

## Συμπεριφορά δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα με διαβρωμένο χαλύβδινο οπλισμό υπό φορτίο λειτουργικότητας

### Γαρυφαλιά Γ. Τριανταφύλλου

Υποψήφια Διδάκτωρ, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ,  
E-mail: gtriant@civil.duth.gr

### Θεόδωρος Χ. Ρουσάκης

Επίκουρος Καθηγητής, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ,  
E-mail: trousak@civil.duth.gr

### Αθανάσιος Ι. Καραμπίνης

Καθηγητής, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ,  
E-mail: karabin@civil.duth.gr

### Εισαγωγή

Η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα υποβάθμισης των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Καθώς οι χαλύβδινες ράβδοι διαβρώνονται, η αντίστοιχη διατομή τους μειώνεται (Roberge 1999). Τα προϊόντα λόγω διάβρωσης εναποτίθενται γύρω από τις ράβδους προκαλώντας μεγαλύτερο όγκο από τον όγκο της εναπομένουσας ράβδου. Το σκυρόδεμα γύρω από τις διαβρωμένες πλέον ράβδους δέχεται εφελκυστικές τάσεις, οι οποίες όταν υπερβούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος προκαλούν ρηγματώσεις του σκυροδέματος. Οι ρηγματώσεις μειώνουν την αντοχή και τη δυσκαμψία των κατασκευών και επιταχύνουν τη διείδυση των διαβρωτικών παραγόντων, οδηγώντας σε περαιτέρω ρηγμάτωση του σκυροδέματος (Mehta and Gerwick 1982). Η δομική ακεραιότητα των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα που υποβάλλονται σε διαδικασία διάβρωσης, μειώνεται λόγω της απώλειας συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος καθώς και λόγω της απώλειας της διατομής των χαλύβδινων ράβδων (Soudki and Sherwood 2000).

Εκτεταμένη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί με αντικείμενο την επιρροή της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού στην επιτελεστικότητα των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Η διαδικασία της διάβρωσης είναι συνήθως επιταχυνόμενη με την χρήση σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος στον χαλύβδινο οπλισμό και προϊόντων χλωρίου, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται. Η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στη συμπεριφορά διαβρωμένων στοιχείων τα οποία πρώτα διαβρώθηκαν έως ένα ποσοστό και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε φόρτιση μέχρι την αστοχία τους. Υπό πραγματικές συνθήκες, η διάβρωση και φόρτιση των κατασκευών που φέρουν τα φορτία λειτουργικότητας είναι μια ταυτόχρονη διαδικασία. Ένα στοιχείο από ωπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο έχει καμπτικές ρωγμές λόγω επιβολής σταθερού φορτίου, διαβρώνεται πιο γρήγορα σε σχέση με ένα μη ρηγματωμένο στοιχείο (Yoon 2000, Mohammed et al. 2001). Οι Yoon et al. (2000) διερεύνησαν την επιρροή της φόρτισης και διάβρωσης σε δοκούς μικρής διατομής, υπό διάφορα επίπεδα φορτίου (0-75% του φορτίου αστοχίας) και διαφορετικά ιστορικά φόρτισης. Η επιρροή ήταν σημαντική στην έναρξη της ρηγμάτωσης και στον ρυθμό εξέλιξής της. Οι Ballim et al. (2003) μελέτησαν τη συμπεριφορά δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα που υποβλήθηκαν σε ταυτόχρονη διάβρωση και σταθερή φόρτιση, υπό φορτίο 23% και 34% του φορτίου αστοχίας. Απώλεια μάζας του χαλύβδινου

οπλισμού ίση με 6.2%, οδηγεί σε αύξηση των βυθίσεων ίση με 40-70% σε σχέση με τις βυθίσεις της δοκού χωρίς διάβρωση.

Οι El Maaddawy et al. (2005) μελέτησαν πειραματικά τη συμπεριφορά διαβρωμένων δοκών υπό σταθερό φορτίο 60% του φορτίου διαρροής της δοκού χωρίς διάβρωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταυτόχρονη φόρτιση και η ύπαρξη καμπτικών ρωγμών κατά τη διάρκεια της έκθεσης σε διάβρωση, αύξησαν το εύρος των ρωγμών λόγω διάβρωσης, αύξησαν τον βαθμό διάβρωσης του χάλυβα και μείωσαν την αντοχή των δοκών. Η μείωση της αντοχής των δοκών ήταν σχεδόν ανάλογη της μείωσης της διατομής του χαλύβδινου οπλισμού λόγω της διάβρωσης. Για επίπεδα απώλειας μάζας του χάλυβα μικρότερα του 15%, η ικανότητα βυθίσεων της δοκού αυξήθηκε λόγω της μειωμένης διατομής. Σε υψηλότερα επίπεδα όπου εμφανίζεται σημειακή διάβρωση και υπό σταθερό φορτίο, φαίνεται να επηρεάζεται ελάχιστα η μείωση στην ικανότητα βυθίσεων. Η αντοχή θραύσης διαβρωμένης δοκού υπό σταθερό φορτίο δεν εξαρτάται μόνο από το ποσοστό διάβρωσης αλλά και από την περιοχή της ράβδου που διαβρώνεται, ιδιαίτερα όταν η διάβρωση παρατηρείται τοπικά στο μέσο του ανοίγματος (Du et al. 2013). Οι Hariche et al. (2012) διερεύνησαν την επιρροή της διάταξης του οπλισμού χρησιμοποιώντας 1, 2 και 3 ράβδους διαμέτρου 16, 12 και 10 mm αντίστοιχα, καθώς και το μέγεθος του σταθερού φορτίου. Οι βυθίσεις των δοκών αυξήθηκαν με την βαθμιαία διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού υπό ταυτόχρονη φόρτιση, ιδιαίτερα κατά τα αρχικά στάδια της διάβρωσης. Οι εγκάρσιες ρωγμές και οι τάσεις διόγκωσης που δημιουργούνται από τα προϊόντα διάβρωσης συνέβαλλαν σε αυτό. Όσο αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο, τόσο μειώνεται η καμπτική ικανότητα.

Φορτία μεγαλύτερου εύρους οδηγούν στην δημιουργία ρωγμών στο σκυρόδεμα, προκαλώντας μείωση της δυσκαμψίας της ρηγματωμένης διατομής. Έτσι, το κριτήριο περιορισμού των βυθίσεων δοκού υπερσκελίζεται πολύ νωρίτερα από ότι υπό φυσιολογικές συνθήκες φόρτισης και μπορεί να οδηγήσει τη δοκό να μην ικανοποιεί πλέον το κριτήριο λειτουργικότητας. Η έρευνα επικεντρώνεται ιδιαίτερα στη συμπεριφορά δοκών κατά τη διάδοση της διάβρωσης, τη δημιουργία ρηγματώσεων, την αντοχή στην αστοχία, καθώς και στις σχέσεις μεταξύ φορτίου και διάβρωσης. Στην υφιστάμενη βιβλιογραφία συνήθως η διάβρωση του οπλισμού επικεντρώνεται στο μέσο του ανοίγματος των δοκών. Στην εργασία των Malumbela et al. (2009a,b) το επίπεδο των επιβαλλόμενων φορτίων κυμαίνεται μεταξύ 8% και 12% του φορτίου αστοχίας, το οποίο είναι χαμηλότερο σε σχέση με το φορτίο των πραγματικών κατασκευών. Οι Malumbela et al. (2009a) έχουν ωστόσο επισημάνει ότι έπειτα από 50 ημέρες διάβρωσης και έπειτα από συγκεκριμένο επίπεδο διάβρωσης, η δυσκαμψία των δοκών που διαβρώνονται υπό σταθερό φορτίο είναι η ίδια για δοκούς με εγκάρσιες ρωγμές λόγω του φορτίου και των δοκών χωρίς εγκάρσιες ρωγμές. Η απώλεια στην δυσκαμψία των διαβρωμένων δοκών αποδίδεται στην απώλεια συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος και στην μείωση της διατομής των εφελκόμενων ράβδων. Οι Liu et al. (2016) μελέτησαν την επιρροή της διάβρωσης δοκών υπό σταθερό φορτίο ίσο με 50%, 65% και 80% του φορτίου αστοχίας. Τα διάφορα επίπεδα φορτίου επηρέασαν σημαντικά την αύξηση του βαθμού διάβρωσης του χάλυβα, τη μείωση της δυσκαμψίας καθώς και τη μείωση της καμπτικής ικανότητας. Επιπρόσθετα, ο δείκτης πλαστιμότητας επηρεάζεται από τον βαθμό διάβρωσης αλλά και από το επίπεδο του φορτίου. Η καμπτική μορφή αστοχίας των δοκών μπορεί να αντικατασταθεί από λιγότερο πλαστική είτε από ψαθυρή μορφή αστοχίας.

Την επιρροή του μοτίβου των ρηγματώσεων λόγω διάβρωσης στο εύρος των ρωγμών μελέτησαν οι Malumbela et al. (2011). Για εύρος ρωγμής λόγω διάβρωσης μικρότερο των 0.60 mm, οι δοκοί παρουσίασαν παρόμοιο μοτίβο ρωγμών και βαθμό αύξησης του εύρους τους. Αν η διαδικασία διάβρωσης περιλαμβάνει διάστημα διαβροχής και διάστημα μη διαβροχής εναλλάξ των δοκών με χλωριούχο διάλυμα, τότε το μεγαλύτερο διάστημα μη διαβροχής συνεπάγεται περαιτέρω αύξηση του

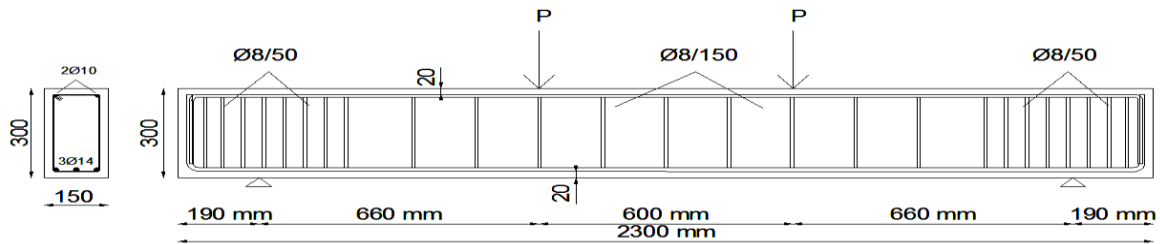
βαθμού διάβρωσης. Μέγιστη απώλεια μάζας του χάλυβα της τάξης του 1% αντιστοιχεί σε μέγιστη ρωγμή λόγω διάβρωσης εύρους περίπου 0.02 mm.

Οι Zhang et al. (2009) υπέβαλλαν τις δοκούς σε φυσική διάβρωση χωρίς τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και υπό σταθερό φορτίο για διάστημα 27 ετών. Κατά την έναρξη της διάβρωσης, η βύθιση επηρεάζεται περισσότερο από τη σημειακή διάβρωση σε σχέση με το φορτίο αστοχίας, λόγω της απώλειας συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, ενώ όσο η διάβρωση προχωράει, μόνο η καμπτική ικανότητα επηρεάζεται. Οι Dang and Francois (2013) χρησιμοποιώντας δοκούς από το ίδιο πειραματικό πρόγραμμα των Zhang et al. (2009), παρατήρησαν ανομοιόμορφη εμφάνιση διάβρωσης καθ' όλο το μήκος των ράβδων, παρά το γεγονός ότι οι συνθήκες φυσικής διάβρωσης ήταν πανομοιότυπες. Έτσι, η μορφή αστοχίας άλλαξε από θραύση της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος σε αστοχία των διαβρωμένων ράβδων. Η ικανότητα βυθίσεων μειώθηκε σημαντικά (50%) σε σχέση με τη δοκό χωρίς διάβρωση, λόγω μείωσης της παραμόρφωσης αστοχίας των διαβρωμένων ράβδων που μετρήθηκαν από δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν.

Η παρούσα εργασία μελετά τη συμπεριφορά δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα που υποβάλλονται σε κύκλους διάβρωσης και φόρτισης υπό σταθερό κατακόρυφο φορτίο. Αρχικά οι δοκοί διαβρώνονται ως ένα βαθμό και στη συνέχεια υποβάλλονται σε φορτίο που αντιστοιχεί στο 60% ή 75% του φορτίου διαρροής της δοκού που δεν έχει διαβρωθεί αντίστοιχα. Η κάθε δοκός υποβλήθηκε σε 3 διαφορετικά επίπεδα διάβρωσης (ελαφρά, μέτρια, σημαντική διάβρωση) και φορτίστηκε αντίστοιχα σε καθένα από αυτά. Στόχος είναι η μελέτη της επιρροής του βαθμού διάβρωσης στην αύξηση των βυθίσεων καθώς και η επιρροή στο εύρος των ρωγμών λόγω διάβρωσης υπό ταυτόχρονη φόρτιση στο επίπεδο λειτουργικότητας. Έτσι προσεγγίζεται η πραγματική κατάσταση σε μια κατασκευή, η οποία ενώ υπομένει τα φορτία λειτουργίας υφίσταται διάβρωση των οπλισμών και υπάρχει αλληλεπίδραση. Ωστόσο, αποφεύχθηκε η υποβολή των δοκών σε σταθερό φορτίο με παράλληλη διάβρωση καθώς δεν είναι δυνατή η επίτευξη ίδιων συνθηκών διάβρωσης κατά μήκος των διαμήκων ράβδων.

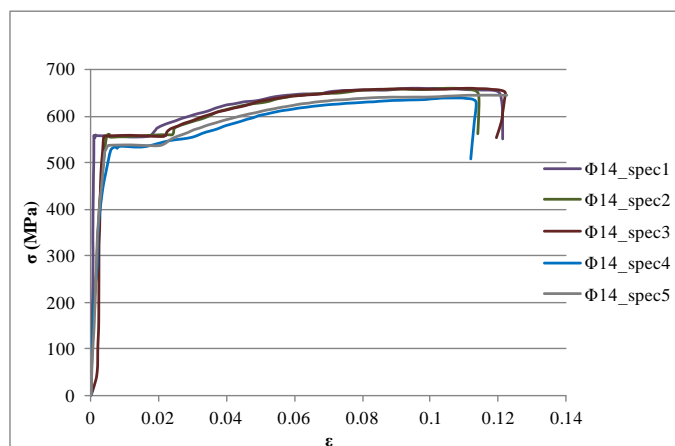
### Πειραματική διαδικασία

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα που έχουν υποστεί διάβρωση του οπλισμού σε διαφορετικούς βαθμούς. Στο εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Δ.Π.Θ. κατασκευάστηκαν 4 δοκοί, εκ των οποίων η 1η παραμένει ως δοκός αναφοράς χωρίς διάβρωση, ενώ οι υπόλοιπες 3 έχουν διαβρωθεί μέσω επιταχυνόμενης διαδικασίας. Οι δοκοί έχουν πλάτος 150 mm, ύψος 300 mm και μήκος 2300 mm. Η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι ίση με 20 mm. Ο εφελκόμενος χαλύβδινος οπλισμός των δοκών αποτελείται από τρεις ράβδους διαμέτρου 14 mm (κάτω), ενώ ο θλιβόμενος οπλισμός από δύο ράβδους διαμέτρου 10 mm (άνω). Ο εγκάρσιος οπλισμός (συνδετήρες) είναι διαμέτρου 8 mm και είναι τοποθετημένος ανά 150 mm στο μεσαίο άνοιγμα των δοκών και ανά 50 mm στα άκρα αυτών. Στο σχήμα 1 απεικονίζεται η διατομή των δοκών και η διάταξη του οπλισμού.



Σχ. 1 Διατομή και διάταξη οπλισμού υπό μελέτη δοκών.

Η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μετρήθηκε ίση με 34.6 MPa, ενώ το μέσο μέτρο Ελαστικότητας ίσο με 32300 MPa, έπειτα από δοκιμές κυλίνδρων 28 ημερών. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μετρήθηκε από δοκιμές διάρρηξης ίση με 2.2 MPa. Ο χαλύβδινος διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός είχε ονομαστική αντοχή διαρροής 500 MPa, ενώ πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε πέντε ράβδους διαμέτρου 14 mm. Η μέση αντοχή διαρροής προέκυψε ίση με 546.5 MPa και η μέση αντοχή θραύσης ίση με 652.8 MPa, όπως απεικονίζεται από το διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων του σχήματος 2.



Σχ. 2 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων ράβδων Ø14.

Η διάβρωση των δοκών πραγματοποιήθηκε μέσω επιταχυνόμενης διαδικασίας προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος επίτευξης του επιθυμητού βαθμού. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εφαρμογή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος στον εφελκυσμένο χαλύβδινο οπλισμό, ενώ ταυτόχρονα οι δοκοί βυθίζονται σε δεξαμενή με διάλυμα χλωριούχου νατρίου περιεκτικότητας 3% NaCl. Ο εφελκυσμένος οπλισμός λειτουργεί ως άνοδος, ενώ χαλύβδινο πλέγμα βυθισμένο στη δεξαμενή λειτουργεί ως κάθοδος, τα οποία και συνδέονται σε τροφοδοτικό παροχής ρεύματος. Οι δοκοί υποβάλλονται σε κύκλους εντός και εκτός δεξαμενής για περαιτέρω φυσική έκθεση. Κάθε κύκλος διαρκεί μία εβδομάδα. Ο βαθμός απώλειας μάζας του εφελκυσμένου χάλυβα θεωρείται ως βαθμός διάβρωσης και εκτιμήθηκε με βάση τον νόμο Faraday σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$m = \frac{atI}{nF}$$

όπου  $m$  είναι η απώλεια μάζας,  $I$  η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος,  $t$  ο χρόνος της διαδικασίας διάβρωσης,  $a$  η ατομική μάζα σιδήρου (55.85 gr),  $n$  το χημικό σθένος σιδήρου ίσο με 2 και  $F$  η σταθερά Faraday (96500C/mol).

Η 1η δοκός αναφοράς που δε διαβρώθηκε (B1) και η 1η δοκός που διαβρώθηκε έως ένα μικρό ποσοστό απώλειας μάζας 5.7% (BC) ακολουθώντας 4 κύκλους διάβρωσης εντός και εκτός της δεξαμενής (σύνολο 8 εβδομάδων), υποβλήθηκαν σε μονότονη φόρτιση 4 σημείων μέχρι αστοχίας (σχήμα 1). Οι εναπομένουσες 2 δοκοί δοκιμάστηκαν σε περαιτέρω κύκλους επιταχυνόμενης διάβρωσης-φόρτισης στο φορτίο λειτουργικότητας. Έτσι, οι 2 δοκοί αρχικά διαβρώθηκαν έως ένα βαθμό σε σύνολο 8 εβδομάδων (όπως και η BC) και κατόπιν καταπονήθηκαν με μονότονο κατακόρυφο φορτίο σταδίου λειτουργικότητας που αντιστοιχεί σε ποσοστό 60% (δοκός BC1) ή 75% (δοκός BC2) του φορτίου διαρροής της δοκού που δεν έχει διαβρωθεί αντίστοιχα (B1). Η κάθε δοκός υποβλήθηκε σε 3 διαφορετικά επίπεδα διάβρωσης: ελαφρά με απώλεια μάζας  $m_f=5.7\%$ , μέτρια με απώλεια μάζας 8.5%, και σημαντική διάβρωση με απώλεια μάζας 12% και φορτίστηκε αντίστοιχα σε καθένα από αυτά.

### Καταγραφή ρωγμών λόγω διάβρωσης

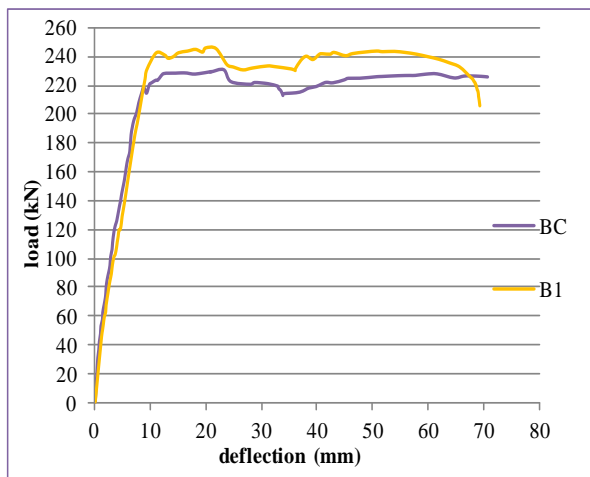
Σε κάθε κύκλο διάβρωσης διενεργήθηκε μακροσκοπικός οπτικός έλεγχος για κάθε δοκό με λεπτομερή καταγραφή του μοτίβου και εύρους των ρηγματώσεων που αναπτύχθηκαν λόγω διάβρωσης. Μια διαμήκης ρωγμή σχηματίστηκε στο εφελκόμενο πέλμα όλων των δοκών, παράλληλη κυρίως στην μεσαία εφελκόμενη ράβδο. Κηλίδες σκουριάς επίσης σχηματίστηκαν κατά μήκος των ρωγμών αυτών. Διαμήκεις ρωγμές λόγω διάβρωσης δημιουργήθηκαν επίσης στην μπροστά και πίσω όψη των δοκών, παράλληλα στις διαμήκεις ράβδους. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται το μοτίβο των ρηγματώσεων λόγω διάβρωσης μετά το πέρας του τελευταίου κύκλου της ελαφράς διάβρωσης. Η πρώτη διαμήκης ρωγμή εμφανίστηκε μετά το πέρας του πρώτου κύκλου διάβρωσης (1<sup>η</sup> εβδομάδα) για όλες τις δοκούς. Στο μέσο του κάτω εφελκόμενου πέλματος μετρήθηκε ίση με 0.15 mm κατά τον πρώτο κύκλο και ίση με 0.25 mm κατά τον δεύτερο κύκλο. Στην μια όψη οι ρωγμές είχαν μεγαλύτερο μήκος σχεδόν καθ' όλη τη δοκό και το μέγιστο εύρος μετρήθηκε ίσο με 0.15 mm. Στην άλλη όψη οι ρωγμές είχαν μικρότερο μήκος και εύρος. Όσο η διαδικασία της διάβρωσης προχωρούσε, οι ρωγμές αυξάνονταν σε εύρος και στο τέλος του τρίτου κύκλου στο εφελκόμενο πέλμα η μέγιστη είχε εύρος 0.40 mm, ενώ στο τέλος του τέταρτου και τελευταίου κύκλου 0.60 mm. Στις πλευρές η μέγιστη ρωγμή είχε εύρος 0.25 mm.



Σχ. 3 Μοτίβο ρηγματώσεων λόγω ελαφράς διάβρωσης  $m_f=5.7\%$  κάτω εφελκόμενου πέλματος.

## Πειραματικά αποτελέσματα

Η δοκός αναφοράς B1 και η διαβρωμένη BC παρουσίασαν καμπτική μορφή αστοχίας με διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα και στη συνέχεια θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη. Το διάγραμμα φορτίου-βύθισης των δύο δοκών απεικονίζεται στο σχήμα 4. Το μέγιστο φορτίο της δοκού BC καταγράφηκε ίσο με 230.51 kN, σε σύγκριση με 247.5 kN της μη-διαβρωμένης δοκού (περίπου 6.9% χαμηλότερο). Στην αστοχία, η δοκός με τον διαβρωμένο οπλισμό είχε μέγιστη βύθιση ίση με 70.84 mm, ενώ η μη διαβρωμένη δοκός αστόχησε σε χαμηλότερη βύθιση ίση με 69.42 mm. Παρατηρείται μικρή αύξηση των βυθίσεων της τάξης του 2% για την διαβρωμένη δοκό. Οι Park and Paulay (1975) και οι Ting and Nowak (1991) επεσήμαναν ότι η ικανότητα βυθίσεων αυξάνεται καθώς η διατομή του χάλυβα μειώνεται, όταν οι δοκοί έχουν την ίδια διατομή και το ίδιο ογκομετρικό ποσοστό του χάλυβα.



Σχ. 4 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης δοκού αναφοράς B1 και διαβρωμένης δοκού BC.



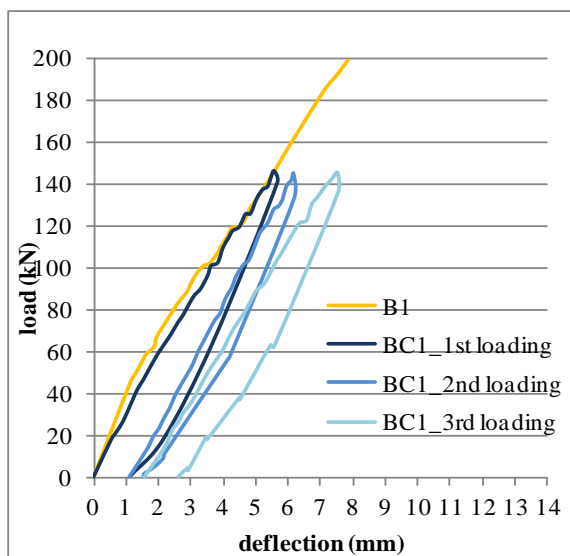
Σχ. 5 Αποκόλληση τμήματος σκυροδέματος στο μεσαίο άνοιγμα της δοκού BC κατά τη φόρτιση.

Οι καμπτικές ρωγμές αναπτύχθηκαν σε φορτία που αντιστοιχούν στο επίπεδο της λειτουργικότητας για τις δύο δοκούς, αλλά οι διαμήκεις ρωγμές λόγω διάβρωσης δεν αυξήθηκαν σε εύρος. Όσο η διαδικασία της φόρτισης προχωρούσε, περισσότερες καμπτικές και καμπτοδιατμητικές ρωγμές εμφανίζονταν και οι ήδη υπάρχουσες αύξαναν το εύρος τους. Όταν η διαβρωμένη δοκός BC έφτασε το μέγιστο φορτίο της, ένα κομμάτι της επικάλυψης του σκυροδέματος αποκολλήθηκε από την μεσαία κάτω περιοχή της δοκού. Σε μεγαλύτερες βυθίσεις, οι ρωγμές δεν αναπτύχθηκαν περαιτέρω, όμως περισσότερα τμήματα σκυροδέματος αποκολλήθηκαν και ο διαβρωμένος χαλύβδινος οπλισμός αποκαλύφθηκε (σχήμα 5).

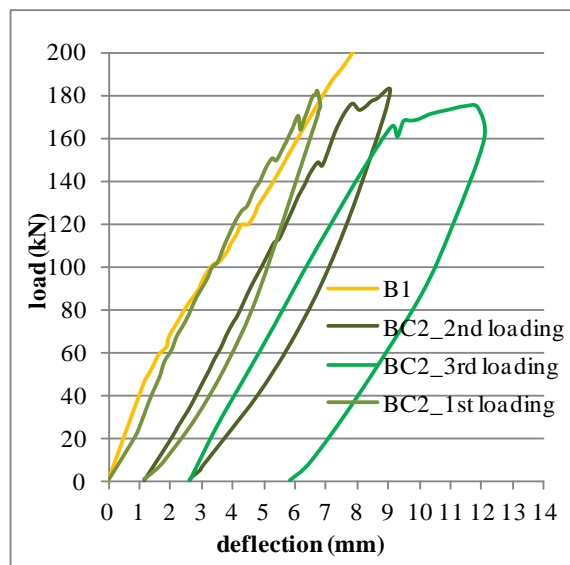
Μετά την επίτευξη του πρώτου επιπέδου διάβρωσης (βαθμός απώλειας μάζας 5.7%), οι δύο εναπομένουσες δοκοί υποβλήθηκαν σε σταθερό κατακόρυφο φορτίο ίσο με 60% (δοκός BC1) και 75% (δοκός BC2) του φορτίου διαρροής της δοκού που δε διαβρώθηκε. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης αναπτύχθηκαν καμπτικές ρωγμές στο μεσαίο καμπτικό άνοιγμα, με τη μέγιστη ρωγμή να έχει εύρος 0.30 mm για τη δοκό BC1 και 0.40 mm για τη δοκό με το μεγαλύτερο φορτίο BC2. Καμπτοδιατμητικές ρωγμές μικρότερου εύρους εμφανίστηκαν στα διατμητικά ανοίγματα.

Στην συνέχεια οι διαβρωμένες δοκοί υποβλήθηκαν σε περαιτέρω διάβρωση, υπό τις ίδιες συνθήκες επιταχυνόμενης διαδικασίας και για το ίδιο χρονικό διάστημα. Στο δεύτερο επίπεδο διάβρωσης, ο βαθμός απώλειας μάζας του εφελκόμενου χάλυβα μετρήθηκε σύμφωνα με τον νόμο Faraday ίσος με 8.5%. Οι ρωγμές αυξήθηκαν σε εύρος και συγκεκριμένα η μέγιστη διαμήκης ρωγμή στην μπροστά όψη κυμαινόταν μεταξύ 0.30-0.40 mm (από 0.25 mm), ενώ 0.80 mm (από 0.60 mm) στο μεσαίο κάτω εφελκόμενο πέλμα και για τις δύο δοκούς. Τότε, οι δοκοί υποβλήθηκαν ξανά στα ίδια κατακόρυφα φορτία αντιστοίχως. Περισσότερες καμπτικές ρωγμές δημιουργήθηκαν στο μεσαίο άνοιγμα. Η μέγιστη καμπτική για την δοκό BC1 παρέμεινε 0.30 mm, ενώ αυξήθηκε για την δοκό BC2 μεταξύ 0.45-0.50 mm. Επιπρόσθετα, ρωγμές λόγω διάβρωσης αυξήθηκαν σε εύρος στην μπροστά όψη των δοκών κατά την διάρκεια της φόρτισης. Συγκεκριμένα, για την δοκό BC1 ρωγμή εύρους 0.30 mm αυξήθηκε σε 0.50 mm, ενώ για την δοκό BC2 ρωγμή εύρους 0.40 mm αυξήθηκε σε 0.80 mm.

Στο τρίτο και τελευταίο επίπεδο διάβρωσης, οι δοκοί έχοντας διαβρωθεί υπό πανομοιότυπες συνθήκες, παρουσίασαν απώλεια μάζας των εφελκόμενων ράβδων περίπου 12% με βάση τον νόμο Faraday. Οι ρωγμές λόγω διάβρωσης αυξήθηκαν σημαντικά για τις δύο δοκούς, με την μέγιστη στην μπροστά όψη να ισούται με 0.80 mm, ενώ στο εφελκόμενο πέλμα να αυξάνεται σε εύρος 1.25 mm. Τέλος, σταθερό κατακόρυφο φορτίο λειτουργικότητας εφαρμόστηκε στις δύο δοκούς. Η δοκός BC1 παρουσίασε αύξηση καμπτικών ρωγμών έως 0.35 mm στην μεσαία περιοχή, αλλά και αύξηση του εύρους των καμπτοδιατμητικών ρωγμών. Η δοκός BC2 που δοκιμάστηκε σε μεγαλύτερο φορτίο παρουσίασε πολύ μεγαλύτερη αύξηση των καμπτικών ρωγμών, οι οποίες κυμαίνονταν μεταξύ 0.50 mm-1.50 mm σε όλο το μεσαίο άνοιγμα και καμπτοδιατμητικές εύρους 0.50 mm. Αύξηση παρατηρήθηκε και σε διαμήκη ρωγμή λόγω διάβρωσης, ίση με 0.90 mm (από 0.60 mm). Στην BC1 διαμήκης ρωγμή που μετρήθηκε 0.50mm κατά την διάβρωση, αυξήθηκε σε 0.60 mm κατά την φόρτιση. Στα σχήματα 6 και 7 απεικονίζεται το διάγραμμα φορτίου-βύθισης (load-deflection), ενώ στα σχήματα 8 και 9 οι δύο δοκοί κατά την διάρκεια της φόρτισης στο τελευταίο επίπεδο διάβρωσης.



Σχ. 6 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης διαβρωμένης δοκού BC1.



Σχ. 7 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης διαβρωμένης δοκού BC2



Σχ. 8 Μοτίβο ρηγματώσεων δοκού BC1 στο τελευταίο επίπεδο διάβρωσης.



Σχ. 9 Καμπτική ρωγμή και άνοιγμα ρωγμής λόγω διάβρωσης δοκού BC2.

Παράλληλα, καταγράφηκαν σημαντικά αυξημένες βυθίσεις για το ίδιο φορτίο από κύκλο σε κύκλο για την κάθε δοκό. Η δοκός BC1 που δοκιμάστηκε σε φορτίο λειτουργικότητας 60%, παρουσίασε βύθιση ίση με 5.53 mm κατά την διάρκεια της 1<sup>ης</sup> φόρτισης για ελαφρά διάβρωση και ίση με 6.16 mm κατά την 2<sup>η</sup> φόρτιση για μέτρια διάβρωση (αύξηση 11.3%). Κατά την 3<sup>η</sup> φόρτιση για σημαντική διάβρωση, η βύθιση για το ίδιο φορτίο αυξήθηκε ακόμη περισσότερο κατά 35.6%, καθώς καταγράφηκε βύθιση ίση με 7.5 mm, σε σχέση με την αντίστοιχη της 1<sup>ης</sup> φόρτισης.

Η δοκός BC2 που δοκιμάστηκε σε μεγαλύτερο φορτίο λειτουργικότητας 75%, παρουσίασε ακόμη μεγαλύτερη αύξηση βύθισης. Στην 1<sup>η</sup> φόρτιση για ελαφρά διάβρωση η βύθιση που καταγράφηκε ήταν ίση με 6.79 mm, ενώ στην 2<sup>η</sup> φόρτιση ίση με 9.04 mm, δηλαδή αύξηση 33.1%. Κατά την 3<sup>η</sup> φόρτιση για σημαντική διάβρωση, η βύθιση για το ίδιο φορτίο αυξήθηκε περισσότερο κατά 68.9%, καθώς καταγράφηκε βύθιση ίση με 11.47 mm, σε σχέση με την αντίστοιχη της 1<sup>ης</sup> φόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την 3<sup>η</sup> φόρτιση, η δοκός δεν μπόρεσε να φτάσει το φορτίο που αντιστοιχεί στο 75% του φορτίου διαρροής της δοκού αναφοράς, καθώς έπαιρνε βυθίσεις σε μικρότερο φορτίο, γεγονός που υποδηλώνει την διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα (μέτρηση η οποία έχει καταγραφεί και από το επιμηκυνσιόμετρο strain gauge που ήταν τοποθετημένο στον εφελκόμενο χάλυβα).

Στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, οι δοκοί θα ενισχυθούν με σύνθετα υλικά ινών άνθρακα ώστε να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητά τους στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας και στον περιορισμό των βυθίσεων.

### Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επιρροή του φαινομένου της διάβρωσης στην καμπτική ικανότητα δοκών από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Δοκός με απώλεια μάζας του χαλύβδινου οπλισμού 5.7% παρουσιάζει μείωση του μέγιστου φορτίου κατά 6.9% σε σχέση με τη δοκό αναφοράς που δε διαβρώθηκε και μικρή αύξηση της βύθισης κατά την αστοχία ίση με 2%. Επιπρόσθετα, μελετάται η επιρροή της διάβρωσης σε διάφορα επίπεδα απώλειας μάζας χάλυβα μετρούμενης κατά Faraday: 5.7%, 8.5% και 12 %, σε δοκούς που υποβάλλονται σε σταθερό κατακόρυφο φορτίο επιπέδου λειτουργικότητας. Μελετώνται δύο διαφορετικά φορτία σε ποσοστό 60% και 75% του φορτίου διαρροής της δοκού αναφοράς που δε διαβρώθηκε αντίστοιχα. Για φορτίο λειτουργικότητας 15%



υψηλότερο, οι ρωγμές λόγω διάβρωσης στην μπροστά όψη των δοκών αυξήθηκαν κατά την φόρτιση. Συγκεκριμένα, το εύρος της διαμήκου ρωγμής λόγω διάβρωσης για απώλεια μάζας 8.5% αυξήθηκε σε 0.80 mm από 0.40 mm για τη δοκό BC2 (75% φορτίο) ενώ αυξήθηκε σε 0.5 mm από 0.30 mm για τη δοκό BC1 (60% φορτίο). Η αντίστοιχη αύξηση της βύθισης ως προς τη βύθιση που αντιστοιχεί σε απώλεια μάζας ίση με 5.7%, ήταν για τη δοκό BC2 33.1% ενώ 11.3% για τη δοκό BC1.

Για σημαντικό επίπεδο διάβρωσης της τάξης του 12%, η μέγιστη διαμήκης ρωγμή λόγω διάβρωσης μετρήθηκε ίση με 1.25 mm στο κάτω εφελκόμενο πέλμα, ενώ ίση με 0.80 mm στην μπροστά όψη των δοκών κατά την διαδικασία της διάβρωσης. Για υψηλότερο φορτίο, οι καμπτικές ρωγμές αύξησαν αρκετά το εύρος τους, μεταξύ 0.50-1.50 mm.. Κατά την διάρκεια της φόρτισης, διαμήκης ρωγμή λόγω διάβρωσης στην μπροστά όψη της δοκού BC2 από 0.60mm αυξήθηκε σε 0.90 mm. Στην δοκό BC1 διαμήκης ρωγμή που μετρήθηκε στην μπροστά όψη της 0.50 mm κατά την διάβρωση, αυξήθηκε σε 0.60 mm κατά την φόρτιση. Η αύξηση στη βύθιση για τη δοκό BC2 ήταν 68.9% σε σχέση με 35.6% της δοκού BC1, σε σύγκριση με την αντίστοιχη βύθιση που αντιστοιχεί σε χαμηλό επίπεδο διάβρωσης ίσο με 5.7%. Επιπρόσθετα, η δοκός με το μεγαλύτερο φορτίο δε μπόρεσε να φτάσει το φορτίο που αντιστοιχεί στο 75% του φορτίου διαρροής της δοκού αναφοράς, γεγονός που υποδηλώνει την διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) από το πρόγραμμα «ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΕΙΑΣ ΙΚΥ/SIEMENS».

## Βιβλιογραφία

- Ballim Y., Reid JC. (2003), “Reinforcement corrosion and the deflection of RC beam-an experimental critique of current test methods.”, *Cement and Concrete Composites*, 25(6):625-632.
- Dang V.H., Francois R. (2013), “Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behavior of RC beam.”, *Engineering Structures*, 48:558-568.
- Du Y., Cullen M., Li C. (2013), “Structural performance of RC beams under simultaneous loading and reinforcement corrosion.”, *Construction and Building Materilas*, 38:472-481.
- El Maaddawy T., Soudki K., Topper T. (2005), “Long-term performance of corrosion damaged reinforced concrete beams.”, *ACI Structural Journal*, 102(5):649-656
- Hariche L., Ballim Y, Bouhicha M., Kenai S. (2012), “Effect of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion.”, *Cement and Concrete Composites*, 34:1202-1209.
- Liu Y., Jiang N., Deng Y., Ma Y., Zhang H., Li M. (2016), “Flexural experiment and stiffness investigation of reinforced concrete beam under chloride penetration and sustained loading.”, *Construction and Building Materials*, 117:302-310.
- Malumbela G., Moyo P., Alexander M. (2009a), “Behaviour of RC beams under sustained service loads.”, *Construction and Building Materials*, 23(3):346-351.
- Malumbela G., Alexander M., Moyo P. (2009b), “Steel corrosion on RC structures under sustained service loads-A critical review.”, *Engineering Structures*, 25:2518-2525.
- Malumbela G., Moyo P., Alexander M. (2011), “Influence of corrosion crack patterns on the rate of crack widening of RC beams.”, *Construction and Building Materials*, 25:2540-2553.
- Mehta PK., Gerwick BC. (1982), “Cracking-Corrosion Interaction in Concrete Exposed to Marine Environment.”, *Concrete International*, 4(10), 45-51.

- Mohammed T., Otsuki N., Hisada M., Shibata T. (2001), “Effect of crack width and bar types on corrosion of steel in concrete.”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 13(3):194-201.
- Park R., Paulay T. (1975), *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, 1975, 800pp.
- Ting S., Nowak A.S. (1991), “Effect of Reinforcing Steel Area Loss on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams.”, *ACI Structural Journal*, 88 (3), 309-314.
- Roberge PR. (1999), *Handbook of corrosion engineering*, New York: McGraw-Hill.
- Soudki K., Sherwood TG. (2000), “Behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre reinforced polymer laminates subjected to corrosion damage.”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(5):1005-1010.
- Yoon S., Wang K., Weiss WJ, Shah SP (2000), “Interaction between loading, corrosion and serviceability of reinforced concrete.”, *ACI Material Journal*, 97(6):637-644.
- Zhang R., Castel A., Francois R. (2009), “Serviceability limit state criteria based on steel-concrete bond loss for corroded reinforced concrete in chloride environment.”, *Materials and Structures*, 42:1407-1421.