

Ενίσχυση σε κάμψη δοκών με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών με άνθρακα σε εγκοπή

Reinforcement for flexure of beams using carbon fiber reinforced polymers in a notch

Αλέξανδρος ΚΑΤΣΙΑΟΥΝΗΣ¹, Νικόλαος ΝΙΚΟΛΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ²,
Νίκος ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ³

Λέξεις κλειδιά: Εποξειδικές Ρητίνες, Ελάσματα Ινών Άνθρακα, Κορδόνια Ινών Άνθρακα, Εγκοπή Αρμών, epoxy resins, Carbon Fiber Plates, Carbon Fiber Strings, Near Surface Mountain.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η ενίσχυση δοκών σε κάμψη με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών με άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymers-CFRPs) τοποθετημένα σε εγκοπή. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί τρόποι ενίσχυσης: με έτοιμα προδιαμορφωμένα ελάσματα ινών άνθρακα (plates) και με κορδόνια ινών άνθρακα (strings). Επιπροσθέτως, διερευνήθηκε η αύξηση της χαμηλής επικάλυψης δοκιμών με τσιμεντοειδές κονίαμα και η εν συνεχεία ενίσχυση σε κάμψη με την εφαρμογή των παραπάνω δύο μεθόδων. Η τοποθέτηση των CFRPs έγινε σε εγκοπές στην καμπτόμενη επιφάνεια των δοκών (Near Surface Mountain). Σε κάθε περίπτωση, η εργαστηριακή διερεύνηση έγινε σε οπλισμένες δοκούς σκυροδέματος μικρής κλίμακας. Συνολικά, παρατηρήθηκε ότι η ενίσχυση των δοκών ήταν επιτυχής, αυξάνοντας σημαντικά την καμπτική αντοχή σε όλες τις περιπτώσεις.

ABSTRACT: This paper investigated the reinforcement for flexure of beams using Carbon Fiber Reinforced Polymers in a notch. In particular, two different types of reinforcement were investigated. Reinforcement with prefabricated carbon fiber plates and carbon fiber strings. In addition, the increase of concrete coating was investigated, due to the lack of it, with two kinds of repair mortars reinforcing them afterwards with the above methods. The reinforcement was achieved by means of Near Surface Mountain. The research was carried out, using small scaled reinforced beams in any case. At the end of the research it is concluded that the reinforcement of the beams using CFRPs in all of the above methods, was successful with a significant increase of the flexural strength.

¹ Πολιτικός Μηχανικός, BEng, University of East London-Athens Campus, email: alxkts@windowslive.com

² Εκπαιδευτικός Τεχνολόγος Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υπ. Διδάκτορ Ε.Μ.Π, email: nikolasnikoloutso@hotmail.com

³ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Δ.Π.Θ., TM Manager Refurbishment SIKA HELLAS SA, 15 Protomagias, str.|Kryoneri|GR-14568|Greece, email: anagnostopoulos.nikos@gr.sika.com

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βλάβες σε δοκούς από Ο/Σ προέρχονται κυρίως είτε από σεισμικά φορτία είτε από αυξημένη καταπόνηση λόγω κατακόρυφων φορτίων. Ο συχνότερος τύπος βλάβης είναι οι εγκάρσιες καμπτικές ρωγμές στο κάτω πέλμα της δοκού είτε οι διατμητικές ρωγμές στις παρειές κυρίως των στοιχείων. Εντονότερα, οι βλάβες εμφανίζονται λόγω ανεπαρκούς αγκύρωσης και ολίσθησης του οπλισμού στο κάτω πέλμα. Η εμφάνιση της βλάβης αυτής γίνεται με ένα ρήγμα μεγάλου πλάτους στη παρειά της στήριξης. (Δρίτσος, 2005). Ως εκ τούτου, καθίσταται προφανές ότι η ενίσχυση σε δοκούς έναντι κάμψης αποτελεί σημαντικό εργαλείο του μηχανικού, ειδικά σε μια χώρα με έντονη σεισμική δραστηριότητα.

Ο Kreit και λοιποί και Almassri και λοιποί μελέτησαν τη δομική απόδοση των μακροπρόθεσμων φυσικά διαβρωμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με δύο ράβδους ενίσχυσης στη καμπτόμενη επιφάνεια, οι οποίες ενισχύθηκαν με μια ράβδο 6mm CFRP σε εγκοπή. Η επικάλυψη σκυροδέματος δεν επισκευάστηκε και η εφαρμογή της ράβδου CFRP σε εγκοπή έγινε ακριβώς στη μέση καμπτόμενη επιφάνεια όπου καμία ρωγμή διάβρωσης δεν εμφανίστηκε.

Η ικανότητα παραλαβής φορτίων βελτιώθηκε και η ακαμψία αυξήθηκε ελαφρώς. Η ποιότητα και η θέση της επικάλυψης σκυροδέματος η οποία καταστράφηκε από τη διάβρωση του οπλισμού έχει μεγάλη σημασία, παράλληλα η απόδοση της τεχνικής εγκοπών (NSM) περιορίστηκε από το διαχωρισμό της επικάλυψης σκυροδέματος λόγω των διαβρωμένων ρωγμών. Ο Almassri και λοιποί, πραγματοποίησε ανάλυση FEM δύο και τριών διαστάσεων, η οποία ήταν σε θέση να προβλέψει την ικανότητα παραλαβής φορτίου και την μέγιστη μείωση της παραμόρφωσης λόγω της διάβρωσης. (Triantafyllou, Rousakis and Karabinis, 2017)

Αντικείμενο της παρούσας έρευνας αποτέλεσε η συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων μεθόδων ενίσχυσης έναντι κάμψης με CFRPs σε εγκοπή. Η εργαστηριακή διερεύνηση έγινε σε οπλισμένες δοκούς ορθογωνικής διατομής. Η επιλογή της οπλισής έγινε ώστε να καταπονηθεί καμπτικά το κάθε δοκίμιο.

Η ενίσχυση πραγματοποιήθηκε με 2 διαφορετικές τεχνικές: με ελάσματα ινών άνθρακα και με κορδόνι ινών άνθρακα, και τα δύο σε επιφανειακή εγκοπή. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση της αύξησης της επικάλυψης της εφελκυόμενης επιφάνειας με επισκευαστικό κονίαμα και η ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο παραπάνω τεχνικών ενίσχυσης.

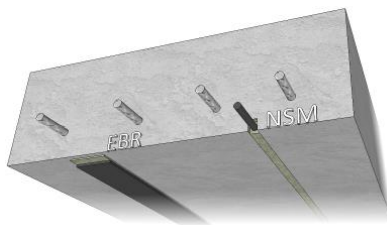
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές ενίσχυσης όπως η χρήση μεταλλικών, η εναλλακτική εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως οι εξαιρετικές ιδιότητες βάρους προς αντοχή, η

διαθεσιμότητα του υλικού σε σχετικά απεριόριστο μήκος, η συγκριτικά ευκολότερη εγκατάσταση και η ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τα σύνθετα υλικά μία πολύ ελκυστική εναλλακτική πρόταση. (Σπυράκος Κ., 2004)

Η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή σε εγκοπή (NSM) έχει αναπτυχθεί προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αστοχία δεσμών στη διεπιφάνεια μεταξύ του EBR και της επιφάνειας σκυροδέματος με την παρεμβολή της ενίσχυσης FRP στις συγκεκριμένες εγκοπές οι οποίες πληρώνονται με εποξειδικές ρητίνες. Ο σχεδιασμός των συστημάτων CFRP, που βασίζονται στις λύσεις εγκοπών κοντά στην εφελκυσόμενη επιφάνεια στοιχείων, παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των εναλλακτικών λύσεων βασισμένων σε επικολλωμένες ενισχύσεις στην επιφάνεια των μελών. Αντίθετα, με την EBR (εξωτερικά επικολλωμένη ενίσχυση), όπου οι λάμες επικολλώνονται στο υπόστρωμα, οι λύσεις NSM είναι βασισμένες στην εφαρμογή της λάμας στο εσωτερικό των στοιχείων και καλύπτονται εξολοκλήρου.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνικής ενίσχυσης είναι τα ακόλουθα: α) Ενισχυμένη επικόλληση μεταξύ του CFRP και του στοιχείου λόγω της αυξανόμενης περιοχής επαφής και του πλήρη εγκιβωτισμού, αυξάνοντας την παραμόρφωση του στοιχείου σε σύγκριση με τις απλά-επικολλωμένες λύσεις. β) Η ενδεχόμενη μείωση του απαραίτητου μήκους αγκύρωσης. γ) Η δυνατότητα χρήσης των NSM στην περίπτωση στοιχείων με περιορισμένη εφελκυστική αντοχή ή/και τη σημαντική παρουσία ρωγμών. δ) Η μείωση του κινδύνου λυγισμού λόγω του περιορισμού του CFRP εντός της εγκοπής. Αυτό επιτρέπει στο στοιχείο να λειτουργήσει κάτω από τυχαίες φορτίσεις (π.χ. σεισμικές επιταχύνσεις). ε) Τα συστήματα NSM μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η επιφάνεια του μέλους είναι καμπύλη.



Σχήμα 1. Κατηγορίες μεθόδων σύνδεσης διεπιφάνειας ενισχύσεων

Στη σχετική βιβλιογραφία, υπάρχουν διάφορες πειραματικές μελέτες σε ενισχυμένες δοκούς, κάτω από μονοτονική φόρτιση με ενίσχυση σε εγκοπή κοντά στην επιφάνεια De Lorenzis και Nanni (2002), Sena-Cruz και Barros (2004), Barros και Fortes (2005), Teng και άλλοι (2006) και Wahab και άλλοι (2011), αποδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου ενίσχυσης. Μια

περιεκτική έρευνα στην ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή σε εγκοπή παρουσιάζεται από τους de Lorenzis και Teng, ενώ οι χαρακτηριστικοί παρατηρηθέντες τρόποι αστοχίας περιγράφονται από τον Coelho και άλλους.

Οι Sena-Cruz και άλλοι, 2011, πραγματοποίησαν πειραματική διερεύνηση σε κόπωση, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα συγκριτικά με τα εξωτερικά επικολλούμενα φύλλα (EBR) και με φύλλα τοποθετημένα σε εγκοπή κοντά στην επιφάνεια (NSM). Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα (Charalambidi, Rousakis and Karabinis, 2016) δοκοί ενισχυμένοι με NSM παρουσίασαν την υψηλότερη ικανότητα παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο έναντι άλλων τρόπων ενίσχυσης με EBR στις μονοτονικές δοκιμές (Charalambidi, Rousakis and Karabinis, 2016)

Εκτός από την υψηλότερη ικανότητα παραλαβής φορτίου, επιτυγχάνεται αυξημένη ανθεκτικότητα σε σχέση με την EBR δεδομένου ότι τα FRPs προστατεύονται καλά στις εγκοπές και είναι λιγότερο εκτεθειμένα από εξωτερικές πηγές προσβολής (υγρασία, χλωριόντα κτλ). Πολύ λίγες μελέτες που δημοσιεύονται εξετάζουν τα διαβρωμένα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος που επισκευάζονται και που ενισχύονται με τα συστήματα NSM. Ο Kreit και λοιποί και Almassri και λοιποί μελέτησαν την απόδοση διαβρωμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με δύο ράβδους ενίσχυσης στη καμπτόμενη επιφάνεια, οι οποίες ενισχύθηκαν με μια ράβδο 6mm CFRP σε εγκοπή. Η επικάλυψη σκυροδέματος δεν επισκευάστηκε και η εφαρμογή της ράβδου CFRP σε εγκοπή έγινε ακριβώς στη μέση καμπτόμενη επιφάνεια όπου καμία ρωγμή διάβρωσης δεν εμφανίστηκε. Η ικανότητα παραλαβής φορτίων βελτιώθηκε και η ακαμψία αυξήθηκε ελαφρώς.

Η εφαρμογή συστημάτων ενίσχυσης με CFRPs σε επιταχυνόμενα διαβρωμένες δοκούς μελετήθηκε από τους Triantafyllou, Rousakis and Karabinis, 2017. Η ενίσχυση έλαβε χώρα κατόπιν εφαρμογής πλήρους συστήματος επισκευής και αποκατάστασης της επικάλυψης. Η απόδοση των συστημάτων ενίσχυσης σε εγκοπή παρουσιάστηκε επίσης αυξημένη σε σχέση με τον εξωτερικά επικολλούμενο οπλισμό (EBR).

Ο σχεδιασμός της ενίσχυσης βασισμένης σε εγκοπές κοντά στην επιφάνεια (NSM) ακολουθεί διαφορετικές διαδικασίες διαστασιολόγησης απ' ό,τι η ενίσχυση με επικολλούμενα στοιχεία. Δύο από τις κύριες οδηγίες που περιλαμβάνουν αυτές τις παραμέτρους είναι ο αμερικάνικος κανονισμός ACI440.2R-08 (2008) και ο βρετανικός TR 55 (2012). Στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί ακολούθησαν την οδηγία του ACI 440.2R-08.

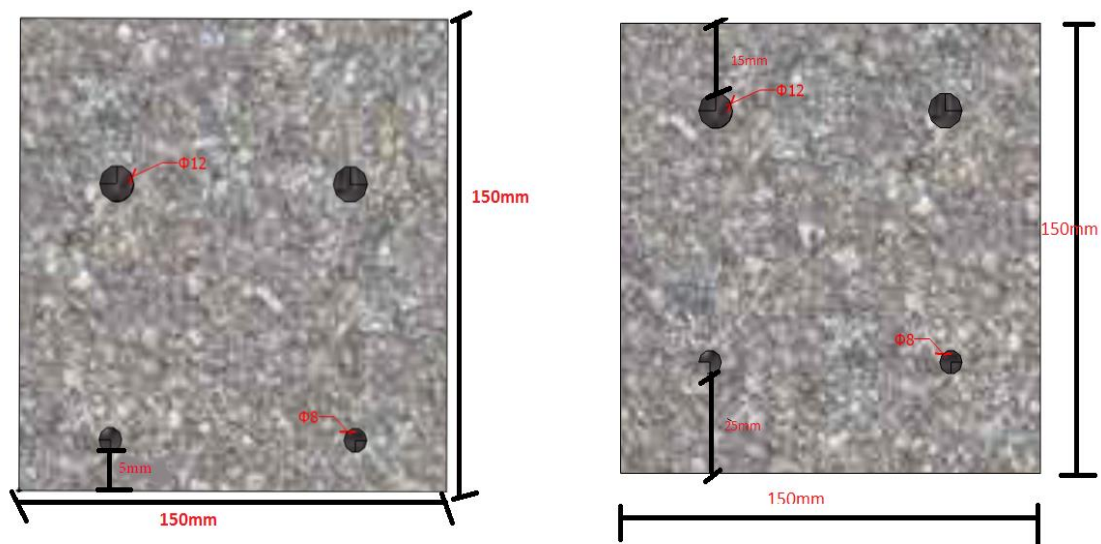
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το πειραματικό μέρος της παρούσας έρευνας είχε ως κύριο σκοπό τη διερεύνηση των παρακάτω παραμέτρων:

α) Τη διερεύνηση δυνατότητας εφαρμογής κορδονιού ινών άνθρακα σε εγκοπή εναλλακτικά και συγκριτικά με τη χρήση ελάσματος σε εγκοπή και την αξιολόγηση της απόδοσης αυτού.

β) Τη δυνατότητα χρήσης της τεχνικής ενίσχυσης σε εγκοπή σε δοκούς με χαμηλή επικάλυψη (παράμετρος αδυναμίας εφαρμογής λύσης με NSM) κατόπιν αύξησης της επικάλυψης με τη χρήση επισκευαστικού κονιάματος.

γ) Το ποσοστό αύξησης της καμπτικής ικανότητας αποτελεί επίσης μέρος της εργασίας, λαμβάνοντας υπόψη περιοριστικούς παράγοντες π.χ. διαστάσεις δοκών, εξοπλισμός καμπτικής αντοχής εργαστηρίου.



Σχήμα 2. Κατηγορίες Δοκών-Διαφοροποίηση Επικάλυψης

Όπως προκύπτει από το σχήμα 2 για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν δοκοί Ο/Σ μήκους 550mm, πλάτους 150mm και ύψους 150mm. Οι δοκοί παρασκευάστηκαν από σκυρόδεμα C16/20, εφελκόμενο οπλισμό 2Φ8 και θλιβόμενο οπλισμό 2Φ12. Χρησιμοποιήθηκε επίσης οπλισμός διάτμησης Φ8/5. Στον πίνακα 1 παρακάτω, παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκών.

Μία σειρά δοκών χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του μέγιστου φορτίου αστοχίας των μη ενισχυμένων δοκών (RHC, RLC). Η επόμενη σειρά δοκιμών (HCP, HCC) αφορούσε δοκίμια ακριβώς ίδια με τα αναφοράς ενισχυμένα όμως με την εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών με τις δύο διαφορετικές τεχνικές (έλασμα και κορδόνι) στην επαρκή επικάλυψη του κάτω πέλματος (25mm).

Τέλος, η τελευταία σειρά δοκιμών (LCP, LCC) αφορούσε δοκούς με μη επαρκή επικάλυψη για την εφαρμογή των δύο τεχνικών ενίσχυσης. Στις δοκούς αυτές αυξήθηκε η επικάλυψη με τη χρήση επισκευαστικού κονιάματος και κατόπιν πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή των NSM (έλασμα και κορδόني) εντός της εγκοπής που δημιουργήθηκε στη μάζα του κονιάματος.

Πιο αναλυτικά και αναφορικά με τα προς ενίσχυση δοκίμια, η πρώτη κατηγορία (RHC) αναφέρεται σε επικάλυψη οπλισμού 15mm από τον θλιβόμενο οπλισμό και σε 25mm από τον εφελκόμενο, ενώ η δεύτερη κατηγορία (RLC) αναφέρεται σε επικάλυψη οπλισμού 5mm από τον εφελκόμενο οπλισμό.

Η αύξηση της επικάλυψης πραγματοποιήθηκε με επισκευαστικό τσιμεντοειδές κονίαμα κατηγορίας R4 σύμφωνα με το EN 1504-3 (Sika Monotop®-627 HP).

Κατόπιν της ωρίμανσης των κονιαμάτων έγιναν εγκοπές για εγκιβωτισμό και εφαρμόστηκε η διαδικασία ενίσχυσης, είτε με λάμες ινών άνθρακα είτε με κορδόνια ινών άνθρακα. Οι πρόσθετες επικαλύψεις έχουν πρόσθετο ύψος 20mm. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι αρμοί που εγκιβωτίστηκαν οι ενισχύσεις έχουν: για τα ελάσματα βάθος 15mm και πλάτος 5mm και για τα κορδόνια βάθος 20mm και πλάτος 20mm αντίστοιχα. Οι ενισχύσεις κάλυψαν όλο σχεδόν το μήκος της δοκού και εγκιβωτίστηκαν πλήρως εντός του αρμού.

Πίνακας 1. Κωδικοποίηση Δοκών

ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΩΝ	ΣΧΟΛΙΑ
RHC	Δοκός Αναφοράς Κανονικής Επικάλυψης
RLC	Δοκός Αναφοράς Χαμηλής Επικάλυψης
HCP	Δοκός με Ενίσχυση Λάμας Κανονικής Επικάλυψης
HCC	Δοκός με Ενίσχυση Κορδονιού Κανονικής Επικάλυψης
LCP	Δοκός με Ενίσχυση Λάμας Χαμηλής Επικάλυψης
LCC	Δοκός με Ενίσχυση Κορδονιού Χαμηλής Επικάλυψης
ALP	Αγκυρωμένη Δοκός με Ύφασμα και Ενίσχυση Λάμας Χαμηλής Επικάλυψης
ALC	Αγκυρωμένη Δοκός με Ύφασμα και Ενίσχυση Κορδονιού Χαμηλής Επικάλυψης

ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

Η επιφάνεια του σκυροδεάματος του κάτω πέλματος των δοκών με χαμηλή επικάλυψη προετοιμάστηκε με τη χρήση διαμαντόδισκου σκυροδέματος για την εξομάλυνση και την απόδοση υφής ανοιχτού πορώδους και τραχύτητας CSP 3. Για την αυξημένη πρόσφυση του τσιμεντοειδούς κονιάματος εφαρμόστηκε εποξειδική ρητίνη (Sikadur®-32 EF) και αμέσως μετά τη διάστρωση εφαρμόστηκε το ινοπλισμένο επισκευαστικό κονίαμα υψηλών αντοχών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις χαρακτηριστικών της τάξεως R4 του Ευρωπαϊκού Προτύπου ΕΛΟΤ EN 1504 (Sika Monotop®-627 HP). Πραγματοποιήθηκε τακτική διαβροχή με υγρή λινάτσα για 7 μέρες.

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Σε κάθε δοκό προς ενίσχυση, πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη και ο καθαρισμός των εγκοπών με ειδικό αρμοκόφτη σκυροδέματος στις διαστάσεις της προδιαγραφής του προμηθευτή του υλικού.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ

Με τη πάροδο του χρόνου ωρίμανσης τα δοκάρια προετοιμάστηκαν για να ενισχυθούν με τις επιλεγμένες τεχνικές. Η εφαρμογή των μεθόδων ενίσχυσης με έλασμα ινών άνθρακα περιελάμβανε τα παρακάτω στάδια.

Πραγματοποιήθηκε η κοπή των ελασμάτων Sika Carbodur® S-1.030 με δίσκο τροχίσματος. Ακολούθησε το καθάρισμα-ενεργοποίηση του ελάσματος με ειδικό διαλύτη- ενεργοποιητή. Εφαρμόστηκε εποξειδική ρητίνη επικόλλησης / εγκιβωτισμού και οι εγκοπές γεμίζονται από κάτω προς τα πάνω για να εξασφαλιστεί ολική πλήρωση της εγκοπής με υλικό και κατόπιν τοποθετήθηκαν τα ελάσματα ινών άνθρακα μέσα στην εγκοπή γεμισμένη με συγκολλητική ρητίνη. Η επιφάνεια πιέζεται με σπάτουλα για να διαμορφωθεί μια καθαρή επιφάνεια και να διασφαλιστεί ο απεγκλωβισμός αέρα.

Η εφαρμογή των κορδονιών ινών άνθρακα περιελάμβανε τις παρακάτω διαδικασίες: Κοπή κορδονιού SikaWrap® FX-50 C στις απαιτούμενες διαστάσεις με ψαλίδι και εμποτισμός με ενέσιμη εποξειδική ρητίνη (Sikadur®-52), σύμφωνα με το EN 1504-4 έως ότου εμποτιστούν πλήρως οι ίνες. Πίεση ινών κατάλληλα έτσι ώστε να απομακρυνθεί η περίσσεια ρητίνης και να απεγκλωβιστεί ο αέρας. Όσο το κορδόνι είναι εμποτισμένο, και εντός του χρόνου ενέργειας, εγκιβωτίζεται εντός της εγκοπής η οποία έχει πληρωθεί (όπως προηγουμένως) με εποξειδική ρητίνη εγκιβωτισμού / αγκύρωσης (Sika Anchorfix®-3+)

Πίνακας 2. Υλικά Ενίσχυσης

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΕΦ. ΑΝΤΟΧΗ	ΧΑΡ. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣ/ΤΑΣ	ΟΡΙΑΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΔΙΑΤΟΜΗ
Sika Carbodur® S-1.030	Λάμα Ινών Ανθρακα	3100 MPa	165 GPa	>1.70%	1.30%	Πλάτος 10mm Πάχος 3.0 mm Επιφάνεια 30 mm ²
SikaWrap® FX-50 C	Κορδόνι Ινών Ανθρακα	4000 MPa	> 225 GPa (ινών)	> 0.90% (laminate)	0.60% (laminate)	Διάμετρος 10mm Επιφάνεια 28 mm ²

Πίνακας 3. Συμπληρωματικά Υλικά

Υλικό	Χρήση
Sikadur®-32 EF	Συγκόλληση Σκυροδέματος με τσιμεντοειδές κονίαμα
Sika AnchorFix® -3+	Εποξειδικό Συγκολλητικό εγκιβωτισμού Κορδονιού / Ελάσματος
Sikadur®-52	Ρητίνη Χαμηλού Ιξώδους για Εμποτισμό του Κορδονιού
Sikadur® -330	Εποξειδική Ρητίνη Εμποτισμού και επικόλλησης υφάσματος SikaWrap®-230 C
Sika Monotop®-627 HP	Επισκευαστικό τσιμεντοειδές κονίαμα ενός συστατικού
SikaWrap®-230 C	Ύφασμα Ινών Άνθρακα – Αγκύρωση συστημάτων καμπτικής ενίσχυσης CFRPs

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα για την εύρεση της επίδρασης της ενίσχυσης στις δοκούς της έρευνας. Στο πίνακα 4 παρατηρείται η πρώτη εμφάνιση ρωγμής σε κοντινά φορτία για όλες τις δοκούς λόγω αστοχίας του σκυροδέματος στην εφελκυστική ίνα. Επιπροσθέτως με την εφαρμογή της ενίσχυσης οι επόμενες ρωγμές ήταν διατμητικές για όλες τις δοκούς ακολουθώντας κοινό μοτίβο εμφάνισης.

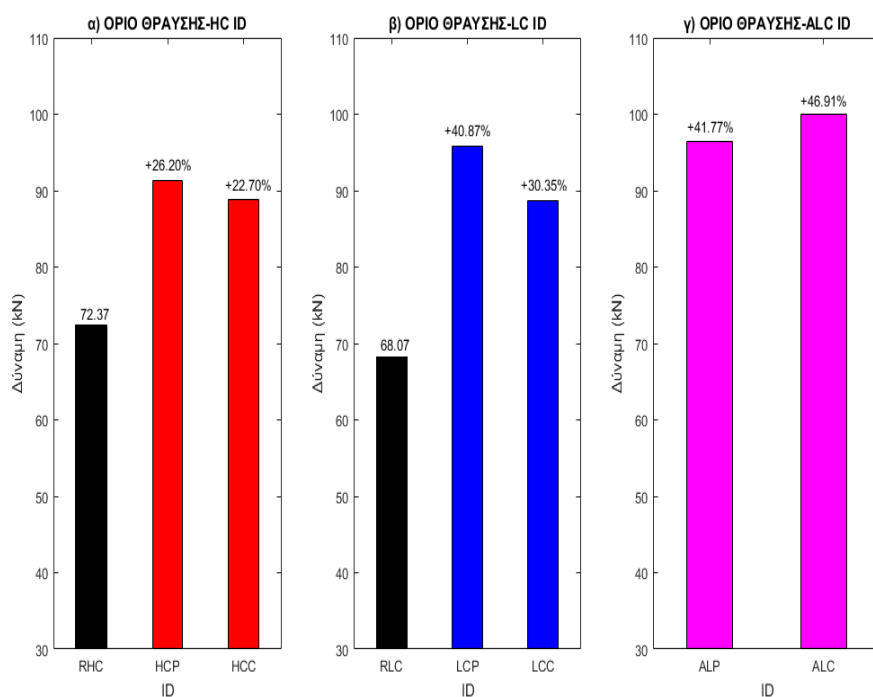
Πίνακας 4. Εμφάνιση Ρωγμών – Θραύσης

ΔΟΚΟΙ	ΡΩΓΜΕΣ (kN)							ΘΡΑΥΣΗ (kN)
	ΚΑΜ/ΚΗ	ΚΑΜ/ΚΗ	ΔΙΑΤΜ/ΚΗ	ΔΙΑΤΜ/ΚΗ	ΚΑΜΠΤΟ -ΔΙΑΤ/ΚΗ	ΚΑΜ/ΚΗ	ΚΑΜΠΤΟ -ΔΙΑΤ/ΚΗ	
RHC	41.5	-	62.5	-	-	-	-	72.37
HCP	60.33	-	78	81	-	-	-	91.33
HCC	43.5	-	-	-	60	75	-	88.81
RLC	29	-	-	-	38.4	51	59.8	68.07
LCP	65	-	-	-	-	95	-	95.89
LCC	-	-	59	66	-	-	-	88.73
ALP	56	70	-	91	-	-	-	96.5
ALC	82	-	97	-	-	-	-	100

Στο πίνακα 5 παρατηρείται η αύξηση του φορτίου αστοχίας των δοκών με όλες τις μεθόδους ενίσχυσης, και εν συνεχεία στο σχήμα 3 που ακολουθεί δίνεται έμφαση στη ποσοστιαία επιρροή, των μεθόδων ενίσχυσης, στα όρια θραύσης.

Πίνακας 5. Μέγιστο Φορτίο Θραύσης

ΔΟΚΟΙ	RHC	HCP	HCC	RLC	LCP	LCC	ALP	ALC
Μ.Ο. (kN)	72.37	91.33	88.81	68.07	95.89	88.73	96.50	100
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΥΞΗΣΗΣ (%)	-	+26.20	+22.70	-	+40.87	+30.35	+41.77	+46.91



Σχήμα 3. Συγκριτικά Ραβδόγραμμα ορίων θραύσης, α) δοκοί με κανονική επικάλυψη, β) δοκοί με χαμηλή επικάλυψη, γ) δοκοί με χαμηλή επικάλυψη και αγκύρωση

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ

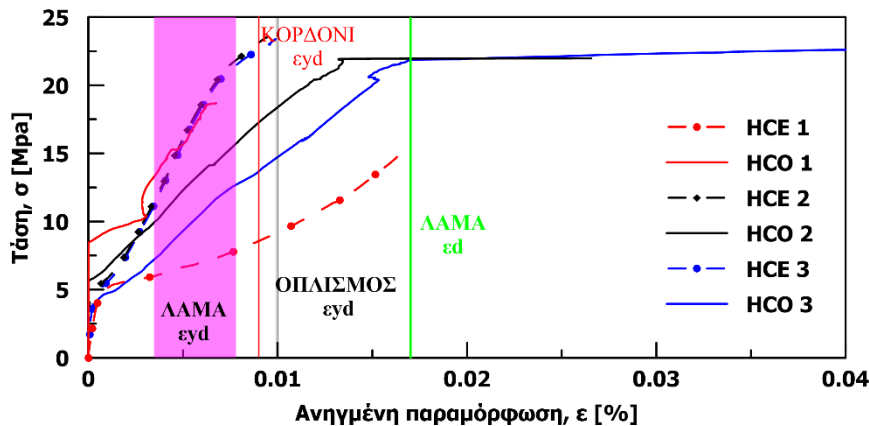
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις των οπλισμών και της ενίσχυσης των δοκών. Σε επιλεγμένες δοκούς κανονικής επικάλυψης επικολλήθηκαν τόσο, στο μέσον των ραβδών οπλισμού όσο και στο μέσον των μεθόδων ενίσχυσης παραμορφωσιόμετρα τα οποία κατέγραψαν την ανηγμένη παραμόρφωση των στοιχείων. Όπως προκύπτει από το σχήμα 4 τα παραμορφωσιόμετρα έδειξαν πως οι οπλισμοί ξεπέρασαν το επιτρεπόμενο όριο διαρροής του δομικού χάλυβα B500C ενώ οι ενισχύσεις παρέμειναν μέσα στα όρια των κανονισμών.

$\epsilon_{yd}(\text{οπλισμού})=0.01\%$

$\epsilon_{yd}(\text{κορδονιού})=0.009\%$

$\epsilon_{yd}(\text{λάμας})=0.017\%$

$\epsilon_d(\text{λάμας})=0.004\%-0.008\%$



Σχήμα 4. Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένης Παραμόρφωσης Οπλισμού, Ενίσχυσης, κωδικοί HCE: παραμορφωσιόμετρα ενισχύσεων, κωδικοί HCO: παραμορφωσιόμετρα οπλισμών

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικότερο συμπέρασμα της παρούσας έρευνας παρουσιάζεται η επιτυχημένη αύξηση της καμπτικής αντοχής των δοκών με όλους τους τρόπους ενίσχυσης. Το ποσοστό της αύξησης κυμαίνεται από 25% έως 40%.

Ο βέλτιστος τρόπος ενίσχυσης που παρατηρήθηκε ήταν τα ελάσματα ινών άνθρακα σε κάθε περίπτωση δοκού. Παρόλα αυτά αποδείχθηκε ότι η ενίσχυση με κορδόνι επέφερε τα προσδοκώμενα αποτελέσματα στην αύξηση της καμπτικής αντοχής και έτσι κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσον ενίσχυσης παράλληλα με άλλες μεθόδους.

Σε μελλοντική έρευνα θα ήταν δόκιμη η αγκύρωση των κορδονιών σύμφωνα με τους κανονισμούς για να διερευνηθεί η λειτουργικότητα τους ως εύκαμπτα στοιχεία.

Η αύξηση της επικάλυψης των δοκών στις οποίες χρειαζόταν κρίνεται επιτυχής. Η κρίση αυτή παρατηρείται στην εμφάνιση των ρωγμών, οι οποίες ξεκινούν από τη πρόσθετη επικάλυψη.

Η αιτία θραύσης των δοκών ήταν η αποκόλληση της ενίσχυσης από το σκυρόδεμα, στα άκρα των δοκών. Η επαναλαμβανόμενη εμφάνιση των συγκεκριμένων θραύσεων αποδεικνύει την επιτυχία της έρευνας.

Με τη προσθήκη των ανθρακουφασμάτων στα άκρα των δοκών παρατηρήθηκε η βελτίωση της αντοχής η οποία ώθησε τη μηχανή κάμψης στα όρια της με αποτέλεσμα να σταματήσει η φόρτιση στα 100kN. Έτσι δεν επιτεύχθηκε θραύση των συγκεκριμένων δοκών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση αυτής της πτυχιακής έρευνας πραγματοποιήθηκε με τη συνεισφορά πολλών ατόμων. Καταλυτικό παράγοντα έπαιξε η υποψήφια Δρ. Γαρυφαλιά Τριανταφύλλου, η οποία εκτέλεσε τους απαραίτητους ελέγχους διαστασιολόγησης των υλικών ενίσχυσης για τις δοκούς της έρευνας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Βασίλειο Σαρλή Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ ο οποίος με συμβούλευε μέσω της εμπειρίας του στις ενισχύσεις κατασκευών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία ΡΑΜΜΟΣ Α.Ε. για τη παροχή του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος καθώς και κυρίως την εταιρεία SIKΑ HELLAS ABEE για τη παροχή των υλικών ενίσχυσης και της συνολικής υποστήριξης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Δρίτσος, Σ. Η. (2005), *Επισκευές Και Ενισχύσεις Κατασκευών*. Γ' Έκδοση. Πάτρα.
- Κ. Σπυρακος (2004), *Ενίσχυση Κατασκευών Για Σεισμικά Φορτία*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος. Αθήνα.
- ΠΑΠΑΣΕΡΑΦΕΙΜ, Α. (2007) 'Ενίσχυση των κατασκευών με χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή', '13ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών'. ΠΑΤΡΑ.
- ACI Comitee 440 (2008), 'ACI 440.2R-08, Guide For The Design And Construction Of Externally Bonded Frp Systems For Strengthening Concrete Structures'
- Charalambidi, B. G., Rousakis, T. C. and Karabinis, A. I. (2016) 'Fatigue Behavior of Large-Scale Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Fiber-Reinforced Polymer Laminates', *Journal of Composites for Construction*.
- Lorenzis, L. De and Nanni, A. (2003) 'Proposed design procedure of NSM FRP reinforcement for strengthening of RC beams', *Proceedings, 6th international symposium on frp reinforcement for concrete structures, Singapore*.
- Technical Report No.55 (2012), 'Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials, reported by the Concrete Society'
- Triantafyllou, G. G., Rousakis, T. C. and Karabinis, A. I. (2017) 'Corroded RC beams patch repaired and strengthened in flexure with fiber-reinforced polymer laminates', *Composites Part B: Engineering*.
- Vazquez, D. (2016) 'Flexural strengthening with NSM reinforcement', Sika, V 1.3(June).