

Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της καμπτικής συμπεριφοράς διαβρωμένων δοκών ωπλισμένου σκυροδέματος επισκευασμένων και ενισχυμένων με ινωπλισμένα πολυμερή
Finite Element Analysis of the flexural behavior of corroded RC beams patch repaired and strengthened with FRP

Γαρυφαλιά Γ. Τριανταφύλλου¹, Θεόδωρος Χ. Ρουσάκης², Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης³

Λέξεις κλειδιά: δοκός, διάβρωση, ΙΩΠ, πεπερασμένα στοιχεία, διεπιφάνειες
Keywords: beam, corrosion, FRP, Finite Element Analysis (FEA), interfaces

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Αντικείμενο μελέτης της εργασίας είναι η αναλυτική διερεύνηση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία της καμπτικής συμπεριφοράς διαβρωμένων δοκών Ω/Σ που έχουν επισκευαστεί και ενισχυθεί με ΙΩΠ άνθρακα πειραματικά. Οι δοκοί διαβρώθηκαν σε τρία διαφορετικά επίπεδα διάβρωσης και ενισχύθηκαν με δύο διαφορετικές μεθόδους ενίσχυσης (EBR είτε NSM) αλλά ισοδύναμο ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης. Σε όλες τις δοκούς προηγήθηκε αντικατάσταση του υποστρώματος και επισκευή με τσιμεντοειδές κονίαμα υψηλής αντοχής. Λωρίδες ΙΩΠ άνθρακα επικολλήθηκαν στα διατμητικά ανοίγματα. Η αναλυτική προσομοίωση ακολούθησε ακριβώς την διάταξη και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών της πειραματικής διαδικασίας και εφαρμόστηκαν πανομοιότυπες συνθήκες φόρτισης. Συγκρίνονται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης της ανάλυσης με τις αντίστοιχες των πειραμάτων και προκύπτει αξιοσημείωτη σύγκλιση, ενώ η καμπτική μορφή αστοχίας μπορεί να προβλεφθεί ικανοποιητικά. Διενεργείται παραμετρική διερεύνηση ώστε να αξιολογηθεί η επιρροή των μηχανικών ιδιοτήτων του παλαιού σκυροδέματος και του επισκευασμένου υποστρώματος.

ABSTRACT : In the current paper, three dimensional Finite Element (FE) models

¹ Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: gtriant@civil.duth.gr

² Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: trousak@civil.duth.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: karabin@civil.duth.gr

for corroded RC beams, patch repaired and strengthened with carbon Fiber Reinforced Polymers are validated against an experimental study. RC beams were corroded at three different corrosion levels and strengthened with externally bonded EBR or near surface mounted NSM CFRP laminates with equivalent axial rigidity. The substrate was initially removed and patch repaired with a polymer modified mortar for all beams. CFRP strips were applied at shear spans. The 3D FE models take into account the configuration and the mechanical properties of the tested beams, as well as the experimental loading conditions. The numerical load-deflection curves and failure modes are evaluated against the experimental results and converge satisfactorily. A parametric study was also conducted to assess the influence of the mechanical properties of the old concrete and of the repair mortar.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρκετές κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα αντιμετωπίζουν βλάβες λόγω διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού και οδηγούνται σε ανεπιθύμητη απώλεια της ικανότητας ανάληψης φορτίου, της πλαστιμότητας και της δυσκαμψίας τους. Η ενίσχυση των κατασκευών Ω/Σ με ινωπλισμένα πολυμερή εφαρμόζεται ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες και έχει προσελκύσει το ερευνητικό ενδιαφέρον και σε στοιχεία με βλάβες λόγω διάβρωσης του οπλισμού. Ενώ έχει διεξαχθεί εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση στο πεδίο των ενισχύσεων με ΙΩΠ, η αναλυτική διερεύνηση είναι πιο περιορισμένη παρόλο που είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της επίδρασης των κρίσιμων παραμέτρων σχεδιασμού στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης. Οι Camata et al. (2004) χρησιμοποίησαν μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με προσομοίωμα μηχανικής της θραύσης προκειμένου να μελετήσουν την αστοχία αποκόλλησης μεταξύ των ελασμάτων ΙΩΠ και του σκυροδέματος και πρόβλεψαν ικανοποιητικά την ανάπτυξη των ρηγματώσεων. Οι Pham et al. (2006) χρησιμοποίησαν προσομοίωμα διακριτών ρωγμών βασισμένο στη μηχανική της θραύσης ώστε να αναπαραστήσουν τη συμπεριφορά στη διεπιφάνεια. Η μη γραμμική διαδικασία της αποκόλλησης του οπλισμού ΙΩΠ μπορεί εναλλακτικά να εκφραστεί με προσομοίωση μιας συνεκτικής ζώνης (cohesive zone model, CZ model). Οι Coronado and Lopez (2006) επεσήμαναν ότι η ενέργεια αστοχίας της διεπιφάνειας του σκυροδέματος έχει καθοριστικό ρόλο στην πρόβλεψη της αστοχίας λόγω αποκόλλησης των ΙΩΠ. Ο Wang (2006) χρησιμοποίησε διγραμμικό νόμο συνάφειας-ολίσθησης για την προσομοίωση της διεπιφάνειας σκυροδέματος-ΙΩΠ ως συνεκτικής ζώνης. Η διατμητική ικανότητα δοκών και η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε πειραματικά μπόρεσε να προβλεφθεί ικανοποιητικά από την ανάλυση των Manos et al. (2014). Τρισδιάστατο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποίησαν και οι Rezazadeh et al. (2016) ώστε να προσομοιώσουν ενισχυμένες δοκούς με συστήματα ιών άνθρακα, το οποίο παρουσίασε ικανοποιητική σύγκλιση της γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών και των διεπιφανειών ανάμεσα στο σκυρόδεμα και την εποξειδική ρητίνη και ανάμεσα στην εποξειδική ρητίνη και τον οπλισμό ενίσχυσης. Περιορισμένη έρευνα έχει διεξαχθεί στο πεδίο της αναλυτικής διερεύνησης διαβρωμένων δοκών επισκευασμένων και ενισχυμένων με ΙΩΠ. Οι Almassri et al (2016) βασιζόμενοι στην πειραματική μελέτη τους, ανέπτυξαν

αναλυτικά προσομοιώματα διαβρωμένων δοκών ενισχυμένων με μια ράβδο εγκοπής ινών άνθρακα θεωρώντας πλήρη συνάφεια ανάμεσα στο σκυρόδεμα και την ράβδο εγκοπής, ενώ δεν είχε προηγηθεί αντικατάσταση του σαθρού σκυροδέματος.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά προσομοιώματα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (με την χρήση του λογισμικού ABAQUS) διαβρωμένων δοκών Ω/Σ που έχουν επισκευαστεί και ενισχυθεί με ΙΩΠ. Προσομοιώνεται με ιδιαίτερη ακρίβεια η πειραματική διαδικασία που αφορούσε την αντικατάσταση του ρηγματωμένου υποστρώματος με τσιμεντοειδές κονίαμα υψηλής αντοχής και την εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων καμπτικής ενίσχυσης (EBR και NSM) με ισοδύναμο ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης σε δοκούς με τρεις διαφορετικούς βαθμούς διάβρωσης (Triantafyllou et al. 2018). Τα αναλυτικά προσομοιώματα περιλαμβάνουν τρεις διαφορετικές κρίσιμες διεπιφάνειες ανάμεσα στα υλικά (παλαιό σκυρόδεμα-επισκευαστικό κονίαμα, επισκευαστικό κονίαμα-εποξειδική ρητίνη, εποξειδική ρητίνη-ΙΩΠ) με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιολογούνται με βάση τα αντίστοιχα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και συγκλίνουν ικανοποιητικά. Παράλληλα, διενεργείται παραμετρική διερεύνηση ώστε να αξιολογηθεί η επιρροή των μηχανικών ιδιοτήτων του παλαιού σκυροδέματος και του επισκευασμένου υποστρώματος.

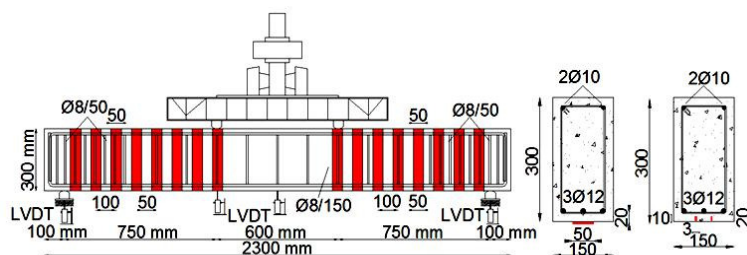
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Διάταξη δοκιμών και διαδικασία επισκευής και ενίσχυσης

Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος και Αντισεισμικών Κατασκευών του Δ.Π.Θ και περιελάμβανε 1 δοκό αναφοράς χωρίς διάβρωση και χωρίς ενίσχυση (RC-N) και 9 δοκούς που διαβρώθηκαν υπό τις ίδιες συνθήκες επιταχυνόμενης διαδικασίας σε τρεις διαφορετικούς βαθμούς διάβρωσης. Όλες οι δοκοί έχουν πλάτος 150 mm, ύψος 300 mm, συνολικό μήκος 2300 mm και θεωρητικό άνοιγμα 2100 mm. Ο εφελκόμενος χαλύβδινος οπλισμός αποτελείται από τρεις ράβδους διαμέτρου 12 mm, ο θλιβόμενος οπλισμός από δύο ράβδους 10 mm, ενώ ο εγκάρσιος οπλισμός αποτελείται από συνδετήρες διαμέτρου 8 mm τοποθετημένους ανά 150 mm στο μεσαίο άνοιγμα των δοκών και ανά 50 mm στα άκρα αυτών. Η καθαρή επικάλυψη του σκυροδέματος ισούται με 20 mm. Η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος 28 ημερών μετρήθηκε ίση με 34.6 MPa, το μέτρο Ελαστικότητας ίσο με 32300 MPa και η μέση εφελκυστική αντοχή ίση με 2.2 MPa. Ο χαλύβδινος οπλισμός είχε ονομαστική αντοχή διαρροής 500 MPa, ενώ από δοκιμές εφελκυσμού μετρήθηκε μέση αντοχή διαρροής ίση με 552 MPa και μέση αντοχή θραύσης ίση με 653 MPa.

Οι δοκοί διαβρώθηκαν μέσω επιταχυνόμενης διαδικασίας, η οποία περιελάμβανε την βύθισή τους σε δεξαμενή διαλύματος NaCl περιεκτικότητας 3% και την εφαρμογή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος στον εφελκόμενο οπλισμό.

Ακολουθούσαν εναλλάξ κύκλοι εντός της δεξαμενής και εκτός αυτής για περαιτέρω φυσική έκθεση. Η πραγματική απώλεια μάζας του διαβρωμένου χάλυβα μετρήθηκε από ράβδους που αφαιρέθηκαν και καθαρίστηκαν για το χαμηλό επίπεδο διάβρωσης ίση με $m_{grav,low}=7.56\%$, για το μέτριο επίπεδο διάβρωσης ίση με $m_{grav,medium}=15.48\%$ και για το υψηλό επίπεδο διάβρωσης ίση με $m_{grav,high}=24.15\%$. Το ρηγματωμένο υπόστρωμα των διαβρωμένων δοκών αφαιρέθηκε, ο διαβρωμένος οπλισμός καθαρίστηκε, εφαρμόστηκαν αναστολέας διάβρωσης και κονίαμα ενίσχυσης πρόσφυσης και τελικά κονίαμα τσιμεντοειδούς βάσης υψηλής αντοχής 50 MPa στις 28 ημέρες. Οι ακμές του εφελκόμενου πέλατος καμπυλώθηκαν με ακτίνα καμπυλότητας 17 mm προκειμένου να επικολληθούν οι λωρίδες ινών άνθρακα στα διατμητικά ανοίγματα. Δύο μέθοδοι καμπτικής ενίσχυσης εφαρμόστηκαν με ισοδύναμο ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης: α) επικόλληση εξωτερικού ελάσματος ινών άνθρακα πλάτους 50 mm και πάχους 1.2 mm στο εφελκόμενο πέλμα (μέθοδος EBR) και β) εφαρμογή δύο ελασμάτων εγκοπής ινών άνθρακα πλάτους 10 mm και πάχους 3 mm σε ειδικά διαμορφωμένες εγκοπές βάθους 15 mm και πλάτους 9 mm στο κάτω πέλμα (μέθοδος NSM). Ο καμπτικός οπλισμός ενίσχυσης είχε εφελκυστική αντοχή ίση με 3100 MPa, μέτρο Ελαστικότητας 165000 MPa και επιμήκυνση θραύσης ίση με 1.7%. Οκτώ λωρίδες ινών άνθρακα επικολλήθηκαν σε κάθε διατμητικό άνοιγμα, πλάτους 50 mm και απόστασης 100 mm μετρούμενης κεντροβαρικά. Για τον μικρό και μέτριο βαθμό διάβρωσης επικολλήθηκαν λωρίδες μορφής U-CFRP σε δύο στρώσεις, ενώ για τον υψηλό βαθμό διάβρωσης επικολλήθηκαν λωρίδες σε τέσσερις στρώσεις κατάλληλα αγκυρωμένες κλειστής μορφής, καθώς αρκετοί συνδετήρες ήταν πλήρως κομμένοι. Τα υφάσματα ινών άνθρακα είχαν πάχος 0.171 mm, εφελκυστική αντοχή 3800 MPa, μέτρο Ελαστικότητας 242000MPa και επιμήκυνση θραύσης 1.43%. Όλα τα υλικά αντιδιαβρωτικής προστασίας, επισκευής και ενίσχυσης είναι προϊόντα της εταιρίας Sika Hellas ABEE, Κρυονέρι Αττικής. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η διάταξη των υπό μελέτη δοκιμίων. Όλες οι δοκοί υποβλήθηκαν σε συνθήκες μονότονης φόρτισης τεσσάρων σημείων μέχρι την αστοχία τους.

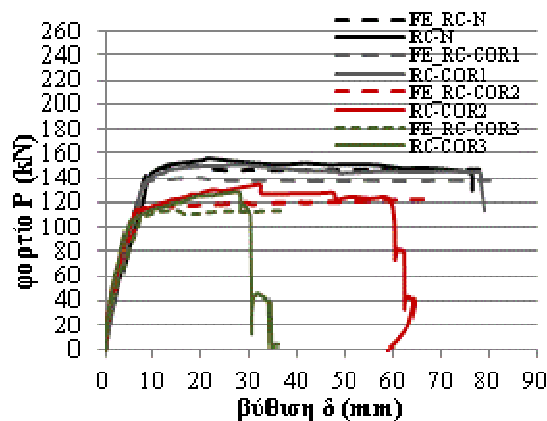


Σχήμα 1. Διατομή και διάταξη οπλισμών και φόρτισης των υπό μελέτη δοκιμίων.

Πειραματικά αποτελέσματα

Τα διαγράμματα φορτίου P (kN)-βύθισης δ (mm) της δοκού χωρίς διάβρωση και των διαβρωμένων δοκών χωρίς και με ενίσχυση παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-4. Η μορφή αστοχίας της δοκού χωρίς διάβρωση (RC-N) και της διαβρωμένης

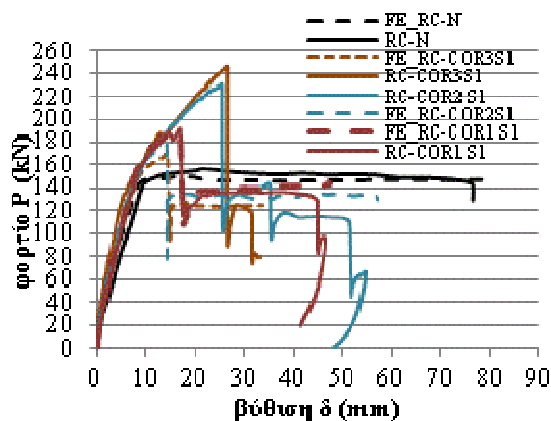
δοκού με χαμηλό βαθμό διάβρωσης RC-COR1 ήταν καμπτική με διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα και θραύση του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη. Για την δοκό RC-COR1 καταγράφηκε χαμηλότερο μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο κατά 4% (150.9 kN) σε σχέση με την δοκό χωρίς διάβρωση (156.9 kN), αλλά μεγαλύτερη βύθιση αστοχίας κατά 2.45% (78.1 mm) συγκριτικά με την δοκό χωρίς διάβρωση (76.3 mm). Για μεγαλύτερα επίπεδα διάβρωσης, οι δοκοί RC-COR2 (μέτριος βαθμός) και RC-COR3 (υψηλός βαθμός) αστόχησαν λόγω διαρροής του εφελκόμενου χάλυβα και τελικά σημειώθηκε θραύση των διαβρωμένων εφελκόμενων ράβδων. Το μέγιστο φορτίο της δοκού RC-COR2 ήταν μειωμένο κατά 14.6% (134.1 kN), ενώ η βύθιση κατά την αστοχία μειώθηκε κατά 15.47% (64.5 mm) σε σχέση με την δοκό RC-N. Για την δοκό RC-COR3, το μέγιστο φορτίο μειώθηκε κατά 18.5% (127.8 kN) και η βύθιση κατά την αστοχία μειώθηκε κατά 52.7% (36.1 mm) σε σχέση με την δοκό χωρίς διάβρωση RC-N.



Σχήμα 2. Διαγράμματα φορτίου-βύθισης της δοκού χωρίς διάβρωση και των διαβρωμένων δοκών χωρίς ενίσχυση.

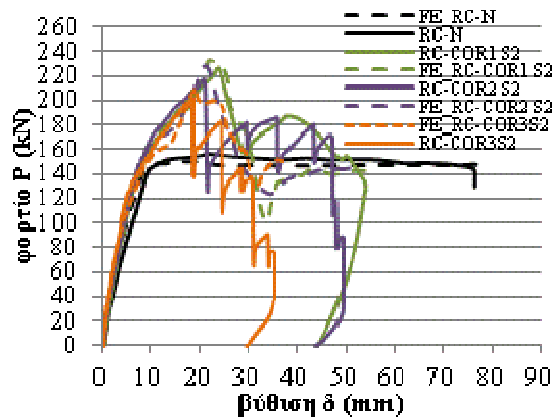
Η μορφή αστοχίας της δοκού με χαμηλό βαθμό διάβρωσης που επισκευάστηκε και ενισχύθηκε με εξωτερικό έλασμα RC-COR1S1 (μέθοδος EBR) χαρακτηρίστηκε από αποκόλληση του εξωτερικού ελάσματος αφού προηγήθηκε διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα. Σημειώθηκε επιπρόσθετα ενδιάμεση αποκόλληση ανάμεσα στο παλιό σκυρόδεμα και το επισκευασμένο κονίαμα (ρωγμή 0.60 mm) και τελικά αστόχησε η θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος. Καταγράφηκε μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο ίσο με 191.7 kN σε βύθιση 17 mm, το οποίο ήταν κατά 22.1% μεγαλύτερο σε σχέση με την δοκό χωρίς διάβρωση RC-N. Η δοκός RC-COR2S1 με μέτριο βαθμό διάβρωσης και ενίσχυση με EBR αστόχησε σε πολύ μεγαλύτερο φορτίο ίσο με 230.5 kN σε βύθιση 25.3 mm λόγω αποκόλλησης του εξωτερικού ελάσματος, το οποίο είναι κατά 46.9% μεγαλύτερο συγκριτικά με την δοκό RC-N. Διαμήκης ρωγμή εύρους 1.50 mm σχηματίστηκε ανάμεσα στην διεπιφάνεια παλαιού σκυροδέματος-κονιάματος και τελικά δύο διαβρωμένες εφελκόμενες ράβδοι αστόχησαν. Η μορφή αστοχίας της

δοκού RC-COR3S1 με υψηλό βαθμό διάβρωσης και ενίσχυση με EBR ήταν διαφορετική, καθώς αναπτύχθηκε πολύ μεγαλύτερο αναλαμβανόμενο φορτίο ίσο με 245.6 kN σε βύθιση 26.7 mm και τελικά σημειώθηκε θραύση του εξωτερικού ελάσματος ινών άνθρακα. Οι έντονες βλάβες που προκάλεσε η διάβρωση στους συνδετήρες ενεργοποίησαν ακόμη περισσότερο τον μηχανισμό ενδιάμεσης αγκύρωσης που παρέχουν οι εγκάρσιες λωρίδες ΙΩΠ. Μια πολύ μικρή ρωγμή εύρους μικρότερη από 0.10 mm σχηματίστηκε στην διεπιφάνεια των δύο σκυροδεμάτων και τελικά δύο διαβρωμένες ράβδοι αστόχησαν.



Σχήμα 3. Διαγράμματα φορτίου-βύθισης της δοκού χωρίς διάβρωση και των διαβρωμένων δοκών ενισχυμένων με εξωτερικό έλασμα (μέθοδος EBR).

Η δοκός με χαμηλό βαθμό διάβρωσης που επισκευάστηκε και ενισχύθηκε με δύο ελάσματα εγκοπής RC-COR1S2 (μέθοδος NSM) αστόχησε λόγω αποκόλλησης με την μορφή του διαχωρισμού του σκυροδέματος μετά την διαρροή του εφελκούμενου χάλυβα, σημειώθηκε ενδιάμεση αποκόλληση ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευασμένο κονίαμα (ρωγμή 0.60 mm) και τελικά θραύση του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη. Το μέγιστο φορτίο καταγράφηκε ίσο με 226.6 kN σε βύθιση ίση με 24.1 mm, το οποίο και ήταν κατά 18.2% υψηλότερο σε σχέση με την ενισχυμένη δοκό με EBR RC-COR1S1 και κατά 44.4% σε σχέση με την δοκό χωρίς διάβρωση RC-N. Η δοκός RC-COR2S2 με μέτριο βαθμό διάβρωσης και ενίσχυση με NSM κατέγραψε μέγιστο φορτίο ίσο με 216.3 kN σε βύθιση 21 mm, το οποίο είναι κατά 6.1% χαμηλότερο σε σχέση με την ενισχυμένη δοκό RC-COR2S1 και κατά 37.8% μεγαλύτερο σε σχέση με την δοκό RC-N. Για την δοκό RC-COR3S2 με υψηλό βαθμό διάβρωσης και ενίσχυση με NSM το μέγιστο φορτίο καταγράφηκε ίσο με 202.2 kN σε βύθιση 18.5 mm το οποίο είναι χαμηλότερο κατά 17.7% σε σχέση με την δοκό RC-COR3S1 και κατά 28.8% μεγαλύτερο σε σχέση με την δοκό RC-N. Διαμήκεις ρωγμές μέγιστου εύρους 0.80 mm άνοιξαν στην διεπιφάνεια παλαιού σκυροδέματος-επισκευαστικού κονιάματος για την δοκό RC-COR2S2, ενώ καμιά αστοχία δεν παρατηρήθηκε στην δοκό RC-COR3S2 εκτός από μια μικρή ρωγμή εύρους <math>< 0.10\text{ mm}</math>. Τελικά, δύο διαβρωμένες ράβδοι αστόχησαν.

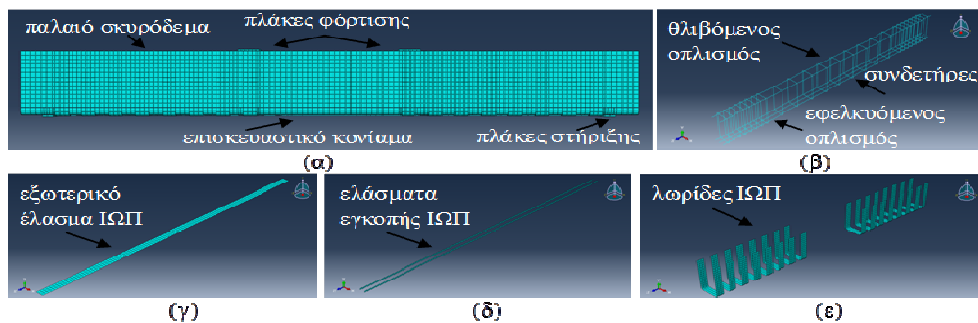


Σχήμα 4. Διαγράμματα φορτίου-βύθισης της δοκού χωρίς διάβρωση και των διαβρωμένων δοκών ενισχυμένων με ελάσματα εγκοπής (μέθοδος NSM).

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Περιγραφή του προσομοιώματος με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

Η αναλυτική προσομοίωση της καμπτικής συμπεριφοράς των δοκών Ω/Σ που μελετήθηκαν πειραματικά διεξήχθη με την χρήση του λογισμικού ABAQUS. Το παλαιό σκυρόδεμα, το επισκευασμένο υπόστρωμα με κονίαμα υψηλής αντοχής (σχεδιάστηκε μέχρι το ύψος της μισής διατομής των εφελκόμενων ράβδων), η εποξειδική ρητίνη και οι πλάκες φόρτισης και στηρίξεων προσομοιώθηκαν ως στερεά στοιχεία τρισδιάστατης μορφής οκτώ κόμβων (type C3D8R). Οι γωνίες του κάτω πέλματος καμπυλώθηκαν με ακτίνα καμπυλότητας 17 mm, όπως ακριβώς και στην πειραματική διαδικασία. Η διεπιφάνεια ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευασμένο υπόστρωμα και η διεπιφάνεια ανάμεσα στο επισκευασμένο υπόστρωμα και τον καμπτικό οπλισμό ενίσχυσης, προσομοιώθηκαν ως CZ με κατάλληλη απόκριση πρόσφυσης-αποχωρισμού (traction-separation) με την βοήθεια στερεών στοιχείων τρισδιάστατης μορφής οκτώ κόμβων (type C3D8R). Το εξωτερικό έλασμα, τα ελάσματα εγκοπής και οι λωρίδες ινών άνθρακα προσομοιώθηκαν ως ιδεατά στοιχεία μορφής κελύφους τεσσάρων κόμβων (type S4R). Ο διαμήκης εφελκόμενος και θλιβόμενος χαλύβδινος οπλισμός και οι συνδετήρες προσομοιώθηκαν ως τρισδιάστατα στοιχεία δύο κόμβων δικτύματος (type T3D2), τα οποία ενσωματώθηκαν στο σώμα του σκυροδέματος. Τα διακριτά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην διακριτοποίηση είχαν μέγεθος 25 mm. Χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος φόρτισης κάμψης τεσσάρων σημείων μέχρι την αστοχία εφαρμόζοντας το πειραματικό ιστορικό μετατοπίσεων. Η μη γραμμική ανάλυση έγινε σύμφωνα με την δυναμική επίλυση του λογισμικού (ABAQUS/EXPLICIT). Στην Εικόνα 1 απεικονίζονται τα επί μέρους στοιχεία του αναλυτικού προσομοιώματος.



Εικόνα 1. Τρισδιάστατο προσομοίωμα δοκού (α), χαλύβδινων οπλισμών (β), εξωτερικού ελάσματος ΙΩΠ (γ), ελασμάτων εγκοπής ΙΩΠ (δ) και λωρίδων ΙΩΠ (ε).

Προσομοίωση των υλικών και διεπιφανειών

Η προσομοίωση του υλικού του σκυροδέματος έγινε με βάση το μοντέλο Concrete Damaged Plasticity που προτάθηκε από τους Lubliner et al. (1989) και Lee and Fenves (1998) ώστε να εκφραστεί η θλιπτική και εφελκυστική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Θεωρούνται δύο βασικοί μηχανισμοί αστοχίας, οι οποίοι είναι ο σχηματισμός των ρηγματώσεων και η διάδοσή τους σε εφελκυσμό και η ελαστο-πλαστικότητα σε θλίψη. Οι παράμετροι που υιοθετήθηκαν είναι η γωνία διόγκωσης ψ , η εκκεντρότητα e , ο λόγος ανάμεσα στην θλιπτική αντοχή σε διαξονική και μονοαξονική θλιπτική τάση $f_{b,offco}$, το σχήμα της επιφάνειας φόρτισης K_c και η παράμετρος ιξώδους V . Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, το μέτρο Ελαστικότητας και η εφελκυστική αντοχή ελήφθησαν από τις αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές των κυλινδρικών δοκιμίων 28 ημερών. Για το τσιμεντοειδές κονίαμα υψηλής αντοχής που εφαρμόστηκε στο υπόστρωμα των δοκών, χρησιμοποιήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά που προτείνονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Ο λόγος του Poisson θεωρήθηκε ίσος με 0.20. Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του χαλύβδινου οπλισμού υιοθετήθηκε η ελαστο-πλαστική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού. Ο λόγος του Poisson θεωρήθηκε ίσος με 0.30. Η μηχανική συμπεριφορά των ΙΩΠ προσομοιώθηκε ως γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής κατά την αστοχία και της παραμόρφωσης θραύσης με βάση το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Η εφελκυστική συμπεριφορά της εποξειδικής ρητίνης επίσης προσομοιώθηκε με βάση την ελαστο-πλαστική σχέση τάσεων παραμορφώσεων του υλικού. Η μη γραμμική αστοχία που συμπεριλαμβάνει την επιφανειακή αποκόλληση ανάμεσα στις διεπιφάνειες του σκυροδέματος-κονιάματος και του κονιάματος-ΙΩΠ, προσομοιώθηκε με βάση το προσομοίωμα CZ (cohesive zone model). Το στάδιο της έναρξης της αστοχίας στην διεπιφάνεια και το στάδιο διάδοσής της, περιγράφονται μέσω του νόμου πρόσφυσης-αποχωρισμού, με μικτή λειτουργία που περιλαμβάνει σχέσεις τάσεων-διαχωρισμού και διατμητικών τάσεων-ολίσθησης.

Αποτελέσματα ανάλυσης με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα της πειραματικής διερεύνησης και προέκυψε αξιοσημείωτη σύγκλιση (Σχήμα 2-4). Για την δοκό αναφοράς χωρίς διάβρωση RC-N ο λόγος αναλυτικού προς πειραματικού μέγιστου φορτίου προέκυψε ίσος με 0.95, ενώ ο αντίστοιχος λόγος της βύθισης αστοχίας ίσος με 1.05. Για όλες τις διαβρωμένες δοκούς λήφθηκε υπόψη η αντίστοιχη απώλεια μάζας του εφελκυσμένου χάλυβα που μετρήθηκε πειραματικά. Για την δοκό αναφοράς με χαμηλό βαθμό διάβρωσης RC-COR1 ο λόγος αναλυτικού προς πειραματικού μέγιστου φορτίου προέκυψε ίσος με 0.93, ενώ ο αντίστοιχος λόγος της βύθισης αστοχίας ίσος με 1.04. Για τις δοκούς RC-COR2 και RC-COR3 με εντονότερη διάβρωση ο λόγος αναλυτικού προς πειραματικού μέγιστου φορτίου προέκυψε ίσος με 0.91 και 0.90, ενώ ο αντίστοιχος λόγος της βύθισης αστοχίας ίσος με 1.02 και 1.04 για τον μέτριο και υψηλό βαθμό διάβρωσης αντίστοιχα. Η μορφή αστοχίας κατά την ανάλυση των δοκών χωρίς ενίσχυση ήταν καμπτική με διαρροή του εφελκυσμένου χαλύβδινου οπλισμού και τελικά θραύση της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος.

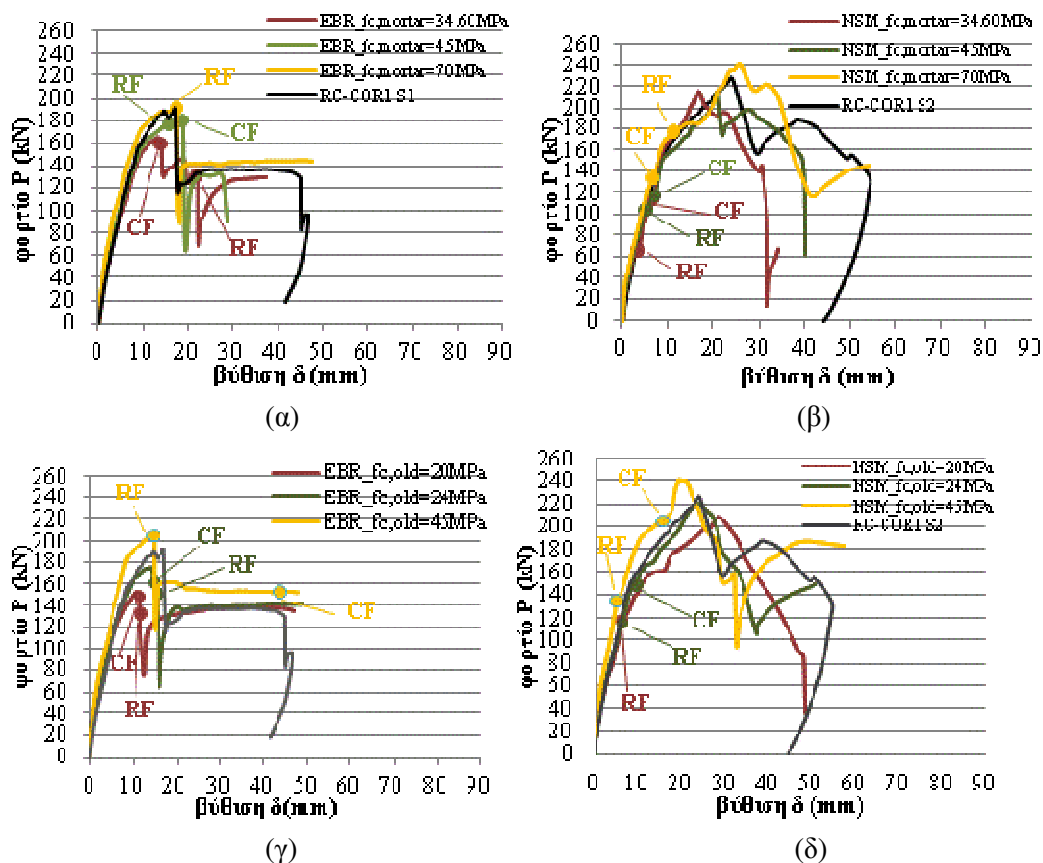
Για την διαβρωμένη ενισχυμένη δοκό με εξωτερικό έλασμα (EBR) και χαμηλό βαθμό διάβρωσης RC-COR1S1, το αναλυτικό προς το πειραματικό μέγιστο φορτίο παρουσίασαν μεγάλη σύγκλιση και ο αντίστοιχος λόγος τους προέκυψε ίσος με 0.98, ενώ ο λόγος αναλυτικής προς πειραματική βύθιση αστοχίας προέκυψε ίσος με 0.90. Καταγράφηκε καμπτική μορφή αστοχίας κατά την ανάλυση με διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα και αποκόλληση του ελάσματος ΙΩΠ, ενώ κατά το μέγιστο φορτίο αστόχησε η διεπιφάνεια ανάμεσα στην εποξειδική ρητίνη και το έλασμα. Για τις διαβρωμένες ενισχυμένες δοκούς με εξωτερικό έλασμα και μέτριο (RC-COR2S1) και υψηλό (RC-COR3S1) βαθμό διάβρωσης, η αποκόλληση του ελάσματος καταγράφηκε κατά την ανάλυση σε χαμηλότερα μέγιστα φορτία και αντίστοιχα χαμηλότερες βυθίσεις με λόγους αναλυτικού προς πειραματικού μέγιστου φορτίου ίσους με 0.77 και 0.70. Κατά το μέγιστο φορτίο αστόχησε πρώτα η διεπιφάνεια ανάμεσα στην εποξειδική ρητίνη και το καμπτικό έλασμα και αμέσως μετά συνέβη αποκόλληση στην διεπιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος με το επισκευαστικό κονίαμα. Περεταίρω πειραματική και αναλυτική έρευνα θα πρέπει να διεξαχθεί ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή της αυξανόμενης ορθής τάσης ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευαστικό κονίαμα ως αποτέλεσμα της συνεισφοράς του διατμητικού οπλισμού ενίσχυσης με λωρίδες ΙΩΠ.

Για την διαβρωμένη ενισχυμένη δοκό με ελάσματα εγκοπής (NSM) και με χαμηλό βαθμό διάβρωσης RC-COR1S2, ο λόγος αναλυτικού προς πειραματικού μέγιστου φορτίου προέκυψε ίσος με 1.03, ενώ ο αντίστοιχος λόγος της βύθισης αστοχίας ίσος με 0.91. Κατά το μέγιστο φορτίο, η διεπιφάνεια ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευαστικό κονίαμα αστόχησε πρώτα, ενώ λίγο αργότερα σημειώθηκε αστοχία της διεπιφάνειας ανάμεσα στην εποξειδική ρητίνη και τα ελάσματα εγκοπής. Για τις ενισχυμένες δοκούς με ελάσματα εγκοπής και μέτριο (RC-COR2S2) και υψηλό (RC-COR3S2) βαθμό διάβρωσης, ο λόγος αναλυτικού προς πειραματικού μέγιστου φορτίου προέκυψε ίσος με 1.05 και 1.04,

ενώ ο αντίστοιχος λόγος της βύθισης αστοχίας ίσος με 0.98 και 1.04. Η αστοχία σημειώθηκε λόγω αποκόλλησης της διεπιφάνειας ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευαστικό κονιάμα αρχικά και έπειτα ανάμεσα στην εποξειδική ρητίνη και τα ελάσματα εγκοπής.

Παραμετρική ανάλυση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία

Παράλληλα διερευνήθηκε η επιρροή της θλιπτικής αντοχής του παλαιού σκυροδέματος και του επισκευαστικού κονιάματος στην φέρουσα ικανότητα των δοκών. Χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο προσομοίωμα της δοκού με χαμηλό βαθμό διάβρωσης, επισκευασμένης και ενισχυμένης με εξωτερικό έλασμα (EBR) και ελάσματα εγκοπής (NSM) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά των δοκών RC-COR1S1 και RC-COR1S2.



Σχήμα 5. Η επιρροή της αντοχής του επισκευαστικού κονιάματος για τις διαβρωμένες ενισχυμένες δοκούς με την μέθοδο EBR (α) και την μέθοδο NSM (β). Η επιρροή της αντοχής του παλαιού σκυροδέματος για τις διαβρωμένες ενισχυμένες δοκούς με την μέθοδο EBR (γ) και την μέθοδο NSM (δ).

Διερευνήθηκαν τρεις θλιπτικές αντοχές επισκευαστικού κονιάματος. Σε ό,τι αφορά την ενίσχυση με EBR και θεωρώντας αντοχή κονιάματος ίση με $f_{c,mortar}=34.6$ MPa (ισοδύναμη με αυτή που είχε το παλαιό σκυρόδεμα στην πειραματική διαδικασία), η φέρουσα ικανότητα κατά την αστοχία μειώθηκε κατά 14% σε σχέση με την δοκό RC-COR1S1, ενώ προηγήθηκε η αποκόλληση της διεπιφάνειας ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευαστικό κονίαμα. Για αντοχή ίση με $f_{c,mortar}=45$ MPa πρώτα αστόχησε η διεπιφάνεια ανάμεσα στην εποξειδική ρητίνη και το έλασμα και το φορτίο μειώθηκε κατά 6.1%. Αυξάνοντας την αντοχή του κονιάματος, βελτιώνεται η συνολική συμπεριφορά της δοκού (Σχήμα 5α). Σε ό,τι αφορά την ενίσχυση με NSM και θεωρώντας αντοχή κονιάματος μικρότερη από $f_{c,mortar}=45$ MPa, το μέγιστο φορτίο μειώθηκε κατά περίπου 5.7% σε σχέση με την δοκό RC-COR1S2 και προηγήθηκε η αστοχία στην διεπιφάνεια εποξειδικής ρητίνης και ελασμάτων εγκοπής. Για μεγαλύτερη αντοχή κονιάματος το μέγιστο φορτίο αυξήθηκε κατά 5.9% και πρώτα αστόχησε η διεπιφάνεια του παλαιού σκυροδέματος με το κονίαμα (Σχήμα 5β). Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν τρεις θλιπτικές αντοχές παλαιού σκυροδέματος. Σε ό,τι αφορά την ενίσχυση με EBR και θεωρώντας αντοχή ίσης με $f_{c,old}=20$ MPa και $f_{c,old}=24$ MPa, το μέγιστο φορτίο μειώθηκε κατά 20.7% και κατά 9%, ενώ προηγήθηκε αστοχία ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευαστικό κονίαμα. Αυξάνοντας την αντοχή στο παλαιό σκυρόδεμα πάνω από $f_{c,old}=45$ MPa, η διεπιφάνεια της εποξειδικής ρητίνης με το έλασμα αστόχησε πρώτη, ενώ το μέγιστο φορτίο κατά την αστοχία ήταν μεγαλύτερο κατά 7.5% σε σχέση με την δοκό RC-COR1S1 (Σχήμα 5γ). Σε ό,τι αφορά την ενίσχυση με NSM και θεωρώντας αντοχή παλαιού σκυροδέματος μικρότερη από $f_{c,old}=24$ MPa, το μέγιστο φορτίο μειώθηκε κατά περίπου 2.8% σε σχέση με την δοκό RC-COR1S2 και προηγήθηκε η αστοχία στην διεπιφάνεια εποξειδικής ρητίνης και ελασμάτων εγκοπής. Για αντοχή σκυροδέματος ίσης με $f_{c,old}=45$ MPa, το μέγιστο φορτίο αυξήθηκε κατά 5.9% (Σχήμα 5δ).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναλυτικά προσομοιώματα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία δοκών με χαμηλό, μέτριο και υψηλό βαθμό διάβρωσης, επισκευασμένων με κονίαμα υψηλής αντοχής και ενισχυμένων με εξωτερικό έλασμα (μέθοδος EBR) και με δύο ελάσματα εγκοπής (μέθοδος NSM) αξιολογούνται με βάση αντίστοιχο πειραματικό πρόγραμμα. Τα προσομοιώματα μπορούν να περιγράψουν την μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία, καθώς επίσης και την διεπιφάνεια ανάμεσα στο παλαιό σκυρόδεμα και το επισκευαστικό κονίαμα και ανάμεσα στο επισκευαστικό κονίαμα-εποξειδική ρητίνη-οπλισμό ενίσχυσης ΙΩΠ. Οι αναλυτικές προβλέψεις συγκλίνουν ικανοποιητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα σε ό,τι αφορά την φέρουσα ικανότητα και την μορφή αστοχίας. Από την παραμετρική διερεύνηση της αντοχής του παλαιού σκυροδέματος και του επισκευαστικού κονιάματος προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η αντοχή βελτιώνεται ο μηχανισμός μεταφοράς δύναμης μεταξύ των σκυροδεμάτων αλλά και του οπλισμού ενίσχυσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) από το πρόγραμμα «ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΕΙΑΣ ΙΚΥ/SIEMENS». Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στην εταιρία Sika Hellas για την προσφορά των υλικών αντιδιαβρωτικής προστασίας, επισκευής και ενίσχυσης των δοκών του πειραματικού προγράμματος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Almassri B., Al Mahmoud F., Francois R., “Behavior of corroded reinforced concrete beams repaired with NSM CFRP rods, experimental and finite element study”. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 92 (2016), 477-488.

Camata G., Spacone E., Al-Mahaidi R., Saouma V., “Analysis of test specimens for cohesive near-bond failure of fiber-reinforced polymer plated concrete”. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, No 6 (2004), 528-538.

Coronado C., Lopez M., “Sensitivity analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates”. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, No 1 (2006), 102-114.

Lee J., Fenves G., “Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures”. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No 8 (1998), 892-900.

Lubliner J., Oliver J., Oller S., Onate E., “A plastic-damage model for concrete”. *International Journal of Solids and Structure*, Vol 25, No 3 (1989), 299-326.

Manos G., Theofanous M., Katakalos K., “Numerical simulation of the shear behavior of reinforced concrete rectangular beam specimens with or without FRP-strip shear reinforcement”. *Advances in Engineering Software*, Vol. 67 (2014), 47-56.

Pham H., Al-Mahaidi R., Saouma V., “Modeling of CFRP-concrete bond using smeared and discrete cracks”. *Composites Structures*, Vol. 75 (2006), 145-150.

Rezazadeh M., Cholostiakow S., Kotynia R., Barros J., “Exploring new NSM reinforcements for the flexural strengthening of RC beams: Experimental and numerical research”. *Composite Structures*, Vol. 141 (2016), 132-145.

SIMULIA, Abaqus, Theory Manual (6.12), Dassault Systems, Providence, RI, USA, (2012).

Triantafyllou G.G, Rousakis T.C., Karabinis A.I., “Effect of patch repair and strengthening with EBR and NSM CFRP laminates for RC beams with low, medium and heavy corrosion”. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 133, (2018) 101-111.

Wang J., “Cohesive zone model of intermediate crack-induced debonding of FRP-plated concrete beam”. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43 (2006), 6630-6648.