

**Θλιπτική αντοχή σε κανονικές και υψηλές θερμοκρασίες
φωτοδιαπερατού σκυροδέματος με συμβατικά και
ανακυκλωμένα αδρανή**
Compressive strength in normal and high temperatures of
light transmitting concrete with natural and recycled
aggregates

Σοφία ΜΑΥΡΙΔΟΥ¹, Αθηνά ΣΑΒΒΑ², Νίκη ΤΡΟΧΟΥΤΣΟΥ³

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα, ανακυκλωμένα αδρανή, πλαστικές οπτικές ίνες, θλιπτική, υψηλές θερμοκρασίες, έμμεσες μέθοδοι.
Keywords: Concrete, recycled aggregates, plastic optical fibres, compressive strength, high temperatures, indirect test methods

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Το σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό με πολύ ικανοποιητικά χαρακτηριστικά, χωρίς ωστόσο να είναι και τόσο φιλικό προς το περιβάλλον. Και αυτό διότι αφενός απαιτούνται φυσικοί πόροι και κατανάλωση ενέργειας για την παρασκευή του και αφετέρου, μετά την κατεδάφισή του δημιουργούνται προβλήματα με τους χώρους εναπόθεσης του. Επιπλέον το σκυρόδεμα έχει κατηγορηθεί ότι ως κατασκευαστικό υλικό δημιουργεί σκοτεινούς χώρους, στους οποίους το φως εισέρχεται μόνο από τα - συνήθως μικρά - ανοίγματα. Έτσι, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η συμπεριφορά ενός ειδικού τύπου σκυροδέματος, τόσο με συμβατικά όσο και με ανακυκλωμένα αδρανή, στο οποίο, για λόγους φωτοπερατότητας, ενσωματώθηκαν πλαστικές οπτικές ίνες, διαμέτρου 0,75 mm, σε ποσοστά 0, 0.5 και 0.71% κο. Εξετάσθηκε η θλιπτική αντοχή στις 7, 28 και 150 ημέρες (με άμεσες και έμμεσες μεθόδους) και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (250^o C). Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν πως είναι δυνατή η παραγωγή φωτοδιαπερατών σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή που παρουσιάζουν ικανοποιητική μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα.

ABSTRACT: Concrete is the most popular building material, with very satisfactory characteristics, however it is not very friendly to the environment.

¹ Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Μέλος ΣΕΠ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, email: sofia.mavridou@ac.eap.gr

² Καθηγήτρια, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: asavva@civil.duth.gr

³ MSc Πολιτικός Μηχανικός, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, email: ntrochoutsoul@sheffield.ac.uk

This is attributed to the fact that many natural resources and energy are demanded for its production on the one hand, while on the other hand after it is demolished many wastes are generated. Moreover it has been accused as it provides dark spaces while light passes through small openings. So, current research is dealing with the performance of a special type of concrete, produced by conventional and recycled aggregates, while in order to increase its light transmission plastic optical fibres of 0.75mm diameter have been added in percentages 0, 0.5 και 0.71per volume. Its compressive strength has been tested in 7, 28 and 150 days with direct and indirect test methods as well as its durability through the examination of its performance under high temperatures (250°C). Laboratory results certify that it is possible to produce light transmitting concrete of satisfactory strength and durability, even by the use of recycled aggregates.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά στοιχεία

Ο κατασκευαστικός τομέας περιλαμβάνει κατασκευές με βασικό δομικό υλικό το σκυρόδεμα λόγω του ότι αποτελεί ένα εύχρηστο υλικό, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η διαρκής ανάγκη για τη δημιουργία σκυροδέματος με ικανοποιητική αντοχή και ταυτόχρονα βελτιωμένη/αυξημένη ανθεκτικότητα έχει οδηγήσει στην διεξαγωγή πληθώρας εργαστηριακών μελετών, με στόχο τη βελτίωση βασικών αλλά και ειδικών χαρακτηριστικών του.

Ταυτόχρονα, το σκυρόδεμα έχει κατηγορηθεί ότι ως κατασκευαστικό υλικό είναι αρκετά ογκώδες, δημιουργώντας σκοτεινούς χώρους, στους οποίους το φως εισέρχεται μόνο από τα -συνήθως μικρά -ανοίγματα. Επομένως, η προσπάθεια οδηγείται προς την κατεύθυνση δημιουργίας ενός σκυροδέματος με ικανοποιητική φωτοδιαπερατότητα. Το διαπερατό από το φως σκυρόδεμα (*Translucent/ light-transmitting concrete*) αποτελεί ένα είδος σκυροδέματος που έχει ως κύρια συστατικά παρασκευής του εκτός από τα συνηθισμένα υλικά (τσιμέντο, αδρανή, νερό, πρόσθετα ή/και πρόσμικτα) και υλικά που επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός, με κυριότερα τις πολυμερείς ρητίνες (Fowler D.W, 1999) ή τις οπτικές ίνες (Gawatre et al, 2016).

Οι οπτικές ίνες αποτελούνται από πολύ λεπτά νήματα που κατασκευάζονται κυρίως (99% αυτών) από μεγάλης καθαρότητας γυαλί, και έχουν την ικανότητα να επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός κατά μήκος αυτών από τον πομπό στο δέκτη. Οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως το χαμηλό βάρος και ο μικρός όγκος που καταλαμβάνουν, όμως είναι πολύ ακριβές. Έτσι στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά μιγμάτων σκυροδέματος με χρήση πλαστικών οπτικών ινών, οι οποίες είναι οικονομικότερες των ινών από γυαλί ή των πολυμερών ρητινών.

Παράλληλα, στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης και της ευρύτερης προσπάθειας για τη διαφύλαξη των πρώτων υλών, είναι σημαντική η αξιοποίηση στερεών

αποβλήτων. Τα απόβλητα αυτά συχνά είναι κατάλληλα για χρήση τους ως αδρανή και κατ'επέκταση είναι δυνατή η προφύλαξη των φυσικών πρώτων υλών μέσω της χρήσης δευτερογενών ανακυκλωμένων υλικών. Τα ανακυκλωμένα αδρανή προέρχονται συνήθως από παλαιά στοιχεία σκυροδέματος. Η προέλευση, σύσταση και ηλικία του πρωτογενούς υλικού μπορεί να είναι γνωστά, ωστόσο συνήθως αυτά είναι άγνωστα, καθώς στις μονάδες ανακύκλωσης αδρανών αναμιγνύονται παλαιά στοιχεία σκυροδέματος διαφορετικής προέλευσης, σύστασης και ηλικίας. Η διαρκής αύξηση των Αποβλήτων από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις αποτελούν ένα μεγάλο ρεύμα στερεών αποβλήτων, των οποίων η ποσότητα αυξάνεται διαρκώς παγκοσμίως. Στην Ευρώπη μόνο το 2012 παράχθηκαν 383 εκατομμύρια τόνοι ΑΕΚΚ (Eurostat, 2016). Η ποσότητα αυτή αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία μέσα στα επόμενα χρόνια, καθώς πολλά κτίρια και έργα υποδομής φτάνουν το τέλος του κύκλου ζωής τους. Η μεγάλη αυτή ποσότητα των ΑΕΚΚ έχει οδηγήσει στη θέσπιση ειδικής σχετικής νομοθεσίας (ΠΔ, 2010), με στόχο την αξιοποίηση και εναλλακτική διαχείριση των ποσοτήτων αυτών, θέτοντας σαφείς χρονικούς και ποσοτικούς στόχους αξιοποίησης (μέχρι το 2020 θα πρέπει το ποσοστό αξιοποίησης να ανέλθει στο 70%). Δυστυχώς στη χώρα μας, τα ποσοστά αξιοποίησης των ΑΕΚΚ βρίσκονται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα, σε αντίθεση με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες στις οποίες ο ποσοτικός στόχος της διεθνούς νομοθεσίας έχει υπερκαλυφθεί ήδη (Eurostat 2016). Στη χώρα μας υπάρχουν ήδη εγκεκριμένα συστήματα, όπως το Συλλογικό Σύστημα Εναλλακτικής Διαχείρισης ΑΕΚΚ –"ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΒΟΡΕΙΟΥ ΕΛΛΑΔΟΣ -ΑΝΑΒΕ ΑΕ", το πρώτο αδειοδοτημένο καθώς και άλλα στην ευρύτερη περιοχή της χώρας με κυριότερα τα ΣΑΝΚΕ ΕΠΕ, ΣΕΔΠΕΚΑΤ ΑΕ, Ανακύκλωση Χαλκιδικής ΟΕ, Ανακύκλωση ΑΕΚΚ Κεντρικής Μακεδονίας ΕΚΚΑ ΑΕ, ΨΑΡΡΑΣ Εναλλακτική Διαχείριση ΑΕΜΚΕ και Ανακύκλωση Αδρανών Ν. Ελλάδας) κα.

Με βάση τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η παρασκευή φωτοδιαπερατού σκυροδέματος με την προσθήκη πλαστικών οπτικών ινών και με συμβατικά αλλά και ανακυκλωμένα αδρανή. Δυστυχώς, η υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με το συγκεκριμένο αυτό είδος σκυροδέματος, ενδεικτική της οποίας αναφέρεται στη συνέχεια, είναι ιδιαίτερα ανεπαρκής και περιορισμένη, ιδιαίτερα ως προς τις μηχανικές αντοχές και την ανθεκτικότητα αυτού.

Συγκεκριμένα, το διαπερατό από το φως σκυρόδεμα πρωτοαναφέρθηκε με μια Καναδική πατέντα του 1935, ενώ τη δεκαετία του '90 αναπτύχθηκαν τέτοιου είδους προϊόντα από τον Aron Losonczi, που εφεύρε το LiTraCon, το οποίο πατενταρίστηκε στις ΗΠΑ το 2005. Η δημιουργία του LitraCon βασίστηκε στην προσθήκη πλαστικών οπτικών ινών σε ποσοστά 4% κο. Πιο πρόσφατα, η Ιταλική εταιρία Italcementi Group δημιούργησε τη δική της «εκδοχή» διαπερατού από το φως σκυροδέματος, το οποίο συνδυάζει τις καλύτερες ιδιότητες στοιχείων από σκυρόδεμα και διαφανών ανοιγμάτων. Το σκυρόδεμα αυτό ονομάστηκε ilight και παρουσιάστηκε το 2010 στη Σανγκάι ενώ παρουσιάστηκε επίσης στη Βόρεια Αμερική τον Οκτώβριο του 2011 και συγκεκριμένα στο Τορόντο σε ετήσια έκθεση για την «πράσινη» κατασκευή. Παρασκευάζεται ήδη σε Αυστρία, Γερμανία και Ουγγαρία ενώ είναι διαθέσιμο στην κατασκευαστική βιομηχανία

του Καναδά τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο η χρήση του δεν είναι ευρεία λόγω της οικονομικής κρίσης αλλά και της άγνοιας που υπάρχει πάνω στο νέο αυτό υλικό, κάνοντας τον κατασκευαστικό κλάδο επιφυλακτικό απέναντί του.

Σύμφωνα με προηγούμενη μελέτη της Κουμαρέλα Α., 2013 φωτοπερατό σκυρόδεμα με πλαστικές οπτικές ίνες σε ποσοστά 0.13 και 1.04% κο δύο διαμέτρων 0.25mm και 0.75mm αντίστοιχα και θραυστά αδρανή, εμφάνισε διαφοροποιήσεις ως προς τη θλιπτική αντοχή και την ανθεκτικότητα τέτοιων μιγμάτων συγκριτικά με το συμβατικό. Συγκεκριμένα η προσθήκη των ινών βρέθηκε να αυξάνει τη θλιπτική αντοχή σε όλα τα μίγματα έως ~9% και να μειώνει την αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες έως 12% έναντι 5% του συμβατικού.

Η Καψάσκη Κ., 2013 εξέτασε φωτοπερατό σκυρόδεμα με όμοιας διαμέτρου οπτικές ίνες, σε διαφορετικά όμως ποσοστά συμμετοχής (0.10 και 0.50% κο). Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, η μεγαλύτερης διαμέτρου ίνα εμφάνισε καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με την αντίστοιχη της μικρότερης διαμέτρου και συγκεκριμένα βελτίωσε τη θλιπτική αντοχή έναντι πυρκαγιάς (κατά 0.9%). Ωστόσο, το συμβατικό σκυρόδεμα χωρίς οπτικές ίνες εμφανίζει υψηλότερη θλιπτική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες έναντι αντίστοιχου με οπτικές ίνες (μείωση αντοχών 5% έναντι 10% των διαφανών σκυροδεμάτων).

Ο Φιλίππου, 2013 εξέτασε φωτοδιαπερατό σκυρόδεμα με οπτικές ίνες ομοίων διαστάσεων, σε ποσοστά συμμετοχής αυτών 0.16 και 0.71% κο. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, τα μίγματα με τη λεπτότερη ίνα παρουσίασαν συγκριτικά με το συμβατικό χωρίς ίνα σκυρόδεμα, την ίδια χαρακτηριστική αντοχή και υψηλότερες θλιπτικές αντοχές μετά τις 28 ημέρες (έως 2.2%) καθώς και μειωμένες αντοχές λόγω φωτιάς (9.4% έναντι 5.4% του συμβατικού).

Παράλληλα, μελέτη των Patil Gaurao S., Patil Swapnal V., 2015 εξέτασε τη συμπεριφορά σκυροδέματος με την προσθήκη πλαστικών οπτικών ινών και ειδικών φωτοδιαπερατών λεπτόκοκκων αδρανών. Βασικές ιδιότητες των παραγόμενων μιγμάτων ήταν η θλιπτική αντοχή να κυμαίνεται μεταξύ 150 MP και μέχρι 250 MPa.

Ωστόσο, η παρασκευή και ο έλεγχος σκυροδέματος που περιέχει τόσο συμβατικά όσο και ανακυκλωμένα αδρανή με οπτικές ίνες δεν έχει μελετηθεί προηγουμένως και εξετάζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ- ΥΛΙΚΑ

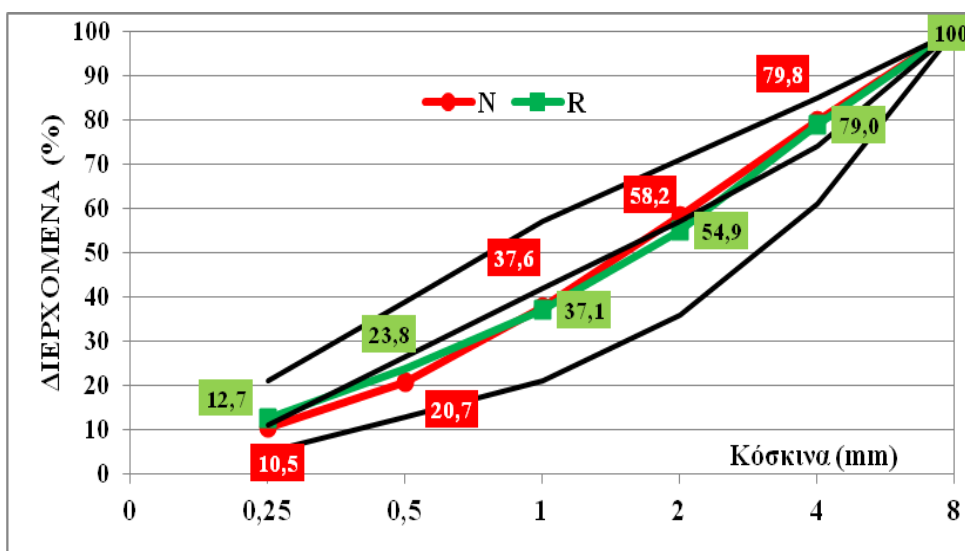
Συνθέσεις

Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά:

- Τσιμέντο CEM II/B-M (P-W-L) 42.5N (κατά EN197-1) της Lafarge

- Αδρανή με $D_{max}=8$ mm (τόσο συμβατικά όσο και ανακυκλωμένα). Τα ανακυκλωμένα αδρανή της παρούσας εργασίας ελήφθησαν από τις εγκαταστάσεις της μονάδας 'Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας Α.Ε.', της περιοχής Γέφυρα, στη δυτική περιφέρεια του νομού Θεσσαλονίκης.
- Πρόσθετο (Ρευστοποιητής Viscocrete Ultra 600)
- Πλαστικές οπτικές ίνες διαμέτρου 0.75mm. Οι ίνες προστέθηκαν σε ποσοστά 0,50% κο (μείγμα N/R0.50) και 0.71% κο (μείγμα N/R0.71) του σκυροδέματος, σε κάνναβο γραμμών-στηλών.

Παρασκευάστηκαν δύο σειρές μιγμάτων σκυροδέματος κατηγορίας σχεδιασμού C20/25 με απαιτούμενη αντοχή 31MPa, η πρώτη με συμβατικά αδρανή (κωδικός σύνθεσης N-Normal) και η δεύτερη με συμβατική άμμο και ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή (κωδικός σύνθεσης R-Recycled). Η κοκκομετρική διαβάθμιση των μιγμάτων βρίσκεται εντός των ορίων του ΚΤΣ 16 και καταγράφεται στο **Σχήμα 1**, ενώ οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών (συμβατικών και ανακυκλωμένων) δίνονται στον "Πίνακα 1".



Σχήμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών των μιγμάτων και όρια κατά ΚΤΣ-2016

Τα παραγόμενα δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 150x150x150mm συντηρήθηκαν σε θάλαμο (υγρασίας >95% και θερμοκρασία $20\pm 2^\circ$ C) σύμφωνα με το EN12390-2, αλλά μέχρι τις 150 ημέρες. Η θλιπτική αντοχή υπολογίστηκε στις 7, 28 και 150 ημέρες, ενώ η ανθεκτικότητα σε φωτιά μετρήθηκε στις 150 ημέρες.

Στον "Πίνακα 2", δίνονται οι αναλογίες μείξης των παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων.

Πίνακας 1. Βασικές φυσικές ιδιότητες συμβατικών και ανακυκλωμένων αδρανών υλικών

Αδρανές	Πυκνότητα (g/cm ³)	Υγρασία (%)
Συμβατική άμμος	2.65	4.5
Συμβατικό ρυζάκι	2.66	2.0
Ανακυκλωμένη άμμος	2.45	5.8
Ανακυκλωμένο ρυζάκι	2.51	2.9

Πίνακας 2. Αναλογίες μίξης σκυροδεμάτων (kg/m³)

Συστατικά μινεμάτων (σε kg/m ³)	N	R
Τσιμέντο	400	400
Νερό	244	244
Λόγος w/c	0.61	0.61
Συμβατική άμμος	791.91	765.61
Συμβατικό ρυζάκι	791.91	
Ανακυκλωμένο ρυζάκι		765.60
Ρευστοποιητής Viscocrete Ultra 600	1-2% κβ τσιμέντου	

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Εργασιμότητα

Πρώτος έλεγχος του παραγόμενου σκυροδέματος ήταν η μέτρηση της κάθισης, η οποία για τη σειρά N κυμάνθηκε μεταξύ 15-23cm, ενώ για τη σειρά R, η κάθιση κυμάνθηκε μεταξύ 12-20cm με μέση τιμή 17cm. Παρατηρείται ότι η εργασιμότητα των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή ήταν μικρότερη κατά 6,1% εξαιτίας της απορροφητικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών, η οποία μειώνει τη ρευστότητα.

Θλιπτική αντοχή και έμμεσες μέθοδοι (κρουσίμετρο και ηχώμετρο) στους 20°C

Στους "Πίνακες 4, 5, και 6" καταγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής, καθώς και των έμμεσων μεθόδων (αναπήδησης R του κρουσιμέτρου - Schmidt, τύπου N- και της ταχύτητας V των υπερήχων-PUNDIT) για όλα τα μίγματα και τα ποσοστά των ινών. Η θλιπτική αντοχή (κατά EN12390-3) για κάθε ηλικία αποτελεί τον MO 3 τιμών, η τιμή R της κρουσιμέτρησης (κατά EN12504-2:2012) υπολογίστηκε ως μέση τιμή 30 μετρήσεων (10 μετρήσεις ανά δοκίμιο ελέγχου) ενώ η ταχύτητα υπερήχων (κατά EN12504-4:2004) αποτελεί τη μέση τιμή 6 μετρήσεων (2 ανά δοκίμιο ελέγχου). Η κρουσιμέτρηση πραγματοποιήθηκε με φορά προς τα κάτω.

Πίνακας 4. Θλιπτική αντοχή (σε MPa) των μειγμάτων N (με συμβατικά αδρανή) και των μειγμάτων R (με συμβατική άμμο και ανακυκλωμένο γαρμπίλι), σε σχέση με το ποσοστό (κ.ό) των πλαστικών οπτικών ινών και την ηλικία

ΗΜΕΡΕΣ	N	N0.50	N0.71	R	R0.50	R0.71
7	25.6	29.2	28.2	15.0	14.0	14.6
28	35.1	36.9	37.3	21.4	19.8	20.9
150	54.6	60.8	58.8	34.9	35.2	36.2

Με βάση τον "Πίνακα 4", τα μίγματα της σειράς N ανέπτυξαν αντοχή 25.6-29.2 MPa, 35.1-37.3 MPa και 54.6MPa έως 60.8 MPa, στις 7, 28 και 150 ημέρες αντίστοιχα, ενώ τα μίγματα της σειράς R, ανέπτυξαν αντοχή 14.0 - 15.0, 19.8-21.4 MPa και 34.9-36.2 MPa, στις ίδιες ηλικίες, αντίστοιχα. Οι συνθέσεις με ανακυκλωμένα αδρανή εμφάνισαν χαμηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής της τάξης του 39-46% στις 28 ημέρες και 36-42% στις 150 ημέρες, μείωση η οποία αποδίδεται στα ανακυκλωμένα αδρανή που επικαλύπτονται με τσιμεντόπαστα, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαπερατότητας αυτών. Παρατηρείται ότι η μείωση σε μεγαλύτερη ηλικία είναι μικρότερη για το σύνολο των συνθέσεων, ενώ προσθήκη των ινών φαίνεται να λειτουργεί περισσότερο θετικά στη σειρά R ειδικά στις 150 ημέρες, στις οποίες η προσθήκη αυτή προκάλεσε αύξηση της τάξης του 3%. Όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή και για ηλικία 150 ημερών, καλύτερη εμφάνιση δίνει η σύνθεση N0.50 για τη σειρά N και R0.71 για τη σειρά R.

Πίνακας 5. Τιμές αναπήδησης του κρουσιμέτρου των μειγμάτων N (με συμβατικά αδρανή) και των μειγμάτων R (με συμβατική άμμο και ανακυκλωμένο γαρμπίλι), σε σχέση με το ποσοστό (κ.ό) των πλαστικών οπτικών ινών και την ηλικία

ΗΜΕΡΕΣ	N			R		
	N	N0.50	N0.71	R	R0.50	R0.71
7	16.1	17.3	17.5	12.6	12.5	11.6
28	18.5	20.0	20.7	14.0	13.7	13.7
150	21.3	24.7	25.2	16.2	16.9	16.9

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της κρουσιμέτρησης, τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα από την άμεση θραύση των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια της σειράς R εμφανίζουν μειωμένη επιφανειακή σκληρότητα συγκριτικά με τα αντίστοιχα της σειράς N και για τις τρεις ημερομηνίες ελέγχου. Και στην περίπτωση αυτή, η προσθήκη των οπτικών ινών προκαλεί αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας των δοκιμίων της σειράς N σε όλες τις ηλικίες ενώ στις 150 ημέρες η τάση αυτή συνεχίζεται μόνο για τις συνθέσεις με συμβατικά αδρανή. Το βέλτιστο ποσοστό προσθήκης ινών είναι 0.71% για τη σειρά N ενώ για τη σειρά R δε φαίνεται να υπάρχει βέλτιστο ποσοστό ινών.

Πίνακας 6. Ταχύτητα υπερήχων (Km/sec) των μειγμάτων N (με συμβατικά αδρανή) και των μειγμάτων R (με συμβατική άμμο και ανακυκλωμένο γαρμπίλι), σε σχέση με το ποσοστό (κ.ό) των πλαστικών οπτικών ινών και την ηλικία

ΗΜΕΡΕΣ	N	N0.5	N0.71	R	R0.5	R0.71
7	3.77	3.87	3.98	3.32	3.36	3.46
28	3.97	4.02	4.17	3.54	3.57	3.65
150	4.28	4.31	4.40	3.80	3.89	3.89

Τα αποτελέσματα της ταχύτητας υπερήχων επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα από τη θραύση και κρουσιμέτρηση των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, η τιμή της ταχύτητας υπερήχων είναι μικρότερη στα δοκίμια της σειράς R συγκριτικά με τα αντίστοιχα της σειράς N, ενώ η προσθήκη των οπτικών ινών φαίνεται να προκαλεί αύξηση της ταχύτητας υπερήχων για όλες τις εξεταζόμενες ηλικίες ελέγχου, καθώς οι ίνες φαίνεται να λειτουργούν ως περίσφιξη, μειώνοντας τα κενά και αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα των υπερήχων.

Θλιπτική αντοχή και έμμεσες μέθοδοι στους 250°C

Στην ηλικία των 150 ημερών, τα δοκίμια σκυροδέματος ελέγχθηκαν ως προς την ανθεκτικότητά τους σε υψηλή θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, πυρώθηκαν για 2 ώρες στη μέγιστη θερμοκρασία των 250°C και εν συνεχεία τα δοκίμια παρέμειναν στον κλίβανο για σχεδόν 20-24 ώρες, προκειμένου να κατέβει η θερμοκρασία σε τιμές κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έπειτα από την απομάκρυνσή τους από τον κλίβανο, τα δοκίμια, αφού κρουσιμετρήθηκαν και ηχομετρήθηκαν, θραύστηκαν. Τα αποτελέσματα της θλιπτικής τους αντοχής καταγράφονται στον "Πίνακα 7".

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, η αντοχή των συμβατικών μιγμάτων κυμάνθηκε από 47.0 έως 48.4 MPa, ενώ η αντίστοιχη των ανακυκλωμένων μιγμάτων από 24.8 έως 30.0 MPa. Η εναπομένουσα θλιπτική αντοχή μετά τη θέρμανση στους 250°C εκφράζεται ως ο λόγος f_{250}/f_{20} , όπου με f_{250} συμβολίζεται η αντοχή μετά τη θέρμανση στους 250°C και f_{20} η αντοχή του σκυροδέματος στους 20°C και δίνεται στον "Πίνακα 8". Στον ίδιο Πίνακα δίνονται και οι εναπομένουσες ενδείξεις του κρουσιμέτρου και του ηχομέτρου.

Πίνακας 7. Θλιπτική αντοχή (MPa) των μειγμάτων στους 20°C και 250 °C

Θερμοκρασία (°C)	N	N0.50	N0.71	R	R0.50	R0.71
20°C	54.6	60.8	58.8	34.9	35.2	36.2
250°C	48.4	48.4	47.0	29.9	30.0	24.8

Πίνακας 8. Εναπομένονσα θλιπτική αντοχή f , τιμή κρουσιμέτρησης R και ήχος υπερήχων V της σειράς N- με συμβατικά αδρανή- και R- με συνδυασμό συμβατικών και ανακυκλωμένων αδρανών- για τις θερμοκρασίες 20 και 250°C, για τα διάφορα ποσοστά ινών

% ίνες	Θλιπτική αντοχή			Κρουσιμέτρηση			Ταχύτητα υπερήχων		
	0	0.5	0.71	0	0.5	0.71	0	0.5	0.71
N	0.89	0.79	0.79	0.95	1.02	1.04	0.61	0.57	0.61
R	0.86	0.85	0.69	1.17	1.11	1.02	0.66	0.55	0.56

Παρατηρείται ότι όλες οι συνθέσεις N-R χάνουν ποσοστό της αντοχής τους στους 250°C ανεξαρτήτως του είδους των αδρανών. Για τη μεν σειρά N, η προσθήκη των ινών προκάλεσε μείωση της αντοχής κατά 10%, ενώ για τη σειρά R, η μείωση για τη σύνθεση με 0.5% κο ίνες δεν παρουσίασε μείωση ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό (0.71%κο) προκάλεσε περαιτέρω μείωση της αντοχής κατά 17%. Στη θερμοκρασία των 250 °C, οι ίνες έχουν λειώσει και τα δοκίμια χάνουν την φωτοπερατότητά τους.

Τα αποτελέσματα των έμμεσων δεν συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής καθώς η πύρωση στους 250 βαθμούς αύξησε τη σκληρότητα των επιφανειών κάποιων μιγμάτων, και μείωσε πολύ τις ενδείξεις του ηχομέτρου. Τα παραπάνω μπορούν να αποδοθούν στην διεύρυνση τυχόν εσωτερικών μικρορηγματώσεων και των κενών που άφησαν οι λιωμένες ίνες.

Βαθμονόμηση εμμέσων

Με γραμμική παλινδρόμηση των ζευγών τιμών αντοχής f και έμμεσων μεθόδων R και V δημιουργήθηκαν σχέσεις βαθμονόμησης των εμμέσων, της συσχέτισης δηλ της αντοχής με το κρουσίμετρο και με το ηχώμετρο. Τα σχετικά αποτελέσματα f - R και f - V στους 20°C δίνονται στον "Πίνακα 9" ενώ τα αντίστοιχα στους 250°C δίνονται στον "Πίνακα 10".

Πίνακας 9. Σχέσεις συσχέτισης f - R και f - V της σειράς N- με συμβατικά αδρανή- και R- με συνδυασμό συμβατικών και ανακυκλωμένων αδρανών- στους 20°C, για τα διάφορα ποσοστά ινών

Ίνες (% κο)	ΣΕΙΡΑ N $f(R)$	ΣΕΙΡΑ R $f(R)$	ΣΕΙΡΑ N $f(V)$	ΣΕΙΡΑ R $f(V)$
0	$f=0.848e^{0.2293R}$	$f=2.3721e^{0.1466R}$	$f=0.096e^{1.4838V}$	$f=0.0429e^{1.7612V}$
0.5	$f=5.322e^{0.1063R}$	$f=1.1554e^{0.2154R}$	$f=0.0506e^{1.6423V}$	$f=0.0433e^{1.7201V}$
0.71	$f=1.7379e^{0.1652R}$	$f=1.437e^{0.2021R}$	$f=0.0258e^{1.7543V}$	$f=0.0105e^{2.09V}$

Πίνακας 10. Σχέσεις συσχέτισης f-R και f-V της σειράς N- με συμβατικά αδρανή- και R- με συνδυασμό συμβατικών και ανακυκλωμένων αδρανών- στους 250°C, για τα διάφορα ποσοστά ινών

Ίνες (% κο)	ΣΕΙΡΑ N f(R)	ΣΕΙΡΑ R f(R)	ΣΕΙΡΑ N f(V)	ΣΕΙΡΑ R f(V)
0	$f=2.1007e^{0,154R}$	$f=0.7269e^{0,1961R}$	$f=0.085e^{1,5641V}$	$f=0.0372e^{1,8573V}$
0.5	$f=4.1067e^{0,0973R}$	$f=0.4703e^{0,2487R}$	$f=0.0398e^{1,614V}$	$f=0.0342e^{1,6906V}$
0.71	$f=4.1519e^{0,092R}$	$f=1.5927e^{0,1639R}$	$f=0.02e^{1,6816V}$	$f=0.008e^{2,0038V}$

Ο συντελεστής συσχέτισης R^2 για τις παραπάνω σχέσεις και για τους 20°C κυμάνθηκε μεταξύ 0.9942-0.9992 ενώ για τους 250°C κυμάνθηκε στο 1 για το σύνολο των συνθέσεων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας και δεδομένης της ανάγκης παρασκευής ειδικού τύπου σκυροδέματος το οποίο θα επιτρέπει τη διέλευση του φωτός μέσω της μάζας του, ενώ ταυτόχρονα θα περιέχει και ανακυκλωμένα αδρανή προστατεύοντας του φυσικούς πόρους, παρασκευάστηκαν μίγματα σκυροδέματος μόνο με συμβατικά αδρανή με αντοχές της τάξης των ~55MPa στις 150 ημέρες, ενώ αντίστοιχα με συνδυασμό συμβατικών και ανακυκλωμένων αδρανών με αντοχές της τάξης των ~35MPa. Όσον αφορά στις αντοχές αυτών στις θερμοκρασίες ελέγχου, τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω:

Αντοχή στους 20°C

Σε σχέση με το συμβατικό σκυροδέμα, τα ανακυκλωμένα μίγματα παρουσίασαν μειωμένες αντοχές κατά 36-42%, ωστόσο οι απώλειες αυτές μειώνονται με το χρόνο. Η προσθήκη ινών φαίνεται να λειτουργεί περισσότερο θετικά στη σειρά R ειδικά στις 150 ημέρες, στις οποίες η προσθήκη ινών προκάλεσαν αύξηση της τάξης του 3%. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα αποτελέσματα των έμμεσων μεθόδων.

Αντοχή στους 250°C

Τα ανακυκλωμένα μίγματα, λόγω της πύρωσης, παρουσίασαν μεγαλύτερες του συμβατικού απώλειες αντοχής κατά 3% όταν δεν έχουν ίνες και κατά 10% όταν έχουν. Η προσθήκη ινών αυξάνει τις απώλειες της θλιπτικής αντοχής κατά 10% στα συμβατικά σκυροδέματα και κατά 1-17% στα ανακυκλωμένα μίγματα. Τα αποτελέσματα των έμμεσων βρίσκονται σε αναντιστοιχία.

Τέτοιου είδους σκυροδέματα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την εξοικονόμηση ενέργειας, όταν αυτά χρησιμοποιούνται ως εξωτερικοί τοίχοι πλήρωσης. Η εξοικονόμηση αυτή είναι εφικτή, λόγω χρήσης λιγότερης

ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας, δεδομένης της εισόδου του φωτός στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου, καθιστώντας έτσι την κατασκευή τόσο περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον όσο και ενεργειακά συμφέρουσα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες στους διπλωματούχους Πολιτικούς Μηχανικούς ΔΠΘ, Άγγελο Γαϊτάνη, Νίκο Γκολέμη, Κωνσταντίνα Φωτοπούλου και Ιωάννα Σιούτη για την άψογη συνεργασία κατά τη διάρκεια της ερευνητικής εργασίας καθώς και στην κα Ισαακίδου Ευαγγελία, για τη συμβολή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας, ειδικά στο θέμα ελέγχων ανθεκτικότητας των εξεταζόμενων μιγμάτων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αλεξανδρή, Α., «*Οπτοηλεκτρονική, Θεωρία – Εφαρμογές – Πειράματα*», Τζιόλα, Θεσσαλονίκη (2010)

Εφημερίδα της Κυβερνήσεως Νο1312, “Μέτρα, Όροι και Πρόγραμμα για την Εναλλακτική Διαχείριση των Αποβλήτων από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ)” (2010)

Καγάσκη, Κ., «Διάφανο σκυρόδεμα με πλαστικές οπτικές ίνες (0.10 και 0.5% κο)», Διπλωματική Εργασία (υπό την επίβλεψη της Καθ. Α. Σάββα), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη (2013)

Κουμαρέλα, Α., «Φωτοδιαπερατό σκυρόδεμα με πλαστικές οπτικές ίνες (0.13 και 1.04%κο)», Διπλωματική Εργασία (υπό την επίβλεψη της Καθ. Α. Σάββα), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη (2013)

Φιλίππου, Θ., «Φωτοδιαπερατό σκυρόδεμα με πλαστικές οπτικές ίνες (0.16 και 0.71% κο)», Διπλωματική Εργασία (υπό την επίβλεψη της Καθ. Α. Σάββα), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη (2013)

Fowler, D.W., “Polymers in concrete: a vision for the 21st century”. Cement & Concrete Composites, Vol. 21 (1999) 449-452

Dinesh, W.G., Giri, S.D. & Bande, B.B., “Transparent Concrete as an eco-friendly material for building”. International Journal of Engineering Science Invention, Vol 5, No 3 (2016) 55-62

EN 933-1 Tests for geometrical properties of aggregates – determination of particle size distribution – sieving method, 1997

EN 12390-2 Testing hardened concrete: Making and curing specimens for strength tests, 2009

EN 12390-3 Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens, 2009

EN 12504-2 Testing concrete in structures/Non-destructive testing: Determination of rebound number, 2012

EN 12504-4 Testing concrete: Determination of ultrasonic pulse velocity, 2004

Eurostat 2016: <http://ec.europa.eu/enviromnet/waste/studies/pdf/CDW%20Statistics%202011.pdf> (τελευταία πρόσβαση: 8/11/2017)

<http://anakyklosi-am.gr> (Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας) (τελευταία πρόσβαση: 10/11/2017)

LiTraCon, <http://www.litracon.hu> (τελευταία πρόσβαση: 10/11/2017)

Patil, G.S. & Patil, S.V., “Light Transmitting Concrete- A New Innovation”. International Journal of Engineering Research and General Science, Vol 3, No 2, (2015) 806-811