

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ FRP

ΓΕΩΡΓΙΤΣΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την περιγραφή της συμπεριφοράς στοιχείων ενισχυμένων με FRP σε υψηλές θερμοκρασίες. Αρχικά γίνεται αναφορά στις θερμομηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών και των συστατικών τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μοντέλο αστοχίας των ενισχυμένων στοιχείων λόγω έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Έπειτα παρατίθενται εργαστηριακές μελέτες και τα συμπεράσματά τους. Τέλος, γίνεται αναφορά στους υφιστάμενους κανονισμούς και τις αδυναμίες τους.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή προέρχονται από συνδυασμό ινών (γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου) σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα FRPs κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο ινών από τις οποίες είναι κατασκευασμένα:

- GFRP από ίνες γυαλιού
- CFRP από ίνες άνθρακα.
- AFRP από ίνες αραμιδίου

Τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν εισαχθεί στον κατασκευαστικό κλάδο την τελευταία εικοσαετία και η ζήτηση τους έχει ανοδική πορεία έναντι των συμβατικών υλικών λόγω ιδιοτήτων τους όπως η υψηλή εφελκυστική αντοχή, το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή σε διάβρωση και η ηλεκτρομαγνητική ουδετερότητα τους. Συγκεκριμένα, αποτελεί ιδιαίτερα ελκυστική λύση στις ενισχύσεις-επισκευές υφιστάμενων κατασκευών λόγω της ταχύτητας εκτέλεσης των εργασιών και της μικρής διατάραξης του ήδη διαμορφωμένου χώρου.

Παρόλα αυτά, το γεγονός της μικρής διερεύνησης των υλικών αυτών κάτω από υψηλές θερμοκρασίες όπως είναι η περίπτωση της φωτιάς αποτελεί σοβαρό εμπόδιο ώστε να γίνει αυτός ο τρόπος ενίσχυσης ευρέως εφαρμόσιμος από μελετητές και κατασκευαστές. Οι κανόνες πυροπροστασίας απαιτούν την εξασφάλιση της φέρουσας ικανότητας για ένα χρονικό διάστημα(βάσει τύπου κτιρίου), παρόλα αυτά δεν υπάρχουν προς το παρόν λεπτομερείς εγκεκριμένες προδιαγραφές και πρότυπα. Δεδομένου, ότι τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται κατά κόρον είτε για περίσφιξη υποστυλωμάτων είτε για καμπτική ενίσχυση δοκών-πλακών, μέλη τα οποία είναι περισσότερο ευάλωτα στη πυρκαγιά λόγω της πολύπλευρης έκθεσης τους σε αυτήν, η διστακτικότητα των μελετητών και κατασκευαστών δικαιολογείται.

Περνώντας στο τεχνικό κομμάτι του θέματος, το ενισχυμένο στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος υστερεί στο γεγονός ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας τόσο στη συγκολλητική ρητίνη όσο και στη μήτρα εποξειδικής ρητίνης μεταβάλλεται η μοριακή δομή τους σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του πολυμερούς (Tg). Η ρητίνη πέρα από τη θερμοκρασία αυτή αναφλέγεται και καίγεται, με αποτέλεσμα να χάνεται η συνάφεια στη διεπιφάνεια των δύο υλικών και να μην λειτουργεί ο μηχανισμός της ενίσχυσης.

2.ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ

Από μελέτες έχει αποδειχθεί ότι:

- Ασχέτως χημικής σύνθεσης οι ίνες γυαλιού στη θερμοκρασία των 550 °C χάνουν το 50% της εφελκυστικής τους αντοχής.[1]
- Οι ίνες αραμιδίου είναι περισσότερο εξαρτώμενες θερμοκρασιακά σε σχέση με τις ίνες γυαλιού [2]
- Η εφελκυστική αντοχή των ινών άνθρακα δείχνει να μην επηρεάζεται σε θερμοκρασίες έως 1000 °C[2]

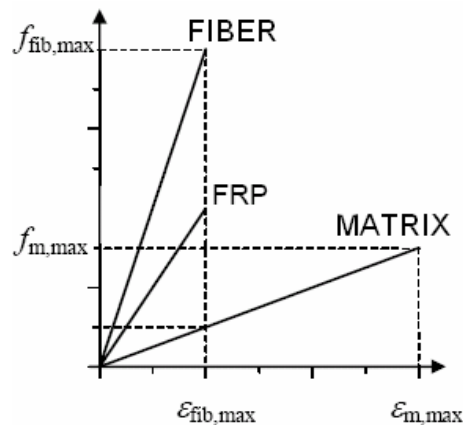
3.ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΗΤΙΝΩΝ

Μακροχρόνια οι ρητίνες λόγω των περιβαλλοντικών δράσεων υφίστανται χημική αλλοίωση η οποία είναι μη αναστρέψιμη και αναφέρεται ως «γήρανση». Βραχυπρόθεσμα οι ρητίνες υφίστανται φυσική μεταβολή των ιδιοτήτων τους οι οποίες είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενες και είναι αναστρέψιμες μέχρι ένα θερμοκρασιακό όριο.[3] Οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των ρητινών καθώς και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) διαφέρουν σημαντικά, λόγω των διαφορετικών χημικών συνθέσεων που μπορεί να προκύψουν. Ως θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) αναφέρουμε τη θερμοκρασία εκείνη όπου πριν από αυτήν το πολυμερές συμπεριφέρεται ως στερεό πλησιάζοντάς την και ελαφρώς υπερβαίνοντας την αποκτά μια ελαστομερή μορφή και αρκετά πάνω από αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μεγάλου ιξώδους ρευστό. Η T_g αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών και κυμαίνεται μεταξύ 65-120 °C. Συγκεκριμένα, πριν από την T_g το πολυμερές είναι άκαμπτο με μεγάλη αντοχή ενώ μετά γίνεται εύκαμπτο έως παχύρρευστο σε υψηλότερες θερμοκρασίες με αισθητά μειωμένες τις μηχανικές του ιδιότητες.[4]

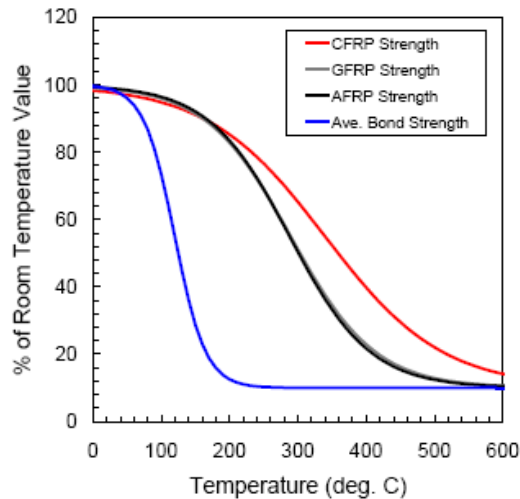
4.ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινοπλισμένων πολυμερών εξαρτάται κυρίως από τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας. Ο λόγος είναι ότι, ρόλος της μήτρας είναι να συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, να τις προστατεύει και να εξασφαλίζει τη μεταφορά δυνάμεων σε αυτές. [4]

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο πλέον συνηθισμένος τύπος μήτρας είναι οι εποξειδικές ρητίνες, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι θερμομηχανικές ιδιότητες της μήτρας υπάγονται στις προαναφερθείσες περί ρητινών.



Εικόνα 1: Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ινών, μήτρας και FRP[1]



Εικόνα 2: Διάγραμμα αντοχής-θερμοκρασίας FRP και συνάφειας [5]

5.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή επικολλώνται στην επιφάνεια του μέλους που πρέπει να ενισχυθεί με συγκολλητικό υλικό που συνήθως είναι εποξειδική ρητίνη. Το συγκολλητικό υλικό είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των δυνάμεων από το σκυρόδεμα στο ινοπλισμένο πολυμερές. Σε συνήθεις θερμοκρασίες οι τρόποι αστοχίας ενός μέλους ενισχυμένου με ινοπλισμένα πολυμερή είναι οι εξής:

1. Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας
 - 1.1. Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
 - 1.2. Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, θραύση σύνθετων υλικών
 - 1.3. Σύνθλιψη σκυροδέματος
2. Μηχανισμοί με απώλεια πλήρους συνεργασίας
 - 2.1. Αποκόλληση στην ακραία ίνα
 - 2.2. Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή
 - 2.3. Διατμητική αστοχία στο άκρο ,αποκόλληση της επικάλυψης

Σε μη συνήθεις θερμοκρασίες, παραδείγματος χάριν κατά την εξέλιξη μια πυρκαγιάς, η συγκολλητική ρητίνη πλησιάζοντας τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) και πολύ περισσότερο υπερβαίνοντας την, παρουσιάζει ραγδαία απομείωση των μηχανικών της ιδιοτήτων. Αποτέλεσμα αυτής της απομείωσης είναι η απώλεια της πλήρους συνεργασίας των δυο υλικών, δηλαδή παύει να ισχύει το συμβιβαστό των παραμορφώσεων. Η απουσία πλήρους μεταφοράς των δυνάμεων διαμέσου της συγκολλητικής ρητίνης, οδηγεί τοπικά σε σχηματισμό μικρορηγματώσεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος και αυξημένες διατμητικές τάσεις που επιφέρουν μια σχετική ολίσθηση μεταξύ σκυροδέματος και ινοπλισμένου πολυμερούς. Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε μεγαλύτερη διολίσθηση έως αποκόλλησης του ινοπλισμένου πολυμερούς, παύοντας να συνεισφέρει στο στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος.[11]

6.ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Η αντιμετώπιση της ευπάθειας στις υψηλές θερμοκρασίες των συστημάτων ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι η ανάπτυξη

νέων ινών και ρητινών ή η βελτίωση των υπαρχόντων ως προς τις θερμοεπιβραδυντικές ιδιότητες τους με χρήση νέων υλικών όπως ίνες βασάλτη και φαινολικές ρητίνες. Ο δεύτερος τρόπος, και ταχύτερα εφαρμόσιμος από την κατασκευαστική κοινότητα, είναι η προστασία των ινοπλισμένων πολυμερών με χρήση μονωτικών υλικών. Ο πρώτος τρόπος είναι εκτός θέματος της παρούσης εργασίας.[6]

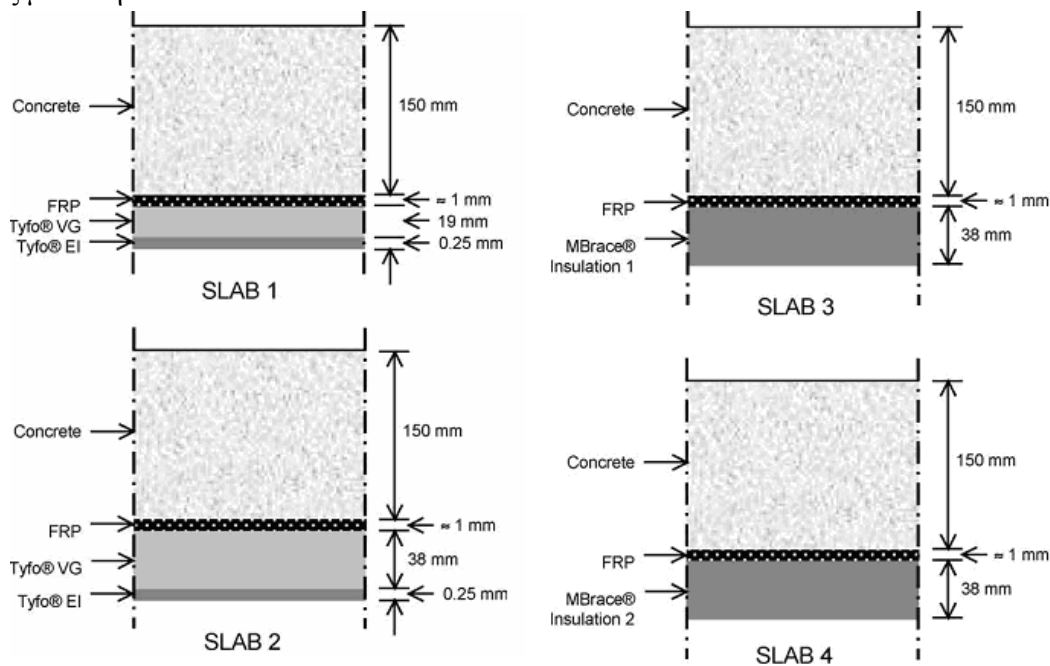
7. ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΩΣΕΩΝ

Μερικοί από τους πιο διαδεδομένου τύπους μονώσεων είναι:

- Μονώσεις με βάση το γύψο, είτε με τη μορφή γυψοσανίδας είτε με τη μορφή αφρού
- Μονώσεις με βάση τσιμεντοειδές

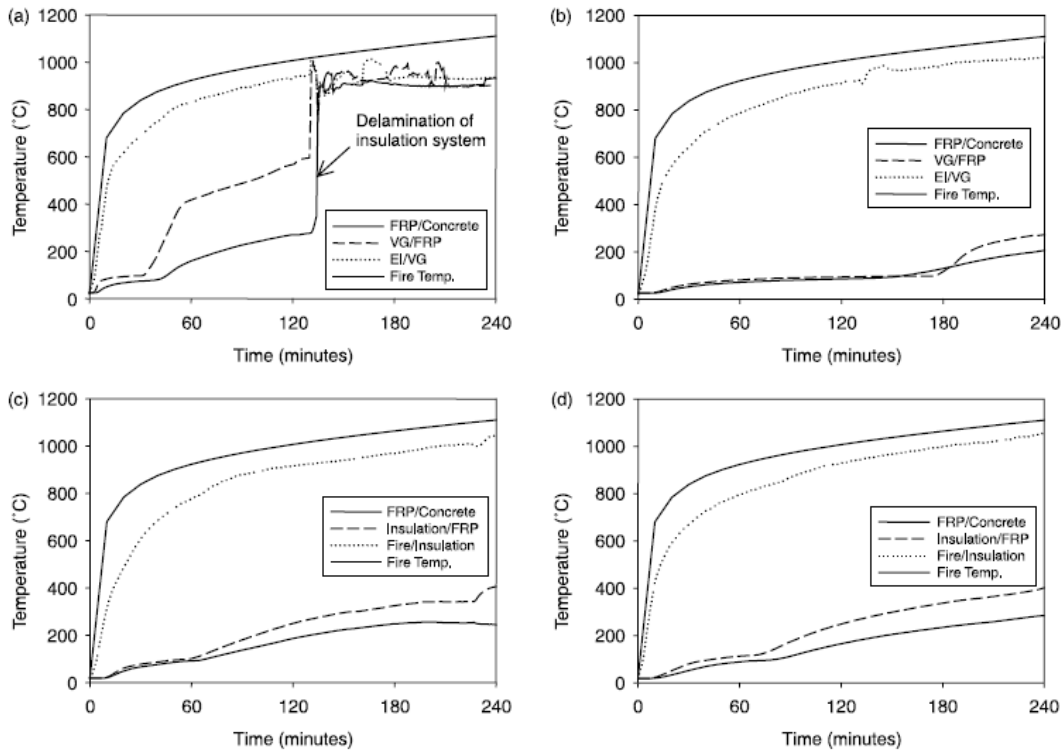
8. ΑΠΟΡΡΟΙΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Η ερευνητική ομάδα του NRC διεξήγαγε δοκιμές μικρής κλίμακας πάνω σε τέσσερις εξωτερικά ενισχυμένες με ινοπλισμένα πολυμερή πλάκες για να εκτιμηθεί η απόδοση και η αποτελεσματικότητά τους.[7] Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τα κριτήρια που ορίζει ο ASTM E119[10] και χωρίς την επίδραση εξωτερικού φορτίου. Οι διαστάσεις των πλακών ήταν 954mm X1331mm και 150mm ύψος. Οι δύο πρώτες πλάκες έφεραν μόνωση με βάση το γύψο και ειδική διογκωτική εποξική επικάλυψη. Στις άλλες δύο τοποθετήθηκε τσιμεντοειδές ως μόνωση.



Εικόνα 3: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες των πλακών [7]

Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν ότι εκτός της πρώτης πλάκας, που έφερε μειωμένο πάχος μόνωσης σε σχέση με τις υπόλοιπες, οι μονώσεις διατηρήθηκαν ακέραιες κατά την 4ωρη διεξαγωγή της δοκιμής. Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα της εικόνας 4:



Εικόνα 4: Διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου των επιμέρους διεπιφανειών από α έως δ για τις πλάκες 1 έως 4 αντίστοιχα[7]

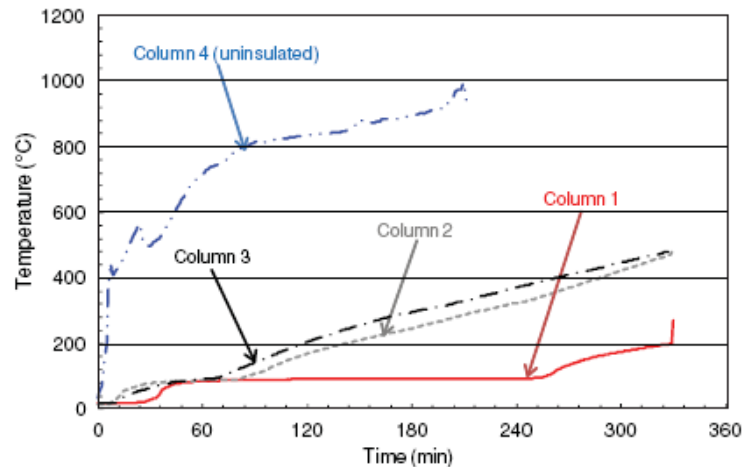
Όπως διαπιστώνεται:

- το πάχος των 19mm για τη μόνωση στην πλάκα 1 δεν ήταν αρκετό και κατέρρευσε, αφήνοντας εκτεθειμένη την ενίσχυση.
- Το πάχος μόνωσης των 38mm ήταν αρκετό και για τους δύο τύπους μονώσεων
- Η μόνωση στην πλάκα 2 που είχε ως βάση το γύψο παρουσίασε καλύτερη συμπεριφορά έναντι της μόνωσης από τσιμεντοειδές, διατηρώντας την θερμοκρασία μεταξύ των διεπιφανειών μόνωσης-FRP και FRP-σκυροδέματος σε χαμηλότερα επίπεδα
- Δεν κατέστη δυνατό στη διεπιφάνεια FRP-σκυροδέματος η θερμοκρασία να παραμείνει κάτω από την T_g , με αποτέλεσμα την απώλεια της συνάφειας
- Η μόνωση βοήθησε και το στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος να διατηρηθεί σε χαμηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα με αποτέλεσμα μικρότερης βλάβης, στοιχείο το οποίο ενισχύει την εικόνα που παρουσιάζει το σύνθετο αυτό δομικό μέλος συνολικά

Σε αντίστοιχα αποτελέσματα καταλήγει και μια άλλη πειραματική μελέτη η οποία εξετάζει στοιχεία υποστρωμάτων. Η μελέτη ακολουθεί τα ίδια πειραματικά κριτήρια με την προηγούμενη με τη διάφορα της επιβολής εξωτερικού φορτίου.[8] Τα στοιχεία των υποστρωμάτων και των μονώσεων τους παρατίθενται στον πίνακα της εικόνας 5.

| Column No. | Type of FRP | Type of insulation and thickness |
|------------|---|----------------------------------|
| 1 | 1 layer Carbon $T_g = 93^\circ\text{C}$ | Gypsum-based, 57 mm |
| 2 | 1 layer Carbon $T_g = 93^\circ\text{C}$ | Gypsum-based, 32 mm |
| 3 | 2 layers Carbon $T_g = 71^\circ\text{C}$ | Cementitious, 53 mm |
| 4 | 2 layers Carbon $T_g = 71^\circ\text{C}$ | None |

Εικόνα 5: Πίνακας δεδομένων υποστυλωμάτων [8]

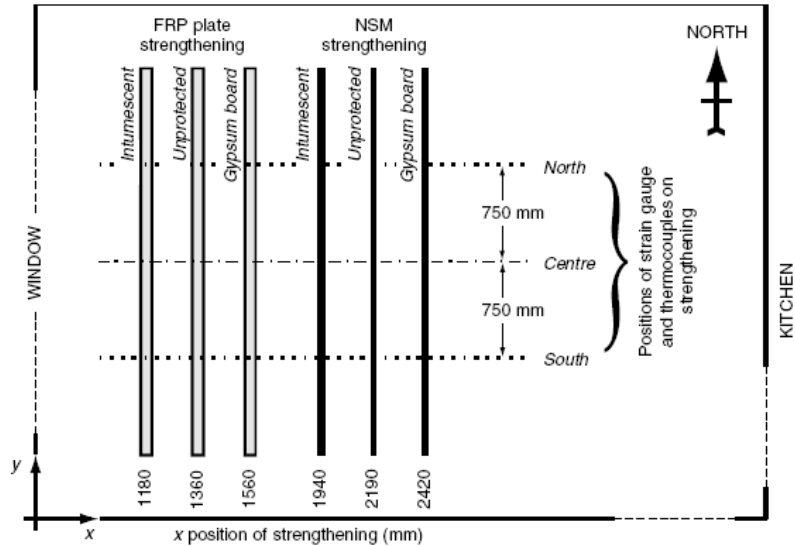
Εικόνα 6: Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου επιφάνειας FRP-σκυροδέματος των 4^{ων} υποστυλωμάτων [8]

Από το παραπάνω πείραμα μπορούν να εξαχθούν τα εξής:

- Στο παραπάνω διάγραμμα οι μονώσεις των υποστυλωμάτων επαρκούν και για έκθεση μεγαλύτερη των 4ωρών. Προσδίδοντας στο σύστημα μια καλή συμπεριφορά απέναντι στην αύξηση της θερμοκρασίας.
- 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 για την ορθή δομική λειτουργία των κατασκευών.
- Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να δοθεί στο πρώτο υποστυλώμα, όπου φέρει μόνωση μεγαλύτερου πάχους και συγκολλητική ρητίνη με υψηλότερη T_g . Ο συνδυασμός αυτών των δύο δίνει μια καμπύλη από την οποία θα μπορούσαμε να εξάγουμε το αποτέλεσμα ότι η συγκολλητική ρητίνη διατήρησε μεγάλο μέρος των μηχανικών της ιδιοτήτων καθώς η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια FRP-σκυροδέματος δεν υπερέβη κατά πολύ την T_g .

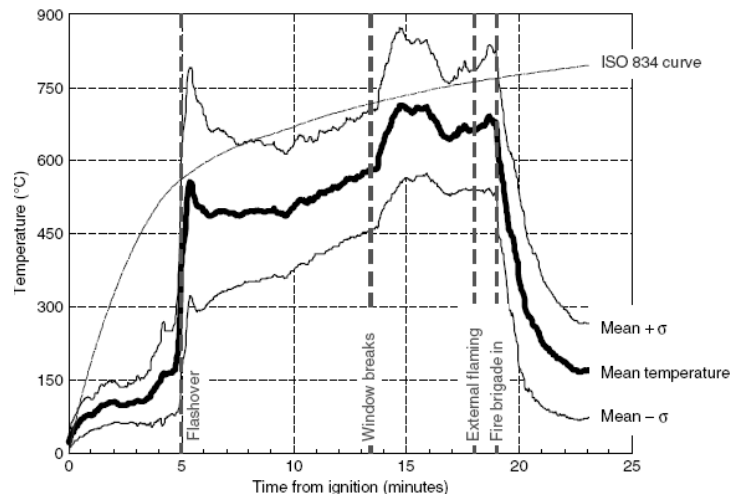
Όλα τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα εμπεριέχουν ένα μικρό σφάλμα που οφείλεται στο γεγονός ότι τόσο τα εγκεκριμένα πρότυπα τα οποία ακολουθούνται κατά τη διεξαγωγή εργαστηριακών πειραμάτων, όσο και οι δυνατότητες του εκάστοτε εργαστηρίου δεν μπορούν να προσομοιώσουν επακριβώς τα δεδομένα μιας πραγματικής πυρκαγιάς. Τα δεδομένα αυτά τα εξακριβώνουμε με τις δοκιμές πυρκαγιάς του Dalmarnock.[9] Σε ένα

διαμέρισμα ενός κτιρίου κατασκευής του 1964 αυτής της περιοχής τοποθετήθηκαν 3 φύλλα CFRP και 3 ράβδοι CFRP(NSM) Φ12, φέροντας μονώσεις γυψοσανίδας 12 mm, ειδικής βαφής επάλειψης και καμία μόνωση αντίστοιχα. Το θερμικό φορτίο του πειράματος προερχόταν από έπιπλα γραφείου. Η ενίσχυση του FRP τοποθετήθηκε όπως δείχνει η εικόνα



Εικόνα 7: Σχηματική απόδοση τοποθέτησης της ενίσχυσης[9]

Η θερμική καμπύλη των αερίων κατά την εξέλιξη του πειράματος και η διακύμανση της καθώς και η καμπύλη ISO 834 ως δεδομένο σύγκρισης παρουσιάζονται στην εικόνα. Από τα δεδομένα της εικόνας διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη μέση τιμή είναι περίπου 700 °C και αποκλίνει έως 850 °C, δεδομένο που επαληθεύει τον Ελληνικό Κανονισμό Πυροπροστασίας που θεωρεί ότι η μέγιστη θερμοκρασία σε ένα διαμέρισμα κυμαίνεται μεταξύ 800-900 °C.[]



Εικόνα 8: Ανάπτυξη των θερμοκρασιών των αερίων[9]

Μετά την κατάσβεση της φωτιάς παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Το μη μονωμένο φύλλο αποκολλήθηκε πλήρως, ενώ η συγκολλητική ρητίνη και η μήτρα εποξειδικής ρητίνης κήκον ολοσχερώς αφήνοντας εκτεθειμένο το σκυρόδεμα.
- Το φύλλο με τη μόνωση από διογκωτικό αφρό επίσης αποκολλήθηκε από το ταβάνι και κήκε η μήτρα εποξειδικής ρητίνης
- Η γυψοσανίδα παρέμεινε άθικτη μετά το πείραμα, χωρίς καμία εμφανή οπή ή ενδείξεις ότι η φωτιά εισχώρησε. Μετά την αφαίρεση της γυψοσανίδας το φύλλο βρέθηκε πλήρως συγκολλημένο, χωρίς καμία εμφανή ζημιά τόσο στο φύλλο όσο και στην κόλλα.
- Η κόλλα γύρω από τη NSM ράβδο είχε καεί πλήρως καθώς δεν διέθετε μόνωση, αφήνοντας μερικώς εκτεθειμένο το FRP χωρίς όμως να έχει καεί η μήτρα.
- Ο διογκωτικός αφρός γύρω από τη ράβδο NSM ενεργοποιήθηκε. Η ενίσχυση κάτω από τον αφρό ήταν στη θέση της, παρόλο που η κόλλα είχε στυλβωθεί και περιείχε μικρές εγκάρσιες ρωγμές.
- Η γυψοσανίδα που προστάτευε τη ράβδο παρέμεινε άθικτη και η ενίσχυση από κάτω ήταν οπτικά αναλλοίωτη
- Σε όλες τις περιπτώσεις η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια ξεπέρασε ταχύτατα τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g . Όπως ήταν αναμενόμενο οι θερμοκρασίες αυτές είναι μεγαλύτερες στα μη μονωμένα φύλλα, αλλά ακόμη και με τη μόνωση της γυψοσανίδας η T_g ξεπεράστηκε σε λιγότερο από ένα λεπτό μετά το flashover. Επίσης οι θερμοκρασίες στην κόλλα των ράβδων ήταν συγκρίσιμες παρόλο που οι ράβδοι ήταν ενσωματωμένες στο σκυρόδεμα.

Flashover λέγεται η χρονική στιγμή μετά την ανάφλεξη όπου η φωτιά από αναπτυσσόμενη μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ανεπτυγμένη.

9. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΛΛΕΙΨΕΙΣ

Οι υπάρχοντες κανονισμοί πυροπροστασίας για μέλη ενισχυμένα με ινοπλισμένα πολυμερή, δεν επιβάλλουν να διατηρείται η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς και αντ'αυτού δίνουν τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί συνολικά το μέλος. Έτσι σύμφωνα με τους κανονισμούς απαιτείται η αντοχή του μέλους χωρίς την ενίσχυση, να είναι ικανή ώστε να φέρει τα πλήρη φορτία λειτουργίας κατά τη διάρκεια της φωτιάς σε όλο το καθορισμένο χρονικό διάστημα.[10] Από τον συντηρητικό τρόπο που είναι διατυπωμένος ο παραπάνω κανονισμός διαπιστώνεται η ελλιπής έρευνα πάνω στο θέμα. Ο κανονισμός δεν έχει εισάγει ακόμα αντίστοιχα στοιχεία που να αφορούν στις μηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών και της συγκολλητικής ρητίνης κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, όπως γίνεται αντίστοιχα με το σκυρόδεμα και τον χάλυβα. Επίσης δεν προτείνει τρόπους μόνωσης των ινοπλισμένων πολυμερών, δεδομένης της ευαισθησίας τους. Τα παραπάνω αποτελούν τροχοπέδη στη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών σε περίπτωσης ενίσχυσης κατασκευών που θα απαιτούσαν η ενίσχυση να φέρει και φορτία λειτουργίας. Σ' αυτήν την περίπτωση θα ήταν επιβεβλημένη η χρήση μονωτικών υλικών με τέτοιο τρόπο ώστε κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς να μην υπήρχε απώλεια τόσο της αντοχής του ινοπλισμένου πολυμερούς όσο και της συνεργασίας του με το μέλος

10.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Rehm G, Franke L. Kunstharzgebundene Glasfaserstable als Bewehrung im Betonbau. Die Bautechnik 1974;4:115–20.
- [2] Sen R. Investigation of S-2 glass/epoxy strands in concrete. In: Nanni A, Dolan C, editors. Int. Symposium on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures. ACI SP-183, 1993. p. 15–33
- [3] “a review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties”
- [4] “ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ”, Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, Πάτρα 2004
- [5] DESIGN GUIDELINES FOR FIRE RESISTANCE OF FRP-STRENGTHENED CONCRETE STRUCTURES, Mark F. GREEN, Noureddine BENICHOU, Venkatesh KODUR, Luke A. BISBY
- [6] “BEHAVIOR OF FRP STRENGTHENED BEAMS SUBJECTED TO ELEVATED TEMPERATURES”, Yuqian ZHOU, Kiang Hwee TAN
- [7] “Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs”, M.F. Green, V.K.R. Kodur, Brea Williams, Ershad Chowdhury and L.A. Bisby 13 May 2005
- [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
- [9] “Bonded Fibre Reinforced Polymer Strengthening in a Real Fire”, T.J. Stratford, M. Gillie, J.F. Chen and A.S. Usmani
- [10] “ASTM E119-01:Standard Methods of Fire Test of Building Constuction and Materials”, American Society for Testing and Material
- [11] “Effect of bond degradaton on fire resistance of FRP-strengthened reinforced concrete beams”, A. Ahmed, V.K.R. Kodur, 2010]
- [12] “Ελληνικός Κανονισμός Πυροπροστασίας Κτηρίων (Π.Δ. 71/1988)”

