

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP)

ΚΟΛΛΑΞΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

1. Περίληψη

Σε αυτή την εργασία γίνεται παρουσίαση της συμπεριφοράς ενισχυμένων μελών οπλισμένου σκυροδέματος με FRP (υποστηλώματα, πλάκες, πλακοδοκοί) κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς και της συμβολής ειδικών μονωτικών υλικών για την πυροπροστασία. Μέσω πειραμάτων εξάγονται συμπεράσματα για την αντιμετώπιση του προβλήματος μέσω της πυροπροστασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers) είναι μια λύση καινοτόμα για πολλά από τα προβλήματα φθοράς που παρουσιάζονται στις κατασκευές και η οποία αντέχει στο χρόνο. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση στη χρήση των FRP τόσο για ενίσχυση όσο και για όπλιση σε κατασκευές από μπετόν. Όμως όταν χρησιμοποιείται σε κτίρια, τα ενισχυμένα μέλη Ο.Σ. με FRP πρέπει να τηρούν την ανθεκτικότητά τους σε πυρκαγιά που περιγράφεται από τους κανονισμούς. Γι' αυτό πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψη ο σχεδιασμός των κατασκευαστικών δομικών μελών για την περίπτωση πυρκαγιάς. Είναι πάρα πολύ βασικό κατά τη διάρκεια μιας φωτιάς να παραμένει ακέραιος ο φέρων οργανισμός. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι υπάρχει έλλειψη γνώσεων της συμπεριφοράς των FRP στην πυρκαγιά. Η γνώση της συμπεριφοράς στο φαινόμενο της πυρκαγιάς και η θέσπιση κανόνων θα οδηγήσει στην εκτεταμένη χρήση αυτών [6]. Γι' αυτό το λόγο η επιστημονική κοινότητα άρχισε να ενδιαφέρεται για τη συμπεριφορά των υλικών αυτών στη φωτιά.

2. ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Η συμπεριφορά του κτιρίου σε φωτιά είναι αρκετά πολύπλοκη και μη γραμμική και συμπεριλαμβάνει τρία βασικά στάδια. Η διαδικασία αρχίζει με την ανάφλεξη του υλικού που σηματοδοτεί την έναρξη του **σταδίου ανάπτυξης της πυρκαγιάς** το οποίο συνεχίζει μέχρι η φλόγα να απλωθεί σε όλες τις εύφλεκτες επιφάνειες. Τότε η πυρκαγιά περνάει στο **στάδιο της πλήρους ανάπτυξης** που είναι μια κρίσιμη στιγμή για τα στοιχεία της κατασκευής γιατί αρχίζουν και χάνουν τα χαρακτηριστικά της αντοχής τους και την ικανότητα ανάληψης φορτίου. Στη συνέχεια λόγω της έλλειψης οξυγόνου και καύσιμης ύλης η πυρκαγιά μπαίνει στο τελικό **στάδιο της εξασθένησης** [4].

3. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Παρά το γεγονός ότι η ιδέα των ινοπλισμένων υλικών εντοπίζεται από τα αρχαία χρόνια, όταν χρησιμοποιούνταν το άχυρο ως οπλισμός στην κατασκευή των τούβλων από τους Ισραηλίτες 800 π.Χ. τα ινοπλισμένα υλικά όπως τα γνωρίζουμε σήμερα ως ινοπλισμένα συνθετικά υλικά δεν είχαν παρουσιαστεί πριν από τις αρχές του 1940 [9]. Τα σύνθετα αυτά υλικά αποτελούνται από τον συνδυασμό δυο βασικών συστατικών. Την μήτρα από πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρα) η

οποία οπλίζεται (reinforce) με ίνες (fibers), οργανικές ή ανόργανες (υάλου, άνθρακα, αραμιδίου). Ο συνδυασμός των δυο αυτών υλικών έχει ως αποτέλεσμα την παροχή πολύ βελτιωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών αντοχής του σύνθετου υλικού σε καταπονήσεις σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του καθενός συστατικού χωριστά. Μερικά από τα χαρακτηριστικά των FRP είναι το μικρό τους βάρος, η μεγάλη αντοχή, η ανθεκτικότητα στη διάβρωση [4].

3.2 ΧΡΗΣΗ

Συνήθως τα FRP για εξωτερική χρήση χρησιμοποιούνται: α) τυλιγμένα σε κολώνες υπό την μορφή μανδύα για να αυξήσουν την αντοχή και την πλαστιμότητα ή β) σε δοκούς και πλάκες υπό την μορφή ελασμάτων για την αύξηση της καμπτικής αντοχής. Επίσης χρησιμοποιούνται και ράβδοι από FRP για την όπλιση σκυροδέματος, αντί για χάλυβα, λόγω της μεγάλης αντοχής, της μη διάβρωσης, του μη μαγνητισμού και του μικρού βάρους τους.

Για τα υποστηλώματα τα οποία είναι το κύριο μέλος με το οποίο θα ασχοληθούμε οι αυξήσεις σε αντοχή και πλαστιμότητα οφείλονται στο γεγονός ότι το στρώμα FRP που τυλίγει το σκυρόδεμα δημιουργεί μια δύναμη η οποία θέτει υπό περιορισμό τον διασταλλόμενο μπετονένιο πυρήνα όταν το υποστήλωμα βρίσκεται υπό θλιπτικό φορτίο. Έτσι το σκυρόδεμα το οποίο βρίσκεται σε μια κατάσταση τριαξονικής καταπόνησης, έχει αυξημένη τελική αντοχή και παραμόρφωση μειώνοντας την τέμνουσα τάση και συγκρατώντας την έναρξη των ρωγμών. Είναι προφανές ότι οι παραπάνω αυξήσεις σε αντοχή και πλαστιμότητα σχετίζονται βασικά με τις μηχανικές ιδιότητες του FRP το οποίο μπορεί να αλλοιωθεί σε μεγάλο βαθμό όταν εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες [5]. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο μανδύας FRP δεν προσδίδει στην αξονική αντοχή του υποστηλώματος αλλά περιορίζει τις θλιπτικές καμπτικές περιοχές του [3].

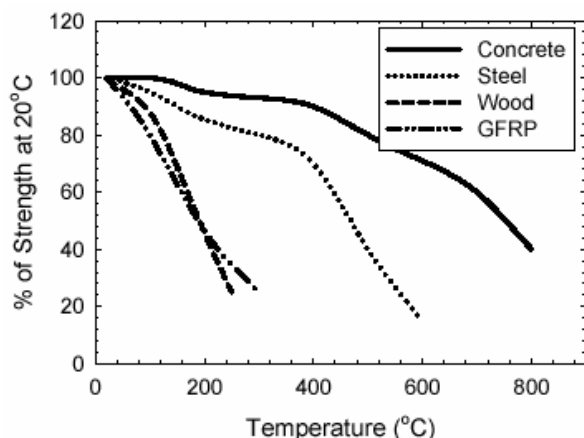
Μέχρι στιγμής πέρα από τη γεφυροποιία στην οποία δεν απαιτείται ανθεκτικότητα σε πυρκαγιά, λίγες είναι οι εφαρμογές στο ευρύτερο πεδίο του πολιτικού μηχανικού λόγω της απουσίας πληροφοριών και κανόνων για την προστασία σε πυρκαγιά των FRP υλικών. Θέλοντας λοιπόν να ερευνηθεί η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς πρέπει να ελεγχθούν 1) η ικανότητα ανάληψης των φορτίων, 2) η ανάπτυξη τοξικών καπνών, 3) η αύξηση της θερμοκρασίας στην κατασκευή, 4) η εξάπλωση φλόγας 5) η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και FRP [12].

3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Τα FRP είναι ευαίσθητα στην αύξηση της θερμοκρασίας σε δύο διαφορετικά στάδια. Πρώτα η πλειοψηφία των FRP χάνουν τις μηχανικές τους ιδιότητες σε θερμοκρασίες που είναι λίγο παραπάνω από τις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, ενώ κατά δεύτερο λόγο σε πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες (πάνω από 400°C) καίγονται με αποτέλεσμα την αποικοδόμηση της χημικής συγκρότησης της ρητίνης. Αυτή η θερμική καταστροφή έχει ως αποτέλεσμα να χαθούν οριστικά τα χαρακτηριστικά ανάληψης φορτίων [10]. Συγκεκριμένα τα FRP χάνουν την αντοχή και την δυσκαμψία τους όταν ξεπερνάνε την θερμοκρασία μεταβολής του γυαλιού T_g : δηλαδή την θερμοκρασία πάνω από την οποία τα πολυμερή των FRP υλικών πάσχουν από θερμική κατάπτωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Πάνω από το όριο αυτό το οποίο μπορεί να είναι από 65°C έως 150°C η συγκρατούσα ύλη αρχίζει να γίνεται παχύρρευστη και ελαστική. Η δυσκαμψία μειώνεται οδηγώντας σε υπερβολική εκτροπή του FRP [8]. Επίσης αν δεν υπάρχει προστασία τα FRP είναι ευαίσθητα σε ανάφλεξη του πολυμερούς με παράλληλη αποβολή τοξικών αερίων και εξάπλωση της φλόγας σε θερμοκρασίες πάνω από τους 400°C [4]. Οι υπάρχουσες εισηγήσεις για τα ενισχυμένα μέλη Ο.Σ. με FRP κάνουν λόγο για την ολική απώλεια των FRP κατά την πυρκαγιά. Αν και αυτή η υπόθεση είναι συντηρητική μπορεί όχι απαραίτητα να είναι περιοριστική. Ωστόσο δεν είναι ξεκάθαρο ποιες είναι οι συνέπειες, όταν το υλικό ξεπεράσει την θερμοκρασία T_g , σε σχέση με την γενική συμπεριφορά του ενισχυμένου μέλους Ο.Σ. με FRP [12]. Μελέτες που ερεύνησαν την απώλεια αντοχής και δυσκαμψίας των FRP σε συνθήκες πυρκαγιάς έδωσαν μια πληθώρα αποτελεσμάτων εξαρτώμενα από τον τύπο των πολυμερών και των ινών που συνεργάζονται. Έτσι

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP)

παράλληλα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία για τις ιδιότητες των FRP σε υψηλές θερμοκρασίες οι Kodur και Baingo πρότειναν μια συντηρητική καμπύλη αντοχής - θερμοκρασίας για ράβδους FRP η οποία φαίνεται στο σχήμα 1. Εδώ μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αντοχή των FRP παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με το σκυρόδεμα και τον χάλυβα [4].



Σχήμα 1. Καμπύλες Αντοχής σε συνάρτηση με την μεταβολή της Θερμοκρασίας για σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο και GlassFRP

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ

Πειράματα, σε πλήρη κλίμακα, έχουν γίνει από ενισχυμένα μελη Ο.Σ. με FRP. Συγκεκριμένα έχουν γίνει τα πειράματα σε συνθήκες πυρκαγιάς σε τρία υποστηλώματα Ο.Σ. κυκλικής διατομής με παράλληλη επιβολή φορτίου, σε τέσσερις μη φορτισμένες πλάκες Ο.Σ. και σε δύο πλακοδοκούς Ο.Σ. με επιβολή φορτίου. Στον πίνακα 1 αναφέρονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά τους [2]. Οι πειραματικές διαδικασίες για την εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών πυρκαγιάς έχουν γίνει σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες που ορίζονται από τον ASTM E119 (American Society for Testing and Materials) [2]. Η αντοχή σε πυρκαγιά των υποστηλωμάτων από Ο.Σ. προσδιορίζεται σύμφωνα με το φορτίο που μπορούν να φέρουν κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς. Σύμφωνα με τις οδηγίες για πυρκαγιά του ASTM E119 τα μέλη πρέπει να φέρουν ολόκληρο το φορτίο λειτουργίας τους για τον απαιτούμενο χρόνο πυρκαγιάς ο οποίος είναι συνήθως μεταξύ δυο και πέντε ωρών ανάλογα με το είδος του κτιρίου, την χρήση του και του αριθμού των ατόμων που βρίσκονται σ' αυτό. Στα συγκεκριμένα πειράματα μας ενδιαφέρει βασικά η μεταφορά των φορτίων λειτουργίας από τα μέλη ανεξαρτήτως αν το υλικό FRP έχει ξεπεράσει την θερμοκρασία T_g [3].

4.1. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΛΩΝ

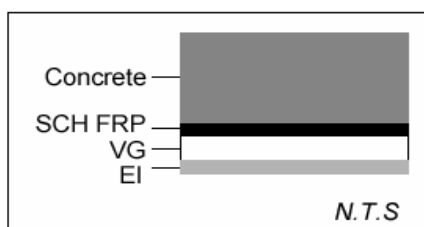
Όλα τα μέλη έχουν ενισχυθεί με φύλα (μανδύες) ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα (CarbonFRP) ή γυαλιού (GlassFRP) και στην συνέχεια μονωθεί με ειδικά υλικά της Fyfe Co. τα οποία αποτελούν ένα πολύ καλό σύστημα πυροπροστασίας. Συγκεκριμένα η μόνωση για την πυρκαγιά, Tyfo VG/EI, είναι ένα ειδικό σύστημα πυροπροστασίας από την Fyfe Co. το οποίο αποτελείται από δυο συστατικά: α) το VG το οποίο είναι ένα επίχρισμα σιμεντίτη ειδικό για πυροπροστασία και το οποίο εφαρμόζεται ψεκάζοντάς το. Αυτό έχει μικρή θερμική αγωγιμότητα και είναι αδρανές μέχρι θερμοκρασίες που φτάνουν τους 1000°C, β) το EI ένα περίβλημα τροποποιημένης εποξικής ρητίνης το οποίο σφραγίζει το στρώμα VG. Αυτό το υλικό κατά την αύξηση της θερμοκρασίας διογκώνεται ώστε να δημιουργηθεί ένα απανθρακωμένο πορώδες στρώμα το οποίο έχει και αυτό μικρή θερμική αγωγιμότητα. Η εφαρμογή του γίνεται περνώντας το πάνω από το στρώμα VG σαν μπογιά. Συγκεκριμένα η συμπεριφορά του έχει ως εξής: μετά τα 3-4min από την έναρξη της πυρκαγιάς αρχίζει

και ενεργοποιείται το στρώμα EI. Η διαστολή του ολοκληρώνεται στα 10min και στην συνέχεια αρχίζει και χάνει το δεσμό του από το υποστήλωμα στα 15min έκθεσης. Η αποτελεσματικότητα του στρώματος EI είναι διπλής σημασίας. Βασικά το στρώμα αυτό είναι η πρώτη γραμμή άμυνας του υποστηλώματος διατηρώντας σε χαμηλά επίπεδα την θερμοκρασία στο υποστήλωμα παρά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Κατά δεύτερο λόγο το στρώμα «μπογιάς» EI που υπάρχει ακριβώς πάνω από το στρώμα VG έχει καταφέρει να παγιδεύσει όλη την υγρασία στο στρώμα VG. Έτσι τα μονωτικά χαρακτηριστικά του στρώματος VG αυξάνονται ακόμα περισσότερο και μόλις η πυρκαγιά περάσει στο στρώμα VG, αυτό απελευθερώνει χημικά και φυσικά συνδυασμένο νερό υπό την μορφή ατμού το οποίο βοηθάει στη διατήρηση της θερμοκρασίας κοντά στους 100°C μέχρις ότου όλο το νερό εξατμιστεί. Παράλληλα η μονωτική ιδιότητα του υλικού καθυστερεί την απελευθέρωση του ατμού [1], [11].

4.2. ΠΛΑΚΕΣ

Πειράματα έγιναν για να αποτιμηθεί η μεταφορά θερμότητας σε μικρής κλίμακας μετονένιες πλάκες οι οποίες είχαν ενισχυθεί με φύλα FRP και μονωθεί με ένα συνδυασμό υλικών για πυροπροστασία. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1 οι τέσσερις πλάκες οι οποίες δοκιμάστηκαν σε πυρκαγιά ήταν ενισχυμένες και μονωμένες με διαφορετικά υλικά (ενίσχυση: Tyfo SCH , MBrace CF130, μόνωση: Tyfo VG/EI, Sonowall R, Fireshield 1350) ενώ παράλληλα δεν ήταν κάτω από την επιβολή φορτίων (γι' αυτό το λόγω τα πειράματα των πλακών δεν θεωρούνται ολοκληρωμένης κλίμακας αφού η επιβολή φορτίου είναι βασική προϋπόθεση του ASTM E119). Ο βασικός λοιπόν σκοπός των πειραμάτων των πλακών ήταν να εξεταστεί η καλύτερη δυνατή λύση για την μόνωση των πλακοδοκών (που θα ακολουθήσουν) τόσο σε θέμα μονωτικού υλικού όσο και σε θέμα πάχους [2].

Εδώ θα αναλύσουμε την συμπεριφορά μόνο των δύο πλακών (1 και 2) οι οποίες είναι από σκυρόδεμα αντοχής 28MPa, διαστάσεων (954mmx1331mm) και πάχους 150mm. Ακολουθήθηκε ταυτόχρονη τοποθέτησή τους στον ίδιο θάλαμο για δοκιμή σε πυρκαγιά. Στο συγκεκριμένο πείραμα



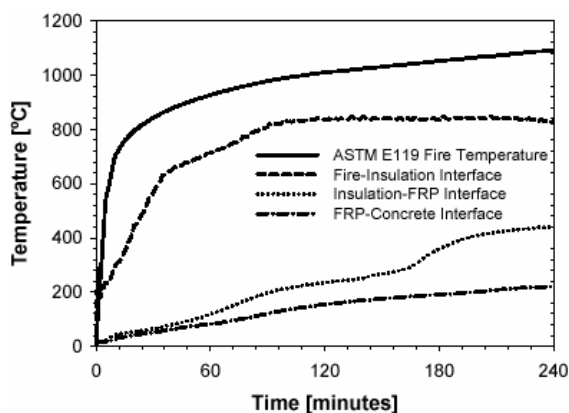
όπως αναφέρθηκε δεν υπήρξε κανένα φορτίο που να παραλαμβάνουν οι πλάκες πέρα από το ίδιο βάρος. Αυτές οι πλάκες ενισχύθηκαν με δυο στρώσεις από υλικό Tyfo SCH με άνθρακα το οποίο έχει $T_g = 93^\circ\text{C}$, ενώ για μόνωση στην πυρκαγιά χρησιμοποιήθηκε το σύστημα μόνωσης VG/EI. Στην πρώτη πλάκα το στρώμα VG είναι 19mm ενώ στην δεύτερη 38mm και 0,25mm EI σε κάθεμία έχοντας την **Σχήμα 2. Στρώματα πλάκας** μορφή που φαίνεται και στο σχήμα 2. Οι πλάκες ήταν

εκτεθειμένες σε συγκεκριμένες συνθήκες πυρκαγιάς για τέσσερις ώρες. Στα πρώτα πέντε λεπτά το στρώμα EI ενεργοποιήθηκε δημιουργώντας ένα απανθρακωμένο κάλυμμα με παράλληλη αποβολή καπνού ενώ στα δεκαπέντε λεπτά έχασε τον δεσμό του με το VG. Στις 2h και 15min το στρώμα των 19mm του VG στην πλάκα 1 έχασε και αυτό τον δεσμό του με το μανδύα FRP, ενώ δυο λεπτά αργότερα αποκολλήθηκε και το στρώμα FRP. Στη συνέχεια ακολούθησε θρυμματισμός του σκυροδέματος και εμφάνιση ρωγμών στην μη εκτεθειμένη επιφάνεια. Αντίθετα για την πλάκα 2 καμία εξωτερική βλάβη δεν παρατηρήθηκε ενώ η μόνωση παρέμεινε προστατεύοντας την πλάκα για όλη την διάρκεια της πυρκαγιάς. Για να θεωρηθεί το σύστημα ενίσχυσης με FRP κατασκευαστικά αποτελεσματικό και δραστικό υπάρχει η υπόθεση ότι πρέπει η θερμοκρασία στο στρώμα του FRP να παραμείνει κάτω από την T_g . (3.3) Βέβαια αυτή η προϋπόθεση δεν αναγνωρίζεται ως βασικό κριτήριο για τους κανονισμούς πυρκαγιάς. Στην περίπτωση όμως που την δεχτούμε ο χρόνος είναι 45min για την πλάκα 1 και 150min για την πλάκα 2 [4]

4.3 ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΙ

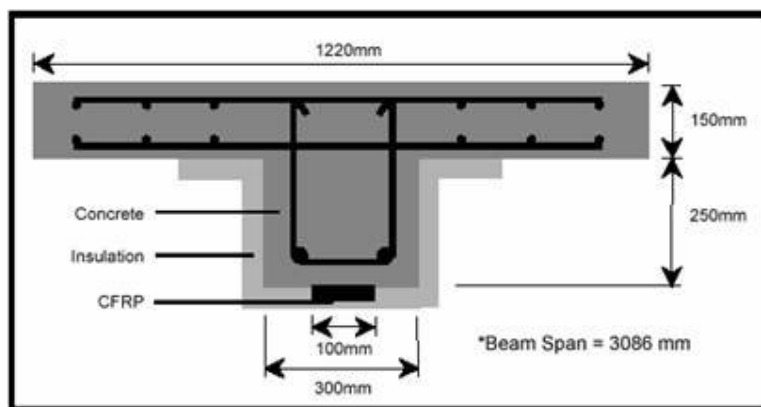
Οι δυο πλακοδοκοί οι οποίες δοκιμάστηκαν σε πυρκαγιά ήταν μονωμένες με Tyfo VG/EI-R ενώ για ενίσχυση είχαν Tyfo SCH FRP. Οι πλακοδοκοί πέτυχαν αντοχή στη φωτιά με παράλληλη επιβολή φορτίου για τέσσερις ώρες. Οι λόγοι του φορτίου επιβολής προς το τελικό φορτίο μελέτης δίνονται στο πίνακα 1 και έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με το

CSA (Canadian Standards Association) S806. Μετά από τέσσεράμιση ώρες σε έκθεση στη πυρκαγιά και ενώ δεν υπήρχε κανένα δείγμα αστοχίας ο λόγος φορτίου αυξήθηκε σε 1.26 και πάλι χωρίς να παρουσιαστεί αστοχία. Η εικόνα 1 δείχνει την διατομή της ενισχυμένης πλακοδοκού και την μόνωση η οποία τοποθετήθηκε, ενώ στο σχεδιάγραμμα του σχήματος 3 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο για τα διάφορα στρώματα της πλακοδοκού με πάχος μόνωσης 38mm. Η εξαιρετική θερμική προστασία μέσω της μόνωσης είναι εμφανής αφού το στρώμα του FRP φτάνει μόνο τους 320°C και μάλιστα μετά από τέσσερις ώρες. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η μόνωση έμεινε άθικτη για όλη την διάρκεια του πειράματος. Όσο αφορά την συμπεριφορά στο δομικό του κομμάτι τα αποτελέσματα ήτανε ικανοποιητικά για τα ενισχυμένα μέλη με FRP ακόμη και μετά από τις τέσσερις ώρες έκθεσης στη φωτιά [2].



χρόνο

Εικόνα 1. Διατομή πλακοδοκού

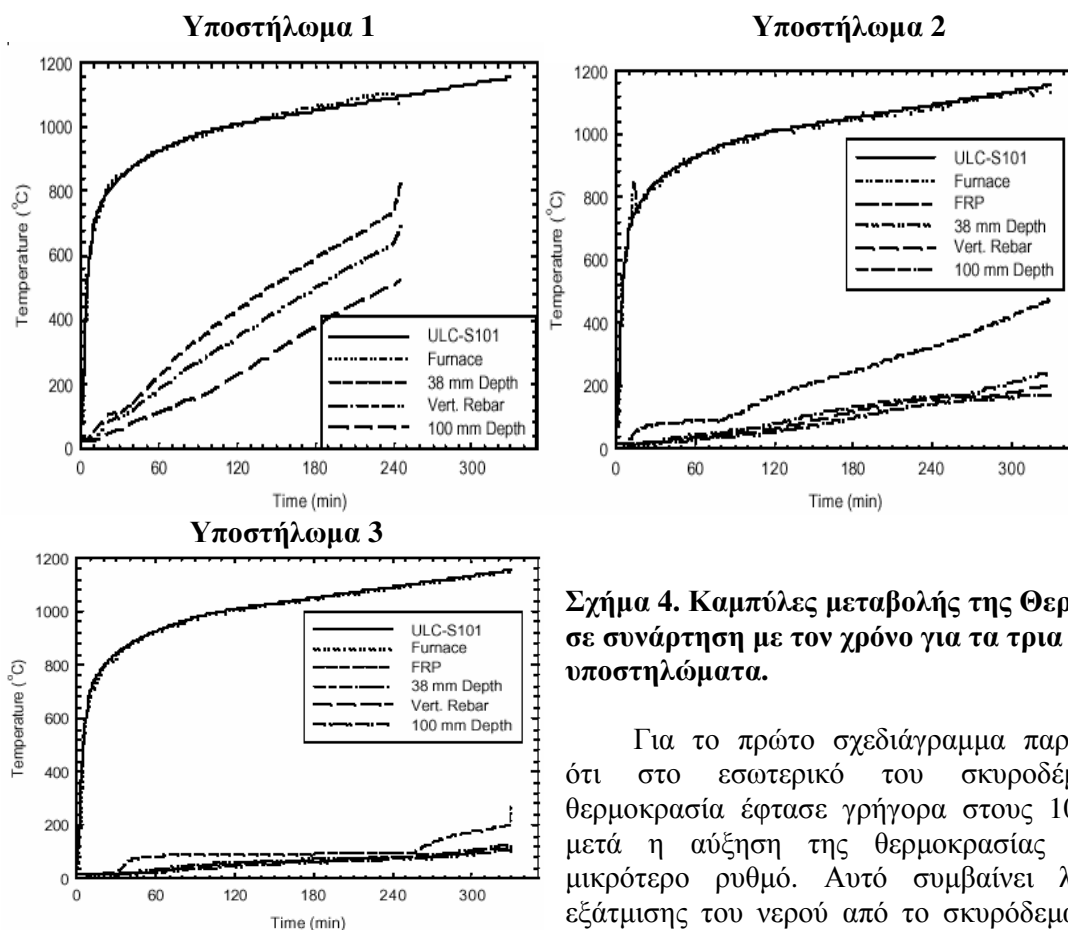


Σχήμα 3. Καμπύλη μεταβολής της Θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον

4.4 ΥΠΟΣΤΗΛΩΜΑΤΑ

Στα πειράματα εξετάζονται τρία υποστηλώματα με χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα 1. Τα υποστηλώματα είναι κυκλικής διατομής, ενισχυμένα, μονωμένα για πυροπροστασία και έχουν ύψος 3810mm με μήκος έκθεσης στην πυρκαγιά 3000mm. (Στα πειράματα δεν έχουν δοκιμαστεί ενισχυμένα υποστηλώματα με φύλλα FRP χωρίς μόνωση γιατί έχει αποδειχθεί ότι σε λιγότερο από μια ώρα έκθεσης σε πυρκαγιά το στρώμα αυτό χάνεται και το υποστήλωμα συμπεριφέρεται ανεπαρκώς [1]). Όσο αφορά το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου για τα υποστηλώματα 2, 3 είναι αντιπροσωπευτικό του φορτίου λειτουργίας των ενισχυμένων υποστηλωμάτων προσδιορισμένο από υπάρχοντες κανονισμούς για την ενίσχυση μελών Ο.Σ. με FRP και υποθέτοντας τον λόγο κινητών φορτίων προς μόνιμα 1:1. Αντίστοιχη υπόθεση γίνεται και για το μη ενισχυμένο υποστήλωμα (1). Οι λόγοι του φορτίου επιβολής προς το τελικό φορτίο μελέτης για τα τρία υποστηλώματα δίνονται στη έκτη στήλη του πίνακα 1. Οι καμπύλες μεταβολής θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο για τα

υποστηλώματα 1,2 και 3 σε διάφορα στρώματα αυτών δίνονται στο σχήμα 4. Και στα δυο υποστηλώματα (2, 3) η πυροπροστασία μέσω του μονωτικού στρώματος ήταν ικανοποιητική και η θερμοκρασία τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στο χάλυβα παρέμεινε κάτω από τους 350°C για όλη την διάρκεια της πυρκαγιάς (μέχρι την αστοχία). Έτσι τα υποστηλώματα 2 και 3 ικανοποίησαν τις προϋποθέσεις του ASTM E119 αντοχής σε φωτιά για πέντε ώρες στα υποστηλώματα κυκλικής διατομής.



Σχήμα 4. Καμπύλες μεταβολής της Θερμο-κρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο για τα τρία υποστηλώματα.

Για το πρώτο σχεδιάγραμμα παρατηρούμε ότι στο εσωτερικό του σκυροδέματος η θερμοκρασία έφτασε γρήγορα στους 100°C ενώ μετά η αύξηση της θερμοκρασίας έγινε με μικρότερο ρυθμό. Αυτό συμβαίνει λόγω της εξάτμισης του νερού από το σκυρόδεμα και την μετακίνηση της υγρασίας λόγω θερμότητας προς

το κέντρο του υποστηλώματος. Η αστοχία σ' αυτό το υποστήλωμα επήρθε όταν ο πυρήνας του έφτασε σε θερμοκρασία 400°C. Στα άλλα δυο σχήματα φαίνονται οι μεταβολές θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο για τα υποστηλώματα 2 και 3. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η θερμοκρασία του στρώματος FRP παραμένει κάτω από τους 150°C για αρκετό χρονικό διάστημα (μέχρι τέσσερις ώρες για το υποστήλωμα 3). Αυτό οφείλεται στην απαραίτητη εξασφάλιση πάχους του μονωτικού στρώματος VG/EI το οποίο κατάφερε να διατηρήσει τη θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα για παρατεταμένη διάρκεια. Στο υποστήλωμα 3 οι θερμοκρασίες είναι γενικά μικρότερες απ' ό,τι στο υποστήλωμα 2 γιατί όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1 υπάρχει σχεδόν η διπλάσια μόνωση στο υποστήλωμα 3. Αντίθετα προς το υποστήλωμα 1, τα 2 και 3 στον χάλυβα και το μπετόν διατήρησαν θερμοκρασίες κάτω των 200°C, ενώ στο υποστήλωμα 1 οι θερμοκρασίες είχαν φτάσει στους 800°C και 650°C για το μπετόν και το χάλυβα αντίστοιχα. Αφού η θερμοκρασία των 200°C δεν επηρεάζει τόσο τις μηχανικές ιδιότητες του μπετόν και του χάλυβα ώστε να τις εκφυλίσει, μπορεί να ειπωθεί με ασφάλεια ότι τα ενισχυμένα υποστηλώματα διατήρησαν την ικανότητα μεταφοράς του αξονικού φορτίου για παραπάνω από πέντε ώρες

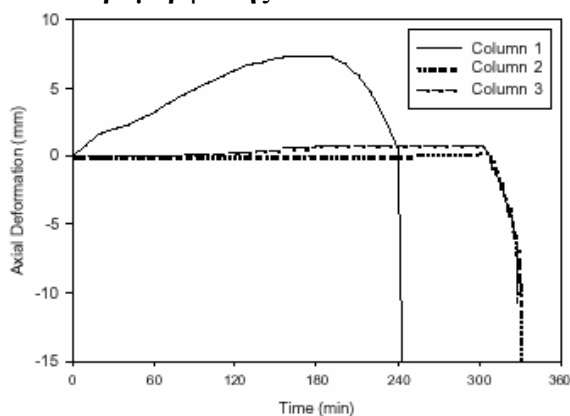
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP)

έκθεση σε συνθήκες πυρκαγιάς [1]. Τα υποστηλώματα 2 και 3 αστόχησαν στις πεντέμισι ώρες αλλά μετά από αύξηση του φορτίου στο 180% του απαιτούμενου φορτίου λειτουργίας (μεγαλύτερο από το τελικό φορτίο σχεδιασμού), ενώ το υποστήλωμα 1 αστόχησε στις τέσσερις ώρες και ένα τέταρο κάτω από την επιβολή του φορτίου λειτουργίας. Συνολικά και τα τρία υποστηλώματα πέτυχαν αντοχή στη φωτιά με παράλληλη επιβολή φορτίου για παραπάνω από τέσσερις ώρες. Στην εικόνα 2 φαίνεται το υποστήλωμα κυκλικής διατομής πριν και μετά την έκθεσή του στη φωτιά για παραπάνω από πέντε ώρες.



Εικόνα 2. Υποστήλωμα κυκλικής διατομής α) πριν και β) μετά την έκθεσή του στην πυρκαγιά. [7]

Σχήμα 4. Μεταβολή της αξονικής παραμόρφωσης



Η μεταβολή της αξονικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση με το χρόνο δίνεται στο σχήμα 4 και για τα τρία υποστηλώματα. Αρχικά το υποστήλωμα 1 διαστέλλεται μέχρι να αρχίσει να κάμπτεται σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ στη συνέχεια συστέλλεται απότομα και οδηγείται στην αστοχία. Η παραμόρφωση κατά την έκθεση στην πυρκαγιά οφείλεται σε πολλούς παράγοντες όπως το φορτίο, την θερμική διαστολή, τον ερπυσμό. Η αρχική παραμόρφωση οφείλεται στην θερμική διαστολή του μπετόν και του χάλυβα. Καθώς το φαινόμενο της θερμικής διαστολής και του φορτίου είναι σημαντικά κατά την διάρκεια των ενδιάμεσων σταδίων, το φαινόμενο του ερπυσμού

έρχεται σε μετέπειτα στάδια λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας. Τέλος η απότομη συστολή είναι αποτέλεσμα της απώλειας αντοχής και δυσκαμψίας του μπετόν και του χάλυβα λόγω της αύξησης της

θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υποστηλώματος. Για τα υποστηλώματα 2, 3 το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης, που ήταν μόνο μια μικρή επιμήκυνση, οφείλεται στην ήπια θερμική διαστολή. Η διαστολή ήταν μεγαλύτερη για το υποστήλωμα 2 στο οποίο επικράτησε ελαφρώς μεγαλύτερη θερμοκρασία από το υποστήλωμα 3 λόγω του μικρότερου πάχους μόνωσης. Σε αντίθεση με το υποστήλωμα 1, στα 2 και 3 δεν παρουσιάστηκε καμία συστολή μέχρι την στιγμή που αυξήθηκε επιτηδευμένα το φορτίο για να φτάσουμε στην αστοχία. Αυτό οφείλεται στην ευεργετική συμβολή του στρώματος μόνωσης το οποίο είχε ως αποτέλεσμα τις ελάχιστες δυνατές αυξήσεις θερμοκρασίας στο σκυρόδεμα και στον χάλυβα και κατά συνέπεια καμία απώλεια σε αντοχή και δυσκαμψία. [1]

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά από τα πειράματα σε πυρκαγιά						
Μέλος/No	Διαστάσεις	FRP	Μόνωση	Πάχος Μόνωσης (mm)	Λόγος φορτίων	Αντοχή στη Φωτιά (hrs)
Υποστήλωμα 1	355mm Ø κυκλικό	ΧΩΡΙΣ	ΧΩΡΙΣ	-	0,66	>4
Υποστήλωμα 2	400mm Ø κυκλικό	Tyfo SCH	Tyfo VG/EI	32/0,56	0,73	>5
Υποστήλωμα 3	400mm Ø κυκλικό	Tyfo SCH	Tyfo VG/EI	57/0,25	0,73	>5
Πλάκα 1	150mm πάχος	Tyfo SCH	Tyfo VG/EI	19/0,25	0,00	>2
Πλάκα 2	150mm πάχος	Tyfo SCH	Tyfo VG/EI	38/0,25	0,00	>4
Πλάκα 3	150mm πάχος	MBrace CF130	Sonowall R	38	0,00	>4
Πλάκα 4	150mm πάχος	MBrace CF130	Fireshield 1350	38	0,00	>4
Πλακοδοκός 1	Εικόνα 3	Tyfo SCH	Tyfo VG/EI-R	25	0,63	>4
Πλακοδοκός 2	Εικόνα 3	Tyfo SCH	Tyfo VG/EI-R	38	0,63	>4

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Κατάλληλα σχεδιασμένα υποστηλώματα ενισχυμένα με μανδύα FRP (έχοντας την κατάλληλη μόνωση για πυροπροστασία) μπορούν να πετύχουν ικανοποιητικές αντοχές σε πυρκαγιά με παράλληλη επιβολή πλήρους φορτίου λειτουργίας για τουλάχιστον πέντε ώρες σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ASTM E119.
- Όλα τα μονωμένα ενισχυμένα μέλη Ο.Σ. με FRP πέτυχαν ικανοποιητικές αντοχές σε πυρκαγιά παρά το γεγονός ότι η θερμοκρασία της μετάβασης του γυαλιού T_g των πολυμερών των FRP είχε ξεπεραστεί αρκετά νωρίτερα.. Συμπερασματικά αυτά τα αποτελέσματα μας οδηγούν στο ότι η αντοχή σε πυρκαγιά των ενισχυμένων μελών Ο.Σ. με FRP δεν είναι αναγκαστικό να προσδιορίζεται με όρους θερμοκρασίας στο επίπεδο του FRP αλλά θα πρέπει να βασίζεται στην ικανότητα ανάλιψης φορτίου από όλο το μέλος κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς [2].
- Πέρα από τα συμβατικά υποστηλώματα Ο.Σ., αυτά τα οποία είναι ενισχυμένα με FRP είναι αναγκαίο να έχουν καλή πυροπροστασία με ειδικά μονωτικά υλικά ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή αντοχή σε πυρκαγιά κάτω από την επιβολή φορτίου. Η απόδοση των μονωμένων ενισχυμένων υποστηλωμάτων μπορεί να είναι ίδια ή/και καλύτερη από τα συμβατικά υποστηλώματα Ο.Σ.
- Αφού δεν υπάρχει σαφής προϋπόθεση για την παραμονή της θερμοκρασίας του στρώματος FRP κάτω από την T_g δεν είναι γνωστό ποιά είναι η επιτρεπτή θερμοκρασία ώστε οι απομένουσες ιδιότητες να είναι δραστικές μετά από μια σοβαρή πυρκαγιά σε ένα κτίριο [11].
- Η αντοχή σχεδιασμού του μη ενισχυμένου υποστηλώματος πρέπει να παραμένει μεγαλύτερη από τα φορτία λειτουργίας (χωρίς συντελεστές) για την διάρκεια της πυρκαγιάς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανησυχία για την απώλεια της αποτελεσματικότητας του φύλλου FRP στην περίπτωση πυρκαγιάς. Αυτό βέβαια περιορίζει το ποσοστό της αύξησης της αντοχής

των υποστηλωμάτων μέσω μανδύα FRP στο 40% έως 70% και στο 25% έως 50% για συντελεστές φορτίων Αμερικής και Καναδά αντίστοιχα [11].

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kodur, V.K.R.; Bisby, L.A.; Green, M.F., “Fire endurance of FRP –strengthened reinforced concrete columns”, IRC Internal Report No 46633 National Research Council of Canada NRCC, Proceedings of the Fourth International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Seoul, Korea, June 27-30, 2004, pp. 872-881.
2. Kodur, V.R.; Green, M.F.; Bisby, L.A.; Williams, B., “Evaluating the fire performance of FRP-strengthened structures”, IRC Internal Report No 47021 National Research Council of Canada, Concrete Engineering International, v. 8, no. 2, Summer 2004, pp. 48-50.
3. Bisby, L.; Kodur, V.; Green, M., “Modelling the fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete columns”, Proceedings of the Third International Workshop, Structures in Fire, Ottawa, Ontario, May 10-11, 2004, pp. 1-15.
4. Williams, B.K.; Kodur, V.K.R.; Bisby, L.A.; Green, M.F., “The Performance of FRP-strengthened concrete slabs in fire”, Proceedings of the Fourth International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures ACMBS, Calgary, Alberta, July 20-23 2004, pp. 1-8.
5. Sorathia, U.; Beck, C., “Structural Performance Of Composites at Elevated Temperatures due to Shipboard Fires”, Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, Annapolis, MD 21402.
6. Graigie, L., “New Research on the Behaviour of FRP-strengthened Concrete Elements in Fire”, American Composites Fabricators Association ACMA <http://www.glam.ac.uk>
7. Green, M.F.; Kodur, V.R.; Bisby, L.A.; Williams, B.K., “Fire Performance of FRP-strengthened Structures”, Intelligent Sensing for Innovative Structures ISIS Innovator Newsletter, February 2004, p.1.
8. Ohlemiller, T.; Cleary, T.; Brown, J.; Shields, J., “Assesing the Flammability of Composite Materials”, Proceedings of the Thirty-Ninth Sagamore Army Materials Research Conference, Plymouth, MA, September 16-17, 1992, pp. 308-309
9. Tang, B., “Fiber Reinforced Polymer Composites Applications in USA”, FRP Library, Federal Highway Administration, Washington, January 6, 1997.
10. Karbhari, V.M.; Chin, J.W.; Hunston, D.; Benmokrane, B.; Juska, T.; Morgan, R.; Lesko, J.J.; Sorathia, U.; Reynaud, D., “Durability Gap Analysis for FRP Composites in Civil Infrastructure”, National Institute of Standards and Technology NIST, Journal of Composites for Construction, 7(3), 238-247, 2003.
11. Bisby, L.A.; Kodur, V.R.; Green, M.F., “Performance in Fire of FRP-confined Reinforced Concrete Columns”, IRC Internal Report No 46966 National Research Council of Canada, Queen’s University.
12. Nadjai, A.; Faris, Ali, “Fire Performance of FRP in Reinforced Concrete Structures”.