

# Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΥΑΛΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΔΡΑΝΕΣ ΜΑΡΜΑΡΟ

Αναστασία Β. Σωτηροπούλου

*Δρ. Πολ. Μηχ., Καθηγήτρια – Προϊσταμένη Τμημ. Εκπ/κών Πολ. Δομ. Έργων ΑΣΠΑΙΤΕ*

Ζαχαρίας Γ. Πανδερμαράκης

*Δρ. Μηχανικός – Επιστημ. Συνεργ. ΑΣΠΑΙΤΕ*

Βάσω Κανελλοπούλου

*MSc in Structural Design and Construction Management - Πτυχιούχος ΑΣΠΑΙΤΕ*

Μαλαματένια Σκουλικάρη

*MSc in Structural Design and Construction Management - Πτυχιούχος ΑΣΠΑΙΤΕ*

*Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο κονίαμα, αδρανή από μάρμαρο, ίνες υάλου, ίνες πολυπροπυλενίου, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Μελετήθηκε η θλιπτική και καμπτική αντοχή ενισχυμένων κονιαμάτων με διάσπαρτες ίνες πολυπροπυλενίου και υάλου. Χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές μάρμαρο με μέγιστο κόκκο 4mm ενώ ελέγχθησαν δοκίμια με περιεκτικότητες ινών κατ'όγκο 0.07%, 0.13% και 0.26%. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η προσθήκη έστω και μικρού ποσοστού ινών επηρεάζει τόσο τη θλιπτική όσο και την εφελκυστική αντοχή όπως και την πλαστιμότητά τους.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα επισκευαστικά κονιάματα έχουν ευρύτατα χρησιμοποιηθεί για την επισκευή και ενίσχυση διαφόρων στοιχείων δομικών κατασκευών. Φέροντα στοιχεία που έχουν υποστεί σοβαρές βλάβες από σεισμούς απαιτούν κατά την ενίσχυσή τους κονιάματα που να εμφανίζουν υψηλή πλαστιμότητα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα με κοντές ίνες ινοπλισμένα κονιάματα. Ένα μεγάλο εύρος ινών, τεχνητών και φυσικών, δύναται σήμερα να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυσή τους όπως και αντίστοιχα ένα εξίσου μεγάλο εύρος αδρανών. Τα προκύπτοντα όμως με αυτόν τον τρόπο προτεινόμενα κονιάματα απαιτούν μια συστηματικότερη διερεύνηση. Η χρήση αδρανών από μάρμαρο είναι μια από τις καινοτομικές εκείνες

διαφοροποιήσεις που εμφανίζονται σήμερα στην τεχνολογία κονιαμάτων ιδίως στον ελλαδικό χώρο όπου άφθονα λεπτόκοκκα κλάσματα μαρμάρου παράγονται κατά την εξορυκτική διαδικασία και κατεργασία του μαρμάρου. Πολλές φορές θραύσματα μαρμάρου ή όχι τόσο ποιοτικά τμήματα απορρίπτονται ως απόρριμμα και έτσι είναι σημαντικό στοιχείο η διερεύνηση της δυνατότητας εναλλακτικής και ωφέλιμης αξιοποίησής τους (Sotiropoulou A.B. & Pandermarakis Z.G. 2006, Corinaldesi V et al 2005). Στη συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκε πειραματικά η θλιπτική και η καμπτική αντοχή όπως και η πλαστιμότητα ινοπλισμένων κονιαμάτων με αδρανές μάρμαρο.

## ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Στα ινοπλισμένα κονιάματα, κοντές ίνες διασπείρονται ομοιόμορφα εντός της κονιάς κατά το στάδιο της ανάμιξης οδηγώντας στην παρασκευή ενός ομογενούς μίγματος και τελικά κονιάματος. Η χρήση διάσπαρτων ινών εντός του κονιάματος οδηγεί στην αύξηση της καμπτικής αντοχής και της πλαστιμότητας ενώ γενικά το οδηγεί σε μια πιο ανθεκτική συμπεριφορά περιορίζοντας την διάδοση των αναπτυσσόμενων ρωγματώσεων. Κατά συνέπεια στη μείωση της ψαθυρότητάς τους. Το εφαρμοζόμενο φορτίο μεταφέρεται από τη μήτρα στην ίνα από όπου μετά την θραύση αναλαμβάνεται εξ'ολοκλήρου από τις ίνες μέχρι να αποκολληθούν ή να αστοχήσουν (Daniel J & Shah S 1994, Mullick et al. 2006). Έτσι έως την θραύση της μήτρας το ενισχυμένο κονίαμα συμπεριφέρεται ως άοπλο. Στην συνέχεια όμως οι ίνες αναλαμβάνουν τη μεταφορά του επιβαλλόμενου φορτίου αυξάνοντας την ολκιμότητά του. Επίσης η χρήση ινών βελτιώνει την αντοχή σε διάρρηξη αλλά και την συστολή ξήρανσης. Από την άλλη, έχει αναφερθεί ότι η χρήση ινών όπως οι ίνες πολυπροπυλενίου οδηγούν σε πτώση της θλιπτικής αντοχής. Στις βιβλιογραφικές αναφορές παρατηρούμε ότι αναμένεται παρόμοια συμπεριφορά σε όλες τις κατευθύνσεις λόγω της ομοιόμορφης διασποράς των ινών. Οι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν τις τελικές ιδιότητες των ινοπλισμένων κονιαμάτων είναι το είδος της χρησιμοποιούμενης ίνας, ο προσανατολισμός τους μέσα στην μήτρα του κονιάματος, η κατ'όγκον περιεκτικότητα των ινών όπως και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών και πιο συγκεκριμένα ο λόγος μήκους προς διάμετρο. Επίσης τα επιφανειακά χαρακτηριστικά της ίνας όπως η παρουσιαζόμενη τραχύτητα και η αντοχή πρόσφυσης της ίνας με το κονίαμα. Οι ίνες πολυπροπυλενίου χαρακτηρίζονται από χαμηλή δυσκαμψία και γενικά φτωχή επιτυγχανόμενη αντοχή πρόσφυσης και συνεισφέρουν στην αύξηση του πλάστιμου της συμπεριφοράς ιδίως μετά το μέγιστο του φορτίου. Σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες έχει βρεθεί ότι όχι μόνο αυξάνει την παρατηρούμενη ολκιμότητα του κονιάματος αλλά

εμφανίζει και ένα μεγαλύτερο παραμένον φορτίο μετά το παρουσιαζόμενο μέγιστο. Οι ίνες πολυπροπυλενίου προτιμώνται όταν προβλέπονται μεγάλες παραμορφώσεις και άρα υψηλές απαιτήσεις σε ολκιμότητας και δυσθραυστότητα κάτι που δεν μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με τη χρήση χαλύβδινων ινών (Brown et al. 2002, Mullick et al. 2006, Sukontasukkul 2004).

Στο κονίαμα του συγκεκριμένου ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν αδρανή από μάρμαρο στη θέση των παραδοσιακά χρησιμοποιούμενων ασβεστολιθικών αδρανών. Η χρήση αυτού τύπου αδρανών, αν και της ίδιας χημικής σύστασης με αυτήν των κοινών ασβεστολιθικών, δεν εξασφαλίζει εκ των προτέρων μια αποδεκτή συμπεριφορά μια και εν γένει παρουσιάζουν διαφορετικά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### *Χρησιμοποιούμενα υλικά*

Στη συγκεκριμένη εργασία παρασκευάστηκαν κονιάματα με κονία τσιμέντο υψηλής αντοχής I52.5. Ως αδρανές χρησιμοποιήθηκε διαβαθμισμένο κλάσμα μαρμάρου 0 έως 4mm σε αναλογία με το τσιμέντο 1/3, ενώ ο υδατοτσιμεντοσυντελεστής που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.50. Ως ενισχυτικό χρησιμοποιήθηκαν ίνες υάλου και ίνες πολυπροπυλενίου. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των ινών υάλου και των ινών πολυπροπυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 1.

### *Παρασκευή δοκιμίων*

Δύο μεγάλες σειρές δοκιμίων προέκυψαν. Στη μία χρησιμοποιήθηκαν ως ενισχυτική φάση ίνες υάλου ενώ στην δεύτερη ίνες πολυπροπυλενίου σε αναλογίες και βάρη τέτοια ώστε η επιτυγχανόμενη τελική κατόγκον αναλογία τους να είναι και στις δύο σειρές 0.07%, 0.13% και 0.26%. Την προσεκτική ανάμιξη τσιμέντου και αδρανών στις κατάλληλες αναλογίες ακολούθησε η πρόσθεση των ινών αναμιγνύοντας εντός κατάλληλου αναδευτήρα αφού προηγουμένως αυτές είχαν επαρκώς διαχωριστεί μεταξύ τους.

Πίνακας 1. Ιδιότητες χρησιμοποιούμενων ινών

Τύπος Ινών	Υάλου (E-glass)	Πολυπροπυλενίου (PP)
Μήκος	6mm	6mm
Διάμετρος	13μm	40μm
Πυκνότητα	*2.54kg/lt	0.91kg/lt
Καμπτική Αντοχή	*260MPa	360MPa
Μέτρο Ελαστικότητας	*70GPa	2.5GPa

\*(Daniel J & Shah S 1994)

Κατόπιν προστέθηκε η κατάλληλη αναλογία ύδατος και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η διάστρωση του νωπού μίγματος σε κατάλληλες πρότυπες ανοξείδωτες τριπλές μήτρες σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1015.11 1999. Προέκυψαν έτσι πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 160mm x 40mm x 40mm. Το κονίαμα παρέμεινε στις μήτρες για δύο ημέρες διατηρώντας το σε συνθήκες θερμοκρασίας 20°C και κορεσμένης υγρασίας, απ'όπου μετά την απομάκρυνσή τους από τις μήτρες τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές ύδατος για την εξασφάλιση της ομαλής συντήρησής τους για 20 ακόμα ημέρες. Μια εβδομάδα πριν τον έλεγχο τους απομακρύνθηκαν από τις δεξαμενές συντήρησης, αφήνοντάς τα να στεγνώσουν στο χώρο των δοκιμών κάτω από θερμοκρασία 20±2°C και 50-60% σχετική υγρασία.

#### Διεξαγωγή δοκιμών-Μετρήσεις

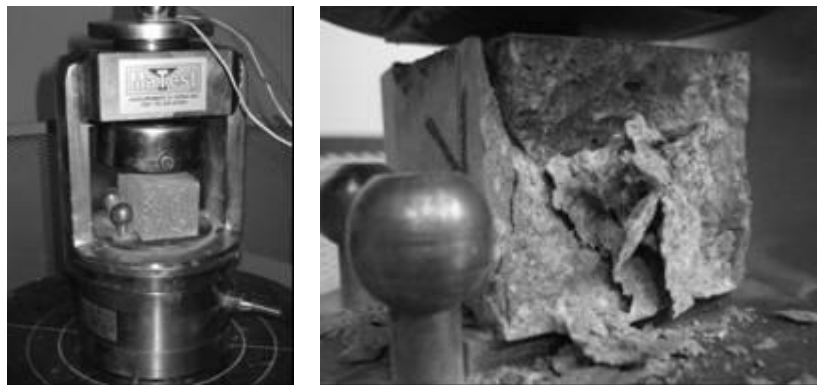
Για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής κάθε σύστασης ελέχθησαν από πέντε πρισματικά δοκίμια προερχόμενα από διαφορετικά μίγματα. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κατάλληλων πρότυπων διατάξεων για τον έλεγχο της καμπτικής αντοχής κονιαμάτων σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο. Για τον καλύτερο έλεγχο της δοκιμής χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα στις κάτω εφελκόμενες στρώσεις των δοκιμίων. Η καμπτική καταπόνηση που πραγματοποιείται μέσω αυτής της δοκιμής είναι κάμψη τριών σημείων με αποτέλεσμα οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις να δίνονται όπως προκύπτει εύκολα, από την ακόλουθη έκφραση (Σωτηροπούλου Α & Πασσά Δ 2003):

$$\sigma = 1.5 \frac{P \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (1)$$

όπου  $P$  το επιβαλλόμενο φορτίο,  $l$  το μήκος ανάμεσα στα σημεία στήριξης του δοκιμίου ίσο με 10cm και  $b$  και  $d$  η βάση και το ύψος των πρισματικών δοκιμίων ίσα με 4cm. Ως εφελκυστική αντοχή σε κάμψη προκύπτει η προσδιοριζόμενη από τον ως άνω τύπο τάση για φορτίο ίσο με το μέγιστο εμφανιζόμενο κατά την διαδικασία της δοκιμής αμέσως μετά την γραμμική αρχική περιοχή. Τα δύο τμήματα που προέκυπταν μετά από κάθε δοκιμή κάμψης και τα συνολικά δέκα για κάθε σύσταση υποβλήσαν σε θλιπτική καταπόνηση.



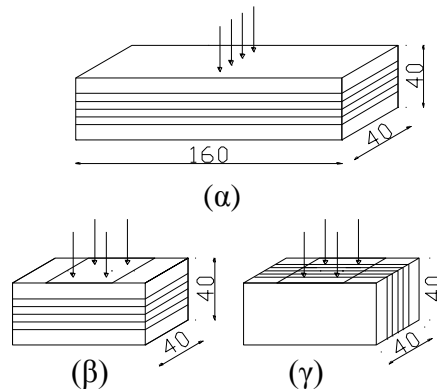
Σχήμα 1: Πρότυπη συσκευή καμπτικής καταπόνησης κονιαμάτων



Σχήμα 2: Πρότυπη συσκευή θλιπτικής καταπόνησης κονιαμάτων

Τα μισά (δηλ. πέντε δοκίμια) καταπονήθηκαν εγκάρσια στη διεύθυνση της παρουσιαζόμενης διάστρωσης και τα άλλα μισά παράλληλα (σχ. 3α,β,γ).

Επιχειρήθηκε με αυτόν τον τρόπο να εκτιμηθεί η παρουσιαζόμενη ανισοτροπία λόγω του τρόπου παρασκευής των δοκιμίων. Οι εν λόγω θλιπτικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν επίσης με τη βοήθεια κατάλληλων πρότυπων διατάξεων (ΕΛΟΤ EN 1015-11:1999).



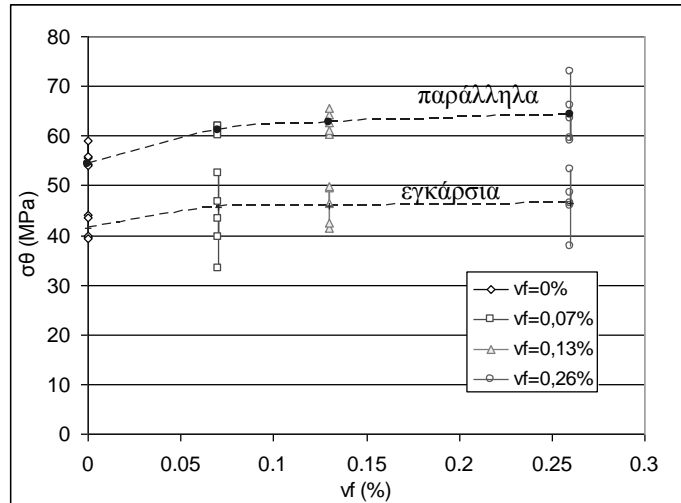
Σχήμα 3α,β,γ: Καμπτική καταπόνηση εγκάρσια στη διάστρωση (α) και θλιπτική καταπόνηση εγκάρσια (β) και παράλληλα (γ) στην πραγματοποιούμενη διάστρωση του κονιάματος (διαστάσεις σε χιλιοστά).

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

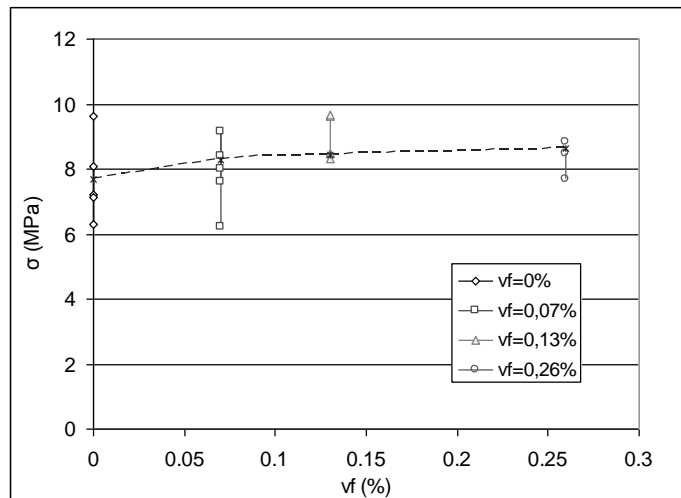
### *Ινοπλισμένο με ίνες υάλου κονίαμα*

Στο σχ.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής, κατά διεύθυνση κάθετα και παράλληλα στη διάστρωση του κονιάματος, για το ινοπλισμένο με ίνες υάλου κονίαμα. Καταρχήν μπορούμε να δούμε ότι εμφανίζεται μια αυξημένη αντοχή (περίπου 30 με 35 %) για όλες τις περιεκτικότητες στη διεύθυνση παράλληλα στις στρώσεις του κονιάματος απ'ότι κάθετα σε αυτές. Προφανώς η παραγόμενη εσωτερική μικροδομή του κονιάματος ήδη από το στάδιο της παρασκευής, το οδηγεί σε μια ανισοτροπία με ασθενή άξονα εγκάρσια στη διάστρωση και ισχυρό πάνω στο επίπεδο της διάστρωσης. Από το ίδιο σχ. μπορούμε να εξάγουμε άνετα το συμπέρασμα ότι η προσθήκη ακόμα και μικρής ποσότητας ινών όπως εδώ, προκαλεί μια ικανοποιητική αύξηση της θλιπτικής αντοχής η οποία ξεκινά από 10% αυτής της άοπλου για 0.07% προσθήκη ινών και φθάνει έως και 20% για προσθήκη 0.26% ίνες κατ'όγκο. Ακόμα βλέπουμε ότι ο ρυθμός αύξησης της αντοχής βαίνει διαρκώς μειούμενος με την μεγαλύτερη αύξηση και άρα

απόδοση τη χρήση ινών να εμφανίζεται στην χαμηλότερη περιεκτικότητα των 0.07% κατ'όγκο.



Σχήμα 4: Η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος ενισχυμένου με ίνες υάλου εγκάρσια και παράλληλα στην διάστρωσή του



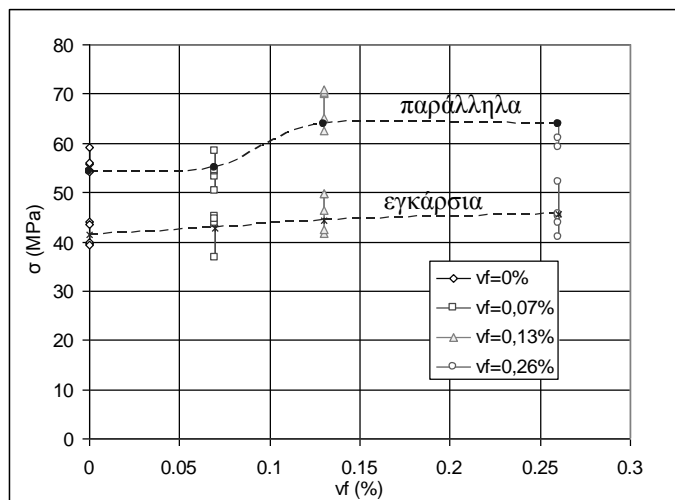
Σχήμα 5: Η μεταβολή της καμπτικής αντοχής του κονιάματος ενισχυμένου με ίνες υάλου

Παρόμοια μπορούμε να δούμε (σχ.5) μια ανάλογη συμπεριφορά για την καμπτική αντοχή που εμφανίζει το κονίαμα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού. Η

προσθήκη ινών το οδηγεί σε αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του λόγω κάμψης περίπου 20 με 25% σε σχέση με το άοπλο.

#### *Ινοπλισμένο με ίνες πολυπροπυλενίου κονιάμα*

Στο σχ. 6 παρατηρούμε την μεταβολή της θλιπτικής αντοχής τόσο κατά τη διεύθυνση της διάστρωσης όσο και εγκάρσια σε αυτή. Όπως και στην περίπτωση του κονιάματος με ίνες υάλου έτσι και εδώ παρουσιάζεται μια έντονη ανισοτροπία προς της διάφορες διευθύνσεις. Η αντοχή παράλληλα

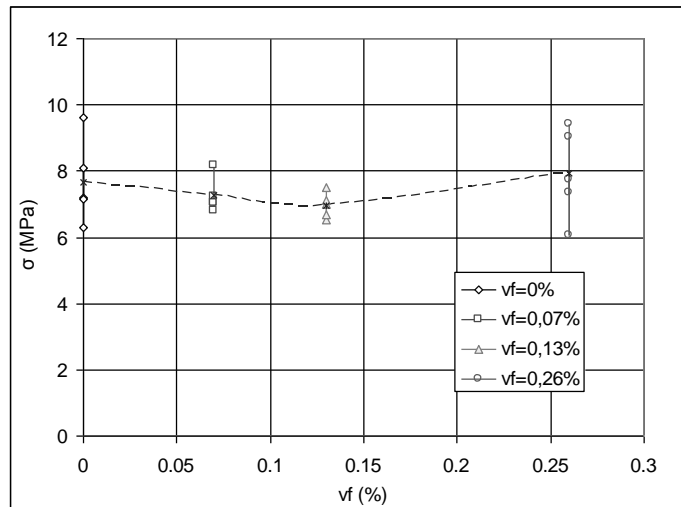


Σχήμα 6: Η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος ενισχυμένου με ίνες πολυπροπυλενίου εγκάρσια και παράλληλα στην διάστρωσή του

στη διάστρωση εμφανίζεται 25 με 55% μεγαλύτερη σε σχέση με την αντοχή εγκάρσια στη διάστρωση. Επίσης, συμπεραίνουμε ότι η προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου προκαλεί μικρή μεταβολή της αντοχής γύρω στο 5 με 10% για το εύρος των περιεκτικοτήτων πολυπροπυλενίου που ελέγξαμε.

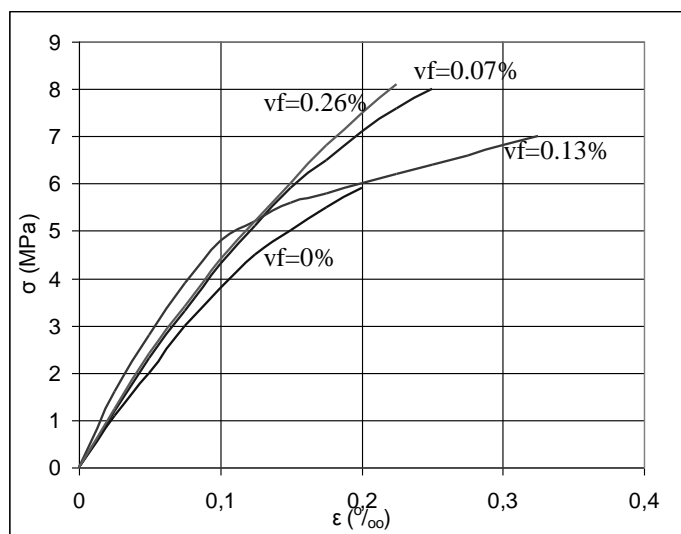
Από το σχ.7 παρατηρούμε ότι η αντοχή σε κάμψη σε χαμηλές περιεκτικότητες ινών δεν εμφανίζει αισθητή μεταβολή παρά μόνο σε αυτήν των 0.26% παρουσιάζοντας μιας αύξηση γύρω στο 10%.





Σχήμα 7: Η μεταβολή της καμπτικής αντοχής του κονιάματος ενισχυμένου με ίνες πολυπροπυλενίου

Η σύγκριση της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής του ινοπλισμένου κονιάματος με ίνες τόσο πολυπροπυλενίου όσο και υάλου έδειξε μια αναλογία 1/6 κάτι που είναι μέσα στα αναμενόμενα όρια σύμφωνα με τις υπάρχουσες αναφορές.



Σχήμα 8: Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων κατά την κάμψη κονιαμάτων ενισχυμένων με ίνες πολυπροπυλενίου

Στο σχ.8 (δοκιμή κάμψης) , παρατηρείται στο ινοπλισμένο κονίαμα με με ίνες πολυπροπυλενίου μια αύξηση της πλαστιμότητάς τους έως την περιεκτικότητα των 0.13% κατ'όγκο ινών. Στην συνέχεια όμως φάνηκε ότι η περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας των ινών βελτίωσε την καμπτική του αντοχή, όμως περιορίσε την πλαστιμότητά του σε χαμηλότερο επίπεδο. Ενδεχόμενα η αύξηση της περιεκτικότητας των ινών να οδηγεί σε έναν υπεροπλισμό του κονιάματος με αποτέλεσμα την ψαθυροποίησή του. Φαίνεται ότι η χρήση περίπου 0.13% κατ'όγκο ινών θα οδηγήσει στη μέγιστη δυνατή πλαστιμότητα ταυτόχρονα με την επίτευξη μιας ικανοποιητικής βελτίωσης της αντοχής.

Τέλος, οι σχηματιζόμενες επιφάνειες θραύσης κατά τη θλίψη παρουσιάζουν την ίδια κωνική μορφή με αυτήν του σκυροδέματος όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 9: Θραύση δοκιμίων κονιάματος υπό θλίψη

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ινοπλισμένα κονιάματα με ίνες πολυπροπυλενίου και υάλου, τα οποία παρασκευάστηκαν και ελέχθησαν στη συγκεκριμένη μελέτη μπορούν πράγματι να χρησιμοποιηθούν ως επισκευαστικά και ενισχυτικά υλικά για κατεστραμμένο σκυρόδεμα. Όπως έγινε φανερό και από τα προηγούμενα οι ίνες πολυπροπυλενίου και υάλου ενισχύουν τόσο την θλιπτική αντοχή όσο και την εφελκυστική αντοχή του κονιάματος με αδρανές μάρμαρο. Επιπλέον οι ίνες πολυπροπυλενίου προσφέρουν μια αυξημένη πλαστιμότητα στο τελικό κονίαμα λόγω της ενδογενούς μεγαλύτερης τους ολκιμότητας σε αντίθεση με τις ίνες υάλου.

## *Ευχαριστίες*

Ευχαριστούμε τον επιστημονικό υπεύθυνο και μηχανικό της Marmoline κ. Σ. Παπαγιαννάκη για την προμήθεια των υλικών (αδρανών, τσιμέντου αλλά και των ινών υάλου) και για την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλη τη φάση της ερευνητικής εργασίας όπως και τον τεχνικό της ίδιας εταιρίας κ. Πουλακίδα

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Brown, R., Shukla, A. & Natarajan, K.R., “Fiber Reinforcement of Concrete Structures”. University of Rhode Island, Transportation Center (2002)

Corinaldesi, V., Moriconi, G. & Naik, T., “Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete”, University of Wisconsin – Milwaukee, College of Engineering and Applied Science, Department of Civil Engineer and Mechanics (2005)

Daniel, J. & Shah, S., “Fiber Reinforced Concrete; Developments and Innovations”. American Concrete Institute, USA (1994)

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

Mullick, A.K., Walia, P. & Sharma, S.N., “Applications of Polypropylene Fiber reinforced Concrete (PFRC) with Vacuum Prossesing”, *Advances In Bridge Engineering*. pp.401 – 412 (2006)

Sotiropoulou, A. & Pandermarakis, Z., “Experimental Study of Concrete Using Marble Aggregates”, 16<sup>th</sup> European Conference of Fracture Mechanics, Alexandroupolis (2006)

Sukontasukkul, P.. “Toughness Evaluation of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Beams under Bending”, *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, **9** (3), pp.35–40 (2004)

Σωτηροπούλου, Α. & Πασσά, Δ., “Αντοχή Υλικών – Εργαστηριακές Ασκήσεις”, Αθήνα, Εκδόσεις ΙΩΝ (2003)

ΥΠΕΧΩΔΕ, Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, Β’ έκδοση., Αθήνα.. Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ (1999)