

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP) ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (TRM)

**ΖΗΚΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ
ΦΡΑΝΤΖΕΣΚΑΚΗ ΕΜΜΑΝΟΥΕΛΑ**

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η περιγραφή της συμπεριφοράς στοιχείων ενισχυμένων με Ινοπλισμένα Πολυμερή υλικά (FRP) και με Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (TRM), υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών. Αρχικά, παρουσιάζονται τα υλικά και η δομή των στοιχείων ενίσχυσης FRP και TRM, καθώς και οι θερμομηχανικές τους ιδιότητες. Για κάθε υλικό ενίσχυσης παρατίθενται πειραματικές δοκιμές σε υψηλές θερμοκρασίες, παίρνοντας αποτελέσματα όσον αφορά την αντοχή των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.

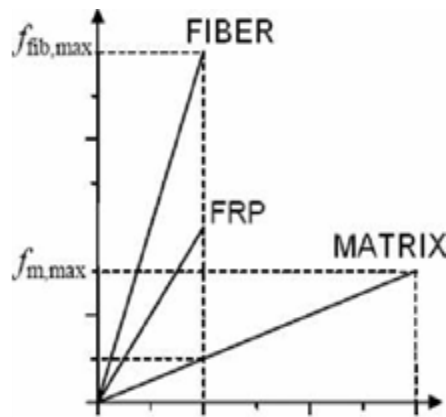
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει αναζωπυρωθεί το ενδιαφέρον για τη μελέτη της επίδρασης υψηλών θερμοκρασιών, τόσο στα υλικά όσο και στην ίδια την κατασκευή. Η έκθεση των δομικών στοιχείων της κατασκευής σε θερμική καταπόνηση προκαλεί δομικές αλλαγές στη σύσταση των υλικών αλλά και απομείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Οι κατασκευές από σκυρόδεμα, κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων κατασκευών. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος, η ικανότητα ανάληψης φορτίων ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες, η χρήση επιχρισμάτων επ'αυτών αλλά και η δυνατότητα παρασκευής πυράντοχων μιγμάτων, είναι μερικά από τα στοιχεία που τις τοποθετούν σε πλεονεκτική θέση έναντι των άλλων κατασκευών, όπως αλουμινοκατασκευές, ξύλινες και σιδηρές κατασκευές [1].

Οι συνεχής αυξανόμενες απαιτήσεις για ανθεκτικότερες κατασκευές, οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών. Στην κατηγορία των νέων υλικών συγκαταλέγονται και τα σύνθετα υλικά (composite materials), που ήδη παρουσιάζουν ευρύτατη εφαρμογή σε πολλούς κατασκευαστικούς τομείς. Η βασική ιδέα της ανάπτυξης ενός σύνθετου υλικού είναι η ανάμειξη δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την δημιουργία ενός νέου, το οποίο θα έχει τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες των αρχικών υλικών. Κάποιοι από τους πιο γνωστούς και πλέον διαδεδομένους τύπους σύνθετων υλικών είναι τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP), καθώς και τα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (TRM).

2.ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP) [2],[3],[4]

Τα Ινοπλισμένα Πολυμερή αποτελούνται από ίνες υψηλής αντοχής (άνθρακα, ύαλου ή αραμιδίου) πλεγμένες μέσα σε μία μήτρα εποξειδικής ρητίνης, σχηματίζοντας έτσι ένα είδος υφάσματος. Οι ίνες προσφέρουν αυξημένη δυσκαμψία και εφελκυστική αντοχή, ενώ η ρητίνη δίνει την θλιπτική αντοχή στο υλικό, αποτελεί το μέσο σύνδεσης των ινών και μεταφέρει τα φορτία μεταξύ αυτών. Η ρητίνη χρησιμοποιείται τόσο σαν την μήτρα του σύνθετου υλικού, όσο και σαν το συγκολλητικό μέσο που θα προσφέρει τον απαραίτητο δεσμό μεταξύ του σύνθετου υλικού και του υπό ενίσχυση στοιχείου. Τα πλεονεκτήματα αυτού του μίγματος είναι ότι μπορεί να μορφωθεί επιτόπου στο έργο γύρω από οποιοδήποτε σχήμα επιφάνειας (μετά την κατάλληλη προετοιμασία αυτής). Έχει πάντως περιορισμένη εφαρμογή, καλύπτοντας κυρίως αδυναμίες μεμονωμένων στοιχείων και δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιηθεί για αντισεισμική ενίσχυση του συνόλου της κατασκευής.



Σχήμα 1: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ινών, μήτρας και FRP [5].

2.1 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΑΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ (FRP)

2.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα FRP εμφανίζουν χαμηλή αντίσταση σε μέτριες και υψηλές θερμοκρασίες. Οι θερμομηχανικές ιδιότητες τους εξαρτώνται κυρίως από τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο πλέον συνηθισμένος τύπος μήτρας είναι οι εποξειδικές ρητίνες.

2.1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΗΤΙΝΩΝ

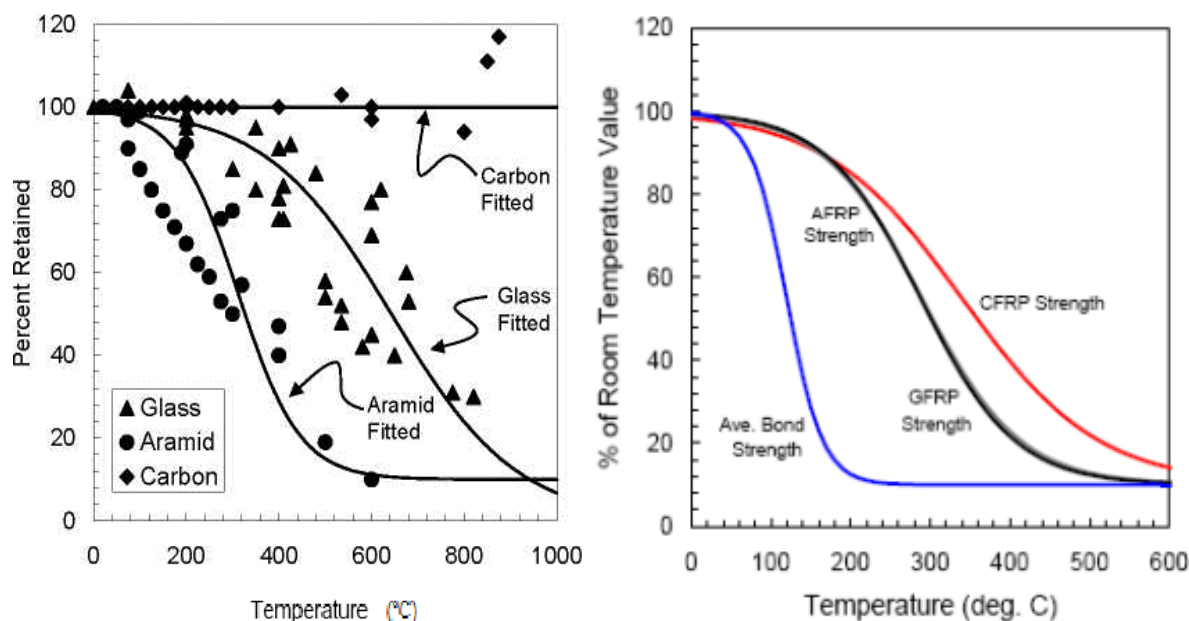
Οι ρητίνες υφίστανται φυσική μεταβολή των ιδιοτήτων τους και αλλοιώνονται στην θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου (T_g). Με τον όρο θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ορίζουμε την θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα μια σχετικά απότομη αλλαγή από την υαλώδη στην ελαστική ή εύκαμπτη θερμοπλαστική κατάσταση όλων σχεδόν των πολυμερών. Η χαρακτηριστική αυτή θερμοκρασία T_g για την ρητίνη είναι λίγο πάνω των 60°C , όπου παρατηρείται σημαντική μείωση του μέτρου ελαστικότητας E και της αντοχής της, με αποτέλεσμα την πτώση της αντοχής του υλικού. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 250°C η ρητίνη καίγεται [3].

2.1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ

Έχει αποδειχθεί ότι οι ίνες είναι ανθεκτικότερες στις υψηλές θερμοκρασίες έναντι των ρητινών. Για παράδειγμα, στο Σχ.2 (α) φαίνεται η αντοχή των ινών σε αυξημένες θερμοκρασίες [6].

- Οι ίνες άνθρακα είναι ουσιαστικά ανεπηρέαστες έως τους 1000°C .
- Οι ίνες υάλου διατηρούν περίπου το μισό της εφελκυστικής τους αντοχής πάνω από τους 600°C .
- Οι ίνες αραμιδίου είναι περισσότερο εξαρτώμενες θερμοκρασιακά σε σχέση με τις ίνες υάλου.

Κατά των συνδυασμό των παραπάνω ινών με την ρητίνη σαν ένα σύνθετο υλικό η αντοχή του υλικού αυτού σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται σημαντικά, όπως φαίνεται στο Σχ.2 (β). Σε θερμοκρασίες μεταξύ 250°C και 400°C τα περισσότερα σύνθετα υλικά χάνουν το μισό της αρχικής αντοχής τους σε εφελκυσμό [6].



Σχήμα 2: (α) Διάγραμμα αντοχής ινών- υψηλών θερμοκρασιών, (β) Διάγραμμα αντοχής-θερμοκρασίας FRP και συνάφειας [6].

2.2 ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Όσον αφορά τη συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών σε περίπτωση πυρκαγιάς, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τη φωτιά αναφλέγονται, κατά κύριο λόγο, λόγω της ρητίνης. Έτσι οδηγούμαστε σε απουσία μεταφοράς των δυνάμεων διαμέσου της συγκολλητικής ρητίνης και προκαλείται αύξηση των διατμητικών τάσεων και αποκόλληση της ενίσχυσης από το σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό τα σύνθετα υλικά που δε διαθέτουν πυροπροστασία θεωρούνται ανενεργά σε περίπτωση πυρκαγιάς [7].

2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος για την επίτευξη της πυροπροστασίας γίνεται με υλικά μόνωσης μεγάλου πάχους (40 - 50 mm) με βάση τον γύψο ή με τσιμεντοειδή βάση. Το υλικό μόνωσης προστατεύει το ινοπλισμένο πολυμερές και συγκεκριμένα τη συγκολλητική ουσία (ρητίνη), όχι μόνο από τη φωτιά αλλά και γενικά από τις υψηλές θερμοκρασίες.

2.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Θα παρατεθούν δυο πειράματα της ερευνητικής ομάδας NRC-IRC προκειμένου να διερευνηθεί η απόδοση και η αποτελεσματικότητα δομικών στοιχείων ενισχυμένων με Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP) και επικαλυμμένα με δύο διαφορετικά είδη μόνωσης, κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες [8].

Το πρώτο πείραμα αναφέρεται σε τέσσερα κυκλικά υποστυλώματα, διαμέτρου $d=400\text{mm}$ και ύψους $h=3810\text{mm}$ υπό την επίδραση εξωτερικού φορτίου. Το πείραμα διεξήχθη βάσει του προτύπου ULC S101 [8]. Στο Σχ. 3 παρατίθενται αναλυτικά όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε για τα τέσσερα υποστυλώματα.



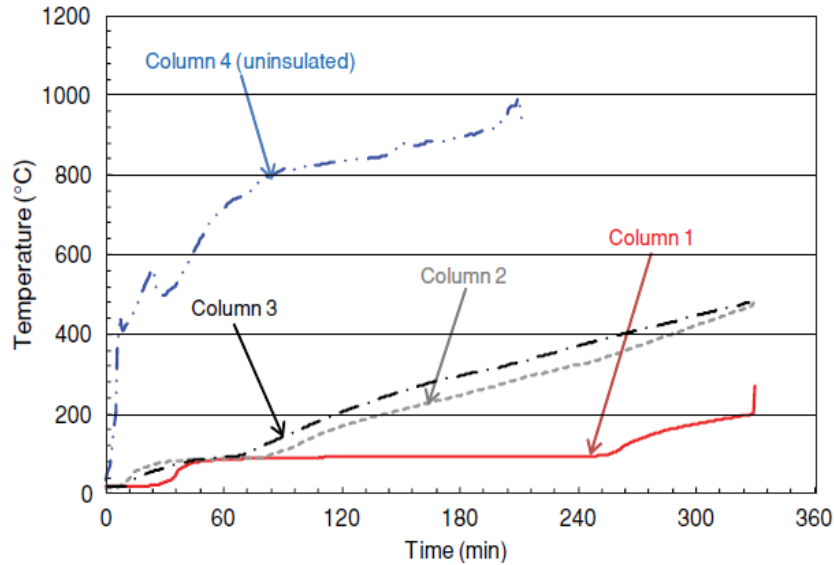
Σχήμα 3: Προετοιμασία και δοκιμή κυκλικού υποστυλώματος από Ο.Σ σε υψηλή θερμοκρασία [8]

Το υλικό ενίσχυσης των στοιχείων είναι ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα. Για τα κυκλικά υποστυλώματα η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g), το είδος αλλά και το πάχος της μόνωσης διαφέρουν, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Κυκλικό Υποστύλωμα No.	Ινοπλισμένο Πολυμερές	Τύπος- πάχος μόνωσης	Πυραντίσταση (min)	Προβλεπόμενη αντοχή σε θερμοκρασία δωματίου (kN)
1	1 ύφασμα με ίνες άνθρακα, $T_g = 93^\circ\text{C}$	Με βάση τον γύψο, 57 mm	> 300	5,094
2	1 ύφασμα με ίνες άνθρακα, $T_g = 93^\circ\text{C}$	Με βάση τον γύψο, 32 mm	> 300	5,094
3	2 υφάσματα με ίνες άνθρακα, $T_g = 71^\circ\text{C}$	Με βάση το τσιμέντο, 53 mm	> 300	4,720
4	2 υφάσματα με ίνες άνθρακα, $T_g = 71^\circ\text{C}$	Καμία	210	4,720

Σχήμα 4 : Πίνακας δεδομένων κυκλικών υποστυλωμάτων [8]

Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί και στην συνέχεια αναλύονται.

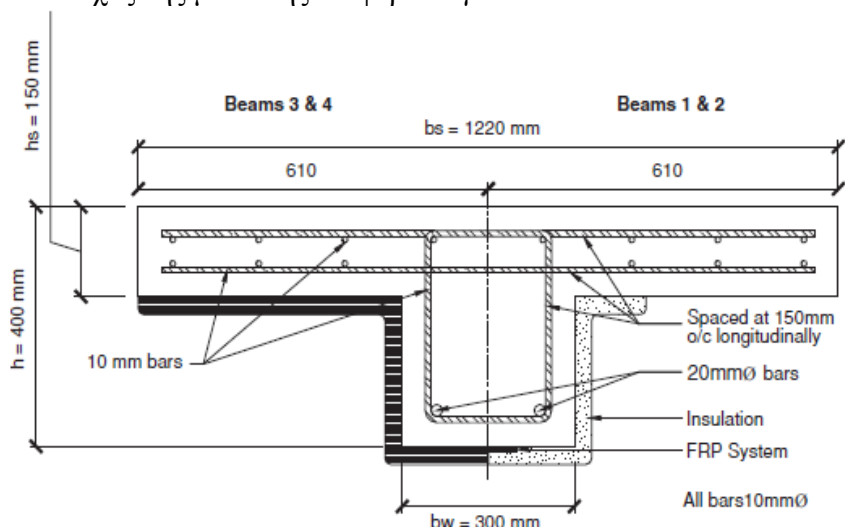


Σχήμα 5: Διάγραμμα θερμοκρασίας - χρόνου επιφάνειας FRP-σκυροδέματος των υποστυλωμάτων [8]

Από το πρώτο πείραμα μπορούν να εξαχθούν τα εξής:

- Σε όλα τα στοιχεία η πυραντίσταση τους ήταν ικανοποιητική για πάνω από 5 ώρες ακόμα και όταν η θερμοκρασία τους υπερέβη τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g .
- Το μη μονωμένο στοιχείο αστόχησε σε 210 λεπτά από την έναρξη του πειράματος, αποδεικνύοντας γενικότερα την ανάγκη μόνωσης των ενισχυμένων στοιχείων και ειδικότερα την ανάγκη μόνωσης των υποστυλωμάτων τα οποία είναι και τα πιο κρίσιμα στοιχεία για την ορθή δομική λειτουργία των κατασκευών.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρώτο κυκλικό υποστύλωμα παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι φέρει μόνωση μεγαλύτερου πάχους και συγκολλητική ρητίνη με υψηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g . Καταλήγουμε ότι η συγκολλητική ρητίνη διατήρησε μεγάλο μέρος των μηχανικών της ιδιοτήτων.

Το δεύτερο πείραμα αναφέρεται σε τέσσερις οπλισμένες πλακοδοκούς διαστάσεων 1220mm πλάτους και 3900mm μήκους. Το πείραμα διεξήχθη με την επιβολή πλήρους εξωτερικού φορτίου βάσει του προτύπου ULC S101 [8]. Το υλικό ενίσχυσης των στοιχείων είναι ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g), το είδος αλλά και το πάχος της μόνωσης διαφέρουν για κάθε πλακοδοκό.



Σχήμα 6: Ενισχυμένη πλακοδοκός με μόνωση [8]

Πλακοδοκός No.	Ινοπλισμένο Πολυμερές	Τύπος- πάχος μόνωσης	Πυραντίσταση (min)	Προβλεπόμενη ροπή αντοχής σε θερμοκρασία δωματίου (kN-m)
1	1 ύφασμα με ίνες άνθρακα, $T_g = 93^{\circ}\text{C}$	Με βάση τον γύψο, 25 mm	> 240	130
2	1 ύφασμα με ίνες άνθρακα, $T_g = 93^{\circ}\text{C}$	Με βάση τον γύψο, 38 mm	> 240	130
3	2 υφάσματα με ίνες άνθρακα, $T_g = 71^{\circ}\text{C}$	Με βάση το τσιμέντο, 30 mm	> 240	145
4	2 υφάσματα με ίνες άνθρακα, $T_g = 71^{\circ}\text{C}$	Με βάση το τσιμέντο, 28mm	> 240	145

Σχήμα 7 : Πίνακας δεδομένων πλακοδοκών [8]

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το δεύτερο πείραμα αναλύονται ως εξής:

Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν αντοχή στη φωτιά της τάξης των τεσσάρων ωρών όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα. Στην πραγματικότητα όμως, ήταν σε θέση να διατηρήσουν τα εφαρμοζόμενα φορτία για περισσότερο από τέσσερις ώρες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, αφού τα δοκίμια διατομής T επανήλθαν σε θερμοκρασία δωματίου, υποδεικνύουν ότι η ικανότητα των μελών μετά τις δοκιμές πυρκαγιάς ήταν ισοδύναμη με την ικανότητα των ίδιων μη ενισχυμένων μελών πριν από την πυρκαγιά. Η θερμική προστασία του μέλους μέσω της μόνωσης ήταν ικανοποιητική και η ίδια η μόνωση έμεινε άθικτη καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος.

2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

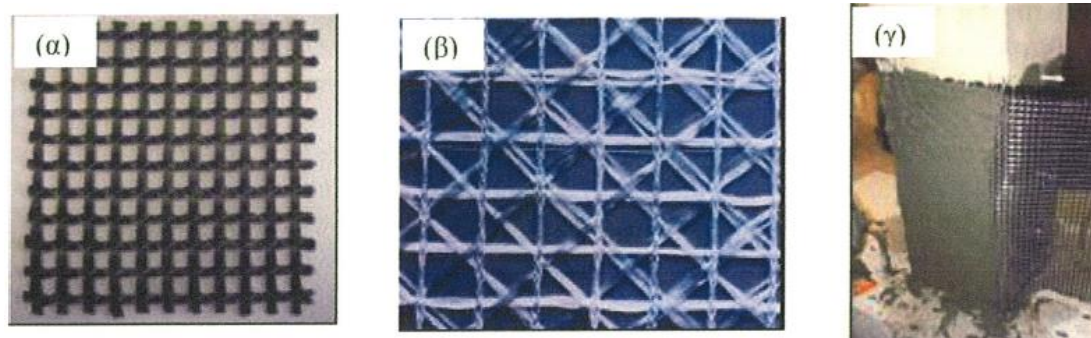
Μέλη από σκυρόδεμα ενισχυμένα με FRP (υποστυλώματα, δοκοί διατομής T), που προστατεύονται με ένα ειδικά σχεδιασμένο σύστημα μόνωσης, είναι ικανά να επιτύχουν ικανοποιητική τάξη αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες σύμφωνα με το ULC S101, υπό πλήρες μόνιμο φορτίο. Σε όλες τις περιπτώσεις, η ικανοποιητική αντοχή στη φωτιά επιτεύχθηκε, παρόλο που η μετάπτωση της θερμοκρασίας υάλου (T_g) της πολυμερούς μήτρας του FRP ξεπεράστηκε σχετικά νωρίς στις δοκιμές.

Η έρευνα παρείχε αρκετά σημαντικά συμπεράσματα που θα αυξήσουν το επίπεδο της εμπιστοσύνης στη χρήση των συστημάτων FRP για την επισκευή και για την ενίσχυση μελών οπλισμένου σκυροδέματος σε κτίρια, όπου η αντοχή στη φωτιά είναι πρωταρχικό μέλημα του σχεδιασμού:

1. Αποτυχία των FRP που προστατεύονται από μόνωση, δεν σημαίνει ότι τα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα θα αποτύχουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αντοχής σε φωτιά.
2. Οι ενισχυμένες με FRP κατασκευές από σκυρόδεμα μπορεί να επιτύχουν αντοχή στη φωτιά τάξης μεγαλύτερης από 4 ώρες, όταν εφαρμόζεται η κατάλληλη προστατευτική μόνωση.
3. Χρησιμοποιώντας μονωμένα FRP για την επισκευή σκυροδέματος, σημαίνει ότι μετά από μια φωτιά, μπορεί να είναι δυνατό να αντικατασταθεί είτε το σύστημα ενίσχυσης FRP, είτε το FRP μαζί με την μόνωση, αντί του μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα.

3. ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (TRM) [9],[10]

Τα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας αποτελούν ένα νέο σύνθετο υλικό το οποίο είναι υπό έρευνα την τελευταία δεκαετία. Τα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (TRM) αποτελούνται από πλέγματα ινών κυρίως γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και από ίνες νέου τύπου, όπως είναι ο βασάλτης. Οι ίνες αυτές αναλαμβάνουν υψηλές εφελκυστικές δυνάμεις και το μέτρο ελαστικότητάς τους κυμαίνεται από 70 έως 500 GPa. Στη μέθοδο ενίσχυσης με Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας οι ίνες βρίσκονται σε μορφή πλέγματος (δύο ή τεσσάρων διευθύνσεων) έτσι ώστε να γίνεται καλύτερα ο εμποτισμός τους με το μητρικό υλικό. Αυτό το υλικό ανόργανης σύστασης, που περιβάλλει τις ίνες και μεταβιβάζει τις δυνάμεις σε αυτές, μπορεί να είναι είτε σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανών τα 2 mm, είτε κονίαμα με βάση το τσιμεντό. Για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων γίνεται προσθήκη πολυμερών με ίνες άνθρακα, πολυαιθυλενίου, γυαλιού και χάλυβα. Η προσθήκη αυτή είναι δυνατό να μεταβάλει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες του κονιάματος, όπως η αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και τη συνάφειά του με τις ίνες, ανάλογα με το ποσοστό των πολυμερών που βρίσκονται στο κονίαμα. Η συγκολλητική ουσία στα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας είναι ίδιας σύστασης με το μητρικό υλικό.



Σχήμα 8: Πλέγματα ινών (α) δύο διευθύνσεων και (β) τεσσάρων διευθύνσεων. (γ) Εφαρμογή ινοπλεγμάτων σε κονίαμα στη βάση υποστυλώματος [10]

3.1 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανθεκτικότητα των στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες εξαρτάται από την συμπεριφορά της μήτρας σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά κατά κύριο λόγο από την ανθεκτικότητα του πλέγματος των ινών.

3.1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ

Παρατηρείται ότι οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν μηδενική μείωση της εφελκυστικής τους αντοχής σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Αντίθετα, οι ίνες υάλου παρουσιάζουν μεγάλη πτώση στην αντοχή τους σε θερμοκρασίες άνω των 600°C. Επίσης, οι ίνες αραμιδίου δεν επιδεικνύουν ικανοποιητική συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικά με τις ίνες υάλου [9].

3.1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το υλικό της ανόργανης μήτρας μπορεί να είναι είτε σκυρόδεμα είτε κάποιο κονίαμα. Έχει αποδειχθεί ότι σε θερμοκρασία 150°C το σκυρόδεμα εμφανίζει ρηγματώσεις μικρής κλίμακας εξαιτίας της διαφορετικής θερμικής διαστολής των αδρανών και του τσιμεντοπολτού, ενώ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 400°C

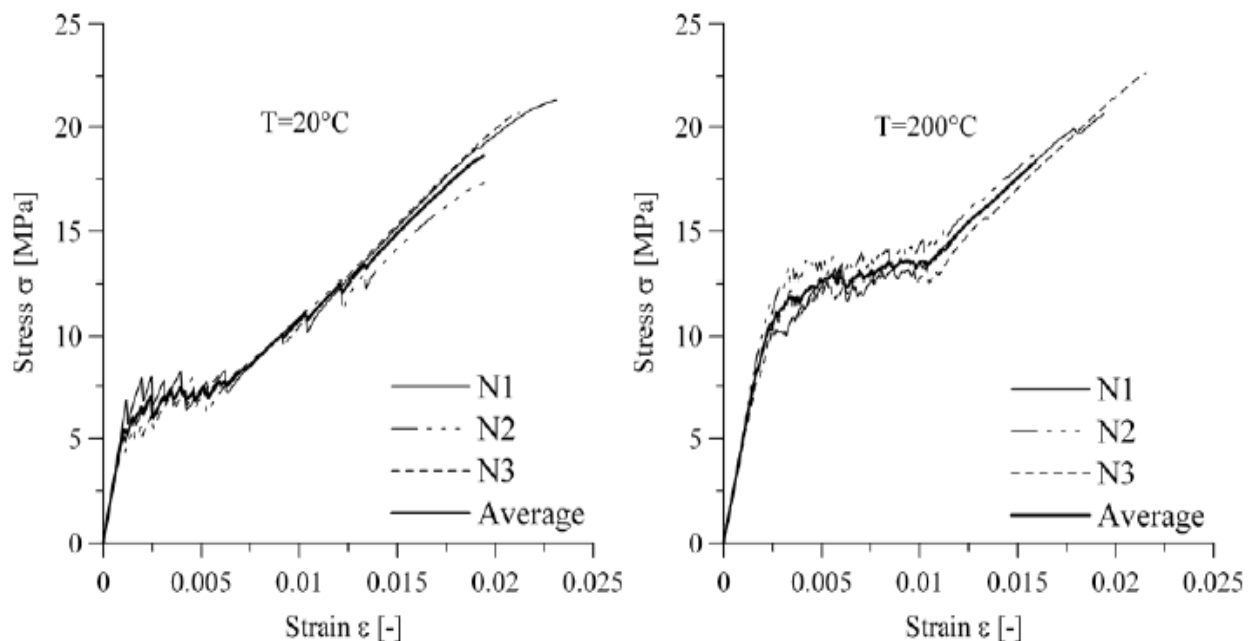
παρατηρείται μεγάλη αποδιοργάνωση του υλικού. Αντίθετα το κονίαμα λόγω της σύστασής του εμφανίζει μικρορηγματώσεις σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στη μικρή θερμική διαστολή των συστατικών του. Βέβαια, εξαιτίας του μικρού πορώδους του, το δεσμευμένο νερό του κονιάματος μετατρέπεται στην θερμοκρασία των 100°C σε υδρατμούς. Όταν η τιμή της πίεσης που οφείλεται στους υδρατμούς ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή της μήτρας, δημιουργούνται ρηγματώσεις στο κονίαμα [9].

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

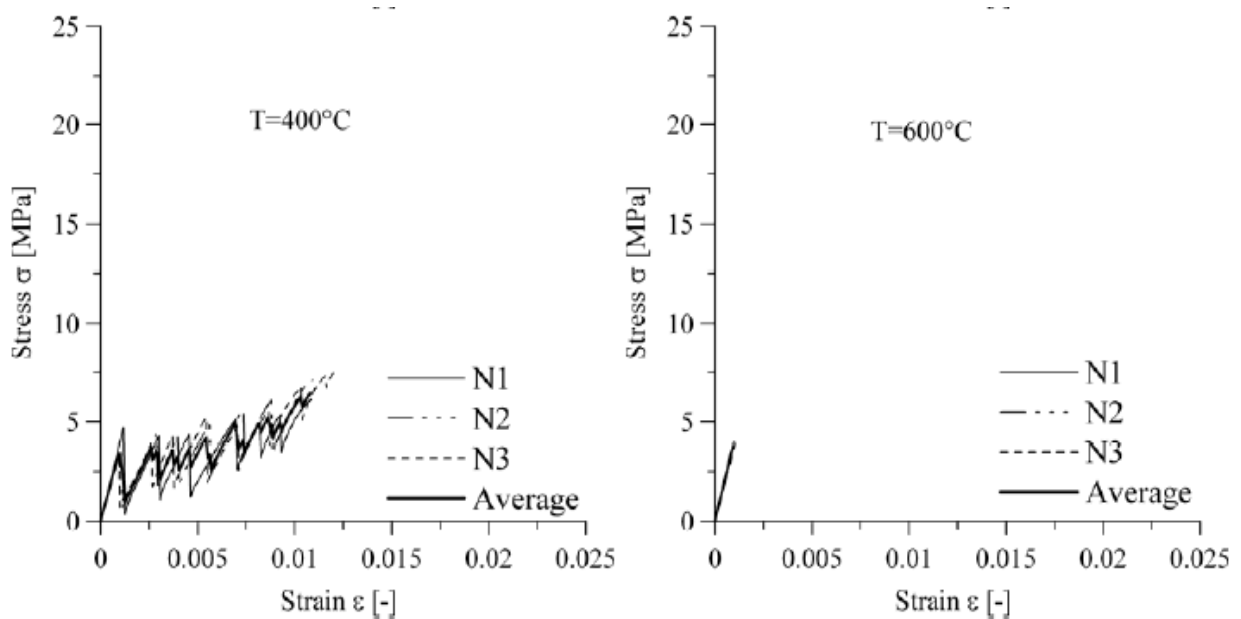
Το πείραμα αναφέρεται στην απόδοση και την αποτελεσματικότητα δομικών στοιχείων ενισχυμένα με Ινόπλεγμα Ανόργανης Μήτρας (TRM) υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών [11]. Τα δοκίμια εξετάστηκαν σε δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού με μέγιστο φορτίο τα 30 kN, αφού θερμάνθηκαν σε κλίβανο. Οι ίνες του ινοπλέγματος είναι ίνες υάλου τύπου AR-GLASS ενώ το υλικό της ανόργανης μήτρας είναι τσιμεντοειδές κονίαμα. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική έρευνα ήταν μήκους 400 mm, πλάτους 70 mm και πάχους 6 mm και ενισχύθηκαν με 2 στρώσεις πλέγματος που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Οι στρώσεις του πλέγματος διαχωρίστηκαν με μία στρώση κονιάματος πάχους 2 mm. Τα δοκίμια σκληρύνθηκαν σε υγρό περιβάλλον για 28 ημέρες μέχρι την διεξαγωγή της θερμικής επεξεργασίας. Οι θερμοκοί κύκλοι διεξήχθησαν σε έναν κλίβανο που εξετάζει τρεις διαφορετικές μέγιστες θερμοκρασίες (200, 400 και 600°C). Όταν επιτεύχθηκε η μέγιστη θερμοκρασία (με ρυθμό θέρμανσης ίσο με 30°C/ώρα), επιβλήθηκε μια φάση σταθεροποίησης 2 ωρών και στη συνέχεια διεξήχθη ένας κλάδος ψύξης των 15°C/ώρα. Μετά τη θερμική επεξεργασία όλα τα δοκίμια, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που θερμάνθηκαν στους 600°C, δεν παρουσίασαν ορατή ρωγμή.

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά αποτελέσματα αποτυπώνονται μέσω των καμπυλών τάσης (σ) - παραμόρφωσης (ϵ) για θερμοκρασίες 20, 200, 400 και 600°C.



Σχήμα 9: Καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης μονοαξονικού εφελκυσμού σε θερμοκρασίες $T=20^{\circ}\text{C}$, $T=200^{\circ}\text{C}$ [11]

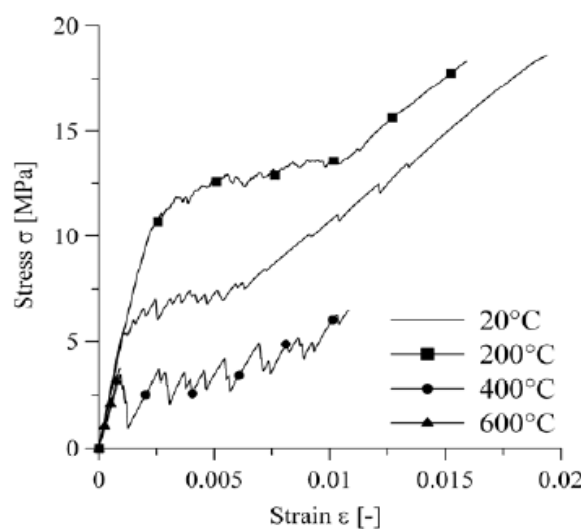


Σχήμα 10: Καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης μονοαξονικού εφελκυσμού σε θερμοκρασίες $T=400^{\circ}\text{C}$, $T=600^{\circ}\text{C}$ [11]

Στα διαγράμματα για θερμοκρασίες 20°C και 200°C παρατηρούνται τα εξής:

Αρχικά η πρώτη ρωγμή επιτεύχθηκε όταν η αντοχή σε εφελκυσμό της μήτρας ξεπεράστηκε. Στη συνέχεια, στη φάση της κράτυνσης, σημειώθηκαν πολλαπλές ρωγμές. Τέλος στον τελικό κλάδο του διαγράμματος δεν αναπτύσσονται περαιτέρω ρωγμές. Στην περίπτωση των 400°C , μέχρι την αστοχία μπορεί να παρατηρηθεί μία φάση πολλαπλών ρωγμών. Στους 600°C , είναι εμφανής μόλις μία γραμμική φάση, η οποία ακολουθείται από ψαθυρή αστοχία.

Η σύγκριση του μέσου όρου των καμπυλών τάσης (σ) – παραμόρφωσης (ϵ) για θερμοκρασίες 20°C , 200°C , 400°C και 600°C παρουσιάζεται στο Σχ.11. Από το διάγραμμα αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι στους 200°C το δοκίμιο εμφάνισε μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με αυτό των 20°C , αφού χρειάστηκε μεγαλύτερη τάση ώστε να εμφανιστεί σε αυτό η πρώτη ρωγμή. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται πιθανώς στη συρρίκνωση του κονιάματος σε θερμοκρασία 200°C , το οποίο οδηγεί σε αύξηση του δεσμού μεταξύ του πλέγματος ινών και της μήτρας. Για υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως είναι οι 400°C - 600°C , η επικάλυψη αποσυντίθεται και έτσι παρουσιάζεται ολίσθηση.



Σχήμα 11: Καμπύλες μέσου όρου τάσεων-παραμορφώσεων σε διάφορες θερμοκρασίες [11]

3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πειραματική έρευνα δείχνει απώλεια αντοχής των μηχανικών ιδιοτήτων των Ινοπλεγμάτων Ανόργανης Μήτρας (TRM) όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες και εξαρτάται κυρίως από την σύσταση και την διάταξη του πλέγματος [11]. Σε θερμοκρασίες έως 200°C, το πλέγμα διατηρεί την αντοχή του, ακόμη και αν η επικάλυψη αρχίζει να χάνει τις αρχικές της ιδιότητες. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, συγκρίσιμη με αυτή που αποκτήθηκε στην περίπτωση των 20°C, έχει επιτευχθεί. Τα δοκίμια δείχνουν την καλύτερη συμπεριφορά τους σε όρους αντοχής που αναφέρονται στην δημιουργία της πρώτης ρωγμής. Σε θερμοκρασίες 400°C έως και 600°C παρατηρείται ότι η επικάλυψη έχει χάσει πλήρως τις μηχανικές της ιδιότητες και η συμπεριφορά της συνολικής ενίσχυσης είναι εύθραυστη. Ωστόσο, τα TRM παρουσιάζουν αντοχή σε εφελκυσμό μεγαλύτερη από 3,98 MPa [11]. Αυτό το φαινόμενο απαιτεί περαιτέρω έρευνες προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά των Ινοπλεγμάτων Ανόργανης Μήτρας (TRM) και η διαδικασία χύτευσης και σκλήρυνσής τους.

4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία μελετά την ενίσχυση στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος με δύο τύπους σύνθετων υλικών, τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP) και τα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (TRM), εκτεθειμένα σε υψηλές θερμοκρασίες. Προσδιορίστηκαν, έπειτα από την έκθεση τους σε τέτοιου είδους θερμοκρασίες, οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών, καθώς και η αντοχή των δομικών στοιχείων. Γενικά και οι δυο μέθοδοι ενίσχυσης που εξετάστηκαν παρουσιάζουν σημαντικά οφέλη στην αναβάθμιση στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος, όπως είναι η βελτίωση της πλαστιμότητας αλλά και η αύξηση της αντοχής του μέλους. Όσον αφορά τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP) κατά την έκθεση τους σε μέτριες και υψηλές θερμοκρασίες, η αντίσταση που επιδεικνύουν είναι χαμηλή, διότι η ρητίνη αλλοιώνεται στην θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου, που συνήθως είναι λίγο πάνω από τους 60°C. Έτσι, το μέλος οπλισμένου σκυροδέματος δεν είναι ικανό να φέρει τα πλήρη φορτία λειτουργίας του στις υψηλές θερμοκρασίες. Για τον λόγο αυτό επιβάλλεται η χρήση μονωτικών υλικών, ώστε να μην υπάρχει απώλεια αντοχής του Ινοπλισμένου Πολυμερούς, όσο και της ορθής συνεργασίας του με το μέλος. Αντίθετα, τα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (TRM) επιδεικνύουν καλύτερη συμπεριφορά στη λειτουργία του μέλους, εξαιτίας του μητρικού τους υλικού και της συγκολλητικής τους ουσίας (κονίαμα ή σκυρόδεμα), υπό υψηλές θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά όμως, υπάρχει απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων της ενίσχυσης στις θερμοκρασίες αυτές. Συγκεκριμένα, παρατηρείται σημαντική πτώση της αντοχής και του μέτρου Ελαστικότητας της ενίσχυσης. Έτσι χάνεται η σωστή συνεργασία μέλους και ενίσχυσης για την παραλαβή των επιβαλλόμενων φορτίων. Ωστόσο, τα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (TRM) αποτελούν ακόμα ένα νέο υλικό και τα πειραματικά τους αποτελέσματα στις υψηλές θερμοκρασίες καλύπτουν ένα μικρό φάσμα, ώστε να υπάρξουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Μελέτη της Μείωσης της Αντοχής Ινοπλισμένων Κονιαμάτων κατά την Έκθεσή τους σε Υψηλές Θερμοκρασίες”, Ζαχαρίας Γ. Πανδερμαράκης - Αναστασία Β. Σωτηροπούλου - Νικόλαος Δ. Νικολουτσόπουλος, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.
- [2] “Σύνθετα υλικά σε νέες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα” , Πτυχιακή εργασία, Γκοτσοπούλου Ιωάννα, Κρεμαστιώτη Αικατερίνη, ΤΕΙ Πειραιά, Ιούνιος 2008.
- [3] “Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές”, Σ.Η. Δρίτσος, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου, 2006.
- [4] “Αντισεισμικές ενισχύσεις κτιρίων με σύνθετα υλικά”, Πτυχιακή εργασία, Καϊάφας Νίκος & Τσαμόπουλος Νίκος, ΤΕΙ Πειραιά, Αθήνα 2006.

- [5] “Επίδραση υψηλών θερμοκρασιών σε στοιχεία ενισχυμένα με FRP”, Γεωργίτσος-Παναγόπουλος, 17^ο Φοιτητικό συνέδριο Ενισχύσεις και Επισκευές, Πάτρα Φεβρουάριος 2011.
- [6] “Design guidelines for fire resistance of FRP-strengthened concrete structures”, N. Benichou, V.K.R. Kodur, M.F. Green and L.A. Bisby, <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca> , University of Patras, Patra, Greece, July 16-18, 2007, pp. 1-10.
- [7] “Effect of bond degradation on fire resistance of FRP-strengthened reinforced concrete beams”, A. Ahmed, V.K.R. Kodur, Michigan State University, East Lansing, MI 48824-1226, Composites: Part B 42 (2011) 226–237, United States, 2010.
- [8] “Fire Performance of Fibre-Reinforced Polymer Systems Used for the Repair of Concrete Buildings”, N. Benichou, V.K.R. Kodur, M.F. Green and L.A. Bisby, National Research Council of Canada, August 2010, ISSN 1206-1220.
- [9] “Πειραματική διερεύνηση στοιχείων σκυροδέματος επι/εοντος προκατασκευασμένων τύπων από Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας”, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Ιωάννη Παπαντωνίου, Πάτρα 2007.
- [10] “Νέα γενιά δομικών υλικών για την ενίσχυση κατασκευών IAM”, Αθ. Τριανταφύλλου, http://library.tee.gr/digital/m2173/m2173_triантаfillou.pdf.
- [11] “Textile Reinforced Mortar at High Temperatures”, Isabella Colombo, Matteo Colombo, Anna Magri, Giulio Zani and Marco di Prisco, Department of Structural Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy, <http://www.scientific.net/AMM.82.202>.

