

**Θλιπτική Αντοχή σε Κανονικές και Υψηλές
Θερμοκρασίες και Υδατοαπορροφητικότητα
Σκυροδεμάτων με Ανακυκλωμένα Χονδρόκοκκα αδρανή
Compression Strength and Water Absorption of Concretes
with Recycled Coarse Aggregate**

Αθηνά ΣΑΒΒΑ¹, Νίκη ΤΡΟΧΟΥΤΣΟΥ²

*Λέξεις κλειδιά: Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος, Ανακυκλωμένα
Σκυροδέματα, Θλιπτική Αντοχή, Υψηλές Θερμοκρασίες, Έμμεσες Μέθοδοι,
Υδατοαπορροφητικότητα.*

*Keywords: Recycled Concrete Aggregate, Recycled Aggregate Concrete,
Compressive Strength, High Temperatures, Indirect Methods, Water Absorption.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία, στα πλαίσια της αειφορίας και της βιώσιμης ανάπτυξης, όσον αφορά τον κατασκευαστικό κλάδο, μελετήθηκαν σκυροδέματα παρασκευασθέντα από ανακυκλωμένα αδρανή. Παρασκευάστηκαν μείγματα με αντικατάσταση των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών με ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCA), σε ποσοστά 5, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50, 55, 60 και 100%. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προέκυψαν από κέντρο ανακύκλωσης της Θεσσαλονίκης. Σε όλα τα μείγματα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Π 42.5 N σε ποσότητα 350 kg/m³, με λόγο N/T=0,54. Μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή στις 2, 7, 28 και 130 ημέρες με άμεσες και έμμεσες (κρουσίμετρο - ηχώμετρο) μεθόδους, καθώς και η εναπομένουσα αντοχή μετά από πύρωση 2h στους 100 και 300°C και η υδατοαπορροφητικότητα των μειγμάτων στις 130 ημέρες. Έγινε σύγκριση με σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή. Δίνονται καμπύλες αναφοράς της αντοχής με τις έμμεσες μεθόδους (f-R και f-V), πριν και μετά την πύρωση.

ABSTRACT: In this experimental work, in the context of sustainability and sustainable development in the construction sector, concretes prepared with recycled concrete aggregates are examined. Mixtures were made by replacing natural coarse aggregates with recycled concrete aggregates (RCA) at levels of 5, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50, 55, 60 and 100% (w/w). In all mixtures, CEM II 42.5 N

¹ Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: asavva@civil.duth.gr

²MSc Πολιτικός Μηχανικός, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, email: ntrochoutsoul@sheffield.ac.uk

was used (350 kg/m^3) with a W/C ratio of 0.54. The compressive strength was measured at 2, 7, 28 and 130 days by direct and indirect (Rebound Hammer - Pulse Velocity) methods. Residual strength after 2 hours of ignition at 100 and 300°C as well as the capillary water absorption of the mixtures at 130 days were also determined. The results were compared to those of concrete with conventional aggregates and calibration curves of compressive strength versus non-destructive tests (f-R and f-V) are given before and after exposure to elevated temperatures.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση του σκυροδέματος, παγκοσμίως, υπερβαίνει το διπλάσιο της συνολικής χρήσης όλων των άλλων οικοδομικών υλικών, συμπεριλαμβανομένου του ξύλου, του χάλυβα, του πλαστικού και του αλουμινίου, de Brito and Saikia (2013). Αυτή η μεγάλη χρήση οδηγεί σε απόβλητα από έργα ανακαίνισης ή/και από κατεδαφίσεις, που στην Ευρώπη φτάνουν περίπου τα 850 εκατομμύρια τόνους ετησίως και αντιστοιχούν στο 31% των συνολικών αποβλήτων, (Fisher and Werge 2009). Τα απόβλητα αυτά αποτελούνται κυρίως από αδρανή υλικά (σκυρόδεμα, τούβλα, κεραμίδια, ασφαλτικά), οργανικά υλικά (χαρτί, ξύλο) και σύνθετα υλικά (σοβάδες, ηλεκτρικό υλικό), με το σκυρόδεμα να αποτελεί το ένα τρίτο της ποσότητας τους. Από έκθεση δε του 1996, που αναφέρει ότι κάθε κάτοικος της Ευρωπαϊκής Ένωσης παράγει ετησίως, κατά μέσο όρο, 500 κιλά απορριμμάτων κατεδαφίσεων (Οικονόμου 2005), μπορεί κάποιος να υποθέσει την τεράστια ποσότητα αποβλήτων σκυροδέματος που παράγονται σε όλο τον κόσμο. Αν και η πρόσφατη παγκόσμια ύφεση οδήγησε σε πτώση της παραγωγής, η ανάπτυξη χωρών, όπως η Βραζιλία, η Ρωσία, η Κίνα και η Ινδία, διατήρησαν την παγκόσμια ζήτηση σε αυξανόμενη τάση. Συνεπώς, η υιοθέτηση μιας πολιτικής για μια αειφόρο ανάπτυξη σε παγκόσμια κλίμακα είναι όλο και περισσότερο αναγκαία για τη διασφάλιση των περιβαλλοντικών πόρων, (Pepe, 2015)

Η επαναχρησιμοποίηση-ανακύκλωση αυτού του απόβλητου σκυροδέματος ως αδρανές υλικό σε ένα νέο σκυρόδεμα αποτελεί μια καλή λύση στην ανάγκη για βιώσιμη κατασκευή επιτυγχάνοντας δύο στόχους: 1) Την προστασία των φυσικών πόρων μετατρέποντας ένα απόβλητο σε χρήσιμο υλικό. Η αυξημένη παραγωγή και χρήση σκυροδέματος οδηγεί σε υπερκατανάλωση των φυσικών αδρανών. Επιπλέον η εξόρυξη τους δημιουργεί οικολογική ανισορροπία καταστρέφοντας τη βιοποικιλότητα των κοντινών περιοχών, προκαλώντας διάβρωση σε παράκτιες και ποτάμιες όχθες, ρυπαίνοντας τα ύδατα με αύξηση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και αυξάνοντας τη ρύπανση από σκόνη και θόρυβο. 2) Τη μείωση της μεγάλης ποσότητας αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής και συνεπώς την αύξηση διαθέσιμων χώρων για γεωργικές ή άλλες ασχολίες.

Για την επίτευξη της αναγκαίας βιωσιμότητας στον κατασκευαστικό τομέα, έχουν αναπτυχθεί αρκετά πρότυπα/κώδικες για τη χρήση του απόβλητου σκυροδέματος ως αδρανές υλικό σε ένα νέο σκυρόδεμα.

Έτσι το EN 12620:2002 (CEN 2002) επιτρέπει τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος, εφόσον ικανοποιούν τις απαιτήσεις που ισχύουν για τα συμβατικά αδρανή, χωρίς δηλαδή να υπάρχουν ιδιαίτερα πρότυπα. Ορισμένες από τις ευρωπαϊκές χώρες, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο έχουν εκδώσει πρότυπα ή τεχνικές οδηγίες σχετικά με τα ανακυκλωμένα αδρανή, ως συμπληρωματικά πρότυπα του EN ή ως ξεχωριστά πρότυπα ή τεχνικές οδηγίες. Το BS 8500-2 (2006), επιτρέπει μέγιστη αντικατάσταση 20% των χονδρόκοκκων, με σχετική θλιπτική αντοχή 20-40 MPa. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άοπλο σκυρόδεμα, σε σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων ή και σε εξωτερικούς χώρους που δεν εκτίθενται σε χλωριόντα ή σε αποπαγωτικά άλατα. Δεν δίνονται διατάξεις για χρήση ανακυκλωμένης άμμου, αλλά δεν απαγορεύει τη χρήση της. Η RILEM (1994) επιτρέπει την πλήρη αντικατάσταση των ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών, με μέγιστη κατηγορία αντοχής το C50/60. Δεν συνιστά τη χρήση ανακυκλωμένης άμμου. Το Buildings Department του Χονγκ Κονγκ με έναν από τους πιο λεπτομερείς οδηγούς (HKBD 2009), ορίζει ότι σκυρόδεμα με 100% ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, παρουσιάζει αντοχή περίπου 20 MPa και θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για μη κατασκευαστικά έργα, ενώ σκυρόδεμα με 20% ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, με αντοχή μεταξύ 25 και 35 MPa μπορεί να εφαρμοστεί για γενικές εφαρμογές. Τα ανακυκλωμένα αδρανή πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις, η δε χρήση ανακυκλωμένης άμμου απαγορεύεται. Το ACI E-701 (2007) προβλέπει τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών σε δομικά σκυροδέματα, ορίζει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανακυκλωμένη άμμος 10-20%, ενώ τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα έως και 100%. Επίσης το ACI 555R-01 (2001) προσφέρει οδηγίες για τη διαδικασία παραγωγής και απόκτησης ανακυκλωμένων αδρανών και για την παραγωγή νέου σκυροδέματος.

Παρόλο όμως, που τα πρότυπα σε ορισμένες χώρες επιτρέπουν τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών σε δομικό σκυρόδεμα, η χρήση τους παραμένει περιορισμένη και οι ιδιότητες του Σκυροδέματος με Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (RAC), εξακολουθούν να θεωρούνται ανοικτό ζήτημα. Τα ανακυκλωμένα αδρανή αφενός έχουν διαφορετική σύνθεση -υψηλό πορώδες, προσκολλημένη τσιμεντόπαστα, πολλαπλές διεπιφάνειες- και αφετέρου όταν προέρχονται από ένα κέντρο ανακύκλωσης παρουσιάζουν διαφορετικές ποιότητες. Έτσι, παρά τα πολλά πειραματικά αποτελέσματα, υπάρχουν μεγάλες διασπορές, διαφοροποιήσεις και αντικρουόμενα συμπεράσματα. Επομένως απαιτείται περισσότερη έρευνα, ώστε τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα να αποτελέσουν εφικτή λύση για δομικές εφαρμογές, δεδομένου μάλιστα ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση αποσκοπεί στην προώθηση της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος, έως 70%, για το 2020 (Pepe 2015).

Για τις έμμεσες μεθόδους (κρουσίμετρο και ηχώμετρο) υπάρχουν λίγα διαθέσιμα αποτελέσματα, όπως των Torcu and Sengel, (2004), Rao et al (2011), Sagoe-Crentsil et al (2001) για το κρουσίμετρο και των Kwan et al (2012), Tu et al

(2006) για το ηχώμετρο. Λίγα αποτελέσματα υπάρχουν και για την ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (Zega and Di Miao,2009)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Παρασκευάστηκαν 11 σειρές δοκιμίων, με την ίδια ποσότητα τσιμέντου CEM II/A-M(P-LL) 42.5N = 350 kg/m³ και την ίδια ποσότητα νερού W=189 kg/m³ (w=0,54). Τα μείγματα της κάθε σειράς παρασκευάστηκαν με αντικατάσταση των συμβατικών χονδρόκοκκων αδρανών (γαρμπίλι και σκύρα) με 5%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60% και 100% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος, που προήλθαν από το κέντρο ανακύκλωσης “Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας”. Τέλος παρασκευάστηκε μια σειρά με συμβατικά αδρανή (μείγμα 0) ως σκυρόδεμα αναφοράς.

Σε όλα τα μείγματα, τα συμβατικά αδρανή ήταν ποταμίσια, η άμμος και θραυστή και φυσική, ενώ τα χονδρόκοκκα θραυστά. Μέγιστος κόκκος όλων των αδρανών D_{max}=32 mm και οι κοκκομετρικές καμπύλες των μειγμάτων ήταν παραπλήσιες και όλες μέσα στην υποζώνη Δ του ΚΤΣ-16.

Οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών δίνονται στον "Πίνακα 1", ενώ οι αναλογίες μείξης των σκυροδεμάτων δίνονται στον "Πίνακα 2". Πριν την ανάμειξη, τα ανακυκλωμένα αδρανή, λόγω της υψηλής απορροφητικότητάς τους και με στόχο τον κορεσμό τους, παρέμειναν στον αναμεικτήρα για 15 min βυθισμένα σε νερό ίσο με το νερό απορρόφησής τους αυξημένο με το 20% περίπου του νερού μείξης.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες των αδρανών

Ιδιότητες	Συμβατικά αδρανή				Ανακυκλωμένα	
	Άμμος συλλεκτή	Άμμος θραυστή	Γαρμπίλι	Σκύρα	Γαρμπίλι	Σκύρα
Πυκνότητα (kg/dm ³)	2.65	2.65	2.65	2.65	2.55	2.60
Απορροφητικότητα (%)	-	-	-	-	8.0	3.0
Επιφαν.Υγρασία (%)	2.10	1.20	0.20	-	-	-

Δοκιμές ελέγχου

Παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm, τα οποία συντηρήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης (20 ± 2 °C και R > 95 %) μέχρι τις 28 ημέρες και μετά αφέθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου. Μετρήθηκε η εργασιμότητα των μειγμάτων και η θλιπτική αντοχή στις 2, 7, 28 και 130 ημέρες με άμεσες και με έμμεσες μεθόδους (κρουσίμετρο και ηχώμετρο). Στις 130 ημέρες, 2 δοκίμια από κάθε μείγμα πυρώθηκαν σε κλίβανο για 2 ώρες στους 100 και 300 °C και αφού κρουσιμετρήθηκαν και ηχομετρήθηκαν, θραύστηκαν. Στην ίδια ηλικία μετρήθηκε και η υδατοαπορροφητικότητα των μειγμάτων.

Πίνακας 2. Αναλογίες μείξης των σκυροδεμάτων

Μείγματα	C	W	Συμβατικά αδρανή (kg)				Ανακυκλωμένα (kg)	
			Άμμος		Γαρμπίλι	Σκόρα	Γαρμπίλι	Σκόρα
			Φυσική	Θραυστή				
0					450.06	270.04	-	-
5					426.72	256.29	22.46	13.49
15					380.31	228.87	67.11	40.39
20					357.24	215.20	89.31	53.80
25					334.27	201.56	111.42	67.19
30	350	189	270.04	810.11	311.38	187.94	133.45	80.55
40					265.86	160.78	177.24	107.19
45					243.24	147.25	199.01	120.47
50					220.70	133.73	220.70	133.73
55					198.25	120.24	242.31	146.96
60					175.88	106.78	263.83	160.17
100					-	-	433.08	264.94

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Εργασιμότητα

Η εργασιμότητα μετρήθηκε με την κάθιση και τα αποτελέσματα δίνονται στον "Πίνακα 3", όπου φαίνονται και η μείωση της εργασιμότητας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα καθώς και οι ποσότητες του υπερρευστοποιητή (Viscocrete 600 plus) που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 3. Κάθιση (cm) των μειγμάτων, μείωση της εργασιμότητας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα (%) και ποσότητα ρευστοποιητή (% της ποσότητας του τσιμέντου) σε κάθε μείγμα

	% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή											
	0	5	15	20	25	30	40	45	50	55	60	100
Εργασιμότητα (cm)	13.1	10.2	10.2	9.0	9.5	8.5	7.1	6.0	5.0	6.0	4.0	3.0
Μείωση σε σχέση με το συμβατικό (%)		22.1	22.1	31.3	27.5	35.1	45.8	54.2	61.8	54.2	69.5	77.1
Ρευστοποιητής	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	1.3	1.0	1.2	2.0	1.0	3.0

Παρατηρείται ότι οι τιμές της κάθισης κυμαίνονται από 3 cm έως 10,2 cm έναντι 13,1 cm του συμβατικού σκυροδέματος, δηλ. οι τιμές της εργασιμότητας των ανακυκλωμένων μειγμάτων είναι από 22,1 έως 77,1% μικρότερες αυτών του συμβατικού. Τα ανακυκλωμένα αδρανή είναι συνήθως πιο γωνιώδη από τα φυσικά, έτσι η εργασιμότητα των αντιστοιχών σκυροδεμάτων αναμένεται να είναι μειωμένη. Επιπλέον τα ανακυκλωμένα αδρανή είναι πολύ πορώδη και απορροφητικά, με συνέπεια τη μείωση του ελεύθερου νερού και τη μείωση της εργασιμότητας, όσο το ποσοστό συμμετοχής τους στο μείγμα αυξάνεται. Πάντως για ποσοστό ανακύκλωσης μέχρι 15%, η εργασιμότητα δεν διαφοροποιείται πολύ και τα μείγματα εντάσσονται στην ίδια κατηγορία κάθισης S₃, ενώ για ποσοστό συμμετοχής έως 60% τα μείγματα παρουσιάζουν κάθιση κατηγορίας S₂. Για ποσοστά ανακύκλωσης πάνω από 60% η εργασιμότητα καθίσταται προβληματική (S₂) με μείγματα πολύ ύφυγρα. Το πρόβλημα θα μπορούσε να επιλυθεί με την αύξηση της δόσης του υπερρευστοποιητή.

Θλιπτική αντοχή

Στον "Πίνακα 4" παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής όλων των μειγμάτων στις 2, 7, 28 και 130 ημέρες, ως μέσος όρος τριών κυβικών δοκιμίων (15x15 cm).

Πίνακας 4. Θλιπτική αντοχή (MPa) των μειγμάτων

Ηλικία (ημέρες)	Ποσοστό (% κ.β) χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών											
	0	5	10	20	25	30	40	45	50	55	60	100
2	42.9	37.1	36.0	35.3	35.0	34.9	32.0	31.2	30.2	29.6	26.5	34.4
7	49.4	48.3	46.8	46.1	42.8	42.0	41.2	40.4	37.7	36.3	35.5	40.2
28	58.4	57.4	52.2	51.7	50.1	49.2	48.4	48.0	45.5	43.8	40.4	45.5
130	70.4	69.0	66.7	64.4	61.4	60.6	60.1	58.7	54.4	54.1	53.3	56.0

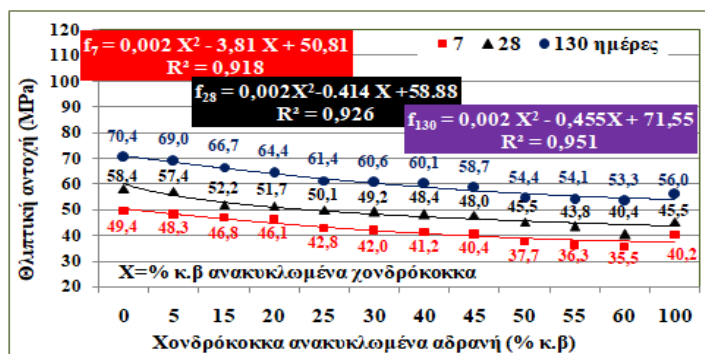
Οι αντοχές των ανακυκλωμένων μειγμάτων κυμάνθηκαν από 26,5 έως 69,0 MPa, έναντι 42,9 έως 70,4 MPa του συμβατικού σκυροδέματος. Η θλιπτική δηλ. αντοχή των σκυροδεμάτων που περιέχουν ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή είναι χαμηλότερη από αυτή του αντίστοιχου συμβατικού σκυροδέματος και η αύξηση της περιεκτικότητας των ανακυκλωμένων τη μειώνει περαιτέρω. Η θλιπτική αντοχή εξαρτάται από την αντοχή των αδρανών, την αντοχή της τσιμεντόπαστας και από την διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντόπαστας. Η ρηγμάτωση - και επομένως η αστοχία- θα ξεκινήσει από το ασθενέστερο σημείο, που στα συμβατικά σκυροδέματα συνήθως είναι η διεπιφάνεια. Καθώς στα ανακυκλωμένα αδρανή υπάρχουν δύο διεπιφάνειες: α) μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της νέας τσιμεντόπαστας και β) μεταξύ ανακυκλωμένων αδρανών και της παλιάς προσκολλημένης τσιμεντόπαστας, αυτές, ως ασθενέστερες, καθορίζουν και την αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον, τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν και υψηλό πορώδες αλλά και ρηγματώσεις λόγω της διαδικασίας θραύσης τους. Συνεπώς, αποτελούν ασθενή σημεία στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα και έτσι

είναι φυσικό η θλιπτική αντοχή να μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού τους στο μείγμα. Παρόλα αυτά, στις 28 ημέρες οι αντοχές όλων των μειγμάτων είναι πάνω από 35,5 MPa, επομένως όλα μπορούν να θεωρηθούν δομικά σκυροδέματα, καθώς μάλιστα η προσθήκη ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στο ρυθμό ανάπτυξης των αντοχών, υποδεικνύοντας μια παρόμοια εξέλιξη στην αντοχή ανακυκλωμένων και συμβατικών σκυροδεμάτων.

Πίνακας 5. Απώλειες (%) της θλιπτικής αντοχής των ανακυκλωμένων μειγμάτων σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα

Ηλικία (ημέρες)	Χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή (% κ.β)										
	5	10	20	25	30	40	45	50	55	60	100
2	13.5	16.1	17.5	18.3	18.6	25.3	27.2	29.6	30.9	38.1	19.7
7	2.3	5.2	6.7	13.4	15.0	16.5	18.2	23.7	26.6	28.1	18.6
28	1.8	10.6	11.5	14.2	15.8	17.2	17.9	22.2	25.0	30.8	22.1
130	1.9	5.3	8.4	12.7	13.8	14.6	16.6	22.6	23.1	24.2	20.4

Στον "Πίνακα 5" δίνονται οι απώλειες των μειγμάτων σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, σε όλες τις ηλικίες. Οι μειώσεις της αντοχής κυμαίνονται από 13,0 έως 38,1 % στις 2 ημέρες, από 2,3 έως 28,1% στις 7 ημέρες, από 1,8 έως 30,8% στις 28 ημέρες, ενώ στις 130 ημέρες από 1,9 έως 24,2%. Παρατηρείται ότι, ενώ η αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών έως το 60%, αυξάνει και τις απώλειες της αντοχής σε σχέση με το συμβατικό, για ποσοστό ανακύκλωσης 100%, οι απώλειες της αντοχής είναι μικρότερες και πλησιάζουν τις απώλειες των μειγμάτων που περιέχουν μόνο 45-50% ανακυκλωμένα αδρανή. Αυτό συμβαίνει, πιθανόν, λόγω της αυξημένης απορροφητικότητας -της μεγάλης ποσότητας- των ανακυκλωμένων αδρανών, όπου το εγκλωβισμένο νερό χρησιμεύει για την εσωτερική συντήρηση του μείγματος. Επιπλέον, η αδρή υφή τους, πιθανόν να βελτιώνει τις διεπιφάνειες μεταξύ νέου κονιάματος και ανακυκλωμένου αδρανούς.



Σχήμα 1. Θλιπτική αντοχή των μειγμάτων (MPa) στις 2, 7, 28 και 130 ημέρες

Στο **Σχήμα 1** φαίνεται η τάση της μείωσης της αντοχής με την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης και δίνονται πολυωνυμικές συσχετίσεις για τις αντοχές

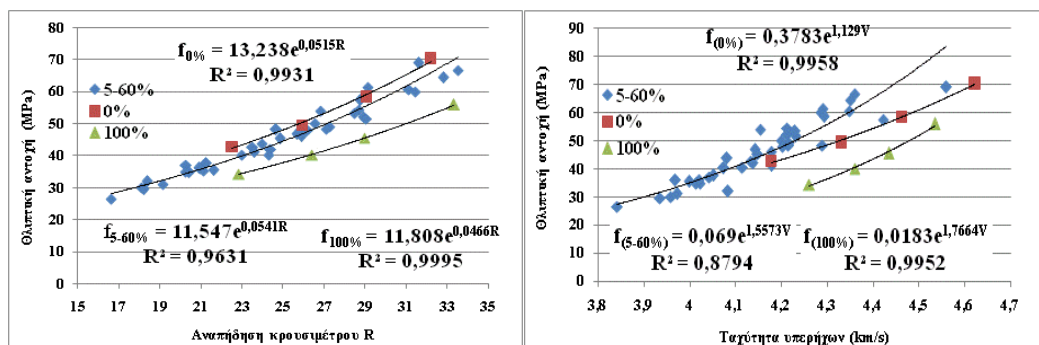
των συμβατικών και ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων για τις 7, 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα. Ο συντελεστής συσχέτισης $R^2 > 0,918$ είναι πολύ υψηλός.

Πίνακας 6. Τιμές έμμεσων μεθόδων στις 2, 7, 28 και 130 ημέρες

Ηλικία (ημέρες)	Ενδειξη Κρουσιμέτρου (R)											
	0	5	10	20	25	30	40	45	50	55	60	100
2	22.5	20.3	20.9	21.1	20.2	20.4	18.4	19.2	18.1	18.2	16.6	22.9
7	26.0	24.7	25.7	25.9	23.5	24.4	23.6	23.0	21.2	20.9	21.6	26.4
28	29.1	28.7	28.9	29.0	26.6	27.3	27.1	26.2	24.8	24.0	24.3	29.0
130	32.2	31.6	33.5	32.8	29.1	31.1	31.4	29.0	28.7	26.8	28.5	33.3

Ηλικία (ημέρες)	Ταχύτητα υπερήχων (Km/s)											
	0	5	10	20	25	30	40	45	50	55	60	100
2	4.18	4.04	3.97	4.02	4.01	4.02	4.08	3.97	3.96	3.94	3.84	4.26
7	4.33	4.29	4.14	4.18	4.13	4.14	4.18	4.12	4.05	4.02	4.00	4.36
28	4.46	4.42	4.21	4.23	4.20	4.22	4.22	4.20	4.15	4.08	4.07	4.43
130	4.62	4.56	4.36	4.35	4.29	4.35	4.29	4.29	4.21	4.15	4.23	4.54

Στον "Πίνακα 6" δίνονται τα αποτελέσματα των έμμεσων μεθόδων στις 2, 7, 28 και 130 ημέρες. Οι τιμές αναπήδησης R, με μικρές αποκλίσεις, μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών και αυτό μπορεί να οφείλεται στην πορώδη φύση τους. Οι τιμές, κυμάνθηκαν από 16,6 έως 33,5 για όλα τα ανακυκλωμένα μείγματα, έναντι 22,5 έως 32,2 του συμβατικού. Η ίδια μείωση παρατηρήθηκε και στις ενδείξεις του ηχομέτρου, με τιμές που κυμάνθηκαν από 3,84 έως 4,56 km/s, έναντι 4,18 έως 4,62 km/s του συμβατικού. Τόσο η ταχύτητα υπερήχων όσο και η ένδειξη του κρουσιμέτρου αυξήθηκαν με την ηλικία και το μείγμα με 100% ανακυκλωμένα έδωσε υψηλότερες τιμές. Επομένως, τα αποτελέσματα των έμμεσων συμπίπτουν με αυτά από τη θραύση των δοκιμίων.



Σχήμα 2. Καμπύλες συσχέτισης της θλιπτικής αντοχής (MPa) με τις ενδείξεις του κρουσιμέτρου και με την ταχύτητα των υπερήχων (km/s) στους 20 °C

Με γραμμική παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη θραύση των δοκιμίων και των αποτελεσμάτων των εμμέσων, προκύπτουν καμπύλες συσχέτισης της αντοχής με τις έμμεσες, που δίνονται στο **Σχήμα 2**. Οι καμπύλες αυτές είναι εκθετικές, με συντελεστή συσχέτισης $R^2 > 0,96$ για το κρουσίμετρο και $R^2 > 0,99$ για το ηχώμετρο

Θλιπτική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

Στον "Πίνακα 7" δίνονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής, ως μέσος όρος των τιμών δύο κυβικών δοκιμίων, μετά από 2 ώρες πύρωση στη max θερμοκρασία των 100 και 300 °C,

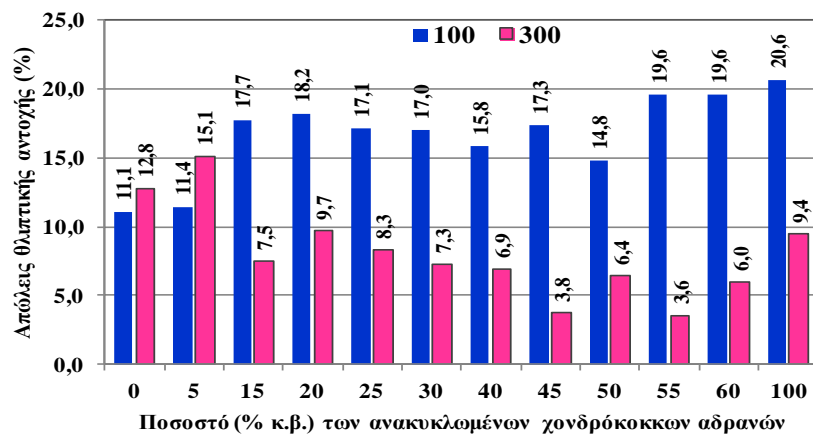
Πίνακας 7. Θλιπτική αντοχή μειγμάτων μετά από πύρωση 2 ωρών στους 100 °C και 300 °C

Θερμοκρασία (°C)	Θλιπτική αντοχή (MPa)											
	Ποσοστό (% κ.β.) χονδρόκκων ανακυκλωμένων αδρανών											
	0	5	15	20	25	30	40	45	50	55	60	100
20	70,4	69,0	66,7	64,4	61,4	60,6	60,1	58,7	54,4	54,1	53,3	56,0
100	62,6	61,1	54,8	52,7	50,9	50,3	50,6	48,5	46,4	43,5	42,9	44,4
300	54,6	51,9	50,7	47,6	46,7	46,7	47,1	46,7	43,4	41,9	40,3	40,2

Οι εναπομένουσες αντοχές στα ανακυκλωμένα μείγματα είναι όλες μεγαλύτερες από 40,2 MPa, και κυμαίνονται από 42,9 έως 61,1 MPa στους 100 °C και από 40,2 έως 51,9 MPa στους 300 °C, έναντι 62,6 και 54,5 MPa του συμβατικού σκυροδέματος, αντίστοιχα. Στο **Σχήμα 4** δίνονται οι απώλειες της θλιπτικής αντοχής λόγω της πύρωσης.

Στους 100 °C, και για ποσοστό ανακύκλωσης έως 5%, συμβατικά και ανακυκλωμένα σκυροδέματα παρουσιάζουν τις ίδιες απώλειες (~ 11%). Για ποσοστά ανακύκλωσης έως 50%, τα μείγματα δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα, με απώλειες από 14,8 έως 18,2%, με μέση τιμή, περίπου στο 17%. Για ποσοστά ανακύκλωσης πάνω από 50%, οι απώλειες κυμαίνονται στο 20%. Μπορεί να θεωρηθεί λοιπόν, ότι για οποιοδήποτε ποσοστό ανακύκλωσης, οι απώλειες είναι μικρότερες από 20,6%, (έναντι 11,1% του συμβατικού), με μέση τιμή περίπου στο 17-18%.

Στους 300 °C, τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται. Το μείγμα με 5% ανακυκλωμένα εξακολουθεί να παρουσιάζει απώλειες (15,1%) σχεδόν όσες του συμβατικού σκυροδέματος (12,8%). Η αύξηση όμως του ποσοστού ανακύκλωσης μειώνει σημαντικά τις απώλειες, οι οποίες κυμαίνονται από 3,6 έως 9,4% με μέση τιμή 7%. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν την πολύ καλή συμπεριφορά και ανθεκτικότητα των ανακυκλωμένων μειγμάτων σε υψηλές (=300 °C) θερμοκρασίες.



Σχήμα 3. Απώλειες (%) θλιπτικής αντοχής λόγω της πύρωσης στους 100 °C και 300 °C

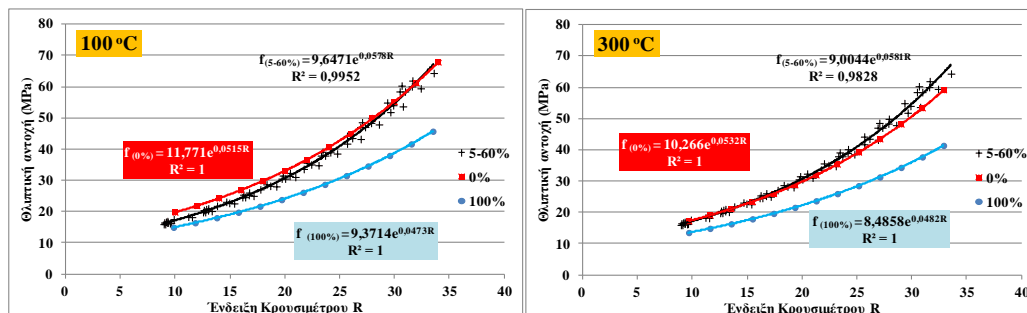
Στον "Πίνακα 8" δίνονται τα αποτελέσματα των εμμέσων μετά την πύρωση στους 100 και 300 °C. Οι απώλεια επιφανειακής σκληρότητας είναι μεγαλύτερη στα ανακυκλωμένα μείγματα, με μια μέση απώλεια της ένδειξης του κρουσιμέτρου περίπου στο 6,3% στους 100 °C και 7,6% στους 300 °C, όταν οι αντίστοιχες απώλειες του συμβατικού είναι 0% και 3%.

Πίνακας 8. Ενδείξεις εμμέσων μετά από πύρωση στους 100 °C και 300 °C

Ένδειξη κρουσιμέτρου R												
Θερμοκρασία (°C)	Ποσοστό (% κ.β.) χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών											
	0	5	15	20	25	30	40	45	50	55	60	100
20	32,2	31,6	33,5	32,8	29,1	31,1	31,4	29,0	28,7	26,8	28,5	33,3
100	32,2	31,2	32,2	31,3	27,2	28,1	28,8	27,0	26,7	24,4	25,5	32,8
300	31,2	30,8	31,9	30,9	27,1	27,5	28,5	26,9	26,3	23,9	24,8	32,2
Ταχύτητα υπερήχων (km/s)												
20	4,62	4,56	4,36	4,35	4,29	4,35	4,29	4,29	4,21	4,15	4,23	4,54
100	4,06	3,96	3,81	3,86	3,87	3,85	3,78	3,73	3,65	3,58	3,60	3,92
300	2,35	2,29	2,19	2,28	2,09	2,08	2,01	2,13	1,99	1,96	1,93	1,45

Η μείωση της ταχύτητας των υπερήχων είναι μεγάλη για όλα τα μείγματα, ένδειξη μικρορηγματώσης. Οι απώλειες των ανακυκλωμένων μειγμάτων είναι περίπου 12,7% (το συμβατικό 12,3%), ενώ στους 300 °C φτάνουν στο 52,9% (49,2% το συμβατικό). Τα ανωτέρω αποτελέσματα σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στους 20 °C, χρησιμοποιούνται για να βαθμονομηθούν οι έμμεσες και να δοθούν σχέσεις που συνδέουν την τιμή των εμμέσων και την αντοχή στις

θερμοκρασίες των 100 και 300 °C. Οι καμπύλες βαθμονόμησης για το κρουσίμετρο δίνονται στο Σχήμα 5, ενώ για το ηχώμετρο, ως εξισώσεις, στον "Πίνακα 9". Είναι εκθετικές και έχουν συντελεστή συσχέτισης $R^2=1$.

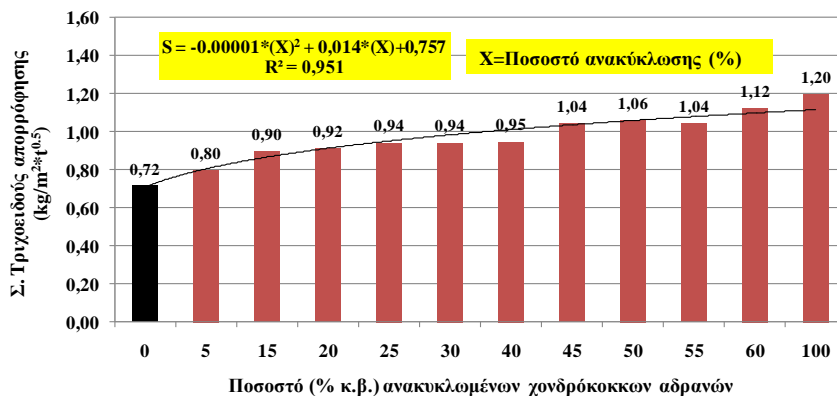


Σχήμα 4. Καμπύλες βαθμονόμησης του κρουσίμετρου στους 100°C και 300°C

Πίνακας 9. Εξισώσεις σχέσης f-V στους 100 °C και 300 °C

(%) ανακυκλωμένα	Θερμοκρασία πύρωσης	
	100 °C	300 °C
0%	$f_{(0\%)} = 11,711e^{0,0515V}$	$f_{(0\%)} = 10,266e^{0,0532V}$
5-60%	$f_{(5-60\%)} = 9,6471e^{0,0578V}$	$f_{(5-60\%)} = 9,0044e^{0,0581V}$
100%	$f_{(100\%)} = 8,4858e^{0,0482V}$	$f_{(100\%)} = 9,3714e^{0,0473V}$

Υδατοαπορροφητικότητα



Σχήμα 5. Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης των μειγμάτων ((kg/m²*t^{0,5})

Ο ρυθμός μεταφοράς του νερού καθώς και η ποσότητα απορρόφησης καθορίζονται από το πορώδες, το μέγεθος των πόρων και τη συνδεσιμότητα τους. Μια ένδειξη για τις παραπάνω παραμέτρους λαμβάνεται με την μέτρηση της

τριχοειδούς απορρόφησης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην ηλικία των 130 ημερών, και δίνονται στο **Σχήμα 5**. Όπως είναι αναμενόμενο, η τριχοειδής απορρόφηση των ανακυκλωμένων μειγμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερη του συμβατικού σκυροδέματος και αποδίδεται στην υψηλότερη απορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών. Παρατηρείται επομένως αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης, όσο αυξάνεται το ποσοστό ανακύκλωσης. Η αύξηση αυτή είναι 11% για 5% ανακυκλωμένα αδρανή, περίπου 25% για ποσοστό ανακύκλωσης 15-20%, 31,5% για ποσοστό ανακύκλωσης 25-40%, 45% για ποσοστό ανακύκλωσης 45-50% και 57 και 67% για ποσοστό ανακύκλωσης 60 και 100%, αντιστοίχως. Το συμβατικό σκυροδέμα έχει συντελεστή απορρόφησης $0,72 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{t}^{0,5}$. Στο **Σχήμα 5**, δίνεται ο συσχετισμός του ποσοστού ανακύκλωσης με το συντελεστή υδατοαπορρόφησης, με συντελεστή συσχέτισης $R^2 > 0,85$

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης των συμβατικών με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή μειώνει την εργασιμότητα. Όμως, για ποσοστό ανακύκλωσης έως 50%, η κάθιση είναι ίδια ή μία τάξη χαμηλότερη του συμβατικού

Η θλιπτική αντοχή των ανακυκλωμένων μειγμάτων μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης. Η μείωση είναι αμελητέα για ποσοστό ανακύκλωσης 5%. ενώ για ποσοστά ανακύκλωσης έως 45% κβ. η πτώση της αντοχής φτάνει το 18%. Όμως, οι αντοχές όλων των μειγμάτων στις 28 ημέρες είναι μεγαλύτερες από 35 MPa, και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομικές κατασκευές.

Τα ανακυκλωμένα μείγματα δείχνουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε θερμοκρασίες 300 °C, παρουσιάζοντας απώλειες μικρότερες του αντίστοιχου συμβατικού, ανεξάρτητα από το ποσοστό ανακύκλωσης. Στους 100 °C οι απώλειες είναι διπλάσιες του συμβατικού (έως 20%).

Τα ανακυκλωμένα μείγματα παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές υδατοαπορροφητικότητας, επομένως καλόν είναι να μην χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που απαιτείται υδατοστεγανότητα.

Δίνονται σχέσεις βαθμονόμησης των έμμεσων μεθόδων στους 20°C, 100 °C και 300 °C και σχέσεις που συνδέουν την θλιπτική αντοχή ή την υδατοαπορροφητικότητα των μειγμάτων με το ποσοστό ανακύκλωσης, με πολύ ικανοποιητικούς συντελεστές συσχέτισης $R^2 > 0,90$.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ACI 555R-01 Removal and reuse of hardened concrete. American Concrete Institute (2001)

ACI E-701 Aggregates for concrete. ACI Education Bulletin E1-07, Materials for Concrete Construction (2007)

BS 8500-2 Concrete - Complementary British Standard to BS EN 206-1. Specification for constituent materials and concrete. British Standards Institution (2006)

de Brito J. & Saikia, N., "Use of Construction and Demolition Waste as Aggregate: Properties of Concrete", in "Recycled Aggregate in Concrete. Green Energy and Technology", ed. de Brito, J. & Saikia, N. , Springer, London, UK (2013) 229-337.

DIN 4226-100 Aggregates for mortar and concrete - Recycled aggregates (2002)

Directive 2008/98/CE of the European parliament and of the council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union (2008)

EN 1992-1-1 Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardisation (2004)

Fisher, C. & Werge, M., "EU as a recycling society", ETC/SCP working paper 2/2009 (2009)

HKBD Use of recycled aggregates in concrete. Hong Kong Buildings Department (2009)

JIS A 5021 Recycled aggregate for concrete – class H, Japan Standards Association (2006)

Kwan, W.H., Ramli, M., Kam, K.J. & Sulieman, M.Z., "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties". *Constr Build Mater*, Vol 26, No 1 (2012) 565–573

Li ,X., "Recycling and reuse of waste concrete in China; Part I. Material behavior of recycled aggregate concrete". *Resour Conserv Recycl*, Vol 53, No 1–2 (2008) 36–44

Oikonomou, N.D., "Recycled concrete aggregates". *Cem Concr Aggreg*, Vol 27, No 2 (2005) 315–318

Pepe, M., «A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications», Springer International Publishing Switzerland (2015)

Rao, C.M., Bhattacharyya, S.K. & Barai, S.V., "Influence of field recycled aggregate on properties of concrete". *Mater Struct*, Vol 44, No 1 (2011) 205–220

RILEM Specification for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, Vol 27, No 173 (1994) 557

RILEM TC 121-DRG "RILEM recommendation: specifications for concrete with recycled aggregates". *Mater Struct*, Vol 27 (1994) 557–559

Sagoe-Crentsil KK, Brown T, Taylor AH (2001) Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cem Concr Res* 31(5):707–712

Topçu, I.B. & Sengel, S., "Properties of concretes produced with waste concrete aggregate". *Cem Concr Res*, Vol 34, No 8 (2004) 1307–1312

Tu, T-Y, Chen, Y-Y & Hwang, C-L, "Properties of HPC with recycled aggregates". *Cem Concr Res* Vol 36, No 5 (2006) 943–950

Zega, C.J. & Di Miao, A.A., "Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature". *Constr Build Mater*, Vol 23, No 5 (2004) 2047–2052