

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP) ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

ΣΚΑΠΙΝΑΚΗΣ ΑΔΑΜΑΝΤΙΟΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π., up1047505@upnet.gr

ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π., up1047422@upnet.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος Ενισχύσεις και Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος. Η ενίσχυση δομικών στοιχείων με ινοπλισμένα πολυμερή (“Fiber Reinforced Polymers” – FRP) αποτελεί μια εδραιωμένη τεχνική που χρησιμοποιείται σε όλον τον κόσμο, η οποία ωστόσο περιορίζεται από το γεγονός ότι τα υλικά αυτά είναι εύφλεκτα και ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εύρεση των βέλτιστων θερμομονωτικών επικαλύψεων δομικών μελών ενισχυμένων με ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) οι οποίες στοχεύουν στην καθυστέρηση αύξησης της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια ΙΟΠ-σκυροδέματος με συνέπεια τη μείωση στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης. Μετά τη μελέτη πειραμάτων και τη συγκέντρωση πληροφοριών έγινε κατανοητό πως τα καλύμματα πυροπροστασίας είναι ικανά να αυξήσουν το χρόνο χρησιμότητας των ΙΟΠ και να βελτιώσουν την τελική αντοχή των δοκιμίων. Τα κονιάματα περλίτη και βερμικουλίτη φάνηκε να είναι τα πιο αποτελεσματικά και ο συνδυασμός τους με κουβέρτα κεραμικών ινών αρκετά ισχυρός. Η διαθεσιμότητα των υλικών και το αυξημένο κόστος της λύσης που αναλύεται είναι, ωστόσο, αυξημένο και περαιτέρω μελέτη κρίνεται απαραίτητη.

1.Εισαγωγή

Η ενίσχυση-επισκευή δομικών στοιχείων με ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers) αποτελεί πλέον μια από τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες τεχνικές ανά τον κόσμο. Ο συνδυασμός του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος, της ευκολίας στην εφαρμογή και του χαμηλού κόστους εξηγεί το λόγο για τον οποίο τα «υφάσματα» από ινώδη οπλισμένα πολυμερή βρίσκονται ψηλά στη λίστα των επιλογών από πολλούς μηχανικούς. Ωστόσο, το γεγονός πως τα υλικά αυτά είναι εύφλεκτα και υπερευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες έχουν περιορίσει την χρήση τους κυρίως σε ογκώδεις κατασκευές, όπως γέφυρες, όπου η μελέτη κατασκευής δε δίνει πρωταρχική σημασία στο ενδεχόμενο πυρκαγιάς [1]. Ως φυσικό επακόλουθο, η έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά των ΙΟΠ σε συνθήκες φωτιάς και οι πειραματικές μελέτες για τη βελτιστοποίηση της χρήσης τους έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι μέχρι τώρα μελέτες έχουν επιδείξει την εφαρμογή θερμομονωτικών επικαλύψεων ως μία πιθανή λύση στο πρόβλημα. Υλικά με χαμηλούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας και αλλαγές στις φυσικές και θερμικές τους ιδιότητες μετά την έκθεση σε πυρκαγιά μελετώνται ως τα πλέον κατάλληλα για την παραγωγή πυρίμαχων τσιμεντοειδών επικαλυμμάτων. Όπως θα αναλυθεί περαιτέρω στις παρακάτω ενότητες, ένα επαρκές πάχος επικάλυψης είναι ικανό να προστατέψει το ΙΟΠ για αρκετή ώρα μέχρι την κατάσβεση της πυρκαγιάς διατηρώντας την αποτελεσματικότητά του και αποτρέποντας την αντικατάστασή του μετά το πέρας του ακραίου γεγονότος.

2.ΙΟΠ (FRP)

Η χρήση φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια στον τομέα των ενισχύσεων των κατασκευών. Η υλοποίηση της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά εξασφαλίζει προστασία σε μέλη με ανεπαρκή αντοχή ή πλαστιμότητα, καθώς επιλύει ζητήματα στοιχείων που είτε έχουν υποστεί ζημιά σε σεισμό είτε ενισχύονται προληπτικά. Αναλόγως της προέλευσης της σύνθεσής τους

κατηγοριοποιούνται σε άνθρακα, γάλου και αραμιδίου, με τις ίνες υφάσματος να έχουν μια ή περισσότερες διευθύνσεις [2]. Η εφαρμογή τους απαιτεί την χρήση κάποιου είδους μήτρας η οποία σε πλήθος εφαρμογών τυγχάνει να είναι η εποξική ρητίνη [3]. Η ευρέως διαδεδομένη χρήση τους οφείλεται στη βελτίωση της απόδοσης των δομικών στοιχείων και στη δυνατότητα να λάβουν χώρα σε πλήθος εφαρμογών, εκεί που οι συμβατικές λύσεις δεν μπορούν να υλοποιηθούν λόγω κατασκευαστικών ιδιαιτεροτήτων. Κύριο γνώρισμά τους είναι η ικανότητα ανάληψης εφελκυστικής δύναμης συνδυαστικά με το χαμηλό βάρος τους και την ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Στα θετικά προσμετράται η ευκολία και η ευελιξία στην αύξηση της αντοχής των στοιχείων χωρίς παραποίηση της γεωμετρίας [4]. Η εφαρμογή τους κατέδειξε κάποιες εμφανείς αδυναμίες οι οποίες σχετίζονται με τους κανόνες σωστής εφαρμογής, το κόστος, την ψαθυρή αστοχία, τη μη αντιστρεψιμότητα της ενίσχυσης, και την πτώση της αντοχής τους σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.

2.2 ΕΙΔΗ ΙΟΠ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Στον τομέα των επισκευών και των ενισχύσεων οι διάμετροι των ινών που χρησιμοποιούνται είναι μεταξύ 5-25mm και διακρίνονται σε [5]:

- Γάλου (πυκνότητας 2300-2400 kg/m³): η κατηγορία αυτή υποδιαιρείται σε 3 τύπους, τον E με αρνητικό χαρακτηριστικό την μείωση της αντοχής του σκυροδέματος σε αλκαλικό περιβάλλον, τον Z ή AR με πλεονέκτημα αυτό της μεγάλης αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον και τον S που χαρακτηρίζεται από υψηλό μέτρο ελαστικότητας πέραν της υψηλής αντοχής.
- Άνθρακα (πυκνότητας 1800-1900 kg/m³): διακρίνονται σε νήματα που προκύπτουν είτε από την απόσταξη κάρβουνου, είτε μέσω θερμικής κατεργασίας του πολυακρυλονιτριλίου η οποία εξασφαλίζει υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας. Συνδυασμός των ανθρακονημάτων με υαλονήματα (τα οποία λειτουργούν ως υβρίδιο) επιδρούν αυξητικά στην ακαμψία του δομικού στοιχείου.
- Αραμίδιου (πυκνότητας 1450 kg/m³): διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή τους και το μέτρο ελαστικότητας. Ίνες με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (Κέβλαρ 29), ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας παραγόμενες από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ 29, Twaron) και ίνες παραγόμενες από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο.

Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Άνθρακας	ΙΟΠ-Αραμιδίου	ΙΟΠ-Γυαλιού
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	πολύ καλή	καλή	οριακή
Αντοχή σε κόπωση	πολύ καλή	καλή	οριακή
Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον	πολύ καλή	καλή	ακατάλληλο υλικό
Αντοχή σε κρούση	μικρή	πολύ καλή	καλή
Αντοχή σε φθορά λόγω τριβής	μέτρια	πολύ καλή	καλή
Γαλβανικό φαινόμενο	ναι	όχι	όχι
Αντοχή σε υπεριώδεις ακτινοβολίες	καλή	μικρή	καλή
Πυκνότητα (kg/m ³ ×10 ³)	~1.80	~2.50	~1.50
Κόστος (συγκριτικά μεταξύ τους)	υψηλό	μέτριο	χαμηλό
Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες	(800-1600) °C	200°C	(300- 1000) °C

Σχήμα 1: Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα, αραμιδίου και γυαλιού [6]

2.3 ΡΗΤΙΝΕΣ

Οι ρητίνες είναι είδος μήτρας συνδετικού-συγκολλητικού υλικού με κυρίαρχη στις σημερινές εφαρμογές την εποξική ρητίνη. Κατά κανόνα είναι δύο συστατικών και η αναλογία ανάμειξης της ποικίλει από 1:1 έως 1:5 (ρητίνη: σκληρυντής) [7]. Ο ρόλος που επιτελεί είναι η μεταφορά των τάσεων από το στοιχείο που έχει ενισχυθεί στο σύνθετο υλικό ενίσχυσης. Αδήριτη είναι η ανάγκη αποσαφήνισης του γεγονότος ότι η ρητίνη είναι αυτή που χαρακτηρίζει ευαίσθητα τα ΙΟΠ σε υψηλές θερμοκρασίες καθότι τα υφάσματα παρουσιάζουν υψηλότερη ανθεκτικότητα. Ειδικότερα στοχεύοντας σε ουσιαστική περιγραφή της συμπεριφοράς της, σε συνθήκες έκθεσης υψηλής θερμοκρασίας διαπιστώνεται ότι από σκληρή και ψαθυρή μεταπίπτει σε ιξώδη και ελαστική κατάσταση μέσω της διαδικασίας της υαλώδους μετάπτωσης [8].

3.ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

3.1 ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Η σχεδίαση σε καταπόνηση πυρκαγιάς δεν έχει μελετηθεί επαρκώς στον κλάδο των πολιτικών μηχανικών. Εσφαλμένα κυριαρχεί η πεποίθηση ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σχεδόν ανθεκτικό έναντι πυρκαγιάς. Η επίδραση της πυρκαγιάς συνδέεται άμεσα με τη διάρκεια και δεν μπορούμε να μιλάμε για υλικά με απεριόριστη πυροπροστασία. Η μελέτη θα πρέπει να γίνεται σε επίπεδο δομικών στοιχείων και όχι υλικών, αν και η επιλογή τους έχει άμεση επίδραση.

3.2 ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΦΩΤΙΑΣ

Ο τρόπος με τον οποίο εξαπλώνεται η πυρκαγιά δίνει την εντύπωση ότι δεν υπακούει σε κάποιο νόμο. Εμπειριστατωμένες μελέτες καταδεικνύουν το ακριβώς αντίθετο. Εφόσον έχουν σχηματιστεί φλόγες, η ταχύτητα εξέλιξης της πυρκαγιάς διπλασιάζεται για αύξηση θερμοκρασίας 10 °C, ενώ γίνεται 1000 φορές μεγαλύτερη για αύξηση 100 °C [9]. Όσο υπάρχει καύσιμη ύλη και οξυγόνο η πυρκαγιά συνεχίζει ανεμπόδιστη. Οι φλόγες πέρα από τις υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν και υψηλές πιέσεις ικανές να σπάσουν τα τζάμια των παραθύρων γεγονός που αυξάνει την ένταση της καύσης καθώς εισέρχεται στο κτήριο ποσότητα οξυγόνου. Τα αέρια της καύσης μπορούν να οδηγήσουν σε ασφυξία, δηλητηριάσεις και περιορισμό ορατότητας καθιστώντας

δύσκολο το έργο της πυρόσβεσης. Η άμεση εξάπλωση σε γειτονικούς χώρους αλλά και η μεταφορά μέσω ανελκυστήρων και αγωγών αερισμού ευνοεί περαιτέρω την μετάδοση της πυρκαγιάς [9]. Ειδικότερα τα εύφλεκτα υλικά που μπορεί να βρίσκονται σε κατοικίες, βιομηχανικούς χώρους, λεβητοστάσια και αποθήκες υγρών καυσίμων δύνανται να επηρεάσουν την εξέλιξη της πυρκαγιάς.

3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΥΡΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Εφόσον η πιθανότητα έκθεσης κατασκευών σε πυρκαγιά δεν είναι μηδενική και συγχρόνως συνοδεύεται από μείωση της ικανότητας παραλαβής των διαφόρων φορτίων από τα δομικά μέλη, ο δείκτης επικινδυνότητας είναι υψηλός. Παρότι η μελέτη και η πρόληψη είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων που δεν μπορούν όλοι να προσδιοριστούν, επιβάλλεται η αξιολόγηση και η αποτίμηση της συμπεριφοράς των κατασκευών καθώς και η πρόληψη. Η διεξαγωγή πειραμάτων σε δοκίμια υπό συνθήκες φωτιάς και η εξέτασή τους σε δοκιμές θλίψης και κάμψης λειτουργεί ως πηγή απαντήσεων. Η αξιολόγηση στην παρούσα μελέτη θα γίνει σε πειραματικό επίπεδο λαμβάνοντας υπόψη και τις επιμέρους θερμοκρασίες των υλικών οι οποίες μέσω κατάλληλων προσομοιωμάτων δύνανται να χρησιμοποιηθούν για τον αναλυτικό προσδιορισμό των παραμενουσών αντοχών (με χρήση λογισμικών). Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην απόδοση των προφίλ πυροπροστασίας με κύριο παράγοντα την διατήρηση της αποτελεσματικότητας των ΙΟΠ.

4.ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΙΟΠ ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Πριν ξεκινήσει η ευρεία χρήση των ΙΟΠ ως υλικά ενίσχυσης και επισκευής δομικών μελών με σκοπό την αύξηση της αντοχής τους, ήταν απαραίτητες οι πειραματικές μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά τους υπό συνθήκες πυρκαγιάς. Χωρίς επιπλέον δεδομένα για τις επιπτώσεις που θα είχε η ανάφλεξη ενός τέτοιου υφάσματος, η καθυστέρηση στην περαιτέρω χρήση τους ανά τον κόσμο θα ήταν σημαντική. Όπως έχει αποδειχθεί η καύση ΙΟΠ συνοδεύεται από διάδοση καπνού και τοξικών αερίων, γεγονός που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν από τους κατασκευαστές και τους μελετητές [10]. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στον τρόπο που συμπεριφέρονται τα ινοπλισμένα πολυμερή στην ακραία κατάσταση της φωτιάς.

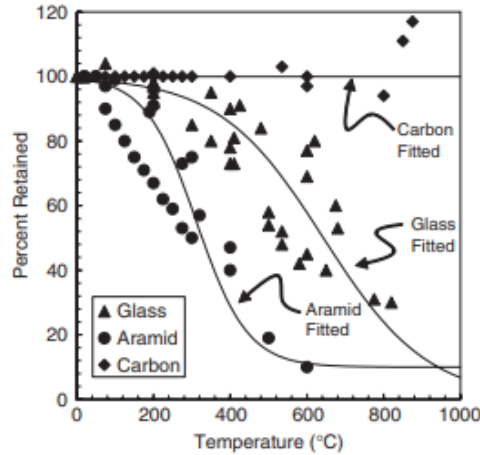
4.1. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΑΛΩΔΟΥΣ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗΣ T_g

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g είναι η θερμοκρασία πέρα από την οποία η συμπεριφορά ενός πολυμερούς αλλάζει και επέρχεται αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Η θερμοκρασία αυτή δεν είναι σταθερή για όλα τα πολυμερή και βρίσκεται στο εύρος τιμών μεταξύ 65-120 °C [1]. Σε γενικές γραμμές, η αποτελεσματικότητα του ΙΟΠ χάνεται όταν η θερμοκρασία φτάσει την κρίσιμη τιμή T_g της μήτρας του πολυμερούς. Η μήτρα του πολυμερούς είναι τις περισσότερες φορές εποξική ρητίνη και αποτελεί το συνδετήριο μέσο μεταξύ του υλικού ενίσχυσης και του ενισχυμένου δομικού μέλους[1]. Πιο συγκεκριμένα, κατά την υαλώδη μετάπτωση η συμπεριφορά της ρητίνης αλλάζει και από σκληρή και ψαθυρή μετατρέπεται σε ελαστική με αποτέλεσμα να μειώνεται η δύναμη προσκόλλησης του ΙΟΠ στο δομικό μέλος και να χάνεται η εφελκυστική του αντοχή. Όπως είναι αντιληπτό, κατά την έναρξη της πυρκαγιάς μόνο μερικά λεπτά απομένουν για την αύξηση της θερμοκρασίας στους 100 °C, τιμή η οποία τις περισσότερες φορές είναι κρίσιμη για τα ΙΟΠ.

4.2. ΑΛΛΑΓΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ FRP ΣΕ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

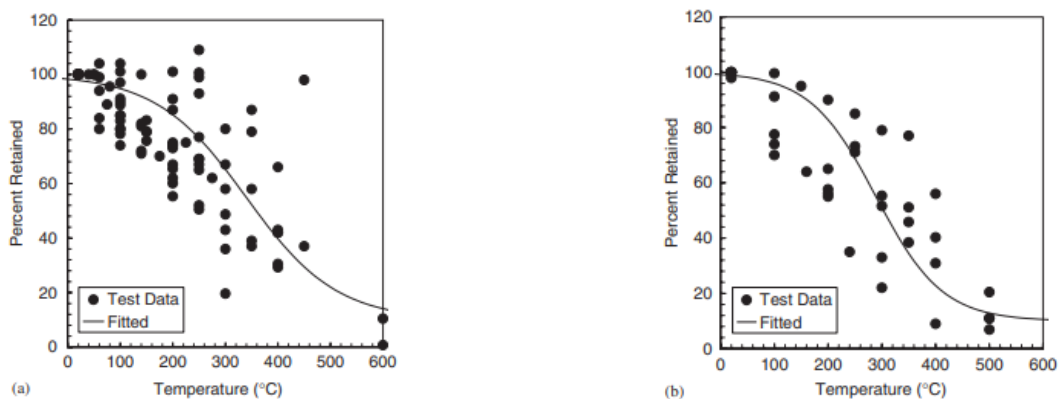
Σε γενικές γραμμές η αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των FRP σχετίζεται με τις ιδιότητες της πολυμερικής μήτρας και όχι τόσο των ινών αυτών καθαυτών καθώς οι

περισσότερες από αυτές εμφανίζουν κάποια αντοχή σε αυξημένες θερμοκρασίες. Έχει βρεθεί πως η σχέση θερμοκρασίας και εφελκυστικής αντοχής των ινών αλλάζει ανάλογα με το είδος. Έτσι οι Bisby et al. (2005) [1] παραθέτουν το παρακάτω διάγραμμα για να επιδείξουν τη διαφορά μεταξύ ινών υάλου, αραμιδίου και άνθρακα.



Σχήμα 2: Διάγραμμα μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής με τη θερμοκρασία για ίνες άνθρακα, αραμιδίου, υάλου [1]

Όπως γίνεται αντιληπτό στο σχήμα 2 οι ίνες άνθρακα δείχνουν να μην επηρεάζονται τόσο από την αύξηση της θερμοκρασίας, ακόμη και σε επίπεδα 1000 °C, σε αντίθεση με τις ίνες αραμιδίου και υάλου όπου η μείωση της αντοχής τους είναι εμφανής. Στην ίδια μελέτη παρατίθενται και διαγράμματα παραμένουσας αντοχής-θερμοκρασίας για διαφορετικά είδη ΙΟΠ. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3 τα ΙΟΠ άνθρακα χάνουν τη μισή αντοχή τους σε θερμοκρασία περίπου 350 °C ενώ η ίδια τιμή για τα ΙΟΠ υάλου είναι περίπου 300 °C, διαφορά η οποία είναι σχετικά μικρή σε σχέση με αυτή της συμπεριφοράς των δύο ινών κάτω από αυξημένη θερμοκρασία (Σχήμα 2).

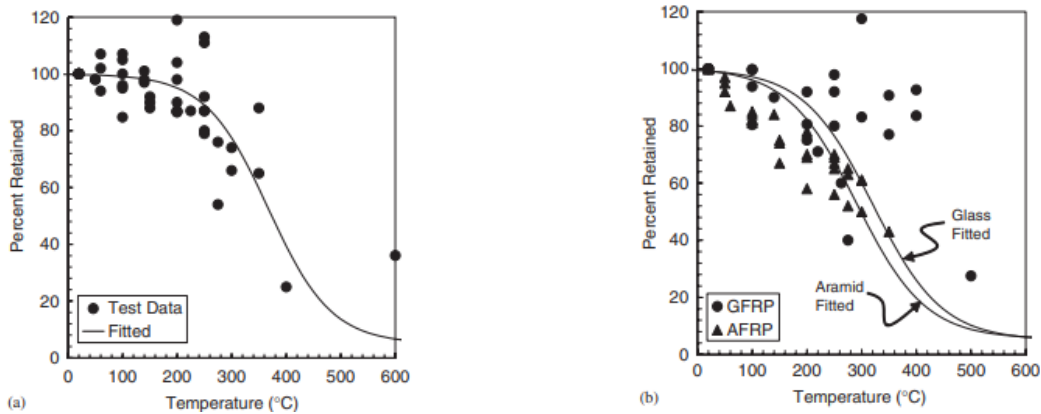


Σχήμα 3: Διάγραμμα μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής με τη θερμοκρασία για α)ΙΟΠ άνθρακα, β)ΙΟΠ υάλου (συλλογή πειραματικών δεδομένων για ράβδους ΙΟΠ) [1]

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι αναμενόμενα και αποδεικνύουν το γεγονός πως μεγαλύτερη συμμετοχή στην αλλοίωση της αντοχής των ΙΟΠ σε πυρκαγιά έχει η υαλώδης μετάπτωση της ρητίνης και όχι τόσο το υλικό των ινών.

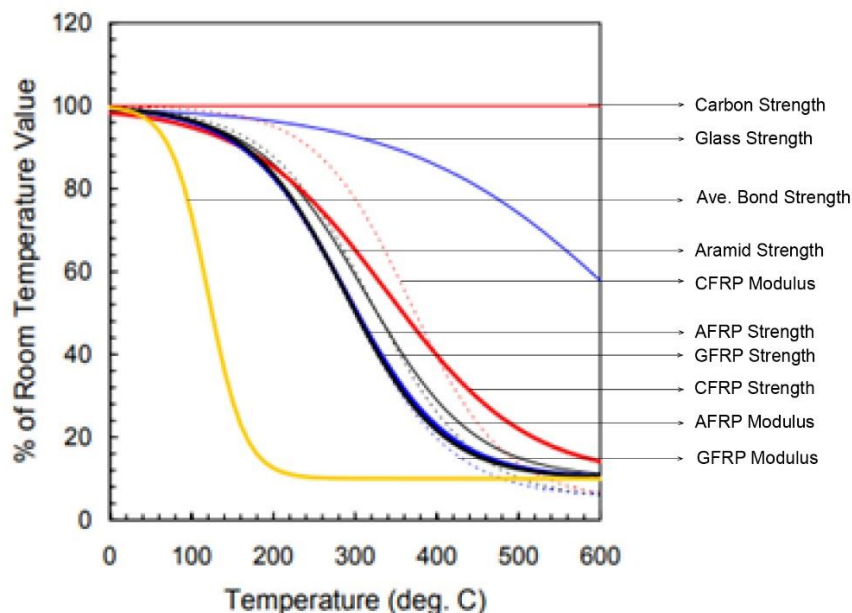
Επιπρόσθετα, ο Bisby [1] παρουσιάζει αλλαγές που αφορούν το μέτρο ελαστικότητας των ΙΟΠ. Και σε αυτή την περίπτωση η υαλώδης μετάπτωση της μήτρας

του πολυμερούς φαίνεται να επηρεάζει τη μεταβολή που παρατηρείται. Στο σχήμα 4 διακρίνεται η πτώση του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας σε ΙΟΠ από άνθρακα, αραμίδιο και ύαλο. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας πέφτει κατά το ήμισυ (σχετικά με την τιμή που έχει σε θερμοκρασία δωματίου) σε θερμοκρασία 380 °C για ΙΟΠ με ίνες άνθρακα, ενώ για ΙΟΠ με αραμίδιο και ύαλο, 290 °C και 320 °C αντίστοιχα. Οι διαφορές εδώ είναι και πάλι ευνοϊκές για τις ίνες από άνθρακα.



Σχήμα 4: Διάγραμμα μεταβολής μέτρου ελαστικότητας-θερμοκρασίας για α) ΙΟΠ άνθρακα, β)ΙΟΠ ύαλου.

Τέλος παρουσιάζεται από τον Bisby [11] ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα που συνοψίζει την αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες των ΙΟΠ, δηλαδή στη μεταβολή της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, και στη μέση τάση συνάφειας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Το διάγραμμα δεν είναι σε καμία περίπτωση ακριβές καθώς βασίζεται σε ημι-εμπειρικά προσομοιώματα που έχουν προκύψει από ανάλυση πειραματικών δεδομένων.



Σχήμα 5: Σύγκριση αναλυτικών εκφράσεων για τις μηχανικές ιδιότητες των ινών, των ΙΟΠ και για τη μέση τάση συνάφειας συναρτήσει της θερμοκρασίας [11]

5. ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΕΣ ΓΙΑ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Οι επικαλύψεις που χρησιμοποιούνται για την προστασία δομικών στοιχείων από πυρκαγιά ανήκουν στις μεθόδους παθητικής πυροπροστασίας των κατασκευών. Η παθητική πυροπροστασία περιλαμβάνει μέτρα τα οποία έχουν ληφθεί από τους μηχανικούς κατά τη διάρκεια της μελέτης κατασκευής και αποσκοπεί στον έλεγχο της εξάπλωσης της φωτιάς, στην επάρκεια των δομικών μελών και στην έγκαιρη εκκένωση του κτιρίου [12]. Η προστασία των δομικών μελών γίνεται ανά τον κόσμο με διάφορα υλικά, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα σε κάθε περιοχή και το οικονομικό κόστος. Οι επικαλύψεις μπορεί να είναι είτε σε στερεά (π.χ. σανίδα) είτε σε ρευστή μορφή (π.χ. κονιάματα, διογκούμενες πυράντοχες βαφές).

Οι σανίδες (στερεά επικάλυψη) είναι τις περισσότερες φορές πιο εύκολες στη μεταχείριση καθώς η τοποθέτηση γίνεται αρκετά εύκολα και δεν παρουσιάζονται προβλήματα συνάφειας, όπως συμβαίνει συχνά με τα κονιάματα. Η εφαρμογή γίνεται σε παραπάνω από μία στρώσεις και στερεώνονται εύκολα με βίδες ή ειδικές κόλλες. Συχνά συναντάται η τοποθέτηση επιπρόσθετων υλικών ανάμεσα από τις σανίδες για επιπλέον προστασία καθώς και η απομάκρυνσή τους για την ύπαρξη στρωμάτων αέρα.

Τα κονιάματα παρασκευάζονται πιο δύσκολα καθώς είναι αναγκαίο να βρεθεί η κατάλληλη αναλογία των υλικών με σκοπό την επίτευξη καλής εργασιμότητας, συνάφειας και βέλτιστων ιδιοτήτων. Συνήθως τα κονιάματα είναι τσιμεντοειδούς προέλευσης και η προσθήκη υλικών με καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίας είναι αυτό που προσδίδει τις επιθυμητές ιδιότητες. Ρευστή μορφή έχουν και οι διογκούμενες πυράντοχες βαφές οι οποίες εφαρμόζονται πάνω στο στοιχείο και ενεργοποιούνται μόλις ξεπεράσουν μια τιμή της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα μόλις φτάσουν την τιμή ενεργοποίησης, διογκώνονται και αυξάνονται σε πάχος δημιουργώντας ένα προστατευτικό στρώμα για το δομικό στοιχείο [11].

Τα υλικά πυροπροστασίας διακρίνονται από μια σειρά κοινών χαρακτηριστικών. Συνδυάζουν χαμηλούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας, υψηλή θερμοχωρητικότητα και υψηλό ποσοστό υγρασίας (νερό) στη σύστασή τους. Τα πρώτα δύο χαρακτηριστικά σχετίζονται με την αργή αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους, ενώ το τελευταίο ευθύνεται για τη δημιουργία πλατώ θερμοκρασίας στους 100 °C. Με τον όρο πλατώ θερμοκρασίας εννοείται η κατάσταση κατά την οποία μια τιμή θερμοκρασίας διατηρείται σταθερή για κάποιο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση μας η θερμοκρασία των 100 °C παραμένει ως έχει μέχρι να εξατμιστεί όλο το νερό που περιέχει η προστατευτική επικάλυψη [13]. Υλικά με τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς πυροπροστασίας.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Η βιβλιογραφία σχετικά με τα υλικά προστασίας των ΙΟΠ σε πυρκαγιά περιορίζεται σε μικρό αριθμό δημοσιεύσεων. Οι περισσότερες μελέτες στοχεύουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων που σχετίζονται με την επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στην αποτελεσματικότητα των ΙΟΠ που ενισχύουν δομικά στοιχεία όπως υποστυλώματα, δοκούς και πλάκες. Οι κονίες που χρησιμοποιούνται ως επιχρίσματα για την προστασία των ενισχυμένων δομικών μελών είναι περιορισμένα. Στην πλειονότητά τους τσιμεντοειδή κονιάματα, κονιάματα με βάση υλικά με χαμηλό δείκτη θερμικής αγωγιμότητας, καθώς και διογκούμενες βαφές. Ωστόσο η προσοχή των μελετητών δεν εστιάζεται στη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών προστατευτικών επικαλύψεων αλλά στις μηχανικές ιδιότητες των δομικών μελών μετά την έκθεσή τους σε περιβάλλον πυρκαγιάς. Έτσι, παρακάτω έχουν συλλεγεί πειράματα που χρησιμοποιούν πληθώρα θερμικών μονώσεων των ΙΟΠ με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις βέλτιστες λύσεις.

6.1. Elkady & Hasan (2010)

Οι Elkady & Hasan [14] διερεύνησαν την αποτελεσματικότητα 10 διαφορετικών κονιαμάτων για προστατευτικά καλύμματα οπλισμένων δοκών και ενισχυμένων με ΙΟΠ άνθρακα. Οι δοκοί, σκυροδέματος αντοχής 24.5 MPa, είχαν διαστάσεις διατομής 150 mm×100 mm και άνοιγμα 600 mm προσομοιώνοντας μια δοκό κανονικών διαστάσεων σε κλίμακα 1 προς 4. Ο οπλισμός των δοκών αποτελούνταν από 4 Φ6 (κατακόρυφος οπλισμός) και συνδετήρες 10Φ/2.5mm. Η ενίσχυση έγινε με ΙΟΠ από ίνες άνθρακα πάχους 1.4 mm και πλάτους 50 mm με μετρημένη εφελκυστική αντοχή στα 2200 MPa. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για προστατευτικά καλύμματα χαρακτηρίζονται από χαμηλούς συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας και είναι τα εξής: άστριοι (feldspar), χαλαζίας (quartz), βερμικουλίτης, περλίτης, θραύσματα πυρότουβλου και γυάλινη άμμος (sand-glass). Επίσης χρησιμοποιήθηκε και το φεροτσιμέντο (ferro-cement) το οποίο είναι ουσιαστικά ένα τσιμεντοειδές κονίαμα ενισχυμένο με μεταλλικό πλέγμα.

Μετά την επιλογή των υλικών έγινε η ανάμειξή τους με τσιμέντο, γύψο, κεραμικές ίνες και νερό σε διάφορες αναλογίες μέχρι να βρεθούν τα καταλληλότερα κονιάματα. Όσον αφορά το τσιμέντο, έγινε μια επιπλέον διερεύνηση για το αν το τσιμέντο αλουμίνας επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα της έρευνας, γι' αυτό και παρασκευάστηκαν κονιάματα με τσιμέντο Πόρτλαντ (OPC) αλλά και με τσιμέντο αλουμίνας. Τα επιχρίσματα είχαν πάχος 30 mm και η εφαρμογή έγινε ξεκινώντας με επάλειψη 10 mm κονιάματος, ύστερα τοποθέτηση μεταλλικού πλέγματος και τελείωμα με τα υπόλοιπα 20 mm. Το κονίαμα από φεροτσιμέντο τοποθετήθηκε με πάχος 50 mm με σκοπό τη σύγκριση διαφορετικών παχών. Στο σχήμα 6 φαίνονται οι αναλογίες των μειγμάτων αναλυτικά.

Mix	Legend	Ordinary Portland cement	Alumina cement	Material	Gypsum	Fibre ceramic	Water
Cement mortar1	B2FC	1			1	0.004	0.75
Cement mortar2	B2FCA		1		1	0.004	0.70
Vermiculite1	B2V	1		1	0.33	0.004	0.75
Vermiculite2	B2VA		1	1	0.33	0.004	0.75
Feldspar1	B2F	1		1.33	0.33	0.004	0.65
Feldspar2	B2FA		1	1.33	0.33	0.004	0.55
Glass sand	B2GS	1		1.33	0.33	0.004	0.9
Thermal brick1	B2TB	1		1	0.33	0.004	0.87
Thermal brick2	B2TBA		1	1	0.33	0.004	0.8
Quartz	B2Q	1		1.33	0.33	0.004	0.68
Perlite1	B2P	1		0.45	0.35	0.004	0.7
Perlite2	B2PA		1	0.45	0.35	0.004	0.72

Note: OPC, ordinary Portland cement; FC, fibre ceramic.

Σχήμα 6: Αναλογίες μίξης (κατά βάρος) των καλυμμάτων προστασίας [14]

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρικό φούρνο ειδικά σχεδιασμένο για το πείραμα, όπου το καθένα υποβλήθηκε σε δοκιμή πυρός βάση του προτύπου ASTM E119. Κάθε δοκός παρέμεινε για 15 λεπτά στους 900 °C και ύστερα παρέμεινε στο εσωτερικό του φούρνου να κρυώσει μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου. Οι διαφορές των δοκιμίων μετά την καύση είναι αισθητές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7, όπου το κονίαμα από χαλαζία αποκολλήθηκε τελείως πάνω από το πλέγμα, το κονίαμα από θραύσματα πυρότουβλου/τσ.αλουμίνας εμφάνισε αρκετές ρωγμές, ενώ το κονίαμα από βερμικουλίτη/OPC εμφάνισε ελάχιστες ρωγμές. Στο σχήμα 8, η διαφορά στην αποτελεσματικότητα των κονιαμάτων είναι εμφανής με το ΙΟΠ προστατευόμενο από 50 mm φεροτσιμέντου να είναι σχεδόν άθικτο, ενώ το ΙΟΠ προστατευόμενο από 30mm κονιάματος χαλαζία να έχει σχεδόν καεί.



Σχήμα 7: Κατάσταση δοκών μετά τη δοκιμή πυρός. α)Χαλαζίας, β)Θραύσματα πυρότουβλου/τσ.αλουμίνας, γ)Βερμικουλίτης/OPC [14]



Σχήμα 8: Κατάσταση CFRP μετά τη δοκιμή πυρός. α)Χαλαζίας, β)Φεροτσιμέντο/OPC [14]

Τα προστατευτικά καλύμματα στη συνέχεια απομακρύνθηκαν και υπολογίστηκε η καμπτική αντοχή του καθενός με σκοπό τη σύγκρισή της με αρχικό δοκίμιο ενισχυμένο με ΙΟΠ άνθρακα το οποίο δεν υποβλήθηκε σε δοκιμή πυρός. Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες με δεδομένα για τις τιμές θερμοκρασίας στο επίπεδο των ΙΟΠ (υπολογίστηκαν με θερμοζεύγη) σε διάφορες φάσεις του πειράματος, καθώς και τα ποσοστά εναπομείνουσας καμπτικής αντοχής.

Θερμοκρασίες στο επίπεδο των CFRP στους 500°C (T _{φούρνου})	
Επικάλυψη	Θερμοκρασία (°C)
50mm Φεροτσιμέντο/OPC	21
Βερμικουλίτης/OPC	25
Άστριοι/OPC	31
Άστριοι/alumina	22
Γυάλινη άμμος	30
Θραύσματα πυρότουβλου/OPC	22
Θραύσματα πυρότουβλου/alumina	22
Χαλαζίας	30
Περλίτης/OPC	21
Περλίτης/alumina	18

Πίνακας 1, προσαρμοσμένος από [14]

Θερμοκρασίες στο επίπεδο των CFRP στους 900°C (T _{φούρνου})	
Επικάλυψη	Θερμοκρασία (°C)
50mm Φεροτσιμέντο/OPC	60
Βερμικουλίτης/OPC	88
Άστριοι/OPC	104
Άστριοι/alumina	88
Γυάλινη άμμος	122
Θραύσματα πυρότουβλου/OPC	108
Θραύσματα πυρότουβλου/alumina	100
Χαλαζίας	98
Περλίτης/OPC	92
Περλίτης/alumina	68

Πίνακας 2, προσαρμοσμένος από [14]

Θερμοκρασίες στο επίπεδο των CFRP μετά το τέλος της δοκιμής	
Επικάλυψη	Θερμοκρασία (°C)
50mm Φεροτσιμέντο/OPC	83
Βερμικουλίτης/OPC	102
Άστριοι/OPC	132
Άστριοι/alumina	126
Γυάλινη άμμος	280
Θραύσματα πυρότουβλου/OPC	208
Θραύσματα πυρότουβλου/alumina	138
Χαλαζίας	106
Περλίτης/OPC	103
Περλίτης/alumina	92

Πίνακας 3, προσαρμοσμένος από [14]

Καμπτική αντοχή μετά τη δοκιμή πυρός	
Επικάλυψη	Ποσοστό συγκριτικά με το control specimen (%)
Control-CFRP	100
Περλίτης/alumina	91.4
50mm Φεροτσιμέντο/OPC	87.1
Βερμικουλίτης/OPC	83.8
Περλίτης/OPC	81.1
Θραύσματα πυρότουβλου/OPC	70.3
Άστριοι/alumina	67.6
Άστριοι/OPC	65.9
Χαλαζίας	64.9
Θραύσματα πυρότουβλου/alumina	56.8
Control-no CFRP	54.1
Γυάλινη άμμος	51.4

Πίνακας 4, προσαρμοσμένος από [14]*Control-CFRP: δοκίμιο ενισχυμένο με ΙΟΠ άνθρακα χωρίς δοκιμή πυρός, Control-no CFRP: δοκίμιο χωρίς ενίσχυση από ΙΟΠ και χωρίς δοκιμή πυρός

Στους παραπάνω πίνακες έχουν επισημανθεί με πράσινο τα υλικά τα οποία είχαν την καλύτερη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, σε θερμοκρασία φούρνου 500 °C όλα τα επικαλύμματα προστάτευσαν επαρκώς τα ΙΟΠ των δοκιμών κρατώντας τη θερμοκρασία κάτω από αυτή της υαλώδους μετάπτωσης. Στους 900 °C ξεχώρισαν αμέσως το κονίαμα με Περλίτη/Τσ.αλουμίνας και το Φεροτσιμέντο των 50mm πάχους. Στη φάση αυτή του πειράματος παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην αντικατάσταση του τσιμέντου Πόρτλαντ με τσιμέντο αλουμίνας το τσιμέντο αλουμίνας (24 °C για το κονίαμα Περλίτη). Μετά το τέλος του πειράματος, σε θέμα θερμοκρασίας, τα υλικά που ξεχώρισαν ήταν τα προαναφερθέντα με το τσιμέντο αλουμίνας να έχει μικρότερη επιρροή. Όσον αφορά την παραμένουσα καμπτική αντοχή, κονίαμα Περλίτη/Τσ.αλουμίνας και Φεροτσιμέντο είχαν τις μεγαλύτερες τιμές με ποσοστά 91.4% και 87.1% του αρχικού δοκιμίου αντίστοιχα. Διαφορές της τάξης των 10% της καμπτικής αντοχής είναι αρκετά ενθαρρυντικές και μαρτυρούν τη σημασία εφαρμογής των επιχρισμάτων προστασίας. Το τσιμέντο αλουμίνας σίγουρα βοηθάει στην προστασία, αλλά η διαφορά είναι σχετικά μικρές αν αναλογιστεί κανείς τη σημαντική οικονομική διαφορά με το OPC. Ενδιαφέρον είναι το

γεγονός πως το κονίαμα από Γυάλινη άμμο έχασε σχεδόν το 50% της καμπτικής αντοχής του αρχικού ενισχυμένου δοκιμίου, έχοντας δηλαδή σχεδόν την ίδια καμπτική αντοχή με το μη ενισχυμένο δοκίμιο που δεν υποβλήθηκε σε δοκιμή πυρός.

6.2. Kamal et al. (2014)

Οι Kamal et al. [15] διερεύνησαν την αποτελεσματικότητα διαφορετικών προστατευτικών καλυμμάτων για δοκούς ενισχυμένες με ΙΟΠ υάλου. Όπως και στην προηγούμενη μελέτη, τα συμπεράσματα βγήκαν αφού τα δοκίμια αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου μετά τη δοκιμή πυρός και υπολογίστηκε η καμπτική τους αντοχή. Πιο συγκεκριμένα, η δοκιμή έγινε σε 36 δοκίμια από σκυρόδεμα μέσης θλιπτικής αντοχής 25 MPa, με διαστάσεις διατομής 100 mm×100 mm και ύψος 1200 mm. Ο οπλισμός που τοποθετήθηκε ήταν 4 ράβδοι χάλυβα Φ8 και συνδετήρες Φ8/150mm. Τα ΙΟΠ από ίνες υάλου είχαν πάχος 0.373 mm/ply, πλάτος 610 mm και εφελκυστική αντοχή 1517 MPa. Επιπρόσθετα, τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στα προστατευτικά καλύμματα τοποθετήθηκαν ίνες υάλου για μείωση της συρρίκνωσης. Ειδικό αερακτικό πρόσμικτο προστέθηκε στα κονιάματα προστασίας με σκοπό τη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας της πάστας.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη θερμική προστασία των ΙΟΠ ήταν τέσσερα κονιάματα και μία κουβέρτα από κεραμικές ίνες με αρκετά χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που αντέχει θερμοκρασίες μέχρι και 2300 °C. Τα τέσσερα κονιάματα αποτελούνταν από Περγλίτη, Βερμικουλίτη, τσιμέντο Πόρτλαντ και άργιλο από την πόλη Ασουάν της Αιγύπτου. Στο σχήμα 9 φαίνονται αναλυτικά οι αναλογίες μίξης των κονιαμάτων.

Layer	Perlite (l)	Vermiculite (l)	Clay (l)	Sand (kg)	Cement (kg)	Water (l)	Fiber (g)	Air-entrained admix (l)
PC mortar	-	-	-	1600	500	200	900	4
Perlite mortar	1 m ³	-	-	-	500	330	900	4
Vermiculite mortar	-	1 m ³	-	-	500	415	900	4
Aswan clay	-	-	1 m ³	-	500	500	1800	4

Σχήμα 9: Αναλογίες μίξης 1m³ των καλυμμάτων προστασίας [15]

Η δοκιμή πυρός έγινε σε ειδικά διαμορφωμένο ηλεκτρικό φούρνο, όπου τα δοκίμια παρέμειναν για δύο ώρες. Η θερμοκρασία αυξανόταν με ρυθμό 20 °C/min μέχρι την τιμή των 600 °C η οποία παρέμεινε σταθερή μέχρι το τέλος των 2 ωρών. Ύστερα τα δοκίμια αφέθηκαν μέχρι να φτάσουν τη θερμοκρασία δωματίου και υπολογίστηκε η καμπτική αντοχή τους με τη χρήση υδραυλικής μηχανής καταπόνησης 2000 kN. Η καμπτική αντοχή μετρήθηκε επιπρόσθετα και για δοκίμια χωρίς ΙΟΠ σε διάφορες θερμοκρασίες για να φανεί η αλλαγή στη συμπεριφορά τους μετά την πυρκαγιά. Όπως φαίνεται στο σχήμα 10, στους 600 °C είτε χρησιμοποιήθηκε ΙΟΠ (B₁₇,B₁₈) είτε όχι (B₁₅,B₁₆) το φορτία αστοχίας παρέμεινε το ίδιο (10.3 kN).

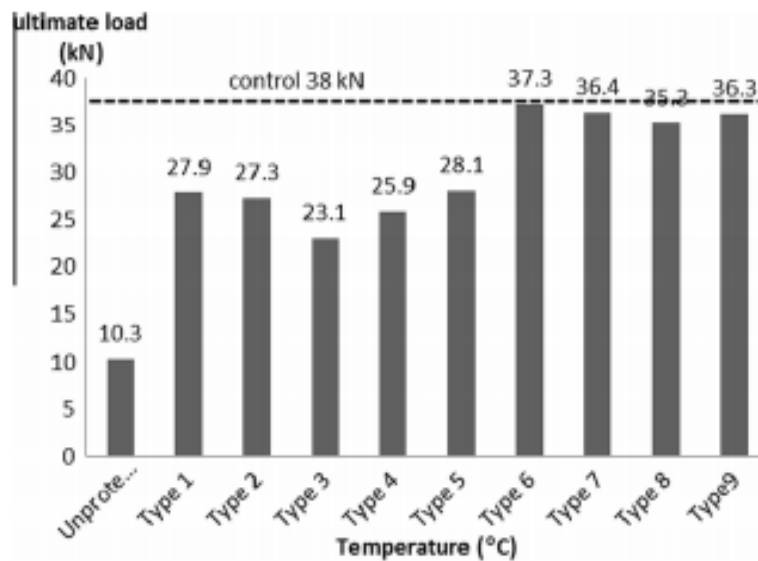
Beam	Strengthening	Temperature (°C)	Protection layer	Failure load (kN)	Ratio to control (B ₁ , B ₂) (%)
B ₁ , B ₂	-	25	-	30	100
B ₃ , B ₄	GFRP	25	-	38	126.67
B ₅ , B ₆	-	100	-	30	100
B ₇ , B ₈	-	200	-	27.1	90.33
B ₉ , B ₁₀	-	300	-	22.8	76.00
B ₁₁ , B ₁₂	-	400	-	18.7	62.33
B ₁₃ , B ₁₄	-	500	-	15.6	52.00
B ₁₅ , B ₁₆	-	600	-	10.3	34.33
B ₁₇ , B ₁₈	GFRP	600	-	10.3	34.33

Σχήμα 10: Φορτία αστοχίας των δοκιμίων χωρίς καλύμματα προστασίας [15]

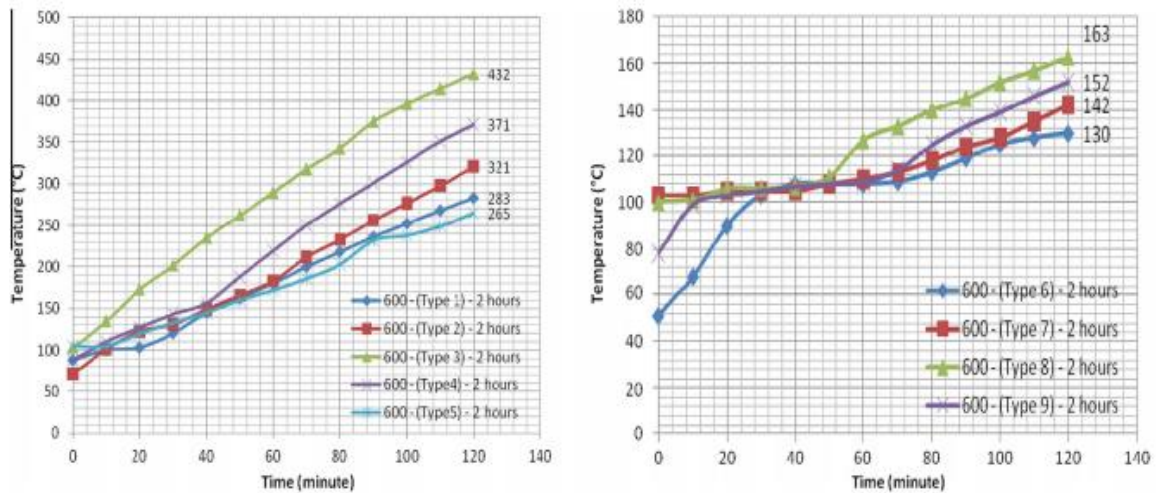
Η ερευνητική ομάδα παρέδωσε αποτελέσματα σχετικά με την καμπτική αντοχή των προστατευμένων δοκιμών και τις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στις επιφάνειες των ΙΟΠ με τη βοήθεια θερμοζεύγων, τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

Καμπτική αντοχή μετά τη δοκιμή πυρός (600 °C)	
Επικάλυψη (30 mm πάχους)	Καμπτική Αντοχή (kN)/Ποσοστό της αντοχής του αρχικού δοκιμίου σε θερμοκρασία δωματίου (38kN)
Περλίτης 30 mm (Type 1)	27.9 (73.41%)
Βερμικουλίτης 30 mm (Type 2)	27.3 (71.84%)
Τσιμέντο Πόρτλαντ 30 mm (Type 3)	23.1(60.78%)
Άργιλος Ασουάν 30 mm (Type 4)	25.9 (68.15%)
Κουβέρτα κεραμικών ινών (Type 5)	28.1 (73.94%)
Περλίτης + Κουβέρτα κεραμικών ινών 50 mm (Type 6)	37.3 (98.15%)
Βερμικουλίτης + Κουβέρτα κεραμικών ινών 50 mm (Type 7)	36.4 (95.78%)
Τσιμέντο Πόρτλαντ + Κουβέρτα κεραμικών ινών 50 mm (Type 8)	35.3 (92.89%)
Άργιλος Ασουάν + Κουβέρτα κεραμικών ινών 50 mm (Type 9)	36.3 (95.52%)

Πίνακας 5, προσαρμοσμένος από [15]



Σχήμα 11: Ραβδόγραμμα Πίνακα 8 [15]



Σχήμα 12: Θερμοκρασίες στην επιφάνεια των ΙΟΠ [15]

Όλες οι μέθοδοι προστασίας είναι φανερό πως λειτούργησαν ευνοϊκά για τα δοκίμια. Μάλιστα σε διάστημα 2 ωρών όλοι οι συνδυασμοί κονιαμάτων και κουβέρτας κεραμικών ινών δεν άφησαν τη θερμοκρασία στην επιφάνεια των ΙΟΠ να ξεπεράσει τους 163 °C. Η καμπτική αντοχή των δοκιμίων παρέμεινε σε αρκετά υψηλά επίπεδα συγκριτικά με το αρχικό δοκίμιο, έχοντας για τις διπλές προστασίες διαφορά κάτω του 10%. Από τα κονιάματα καλύτερη συμπεριφορά είχε αυτό του Περλίτη, σχεδόν ίδια με την κουβέρτα κεραμικών ινών. Τη βέλτιστη συμπεριφορά παρουσίασε ο συνδυασμός κονιάματος Περλίτη και κουβέρτας κεραμικών ινών (συνολικό πάχος 50 mm) με μέγιστη θερμοκρασία στο ΙΟΠ 130 °C και παραμένουσα καμπτική αντοχή 98.15% (σχεδόν αναλλοίωτη).

6.3. Grace & Bebawy (2014)

Οι Grace & Bebawy [13] μελέτησαν τη συμπεριφορά δοκών ενισχυμένων με ΙΟΠ υπό συνθήκες πυρκαγιάς. Σκοπός τους ήταν να αποδείξουν ότι η άποψη πως σε ενδεχόμενη πυρκαγιά τα ΙΟΠ που ενισχύουν μία δοκό πρέπει να μη λαμβάνονται καν υπόψη είναι λανθασμένη. Αντιθέτως, με την προσθήκη προστατευτικών καλυμμάτων είναι ικανά να δράσουν καταλλήλως. Οι δοκοί, σκυροδέματος αντοχής 50 MPa (28d), είχαν διαστάσεις διατομής 152 mm×305 mm και άνοιγμα 3.65 m. Η όπλιση έγινε με 4 χαλύβδινες ράβδους διαμέτρου 12.7 mm (διαμήκης οπλισμός) και με συνδετήρες Φ10/150mm (εγκάρσιος οπλισμός). Τα ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ήταν από ίνες άνθρακα πάχους 0.11mm και εφελκυστικής αντοχής 3400 MPa, καθώς και υβριδικά (ίνες άνθρακα, υάλου) ΙΟΠ πάχους 1 mm. Ως οργανική μήτρα χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη με HDT (heat deflection temperature) στους 107 °C. Όσον αφορά τα προστατευτικά καλύμματα, μελετήθηκαν 3 διαφορετικά είδη. Τσιμεντοειδές κονίαμα με βερμικουλίτη πάχους 51 mm, 3 στρώσεις γυψοσανίδας πάχους 16 mm και ένας συνδυασμός 3 στρώσεων γυψοσανίδας (16 mm) και κουβέρτας κεραμικών ινών στο εσωτερικό (25mm), αντοχής μέχρι και 1260 °C.

Τρεις εκ των δοκών (αρχικά δοκίμια) δεν υποβλήθηκαν σε δοκιμή πυρός αλλά σε δοκιμή κάμψης σε συνθήκες δωματίου με ρυθμό φορτίου 3,8 mm μετατόπισης το λεπτό μέχρι την αστοχία. Τα υπόλοιπα δοκίμια (με ή χωρίς καλύμματα) φορτίστηκαν με 2.22 kN/min μέχρι προκαθορισμένο φορτίο το οποίο παρέμεινε μέχρι και την αστοχία. Η επιβολή του φορτίου των 2.22 kN/min ξεκίνησε σε θερμοκρασία δωματίου και συνεχίστηκε σε συνθήκες φωτιάς (πρότυπο ASTM E119) μέχρι την αστοχία από το προκαθορισμένο φορτίο. Για τα τελευταία δοκίμια, όσα δεν είχαν ΙΟΠ φορτίστηκαν

μέχρι το 50% της ικανότητας παραλαβής φορτίου για τα μη ενισχυμένα, ενώ τα δοκίμια με ΙΟΠ φορτίστηκαν μέχρι φορτίο ενδιάμεσα από την αντοχή του περισφιγμένου και του απερίσφικτου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται όλες οι λεπτομέρειες του πειράματος και τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Beam	Fiber-reinforced polymer	Insulation	Load, lb (kN)	Fire endurance, minutes	Temperature at failure/test stop, °F (°C)				
					Air	Fiber-reinforced polymer	Concrete	Top reinforcement	Bottom reinforcement
B-U-O/A	—	—	12,920 (57.5)	—	68 (20)	—	68 (20)	68 (20)	68 (20)
B-DH-O/A	DHF	—	26,259 (117)	—	68 (20)	68 (20)	68 (20)	68 (20)	68 (20)
B-CF-O/A	CF	—	22,570 (100)	—	68 (20)	68 (20)	68 (20)	68 (20)	68 (20)
B-U-O/F	—	—	6500 (28.9)	112	1885 (1029)	—	1730 (943)	814 (434)	962 (516)
B-U-C/F	—	Cementitious	6500 (28.9)	360	2124 (1162)	—	1209 (653)	765 (407)	773 (411)
B-DH-C/F	DHF	Cementitious	14,000 (62.3)	157	1900 (1037)	252 (122)	694 (367)	232 (111)	227 (108)
B-CF-C/F1	CF	Cementitious	14,000 (62.3)	70	1752 (955)	257 (125)	211 (99)	148 (64)	116 (46)
B-CF-C/F2	CF	Cementitious	12,800 (56.9)	143	1892 (1033)	250 (121)	465 (240)	204 (95)	191 (88)
B-CF-G/F	CF	Gypsum	—	104	1833 (1000)	250 (121)	212 (100)	169 (76)	169 (76)
B-CF-G/F*	CF	—	18,800 (83.6)	—	68 (20)	68 (20)	68 (20)	68 (20)	68 (20)
B-DH-G/F	DHF	Gypsum	14,000 (62.3)	98	1815 (990)	250 (121)	206 (97)	160 (71)	146 (63)
B-DH-GB/F1	DHF	Gypsum and blanket	14,000 (62.3)	150	1912 (1044)	251 (121)	—	—	—
B-DH-GB/F2	DHF	Gypsum and blanket	18,000 (80)	150	1913 (1045)	258 (126)	—	—	—
B-CF-GB/F	CF	Gypsum and blanket	15,500 (69)	125	1827 (997)	263 (128)	—	—	—

*Beam B-CF-G/F was tested under three-point-loading setup for residual strength after fire event.

Note: — is not applicable or not measured.

Σχήμα 13: Σύνοψη πειραματικής μελέτης-Αποτελέσματα [13]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 13, για τα τρία πρώτα δοκίμια που δεν υποβλήθηκαν σε δοκιμή πυρός υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες αντοχές σε κάμψη με σκοπό τη σύγκρισή τους με τα υπόλοιπα δοκίμια. Για τα δοκίμια B-U-O/F και B-U-C/F (σχήμα 13) χωρίς ΙΟΠ, η ύπαρξη του τσιμεντοειδούς κονιάματος έδειξε ότι αυξάνει το χρόνο αντοχής του δοκιμίου (112 min → 360 min) οφελώντας έτσι και τη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Το δοκίμιο με ΙΟΠ από υβριδικές ίνες και τσιμεντοειδές κάλυμμα (B-DH-C/F) έφτασε τους 100 °C στο επίπεδο του ΙΟΠ σε χρόνο 62 λεπτών, όπου και εμφάνισε πλατώ θερμοκρασίας για 83 λεπτά στους 100 °C εξαιτίας της εξάτμισης της υγρασίας του κονιάματος. Μετά την πάροδο των 83 λεπτών, χρειάστηκαν 12 λεπτά ώστε η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ΙΟΠ να φτάσει τους 122 °C όπου η ρητίνη έχασε τη δύναμή της και όλο το σύστημα ΙΟΠ-κονίαμα αποκολλήθηκε κάνοντας τη δοκό να αστογήσει (157 min. συνολικά). Παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασε και το αντίστοιχο δοκίμιο με τα ΙΟΠ από άνθρακα (143 min μέχρι τους 121 °C). Από τις δοκούς που προστατεύτηκαν από γυψοσανίδες, η B-DH-G/F έφτασε την κρίσιμη θερμοκρασία των 121 °C στο επίπεδο του ΙΟΠ σε 98 λεπτά χωρίς την ύπαρξη πλατώ θερμοκρασίας στους 100 °C όπως με το τσιμεντοειδές κονίαμα. Η οργανική μήτρα έχασε τη συμπεριφορά της κάνοντας το ΙΟΠ να αποκολληθεί σε ορισμένα σημεία. Η ρητίνη που απέμεινε, αν και με μαύρο χρώμα, συνέχισε να κρατά προσκολλημένο το ΙΟΠ στις υπόλοιπες θέσεις. Η δεύτερη δοκός με ΙΟΠ άνθρακα και γυψοσανίδες υποβλήθηκε στο φορτίο των 62.5 kN μόνο για 15 λεπτά για τη μελέτη ενός διαφορετικού σεναρίου με τη δοκιμή πυρός να κρατά μέχρι τη θερμοκρασία των 121 °C στο ΙΟΠ (104 min.). Ύστερα, άφησαν το δοκίμιο να κρυώσει για 24 ώρες, αφαίρεσαν τις γυψοσανίδες και μέτρησαν την αντοχή του σε κάμψη, η τιμή της οποίας

έφτασε το 83% της αντοχής του αντίστοιχου αρχικού δοκιμίου που δεν υποβλήθηκε σε δοκιμή πυρός. Ενδιαφέρον το γεγονός πως η ρητίνη εφόσον δεν εμφανίσει φλόγες (flash point: 250 °C) είναι ικανή να ανακτήσει τη συμπεριφορά της μετά το τέλος της πυρκαγιάς. Τέλος, τα δοκίμια με το συνδυασμό κουβέρτας κεραμικών ινών και γυψοσανίδες παρουσίασαν παρόμοια χαρακτηριστικά αλλά λόγω της κατάρρευσης των θερμοζευγών δεν έδωσαν δεδομένα για τις θερμοκρασίες στο εσωτερικό των δοκιμίων. Η εξωτερική στρώση γυψοσανίδας αποκολλήθηκε σε περίπου 90 λεπτά, η δεύτερη στρώση αποκολλήθηκε μερικώς και η εσωτερική στρώση δεν εκτέθηκε στην πυρκαγιά. Από τα δεδομένα φαίνεται πως στα δοκίμια B-DH-C/F (τσιμεντοκονίαμα βερμικουλίτη) και B-DH-G/F (γυψοσανίδες) η προστασία με το κονίαμα καθυστέρησε περισσότερο την αύξηση της θερμοκρασίας στο ΙΟΠ στους 121 °C (157 min έναντι 98 min). Μάλιστα, βρέθηκε και ελάχιστα καλύτερο από το συνδυασμό κουβέρτας και γυψοσανίδας (157 min έναντι 150 min).

6.4. Guruprasad & Ramaswamy (2019)

Στην συγκεκριμένη ερευνητική εργασία [16] οι μελετητές ασχολήθηκαν με την αξιολόγηση σχετικά νέων υλικών για τον κλάδο των κατασκευών, τα οποία αν και δεν έχουν ερευνηθεί επαρκώς θα μελετηθούν ως προς την χρήση τους ως προφίλ πυροπροστασίας. Η σύγκριση γίνεται ανάμεσα στα ακόλουθα: 1) 30 mm fly ash based geopolymer mortar (κονίαμα από γεωπολυμερή, βασισμένο στην ιπτάμενη τέφρα), 2) 30 mm Simwool Ceramic Fibre Blanket (ενισχυμένη κουβέρτα κεραμικών ινών). Τα άοπλα κυλινδρικά δοκίμια στα οποία έγινε η εφαρμογή είχαν διάμετρο 100 mm και ύψος 200 mm, θλιπτική αντοχή 25MPa (μετά από 28 ημέρες συντήρησης) και είχαν σαν βάση τους αδρανή γρανίτη. Η σύνθεση της ρητίνης έγινε με αναλογία 1:0.5 (ρητίνη: σκληρυντής). Τα ΙΟΠ από ίνες άνθρακα που χρησιμοποιήθηκαν (μιας στρώσης μαζί με την ρητίνη), στην ολοκλήρωση της προσκόλλησης είχαν πάχος της τάξεως των 5 mm και εφελκυστική αντοχή 300 MPa. Στα σχήματα 14 και 15 παρουσιάζονται στοιχεία για τα δύο είδη προστασίας.

Fly Ash	Fine Aggregate	Sodium Silicate Solution	Sodium Hydroxide (10 M)
1	1.22	0.3374	0.1712

Σχήμα 14: Αναλογίες μίξης για το κονίαμα από γεωπολυμερή κατά βάρος [16]

Properties of simwool ceramic fibre blanket furnished by the manufacturer.

Dimensions L × B × t (m)	7.62 × 0.610 × 0.025	Standards IS 15402
Density (Kg/m ³)	128	IS 14656
Tensile Strength (kPa)	72.70	IS 14656
Linear Shrinkage(%) 1200 °C × 24 h	2.87	IS 14656
Fibre Index (%)	52.90	IS 14656
Fibre Diameter (μm)	3.07	IS 14656
Chemical Composition (%)	Al ₂ O ₃ – 43.64 SiO ₂ – 55.80	IS 1335 IS 1527

Σχήμα 15: Χαρακτηριστικά της κουβέρτας κεραμικών ινών [16]

Η δοκιμή πυρός έγινε σε ειδικά διαμορφωμένο ηλεκτρικό φούρνο, όπου τα δοκίμια παρέμειναν στους 550°C και στους 715°C για 1 και για 2 ώρες. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν μετά (θερμοκρασία δωματίου-χωρίς τα καλύμματα) σε μονοαξονική θλιπτική καταπόνηση με ρυθμό 10μm/sec μέχρι την κατάρρευση τους. Κάποια από

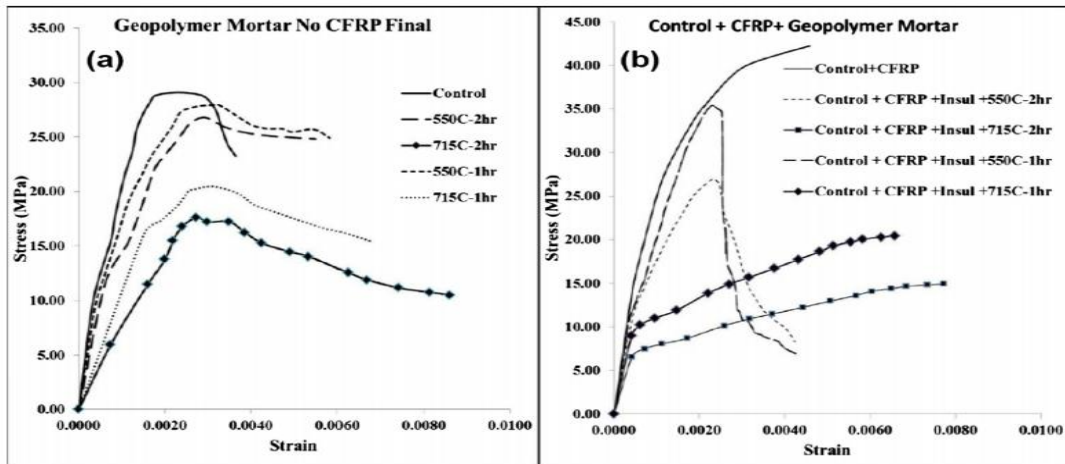
αυτά υποβλήθηκαν σε δοκιμή πυρός και ύστερα ενισχύθηκαν με ΙΟΠ προτού γίνει η δοκιμή σε θλίψη. Παρακάτω φαίνονται οι τιμές που προέκυψαν μετά τη δοκιμή σε θλίψη για τα διαφορετικά δοκίμια που μελετήθηκαν, καθώς και οι καμπύλες τάσης παραμόρφωσης.

Sample details Thermal Insulation using Geopolymer mortar	Without thermal insulation Average Compressive strength at failure (MPa)	With thermal insulation Average Compressive strength at failure (MPa)
Control concrete cylinder (No CFRP wrap, No temperature exposure)	28	NA
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 550 °C (1 h)	18	27.0
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 550 °C (2 h)	15.46	26.8
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 715 °C (1 h)	8.2	20.40
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 715 °C (2 h)	6	17.598
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap	42.2	NA
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 550 °C (1 h)	22.0	35.36
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 550 °C (2 h)	19.0	26.96
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 715 °C (1 h)	9.5	20.43
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 715 °C (2 h)	6.2 CFRP totally delaminated	14.952 CFRP completely delaminated
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter subjected to monotonic compressive loading without CFRP wrap	16.27	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) cooled and later exposed to 550 °C (2 h)	12.02	9.01
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) cooled and thereafter subjected to monotonic compressive loading without CFRP wrap	6.68	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) cooled and later exposed to 715 °C (2 h)	4.58	3.97
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and subjected to monotonic loading	29.96	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 550 °C (1 h)	15.01	27
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 550 °C (2 h)	13.01	24.31
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer of CFRP wrap and subjected to monotonic loading without further thermal exposure	19.9	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 715 deg C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 715 °C (1 h)	5.01	17.422
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 715 °C (2 h)	4.01 CFRP completely delaminated	15.0 CFRP partially delaminated

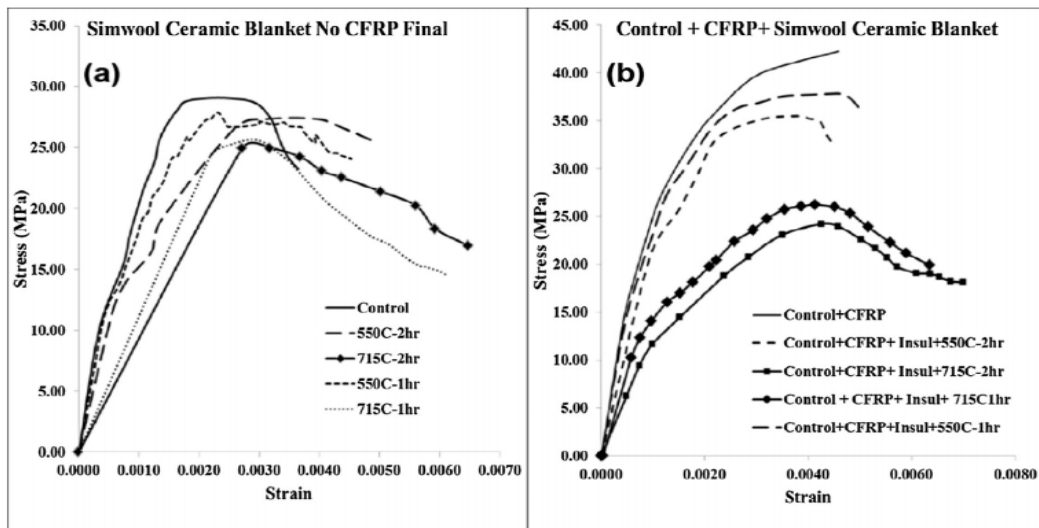
Σχήμα 16: Αποτελέσματα για τη μέση θλιπτική αντοχή των δοκιμίων με κονίαμα από γεωπολυμερή [16]

Sample details Thermal Insulation using Simwool ceramic fibre blanket	Without thermal insulation Average Compressive strength at failure (MPa)	With thermal insulation Average Compressive strength at failure (MPa)
Control concrete cylinder (No CFRP, No temperature exposure)	28	NA
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 550 °C (1 h)	18	27.80
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 550 °C (2 h)	15.46	27.35
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 715 °C (1 h)	8.2	25.1
Control concrete cylinder initially without temperature exposure without CFRP wrap exposed to 715 °C (2 h)	6	24.6
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP	42.2	NA
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 550 °C (1 h)	22.0	37.80
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 550 °C (2 h)	19.0	35.40
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 715 °C (1 h)	9.5	26.21
Control concrete cylinder initially without temperature exposure wrapped with 1 layer CFRP wrap and thereafter exposed to 715 °C (2 h)	6.2 CFRP totally delaminated	24.21 CFRP totally delaminated
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter subjected to monotonic compressive loading without CFRP	16.27	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) and later exposed to 550 °C (2 h) without CFRP	12.02	11.73
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) thereafter subjected to monotonic compressive loading without CFRP	6.68	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) and later exposed to 715 °C (2 h) without CFRP	4.58	4.087
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and subjected to monotonic loading	29.96	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 550 °C (1 h)	18.01	29.101
Concrete cylinder priorly exposed to 550 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 550 °C (2 h)	13.01	29.042
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and subjected to monotonic loading without further thermal exposure	19.9 CFRP totally delaminated	NA
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 715 °C (1 h)	5.89	19.2
Concrete cylinder priorly exposed to 715 °C (2 h) thereafter wrapped with 1 layer CFRP and later exposed to 715 °C (2 h)	4.01	18.9

Σχήμα 17: Αποτελέσματα για τη μέση θλιπτική αντοχή των δοκιμίων με κουβέρτα κεραμικών ινών [16]



Σχήμα 18: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για το κονίαμα από γεωπολυμερή, α)χωρίς ΙΟΠ, b)με ΙΟΠ [16]



Σχήμα 19: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για την κουβέρτα κεραμικών ινών, α)χωρίς ΙΟΠ, b)με ΙΟΠ [16]

Εκτός από την πειραματική διαδικασία, η χρήση ενός προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και για τις δύο περιπτώσεις προστασίας (3D εξαγωνική μεταφορά της θερμοκρασίας) οδήγησε στην εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την επίδραση του πάχους καλύμματος στην αύξηση θερμοκρασίας. Οι τιμές θερμοκρασίας στην επιφάνεια των καλυμμάτων δίνονται στο σχήμα 20 για πάχη 30, 45, 60 και 90 mm.

Insulation Thickness (mm)	Type of Insulation→ Temperature and Time of Exposure	Geopolymer Mortar				Thermal Blanket			
		550 °C 1 h	550 °C 2 h	715 °C 1 h	715 °C 2 h	550 °C 1 h	550 °C 2 h	715 °C 1 h	715 °C 2 h
30 mm	Temperature on inner surface of insulation	Experimental 120 °C	265 °C	254 °C	496 °C	148 °C	163 °C	237.0 °C	438 °C
	Convection Coefficient in FE model h (W/m ² K)	FE Model 126 °C	268 °C	251 °C	499 °C	146 °C	165 °C	239 °C	436 °C
		23.5	23.5	40.0	40.0	23.5	23.5	40.0	40.0
45 mm	Temperature on inner surface of insulation	Experimental -	-	-	-	-	-	-	-
	Convection Coefficient in FE model h (W/m ² K)	FE Model 118 °C	198 °C	189 °C	420 °C	107 °C	126 °C	158 °C	385 °C
		23.5	23.5	40.0	40.0	23.5	23.5	40.0	40.0
60 mm	Temperature on inner surface of insulation	Experimental -	-	-	-	-	-	-	-
	Convection Coefficient in FE model h (W/m ² K)	FE Model 71 °C	171 °C	101 °C	277 °C	67 °C	113 °C	75 °C	204 °C
		23.5	23.5	40.0	40.0	23.5	23.5	40.0	40.0
90 mm	Temperature on inner surface of insulation	Experimental -	-	-	-	-	-	-	-
	Convection Coefficient in FE model h (W/m ² K)	FE Model 36 °C	68 °C	34 °C	99 °C	34 °C	62 °C	29 °C	93 °C
		23.5	23.5	40.0	40.0	23.5	23.5	40.0	40.0

Σχήμα 20: Θερμοκρασίες στην εσωτερική επιφάνεια των καλυμμάτων για διάφορα πάχη από πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων [16]

Τα παραπάνω αποτελέσματα δεν μπορούν παρά να είναι τουλάχιστον ενθαρρυντικά καθώς και τα 2 υλικά (για έκθεση σε 550°C) και στα 4 πάχη για 1 και 2 ώρες δεν επέτρεψαν την αποκόλληση της εποξικής ρητίνης ($T_{\text{αποκόλλησης}}=215^{\circ}\text{C}$). Παρομοίως η τοποθέτηση 90 mm πάχους ενίσχυσης ακόμα και για 2 ώρες (για έκθεση σε 715°C) δεν επέτρεψε την αποκόλληση. Από το σχήμα 20 φαίνεται ότι η χρήση κεραμικής κουβέρτας επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα σε επίπεδο των θερμοκρασιών. Στη μελέτη αναφέρεται ότι δεν επιλέγεται μεγαλύτερο πάχος των 90 mm για το πρόγραμμα ανάλυσης καθώς η μετρούμενη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας της θερμοπροστασίας θα έτεινε σε αυτήν του περιβάλλοντος.

Από τα αποτελέσματα σχετικά με την διατήρηση των αντοχών από τα σχήματα 16, 17, καταλήγουμε στο ότι η αποτελεσματικότητα του κονιάματος από γεωπολυμερή κυμαίνεται στο 70%-73%, ενώ της κεραμικής κουβέρτας στο 80%-93%. Είναι έκδηλο ότι τέτοιες απομειώσεις των αντοχών (ανάμεσα σε αντοχές των δοκιμών χωρίς έκθεση αλλά και αντοχές αυτών μετά την έκθεση σε φωτιά) είναι αρκετά ελπιδοφόρες. Υψηλότερη αποτελεσματικότητα φαίνεται να πετυχαίνει τελικώς η κουβέρτα κεραμικών ινών.

7.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Η βιβλιογραφία που σχετίζεται με τα προστατευτικά καλύμματα των ΙΟΠ είναι αρκετά περιορισμένη. Το πλήθος των μελετών στοχεύει στην ανάλυση της συμπεριφοράς των ΙΟΠ σε πυρκαγιά, χωρίς να συγκρίνει την εφαρμογή διαφορετικών υλικών προστασίας. Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η περαιτέρω μελέτη των υλικών αυτών με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους. Τα πειράματα, λοιπόν, που επιλέχθηκαν παραπάνω εξετάζουν πληθώρα καλυμμάτων και σχολιάζουν τη δράση του καθενός. Η σύγκριση των πειραμάτων δεν μπορεί παρά να είναι ποιοτική και όχι ποσοτική λόγω των διαφορετικών ερευνητικών ομάδων και την ανομοιομορφία στις συνθήκες διεξαγωγής. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με διαφορετική μελέτη σύνθεσης, τα φορτία ήταν διαφορετικής φύσης (θλίψη ή κάμψη) και επιβλήθηκαν σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα (κατά τη διάρκεια της δοκιμής πυρός ή μετά από αυτήν) και οι δοκιμές πυρός έγιναν σε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και διάρκειες. Ωστόσο είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα βέλτιστα υλικά που προτιμώνται και τις επιδόσεις αυτών. Τσιμεντοειδή κονιάματα με περλίτη και βερμικουλίτη πάχους περίπου 30 mm, καθώς και οι κουβέρτες κεραμικών ινών επιλέγονται στην πλειονότητα των πειραμάτων ως υλικά προς μελέτη. Είναι ξεκάθαρο πως τέτοιου είδους καλύμματα είναι ικανά να μειώσουν το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας στο επίπεδο των ΙΟΠ (καθυστερώντας την υαλώδη μετάπτωση της

εποξικής ρητίνης) επιτρέποντας στα υφάσματα ενίσχυσης να λειτουργήσουν φυσιολογικά για ορισμένο χρονικό διάστημα ή μετά το τέλος της πυρκαγιάς χωρίς να χρειάζονται αντικατάσταση.

8.ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ο σχολιασμός της πρακτικής εφαρμογής γίνεται καλύτερα αντιληπτός αν σκεφτούμε τα σενάρια για τα οποία η προστασία των ΙΟΠ θα λειτουργήσει προς όφελος της ασφαλούς εκκένωσης (κατά την οποία ίσως έχουμε αύξηση των φορτίων που δέχεται η κατασκευή). Σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας όπως γέφυρες, σήραγγες και πολυώροφα κτίρια όπου η πιθανότητα πυρκαγιάς λόγω μεγάλης κινητικότητας είναι μεγάλη, η χρήση προφίλ πυροπροστασίας θα εξασφαλίσει ότι η αποτελεσματικότητα των ΙΟΠ δεν θα εξαιρεθεί με την καύση τους και θα λειτουργούν βοηθητικά στην ανάληψη των φορτίων. Γίνεται σαφές ότι η ενίσχυση με ΙΟΠ έχει κριθεί απαραίτητη κατά τη μελέτη του υφιστάμενου δομικού στοιχείου και είναι αναγκαία για την ανάληψη κάθε φορτίου. Για κτίρια σπουδαιότητας 3 και 4 η εφαρμογή καλυμμάτων θα έπρεπε να θεωρείται απαραίτητη καθώς το οικονομικό κόστος σε αυτές τις περιπτώσεις κατασκευής έρχεται σε δεύτερη μοίρα. Επίσης, κατά την καύση των ΙΟΠ εκλύονται καπνοί και τοξικά αέρια τα οποία είναι ζημιογόνα για την υγεία των ανθρώπων που θα βρίσκονται στον χώρο την ώρα που θα ξεσπάσει η πυρκαγιά. Η καθυστέρηση, λοιπόν, στην αύξηση της θερμοκρασίας στο επίπεδο των ΙΟΠ είναι ένα ζήτημα το οποίο μπορεί να λυθεί με την εφαρμογή των καλυμμάτων. Στα θετικά επίσης προσμετράται ότι με προστασία των ΙΟΠ μπορεί να αποφευχθεί η απομάκρυνση και αντικατάσταση τους μετά την λήξη της φωτιάς καθώς δε θα είναι πλέον απαραίτητη (εφόσον δεν έχει ξεπεραστεί το flash point). Ωστόσο, το κόστος μιας τέτοιας λύσης δείχνει να περιορίζει την εφαρμογή της ειδικά σε κατοικίες ιδιωτών. Σε έργα μεγαλύτερης κλίμακας βέβαια, όπου η αντοχή σε φωτιά είναι σε δεύτερη μοίρα (π.χ. γέφυρες), η εφαρμογή ίσως είναι απαραίτητη. Περαιτέρω μελέτη πάνω στην οικονομικότητα παραγωγής-εφαρμογής είναι αναγκαία.

9.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του συνόλου των πειραμάτων δεν μπορεί παρά να είναι στην ουσία ποιοτική. Δεν υφίσταται ο όρος "καλύτερο" υλικό αλλά "κατάλληλο" υλικό ανάλογα με τις συνθήκες, τις συνήθειες, τον χρόνο, τους πόρους, την τοποθεσία της εφαρμογής. Τα παρακάτω συμπεράσματα προέκυψαν μέσω των αναφερόμενων πειραματικών μελετών, των επιπρόσθετων πληροφοριών τριών καθηγητών του τμήματος (κ. Δρίτσου, κ. Τριανταφύλλου, κ. Δέμη) και των συμβουλών αξιόλογων συναδέλφων Πολιτικών μηχανικών που μας εξήγησαν τι ακριβώς εφαρμόζεται στην Ελλάδα. Επιπλέον επικοινωνήσαμε με εταιρίες που εξειδικεύονται στην πυροπροστασία (Sika, Knauf, Baufox, Dryvit, Marmoline κ.α.) και συγκεκριμένα με τα τεχνικά τους τμήματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις προτιμήσεις στο σύνολο των εφαρμογών. Οι σύμβουλοι σχεδιασμού τους μας διαβεβαίωσαν ότι τα κυρίαρχα υλικά στον Ελλαδικό χώρο είναι ο πετροβάμβακας, οι πυράντοχες σανίδες, καθώς και ορισμένα σε μορφή κονιάματος. Καταλήγουμε λοιπόν στα παρακάτω:

- Η αποτελεσματικότητα των ΙΟΠ σε φωτιά επηρεάζεται από την εποξική ρητίνη. Μόλις ξεπεραστεί η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης, τότε το ΙΟΠ αποκολλάται και το δομικό στοιχείο χάνει την επιπρόσθετη ενίσχυση με αποτέλεσμα να είναι πιο ευαίσθητο στα επερχόμενα φορτία. Με τη χρήση των καλυμμάτων καθυστερεί η υαλώδης μετάπτωση και έτσι το δομικό στοιχείο αντέχει μεγαλύτερα φορτία καθώς το ΙΟΠ λειτουργεί κανονικά. Σε περίπτωση

που ξεπεραστεί η T_g και υπάρχει κάλυμμα τότε αν δεν επιβληθούν περαιτέρω φορτία το ΙΟΠ παραμένει ακέραιο-συγκρατούμενο από αυτό και ας είχε χάσει τη λειτουργία του. Μόλις επανέλθει η θερμοκρασία δωματίου, η ρητίνη μπορεί να αποκτήσει ξανά την ικανότητα να προσκολληθεί το ΙΟΠ στο δομικό μέλος υπό την προϋπόθεση ότι δεν ξεπεράστηκε η θερμοκρασία αποσύνθεσης της ή η θερμοκρασία που φλέγεται (flash point).

- Ένα δομικό στοιχείο ενισχυμένο με ΙΟΠ και προστατευμένο από κάλυμμα μπορεί να πετύχει μεγαλύτερη αντοχή από πανομοιότυπο δομικό στοιχείο χωρίς ΙΟΠ και κάλυμμα υπό συνθήκες φωτιάς.
- Η αναζήτηση με γνώμονα τον οικονομικό παράγοντα αλλά και η αξιολόγηση της απόδοσης κατέδειξε ότι η επιλογή κονιάματος με τσιμέντο αλουμίνας σε σχέση με αυτή κονιάματος με τσιμέντο τύπου Portland πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα αλλά με αρκετά αυξημένο κόστος. Τα αποτελέσματα δεν δικαιολογούν την προτίμηση της έναντι του Portland καθότι είναι αρκετά κοντά. Βέβαια θα πρέπει να επισημανθεί ότι η επιλογή του ακριβότερου υλικού μπορεί να οδηγήσει και σε συνολική πιο οικονομική κοστολόγηση καθώς θα χρησιμοποιηθεί λιγότερο υλικό ενώ άλλες φορές αποτελεί και μονόδρομο λόγω των απαιτούμενων συνθηκών.
- Ο βερμικουλίτης και ο περλίτης πρωταγωνιστούν στον χώρο με τις επιδόσεις τους να είναι εξίσου ικανοποιητικές. Αν και ο πρώτος κατά σειρά θεωρείται κατά τι «καλύτερος», αυτό δεν επιβεβαιώθηκε απολύτως από τα πειράματα ενώ τυγχάνει να έχει και υψηλότερο κόστος. Ο περλίτης, αντίθετα, είναι πιο οικείος στον Ελλαδικό χώρο καθώς η χώρα μας έχει μεγάλα αποθέματα και εταιρίες παραγωγούς-προμηθευτές. Βέβαια, η χώρα μας είναι στη ευχάριστη θέση να έχει πηγές βερμικουλίτη με ενθαρρυντικές προοπτικές εκμετάλλευσης [17]. Στην αναφορά [18] παρατίθεται ο ιστότοπος της εταιρείας Perlindustria που εδρεύει στην Ισπανία και εξειδικεύεται στην παραγωγή κονιαμάτων περλίτη και βερμικουλίτη.
- Η ενίσχυση ενός δομικού στοιχείου με ΙΟΠ γίνεται σε εφαρμογές που το στοιχείο μπορεί να είναι ευαίσθητο, "αδύναμο", επιρρεπές σε αστοχία. Παρότι ο σχεδιασμός γίνεται υπέρ της ασφαλείας και με πλήθος κατάλληλων συντελεστών-δηλαδή πριν την εφαρμογή των ΙΟΠ ελέγχεται ότι το δομικό στοιχείο σε περίπτωση πυρκαγιάς δεν αστοχεί-η μη τοποθέτηση πυροπροστασίας σε συνδυασμό με κάποιο φαινόμενο αύξησης των φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του στοιχείου ακόμη και σε κατάρρευση. Η πρόληψη σε αυτές τις περιπτώσεις αυξάνει το διαθέσιμο χρόνο εκκένωσης ή επέμβασης σε περίπτωση εγκλωβισμού.
- Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η πυροπροστασία των ΙΟΠ και των δομικών στοιχείων του συνόλου της κατασκευής είναι μια κοστοβόρα διαδικασία εκ φύσεως και υλοποιείται σε ιδιαίζουσες περιπτώσεις, ενώ προστατεύει πέρα από τα ΙΟΠ και τα ίδια τα στοιχεία.
- Ευκόλως αντιληπτό γίνεται από τα πειράματα και από τις πρακτικές εφαρμογές ότι συνδυασμοί υλικών προστασίας κατά της φωτιάς με κατάλληλο σχεδιασμό παρουσιάζουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Επί παραδείγματι η χρήση κεραμικής κουβέρτας σε συνδυασμό με διάφορα είδη κονιαμάτων κατά περίπτωση συνετέλεσε στην αύξηση της αποτελεσματικότητας σε σχέση με την επιλογή μόνο κονιάματος ως προστασία.

- Σχετικά με την τοποθέτηση της πυροπροστασίας σε μορφή κονιάματος θα μπορούσε να τονισθεί η δυνατότητα εφαρμογής της σε πλήθος περιπτώσεων, ανεξαρτήτως γεωμετρίας. Εφόσον το ενδεχόμενο προβλημάτων συνάφειας έχει ερευνηθεί και αποκλειστεί, η αποδοτικότητα της εφαρμογής διασφαλίζεται. Η τοποθέτηση πυράντοχης σανίδας (board) μπορεί να γίνει γρηγορότερα καθώς δεν απαιτείται χρόνος να στεγνώσει η στρώση και να τοποθετηθεί οπλισμός αν το πάχος εφαρμογής είναι μεγάλο. Ωστόσο, η ενδεχόμενη τοποθέτησή της μπορεί να καθυστερήσει ακόμη και αν οι διαστάσεις του board είναι μεγάλες στην περίπτωση που υπάρχει απαίτηση πολλών άνισων κοψιμάτων υλικού. Επιπρόσθετα, πιθανά κενά ανάμεσα τους (κομμένα τμήμα πυράντοχων σανίδων δεν ταιριάζουν ικανοποιητικά στην εφαρμογή), δημιουργούν την ανάγκη επιλογής πληρωτικού υλικού, ανησυχία που δεν υπάρχει με την επιλογή κονιάματος πυροπροστασίας. Επιπλέον, με την τοποθέτηση board αναιρούνται οποιαδήποτε προβλήματα ενδεχόμενης προβληματικής συνάφειας.
- Ύστερα από επικοινωνία με το σύνολο των εταιριών που δραστηριοποιούνται στον χώρο, κάθε μια είχε να προτείνει δικές της λύσεις-προϊόντα. Τα προϊόντα αυτά περιλαμβάνουν πυράντοχες γυψοσανίδες οι οποίες στην χώρα μας είναι αρκετά διαδεδομένες και ψηλά στις προτιμήσεις, πετροβάμβακα όπου η ποιότητά του εκφράζεται με μονάδες kg/m^2 , συνδυασμό πετροβάμβακα και ειδικής γυψοσανίδας, κεραμικές κουβέρτες καθώς και τσιμεντοειδή κονιάματα (π.χ. Sikacrete 213F) [19].

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bisby, L. A., Green, M. F., & Kodur, V. K. R. (2005). Response to fire of concrete structures that incorporate FRP. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(3), 136–149
- [2] «Υπολογιστικά εργαλεία για τη διαστασιολόγηση ενισχύσεων φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά ινοπλεγμάτων-κονιάματος», Διατριβή διπλώματος ειδίκευσης Αντωνίας Κ. Μιχαήλ, Επιβλέπων μέλος Δ.Ε.Π. Καθηγητής Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος, Πάτρα 2016
- [3] «Πειραματική διερεύνηση διατάξεων ενίσχυσης πλακοδοκών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι ανακυκλιζόμενης τέμνουσας με χρήση σύνθετων υλικών τύπου ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα», Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης ΚΑΤΣΑΠΗ ΑΘ.ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ, Πολιτικού Μηχανικού, Πάτρα 2014
- [4] «Νέα γενιά δομικών υλικών για την ενίσχυση κατασκευών: ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα», Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών
- [5] Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου (2013). Δομικά Υλικά, 10^η έκδοση
- [6] Σημειώσεις μαθήματος «Ενισχύσεις και επισκευές κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος», Παρουσιάσεις μαθήματος-e-class
- [7] Κείμενο στο διαδίκτυο: http://gr.uzin.com/techniques-plirofories/technognosia-know-how/idiotites-ylikon-topothesis-2-systatikon/?fbclid=IwAR3PbddgHYyqMjdOpPbTi3dkwKOntNhqF8U_Vxbsy87UE8uZxucwW9OOp0
- [8] Κείμενο στο διαδίκτυο: <http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/tip23.pdf>
- [9] Κείμενο στο διαδίκτυο:

http://www.firesecurity.gr/bibliothiki/ktiria1.htm?fbclid=IwAR25uulTUVujZsHWzNhBvdhifUZ_gZuNkgeYik_wcc19UCyzVR50WmJqBEI

- [10] Williams, B., Bisby L., Kodur V., Green, M. & Chowdhury, E. (2006). Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1151–1160
- [11] Bisby L., Alexander L. (2003). Fire behaviour of fibre-reinforced polymer (FRP) reinforced or confined concrete [microform], Thesis (Ph.D.)-Queen's University
- [12] Bai Y., Keller T. (2013). Fire Protection Practices for FRP Components. *High Temperature Performance of Polymer Composites*. Chapter 9
- [13] Grace, N., & Bebawy, M. (2014). Fire Protection for Beams with Fiber-Reinforced Polymer Flexural Strengthening Systems. *ACI Structural Journal*, 111(3)
- [14] Elkady, H., & Hasan, A. (2010). Protection of reinforced concrete beams retrofitted by carbon fibre-reinforced polymer composites against elevated temperatures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(9), 1171–1178
- [15] Kamal, O. A., Hamdy, G. A., & Abou-Atteya, M. A. (2014). Efficiency of coating layers used for thermal protection of FRP strengthened beams. *HBRC Journal*, 10(2), 183–190
- [16] Guruprasad, Y. K., & Ramaswamy, A. (2019). Thermal insulation of concrete and the repair material CFRP exposed to high temperature and different time intervals. *Construction and Building Materials*, 205, 549–565
- [17] Tsirambides, A & Michailidis, K 1999 An X K., 1999. An X-ray EPMA and oxygen isotope ray, EPMA, and oxygen isotope study of vermiculitized micas in the ultramafic rocks at Askos, Macedonia, Greece, *Applied Clay Science*, Volume 14, Issues 1–3, February 1999, Pages 121-140
- [18] Perlindustria, Barcelona (Spain): <https://perlindustria.com/en/>
- [19] Sika Hellas ABEE, Φύλλο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Προϊόντος SIKACRETE 213F

