

# Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή: Επίδραση της ομοιογένειας του σκυροδέματος προέλευσης

**Α.Ε. ΣΑΒΒΑ**

Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ.

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης μια εναλλακτική λύση τόσο για τους φυσικούς πόρους, όσο και για τους χώρους ταφής των μπαζών είναι η ανακύκλωση και η χρήση του σκυροδέματος, που προκύπτει από οικοδομικά απορρίμματα και κατεδαφίσεις. Αυτό το «απόβλητο» σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές και, επομένως, το σκυρόδεμα με τέτοια ανακυκλωμένα αδρανή αποτελεί υλικό φιλικό προς το περιβάλλον. Στην εργασία αυτή διερευνάται η επίδραση της ομοιογένειας του σκυροδέματος προέλευσης στην εφελκυστική και θλιπτική αντοχή στους 20 °C μέχρι την ηλικία των 6 μηνών και στη θλιπτική αντοχή μετά από θέρμανση για 2h στους 100, 300 και 550 °C, σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή. Τα ίδια σκυροδέματα ελέγχονται και για την ανθεκτικότητά τους έναντι χλωριόντων, όταν τα ιόντα διεισδύουν είτε από την κάτω πλευρά τους είτε μετά από κύκλους ύγρανσης – ξήρανση 28 ημερών. Τα σκυροδέματα παρασκευάζονται αφενός με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα, αφετέρου με ανακυκλωμένα μόνο τα χονδρόκοκκα αδρανή. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προέρχονται ή από σκυροδέματα μιας ενιαίας ποιότητας και ηλικίας ή από σκυροδέματα που προήλθαν από τη θραύση συμβατικών δοκιμών διαφορετικών ηλικιών και αντοχών. Η ομοιογένεια του αρχικού σκυροδέματος επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τις εξεταζόμενες ιδιότητες.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σχέση μας με το περιβάλλον, η προστασία του, η διατήρηση των ταχύτητα μειούμενων φυσικών πόρων και η ανάγκη να αναγνωρίσουμε τις υποχρεώσεις μας προς τις μελλοντικές γενιές αποτελούν το νόημα και την ουσία της αειφόρου ανάπτυξης. Η οικολογία και η ανακύκλωση στις μέρες μας προκύπτει όχι σαν μόδα, αλλά σαν πραγματική ανάγκη.

Στο πλαίσιο αυτό, μια εναλλακτική λύση τόσο για τους φυσικούς πόρους, όσο και για τους χώρους εναπόθεσης των δομικών απορριμμάτων είναι η χρησιμοποίηση του σκυροδέματος, που προκύπτει από οικοδομικά απορρίμματα και κατεδαφίσεις [1-4]. Αυτό το «απόβλητο» σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αδρανές και, επομένως, το σκυρόδεμα με τέτοια ανακυκλωμένα αδρανή αποτελεί υλικό φιλικό προς το περιβάλλον.

Κι αυτό, γιατί σήμερα οι όγκοι του σκυροδέματος που

πρέπει να απομακρυνθούν, μεγαλώνουν συνεχώς προκαλώντας σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα [5]. Πολλά τεχνικά έργα κατεδαφίζονται λόγω υπέρβασης των ορίων τους, νέων αναγκών, φυσικών καταστροφών κλπ. Αλλά και οι βιομηχανίες σκυροδέματος δημιουργούν απορρίμματα (στοιχεία προκατασκευής, δοκίμια μετά το σπάσιμο, επιστροφές σκυροδέματος λόγω καθυστερήσεων, μη αποδοχής ή κακού υπολογισμού της ποσότητας).

Τα ανακυκλωμένα αδρανή που προέρχονται από κατεδαφίσεις, συνήθως δεν είναι καθαρά, αφού περιέχουν άλατα, κεραμικά, άμμο, σκόνη, ξυλεία, πλαστικά, κλπ [6]. Αν, επιπλέον, λαμβάνονται από ένα κέντρο ανακύκλωσης, συλλέγονται από διάφορα κτίρια με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν ανομοιογένεια και ασταθείς και με μεγάλες διαφοροποιήσεις ιδιότητες.

Αυτό δυσκολεύει τη χρήση τους στην παραγωγή ενός νέου σκυροδέματος [7]. Αντίθετα, τα ανακυκλωμένα που προέρχονται από βιομηχανίες, είναι σχετικά καθαρά με προσκολλημένα σε αυτά μόνο το παλιό τσιμέντο και αφού προέρχονται από τον ίδιο τύπο σκυροδέματος παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιογένεια, δηλ. λιγότερο διαφοροποιημένες και περισσότερο σταθερές ιδιότητες.

Ανακυκλωμένα αδρανή από κατεδαφισμένο σκυρόδεμα έχουν χρησιμοποιηθεί, κυρίως, σε έργα υποδομής π.χ οδοστρώματα και σπανιότερα σε άλλα έργα [1, 8-9]. Έχει δε γίνει αρκετή πειραματική έρευνα στο παρελθόν για τον σχεδιασμό των μειγμάτων και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους [10-26], αλλά η ανθεκτικότητά τους έχει μελετηθεί λιγότερο και, κυρίως, η υδατοπερατότητα, η υδατοαπορροφητικότητα, η ενανθράκωση, η συστολή ξήρανσης, καθώς και η αντοχή σε ψύξη απόψυξη [20-23 και 27-30]. Όσον αφορά στην αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες, υπάρχουν ελάχιστες εργασίες [31].

Πάντως, εξαιτίας της ευρείας διακύμανσης στις ιδιότητες των διαθέσιμων πόρων θα πρέπει να ερευνηθούν οι ιδιότητες των τοπικών υλικών. Στην εργασία αυτή εξετάζονται σκυροδέματα παρασκευασμένα με αδρανή ανακυκλωμένα απορρίμματα βιομηχανίας έτοιμου σκυροδέματος και μελετάται η επίδραση της ομοιογένειας και της αντοχής του σκυροδέματος προέλευσης.

## 2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$f_c/f_{ct}$	= θλιπτική και εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη
$f_{ck}$	= χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος
$f_T$	= θλιπτική αντοχή σε θερμοκρασία T °C
$f_{20}$	= θλιπτική αντοχή σε θερμοκρασία 20 °C
$f_{ct_{50\%}} / f_{ct_{100\%}}$	= εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη σκυροδεμάτων με 50% και 100% ανακυκλωμένα αδρανή
C	= ποσότητα τσιμέντου σε kg ανά m <sup>3</sup>
W	= ποσότητα νερού σε kg ανά m <sup>3</sup>
w	= λόγος νερού προς τσιμέντο

## 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Παρασκευάστηκαν 2 σειρές σκυροδεμάτων με 330 kg/m<sup>3</sup> τσιμέντου CEMII42.5N και w=0,6. Η κοκκομετρική δι-αβάθμιση των αδρανών και των δύο σειρών ήταν εντός των ορίων του ΚΤΣ-97 (Dmax = 32mm).

Τα αδρανή των σκυροδεμάτων της πρώτης σειράς προέρχονταν από τη θραύση κυβικών συμβατικών δοκιμίων σκυροδέματος C12/15 ή C16/20 ή C20/25. Τα δοκίμια αυτά θραύστηκαν κατά τη διάρκεια ενός περίπου έτους για τον έλεγχο της παραγωγής της βιομηχανίας έτοιμου σκυροδέματος ΤΕΚΤΩΝ της Ξάνθης. Επομένως, τα αδρανή των σκυροδεμάτων της σειράς αυτής ήταν ανακυκλωμένο σκυροδέμα, διαφορετικών ηλικιών, συμβατικής αντοχής και αναλογιών μείξης, όπως αυτό που θα λαμβάνονταν π.χ. από ένα κέντρο ανακύκλωσης (ανομοιογενής προέλευση).



Σχήμα 1: Θραυσμένα δοκίμια (αριστερά) και στοιχεία σκυροδέματος (δεξιά) για την παραγωγή αδρανών ανομοιογενούς και ομοιογενούς προέλευσης αντίστοιχα

Figure 1: Concrete specimens (left) and concrete blocks (right) used for the production of aggregates heterogeneous and homogeneous origin, respectively.

Τα σκυροδέματα της δεύτερης σειράς παρασκευάστηκαν με αδρανή που προέκυψαν από τη θραύση μεγάλων στοιχείων σκυροδέματος C12/15 ή C16/20 ή C16/20, ηλικίας 6 περίπου μηνών, (Σχήμα 1). Τα αδρανή των σκυροδεμάτων της σειράς αυτής ήταν ανακυκλωμένο σκυροδέμα, σκυροδετούμενο από την ίδια βαρέλα, της ίδιας δηλαδή ηλικίας

και συμβατικής αντοχής και των ιδίων αναλογιών μείξης (ομοιογενής προέλευση).

Οι φυσικές ιδιότητες όλων των αδρανών δίνονται στον πίνακα 1. Το χαμηλό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών οφείλεται στη χαμηλή πυκνότητα του παλιού τσιμέντου, που είναι προσκολλημένα σ' αυτά.

Για κάθε σειρά παρασκευάστηκαν έξι μείγματα με ανακυκλωμένα αδρανή και ένα μείγμα συμβατικού σκυροδέματος με καθαρά αμμοχάλικα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως μείγμα αναφοράς (0% ανακυκλωμένα). Από τα έξι μείγματα κάθε σειράς, τα τρία, ένα για κάθε κατηγορία του σκυροδέματος προέλευσης, παρασκευάστηκαν με όλα τα αδρανή τους ανακυκλωμένα (100% ανακυκλωμένα), ενώ τα άλλα τρία παρασκευάστηκαν με συνήθη πυριτική άμμο και με χονδρόκοκκα τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα (50% ανακυκλωμένα). Πριν την ανάμειξη, λόγω της υψηλής απορροφητικότητάς τους, τα ανακυκλωμένα αδρανή που είχαν ομοιογενή προέλευση αφέθηκαν στον μεικτήρα μέσα σε νερό, για 20 min περίπου, ώστε να κορεσθούν. Στον πίνακα 2 δίνονται οι αναλογίες μείξης των μειγμάτων.

Για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής αντοχής στις 28 ημέρες, παρασκευάστηκαν για κάθε μείγμα 6 κυβικά δοκίμια (15 cm). Για την εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής και της αντοχής σε διάρρηξη στους 20 °C, παρασκευάστηκαν κυβικά (10 cm) και κυλινδρικά δοκίμια (15 × 30 cm) αντιστοίχως. Τα δοκίμια 24 ώρες μετά την παρασκευή τους τοποθετήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης (στους 20 ± 2 °C και υγρασία > 95 %), μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή στις 7, 28, 90 και 180 ημέρες και η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη στις 28 και 180 ημέρες.

Η θλιπτική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες προσδιορίστηκε με κυβικά δοκίμια (10 cm), τα οποία, στους 6 μήνες, θερμάνθηκαν στους 100°C, 300°C και 550°C, για δύο ώρες στη μέγιστη θερμοκρασία. Η θραύση έγινε 24 ώρες μετά το τέλος της θέρμανσης.

Ο έλεγχος της ανθεκτικότητας σε Cl<sup>-</sup> έγινε με κυβικά δοκίμια ακμής 10 cm, οπλισμένα με ράβδους φ10 S500s. Οι ράβδοι καθαρίστηκαν με διάλυμα HCl που περιείχε μικρή ποσότητα εξαμεθυλοτετραμίνης, ξεπλύθηκαν με αιθανόλη και ζυγίστηκαν. Κατόπιν, τοποθετήθηκαν, ανά 4, μέσα στα δοκίμια, έτσι, ώστε, οι αποστάσεις τους από τη βάση των δοκιμίων, (επικάλυψη) να είναι 2, 4, 6 και 8 cm αντιστοίχως. Μετά από 24 ώρες, οι προεξέχοντες από τα δοκίμια οπλισμοί, καλύφθηκαν από πλαστικά στελέχη και εποξειδικές ρητίνες, έτσι, ώστε η διάβρωση τους να προέλθει μόνο από το εσωτερικό του σκυροδέματος. Μετά από συντήρηση 28 ημερών σε περιβάλλον εργαστηρίου τα δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο ομάδες. Τα δοκίμια της πρώτης ομάδας βυθίστηκαν σε υδατικό διάλυμα NaCl (3M). Η πάνω έδρα τους καλύφθηκε με ένα στρώμα ρητίνης, ώστε η είσοδος των χλωριόντων στο σκυροδέμα να γίνεται από όλες τις υπόλοιπες ελεύθερες έδρες. Τα δοκίμια παρέμειναν βυθισμένα στο διάλυμα για μια περίοδο 28 ημερών, την οποία ακολούθησε μια περίοδος 28ημερης ξήρανσης σε περιβάλλον εργαστηρίου. Η συντήρηση αυτή με 28ήμερους κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης, συνεχίστηκε μέχρι

Πίνακας 1: Φυσικές ιδιότητες των αδρανών  
Table 1: Physicals properties of aggregates

Ομοιογενής προέλευση							Ανομοιογενής προέλευση					
Είδος αδρανών	Φαινόμενο βάρος (kg/m <sup>3</sup> )			Απορροφητικότητα (%)			Φαινόμενο βάρος (kg/m <sup>3</sup> )			Υγρασία (%)		
	Άμμος	Γαρυπίλι	Σκόρα	Άμμος	Γαρυπίλι	Σκόρα	Άμμος	Γαρυπίλι	Σκόρα	Άμμος	Γαρυπίλι	Σκόρα
C12/15	2,03	2,36	2,35	7,40	7,37	6,77	2,2	2,38	2,44	1,060	1,030	1,010
C16/20	2,33	2,35	2,36	4,17	3,08	3,21	2,2	2,44	2,42	1,063	1,024	1,015
C20/25	2,20	2,22	2,23	8,50	7,97	8,31	2,2	2,42	2,47	1,069	1,026	1,020
Συνήθη	2,64	2,65	2,64	2,55	1,90	1,70	2,63	2,6	2,65	1,036	1,01	1,00

Πίνακας 2. Αναλογίες μείξης σκυροδεμάτων  
Table 2: Mix proportions of concretes

Μείγματα	Είδος αδρανών	C (kg/m <sup>3</sup> )	W	Συνήθη Αδρανή (%)			Ανακυκλωμένα (%)		
				Άμμος	Γαρυπ	Σκόρα	Άμμος	Γαρυπ	Σκόρα
<b>Ομοιογενής Προέλευση</b>									
100%	C12/15	330	198				54	8	38
	C16/20						54	8	38
	C20/25						54	8	38
50%	C12/15			54				8	38
	C16/20			54				8	38
	C20/25			54				8	38
0%	Συμβατικά			54	8	38			
<b>Ανομοιογενής προέλευση</b>									
100%	C12/15	330	198				50	9	41
	C16/20						50	9	41
	C20/25						50	9	41
50%	C12/15			50				9	41
	C16/20			50				9	41
	C20/25			50				9	41
0%	Συμβατικά			50	9	41			

την ηλικία των 6 μηνών. Τα δοκίμια της 2<sup>ης</sup> ομάδας τοποθετήθηκαν σε λεκάνες, έτσι, ώστε διάλυμα ίδιας περιεκτικότητας να τα καλύπτει μέχρι το ύψος των 2 cm. Οι παράπλευρες έδρες τους καλύφθηκαν με ρητίνες μέχρι το ύψος των 3 cm, έτσι, ώστε η είσοδος των Cl<sup>-</sup> να γίνεται μόνο από την κάτω έδρα τους (πλευρική είσοδος χλωριόντων). Στους 6 μήνες τα δοκίμια και των δύο ομάδων βγήκαν από το διάλυμα και ελήφθη δείγμα σκυροδέματος από τον κεντρικό άξονά τους σε τέσσερα σημεία (2, 4, 6 και 8 cm από τη κάτω επιφάνεια). Με φυγοκέντριση και τιτλοδότηση με AgNO<sub>3</sub> του δείγματος προσδιορίστηκε η συγκέντρωση σε ppm των ολικών και ελεύθερων χλωριόντων αντιστοίχως. Κατόπιν τα δοκίμια θραύστηκαν, αποσπάρθηκαν οι οπλισμοί, οι οποίοι, αφού καθαρίστηκαν, ζυγίστηκαν εκ νέου, ώστε να βρεθεί η απώλεια του βάρους τους λόγω διάβρωσης.

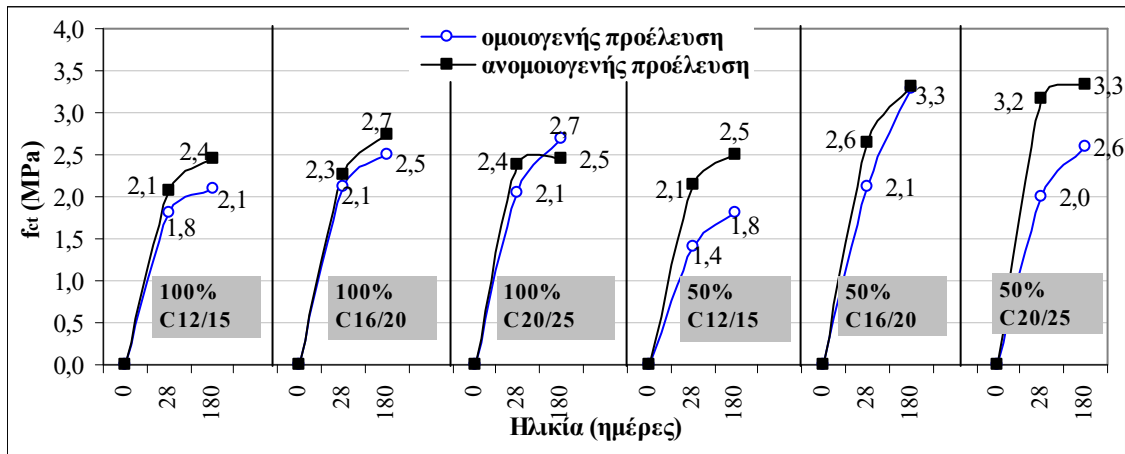
## 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 4.1 Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη

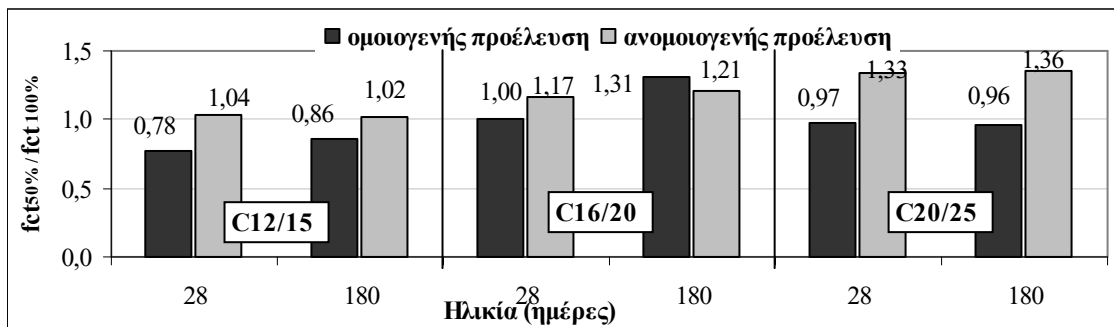
Στο σχήμα 2 δίνεται η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη, ως μέσος όρος τριών τιμών.

Παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης, τόσο μεγαλύτερη φαίνεται να είναι και η εφελκυστική αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων, ανεξαρτήτως του ποσοστού αντικατάστασης των αδρανών ή της ομοιογένειας της προέλευσής τους. Επομένως, η αντοχή προέλευσης επηρεάζει την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη.

Η εφελκυστική αντοχή των μειγμάτων, με ομοιογενή ή όχι



Σχήμα 2: Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη των μειγμάτων  
Figure 2: Splitting tensile strength of mixtures



Σχήμα 3: Εφελκυστική αντοχή σκυροδεμάτων με 50% ανακυκλωμένα αδρανή προς τα αντίστοιχα με 100% ανακυκλωμένα αδρανή  
Figure 3: 50 % recycled aggregate to 100 % recycled aggregate concrete splitting strength ratio

προέλευση των αδρανών, δεν έχει μεγάλες διαφοροποιήσεις. Πάντως, τα μείγματα με ανομοιογενή προέλευση έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερες αντοχές, μεγαλύτερες και του συμβατικού. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι τα αδρανή με ομοιογενή προέλευση είχαν μεγαλύτερη υδατοαπορροφητικότητα με συνέπεια να απορροφήσουν περισσότερο νερό κατά την ανάμειξη. Έτσι, στο σκληρυμένο σκυρόδεμα μειώθηκε πιθανόν η συνάφεια στη διεπιφάνεια, η οποία ως γνωστό επηρεάζει περισσότερο την εφελκυστική αντοχή [32].

Σε σχέση με το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών (Σχήμα 3), η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης αυξάνει την εφελκυστική αντοχή των σκυροδεμάτων με ομοιογενή προέλευση, ενώ την μειώνει, όταν τα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση. Στην πρώτη περίπτωση, η έλλειψη συνάφειας αντικαθίσταται με την αύξηση του παλιού τσιμέντου που είναι προσκολλημένο πάνω στα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα, αυξάνοντας έτσι τη συνολική ποσότητα τσιμέντου στο μείγμα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, όπου η συνάφεια στη διεπιφάνεια είναι μεγαλύτερη, η αύξηση του ανακυκλωμένου υλικού φαίνεται ότι την μειώνει. Η μείωση, ή η αύξηση αυτή, αντιστοίχως, είναι περίπου ίδια σε όλες τις ηλικίες.

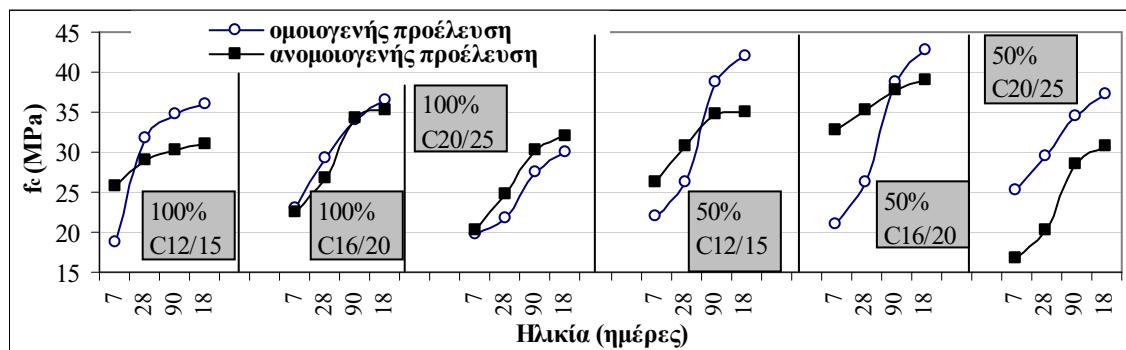
#### 4.2 Χαρακτηριστική αντοχή ( $f_{ck}$ ) - Θλιπτική αντοχή στους 20 °C

Η χαρακτηριστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων από ανακυκλωμένα, ανεξαρτήτως ομοιογένειας, αδρανή (Πίνακας 3), είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική αντοχή των σκυροδεμάτων από τα οποία προήλθαν.

Στα σκυροδέματα με αδρανή ομοιογενούς προέλευσης, η τιμή της χαρακτηριστικής αντοχής δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης, αλλά από το ποσοστό ανακύκλωσης. Για ίδιο ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών τα σκυροδέματα παρουσίασαν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή, η οποία είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτήν του αντίστοιχου συμβατικού σκυροδέματος, όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 100% και ίδια με το συμβατικό, όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 50%. Φαίνεται δηλ. ότι η αντοχή επηρεάζεται περισσότερο από την ποιότητα (πιθανώς και από την ποσότητα) του νέου τσιμέντου (Π42.5N), το οποίο είναι ισχυρότερο από αυτό των σκυροδεμάτων προέλευσης (Π32.5N για τα χαμηλής αντοχής αρχικά - παλαιά - σκυροδέματα και συνδυασμός Π32.5N και Π42.5N για το παλιό C20/25). Στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα ανομοιογενούς προέ-

Πίνακας 3: Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη, θλιπτική αντοχή και  $f_{ck}$  των μειγμάτων  
 Table 3: Splitting tensile strength, compressive strength and  $f_{ck}$  of mixtures

Ηλικία (ημέρες)	Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών						
	100%			50%			0%
	$f_{ck}$ σκυροδέματος προέλευσης						
	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	
<b>Ομοιογενής προέλευση</b>							
$f_{ck}$ μειγμάτων							
28	C20/25	C20/25	C20/25	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30
<b>Εφελκυστική αντοχή (MPa)</b>							
28	1,8	2,1	2,1	1,4	2,1	2,0	2,8
180	2,1	2,5	2,7	1,8	3,3	2,6	3,1
<b>Θλιπτική αντοχή (MPa)</b>							
7	18,7	23,1	19,7	22,0	21,0	25,4	20,4
28	31,8	29,3	21,8	26,2	26,3	29,6	23,1
90	34,8	34,0	27,4	38,7	38,8	34,4	34,6
180	35,9	36,6	30,0	42,1	42,7	37,4	34,8
<b>Ανομοιογενής προέλευση</b>							
$f_{ck}$ μειγμάτων							
	C25/30	C20/25	C25/30	C16/20	C30/37	C25/30	C25/30
<b>Εφελκυστική αντοχή (MPa)</b>							
28	2,1	2,3	2,4	2,1	2,6	3,2	1,6
180	2,4	2,7	2,5	2,5	3,3	3,3	2,4
<b>Θλιπτική αντοχή (MPa)</b>							
7	25,7	22,4	20,2	26,4	32,8	16,7	22,9
28	29,1	26,8	24,8	30,6	35,2	20,2	27,2
90	30,3	34,3	30,4	34,8	37,7	28,6	35,0
180	30,9	35,2	32,1	34,9	38,9	30,6	38,4



Σχήμα 4: Θλιπτική αντοχή των μειγμάτων  
 Figure 4: Compressive strength of mixtures

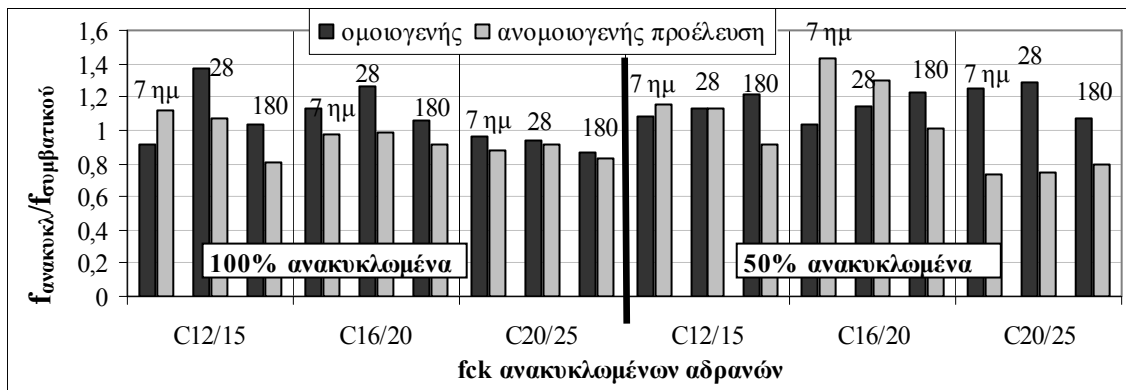
λευσης τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν κάποια τάση. Η χαρακτηριστική αντοχή στα περισσότερα μείγματα είναι ίση με αυτή του συμβατικού. Υπάρχουν, όμως, και αποκλίσεις με τιμές πολύ μικρότερες ή πολύ μεγαλύτερες του αντίστοιχου

συμβατικού. Η τιμή της χαρακτηριστικής αντοχής, πιθανόν, επηρεάζεται από την ποσότητα του παλαιού, προσκολλημένου στους κόκκους, μη ενυδατωμένου τσιμέντου.

Στον Πίνακα 3 και στο Σχήμα 4, δίνονται οι θλιπτικές

Πίνακας 4: Λόγοι θλιπτικών αντοχών των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων προς τις αντοχές των συμβατικών  
Table 4: Recycled aggregate concrete compressive to normal concrete compressive strength ratios.

$f_{\text{ανακυκλωμένων}} / f_{\text{συμβατικού}}$												
Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών												
100%			50%			100%			50%			
$f_{\text{ck}}$ σκυροδέματος προέλευσης												
Ηλικία (ημέρες)	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25
	Ομοιογενής προέλευση						Ανομοιογενής προέλευση					
7	0,92	1,13	0,97	1,08	1,03	1,25	1,12	0,98	0,88	1,15	1,43	0,73
28	1,37	1,27	0,94	1,14	1,14	1,28	1,07	0,99	0,91	1,13	1,29	0,74
90	1,01	0,98	0,79	1,12	1,12	0,99	0,87	0,98	0,87	1,00	1,08	0,82
180	1,03	1,05	0,86	1,21	1,23	1,07	0,80	0,92	0,84	0,91	1,01	0,80



Σχήμα 5: Θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή προς την αντοχή των συμβατικών σκυροδεμάτων  
Figure 5: Recycled aggregate to normal concrete compressive strength ratio.

αντοχές των μιγμάτων, ως μέσος όρος τριών τιμών.

Παρατηρείται ότι η θλιπτική αντοχή των μειγμάτων με ομοιογενή προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών μετά τις 28 ημέρες είναι κατά κανόνα μεγαλύτερη (έως και 52%) εκείνων με ανομοιογενή προέλευση, κυρίως, όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 50%. Αντίθετα, σε μικρότερες ηλικίες, η αντοχή των ομοιογενών μειγμάτων είναι μικρότερη. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο ότι τα ομοιογενή ανακυκλωμένα αδρανή είναι ηλικίας 6 μηνών. Έτσι, η επιπρόσθετη ενυδάτωση του παλιού (μη ενυδατωμένου) τσιμέντου αυξάνει την αντοχή των σκυροδεμάτων με ομοιογενή προέλευση αδρανών, αλλά μόνο στις μεγαλύτερες ηλικίες. Αντίθετα, το παλιό τσιμέντο που είναι προσκολλημένο πάνω στα αδρανή ανομοιογενούς προέλευσης, είναι περισσότερο ενυδατωμένο, καθώς τα αδρανή αυτά προέρχονται από σκυροδέματα διαφόρων ηλικιών (νεαρών αλλά και μέχρι έτους). Τα μείγματα, λοιπόν, με ανομοιογενή ανακυκλωμένα αδρανή, παρουσιάζουν υψηλότερες αντοχές ήδη από τις μικρότερες ηλικίες, αλλά στις μεγαλύτερες οι υδραυλικές τους ικανότητες εξαντλούνται γρηγορότερα ή φαίνεται ότι

εξαρτώνται από το ποσοστό του μη ενυδατωμένου προσκολλημένου παλιού τσιμέντου.

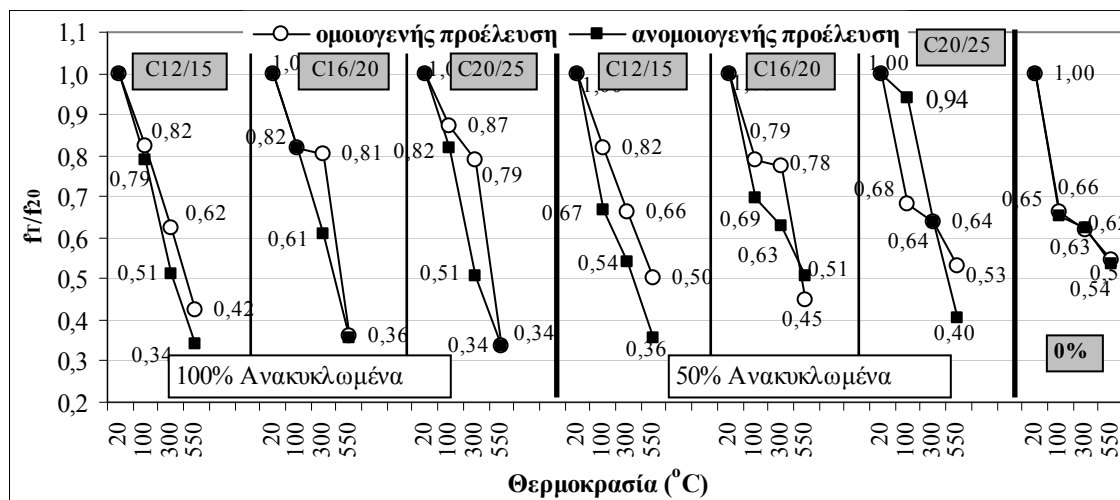
Η μείωση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών από 100% σε 50%, κατά κανόνα, αυξάνει τις θλιπτικές αντοχές (έως και 36%), με εξαίρεση το μείγμα ανομοιογενούς και υψηλής αντοχής προέλευσης, όπου η μείωση των ανακυκλωμένων αδρανών επιφέρει μείωση των αντοχών έως και 19%.

Σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα (Πίνακας 4, Σχήμα 5), όταν η προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών είναι ομοιογενής, όλα τα σκυροδέματα έχουν αντοχές μεγαλύτερες (από 1 έως 37%) του συμβατικού με εξαίρεση το μείγμα με 100% ανακυκλωμένο C20/25, του οποίου οι αντοχές είναι μικρότερες (από 3 έως 21%) του συμβατικού.

Όταν η προέλευση των αδρανών είναι ανομοιογενής και το ποσοστό ανακύκλωσης 100%, όλα τα ανακυκλωμένα μείγματα παρουσιάζουν αντοχές μικρότερες του συμβατικού (1-20%). Η μείωση των ομοιογενών ανακυκλωμένων αδρανών σε 50% ευνοεί τα μείγματα C12/15 και C16/20, που

Πίνακας 5: Εναπομένουσες θλιπτικές αντοχές των σκυροδεμάτων μετά την πύρωση  
 Table 5: Residual compressive strength of concretes after heating

$f_T/f_{20}$							
Θερμοκρασία (°C)	Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών						0%
	100%			50%			
	$f_{ck}$ σκυροδέματος προέλευσης						
	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	
<b>Ομοιογενής προέλευση</b>							
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	0,82	0,82	0,87	0,82	0,79	0,68	0,66
300	0,62	0,81	0,79	0,66	0,78	0,64	0,62
550	0,42	0,36	0,34	0,50	0,45	0,53	0,55
<b>Ανομοιογενής προέλευση</b>							
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	0,79	0,82	0,82	0,67	0,69	0,94	0,65
300	0,51	0,61	0,51	0,54	0,63	0,64	0,62
550	0,34	0,36	0,34	0,36	0,51	0,40	0,54



Σχήμα 6: Εναπομένουσα αντοχή των μειγμάτων μετά από πύρωση για 2h στους 100 °C, 300°C και 550°C  
 Figure 6: Residual strength of mixtures after heating for 2h at the peak temperature of 100 °C, 300°C και 550°C

παρουσιάζουν αντοχές μεγαλύτερες του συμβατικού, μέχρι τις 90 ημέρες το πρώτο (έως 15%) και σε όλες τις ηλικίες το δεύτερο (έως 43%), αλλά αυξάνει τις διαφορές του μείγματος C20/25 με το συμβατικό σκυρόδεμα (αντοχές κατά 20-27% μικρότερες).

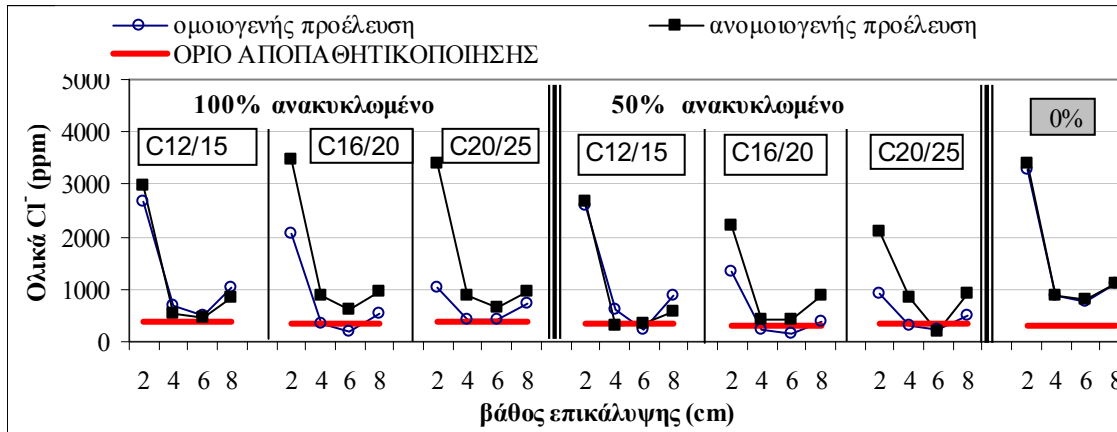
Γενικά, τα σκυροδέματα από αδρανή χαμηλής αντοχής παρουσιάζουν την ίδια περίπου συμπεριφορά, ανεξάρτητα από την ομοιογένεια ή το ποσοστό συμμετοχής τους στο μείγμα. Αντίθετα, το μείγμα από υψηλότερης αντοχής ανακυκλωμένα αδρανή φαίνεται ότι είναι το δυσμενέστερο. Δεδομένου δε ότι όλα τα σκυροδέματα παρασκευάστηκαν με την ίδια ποσότητα τσιμέντου και νερού, η διαφορά, πιθανόν, να οφείλεται στην ποιότητα και την ποσότητα του προσκο-

λημένου, στα καινούργια αδρανή παλαιού τσιμέντου.

### 4.3 Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

Στον Πίνακα 5 και το Σχήμα 6, δίνονται οι εναπομένουσες αντοχές των σκυροδεμάτων (μέσος όρος 3 τιμών), μετά από πύρωση 2 ωρών στους 100, 300 και 550 °C (μέγιστη τιμή).

Τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, ανεξαρτήτως προέλευσης ή ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών τους, στους 550 °C παρουσίασαν μεγαλύτερες απώλειες αντοχών, από 47% έως 66% έναντι 45 με 46% του συμβατικού. Αντίθετα, στους 100 °C, τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες (6-33%)



Σχήμα 7: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων (σε ppm) για συντήρηση με κύκλους ύγρανσης ξήρανσης  
Figure 7: Total chlorines concentration (ppm). Wetting – drying cycles

από αυτές του συμβατικού (34 με 35%). Στους 300 °C, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την ομοιογένεια των ανακυκλωμένων αδρανών. Σκυροδέματα με ομοιογενή προέλευση ανακυκλωμένων αδρανών είναι ανθεκτικότερα του συμβατικού, ενώ, όταν τα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση, τα συμβατικά σκυροδέματα είναι ανθεκτικότερα.

Στις υψηλότερες θερμοκρασίες αποδομούνται τα CSH. Τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα έχοντας προσκολλημένο στους κόκκους τους και το παλαιότερο τσιμέντο υφίστανται μεγαλύτερη φθορά. Γι' αυτό και στους 550 °C, η μείωση των ανακυκλωμένων αδρανών από 100% σε 50%, (μείωση δηλ. των κόκκων με το προσκολλημένο παλιό τσιμέντο), έχει θετικά αποτελέσματα μειώνοντας τις απώλειες. Στους 100 °C, η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μια εντατική ενυδάτωση του παλαιότερου μη ενυδατωμένου τσιμέντου, η οποία αντισταθμίζει τις απώλειες. Γι' αυτό και η μείωση της ποσότητας των ανακυκλωμένων αδρανών, κατά κανόνα, έχει δυσμενή αποτελέσματα. Στους 300 °C, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την ομοιογένεια. Τα ομοιογενή, ανακυκλωμένα αδρανή είναι ηλικίας 6 μηνών, άρα έχουν μεγαλύτερες ποσότητες μη ενυδατωμένου παλαιότερου τσιμέντου, και, επομένως, η αύξηση της θερμοκρασίας δίνει μικρότερες απώλειες, όπως συμβαίνει και στους 100 °C. Τα ανομοιογενή, όμως, αδρανή, είναι ηλικίας μέχρι και ενός έτους, επομένως, έχει ήδη ενυδατωθεί μεγαλύτερη ποσότητα του παλαιότερου τσιμέντου. Υφίστανται λοιπόν μεγαλύτερη φθορά σε σχέση με τα συμβατικά ή τα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή ομοιογενούς προέλευσης. Επομένως, η μείωση των αδρανών από 100% σε 50%, επιφέρει αρνητικά ή θετικά αποτελέσματα αντίστοιχα.

#### 4.4 Ανθεκτικότητα έναντι Cl<sup>-</sup>

Στους πίνακες 6 και 7 και στα σχήματα 7 έως 10 δίνονται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των ολικών και ελεύθερων χλωριόντων σε ppm, ο λόγος δεσμευμένων προς ολικά Cl<sup>-</sup> μετά από συντήρηση 6 μηνών σε διάλυμα NaCl

και η απώλεια του βάρους του οπλισμού των μειγμάτων. Η διάβρωση ξεκινά, όταν η περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου είναι πάνω από 0,2% κ.β. του τσιμέντου. Το ποσοστό αυτό, βάσει της αναλογίας μείξης των σκυροδεμάτων, μετατρέπεται σε ppm και δίνεται στους ίδιους πίνακες σαν όριο αποπαθητικοποίησης.

##### 4.4.1 Συγκέντρωση χλωριόντων σε ppm

Στη συντήρηση με κύκλους (Σχήμα 7, Πίνακας 6) το συμβατικό σκυροδέμα έχει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ολικών χλωριόντων σε όλα τα βάθη, επομένως, τα μείγματα με ανακυκλωμένα αδρανή, ανεξαρτήτως ποσοστού, ομοιογένειας προέλευσης ή βάθους επικάλυψης, είναι ανθεκτικότερα. Η μείωση, πάντως, του ποσοστού των ανακυκλωμένων βελτιώνει την ανθεκτικότητα, αφού οι συγκεντρώσεις Cl<sup>-</sup> μειώνονται.

Εάν η αντοχή προέλευσης είναι χαμηλή, τότε μείγματα ανομοιογενή ή ομοιογενή δεν διαφοροποιούνται σημαντικά. Όσο όμως αυξάνεται η αντοχή προέλευσης, τόσο τα μείγματα διαφοροποιούνται και η ανομοιογενής προέλευση παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ολικών χλωριόντων.

Σε σχέση με το όριο αποπαθητικοποίησης του οπλισμού, το συμβατικό σκυροδέμα παρουσιάζει συγκεντρώσεις πολύ πάνω από το όριο σε όλα τα βάθη (δυσμενέστερο), αντίθετα τα περισσότερα 100% ανακυκλωμένα, με ομοιογενή προέλευση αδρανών, σκυροδέματα, καθώς και τα 50% ανακυκλωμένα με ανομοιογενή προέλευση, για βάθη  $\geq 4$  cm εμφανίζουν συγκεντρώσεις κάτω -ή ελαφρώς πάνω- από το συμβατικό.

Οι λόγοι δεσμευμένων προς ολικά χλωριόντα όλων των ανακυκλωμένων μειγμάτων, ανεξαρτήτως ομοιογένειας ή ποσοστού ανακύκλωσης, είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς του συμβατικού και κυμαίνονται σε πολύ υψηλά επίπεδα (0,95-1 έναντι 0,91-0,99 του συμβατικού).

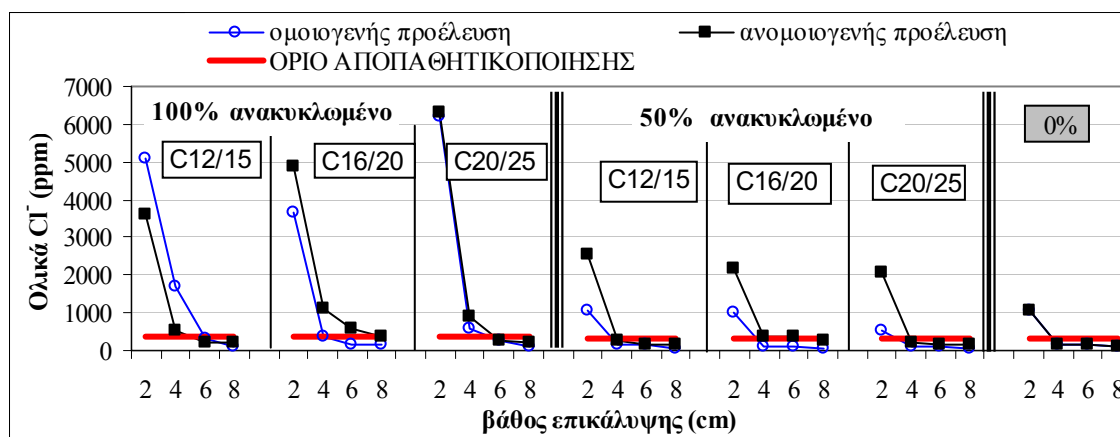
Στην περίπτωση που η είσοδος των χλωριόντων γίνεται από την μία (κάτω) πλευρά (Σχήμα 8, Πίνακας 7), δυσμε-



Πίνακας 6: Ολικά και ελεύθερα Cl<sup>-</sup> (ppm), λόγοι δεσμευμένων προς ολικά Cl<sup>-</sup>, όριο αποπαθητικοποίησης (ppm) και απώλεια οπλισμού (mg/cm<sup>2</sup>) των μειγμάτων για συντήρηση με κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης

Table 6: Total and free Cl<sup>-</sup> (ppm), bounded to total Cl<sup>-</sup> ratios, and steel bar weight loss of mixtures. Wetting – drying cycles

Επικάλυψη (cm)	Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών													
	100%			50%			0%	100%			50%			0%
	f <sub>ck</sub> σκυροδέματος προέλευσης							f <sub>ck</sub> σκυροδέματος προέλευσης						
	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25		C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	
	Ομοιογενής προέλευση							Ανομοιογενής προέλευση						
Ολικά Cl <sup>-</sup> (ppm)														
2	2676	2079	1029	2604	1348	923	3294	2983	3479	3411	2679	2229	2083	3495
4	675	334	433	615	225	307	862	523	875	864	316	422	855	884
6	490	202	424	233	143	220	778	473	595	647	350	418	179	789
8	1028	521	708	862	384	507	1093	825	955	965	587	881	922	1100
Όριο αποπαθητικοποίησης (ppm)														
	364	341	384	323	323	326	308	353	349	351	328	324	326	316
Ελεύθερα Cl <sup>-</sup> (ppm)														
2	53,2	53,2	53,2	53,2	8,9	17,7	262,1	143,0	133,0	98,9	53,2	44,3	88,7	292,6
4	8,9	8,9	8,9	8,9	0,0	8,9	48,9	8,9	8,9	35,5	8,9	8,9	26,6	44,3
6	8,9	8,9	8,9	8,9	0,0	8,9	8,9	8,9	8,9	17,7	8,9	8,9	0,0	17,7
8	8,9	17,7	8,9	8,9	8,9	8,9	46,6	8,9	20,2	44,3	8,9	17,7	8,9	44,3
Δεσμευμένα/Ολικά														
2	0,98	0,97	0,95	0,98	0,99	0,98	0,92	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,96	0,91
4	0,99	0,97	0,98	0,99	1,00	0,97	0,94	0,98	0,99	0,96	0,97	0,98	0,97	0,95
6	0,98	0,96	0,98	0,96	1,00	0,96	0,99	0,98	0,99	0,97	0,97	0,98	1,00	0,98
8	0,99	0,97	0,99	0,99	0,98	0,98	0,96	0,99	0,98	0,95	0,98	0,98	0,99	0,96
Απώλεια οπλισμού (mg/cm <sup>2</sup> )														
2	17,5	17,4	15,6	17,2	13,9	13,7	17,7	17,0	15,2	15,0	15,3	15,1	14,7	17,2
4	10,8	12,0	12,0	10,4	11,5	11,9	12,5	13,4	13,2	13,0	12,8	13,2	12,7	13,5
6	12,4	12,0	12,2	12,5	9,4	11,6	12,6	12,0	12,0	11,6	11,6	11,6	10,9	12,4
8	16,3	16,7	15,3	15,0	13,6	13,5	17,4	16,8	16,8	15,0	15,2	15,9	14,5	17,2



Σχήμα 8: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων σε ppm για πλευρική είσοδο των ιόντων

Figure 8: Total chlorines concentration (ppm). Side penetration

Πίνακας 7: Ολικά και ελεύθερα  $Cl^-$  (ppm), λόγοι δεσμευμένων προς ολικά  $Cl^-$ , όριο αποαθητικοποίησης (ppm) και απώλεια οπλισμού ( $mg/cm^2$ ) των μειγμάτων για πλευρική είσοδο των χλωριόντων

Table 7: Total and free  $Cl^-$  (ppm), bounded to total  $Cl^-$  ratios, and steel bar weight loss of mixtures. One side penetration

Επικάλυψη (cm)	Ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών													
	100%			50%			0%	100%			50%			0%
	$f_{ck}$ σκυροδέματος προέλευσης							$f_{ck}$ σκυροδέματος προέλευσης						
	C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25		C12/15	C16/20	C20/25	C12/15	C16/20	C20/25	
	Ομοιογενής προέλευση							Ανομοιογενής προέλευση						
Ολικά $Cl^-$ (ppm)														
2	5088	3673	6231	1046	1014	531	1055	3621	4900	6326	2553	2178	2050	1070
4	1679	368	560	148	129	113	157	547	1090	909	240	394	203	180
6	316	148	246	138	101	89	142	232	585	268	174	368	171	150
8	82	135	83	75	71	75	80	210	375	210	172	289	144	90
Όριο αποαθητικοποίησης (ppm)														
	364	341	384	323	323	326	308	353	349	351	328	324	326	316
Ελεύθερα $Cl^-$ (ppm)														
2	753,5	636,9	563,1	97,5	8,9	81,9	8,9	115,3	697,5	916,1	434,4	35,5	97,5	602,8
4	203,9	8,9	35,5	8,9	8,9	8,9	8,9	35,5	35,5	8,9	35,5	8,9	8,9	35,5
6	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	17,7	17,7	8,9	17,7	8,9	8,9	17,7
8	8,9	0,0	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,9	8,9	35,5	0,0	8,9	0,0
Δεσμευμένα/Ολικά														
2	0,85	0,83	0,91	0,91	0,99	0,85	0,99	0,97	0,86	0,86	0,83	0,98	0,95	0,44
4	0,88	0,98	0,94	0,94	0,93	0,92	0,94	0,94	0,97	0,99	0,85	0,98	0,96	0,80
6	0,97	0,94	0,96	0,94	0,91	0,90	0,94	0,92	0,97	0,97	0,90	0,98	0,95	0,88
8	0,89	1,00	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,79	1,00	0,94	1,00
Απώλεια οπλισμού ( $mg/cm^2$ )														
2	15,5	14,1	16,6	12,5	13,2	14,2	10,3	7,2	11,0	11,9	8,0	9,5	10,2	10,9
4	14,3	13,0	15,4	9,9	12,0	13,5	8,8	5,1	10,4	7,6	7,3	6,6	7,4	8,4
6	10,6	12,9	15,0	9,8	11,8	13,2	8,4	5,0	10,4	7,1	5,6	5,7	7,0	7,7
8	9,7	11,8	14,2	9,6	10,1	12,5	5,3	5,0	9,9	6,5	5,2	3,3	6,0	5,1

νέστερα θεωρούνται τα μείγματα με 100% ανακυκλωμένα αδρανή για όλα τα βάθη επικάλυψης. Μεταξύ των υπολοίπων σκυροδεμάτων ανθεκτικότερα είναι τα μείγματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή, όταν αυτά έχουν ομοιογενή προέλευση και το συμβατικό σκυρόδεμα, όταν τα ανακυκλωμένα αδρανή είναι ανομοιογενή.

Σε σχέση με το όριο αποαθητικοποίησης τα περισσότερα από τα σκυροδέματα με 100% ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν τιμές κάτω του ορίου, αλλά για βάθη επικάλυψης  $> 4$  cm. Όταν το ποσοστό ανακύκλωσης μειώνεται σε 50% ή και 0% (συμβατικό σκυρόδεμα), τα μείγματα παρουσιάζουν τιμές κάτω του ορίου για μικρότερα βάθη επικάλυψης ( $> 2$  cm).

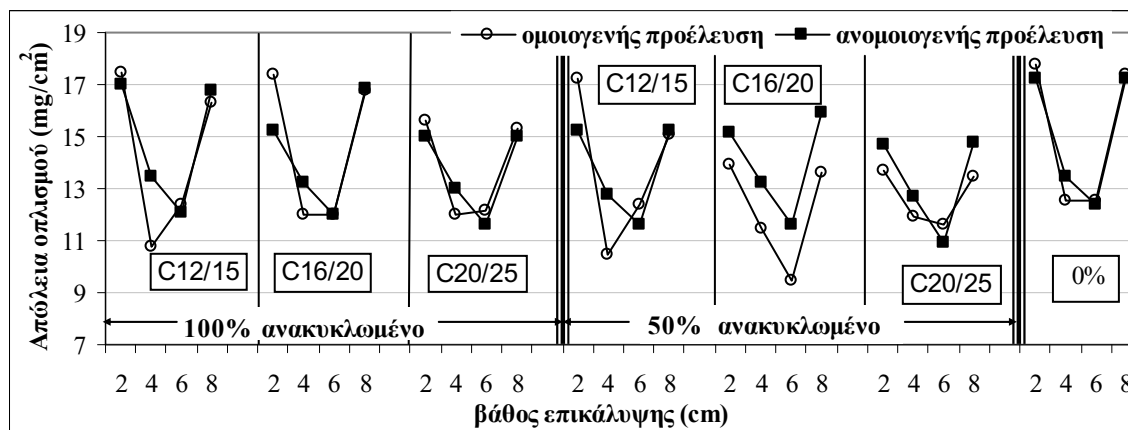
Η ομοιογένεια των ανακυκλωμένων αδρανών δίνει κατά κανόνα καλύτερα αποτελέσματα, κυρίως όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 50%. Οι λόγοι δεσμευμένων προς ολικά

χλωριόντα κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα 0,83-1 έναντι 0,44-1 του συμβατικού.

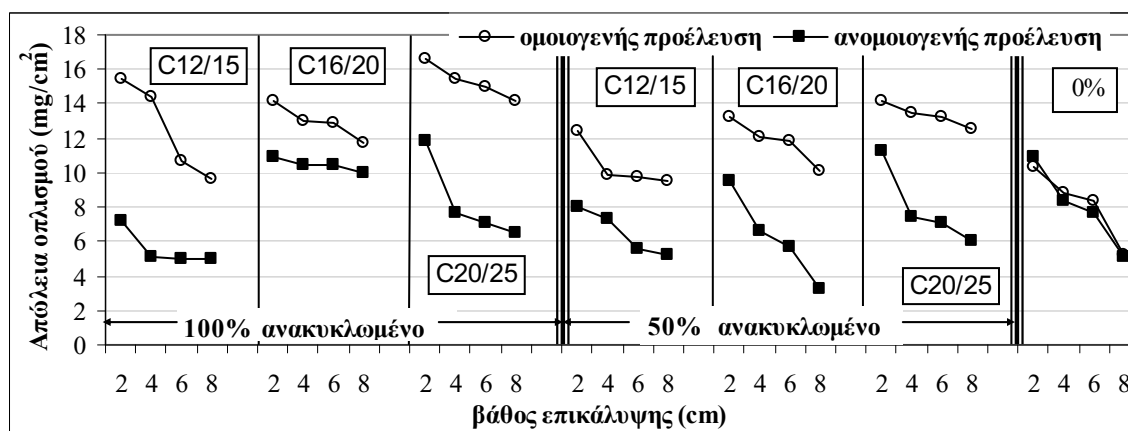
Όσον αφορά στο είδος της συντήρησης, δυσμενέστερη φαίνεται ότι για τα ολικώς ανακυκλωμένα μείγματα είναι η πλευρική είσοδος των χλωριόντων, ενώ για τα μείγματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή ή για τα συμβατικά δυσμενέστερη είναι η συντήρηση με κύκλους διαβροχής (παλίρροιας κλπ).

#### 4.4.2 Απώλεια βάρους οπλισμού

Στον πίνακα 6 και 7 και στα σχήματα 9 και 10 δίνονται τα αποτελέσματα της ανθεκτικότητας των μειγμάτων σε διεύθυνση  $Cl^-$ , ως απώλεια του οπλισμού. Η απώλεια αυτή, σύμφωνα με τον KTX οπλισμένου σκυροδέματος πρέπει να είναι μικρότερη από  $35 mg/cm^2$  και παρατηρείται ότι όλα



Σχήμα 9 : Απόλεια βάρους οπλισμού (mg/cm<sup>2</sup>) για συντήρηση με κύκλους ύγρανσης ξήρανσης  
 Figure 9: Steel bar weight loss (mg/cm<sup>2</sup>). Wetting – drying cycles



Σχήμα 10: Απόλεια βάρους οπλισμού (mg/cm<sup>2</sup>) για πλευρική είσοδο των χλωριόντων.  
 Figure 10: Steel bar weight loss (mg/cm<sup>2</sup>). One side Cl<sup>-</sup> penetration

τα μείγματα είναι κάτω του ορίου ανεξάρτητα συντήρησης ή βάθους.

Παρατηρείται ότι στη συντήρηση με κύκλους (σχήμα 9) τα αποτελέσματα συμφωνούν με εκείνα που ελήφθησαν από τη συγκέντρωση ολικών χλωριόντων. Όπου δηλ. υπήρχαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χλωριόντων εκεί υπάρχουν και οι μεγαλύτερες απώλειες του οπλισμού.

Επομένως, το συμβατικό σκυρόδεμα είναι δυσμενέστερο των ανακυκλωμένων, ενώ τα μείγματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή είχαν τις μικρότερες απώλειες σε όλα τα βάθη.

Αντίθετα, στη συντήρηση με πλευρική είσοδο των χλωριόντων (σχήμα 10), δεν υπήρξε συμφωνία στα αποτελέσματα των δύο μεθόδων (συγκέντρωση ολικών χλωριόντων – απώλειες οπλισμού). Όπου υπήρχαν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ολικών χλωριόντων, δεν υπήρχαν αντίστοιχα και οι μεγαλύτερες απώλειες οπλισμού. Όμως, παρατηρείται ότι οι απώλειες οπλισμού είναι μεγαλύτερες εκεί που υπάρχει και μεγαλύτερη συγκέντρωση σε ελεύθερα χλωριόντα.

Έτσι, όταν τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν ομοιογενή προέλευση και οι δύο μέθοδοι δίνουν ως δυσμενέστερα σε όλα τα βάθη τα μείγματα με 100% ανακυκλωμένα αδρανή.

Διαφοροποιήσεις υπάρχουν ως προς το ποιο είναι το ευνοϊκότερο μείγμα. Τις μικρότερες συγκεντρώσεις σε ολικά χλωριόντα παρουσίασαν σε όλα τα βάθη τα σκυροδέματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή, τα λιγότερα, όμως, ελεύθερα χλωριόντα επομένως και τις μικρότερες απώλειες οπλισμού, παρουσίασε το συμβατικό σκυρόδεμα.

Όταν τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση, τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ολικών χλωριόντων, σε όλα τα βάθη, έδωσαν τα μείγματα με 100% ανακυκλωμένα αδρανή και τις μικρότερες το συμβατικό. Αντίθετα, οι απώλειες οπλισμού στα μείγματα με 100% ή 50% ανακυκλωμένο παλαιό C12/15 ήταν μικρότερες του συμβατικού και κατά κανόνα οι μικρότερες όλων των μειγμάτων. Το συμβατικό παρουσίασε απώλειες μικρότερες από αυτές των μειγμάτων με 100% ανακυκλωμένο C16/20 ή C20/25, αλλά μεγαλύτερες των μειγμάτων από 50% ανακυκλωμένα αδρανή, οποιασδήποτε αρχικής αντοχής. Η μείωση του ποσοστού ανακύκλωσης σε 50% μειώνει και τις απώλειες.

Δυσμενέστερη συντήρηση τόσο στα σκυροδέματα με ανομοιογενή ανακυκλωμένα, όσο και στα συμβατικά σκυροδέματα, είναι αυτή με κύκλους ύγρανσης – ξήρανσης

ανεξαρτήτως ποσοστού ανακύκλωσης ή βάθους. Στα σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή ομοιογενούς προέλευσης δυσμενέστερη συντήρηση είναι αυτή με κύκλους στα μικρά βάθη επικάλυψης (< 4 cm), ενώ σε μεγαλύτερα βάθη, οι μεγαλύτερες απώλειες παρουσιάζονται στη πλευρική συντήρηση. Παρατηρείται δε ότι στα 100% ανακυκλωμένα αδρανή, κατά κανόνα, όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες οπλισμού.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### Εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη

Η ομοιογενής ή όχι προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την εφελκυστική αντοχή. Πάντως, τα μείγματα με ανομοιογενή προέλευση έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερες εφελκυστικές αντοχές ακόμη και από το συμβατικό σκυροδέμα.

Όσο μεγαλύτερη είναι η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εφελκυστική αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων, ανεξαρτήτως του ποσοστού αντικατάστασης ή της ομοιογένειας των αδρανών.

Η αύξηση του ποσοστού ανακυκλωμένων αδρανών αυξάνει την εφελκυστική αντοχή των σκυροδεμάτων με ομοιογενή αδρανή, ενώ τη μειώνει, όταν τα αδρανή είναι ανομοιογενή.

### Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή ( $f_{ck}$ )

Η χαρακτηριστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική αντοχή των σκυροδεμάτων από τα οποία προήλθαν.

Στα σκυροδέματα με αδρανή ομοιογενούς προέλευσης η χαρακτηριστική αντοχή είναι ελαφρώς μικρότερη από αυτήν του αντίστοιχου συμβατικού, όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 100% και ίδια με αυτή του συμβατικού, όταν το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 50%.

Στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα με αδρανή ανομοιογενούς προέλευσης, η χαρακτηριστική αντοχή στα περισσότερα μείγματα είναι ίση ή μεγαλύτερη του συμβατικού.

### Θλιπτική αντοχή $f_c$

Τα μείγματα με ομοιογενή προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών μετά τις 28 ημέρες έχουν κατά κανόνα αντοχές μεγαλύτερες από αυτές των μειγμάτων με ανομοιογενή προέλευση.

Η μείωση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών από 100% σε 50% αυξάνει τις θλιπτικές αντοχές των περισσότερων μειγμάτων.

Όταν η προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών είναι ομοιογενής, σχεδόν όλα τα μείγματα παρουσιάζουν αντοχές υψηλότερες του συμβατικού. Για ανομοιογενή προέλευση των αδρανών και μετά τις 28 ημέρες σχεδόν όλα τα μείγματα

παρουσιάζουν αντοχές μικρότερες του συμβατικού.

### Υψηλές θερμοκρασίες

Τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, ανεξαρτήτως προέλευσης ή ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών τους, στους 100 °C παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες από αυτές του συμβατικού, ενώ στους 550 °C μεγαλύτερες. Στους 300 °C, σκυροδέματα με ομοιογενή προέλευση ανακυκλωμένων αδρανών είναι ανθεκτικότερα του συμβατικού, αντίθετα, όταν τα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση παρουσιάζουν μεγαλύτερες του συμβατικού απώλειες.

### Χλωριόντα

Δυσμενέστερη για τα ολικώς ανακυκλωμένα μείγματα είναι η πλευρική είσοδος των χλωριόντων, ενώ για τα μείγματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή ή για τα συμβατικά σκυροδέματα δυσμενέστερη είναι η συντήρηση με κύκλους διαβροχής (παλίρροιες κλπ).

Η μείωση του ποσοστού των ανακυκλωμένων από 100% σε 50% βελτιώνει την ανθεκτικότητα.

Στη συντήρηση με κύκλους τα μείγματα με ανακυκλωμένα αδρανή, ανεξαρτήτως ποσοστού, ομοιογένειας προέλευσης ή βάθους επικάλυψης παρουσιάζουν τις μικρότερες συγκεντρώσεις ολικών και ελεύθερων Cl<sup>-</sup> και τις μικρότερες απώλειες οπλισμού.

Στην πλευρική είσοδο των χλωριόντων τα μείγματα με 100% ανακυκλωμένα αδρανή είναι τα δυσμενέστερα. Τα σκυροδέματα με 50% ανακυκλωμένα αδρανή παρουσίασαν τις μικρότερες συγκεντρώσεις σε ολικά χλωριόντα, όταν τα αδρανή είναι ομοιογενή ή τις λιγότερες απώλειες οπλισμού όταν αυτά είναι ανομοιογενή.

Οι λόγοι δεσμευμένων προς ολικά χλωριόντα όλων των ανακυκλωμένων μειγμάτων, ανεξαρτήτως ομοιογένειας ή ποσοστού ανακύκλωσης, είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς του συμβατικού στη συντήρηση με κύκλους και σε πολύ υψηλά επίπεδα στην πλευρική είσοδο.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγγραφέας εκφράζει τις πιο θερμές ευχαριστίες της στους Πολιτικούς Μηχανικούς κ.κ. Αβραάμ Ε., Βοδανίκη Δ, Γερμανίδη Π., Γιβαννάκη Φ., Γκόγκο Φ., Δημητρίου Π., Ζορμπά Π., Ζωγράφο Θ., Καταγή Π., Κοντού Ε., Κοσμά Ε., Παπαντωνίου Ι., Σίσκου Ι., Σιδόντα Κ., Τριβέλλα Ε. και Χατζηαγόρου Τ., οι οποίοι συμμετείχαν ως τελειοφοίτοι σπουδαστές στη 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.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Topcu I.B., Guncan N.F. (1995). Using waste concrete as aggregate. *"Cement Concrete Research"*, Vol. 25, No 7, pp. 1385–1390.
- Gilpin R., Menzie D.W. and H. Hyun H. (2004). Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA, *"Resources, Conservation and Recycling"*, Vol. 42, No. 3, pp. 275–294.
- Oikonomou D. N. (2005). Recycle concrete aggregates. *"Cement and Concrete Composites"*, Vol. 27, No 2, pp 315–318.
- Khalaf F.M. and DeVenny A.S. (2004). Recycling of demolished masonry rubble as coarse aggregate in Concrete: review, *"ASCE J of Mater Civil Eng"*, pp. 331–340.
- Chandra S. (2005). Implications of using recycled construction and demolition waste as aggregate in concrete. *"Cement and Concrete Composites"*, Vol. 27, No 6, pp 738–741.
- Nagataki A.S., Gokce T.S. and Hisada M. (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *"Cement Concrete Research"*, Vol. 34, pp. 965–971.
- Hansen T.C and Narud H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *"Concrete International"*, Vol 5, No 1, pp. 79–83.
- Collins R.J. (1996). Recycled aggregates in ready-mixed concrete. *"Proceedings of Sustainable Use of Materials"*. In: J.W. Llewellyn and H. Davis, Editors, Building Research Establishment, UK, Papers 1–2
- Tavakoli M. and Soroushian P. (1996). Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate, *"ACI Materials Journals"*, Vol. 93, No 2, pp. 182–190.
- Nixon P. J. (1978). Recycled concrete as an aggregate for concrete – a review. *"Mater Struct"*, Vol. 11, No 65, pp. 371–378.
- Hansen T.C. (1986). Recycled aggregate and recycled aggregate concrete, second state-of-the-art report, developments from 1945–1985, *"Mater Struct"*, Vol. No 111, pp. 201–246.
- Hansen T.C. (1992). *"Recycling of demolished concrete and masonry"*. E&FN SPON, London.
- ACI Committee 555. (2002). Removal and reuse of hardened concrete. *"ACI Mater J"*, Vol 99, No 3, pp 300–325
- ACI 318-02 (2002). *"Building code requirements for structural concrete & commentary"*. American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- Xiao J., Li J. and Zhang Ch. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *"Cement Concrete Research"*, Vol. 35, No 6, pp. 1187–1194
- Buck A.D. (1977). Recycled concrete as a source of aggregate. *"ACI Journal"*, Vol. 74, No 5, pp. 212–219.
- Hansen T.C. and Hedegard S.E. (1984). Properties of recycled aggregate concrete as affected by admixtures in original concretes. *"ACI Journal"*, Vol. 81, No 1, pp. 21–26.
- Rashwan M.S. and Abourizk S. (1997). The properties of recycled concrete. *"Concrete International"*, Vol. 19, No 7, pp. 56–60.
- Abdelfattah A, Tabsh S. (2003). Feasibility of using recycled concrete in the United Arab Emirates. *ICPCM Conference, Cairo, Egypt*, pp. 82–90.
- Forster S.W. (1986). Recycled concrete as aggregate. *"Concrete International"*, Vol. 8, No 10, pp. 34–40.
- Yamato T., Emoto Y. and Soeda M. (1998). Mechanical properties, drying shrinkage and resistance to freezing and thawing of concrete using recycled aggregate. *ACI SP 179-7*, pp. 105–121.
- Meinhold U., Mellmann G. and Maultzsch M. (2001). Performance of high-grade concrete with full substitution of aggregates by recycled concrete. *"ACI SP 202-6"*, pp. 85–96.
- Frondistou-Yannas S. (1977). Waste concrete as aggregate for new concrete. *"ACI Journal, Proceedings"*, Vol. 74, No 8, pp. 373–376.
- Ajdukiewicz A. and Kliszczewicz A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *"Cement Concrete Composites"*, Vol. 24, pp. 269–279.
- Katz A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *"Cement Concrete Research"*, Vol. 33, pp. 703–711
- Rao A., Jha K.N., Misra S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *"Resources, Conservation and Recycling"*, Vol. 50, No 1, pp71–81
- Hadjieva-Zaharieva R., Ramos-Quebaud M., Wirquin E., Buyle-Bodin F. (2000). Opportunities for implementation of recycled aggregates in production of durable concrete in building construction.. *"Cement and concrete technology in the 2000s, Second international symposium"*, editor Yeginobali A, Istanbul, Turkey, pp. 361–81.
- Levy 2004, S.M. Levy and P. Helene, Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research* 34 (2004), pp. 1975–1980.
- Crentsil Sagoe K.K., Brown T. and Taylor A.H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *"Cement Concrete Research"*, Vol. 31, pp. 707–712
- Ann K.Y., Moon H. Y., Kim Y.B. and Ryou J. (2007). Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials *"Waste management"*, Article in press
- Σάββα Α. (2006). Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με ανακυκλωμένα συμβατικά δοκίμια. *«Πρακτικά 15<sup>ου</sup> Συνεδρίου Σκυροδέματος»*, Αλεξανδρούπολη, Τόμος Δ, σελ. 253-268
- Poon C.S., Shui Z.H. and Lam L. (2004). *"Construction and building materials"*, Vol 18, No 6, pp 461-468

Extended summary

# Recycled aggregate concrete: Effect of homogeneity of origin concrete

A.E. SAVVA

Assistant Professor, Civil Engineering Department, DUTH

## Abstract

*In the context of sustainable development, the recycling and usage of demolished concrete offers an alternative for natural resources, as well for construction waste landfill. This waste concrete could be used as aggregate and thus a concrete made with such recycled aggregates is a material friendly to the environment. This paper examines the effect of the homogeneity of origin concrete on the splitting and compressive strength of recycled aggregate concretes up to the age of six months at 20 °C and on compressive strength after heating for 2h at 100, 300 and 550 °C. The same concretes were also tested for their resistance to chlorines, when the ions penetrate either through their bottom side or after 28 days' of wetting-drying cycles. There are concretes made with 100% recycled aggregates as well others made with only the coarse aggregate recycled. The recycled aggregates were produced either from concretes of uniform quality and age or others taken from tested conventional cubic specimens of different ages and strengths. The way in which the tested properties were affected varied in relation to the homogeneity of the original concrete.*

## 1. INTRODUCTION

Our relationship with the environment, its protection, the preservation of rapidly declining natural resources and the need to acknowledge our responsibilities to future generations make up the meaning and the essence of sustainable development.

In this context, an alternative option for natural resources, as well as for landfills, with regard to the disposal of construction debris is the usage of concrete that comes from construction and demolition work [1-4]. This waste concrete can be used as aggregate; therefore, concrete with recycled aggregate forms a material friendly to the environment.

Nowadays, the masses of concrete that must be withdrawn are continuously growing, causing severe environmental problems [5]. Moreover, the concrete industries produce debris (precast elements, specimens after testing, returns because of delays, non-acceptance or miscalculation of the quantity).

Submitted: Mar. 6, 2008 Accepted: Nov. 25, 2008

Recycled aggregates (RA) that are received from a recycling centre have been collected from several buildings and as a result they present a lack of homogeneity and unstable properties with a lot of variations. This makes their use for the production of a new concrete difficult [7]. On the other hand, RA that come from concrete industries are relative clean, with only the cement paste adhering to them, and since they originate from the same sort of concrete they have less varied and more stable properties.

RA from demolished concrete have been used mainly for sub-bas constructions (pavement, road construction etc), and more rarely for other projects [1, 8-9]. In the past, there was substantial experimental research into their mix design, physical and mechanical properties [10-23], but their durability was not studied at that point. Water absorption and permeability, carbonation, dry shrinkage, as well as freezing and thawing resistance [20-27] were studied most. As regards the strength of Recycle Aggregate Concrete (RAC) at high temperatures, very few studies exist [31].

Due to the wide variation in the properties of the available resources, properties using local materials need to be investigated. This study examined concretes made of aggregates that were recycled waste from the ready-mixed concrete industry and investigated the effect of the homogeneity and strength of the original-initial concrete.

## 2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

Two series of mixtures were made of the same cement CEMII42.5N, equal cement content 330 kg/m<sup>3</sup> and same w = 0.6. For the first series, concrete specimens of strength class C12/15, C16/20 and C20/25 were used as aggregate. Specimens had been tested as a check of the production quality of a ready-mixed concrete company, over a period of approximately one year. This means that the RA were of different ages and conventional compressive strength, comparable to those which might be received from a

recycling centre (heterogeneous origin). For the second series, big blocks of C12/15, C16/20 and C20/25 concrete were used, about six months old (Fig 1). This means that the RA were of the same age and from the same pan mixer (homogeneous origin). For both series, six mixtures of RAC were prepared as well as one mixture with virgin aggregate, as reference normal concrete. Three of the six mixtures of each series were made with all their aggregates recycled (100% RAC) whereas the three remaining were made with virgin siliceous sand and recycled coarse aggregates (50% RAC).

Physical properties for all aggregates are given in Table 1, and mix proportions are shown in Table 2. Homogeneous RA, before mixing, were immersed in water and left in the pan mixer for about 20 min, so that they would be saturated.

To estimate the characteristic strength, 6 cubic specimens (15 cm) of each mixture were made, whereas for the assessment of compressive and splitting strength at 20°C cubic (10 cm) and cylindrical (15 × 30 cm) specimens were prepared, respectively. All specimens were stored in an air-conditioned room at 20±2 °C and >95% relative humidity for up to 28 days. Compressive strength at 7, 28, 90 and 180 days, as well as splitting strength at 28 and 180 days were estimated.

Compressive strength at high temperatures was determined for cubic specimens (10 cm) at 6 months. Specimens were placed in an oven, at 100°C, 300°C and 550°C, where they remained for 2 h at max temperature.

In order to examine Cl<sup>-</sup> resistance, cubic specimens (10 cm) were used, reinforced with steel bars S500s of d=10 mm. The bars were cleaned with HCl solution, which contained a small quantity of hexamethyltetramine. Then they were rinsed with ethanol, weighed and put in the specimens, four in each one, so that their distances from the bottom side were 2, 4, 6 and 8 cm. 24 h later, the parts of the steel bars that protruded from the specimens were covered with plastic stems and epoxy resins in order to avoid corrosion due to external causes. After 28 days of curing, specimens were separated into two groups.

The upper side of specimens of first group was covered with a resin layer and specimens were immersed in an aqueous solution of NaCl (3M). From then on, and every 28 days, they were put in and out of the solution. The adjoining sides of second group specimens were covered with resins up to the height of 3 cm and specimens were put in a solution of the same concentration, so that chlorines could penetrate through the bottom side only. At the age of 6 months, all specimens were perforated at 2, 4, 6 and 8 cm from the bottom surface. For the determination of total and free Cl<sup>-</sup> in ppm, via the turbidity method and titration with AgNO<sub>3</sub> solution, respectively, samples were obtained from the central axis. After that, the steel bars were detached, treated as initially and weighed again, in order to estimate the weight loss due to corrosion.

## 3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1 Splitting strength

No significant difference was found (Fig. 2, Table 3) in the splitting strength of RAC made with either of the two types of RA. In any case, most mixtures with inhomogeneous origin RA had an even higher splitting strength than that of normal concrete. This is probably due to the fact that RA of homogeneous origin had higher water absorption. In consequence, they retained more water during mixing and this could have weakened the bond between cement paste and aggregate in hardened concrete. It was also observed that the higher the characteristic strength of the origin concrete, the higher the RAC splitting strength results were, irrespective of the replacement proportion of aggregates or the homogeneity of their origin.

With regard to the proportion of RA (Fig. 4), an increase of replacement percentage increases the splitting strength of concretes with homogeneous origin RA, whereas the opposite holds for RA of inhomogeneous origin. In the first case, the lack of bond strength between cement paste and aggregate is counterbalanced by the increase of the amount of old cement. In this way, the total amount of cement in the mixture is increased. In the second case, where the transition zone was stronger, the increase of the recycled material appears to weaken it. This increase or reduction of splitting strength appears to be approximately the same at all ages.

### 3.2 Characteristic strength – compressive strength at 20 °C

The characteristic strength of all RAC (Table 3) is higher than the f<sub>ck</sub> of concretes from which they originate.

The f<sub>ck</sub> of concretes with homogeneous origin RA does not appear to be affected by the original concrete's strength, whereas it does seem to be affected by the rate of recycling. All 100% RAC had the same f<sub>ck</sub> value, which was slightly lower than that of the normal concrete. All 50% RAC had the same f<sub>ck</sub>, which was equal to that of normal concrete. Thus, it appears that f<sub>ck</sub> is more influenced by the quality (and probably also by the quantity) of new cement (II 42.5N), which is stronger compared to that of the old -origin- concrete (II 32.5N for low strength old concrete C12/15 and C16/20 and combination of II32.5N and II42.5N for old C20/25).

The f<sub>ck</sub> of most concretes with inhomogeneous RA is the same as that of normal concrete. However, there are deviations. The cause of these deviations is not clear and the characteristic strength is rather affected by the percentage of old, adhering to aggregate, anhydrous cement.

The compressive strength (Table 3, Figure 5) of most mixtures with homogeneous RA, after 28 days, is higher

(up to 52%) than that of mixtures with inhomogeneous ones, mainly when the RA percentage is 50%. However, at early ages, inhomogeneous origin mixtures are stronger than homogeneous ones. Homogeneous RA are 6 months old and, therefore, they have higher levels of old non-hydrated cement. The additional hydration of that anhydrated cement increases the strength at later ages. On the other hand, RAC of inhomogeneous origin, as it is made with RA of different ages, has a reduced amount of anhydrated old cement matrix. Therefore, it has higher strength at an early stage, but at older ages the cementing potential is diminished, or seems to depend on the amount of anhydrated adhering old cement. A decrease of RA raises the compressive strength (up to 36%) of most mixtures, except for those of inhomogeneous and high strength origin, where the decrease of RA percentage results in a reduction of strength down to 19%.

In comparison with normal concrete (Table 4 and Figure 6), when the RA origin is homogeneous, the strength of all mixtures is higher (3 to 21%) than that of normal concrete. When the RA origin is non-homogeneous and recycling rate is 100%, all mixtures exhibit lower (1-20%) strength than that of normal concrete. A decrease in the non-homogeneous RA percentage favours mixture with recycled aggregates produced from C12/15 and C16/20. These mixtures exhibit higher strength compared to normal concrete, before 90 days for the first one (up to 15%) and at all ages for the second one (up to 43%). However, a decrease in the non-homogeneous RA rate leads to a reduction in strength of C20/25 mixture (20-27% lower than normal concrete's strength).

Generally, it seems that concretes made with low strength recycled aggregates exhibit almost the same behaviour, regardless of the homogeneity and participation rate of RA in mixtures. On the other hand, mixtures containing RA of higher strength appear to be the most unfavourable. Given the fact that all RAC were prepared with equal amounts of cement and water, the difference must be due to the type and quantity of old cement adhering to aggregate.

### 3.3 Compressive strength at high temperatures

RAC (Figure 7, Table 5), regardless of the origin and participation rate of their RA, at 550 °C exhibits a greater strength loss (from 47%-66% compared to 45-46% of normal concrete). In contrast, at 100 °C RAC shows a smaller strength loss (6-33%) than that of normal concrete (34-35%). At 300 °C the result depends on RA homogeneity. Concretes with RA of homogeneous origin are more resistant than normal ones, whereas normal concrete is more resistant than concrete with inhomogeneous RA

At higher temperatures, deformation of CSH takes place. RAC have larger deterioration due to the older cement adhering to their aggregate particles. This can explain why at 550 °C a decrease of RA percentage from 100% to 50% is effective in raising the resistance to fire. At 100

°C a temperature increase results in a strong rehydration of anhydrated old cement, a fact that counterbalances strength loss. That is probably why a reduction of the amount of RA mostly has adverse results. At 300 °C resistance depends on the homogeneity. Homogeneous RA are 6 months old, therefore they contain a larger amount of anhydrated old cement and, consequently, a temperature increase results in smaller losses, as also happens at 100 °C. On the other hand, inhomogeneous aggregates are up to 1 year old, therefore they have already got a larger amount of the older cement hydrated. Accordingly, they undergo greater deterioration compared to normal concrete and homogeneous origin RAC. A decrease of RA percentage from 100% to 50% results in a positive or negative response, respectively.

### 3.4 Resistance to Cl<sup>-</sup> penetration

In Figures 8 to 11 and in Tables 6-7 total and free chlorine concentrations (ppm), bound to total Cl<sup>-</sup> ratio and steel bar weight loss after 6 months curing in NaCl solution are given. Corrosion starts when the chlorine concentration is higher than 0.2% by weight of cement. This concentration was converted into ppm on the basis of mixing proportions and is given in the same tables as the critical threshold level for corrosion initiation.

#### 3.4.1 Chlorines concentration

It was observed that at wetting-drying cycles curing (Figure 8, Table 6), normal concrete exhibits higher Cl<sup>-</sup> concentrations at all depths, so RAC are more resistant to ion penetration, regardless of proportion, homogeneity or concrete cover. In any case, a decrease of RA percentage depresses Cl<sup>-</sup> concentration, which means that it improves durability. Concerning critical threshold level, in normal concrete total Cl<sup>-</sup> concentration is much more often above the level, at all depths, whereas the concentration in the most homogeneous RAC is below it, at depths  $\geq 4$  cm. When the strength of the origin concrete was low, no significant difference was found between the homogeneous and inhomogeneous origin mixtures. However, the more the strength of origin concrete increases, the greater variations arise among mixtures, and inhomogeneous origin mixtures have higher concentrations. Regardless of homogeneity and recycling proportion, the bound to total Cl<sup>-</sup> ratios of all RAC are much higher than those of normal concrete and range at very high levels.

When Cl<sup>-</sup> penetrates through only one (bottom) side of the specimen (Fig 9, Table7), 100% RAC are considered to be the most undesirable for every concrete cover. Among the other mixtures, when RA is of homogeneous origin, 50% RAC have the lowest concentration and when RA is of inhomogeneous origin, normal concrete is the best mixture.



As for critical threshold level, almost all 100% RAC, give values below the threshold level for cover depths >4 cm, whereas when RA is reduced the mixtures' values appear to be below the limit for concrete cover >2 cm. Homogeneous RAC commonly give better results, mainly when recycling proportion is 50%. Bound to total Cl<sup>-</sup> ratios, of all RAC range at high levels, 0.83-1 versus 0.44-1 for normal concrete.

Regarding the manner of curing, for 100% RAC bottom side Cl<sup>-</sup> penetration seems to be the most undesirable as opposed to 50% RAC and to normal concrete, for which wetting-drying cycle curing is the most unfavourable one.

#### 3.4.2 Steel bars weight loss

Resistance to Cl<sup>-</sup> penetration of mixtures, in terms of steel bar weight loss, is given in Tables 6-7 and Figures 10-11. This loss, according to Greek Steel Standards for reinforced concrete, has to be less than 35 mg/cm<sup>2</sup>, and it is noted that all mixtures give values below this limit, regardless of curing and cover depth.

In wetting-drying cycles (Fig. 10), results are corresponding to those received from the determination of Cl<sup>-</sup> concentration in ppm. This means that the mixtures with high total Cl<sup>-</sup> concentration demonstrated great steel bar weight loss. Therefore, normal concrete is the most undesirable, and 50% RAC had the smallest loss at all depths.

In contrast, for one side Cl<sup>-</sup> penetration (Fig 11), there was no accordance between these two methods, since the highest total Cl<sup>-</sup> concentration did not correspond to the greatest bar weight loss. What can be noticed is that, the greater the weight loss, the higher the free Cl<sup>-</sup> concentration. So, when RA are of homogeneous origin, both methods prove that 100% RAC are the least resistant at all depths. Concerning the best mixture, 50% RAC exhibited the lowest total Cl<sup>-</sup> concentration at all depths, but normal concrete had the lowest free Cl<sup>-</sup>, and therefore the smallest weight loss. When the RA origin was inhomogeneous, 100% RAC exhibited the highest concentration of total Cl<sup>-</sup> and normal concrete exhibited the lowest at all depths. However, the steel bar weight loss of mixtures with recycled old C12/15 was smaller than that of normal concrete and the smallest of almost all mixtures. Normal concrete exhibited a smaller loss than that of 100% recycled C16/20 and C20/25 mixtures, but greater than that of mixtures with 50% RA, irrespective of initial strength.

A decrease of RA to 50% reduces bar weight loss of almost all mixtures.

The curing that causes the most undesirable results for inhomogeneous RAC, as well as for normal concrete, is the one with wetting-drying cycles, regardless of recycling percentage and depth. For homogeneous RAC, at low cover depths (< 4 cm), the most undesirable curing is the one with

cycles, whereas at higher depths the greatest loss exists when Cl<sup>-</sup> ions penetrate from the bottom side.

Moreover, it is noted that in most 100% RAC, the higher the strength of the origin concrete is, the smaller the bar weight loss that results.

## 4 CONCLUSIONS

### Splitting tensile strength

- √ The homogeneity (or not) of RA does not particularly affect a mixture's splitting strength. In most cases, inhomogeneous origin RAC has a higher splitting strength, even higher than that of normal concrete.
- √ The higher the fck of the origin concrete, the higher the RAC splitting strength, regardless of replacement percentage or RA homogeneity.
- √ An increase in RA percentage improves the splitting strength of homogeneous RAC, whereas it reduces it in inhomogeneous RAC.

### Characteristic strength

- √ The fck of all RAC is higher than the fck of origin concrete.
- √ In comparison with normal concrete, the fck of most inhomogeneous RAC is the same as that of normal concrete. The fck of 100% homogeneous RAC is slightly lower compared to normal concrete, whereas the fck of 50% homogeneous RAC is equal to that of normal concrete

### Compressive strength

- √ The compressive strength of most homogeneous RAC, after 28 days, is higher than that of inhomogeneous RAC.
- √ A decrease of the RA percentage increases the compressive strength of most mixtures.
- √ In comparison with normal concrete, almost all homogeneous RAC has a higher compressive strength, whereas almost all inhomogeneous RAC, after 28 days, has lower strengths

### High temperatures

- √ Regardless of origin and RA participation rate, at 100 °C RACs exhibit a smaller strength loss compared to normal concrete, whereas at 550 °C their strength loss seems to be higher than that of normal. At 300 °C concretes made with homogeneous RA are more resistant to fire, while concrete made of homogeneous RA undergoes larger deterioration compared to normal concrete and homogeneous RAC.

### Chlorines

- √ The most undesirable for 100% RAC is the bottom side penetration of Cl<sup>-</sup>. For 50% RAC and for normal concrete, the most unfavourable curing is that with wetting-drying cycles.
- √ A decrease in the RA percentage improves chlorine penetration resistance.

- √ In wetting-drying cycles, RAC exhibits the lowest total and free Cl<sup>-</sup> concentration, and the smallest steel bar weight loss, regardless of RA proportion and homogeneity or concrete cover depth.
- √ For one side Cl<sup>-</sup> penetration, the most unfavourable mixture is 100% RAC. The best mixture is 50% RAC, which has the lowest total Cl<sup>-</sup> concentration when RA is homogeneous or the smallest bar weight loss when RA is inhomogeneous.
- √ Bound to total Cl<sup>-</sup> ratios of all RAC, regardless of homogeneity and recycling percentage, are much greater than those of normal concrete at wetting-drying cycles and at very high levels for side penetration.