

Πειραματική Διερεύνηση Τσιμεντοκονιάματος Ινοπλισμένου με Ίνες Πολυπροπυλενίου με Μεταβλητό Λόγο Νερό/Τσιμέντο

Experimental Study on Polypropylene Fiber Reinforced
Cementitious Mortar by Variable Water/Cement Ratio.

Νικόλαος ΝΙΚΟΛΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ¹, Σοφία ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΥ²

*Λέξεις κλειδιά: Τσιμεντοκονίαμα, Μικρού μήκους ίνες Πολυπροπυλένιο, Λόγος
N/T, Εργασιμότητα, Αεροπεριεκτικότητα, Κάμψη, Θλίψη, Αντοχή*
*Key words: Cementitious Mortar, Short fibers, Polypropylene, W/C ratio,
Workability, Air Content, Bending, Compressive, Strength.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η τεχνική της ενίσχυσης των τσιμεντοκονιαμάτων με τυχαία κατανεμημένες ίνες μικρού μήκους επεμβαίνει αποτελεσματικά στην σταθεροποίηση των μικρορηγματώσεων, τη βελτίωση της ολκιμότητας και της αντοχής εφελκυσμού τους. Έχουν γίνει πολλές έρευνες στο παρελθόν με μεγάλη ποικιλία ινών μικρού μήκους για τα τσιμεντοκονιάματα, συμπεριλαμβανομένου των χαλύβδινων, των συνθετικών και των φυσικών ινών. Η ενίσχυση των κονιαμάτων με ίνες πολυπροπυλενίου (PP) θεωρείται πολύ αποτελεσματική μέθοδος για τη βελτίωση της συρρίκνωσης, της ανθεκτικότητας και της αντοχής του τσιμεντοειδούς υλικού. Στην παρούσα έρευνα παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ινοπλισμένα κονιάματα, με ίνες PP, σταθερής σύνθεσης, με μεταβλητό λόγο Νερού/Τσιμέντο (N/T). Σε όλες τις συνθέσεις μετρήθηκαν η εργασιμότητα, η αεροπεριεκτικότητα και η αντοχή τους σε κάμψη αλλά και σε μονοαξονική θλίψη. Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί, ότι παρόλο που μεταβαλλόμενου του λόγου N/T, μεταβάλλονται ικανά και οι ιδιότητες των κονιαμάτων, είναι δυνατό, με κατάλληλο σχεδιασμό των μιγμάτων, όλες οι μελετηθείσες συνθέσεις να παράγουν ικανά κονιάματα που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων και εφαρμογών.

ABSTRACT: The reinforcement of cementitious mortars with randomly distributed short fibers provides an efficient approach to the stabilization of their cracking, ductility and strength. A variety of short fibers, including steel, synthetic and natural fibers, has been evaluated in the past for mortar. Polypropylene (PP) fiber reinforced mortar is considered an effective method for improving the

¹ Εκπαιδευτικός Τεχνολόγος Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υπ. Διδάκτορ Ε.Μ.Π., email:
nikolasnikoloutso@hotmail.com

² Πολιτικός Μηχανικός, BEng, email: sofianikolopoulou@outlook.com

shrinkage characteristics, toughness and impact resistance of cementitious material. In this paper, polypropylene fiber reinforced cementitious mortar by variable water/cement (W/C) ratio were produced. For all the mixtures workability, air content, bending strength and compressive strength were measured. The general conclusion is thus, even though mortars' strength is altered sufficiently as the W/C ratio changes, it is achievable with appropriate composition, to produce mortars that can be successfully applied in a wide demand and application range.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ινοπλισμένα κονιάματα έχουν γίνει μεγάλος πόλος έλξης ερευνάς και εφαρμογής τα τελευταία χρόνια. Έχει γίνει έρευνα σε πολλών διαφορετικών ειδών ίνες, διαφορετικές σε μεγέθη και σε ιδιότητες, αλλά και σε υλικό. Η χρήση του κάθε κονιάματος ορίζει και τη σύνθεση, αλλά και τις απαιτούμενες ιδιότητες φυσικές και μηχανικές.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένες, ίνες για κονιάματα, είναι οι μικρού μήκους ίνες, οι οποίες μειώνουν τις μικρορωγμές που πιθανόν να εμφανιστούν κατά τη συστολή ξήρανσης και όχι μόνο και βελτιώνουν τις αντοχές του σκληρυμένου κονιάματος. Σε καμία περίπτωση οι ίνες δεν αντικαθιστούν τον στατικό οπλισμό, αλλά είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν τον οπλισμό έναντι ρηγματώσεων.

Όμως, η έρευνα θα πρέπει να είναι κοντά στην βιομηχανία παραγωγής και να αποσκοπεί στην εφαρμογή προϊόντων της στα έργα του πολιτικού μηχανικού κάνοντας το έργο των χρηστών πιο εύκολο. Πιο συγκεκριμένα, τα παραγόμενα κονιάματα διαφορετικών ιδιοτήτων, έχουν διαφορετικό τρόπο εφαρμογής με αποτέλεσμα αρκετές φορές να χρειάζεται ειδική εκπαίδευση ο χρήστης για την εφαρμογή τους. Ιδανικά λοιπόν θα ήταν να μπορούν να παραχθούν κονιάματα διαφορετικών ιδιοτήτων, αλλά παρόμοιου τρόπου εφαρμογής προς διευκόλυνση του χρήστη.

Αντικείμενο της παρούσας έρευνας ήταν να επιτευχθεί ένα θιξοτροπικό κονίαμα σταθερής εργασιμότητας, αλλά κλιμακωτών αντοχών για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί κατά περίπτωση. Απώτερος στόχος είναι το ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα να μπορεί να αποτελέσει μέρος εφαρμογών ενίσχυσης μικρών έως και μεγάλων απαιτήσεων ινοπλισμένων κονιαμάτων στη δομική μηχανική, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται από απλά πεζοδρόμια μέχρι και ενίσχυση φέρουσας και μη φέρουσας τοιχοποιίας.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο πέντε (5) διαφορετικών συνθέσεων ινοπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με μικρού μήκους ίνες πολυπροπυλενίου (PP). Σε όλες τις συνθέσεις η αναλογία τσιμέντου – αδρανών ήταν σταθερή (1:3), ενώ ο λόγος Νερό/Τσιμέντο (N/T) ήταν κυμαινόμενος από 0.50 έως 0.70. Όσο μειωνόταν το νερό και μειωνόταν και ο λόγος N/T, για να κρατηθεί η παράμετρος της εργασιμότητας σταθερή χρησιμοποιήθηκε χημικό πρόσμικτο, υπερρευστοποιητής, επί τοις εκατό κατά βάρος τσιμέντου κατά περίπτωση.

Σε όλες τις συνθέσεις οι ίνες PP προστέθηκαν σε 0.5% κατ' όγκο μίγματος σταθερής σύνθεσης. Το ποσοστό των ινών που επιλέχθηκε βασίστηκε σε προηγούμενη έρευνα που έδειξε πως η βέλτιστη συνεισφορά τους στις ιδιότητες της συγκεκριμένης σύνθεσης κονιάματος είναι το 0.5% κ.ό. μίγματος (Pandermarakis Z.G, 2012a).

Υλικά

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν σύνθετο Portland τύπου CEM II/A-LL 42,5N. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο τσιμέντο λόγω της κοινής του χρήσης και των αυξημένων αντοχών.

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν πόσιμο, το οποίο προερχόταν από το εθνικό δίκτυο ύδρευση.

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεγίστου κόκκου 4 mm (άμμος), με ποσοστό παιπάλης 12% και ιδιοτήτων που ικανοποιούν το EN 13139.

Οι ίνες πολυπροπυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μήκους 6 mm και ειδικού βάρους 0,910 g/cm³, με εμπορική ονομασία SikaFibers®, οι οποίες δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο με αποτέλεσμα να προσφέρουν βελτίωση της αντοχής του σκληρυμένου κονιάματος.

Το χημικό πρόσμικτο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας ισχυρός υπερρευστοποιητής με εμπορική ονομασία Sika® Viscoflow - 700 (VF), όπου αυξάνει τη ρευστότητα του κονιάματος και δημιουργεί ικανότητα παρατεταμένης εργασιμότητας.

Σύνθεση Κονιαμάτων

Η ακριβής σύνθεση των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν δίνεται στον Πίνακα 1. Η σύνθεση των κονιαμάτων περιλαμβάνει μηχανική ανάδευση των υλικών, μεταφορά του μείγματος σε πρισματικές μήτρες διαστάσεων 160x40x40 mm, όπου συντηρήθηκαν εκεί για 24 ώρες σκεπασμένες με βρεγμένες λινάτσες στο χώρο του εργαστηρίου. Στη συνέχεια, συντηρήθηκαν σε περιβάλλον με υγρασία 100% και θερμοκρασία 20°C μέχρι τη συμπλήρωση της προγραμματισμένης ηλικίας ελέγχου τους.

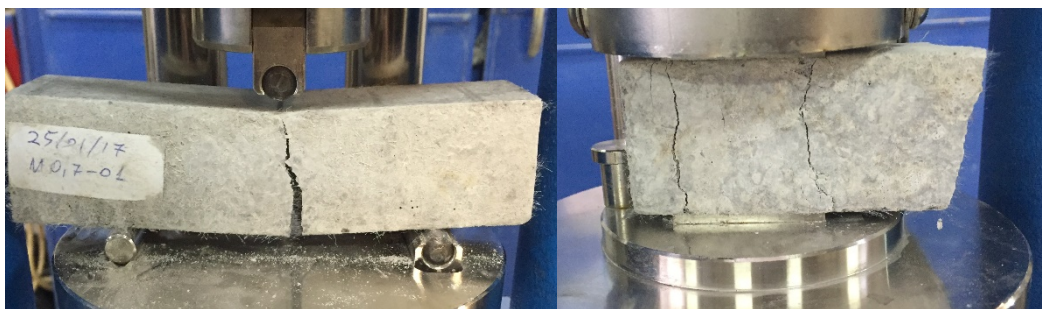
Πίνακας 1. Συνθέσεις κονιαμάτων

Λόγος N/T	Τσιμέντο (g)	Άμμος (g)	Νερό (g)	Ίνες (g)	Υπερρευστοποιητής (g)
0.50			250.0		12.5
0.55			275.0		7.0
0.60	500.0	1500.0	300.0	4.6	3.0
0.65			325.0		1.0
0.70			350.0		-

Εργαστηριακές Δοκιμές

Σε όλες τις παραπάνω συνθέσεις μετρήθηκε η εργασιμότητα με τη μέθοδο της τράπεζας εξάπλωσης, όπως περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C 1437.

Μετρήθηκε το ποσοστό αεροπεριεκτικότητας με τη συσκευή που περιγράφει το πρότυπο EN 1015-7 και υπολογίστηκε έμμεσα το Ειδικό Βάρος τους σε νωπή κατάσταση.



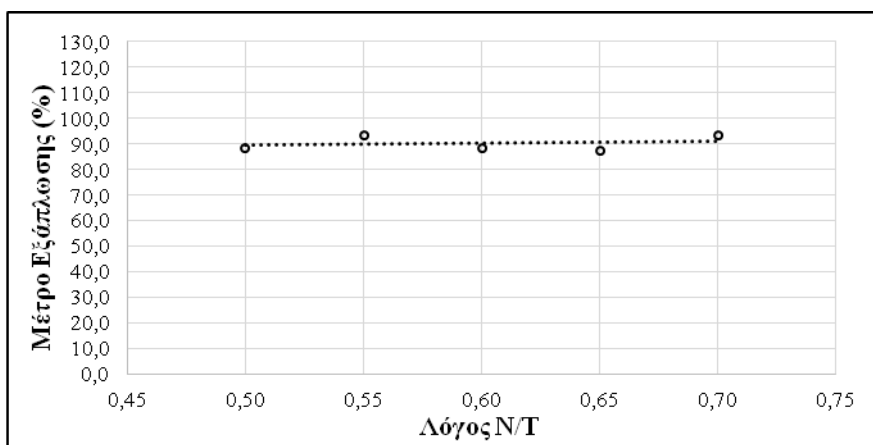
Σχήμα 1. Δοκίμιο μετά από καταπόνηση σε δοκιμή κάμψης 3^{ov} σημείων (αριστερά) και σε μονοαξονική θλίψη (δεξιά).

Παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 160x40x40 mm στα οποία ελέγχθηκαν οι αντοχές σε κάμψη τριών σημείων και μονοαξονική θλίψη (βλ. Σχήμα 1) σε ηλικίες 7, 28, 60 και 90 ημερών. Ο ρυθμός φόρτισης στην κάμψη ήταν 0.03 KN/sec και στην θλίψη 0.5 KN/sec (EN 1015-11).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μετρήσεις Νωπού Κονιάματος

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το μέτρο εξάπλωσης όλων των συνθέσεων, το οποίο εκφράζει την εργασιμότητα. Η εργασιμότητα του κονιάματος ήταν η παράμετρος που κρατήθηκε σταθερή, κάτι το οποίο επιτεύχθηκε, αφού κυμάνθηκε $90 \pm 2.5\%$.



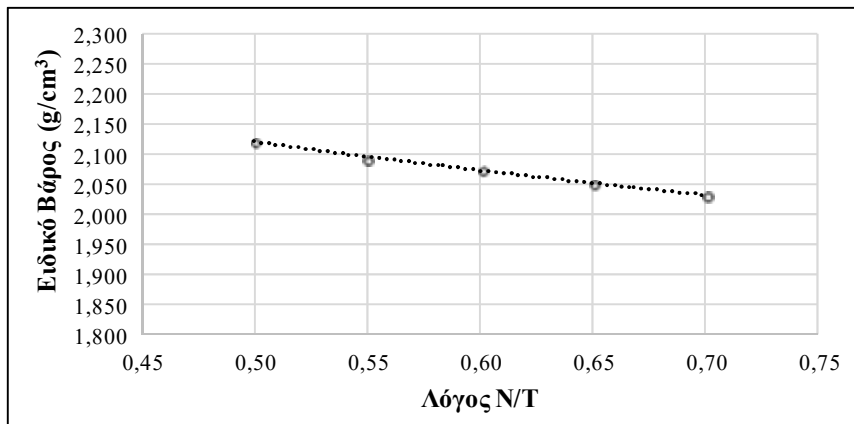
Σχήμα 2. Η εργασιμότητα των κονιαμάτων εκφρασμένη μέσω του μέτρου εξάπλωσης συναρτήσει του λόγου N/T

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 που δίνεται το περιεχόμενο ποσοστό αέρα στα κονιάματα σε όλες τις συνθέσεις, παρατηρείται ότι έμεινε σχεδόν σταθερό στο $4.5 \pm 0.1\%$, παρόλο που άλλαξε ο λόγος N/T. Το ποσοστό αυτό αν και αυξημένο, είναι λογικό και αποδεκτό λόγω της ύπαρξης των ινών στο μίγμα.

Πίνακας 2. Περιεχόμενο ποσοστό αέρα στα κονιάματα

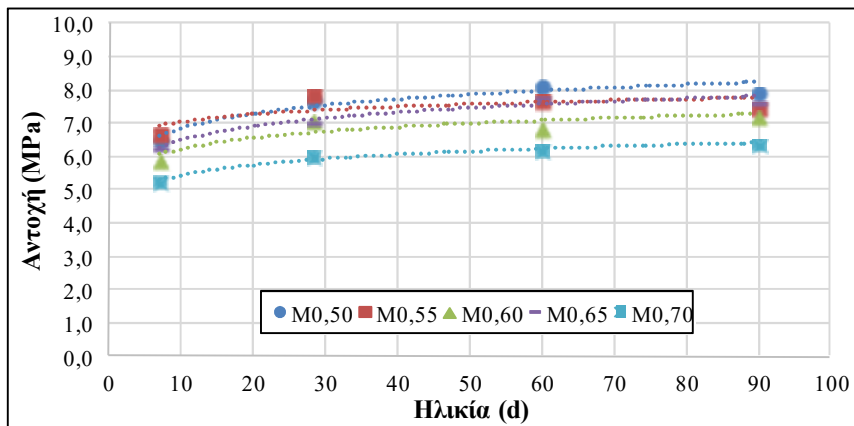
Λόγος N/T	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Αεροπεριεκτικότητα (%)	4.5	4.5	4.7	4.4	4.6

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το Ειδικό Βάρος των κονιαμάτων όλων των συνθέσεων, όπου φαίνεται πως η αύξηση του λόγου N/T το μειώνει αισθητά. Η μείωση αυτή ήταν αναμενόμενη, αφού στον συνολικό όγκο του μείγματος προστέθηκε νερό και μειώθηκαν αναλογικά τα υπόλοιπα υλικά



Σχήμα 3. Η μεταβολή του Ειδικού Βάρους με την αύξηση του λόγου N/T.

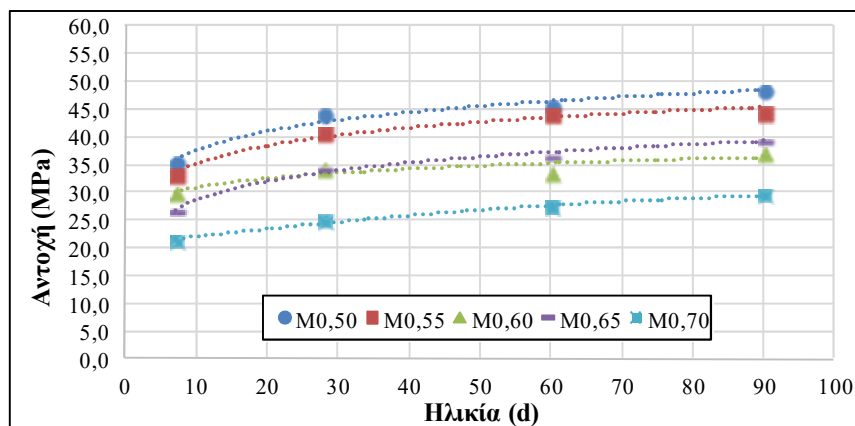
Μετρήσεις Σκληρυμένου Κονιάματος



Σχήμα 4. Η αντοχή σε κάμψη τριών σημείων όλων των συνθέσεων σε σχέση με την ηλικία.

Όπως φαίνεται στο το Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι αντοχές σε κάμψη τριών σημείων, όσο αυξάνονται ωριμάζει το κονίαμα, ανεξαρτήτου σύνθεσης, η αντοχή σε κάμψη αυξάνεται με την ίδια αναλογία. Επίσης, η αντοχή με τη μεταβολή του λόγου N/T μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα, δηλαδή όσο αυξάνεται ο λόγος, μειώνονται οι αντοχές, κάτι το αναμενόμενο. Όμως, σημαντική πληροφορία είναι ότι ανεξαρτήτου ηλικίας η διαφορά της αντοχής σε κάμψη παραμένει. Η διαφορά των αντοχών μεταξύ του μέγιστου με τον ελάχιστο λόγο N/T είναι της τάξης του 25%.

Αντίστοιχη συμπεριφορά έχουν τα κονιάματα όλων των συνθέσεων και στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 5, με τη μόνη διαφορά ότι εδώ η διαφορά των αντοχών μεταξύ του μέγιστου με τον ελάχιστο λόγο N/T είναι της τάξης του 40%.



Σχήμα 5. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη όλων το συνθέσεων σε σχέση με την ηλικία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ως αναμενόμενο συμπέρασμα μπορεί εύκολα να αναφερθεί ότι με τη βοήθεια του κατάλληλου χημικού πρόσμικτου μπορεί να κρατηθεί σταθερή η εργασιμότητα του κονιάματος παρά τις μεταβολές του λόγου N/T.

Επίσης, συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ότι με την επίτευξη της σταθερής εργασιμότητας, όσο μειωνόταν ο λόγος N/T, αυξανόταν αισθητά το ειδικό βάρος, ενώ δείχνει να μην επηρεάζεται καθόλου η αεροπεριεκτικότητα.

Οι αντοχές τόσο σε κάμψη όσο και σε μονοαξονική θλίψη, όπως ήταν

αναμενόμενο αυξάνονταν στο χρόνο σε όλες τις συνθέσεις και μάλιστα με την ίδια αναλογία. Ταυτόχρονα επιτεύχθηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη να κυμαίνεται 30 – 50 MPa και η αντοχή σε κάμψη 6 – 8 MPa στις αντίστοιχες συνθέσεις.

Ως τελικό συμπέρασμα από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι τα κονιάματα των συγκεκριμένων συνθέσεων είναι ικανά να χρησιμοποιηθούν σε διάφορων απαιτήσεων ενισχύσεις και μάλιστα με ακριβώς την ίδια συμπεριφορά κατά την τοποθέτηση, κάνοντας τα εύχρηστα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το Εργαστήριο Ποιοτικού Ελέγχου της Τεχνικής Εταιρείας ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Τ.Ε. για την παραχώρηση του εργαστηρίου της για την διεκπεραίωση των πειραμάτων. Ευχαριστίες εκφράζονται ακόμα και στην εταιρεία Sika Hellas A.B.E.E. για τη χορηγία των ινών και του χημικού πρόσμικτου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, (2015)

EN 197-1, Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements, (2011)

EN 934-1, Admixtures for concrete, mortar and grout. Common requirements (2008)

EN 998-1, Specification for mortar for masonry. Rendering and plastering mortar (2016)

EN 998-2, Specification for mortar for masonry. Masonry mortar (2016)

EN 1015-2 Methods of test for mortar for masonry. Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars, (1999)

EN 1015-7, Methods of test for mortar for masonry. Determination of air content of fresh mortar, (1999)

EN 1015-11 Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, (1999)

EN 13139, Aggregates for mortar, (2013)

Pandermarakis Z. G., Sotiropoulou A.B., Nikoloutsopoulos N.D. and Passa D.P., “Experimental Study of Fiber reinforced Mortars that are used in the Restoration of Traditional Buildings”, Sustainable Development, culture,

traditions Journal, Vol.1, p.p. 15-30, (2012).

Pandermarakis Z. G., Sotiropoulou A.B. and Nikoloutsopoulos N.D, “The Influence of Short Glass and Polypropylene Fibers on First Crack Formation and Toughness of Cement Based Composites after their Exposure to Fire Condition”, Key Engineering Materials (KEM) Vols. 488-489, p.p. 569-572, (2012).

Pandermarakis Z. G., Sotiropoulou A.B., Nikoloutsopoulos N.D, “Structural integrity breakdown of fiber reinforced cement based composites after their exposure to high temperatures”, 1st National Conference on Fracture Mechanics of Materials and Structures, Xanthi, Greece, October 20-23, (2010).

Κορωναίος Α., Πουλάκος, Γ., «Τεχνικά Υλικά, Τόμος 1». Αθήνα, (2006).

Σωτηροπούλου Α.Β., Πανδερμαράκης Ζ.Γ., Κανελλοπούλου Β. και Σκουλικάρη Μ., «Η επίδραση των Ινών Υάλου και Προπυλενίου στην Αντοχή Ινοπλισμένων Κονιαμάτων με Αδρανές Μάρμαρο», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών & Στοιχείων, σελ. 1421-14331, Αθήνα (2008).

Τριανταφύλλου Α., «Δομικά Υλικά», Πάτρα (2013).