

**TRM VERSUS FRP – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ. ΣΕ ΘΕΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ
ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΙΣΤΑΤΙΑΔΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

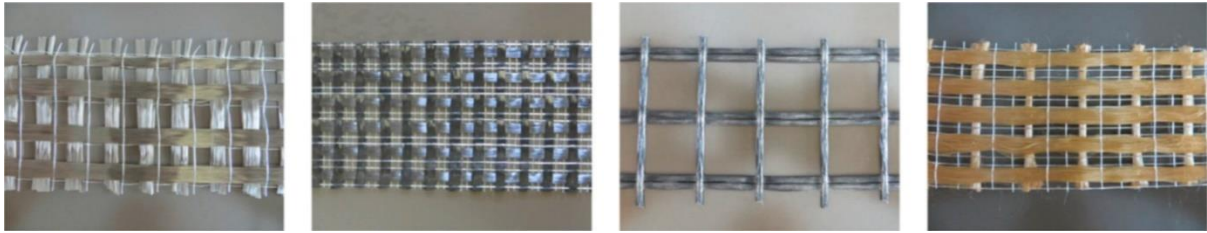
Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π., agsi9panta@gmail.com

Περίληψη

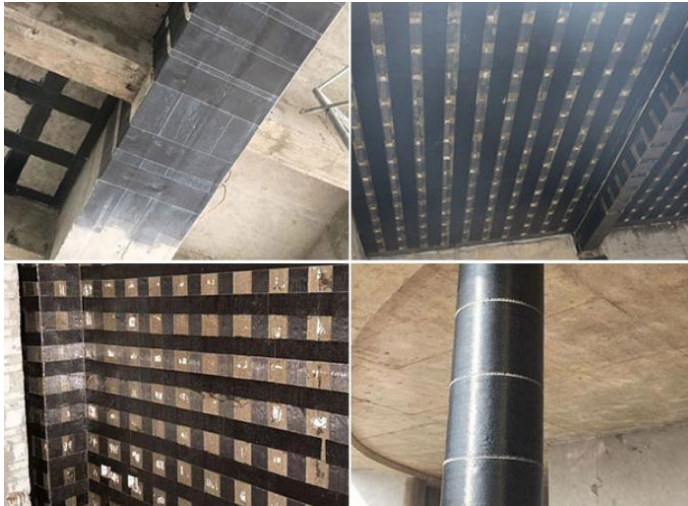
Στόχος της παρακάτω ανάλυσης είναι η ανάδειξη τις αποτελεσματικότητας των σύνθετων υλικών FRP και TRM σε διάφορες εφαρμογές επεμβάσεων. Προς επίτευξη αυτού, παρουσιάζονται και σχολιάζονται αναλυτικά 3 δημοσιεύσεις, δύο με θέμα την ενίσχυση πλακών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι διάτρησης, οι οποίες συγκρίνονται ως προς τα αποτελέσματά τους και μια που αφορά την ενίσχυση δοκών έναντι διατμητικής αστοχίας μέσω πειραματικών διατάξεων στην οποία εν συνεχεία εφαρμόζουμε τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.[13] ώστε να ελέγξουμε αν οι προβλέψεις του όσον αφορά τα είδη αστοχίας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν μετά την ενίσχυση των δοκιμών συμφωνούν με αυτά του πειράματος. Επίσης σχολιάζονται και αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα αρκετών ακόμα δημοσιεύσεων σε διάφορες εφαρμογές ενίσχυσης των δύο σύνθετων υλικών ώστε να πλαισιωθεί σαφέστερα η σύγκρισή τους αλλά και οι εκτενείς και πολυσήμαντες διαφορετικές εφαρμογές που αυτά βρίσκουν σε θέματα επεμβάσεων, όπου έγκειται και το ενδιαφέρον της εργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια ανάλυσης της λειτουργίας δύο σύνθετων υλικών (TRM,FRP) τόσο μέσω της διασαφήνισης των βασικών τους αρχών λειτουργίας σε μικροσκοπική κλίμακα, όσο και μέσω της συναρμογής τους σε άλλα, βασικά δομικά στοιχεία. Συγκεκριμένα αναλύθηκαν και σχολιάστηκαν διάφορες πειραματικές δημοσιεύσεις που αφορούν τα συγκεκριμένα υλικά από τις οποίες, χρησιμοποιήθηκαν κάποια πειραματικά δεδομένα που στην συνέχεια σχολιάστηκαν και συγκρίθηκαν σε μία γενικότερη βάση της απόδοσής τους σε θέματα ενισχύσεων. Εκτός από την σύγκριση μεθόδων-δεδομένων των πειραμάτων έγινε και μια προσπάθεια εφαρμογής του ΚΑΝ.ΕΠΕ.(2017)[13] με στόχο την εκτίμηση σε όρους αντοχών και μορφών αστοχίας, για την περίπτωση των ινοπλισμένων πολυμερών και στην συνέχεια την σύγκριση τους με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Στόχος λοιπόν της παρούσας ανάλυσης δεν είναι μόνο η εξαγωγή νέων, συμπερασμάτων πάνω στην λειτουργία αυτών των δύο υλικών μα και μια ανασκόπηση των ήδη υπαρχόντων καθώς μόνο μέσω τις σύγκρισης και της αμφισβήτησής τους μπορεί, κατά την γνώμη μας να υπάρξει ένα γόνιμο υπόβαθρο το οποίο θα υποστηρίξει την έγκυρη και ορθή χρήση τους σε χώρες όπως η Ελλάδα όπου, απουσία τέτοιων αναλύσεων τα παλαιότερα χρόνια οδήγησε σε καταστροφικά αποτελέσματα στο πεδίο των κατασκευών. Άλλωστε, οι βλάβες που προκαλούνται από σεισμούς σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, η προσεισμική ενίσχυση, η γήρανση και φθορά των κατασκευών, καθώς και η αλλαγή χρήσης, οδηγούν ολοένα και περισσότερο προς την αναζήτηση νέων υλικών και τεχνικών επεμβάσεων οι οποίες εξασφαλίζουν αποτελεσματικότητα, ταχύτητα και ευκολία στην εφαρμογή, διατήρηση της γεωμετρίας των δομικών στοιχείων και μείωση του κόστους.[6]



Σχήμα 1α. Ινομπλέγματα που χρησιμοποιούνται στα TRM (βασάλτης, άνθρακας, γυαλί, PBO)



Σχήμα 1β. Ινοπλισμένα πολυμερή σε διάφορες εφαρμογές

Τα **ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)** χαίρουν παγκόσμιας αναγνώρισης ως δομικά υλικά κυρίως λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων τους. Παρόλο που τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται από τη δεκαετία του 1970, η ουσιαστική έρευνα που αφιερώθηκε τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει στη δημοφιλή χρήση τους, ιδιαίτερα στην ενίσχυση της ικανότητας δομικών μελών. [12] Οι ίνες που έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον της κατασκευαστικής βιομηχανίας είναι το γυαλί, ο άνθρακας και το αραμίδιο. Από την άλλη πλευρά, το συνδετικό είναι οργανικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή όπως η εποξική και πολυεστερική ρητίνη, η πολυουρεθάνη, ο βινυλεστέρας και η φαινόλη. Μετά τον εμποτισμό των πολυμερών στις ίνες και την επακόλουθη ρύθμιση / σκλήρυνση, το σύνθετο προϊόν που παράγεται κατ'αυτόν τον τρόπο ενεργεί ως ένα συνδυασμένο σύστημα και οι τάσεις μεταφέρονται μέσω δεσμού στη διεπαφή των δύο υλικών. Τα χαρακτηριστικά των ινοπλισμένων πολυμερών εξαρτώνται από την περιεκτικότητά τους σε ίνες. Οι ίνες αυτές, είναι το κύριο στοιχείο μεταφοράς φορτίου και παρουσιάζουν υψηλή ακαμψία όταν υπόκεινται σε καταπόνηση.[1]

Μερικά από τα χαρακτηριστικά που εντάσσονται στα πλεονεκτήματά των FRP είναι:

- Η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή.
- Το χαμηλό βάρος.
- Η ανθεκτικότητα σε διάρκεια.
- Η απλή τεχνική εφαρμογής, η οποία βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση των σύνθετων υλικών, ενώ χαρακτηρίζεται από ευελιξία και ταχύτητα εκτέλεσης.
- Η μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης.
- Η σχετικά καλή διατήρηση της γεωμετρίας των δομικών μελών.

Προφανώς, όπως κάθε υλικό τα ινοπλισμένα πολυμερή διέπονται και από ορισμένες αδυναμίες που οφείλονται κυρίως στη χρήση ρητινών. Τέτοιες είναι :

- Η πτωχή συμπεριφορά (απώλεια αντοχής) των ρητινών σε θερμοκρασίες άνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (της τάξης των 70-80°C).
- Το σχετικά υψηλό κόστος των ρητινών.
- Η αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες (εκτός αν γίνει χρήση ρητινών ειδικού τύπου).
- Ο περιορισμός της ικανότητας “αναπνοής” των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από μανδύες FRP.
- Η ασυμβατότητα ρητινών με υλικά ιστορικών κατασκευών
- Η δυσκολία διεξαγωγής μη καταστροφικής αποτίμησης πιθανών βλαβών “πίσω” από μανδύες FRP μετά από σεισμούς.

Αυτά ακριβώς τα μειονεκτήματα οδήγησαν στην δημιουργία των **ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (TRM)**, τα οποία συνιστώνται ευρέως ως ένα εφικτό υποκατάστατο για τα συστήματα FRP για την ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.

Η έρευνα για το TRM που ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980, ωστόσο, ήταν σε αργό ρυθμό μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και σημείωσε άνοδο από το 2002[2]. Η μέθοδος εφαρμογής τους σε δομές ξεπερνούν πολλά μειονεκτήματα των FRP. Ωστόσο, σε αντίθεση με τη χρήση ρητινής πολυμερούς στο FRP, εδώ το τσιμεντοειδές κονίαμα δεν έχει την ικανότητα να εμποτίζει τις ίνες για να τις συγκρατεί μαζί. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την υποκατάσταση των φύλλων με υφάσματα ινών που είχαν ανοίγματα ανά ίσα διαστήματα (κλώνους) για να καταστεί δυνατή η μηχανική εμπλοκή μεταξύ τσιμεντοειδούς κονιάματος και ινών.[12]

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

2.1 Δοκιμή διάτρησης επίπεδων πλακών οπλισμένου σκυροδέματος (1 πειραματική μελέτη διάτρησης πλακών)

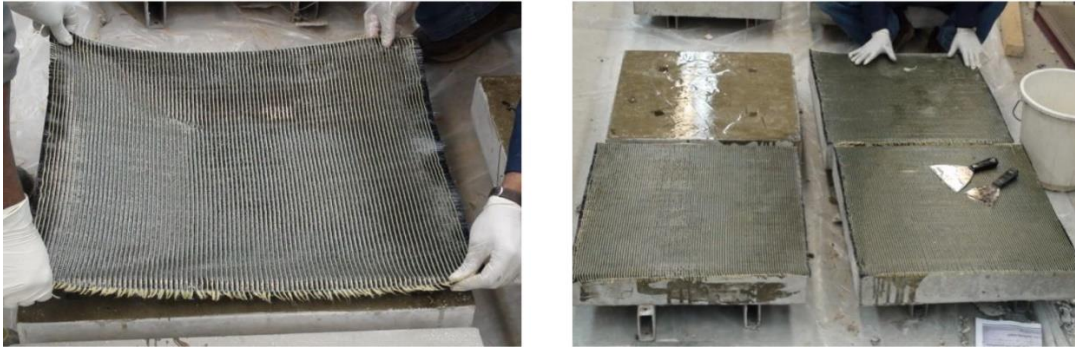
Σε αυτή τη δημοσίευση [1], μελετήθηκε πειραματικά η συμπεριφορά σε διάτρηση πλακών οπλισμένου σκυροδέματος 600x600x90 mm και ενισχυμένων με ράβδους Φ8/100 στις δύο κύριες διευθύνσεις. Οι λεπτομέρειες ενίσχυσης των πλακών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Κατασκευάστηκαν συνολικά 12 πλάκες, χωρισμένες σε δύο ομάδες των 6 ανάλογα με το τύπο σκυροδέματος. Δύο πλάκες κάθε ομάδας ελήφθησαν ως δοκίμια ελέγχου ενώ οι υπόλοιπες τέσσερις πλάκες ενισχύθηκαν χρησιμοποιώντας ινοπλισμένα πολυμερή με φύλλα ινών άνθρακα (CFRP) και ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (TRM). Οι λεπτομέρειες του πειραματικού προγράμματος δίνονται στον Πίνακα 1.

Όνομασία δοκιμίου	Ομάδα	Τύπος ενίσχυσης
SA-1,2	A	-
SA-C1,2	A	Μια στρώση CFRP
SA-T1,2	A	Μια στρώση TRM
SB-1,2	B	-
SB-C1,2	B	Δύο στρώσεις CFRP
SB-T1,2	B	Δυο στρώσεις TRM

Πίνακας 1. Στοιχεία δοκιμίων

Τρία δείγματα κόπηκαν από τα υφάσματα άνθρακα για να προσδιοριστούν οι μέσες μηχανικές ιδιότητες τους. Κάθε δείγμα υποβλήθηκε σε σταδιακά αυξανόμενο μονοαξονικό φορτίο μέχρι να αποτύχει. Τα χαρακτηριστικά του φύλλου CFRP είναι:

Μέτρο Ελαστικότητας CFRP στην κύρια διεύθυνση των ινών = 77,3 GPa, Μέτρο Ελαστικότητας CFRP κάθετα στην κύρια διεύθυνση των ινών = 40,6 MPa, Παραμόρφωση αστοχίας= 1,1%, Αντοχή σε εφελκυσμό = 846 MPa.



Σχήμα 2. Διαμόρφωση ενίσχυσης CFRP [1]

Το ύφασμα TRM περιείχε ίσες πυκνότητες ινών άνθρακα υψηλής αντοχής σε δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις. Για να ληφθούν οι μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος, δοκιμάστηκαν τέσσερα κομμάτια και τα μέσα αποτελέσματα των δοκιμών είναι:

Μέτρο ελαστικότητας υφάσματος: 33 GPa, Παραμόρφωση αστοχίας: 0.95%, Αντοχή σε εφελκυσμό του υφάσματος: 907MPa, Πάχος ανά υφασμάτινο στρώμα f t: 0.2 mm, Άνοιγμα πλέγματος :10 mm

Στην παρούσα μελέτη, ένα εμπορικό κονίαμα τροποποιημένο με πολυμερή χρησιμοποιήθηκε στην ενίσχυση TRM καθώς και δύο στρώσεις ινοπλεγμάτων για κάθε δοκίμιο με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση του μονού φύλλου CFRP όπως έχει δείξει η διαθέσιμη βιβλιογραφία [1]. Οι τυπικές δοκιμές αντοχής σε θλίψη καθώς και οι δοκιμές εφελκυσμού διεξήχθησαν σε πρότυπα δοκίμια σύμφωνα με την ASTM C109 (2002) στις 28 ημέρες και η μέση αντοχή σε θλίψη του κονιάματος ήταν 33,9 MPa ενώ η μέση αντοχή εφελκυσμού του κονιάματος ήταν 2,93 MPa.



Σχήμα 3. Διαμόρφωση ενίσχυσης TRM [1]

Τα πέγματα ελέγχθηκαν κάτω από το οιονεί στατικό φορτίο διάτρησης που εφαρμόστηκε μέσω κυλινδρικής ράβδου χάλυβα διαμέτρου 40 mm με ημισφαιρικό άκρο. Οι πλάκες στηρίχθηκαν σε δύο αντικριστές πλευρές και το φορτίο εφαρμόστηκε στο κέντρο των πλακών και κατ'επέκταση στο κέντρο του οπλισμού και έτσι δεν υπήρχαν ράβδοι στην ακριβής κατεύθυνση του φορτίου, προσφέροντας προφανώς την ελάχιστη αντίσταση στη διάτρηση.

Το φορτίο των 18kN ανά μέτρο εφαρμόστηκε βαθμιαία μέχρι την αστοχία των δοκιμίων χρησιμοποιώντας ένα υδραυλικό γρύλο. Μετά την διεξαγωγή του πειράματος οι μορφές αστοχίας στην εφελκόμενη όψη των δειγμάτων πλάκας ήταν σχεδόν η ίδια για όλα τα δοκίμια, με το σχηματισμό διατμητικού κώνου καθώς μετά την αστοχία της εξωτερικής επιφάνειας του σκυροδέματος ο σπλισμός και η ενίσχυση των TRM και CFRP παρέτεινε την πλήρης διάτρηση του. Ο κώνος που σχηματίστηκε στις ενισχυμένες πλάκες CFRP και TRM ήταν σχεδόν ίδιος σχηματίζοντας γωνίες με την οριζόντιο : $60^{\circ} \leq \theta_1 \leq 65^{\circ}$ και $15^{\circ} \leq \theta_2 \leq 20^{\circ}$, αντίστοιχα.

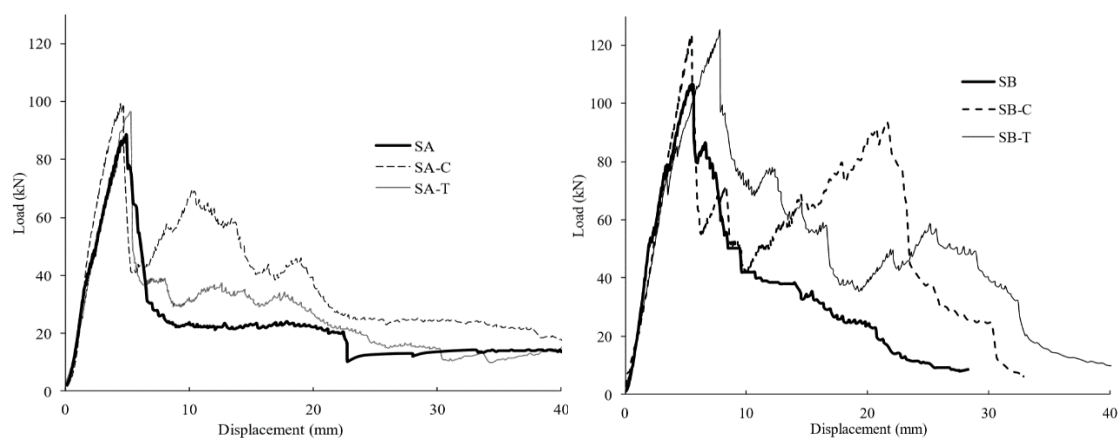


Σχήμα 4. Μορφές αστοχίας πλακών με : CFRP (αριστερά) , TRM (δεξιά) [1]

2.1.2 Συμπεράσματα πειραματικής μελέτης

Ανάλυση των αριθμητικών δεδομένων και των μορφών αστοχίας του πειράματος μας οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης αναδεικνύουν μια ενδιαφέρουσα περίπτωση καθώς παρατηρούμε δύο φορτία αιχμής για τις ενισχυμένες πλάκες. Υπάρχει ξαφνική πτώση του φορτίου μετά την πρώτη κορυφή του, η οποία οφείλεται στην έναρξη του σχηματισμού κώνου διάτρησης, εξαιτίας του οποίου το σκυρόδεμα αρχίζει να χάνει την αντίσταση διάτρησης. Παρόλα αυτά το φορτίο δεν φθάνει στο μηδέν ,αντί αυτού δείχνει σημαντική υπολειμματική αντίσταση στη φόρτιση η οποία παραμένει για σημαντική μετατόπιση και οδηγείται τελικά σε άυξηση σχηματίζοντας ένα "οροπέδιο" το οποίο υποδεικνύει την αντίσταση που παρέχεται από τη δράση βλήτρου των ράβδων σπλισμού στη συγκράτηση του κώνου διάτρησης σκυροδέματος στις μη ενισχυμένες πλάκες.

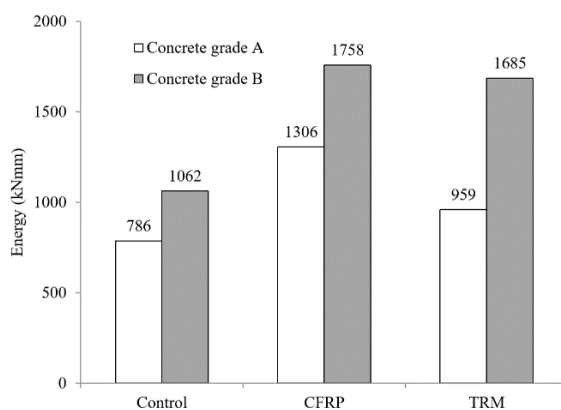


Σχήμα 5. Διαγράμματα φόρτισης-μετατόπισης για: α) Πλάκες ομάδας Α(αριστερά), β) Πλάκες ομάδας Β(δεξιά) [1]

- Στις ενισχυμένες πλάκες, μετά την σύντομη πτώση από το φορτίο αιχμής ,αρχίζει και πάλι να αυξάνεται λόγω της αντίστασης που παρέχεται από τα ενισχυτικά στρώματα. Αυτές οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν ότι η δράση βλήτρου των ράβδων και τα ενισχυτικά στρώματα αρχίζουν να συνεισφέρουν σημαντικά ακόμη και μετά το μέγιστο φορτίο και ύστερα από σημαντική μετατόπιση.
- Οι πλάκες που ενισχύθηκαν με CFRP παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερη ικανότητα ανάληψης φορτίου και δυσκαμψία, επιδεικνύοντας την υπεροχή τους στην ενίσχυση κατά της διάτρησης σε πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος.
- Αν και οι ενισχυμένες πλάκες TRM παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια δυσκαμψία με το δοκίμιο ελέγχου, συμβάλουν επίσης σημαντικά στην ανάληψη υψηλότερου φορτίου.
- Για τις ενισχυμένες με CFRP πλάκες, αν και υπάρχει μικρή αύξηση του πρώτου φορτίου αιχμής (12,4% για σκυρόδεμα Α και 16,6% για σκυρόδεμα Β), το δεύτερο μέγιστο φορτίο είναι σημαντικά υψηλότερο (189,6% , 275,5%)
- Για τις ενισχυμένες με TRM πλάκες, η αύξηση του πρώτου φορτίου αιχμής (9,1% για το σκυρόδεμα Α και 18,1% για το Β βαθμού σκυροδέματος) είναι σχεδόν η ίδια με της ενίσχυσης CFRP, ενώ η δεύτερη κορυφή για τους τύπους σκυροδέματος Α και Β είναι 55,4% και 135,7% υψηλότερη αντίστοιχα σε σχέση με το φορτίο του δοκιμίου ελέγχου.
- Για ενισχυμένες με CFRP πλάκες, υπάρχει σημαντική αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας κατά την διάτρηση πλακών που κυμαίνεται από 65,5% έως 66,1% για τους δύο τύπους σκυροδέματος, ενώ για τις ενισχυμένες με TRM πλάκες η αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας στην διάτρηση των πλακών κυμαίνεται από 22,0% έως 58,7% για τους δύο τύπους σκυροδέματος σε σχέση με πάντα με τα δοκίμια ελέγχου, ιδιότητες πολυσήμαντες καθώς η απορρόφηση της ενέργειας είναι εκείνη που θα δώσει τα σημάδια προειδοποίησης πριν την αστοχία του υλικού.

Όνομασία δείγματος	Δοκίμια ελέγχου	Δοκίμια ελέγχου	Δοκίμια CFRP*	Δοκίμια CFRP*	Δοκίμια TRM*	Δοκίμια TRM*
	Peak I	Peak II	Peak I	Peak II	Peak I	Peak II
SA	88,4	24	99 (12,4%)	69,5 (189,6%)	96,4 (9,1%)	37,3 (55,4%)
SB	106	33,1	123,6 (16,6%)	93.5 (275.5%)	125.2 (18.1%)	58.7 (135.7%)

Πίνακας 2. Μέγιστα φορτία δοκιμίων σε kN, *σε παρένθεση η % διαφορά με το δοκίμιο ελέγχου



Σχήμα 6. Απορρόφηση ενέργειας στις πλάκες [1]

Τέλος, συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με αυτά που μας δίνουν οι τύποι και οι διαδικασίες που δοκιμάστηκε από τους Husain Abbas, Aref A. Abadel, Tarek Almusallam, Yousef Al-Salloum [1] και με εκείνα που μας δίνει η εφαρμογή του ACI 318 (2011) [11].

Όνομασία δοκιμίου	Μέγιστο διατμητικό φορτίο (kN)	Μέγιστο διατμητικό φορτίο (kN)	Μέγιστο διατμητικό φορτίο (kN)	Σύγκριση με πείραμα	Σύγκριση με πείραμα
	Πείραμα	ACI 318	Μοντέλο	Πείραμα-ACI	Πείραμα-μοντέλο
SA	88.4	47.4	102.5	1.86	0.86
SA-C	99.4	47.4	109.8	2.10	0.91
SA-T	96.4	47.4	104.1	2.03	0.93
SB	106.0	59.7	124.3	1.78	0.85
SB-C	123.6	59.7	135.1	1.78	0.92
SB-T	125.2	59.7	137.3	2.10	0.91
Μέσος όρος				1.99	0.90

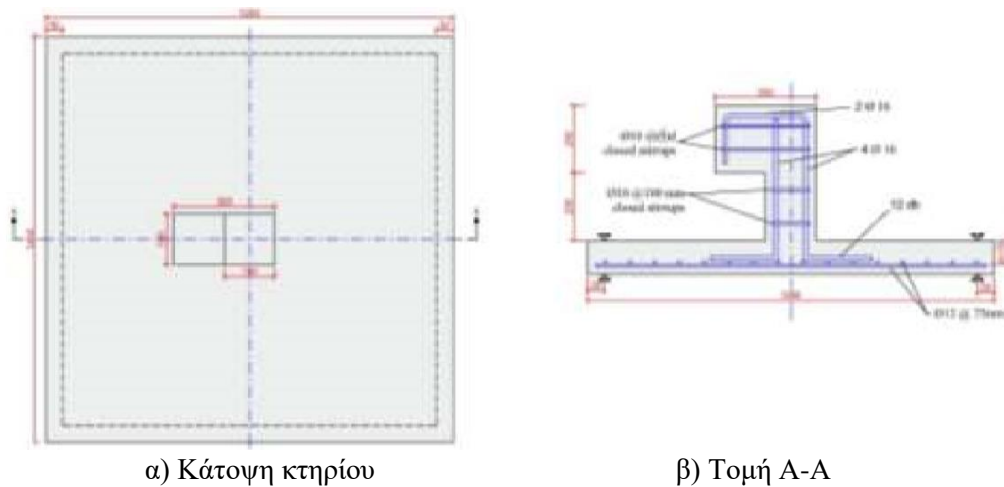
Πίνακας 3. Σύγκριση αποτελεσμάτων Πειράματος-ACI-Μοντέλου

-Από τον πίνακα 3 παρατηρούμε ότι οι εξισώσεις του ACI 318(2011) [2] παρέχουν πολύ συντηρητικές προβλέψεις για μέγιστο διατμητικό φορτίο των δοκιμασμένων πλακών σε σύγκριση με το αριθμητικό μοντέλο. Ο μέσος λόγος $P_u \text{ exp} / P_u \text{ ACI}$ είναι 1,99 χρησιμοποιώντας την εξίσωση ACI 318 (2011) [2] σε σύγκριση με 0,90 για το αριθμητικό μοντέλο. Αυτό πιθανώς βέβαια να οφείλεται στο ότι οι εξισώσεις του κώδικα δεν λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των ενισχυτικών στρωμάτων και συνεπώς, οι διατάξεις του κώδικα δεν προορίζονται για τις ενισχυμένες πλάκες. Παρόλα αυτά το αριθμητικό μοντέλο δίνει μια πολύ καλή προσέγγιση των πραγματικών δεδομένων στην πρόβλεψη της ικανότητας διάτρησης των FRP και TRM ενισχυμένων πλακών οπλισμένου σκυροδέματος.

2.2 Δοκιμή διάτρησης επίπεδων πλακών οπλισμένου σκυροδέματος (2^η πειραματική μελέτη διάτρησης πλακών)

2.2.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Σε αντίθεση με την προηγούμενη μελέτη, αυτή τη δημοσίευση των Majid H. Abdulhussein, Dr. Muhammad J. Kadhim [2], διερεύνησε αριθμητικά και όχι πειραματικά αυτή τη φορά, τη αποτελεσματικότητα κονιάματος: **α)** ενισχυμένου με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (TRM), **β)** ενισχυμένου με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP), ως μέσου βελτίωσης της συμπεριφοράς σε διάτρηση των επίπεδων πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα έγινε μια ανάλυση μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ABAQUS (2016) για να διερευνηθεί η επίδραση της χρήσης του σύνθετου συστημάτων TRM και CFRP στη δοκιμή σε διάτρηση επίπεδων πλακών όσον αφορά την ικανότητα ανάληψης φορτίου, την δυσκαμψία καθώς και τα μοντέλα ρωγμών. Οι παράμετροι που εξετάζονται στην αριθμητική ανάλυση είναι η εκκεντρότητα του φορτίου (μηδέν και 150 mm), ο τύπος εξωτερικής ενίσχυσης (CFRP και TRM) και το άνοιγμα των πλεγμάτων των ινών άνθρακα (10 και 20 mm). Για την προσομοίωση του μοντέλου λήφθηκαν τρία, υπό εξέταση δείγματα πλακών από προηγούμενη εργασία του M. H. Abdulhussein [14], με κοινές διαστάσεις 1200 x 1200 x 100 mm οι οποίες αντιπροσωπεύουν μοντέλα σε κλίμακα 1/2 σε σχέση με ένα υφιστάμενο πολυώροφο κτήριο, Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Γεωμετρία των υπό εξέταση δειγμάτων και τυπικός οπλισμός [2]

Στο εξεταζόμενο δείγμα εμφανίζεται αρνητική ροπή κάμψης που περικλείεται από τις γραμμές που αντιστοιχούν σε σημεία με μηδενική κάμψη γύρω από ένα εσωτερικό υποστυλώμα. Επιπλέον, επεκτάθηκε ένα στέλεχος κεντρικού υποστυλώματος 150 x 150 mm από την θλιβόμενη επιφάνεια της πλάκας και ένας ορθογώνιος βραχίονας συνδέθηκε στην κορυφή του προκειμένου να προσομοιωθεί η μη μηδενική ροπή.

Η περίμετρος της πλάκας ήταν απλά στηριγμένη σε χαλύβδινες ράβδους διαμέτρου 25 χιλιοστών που στερεώθηκαν στην άνω ορθογώνια βάση χάλυβα ενός άκαμπτου χαλύβδινου πλαισίου. Όλα τα μοντελοποιημένα δοκίμια, τα οποία ενισχύθηκαν στην εφελκύμενη πλευρά της πλάκας είχαν αναλογία καμπτικής ενίσχυσης 2.24%.

Η πλάκα (S1-e75-CFRP) ενισχύθηκε προσθέτοντας ένα φύλλο ινών άνθρακα (1000X1000 mm) (CFRP), ενώ οι άλλες δύο πλάκες S3-e75-TRM1 και S4-e75-TRM2 ενισχύθηκαν χρησιμοποιώντας κονίαμα ενισχυμένο με ινοπλέγματα (TRM), με δύο διαφορετικά ανοίγματα πλέγματος 10 και 20 mm αντίστοιχα. Τα δείγματα που αναλύθηκαν χωρίστηκαν επίσης σε δύο ομάδες, συγκεκριμένα τις G1 και G2 με βάση την εκκεντρότητα 0 και 150 mm αντίστοιχα. Κάθε ομάδα συγκρίνει τρία ενισχυμένα δείγματα και ένα δείγμα ελέγχου (μη ενισχυμένο), συνολικά δηλαδή 8 δοκίμια όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Ομάδα	Ονομασία δοκιμίου	Εκκεντρότητα mm	Τύπος ενίσχυσης
G1	S2-e00-XX	0	Δοκίμιο ελέγχου (χωρίς ενίσχυση)
G1	S1-e00-CFRP	0	CFRP-φύλλο +εποξειδική ρητίνη
G1	S3-e00-TRM1b	0	ινόπλεγμα + δύο στρώσεις τσιμεντοκονίας.
G1	S4-e00-TRM2c	0	ινόπλεγμα + δύο στρώσεις τσιμεντοκονίας
G2	S5-e150-XX	150	Δοκίμιο ελέγχου (χωρίς ενίσχυση)
G2	S1-e150-CFRP	150	CFRP-φύλλο +εποξειδική ρητίνη
G2	S3-e150-TRM1	150	ινόπλεγμα + δύο στρώσεις τσιμεντοκονίας.
G2	S4-e150-TRM2	150	ινόπλεγμα + δύο στρώσεις τσιμεντοκονίας

Πίνακας 4. Περιγραφή και ομαδοποίηση υπό εξέταση δοκιμίων

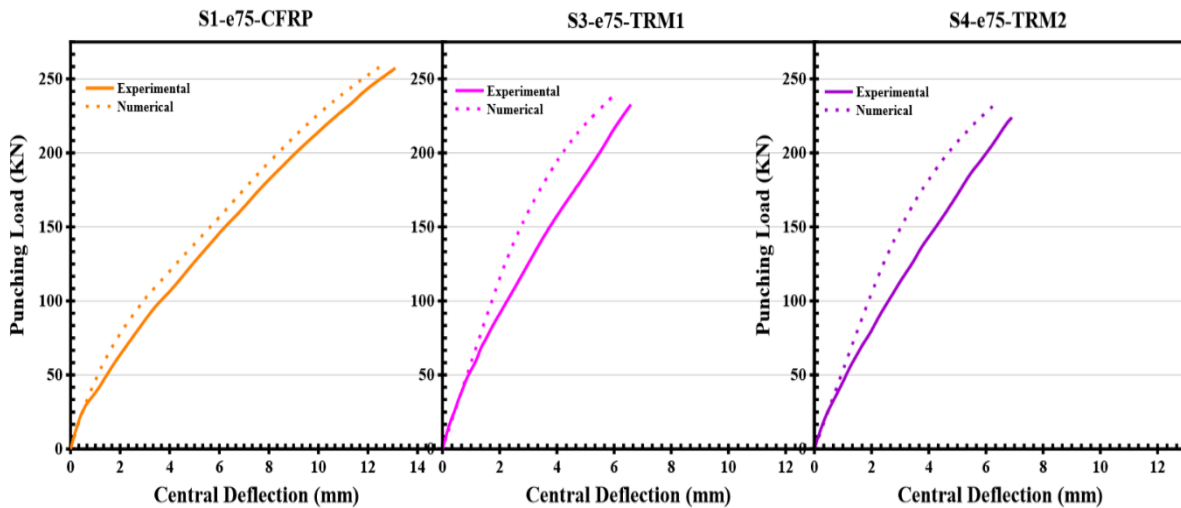
2.2.2 Μοντελοποίηση στοιχείων

- Η πλάκα σκυροδέματος, η κολώνα σκυροδέματος, ο οπλισμός και η πλάκα έδρασης σχεδιάστηκαν χωριστά και στη συνέχεια συναρμολογήθηκαν και συγχωνεύθηκαν για να σχηματίσουν τα δοκίμια. Για τον προσδιορισμό της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των Collins και Mitchell (1997) [20] μετά τη μετατροπή του διαγράμματος ονομαστικής τάσης-παραμόρφωσης.
- Οι απαιτούμενες παράμετροι εισόδου για τον προσδιορισμό των υλικών από χάλυβα, περιλαμβάνουν την πυκνότητα, την ελαστική και την πλαστική συμπεριφορά.
Οι τιμές εισόδου για την τάση σε κάθε σημείο για ισοτροπικό υλικό υπολογίζονται σύμφωνα με τους Hibbit κ.ά.(2011) [21]. Η χαλύβδινη ενίσχυση για την πλάκα και το υποστύλωμα προσομοιώθηκε σε στοιχείο "linear Truss" (T3D2) και συνδέθηκε με την ενσωματωμένη περιοχή που προσδιορίζει το περιβάλλον σκυρόδεμα. Καμπτική αντοχή χάλυβα 461 (MPa).
- Το TRM αντιπροσωπεύεται από ένα γραμμικό στοιχείο δοκού (T3D2) για το ινόπλεγμα και ένα προσομοιωμένο σαν συμπαγές στοιχείο με μειωμένη ενσωμάτωση για το κονίαμα (C3D8R). Για να μοντελοποιηθεί το ινόπλεγμα υπολογίστηκε μια ισοδύναμη διάμετρος για το υλικό και θεωρήθηκε ένα κυκλικό προφίλ. Το συστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση κονιάματος υιοθετήθηκε από τον Awani (2015) [22]. Επίσης δίνονται τα εξής χαρακτηριστικά: αντοχή εφελκυσμού των ινών 4,9 (GPa), μέτρο ελαστικότητας των ινών 230 (GPa), Ισοδύναμο πάχος ξηρής ίνας 0,4 (mm), Πλάτος ανά ίνα πλέγματος 4 (mm).

- Ένα μονής διεύθυνσης στρώμα CFRP μπορεί συνήθως να αντιμετωπιστεί ως ένα ορθοτροπικό υλικό δύο συστατικών (ρητίνη, ίνες) του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες σε μια διεύθυνση είναι διαφορετικές από εκείνες στις δύο ορθογώνιες διευθύνσεις. Το συνεκτικό μοντέλο που επιλέχθηκε στο ABAQUS[19] ορίζει τις επιφάνειες διαχωρισμού και καθορίζει την αλληλεπίδρασή τους περιγράφοντας μια αναλογική μετατόπιση σε κάθε σημείο επαφής. Παράμετροι όπως η δυσκαμψία, η διατμητική αντοχή, το όριο θραύσης και η καμπύλη του μοντέλου ολίσθησης, ως συνάρτηση των ιδιοτήτων του συνεκτικού υλικού και του σκυροδέματος προσδιορίζονται σύμφωνα με το Obaidat (2011) [24]. Τέλος δίνονται: εφελκυστική αντοχή 3.500 (Mpa), μέτρο διάτμησης G 2540 (Mpa), Πάχος φύλλου 1 (mm).

2.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης-πειράματος

Μια σύγκριση μεταξύ της προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων των δοκιμών έδειξε καλή εγκυρότητα της αριθμητικής ανάλυσης όπου το φορτίο διάτμησης των αναλυθέντων μοντέλων είναι μεγαλύτερο από τις πειραματικές τιμές με διαφορά μικρότερη από 2,91%. Το σχήμα 8 απεικονίζει την πειραματική και την μοντελοποιημένη καμπύλη διαγράμματος φορτίου μετατόπισης για τις τρεις ενισχυμένες πλάκες υπό φόρτιση με εκκεντρότητα 75 mm αυτή τη φορά καθώς αυτή ήταν η εκκεντρότητα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα που είχε προηγηθεί της αναλυθείσας δημοσίευσης. Παρόλα αυτά παρατηρούμε πολύ καλή συνάφεια μεταξύ αποτελεσμάτων πειράματος – αριθμητικής ανάλυσης με μεγέθη όπως το φορτίο διάτμησης και τη μετατόπιση σχεδόν να εφάπτονται στα αντίστοιχα διαγράμματα τόσο για τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με TRM όσο και για εκείνα με FRP, κάτι που υπογραμμίζει την δυνατότητα για την δημιουργία αρκετά έμπιστων μοντέλων ανάλυσης για προσομοίωση τέτοιων δοκιμών και αναλύσεων.



Σχήμα 8. Σύγκριση μεταξύ πειράματος - προσομοίωσης σε διαγράμματα φορτίου φορτίου-μετατόπισης [2]

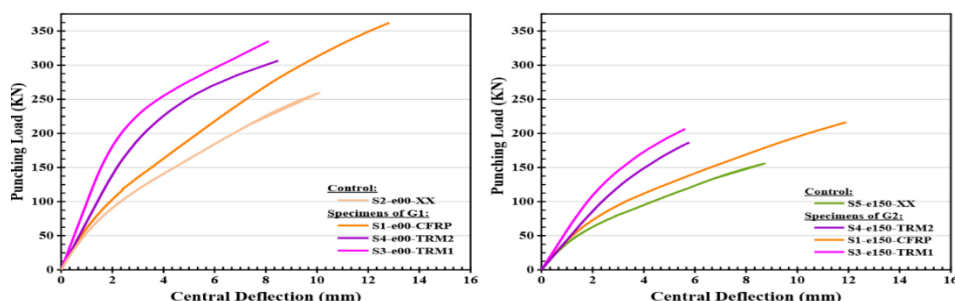
Ομάδα	Δοκίμιο	Μέγιστη μετατόπιση	Μέγιστο φορτίο	Δυσκαμψία προ θραύσης	Δυσκαμψία μετά θραύσης	Απώλεια δυσκαμψίας
		mm	kN	kN/mm	kN/mm	%
G1	S1-e00-CFRP	12.82	362.14	62.33	36.37	58
G1	S3-e00-TRM1	8.11	335.24	89.88	66.59	74
G1	S4-e00-TRM2	8.49	306.56	67.52	52.97	78
G1	S2-e00-XX	10.08	259.29	45.74	28.03	61
G2	S1-e150-CFRP	11.92	216.45	35.02	21.86	62
G2	S3-e150-TRM1	5.62	206.63	47.39	36.90	78
G2	S4-e150-TRM2	5.78	186.88	41.07	32.00	78
G2	S5-e150-XX	8.72	155.84	31.13	20.23	65

Πίνακας 5. Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης

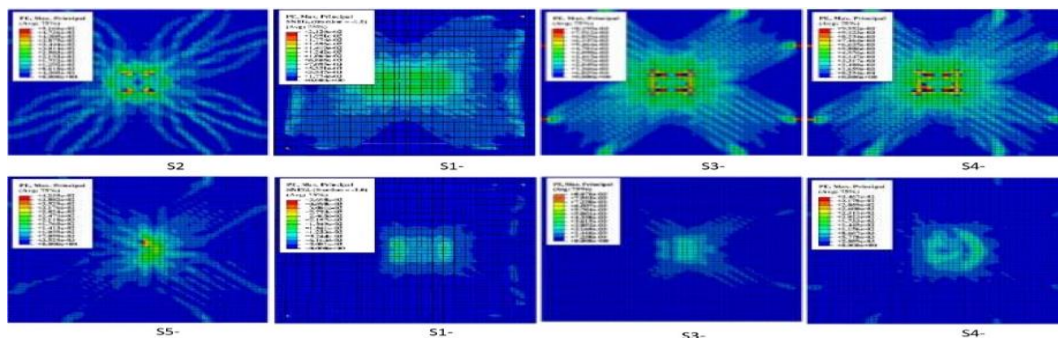
2.2.4 Συμπεράσματα αριθμητικής έρευνας

- Για δοκίμια υπό φόρτιση μηδενικής εκκεντρότητας ,η ενίσχυση των πλακών με την τοποθέτηση φύλλου CFRP στην εφελκόμενη επιφάνεια της πλάκας μείωσε την μετατόπιση στο φορτίο αστοχίας του δείγματος ελέγχου κατά 24,70%. Επίσης η ικανότητα ανάληψης φορτίου και η μετατόπιση στο φορτίο διαρροής αυξήθηκαν κατά 39,67% και 27,18% αντίστοιχα. Η ενίσχυση πλάκας με TRM οδήγησε σε μείωση της μετατόπιση, στο φορτίο διαρροής και στο φορτίο αστοχίας αντίστοιχα, σε σύγκριση με το δείγμα ελέγχου κατά 17,65 και 53,07% κατά μέσο όρο, αντίστοιχα. Ωστόσο, το μέγιστο φορτίο πριν την αστοχία σε διάτρηση βελτιώθηκε κατά 23,78%.
- Επιπλέον, η απόδοση του TRM εξαρτάται από το μέγεθος των ανοιγμάτων του πλέγματος. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση ιών άνθρακα με ανοίγματα 10 mm αύξησε την αντοχή διάτρησης κατά 29,29% σε σύγκριση με το δείγμα αναφοράς.
- Για δοκίμια υπό φόρτιση εκκεντρότητας 150 mm συμπεραίνουμε ότι η προσθήκη φύλλου CFRP στην εφελκόμενη επιφάνεια της πλάκας αύξησε την ικανότητα ανάληψης φορτίου και την μετατόπιση στο σημείο διαρροής κατά 38.90% και 36.70% αντίστοιχα, σε σύγκριση με το δείγμα ελέγχου . Από την άλλη, η ενίσχυση με TRM επηρεάστηκε ελαφρά από το μέγεθος των ανοιγμάτων του πλέγματος. Παρατηρήθηκε ότι η χρήση πλεγμάτων με ανοίγματα 10 είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής διάτρησης των δειγμάτων κατά 38,90% και την μείωση της τελικής κεντρικής μετατόπισης κατά περίπου 35,55%.
- Από τα παραπάνω φαίνεται πως, η αποτελεσματικότητα της χρήσης του συστήματος ενίσχυσης TRM στην αύξηση της αντοχής σε διάτρηση των ενισχυμένων πλακών ήταν μικρότερη από εκείνη του συστήματος CFRP.
- Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η χρήση του CFRP και του TRM αύξησε την αρχική και τη δευτερεύουσα δυσκαμψία σε σύγκριση με τα δείγματα ελέγχου, με την μέγιστη αύξηση της, προ και μετά της δημιουργίας ρωγμών, να φτάνει περίπου στα 96,49 και 137,56%, αντίστοιχα, για τα δοκίμια με την μηδενική εκκεντρότητα και περίπου 52,24 και 82,41%, αντίστοιχα, για έκκεντρα φορτισμένα δοκίμια. Εκείνα που ενισχύθηκαν με TRM έδειξαν μεγαλύτερη βελτίωση στη δυσκαμψία η οποία ελαττώθηκε με την μείωση των ανοιγμάτων του πλέγματος.

- Τα δοκίμια με μηδενική εκκεντρότητα υπερτερούν με διαφορές σε τάξεις μεγέθους των 27,9% και 35,86% στην αύξηση της αρχικής και δευτερεύουσας δυσκαμψίας αντίστοιχα. Αποδείχθηκε ότι την μεγαλύτερη βελτίωση στη δυσκαμψία των TRM είχε η εφαρμογή ανοιγμάτων πλέγματος 10 mm επί της εφελκόμενης επιφάνειας της πλάκας.
- Οι ρωγμές στην ανάλυση εξαπλώνονται μέσα στην πλάκα κοντά στο υποστύλωμα. Ξεκινούν εφαπτομενικά κοντά σε αυτό και έτσι επεκτείνονται ακτινικά όσο αυξάνεται το φορτίο. Η διάδοση των ρωγμών των δοκιμίων που ενισχύθηκαν από CFRP ήταν εντός της διεύθυνσης κατανομής των ινών, ενώ οι ρωγμές για πλάκες ενισχυμένες με TRM ήταν παρόμοιες με αυτές των δειγμάτων ελέγχου, με την διαφορά ότι διαδόθηκαν σε διαφορετικές κατευθύνσεις προς τα άκρα. Επιπλέον, η παρουσία εκκεντρότητας του εφαρμοζόμενου φορτίου είχε ως αποτέλεσμα την εκτεταμένη καταστροφή της εφελκόμενης επιφάνειας της πλάκας. Ενώ τα σχέδια ρωγμών του δείγματος που δοκιμάστηκε με ομόκεντρο φορτίο ήταν περίπου συμμετρικά γύρω από τους δύο άξονες.



Σχήμα 9. Διαγράμματα φόρτισης-μετατόπισης (αριστερά: έκκεντρη, δεξιά: μηδενική εκκεντρότητα) [2]



Σχήμα 10. Προφίλ ρωγμών (άνω: μηδενική εκκεντρότητα φόρτισης, κάτω : έκκεντρη φόρτιση) [2]

2.2.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων 1^{ης} και 2^{ης} πειραματικής μελέτης

Παρότι γνωρίζουμε ότι οι δύο δημοσιεύσεις παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές τόσο στα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη δοκιμίων όσο και στον τύπο και την διεκπεραίωση της διαδικασίας ελέγχου, βρίσκουμε σκόπιμη μία σύγκριση των αποτελεσμάτων τους σε μια βάση πιο γενική, πάνω στην συμπεριφορά των δύο υλικών ενίσχυσης κοιτώντας αν εν τέλει επιτεύχθηκε η καλή αρχή της λειτουργίας τους, αλλά και ως προς τις ομοιότητες και τις διαφορές ενός πραγματικού πειράματος με εκείνο που μοντελοποιήθηκε σε πρόγραμμα H/Y. Μπορούμε λοιπόν να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

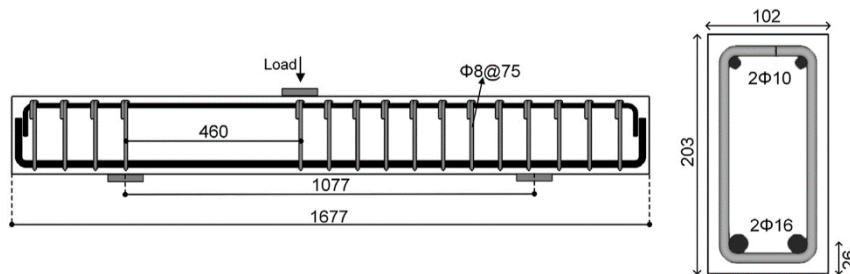
- Στην 1^η πειραματική μελέτη παρατηρήθηκε αύξηση της ικανότητας ανάληψης φορτίου της τάξεως 275,5% για την ενίσχυση με CFRP και 135,7% για δοκίμια που ενισχύθηκαν με TRM, ποσοστά πολλών τάξεων μεγέθους παραπάνω σε σύγκριση με αυτά της 2^{ης} δημοσίευσης (39,67% και 23,78% αντίστοιχα). Αυτή η ασυμβατότητα πιθανώς να εξηγείται τόσο από τις διαφορές στις αναλογίες των εφαρμοζόμενων υλικών ενίσχυσης μεταξύ τους, όσο και από το τύπο εφαρμογής του φορτίου στις πλάκες. Παρότι λοιπόν συμφωνούν ότι τα σύνθετα υλικά αυξάνουν την ικανότητα ανάληψης φορτίου, υπάρχει μεγάλη διαβάθμιση στο μέγεθος αυτής της λειτουργίας
- Και στα δύο πειράματα οι πλάκες που ενισχύθηκαν με CFRP παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερη ικανότητα ανάληψης φορτίου και δυσκαμψία, επιδεικνύοντας την υπεροχή τους σε σχέση με τα TRM στην ενίσχυση κατά της διάτρησης σε πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος.
- Οι δύο δημοσιεύσεις διαφωνούν στην αύξηση της δυσκαμψίας που παρουσιάζουν οι ενισχυμένες πλάκες TRM σχετικά με τον δοκίμιο ελέγχου, καθώς στην αριθμητική ανάλυση του μοντέλου φαίνεται ότι τα TRM οδήγησαν στην μεγαλύτερη αύξηση της δυσκαμψίας των δοκιμίων σε αντίθεση με την πειραματική μελέτη που δίνει προβάδισμα στις πλάκες που ενισχύθηκαν με CFRP, κάτι μπορεί να έγκειται στην χρήση δύο ινοπλεγμάτων από το πείραμα σε σχέση με το μονό ινόπλεγμα ενίσχυσης στο μοντέλο που προσομοιώθηκε σε πρόγραμμα.
- Αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι δύο διαφορετικές καμπύλες των διαγραμμάτων φόρτισης-μετατόπισης των δύο δημοσιεύσεων , όπου παρατηρούμε πως στην πειραματική μελέτη η καμπύλη σχηματίζει 2 αιχμές που αντιπροσωπεύουν την αρχική ανάπτυξη φορτίου πριν και μετά την αστοχία της εξωτερικής επιφάνειας σκυροδέματος. Από την άλλη το πείραμα μέσω μοντελοποίησης φαίνεται να αγνοεί μία τέτοια δράση των υπό φόρτιση δοκιμίων καθώς η φόρτιση αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι το σημείο αστοχίας του υλικού. Μια πιθανή εξήγηση μπορεί να είναι η διαφορετική παραμετροποίηση των σημείων αστοχίας στο μοντέλο προσομοίωσης , καθώς η ίδια η προσομοίωση των υλικών που απαρτίζουν την πλάκα ή ακόμα και μέχρι ποιο σημείο παραμόρφωσης μπορεί να προσομοιώσει το δοθέν μοντέλο στο πρόγραμμα ABAQUS.
- Και οι δύο μελέτες, αν και με κάποιες διαφορές στα μεγέθη, έδειξαν αύξηση σε σχέση με τα δοκίμια ελέγχου της απορρόφησης ενέργειας τόσο των πλακών που ενισχύθηκαν με CFRP, που υπερερεύσαν και στις δύο δημοσιεύσεις ,όσο και αυτών που ενισχύθηκαν με TRM.
- Τέλος και οι δύο δημοσιεύσεις έδωσαν αρκετά υποσχόμενα επίπεδα εγκυρότητας όπου το φορτίο διάτρησης των αναλυθέντων μοντέλων είναι μεγαλύτερο από τις πειραματικές τιμές με διαφορά μικρότερη από 2,91% για την δεύτερη δημοσίευση που αναλύουμε, ενώ στην πρώτη μια αντίστοιχη σύγκριση πειράματος-μοντέλου και πειράματος-ACI 318 [11] έδωσε τιμές 1.99 και 0.90 αντιστοίχως.

2.3 Δοκιμής διάτρησης δοκών (3^η πειραματική μελέτη) – Σύγκριση με ΚΑΝ.ΕΠΕ.(2017)

2.3.1 Περιγραφή του πειράματος : Παρακάτω γίνεται μια ανασκόπηση της δημοσίευσης [7] η οποία παρουσιάζει μια μελέτη σχετικά με τις επιδόσεις των υλικών ενίσχυσης TRM και FRP σε διατμητική ενίσχυση των δοκών ,μελετώντας δοκούς ορθογωνικής διατομής μέσης κλίμακας αλλά και δοκούς πλήρης διατομής τύπου T. Βασικές παράμετροι που ερευνήθηκαν στις ορθογωνικές διατομές περιλαμβάνουν: (α) αυτό καθαυτό το συστήματα ενίσχυσης (TRM ή FRP), (β) το επίπεδο της θερμοκρασίας στο οποίο υπόκεινται τα δείγματα (20 °C, 100 °C, 150 °C, 250 °C), (δ) ο αριθμός των στρωμάτων ενίσχυσης, (γ) ο τύπος της επικάλυψης ενίσχυσης (πλευρική συγκόλληση, U-περιτύλιξη και πλήρης περιτύλιξη) και ε) τις ιδιότητες του

υφάσματος (γεωμετρία, υλικό). Εξετάστηκε επίσης η αποτελεσματικότητα αγκυρωμένων και μη, μανδυνών TRM στην ενίσχυση διάτμησης πλήρους κλίμακας δοκών τύπου T σε υψηλή θερμοκρασία.

- **Σειρά Α :** Το πειραματικό πρόγραμμα της Σειράς Α περιλάμβανε 28 δοκίμια που πραγματοποιήθηκαν σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής μέσης κλίμακας απλά υποστηριζόμενες σε ασύμμετρη κάμψη τριών σημείων. Δεκαέξι δείγματα δοκιμάστηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες (100 ° C, 150 ° C και 250 ° C), ενώ τα υπόλοιπα δώδεκα δείγματα δοκιμάστηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το συνολικό μήκος των δοκών ήταν ίσο με 1677 mm, ενώ το ενεργό μήκος κάμψης ήταν ίσο με 1077 mm (Σχήμα 6), παρέχοντας επαρκές μήκος αγκύρωσης στο διαμήκη οπλισμό. Οι στηρίξεις απείχαν 1077 mm (αυτό ήταν και το μήκος στο οποίο τοποθετήθηκε η ενίσχυση) και εφαρμόστηκε αξονικό φορτίο σε απόσταση 460 mm από την μία στήριξη, παράλληλα στη διεύθυνση του ύψους τους (Σχήμα 11).

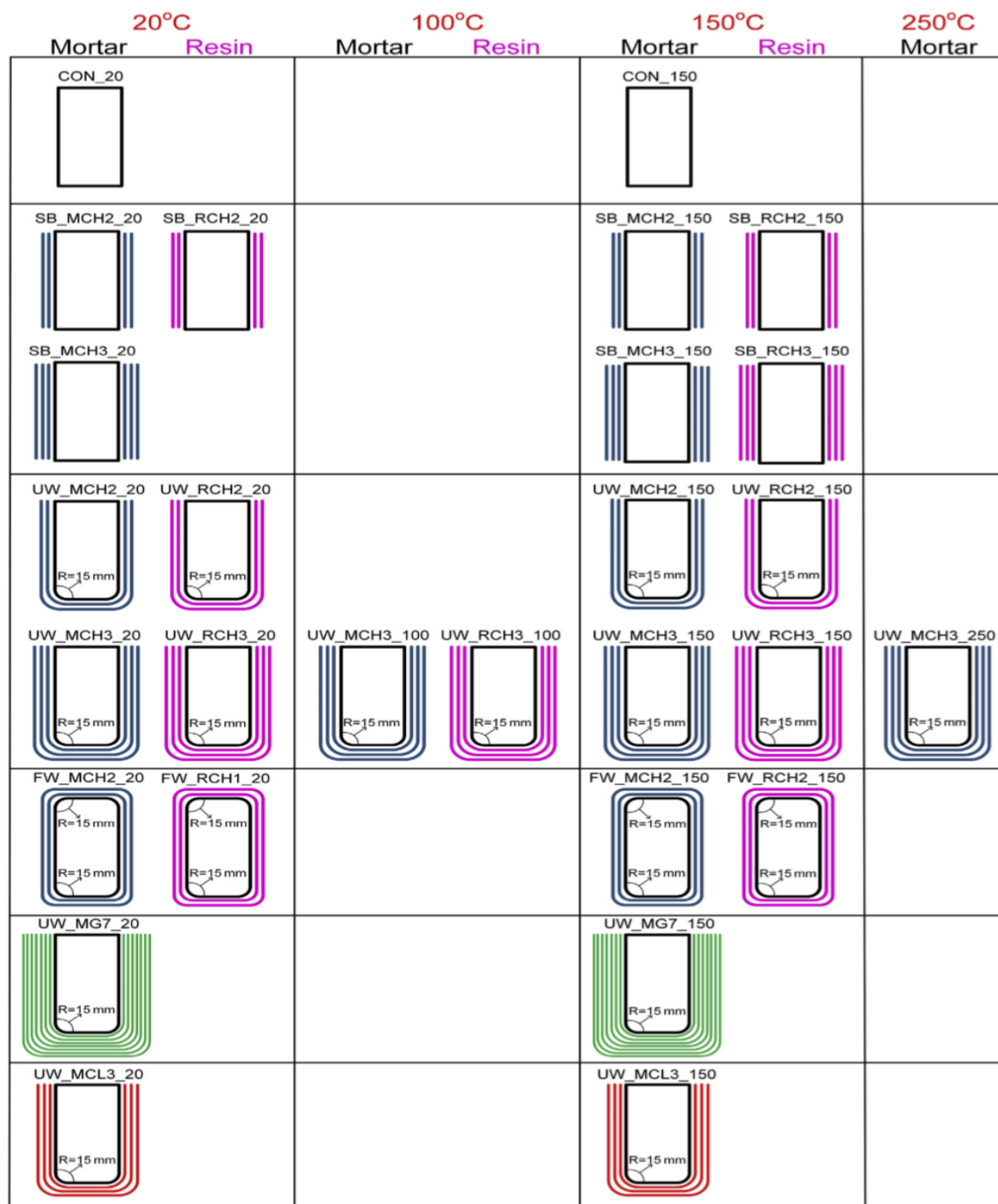


Σχήμα 11. Δοκοί ορθογωνικής διατομής: α) Γεωμετρία και οπλισμός δοκών. β) διατομή (διαστάσεις σε mm) [7]

Πρέπει να σημειωθεί, ότι δεν ήταν τυχαία η θέση εφαρμογής του αξονικού φορτίου, καθώς προκειμένου να προσομοιωθούν τα δοκίμια με δοκούς χαμηλής διατμητικής αντοχής, δεν τοποθετήθηκε περισφιγξη σε μήκος 460 mm από το αριστερό άκρο στήριξης. Το μήκος αυτό, αντιπροσωπεύει τη μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μηδενισμών της ροπής. Στα υπόλοιπα τμήματα της δοκού τοποθετήθηκε εγκάρσιος οπλισμός Φ8 ανά 75 mm, ενώ ο διαμήκης οπλισμός ήταν συνεχής και αποτελείτο από 2 ράβδους Φ16 στην εφελκυσόμενη ζώνη και 2 ράβδους Φ10 στην θλιβόμενη ζώνη. Τα δοκίμια είναι σχεδιασμένα να αστοχούν λόγω διάτμησης, καθώς η διατμητική δύναμη που απαιτείται προκειμένου να φτάσουν οι δοκοί την καμπτική τους αντοχή, είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την διατμητική αντοχή τους.

Δύο δοκοί δοκιμάστηκαν χωρίς να λαμβάνουν ενίσχυση και αντιπροσωπεύουν δείγματα ελέγχου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (CON_20) και στους 150 ° C (CON_150).

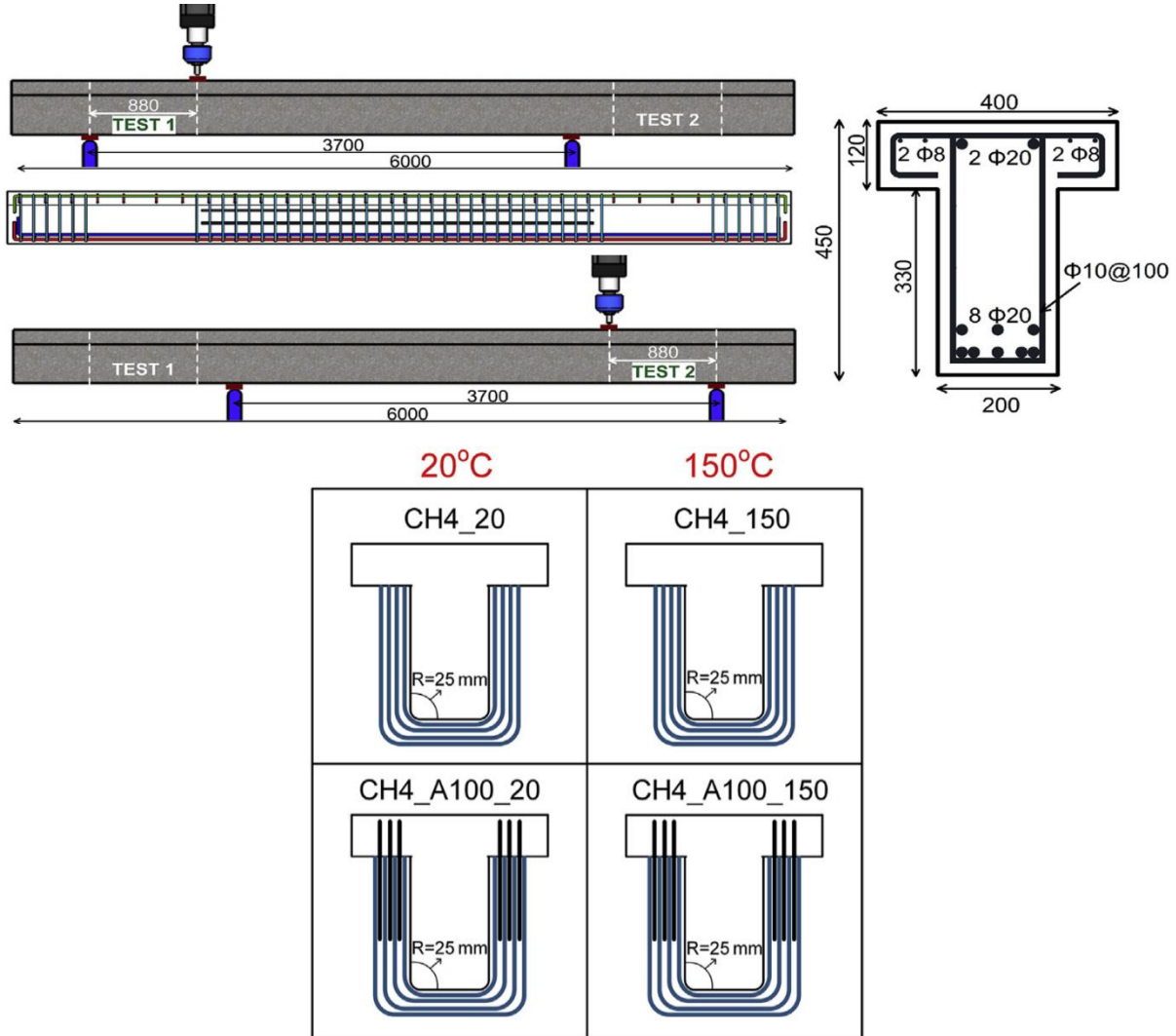
Η ονομασία των ενισχυμένων δειγμάτων είναι X_YMN_T, όπου το X αναφέρεται στην ενισχυτική διαμόρφωση, δηλαδή το SB για την πλευρική συγκόλληση, το UW για την U-wrapping και το FW για την πλήρη περιτύλιξη, το Y δηλώνει το υλικό μήτρας, δηλαδή M για το Mortar (TRM) και R για ρητίνη (FRP), το M δηλώνει τον τύπο του υφάσματος (CL για ελαφρύ άνθρακα, CH για βαρή άνθρακα και G για γυαλί), το N δηλώνει τον αριθμό των στρωμάτων (1, 2, 3 ή 7) και το T δηλώνει τη θερμοκρασία στην οποία τα δείγματα εκτέθηκαν κατά τη δοκιμή (20 ° C, 100 ° C, 150 ° C ή 250 ° C).



Σχήμα 12. Διαμόρφωση ενίσχυσης δοκιμίων [7]

- Σειρά Β :** Πέντε πλάκες πλήρους κλίμακας T εξετάστηκαν σε κάμψη τριών σημείων. Το συνολικό μήκος των δοκών T ήταν ίσο με 6000 mm, ενώ το η ενεργός απόσταση διάτμησης ήταν ίση με 3700 mm. Οι πλακοδοκοί T σχεδιάστηκαν με την ίδια λογική που περιγράφεται παραπάνω όσον αφορά τις συνθήκες διάτμησης. Οκτώ ράβδοι διαμέτρου 20 mm και δύο παραμορφωμένες διαμέτρου 20 mm τοποθετήθηκαν στη ζώνη εφελκυσμού και θλίψης των πλακοδοκών, αντιστοίχως, και τέσσερις παραμορφωμένες ράβδοι διαμέτρου 8 mm τοποθετήθηκαν επιπρόσθετα στα πέλατα.

Μία δοκός εξετάστηκε ως δείγμα αναφοράς σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (CON), ενώ τέσσερα δείγματα ενισχύθηκαν με μανδύα TRM. Η ονομασία των δοκιμών είναι XN_AP_T, όπου το X υποδηλώνει τον τύπο του υφάσματος (CH για τον βαρέα άνθρακα), το N δηλώνει τον αριθμό των στρωμάτων και το T δηλώνει τη θερμοκρασία στην οποία εκτέθηκαν τα δείγματα κατά τη διάρκεια της δοκιμής (20 °C, 150 °C). Το AP αναφέρεται σε δοκίμια με αγκύρωση με το A να δείχνει την ύπαρξή της και το P να αναφέρεται στο ποσοστό αγκύρωσης των TRM (100%).



Σχήμα 13. Δοκοί ορθογωνικής διατομής: α) Γεωμετρία και οπλισμός δοκών. β) διατομή (διαστάσεις σε mm) [7]

Υλικά και διαδικασία ενίσχυσης: Οι δοκοί ορθογωνικής διατομής σκυροδετήθηκαν σε ομάδες των τεσσάρων χρησιμοποιώντας το ίδιο σχέδιο μετόν ενώ τα δοκίμια πλήρους κλίμακας T σε μία παρτίδα έτοιμου σκυροδέματος. Η αντοχή θραύσης και εφελκυσμού σκυροδέματος λήφθηκε πειραματικά την ημέρα της δοκιμής με τη διεξαγωγή πρότυπων δοκιμών σε κυλίνδρους διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές ενισχύσεις από υφάσματα με ίσες ποσότητες ινών σε δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις, δύο υφάσματα από ίνες άνθρακα (ελαφριά και βαριά) και ένα από ίνες υάλου.

Για τα δοκίμια με TRM, χρησιμοποιήθηκε ένα ανόργανο ξηρό συνδετικό υλικό που αποτελείται από τσιμέντο και πολυμερή σε αναλογία 8: 1 κατά βάρος. Ο λόγος ύδατος-συνδετικού υλικού στο κονίαμα ήταν 0,23 : 1 κατά βάρος, καταλήγοντας σε πλαστική συνοχή και καλή εργασιμότητα. Οι ιδιότητες αντοχής του κονιάματος (μέσες τιμές 3 δειγμάτων), λήφθηκαν πειραματικά την ημέρα της δοκιμής χρησιμοποιώντας πρίσματα διαστάσεων 40x40x160 mm, σύμφωνα με το EN 1015-11 [8], σε διάφορα επίπεδα θερμοκρασίας (20 ° C, 100 ° C, 150 ° C ή 250 ° C). Για το την δημιουργία του υλικού FRP, χρησιμοποιήθηκε εμπορική εποξική ρητίνη με μέτρο ελαστικότητας 3,8 GPa και αντοχή εφελκυσμού 30 MPa, ενώ η θερμοκρασία μετάπτωσης Tg ήταν ίση με 68 ° C (σύμφωνα με τα δελτία δεδομένων του κατασκευαστή).

Για τα δοκίμια με FRP, το πρώτο υφασμάτινο στρώμα εφαρμόστηκε στην κορυφή της πρώτης στρώσης ρητίνης και κατόπιν εμποτίστηκε επί τόπου με ρητίνη χρησιμοποιώντας πλαστικό κύλινδρο. Για τα δείγματα με επένδυση TRM το κονίαμα εφαρμόστηκε σε στρώσεις πάχους περίπου 2 mm με λεία μεταλλική σπάτουλα. Μετά την εφαρμογή του πρώτου στρώματος κονιάματος πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος, το ύφασμα εφαρμόστηκε και πιέστηκε ελαφρά μέσα στο κονίαμα, το οποίο προεξέχει διαμέσου όλων των ανοιγμάτων του πλέγματος. Η επόμενη στρώση κονιάματος κάλυψε πλήρως το ινόπλεγμα και η λειτουργία επαναλήφθηκε μέχρις ότου εφαρμόστηκαν όλα τα στρώματα. Βασική σημασία σε αυτή τη μέθοδο, όπως στην περίπτωση των εποξειδικών ρητινών, ήταν η εφαρμογή κάθε στρώματος κονιάματος ενώ το προηγούμενο ήταν ακόμα φρέσκο.

Το σύστημα αγκύρωσης των δειγμάτων CH4_A100_20 και CH4_A100_150 αποτελείται από αγκύρια με βάση πλέγματα ινών. Το κοχλιωτό τμήμα της αγκύρωσης χρησιμεύει για την τοποθέτησή της στις οπές και την αγκύρωση στην πλακοδοκό. Μια εποξειδική ρητίνη με αντοχή σε εφελκυσμό, μέτρο ελαστικότητας και Tg ίση με 72,4 MPa, 3,2 MPa και 82 ° C (σύμφωνα με τα δελτία δεδομένων του κατασκευαστή), αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε για τον εμποτισμό των αγκυρίων και για τη στερέωση των οπών στις οποίες τοποθετήθηκαν τα αγκύρια. Δεκαπέντε αγκυρώσεις εφαρμόστηκαν σε κάθε πλευρά του άκρου της πλακοδοκού, παρέχοντας την πλήρη αγκύρωση των τεσσάρων στρώσεων TRM βαρέως άνθρακα. Πέντε τοποθετήθηκαν σε κάθε μια από τις τρεις διασυνδέσεις μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων TRM.

- **Μορφές αστοχίας δοκών ορθογωνικής διατομής**

Μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών, διαπιστώθηκε ο τρόπος αστοχίας κάθε δοκιμίου. Το δοκίμιο ελέγχου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και σε θερμοκρασία 150 βαθμών Κελσίου απέτυχε στη διάτμηση μετά τον σχηματισμό μιας μεγάλης ρωγμής διάτμησης στο κρίσιμο εύρος. Συγκεκριμένα, όλα τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με FRP και ελέγχθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αστόχησαν διατμητικά με αποκόλλησή τους από την επιφάνεια των δοκών, εκτός του FW_R1 στο οποίο εκδηλώθηκε καμπτική αστοχία με θραύση του σκυροδέματος εκτός της ενισχυμένης περιοχής. Όλα τα δοκίμια με επένδυση FRP που δοκιμάστηκαν σε 150 °C απέτυχαν στη διάτμηση σε τελικά φορτία δραματικά χαμηλότερα από τα αντίστοιχα που δοκιμάστηκαν στους 20 ° C. Σε όλα αυτά τα δείγματα παρατηρήθηκε αστοχία στην συγκόλληση, στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-ρητίνης. Ειδικότερα, ο μανδύας FRP αποκολλήθηκε από τη διεπιφάνεια σκυροδέματος χωρίς να ξεκολλήσει μέρος του σκυροδέματος λόγω της κακής συμπεριφοράς δεσμού εποξειδικής ρητίνης σε θερμοκρασία πάνω από την Tg.

Το πλήρως τυλιγμένο δείγμα FW_RCH2_150, όπως και τα περισσότερα δοκίμια σε θερμοκρασία 150°C, αστόχησε λόγω ολίσθησης των κατακόρυφων ινών μέσω της ρητίνης (η οποία αποσυντέθηκε πλήρως λόγω της υψηλής θερμοκρασίας) σε συνδυασμό με την αποκόλληση της τελευταίας υφαντικής στρώσης που χρησιμοποιείται για την επικάλυψη στην κορυφή της δοκού. Τα δοκίμια με ενίσχυση από μανδύες TRM σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αστόχησαν διατμητικά με θραύση των ινών ή αποκόλληση του μανδύα (ανάλογα με το πλήθος των στρώσεων) εκτός από το δοκίμιο FW_MCH2_20 στο οποίο εκδηλώθηκε καμπτική αστοχία με θραύση του σκυροδέματος εκτός της ενισχυμένης περιοχής. Η συμπεριφορά των δοκιμίων με ενίσχυση TRM σε υψηλές θερμοκρασίες υπερτερεί σημαντικά από αυτή των δοκιμίων με ενίσχυση FRP. Αυτά αστόχησαν διατμητικά με μερική θραύση των ινών στο κονίαμα ή στη ρωγμή της διατμητικής αστοχίας, εκτός από εκείνα με πάνω από 2 στρώσεις τα οποία αστόχησαν με αποκόλληση του μανδύα και μέρους του σκυροδέματος επιδεικνύοντας τον πολύ καλό δεσμό μεταξύ τους ακόμα και σε θερμοκρασίες 150°C. Αυτό μας δείχνει και την σημασία των στρώσεων του ενισχυτικού υλικού TRM στην συμπεριφορά του σε υψηλές θερμοκρασίες η οποία φαίνεται να είναι σημαντικά καλύτερη από τις 3 στρώσεις και μετά.

- **Μορφές αστοχίας πλακοδοκών**

Τα δοκίμια των πλακοδοκών που ενισχύθηκαν με TRM αστόχησαν λόγω αποκόλλησης του μανδύα της ενίσχυσης και μέρους του υποστρώματος σκυροδέματος κατά κύριο λόγο εκτός εκείνων που είχαν αγκυρώσεις τα οποία αστόχησαν με αποκόλληση των αγκυρίων λόγω της ρηγματώσης των πελμάτων των πλακοδοκών. Το ίδιο συνέβη και στις πλακοδοκούς που ελέγχθηκαν σε θερμοκρασίες 150°C με την διαφορά ότι το δοκίμιο με τις αγκυρώσεις, παρότι πάλι αστόχησε λόγω της θραύσης των αγκυρίων, η θραύση αυτή οφείλονταν τώρα στην ρευστοποίηση της εποξειδικής ρητίνης σε θερμοκρασία 128°C που χρησιμοποιήθηκε για να γεμίσει της τρύπες που σταθεροποιούνταν τα αγκύρια. Προς επαλήθευση των παραπάνω αποτελεσμάτων, η ενίσχυση των πλακοδοκών με TRM έδειξε πολύ σημαντική βελτίωση στην συμπεριφορά σε διάτμηση των δοκιμίων σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση τόσο με το δοκίμιο ελέγχου όσο και με τις αντίστοιχες ενισχύσεις με FRP.

Τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Οι μανδύες TRM, διαπιστώθηκε ότι είναι λιγότερο αποτελεσματικοί σε σχέση με τους FRP, αλλά η αποτελεσματικότητά τους καθορίζεται από τον τρόπο τοποθέτησης του μανδύα και τον αριθμό των στρώσεων. Συγκεκριμένα, ο λόγος αποτελεσματικότητας TRM/FRP κυμαίνεται από 0,09 για μία στρώση μανδύα πλευρικά τοποθετημένου, έως 0,92 για δύο στρώσεις μανδύα U.
- Το TRM είναι πολύ πιο αποτελεσματικό στην διατμητική ενίσχυση των δοκών οπλισμένου σκυροδέματος που υποβάλλονται σε υψηλή θερμοκρασία από την χρήση των FRP.
- Η ενισχυτική διαμόρφωση επηρεάζει σημαντικά την αύξηση της διατμητικής ικανότητας τόσο για τους μανδύες TRM όσο και για τα FRP σε υψηλή θερμοκρασία. Ειδικότερα, η πλήρης περιτύλιξη (FW) είναι η πιο αποτελεσματική, ακολουθεί η U-περιτύλιξη (UW), ενώ η πλευρική συγκόλληση (SB) είναι η λιγότερο αποτελεσματική.
- Ο τρόπος αστοχίας των δοκών με πλευρική και τύπου U ενίσχυση με TRM που έχουν υποστεί δοκιμές σε υψηλή θερμοκρασία αλλάζει για διαφορετικό αριθμό στρώσεων.

Αυξάνοντάς τα από 2 σε 3, αποφεύχθηκε η αστοχία του TRM και μεταφέρθηκε στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Από την άλλη, η αύξηση του αριθμού των στρώσεων δεν έχει καμία επίδραση στην αύξηση της διατμητικής ικανότητας ούτε στη μορφή αστοχίας των ενισχύσεων με FRP.

- Η αποτελεσματικότητα των μανδύων FRP μειώθηκε δραματικά με την αύξηση της θερμοκρασίας από 100 °C σε 150 °C. Από την άλλη πλευρά, η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM επηρεάζεται ελάχιστα από την έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή από 100 °C έως 150 °C και 250 °C, αντίστοιχα.
- Για ενισχυμένα μέλη TRM που δοκιμάζονται σε υψηλή θερμοκρασία, η πυκνότερη γεωμετρία του υφάσματος άνθρακα είναι πιο αποτελεσματική στη διατμητική ενίσχυση των μελών σκυροδέματος.
- Οι μανδύες TRM, με ή χωρίς αγκύρωση που εφαρμόστηκαν με μορφή U, σε πλακοδοκούς τύπου T παρέμειναν πολύ αποτελεσματικοί σε υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας. Η αύξηση της διατμητικής ικανότητας του μη αγκυρωμένου μανδύα TRM μειώθηκε κατά 30,5% λόγω της έκθεσής του στους 150 °C, ενώ ο τρόπος αποτυχίας δεν επηρεάστηκε. Η χρήση αγκυρίων αύξησε την αποτελεσματικότητα του μανδύα TRM κατά 80%, παρά την αποκόλλησή τους λόγω της ρευστοποίησης του συγκολλητικού δεσμού που προκλήθηκε από την υψηλή θερμοκρασία.

2.3.2 Εφαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ.(2017)[13]

Επιλέχθηκαν λοιπόν 5 δοκίμια από την πειραματική διάταξη, τα οποία εξετάζονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μέσω εφαρμογής του ΚΑΝ.ΕΠΕ(2017) [13] ως προς την ανάπτυξη διατμητικής αντοχής μετά την ενίσχυση με FRP αλλά και ως προς τη μορφή αστοχίας τους, τα οποία στην συνέχεια συγκρίνονται με εκείνα της πειραματικής διαδικασίας.

Από τα πειραματικά δεδομένα χρειαστήκαμε τιμές για την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ.(2017) [13] που αφορούν:

- Τις διαστάσεις διατομής δοκών (bw,hw)
- Τις τάσεις διαρροής των διαμήκων ράβδων οπλισμού (fsy)
- Τις θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος των δοκιμίων (fcm)
- Τον αριθμό των στρώσεων του υλικού ενίσχυσης (n)
- Τα πάχη των υλικών ενίσχυσης (tj)
- Τη μέθοδο ενίσχυσης (κλειστή ή ανοικτή)
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης (Ej)
- Την παραμόρφωση αστοχίας του υλικού ενίσχυσης (εju)
- Την χαρακτηριστική αντοχή του υλικού ενίσχυσης (fjk)

Το ζητούμενο είναι η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά η οποία ορίζεται ως το άθροισμα των τεμνουσών που αναλαμβάνει το ενισχυτικό υλικό, το σκυρόδεμα και οι συνδετήρες

Για την εύρεση της τέμνουσας αντοχής έγινε χρήση των σχέσεων που διατίθενται στο Κανονισμό επεμβάσεων 2017 Κεφάλαιο 8 (§8.2.2.2) [13]

$$V_{tot} = V_{jd} + V_{Rd,s} (+ V_{Rd,c}) *$$

* (τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα στο διατμητικά άοπλο μέρος της δοκού)

Όπου V_{jd} : τέμνουσα που αναλαμβάνει το ενισχυτικό υλικό,

$VR_{d,c}$: συνεισφορά σκυροδέματος,

$VR_{d,s}$: συνεισφορά συνδετήρων

Στη συνέχεια, γίνεται υπολογισμός της :
$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b w \frac{2d}{3} (\cot \alpha + \sin \alpha) \sin^2 \alpha$$
 σχ.8.9
(KAN.ΕΠΕ 2017)

Εν συνεχεία, ανάλογα με το είδος της ενίσχυσης ανοικτή ή κλειστή επιλέγουμε να εξετάσουμε το ενδεχόμενο αστοχίας από αποκόλληση και αστοχίας λόγω θραύσης ινών αντίστοιχα.

Κλειστή Ενίσχυση (μανδύες ή ζώνες από φύλλα που καλύπτουν όλη την περίμετρο της διατομής που ενισχύουν):

Με γνωστά τα: ϵ_{ju} και E_j από τα δεδομένα του πειράματος, υπολογίσαμε την αντοχή ως εξής:
 $f_{jk} = E_j \epsilon_{jcrit}$

Όπου $\epsilon_{jcrit} = k_n \epsilon_{jmax}$ με $k_n = 0.5$, ενώ $\epsilon_{j,max} = \epsilon_{ju} \psi < 1.5\%$, ορίζοντας ως μειωτικό συντελεστή πολλών στρώσεων, $\psi = \kappa^{-1/4}$ αν $\kappa > 4$

Καταλήγουμε στην αντοχή του υλικού μέχρι τη θραύση του: $\sigma_{jd} = f_{jk} / 1.2^*$

*Ο συντελεστής γ_{Rd} λαμβάνεται ίσος με 1.2 σύμφωνα με τα σχόλια του ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.2.2

Ανοικτή ενίσχυση (χωρίς παράθεση των φύλλων ενίσχυσης, τύπου U ή φύλλα παράλληλα στο κορμό, τύπου ||):

Εκτός του προαναφερθέντος ελέγχου για θραύση ινών, εξετάζεται και η αστοχία λόγω αποκόλλησης.

$\sigma_{jd} = \sigma_{jcrit} / 1.2^*$

*Ο συντελεστής γ_{Rd} λαμβάνεται ίσος με 1.2 σύμφωνα με τα σχόλια του ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.2.2 σελ.8-31

$\sigma_{jcrit} = k_n \sigma_{jmax}$

όπου $k_n = 0.4 + 0.25 \lambda \leq 0.65$ με τον λόγο, $\lambda = \frac{L_e}{d} \geq 1$ όπου:

Ενεργό μήκος αγκύρωσης, $L_e = \sqrt{E_j t_j / 2 f_{ctm}}$ και

Διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης οπλισμού, $L_{av} = 2d/3$

Καταλήγουμε: $\sigma_{jmax} = \beta \frac{\tau_{αποκ}}{t_j} L_e$,

με $\beta = \beta_w \beta_l = \sqrt{2/2}$, εφόσον $\beta_l = 1$ για $\lambda \geq 1$ και $\beta_w = \sqrt{2/2}$ για συνεχή φύλλα (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017, Σχόλια, σελ.8-32)

Εν τέλει, θεωρείται ως αντοχή στην αστοχία η μικρότερη τιμή από τις δύο:

$\sigma_{jd} = \min (\sigma_{jd}(αποκ), \sigma_{jd}(θραύση))$

Ακολουθώς, γίνεται υπολογισμός του $V_{Rd,c}$:

(Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Τεύχος 1-Μιχαήλ Ν. Φαρδής/ σχ. 6,10 [9]):

$$V_{Rd,c} = \left[\max \left\{ \frac{180}{\gamma_c} (100\rho l)^{1/3}, 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}}} f_{ck}^{1/6} \right\} \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} \right) f_{ck}^{1/3} + 0.15 \frac{N_{ed}}{A_c} \right] b_w d$$

Τελικά, έγινε υπολογισμός της συνολικής τέμνουσας σχεδιασμού που προβλέπει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017 [13] και σύγκριση με την αντίστοιχη πραγματική (αποτελέσματα πειράματος) στο επόμενο κεφάλαιο.

2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατίθενται σχήματα με τα αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017, και ακολουθούν σχόλια και παρατηρήσεις επί αυτών.

Όνομα δοκιμίου	Αντοχή σε αποκόλληση (MPa)	Αντοχή υλικού (MPa)	Αστοχία ΚΑΝ.ΕΠΕ
CON_20	-	-	Ρηγμάτωση
SB_RCH2_20	539,5	1.406,25	αποκόλληση
UW_RCH2_20	557,18	1.406,25	αποκόλληση
UW_RCH3_20	337,27	1.406,25	αποκόλληση
FW_RCH2_20	560,5	1.406,25	;

Πίνακας 6. Εκτίμηση μορφής αστοχίας μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ

Όνομα δοκιμίου	Αστοχία ΚΑΝ.ΕΠΕ.	Αστοχία-πείραμα	Σύγκριση
CON_20	-	-	✓
SB_RCH2_20	αποκόλληση	Αποκόλληση (shear failure)	✓
UW_RCH2_20	αποκόλληση	Αποκόλληση (shear failure)	✓
UW_RCH3_20	αποκόλληση	Αποκόλληση (shear failure)	✓
FW_RCH2_20	αποκόλληση	Καμπτική αστοχία – θραύση σκυροδέματος εκτός ενισχυμένης περιοχής	✓

Πίνακας 7. Σύγκριση μορφής αστοχίας που προβλέπει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. και το πείραμα

Όνομα δοκιμίου	V_{dj} ΚΑΝ.ΕΠΕ. (kN)	V_f (πειράματος) (kN)	Διαφορά %
CON_20	0	0	0
SB_RCH2_20	53,43	42	27,21
UW_RCH2_20	53,43	43	24,25
UW_RCH3_20	72,15	50	44,31
FW_RCH2_20	88,67	57	55,56

Πίνακας 8. Σύγκριση συνεισφοράς στη διατμητική αντοχή σύνθετου υλικού προτεινόμενες από κανονισμό και πειράματα

Όνομα δοκιμίου	Vtot ΚΑΝ.ΕΠΕ. (kN)	Vtot (πειράματος) (kN)	Διαφορά %
CON_20	16,252	29,7	-45,28
SB_RCH2_20	69,68	69,9	-0,31
UW_RCH2_20	69,68	72,7	-4,15
UW_RCH3_20	88,41	79,7	10,93
FW_RCH2_20	104,92	86,7	21

Πίνακας 9. Σύγκριση διατμητική αντοχή προτεινόμενη από κανονισμό και πειράματα

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

-Στο δοκίμιο FW_RCH2_20 (κλειστή ενίσχυση τύπου [] με μία στρώση CFRP) δεν εξετάστηκε η περίπτωση αστοχίας προκαλούμενη από αποκόλληση, καθώς ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017 θεωρεί ότι ένα τέτοιο φαινόμενο έχει αποφευχθεί λόγω του σχήματος της ενίσχυσης. Επομένως, μοναδική περίπτωση αστοχίας της ενίσχυσης ήταν η θραύση του μανδύα, αστοχία που δεν έλαβε χώρα καθώς σημειώθηκε καμπτική αστοχία της δοκού αφού η αντοχή του υλικού ενίσχυσης ήταν αρκετά μεγαλύτερη της καμπτικής αντοχής της μη-ενισχυμένης διατομής της δοκού.

- Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017 απαγορεύεται η χρήση ανοικτής ενίσχυσης με ελάσματα εκατέρωθεν του κορμού της δοκού (δοκίμιο SB_RCH2_20). Για αυτό το λόγο, έγινε χρήση των σχέσεων για την ανοιχτή ενίσχυση U προκειμένου να βρεθεί η διατμητική αντοχή της ενίσχυσης. Η παράλειψη αυτή του κανονισμού θεωρείται υπέρ της ασφαλείας καθώς μια τέτοια τεχνική δεν προσφέρεται για σκοπούς ενισχύσεων-επισκευών, και δεν βρίσκει εφαρμογή στη πράξη.

- Παρατηρούμε ότι όλα τα δοκίμια (πλύν του δοκιμίου ελέγχου και της κλειστής ενισχύσεως) αστόχησαν διατμητικά στο μήκος ενίσχυσης με αποκόλληση του CFRP από το σκυρόδεμα. Αυτή την μορφή αστοχίας επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα από τις σχέσεις που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017 [13]

- Άξιο να σημειωθεί είναι ότι αν και υπάρχουν οι μεγάλες αποκλίσεις ο κανονισμός φαίνεται να μην τάσσεται υπέρ της ασφαλείας. Τα αποτελέσματα του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017 υπερεκτιμούν την αντοχή των δοκιμίων σε σχέση με την πραγματική (πειράματα). Συγκεκριμένα, στο δοκίμιο FW_RCH2_20 (ενίσχυση τύπου [] χρήση 2 στρώσεων CFRP) η απόκλιση φτάνει την εκτίμηση 55% παραπάνω αντοχής απ'ότι δίνουν τα αποτελέσματα της δοκιμής. Παρόλα αυτά θα ήταν λάθος να πούμε ότι για αυτό ευθύνονται μόνο οι διατάξεις του κώδικα καθώς εγώ συνυπολόγισα στην συνολική τέμνουσα, αυθαίρετα και την VRdc, δηλαδή μία συνεισφορά του άοπλου σε εκείνο το σημείο σκυροδέματος, πράγμα το οποίο ουδέποτε ορίζει ο κώδικας και παρότι αυτή η συνεισφορά ήταν μικρή δεν μπορεί να κατηγορηθεί για αυτό ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

- Διαφορά παρατηρήθηκε επίσης και στην συνεισφορά στην διατμητική αντοχή από το σκυρόδεμα. Η VRd,c που υπολογίστηκε βάση τύπου που δεν αποτελεί μέρος κάποιου κώδικα δόμησης, δίνει μικρότερη τιμή από την τιμή της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου ελέγχου στο πείραμα. Παρ'όλα αυτά το αποτέλεσμα σε αυτή την περίπτωση είναι συντηρητικό και μπορεί να οφείλεται σε πιθανή μεγαλύτερη συνεισφορά στην αντοχή από τις διαμήκεις ράβδους της διατομής, λόγω ότι στο ρl λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι εφελκόμενες ράβδοι της διατομής.

- Η μεγαλύτερη αντοχή υλικού ενίσχυσης σε διάτμηση προκύπτει όπως αναμενόταν αυτή του δοκιμίου FW_RCH2_20 με τη κλειστή ενίσχυση. Ακολουθούν τα δοκίμια με ενίσχυση U και τέλος η εκατέρωθεν του κορμού ενίσχυση.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύγκριση TRM και FRP, σε :

**Εδώ συμπεριλαμβάνονται και τα συμπεράσματα από τις υπόλοιπες δημοσιεύσεις που μελετήσαμε, οι οποίες για λόγους συντομίας παρουσιάσαμε αλλά και λόγω της ήδη εκτεταμένης κάλυψης που βρίσκουν τόσο σε διεθνές επίπεδο δημοσιεύσεων, όσο και σε προηγούμενες εργασίες του φοιτητικού συνεδρίου, δεν παρουσιάστηκαν εκτενώς στην παρούσα εργασία και αναφέρονται εδώ για λόγους πληρότητας και καλύτερης συνολικής εικόνας της σύγκρισης μεταξύ των δύο υπό εξέταση υλικών (FRP, TRM).*

- **Καμπτική ενίσχυση δοκών**, [3]: διαπιστώθηκε ότι η ενίσχυση με TRM έχει χαμηλότερη αποδοτικότητα από αυτή με FRP, με μέγιστο λόγο αποτελεσματικότητας TRM/FRP 0,80. Ωστόσο, τριπλασιάζοντας τις στρώσεις από TRM διπλασιάστηκε η αποτελεσματικότητά τους. Η τοποθέτηση μανδύων U από TRM στις απολήξεις των δοκών, δεν προσέδωσε σημαντική αύξηση στην καμπτική αντοχή του μέλους (μόνο 9%), ενώ αντίθετα οι αντίστοιχοι μανδύες από FRP οδήγησαν σε αύξησή της κατά 90%.

- **Διατμητική ενίσχυση δοκών ορθογωνικής διατομής**, [4]: διαπιστώθηκε ότι οι μανδύες από TRM είναι λιγότερο αποτελεσματικοί σε σχέση με τους FRP (με λόγο αποτελεσματικότητας TRM/FRP από 0,09 έως 0,92), αλλά αποδείχθηκαν πιο αποδοτικοί όσον αφορά την αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης των δοκών. Η αποτελεσματικότητα των δύο σύνθετων υλικών, καθορίζεται από τον τρόπο τοποθέτησης του μανδύα και τον αριθμό των στρώσεων. Συγκεκριμένα, η αύξηση των στρώσεων των μανδύων από μία σε δύο, επηρέασε περισσότερο τη διατμητική αντοχή των δοκών που ενισχύθηκαν με TRM, καθώς την αύξησε κατά μέγιστο 7,8%(SB μανδύας), ενώ στην περίπτωση των FRP αυξήθηκε έως και 1,35% (SB μανδύας). Επιπλέον, στην περίπτωση των TRM, η αύξηση των στρώσεων οδήγησε σε επιθυμητό τρόπο αστοχίας, με σταδιακή αποκόλληση του μανδύα.

- **Διατμητική ενίσχυση πλακοδοκών**, [5]: στα δοκίμια που ενισχύθηκαν με TRM, οι ρωγμές ήταν σαφώς ορατές στους μανδύες, λόγω της εύθραυστης φύσης της ανόργανης μήτρας, ενώ η διαγώνια ρωγή στα ενισχυμένα με FRP δοκίμια επιβεβαιώθηκε μετά την αφαίρεση των μανδύων στο τέλος κάθε δοκιμής. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι για ίδιο όγκο ινών, ένα στρώμα από βαριά ινοπλέγματα είναι πολύ πιο αποτελεσματικό από δύο στρώματα ελαφρού ινοπλέγματος. Επιπροσθέτως, υψίστης σημασίας κρίνεται η εφαρμογή συστήματος αγκύρωσης στον μανδύα ενίσχυσης, καθώς η αποτελεσματικότητά του μπορεί να αυξηθεί έως και 300%. Τα μη αγκυρωμένα δοκίμια με FRP είναι σχεδόν διπλάσια πιο αποτελεσματικά σε σχέση με τα αντίστοιχα με TRM, ωστόσο, εάν οι μανδύες είναι αγκυρωμένοι, το σύστημα TRM είναι οριακά κατώτερο από το σύστημα FRP.

- **Διατμητική ενίσχυση δοκών- πλακοδοκών, με μανδύες από FRP και TRM, όταν δοκοί ήταν εκτιθέμενοι σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 250°C** [7] : διαπιστώθηκε ότι η διατμητική ενίσχυση με μανδύες από TRM είναι αρκετά πιο αποτελεσματική από ότι με FRP, σε υψηλές θερμοκρασίες. Πιο αναλυτικά, αυξάνοντας την θερμοκρασία από 100°C σε 150°C,

παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη πτώση της αποτελεσματικότητας των μανδύων από FRP, ενώ αντιθέτως, η αποτελεσματικότητα των μανδύων από TRM μειώθηκε ελάχιστα για σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας από 100°C σε 250°C.

Οι μανδύες TRM, με ή χωρίς αγκύρωση που εφαρμόστηκαν με μορφή U, σε πλακοδοκούς τύπου T παρέμειναν πολύ αποτελεσματικοί σε υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας. Η αύξηση της διατμητικής ικανότητας του μη αγκυρωμένου μανδύα TRM μειώθηκε κατά 30,5% λόγω της έκθεσής του στους 150 °C, ενώ ο τρόπος αποτυχίας δεν επηρεάστηκε. Η χρήση αγκυρίων αύξησε την αποτελεσματικότητα του μανδύα TRM κατά 80%, παρά την αποκόλλησή τους λόγω της ρευστοποίησης του συγκολλητικού δεσμού που προκλήθηκε από την υψηλή θερμοκρασία.

- **Ενίσχυση τριών τύπων τοιχοποιίας:** [8] α) **τοιχία διάτμησης (shear walls)** , β) **τύπου δοκού-υποστυλώματος** και (γ) **δοκοί** . [8] : συμπεραίνεται ότι, οι επικαλύψεις από TRM παρέχουν σημαντική αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας σε σύγκριση με τις ενισχύσεις που βασίζονται στη ρητίνη. Όσον αφορά τη αντοχή, οι μανδύες από TRM προσδίδουν τουλάχιστον 65-70% μεγαλύτερη αντοχή. Όσον αφορά τη δυνατότητα παραμόρφωσης είναι πιο αποτελεσματικοί κατά 15-30% στους διάτμητικούς τοίχους, κατά 135% σε τοίχους τύπου δοκού-υποστυλώματος και 350% σε τοιχώματα τύπου δοκού. Επιπλέον, ανεξάρτητα από το μητρικό υλικό (κονίαμα ή ρητίνη), η αποτελεσματικότητα γενικά αυξάνεται με τον αριθμό των στρώσεων.

- **Περίσφιξη υποστυλωμάτων,** [6]: Οι 15 δοκιμές σε θλίψη που εκτελούνται σε αυτή τη μελέτη σε πρίσματα οπλισμένου σκυροδέματος δείχνουν ότι οι μανδύες TRM παρέχουν σημαντική αύξηση στην αντοχή σε θλίψη και την ικανότητα παραμόρφωσης καθυστερώντας το λυγισμό των διαμήκων ράβδων, αυτό το κέρδος αυξάνεται με την ογκομετρική αναλογία της περιτύλιξης TRM. Σε σύγκριση με τους μανδύες FRP με ίση ακαμψία και αντοχή, τα TRM που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη είναι ελαφρώς λιγότερο αποτελεσματικά όσον αφορά την αύξηση της αντοχής και παραμόρφωσης κατά περίπου 10%. Φαίνεται ότι αυτή η μείωση στην αποτελεσματικότητα δεν εξαρτάται από την ογκομετρική αναλογία της ενσωματωμένης ενίσχυσης του συνδετήρα. Οι τρεις δοκιμές σε υποστηλώματα σχεδόν πλήρους κλίμακας υπό κυκλική μονοαξονική κάμψη δείχνουν ότι οι μανδύες TRM είναι πολύ αποτελεσματικά ως μέσο αύξησης της ικανότητας κυκλικής παραμόρφωσης και της διασποράς ενέργειας των παλαιού τύπου υποστηλωμάτων με κακές προδιαγραφές, καθυστερώντας το λυγισμό των ράβδων. Σε σύγκριση με FRP ίσης δυσκαμψίας και αντοχής το TRM έχει σχεδόν την ίδια αποτελεσματικότητα. Παρά το σχετικά περιορισμένο αριθμό τους, όλα τα αποτελέσματα των δοκιμών που παρουσιάζονται σε αυτή τη μελέτη δείχνουν ότι το TRM jacketing είναι μια εξαιρετικά ελπιδοφόρα λύση για την περίσφιξη των υποστηλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος, συμπεριλαμβανομένων και των ελάχιστα ικανών σε σεισμικές περιοχές.

- **Ενίσχυση δεσμού οπλισμού μάτισης-σκυροδέματος περισφιγμένων υποστηλωμάτων** [10]: Και οι δύο μανδύες FRP και TRM αντιστέκονταν στη διάδοση των διαμηκών ρωγμών, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής δεσμού μεταξύ των ράβδων μάτισης και του σκυροδέματος. Γενικά, ο εξωτερικός περιορισμός με μανδύες και η ενίσχυση της τοπικής σχέσης δεσμού-ολίσθησης κατά μήκος της περιοχής του πέλματος είχαν ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της συνολικής απόκρισης των περισφιγμένων υποστηλωμάτων τόσο ως προς την αντοχή όσο και ως προς την ικανότητα παραμόρφωσης σε περίπτωση αστοχίας.

Παρά το σχετικά περιορισμένο αριθμό τους, όλα τα αποτελέσματα των δοκιμών που παρουσιάζονται σε αυτή τη μελέτη υποδεικνύουν ότι ο περιορισμός με μανδύες TRM και FRP είναι μια εξαιρετικά ελπιδοφόρα λύση με μεγάλες δυνατότητες για την ενίσχυση της συμπεριφοράς των τοπικών δεσμών μεταξύ των συγκολλημένων ράβδων και του περιβάλλοντος σκυροδέματος.

- Ενίσχυση πλακών σε διάτρηση (σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων ανάλυσης)
[1,2] :

- Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της ικανότητας ανάληψης φορτίου τόσο για την ενίσχυση με CFRP όσο και για δοκίμια που ενισχύθηκαν με TRM , με τα CFRP να παρουσιάζουν ελαφρώς υψηλότερη ικανότητα ανάληψης φορτίου και δυσκαμψία.
- Οι δύο δημοσιεύσεις διαφωνούν στην αύξηση της δυσκαμψίας που παρουσιάζουν οι ενισχυμένες πλάκες TRM σχετικά με τον δοκίμιο ελέγχου, καθώς στην αριθμητική ανάλυση του μοντέλου φαίνεται ότι τα TRM οδήγησαν στην μεγαλύτερη αύξηση της δυσκαμψίας των δοκιμίων σε αντίθεση με την πειραματική μελέτη που δίνει προβάδισμα στις πλάκες που ενισχύθηκαν με CFRP.
- Και οι δύο μελέτες, αν και με κάποιες διαφορές στα μεγέθη, έδειξαν αύξηση της απορρόφησης ενέργειας τόσο των πλακών που ενισχύθηκαν με CFRP, που υπερτερούσαν και στις δύο δημοσιεύσεις ,όσο και αυτών που ενισχύθηκαν με TRM.
- Τέλος και οι δύο δημοσιεύσεις έδωσαν αρκετά υποσχόμενα επίπεδα εγκυρότητας όπου το φορτίο διάτρησης των αναλυθέντων μοντέλων είναι μεγαλύτερο από τις πειραματικές τιμές με διαφορά μικρότερη από 2,91% για την δεύτερη δημοσίευση που αναλύουμε,ενώ στην πρώτη μια αντίστοιχη σύγκριση πειράματος-μοντέλου και πειράματος-ACI 318 έδωσε τιμές 1.99 και 0.90 αντιστοίχως.

- Σύγκριση ΚΑΝ.ΕΠΕ[13] και πειραματικών αποτελεσμάτων: Δοκιμή Διάτμησης δοκού ορθογωνικής:

- Ο κανονισμός [1] επιβεβαιώνει όλες τις μορφές αστοχίας των δοκιμίων. –
- Η διατμητική αντοχή(VRd,tot) και η συνεισφορά του συνθετου υλικού (Vjd) υπερεκτιμάται αρκετά. Συγκεκριμένα, στο δοκίμιο με ενίσχυση τύπου U (2 στρώσεων) η απόκλιση στην Vjd είναι 60% μεγαλύτερη απ'ότι δίνουν τα αποτελέσματα της δοκιμής.
- Η μεγαλύτερη αντοχή υλικού ενίσχυσης σε διάτμηση προκύπτει όπως αναμενόταν αυτή του δοκιμίου με τη κλειστή ενίσχυση. Ακολουθούν τα δοκίμια με ενίσχυση U και τέλος η πλευρική ενίσχυση.

-Τελικές σκέψεις και προτάσεις για μελλοντικές έρευνες:

Σαν τελευταίο συμπέρασμα λοιπόν αξίζει να αναρωτηθούμε αν τελικά **επιτεύχθηκε ο σκοπός της εργασίας**, στο οποίο απαντάμε πως μέσω συγκρίσεων τόσο μεταξύ δοκιμών , όσο και με σχέσεις που δίνουν οι κώδικες , παρότι μπορεί να αδυνατούμε να χρίσουμε ξεκάθαρο νικητή μεταξύ των ενισχυτικών υλικών, ελπίζω τουλάχιστον να μπορούμε να διακρίνουμε ασφαλέστερα σε ποιες περιπτώσεις λειτουργεί το καθένα ορθότερα καθώς και πού μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα του καθενός με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

Τονίζω λοιπόν την **σημασία ανάπτυξης περαιτέρω πειραματικών δοκιμών σε θέματα εφαρμογής τους** (αλλά και **σε θέματα έκθεσής τους σε περιβαλλοντολογικές συνθήκες όπως κύκλους ψύξης απόψυξης, ενανθράκωσης και χλωριόντων** όπου υπάρχει σοβαρή ευκαιρία για διεξαγωγή σπουδαίας έρευνας λόγω περιορισμένης μέχρις στιγμής ανάλυσης) καθώς και την **ανάγκη επικαιροποίησης των αντίστοιχων προγραμμάτων μοντελοποίησης** ενισχυτικών εφαρμογών των δύο αυτών σύνθετων υλικών που χρίζουν, λόγω της φοβερής δυναμικής που υπόσχονται, της προσοχής όλης της κοινότητας της επιστήμης των μηχανικών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Effect of CFRP and TRM Strengthening of RC Slabs on Punching Shear Strength Husain Abbas, Aref A. Abadel ,Tarek Almusallam ,Yousef Al-Salloum , Dept. of Civil Engineering, King Saud Univ., Riyadh 11421, Saudi Arabia
- [2] NUMERICAL INVESTIGATION ON THE PUNCHING BEHAVIOR OF RC FLAT SLABS STRENGTHENING BY TRM AND FRP ,Majid H. Abdulhussein, Dr. Muhammad J. Kadhim, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Research Gate
- [3] “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams.” Saad M. Raof -Lampros N. Koutas - Dionysios A. Bournas (ELSEVIER,2017)
- [4] “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams.” Zoi C.Tetta- Lampros N. Koutas - Dionysios A. Bournas (ELSEVIER,2015)
- [5] “Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets.” E. Tzoura - T. C. Triantafillou (ELSEVIER,2014)
- [6] Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus FRP Confinement in Reinforced Concrete Columns, Dionysios A. Bournas, Catherine Papanicolaou, Thanasis Triantafillou Article in Aci Structural Journal · December 2007
- [7]”TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures.” Zoi C.Tetta- Dionysios A. Bournas (ELSEVIER,2016)
- [8]“Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading” Catherine G. Papanicolaou -Thanasis C. Triantafillou - Kyriakos Karlos-Myrto Papathanasiou (RILEM, 2006)
- [9] “Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι” , Μιχαήλ Ν. Φαρδής, Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών (Πάτρα,2016)
- [10] Bond Strength of Lap-Spliced Bars in Concrete Confined with Composite Jackets,D. A. Bournas¹ and T. C. Triantafillou, M.ASCE²
- [11]ACI Committee 549. Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and

masonry structures (ACI 549.4R-13). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 2013.

[12] Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures – State-of-the-art review, Hussein M. Elsanadedy*, Husain Abbas, Tarek H. Almusallam, Yousef A. Al-Salloum(ELSEVIER,2019)

[13] ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2017)

[14] M. H. Abdulhussein, “[Investigation](#) of Reinforced Concrete Slabs with Punching Shear Reinforcement or with CFRP Strengthening,” university of babylon, 2018

[15] M. P. Collins and D. Mitchell, Prestressed concrete structures, vol. 9. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.

[16] H. Hibbitt, B. Karlsson, and P. Sorensen, “Abaqus analysis user’s manual version 6.10,” Dassault Systèmes Simulia Corp. Provid. RI, USA, 2011.

[17] O. Awani, “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Textile-Reinforced Mortar,” 2015.

[18] Y. Obaidat, Structural retrofitting of concrete beams using FRP-debonding issues. Department of Construction Sciences, Lund University, 2011.

[19] ABAQUS <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>

[20] Μηχανή αναζήτησης google , <https://scholar.google.com/>

