

Αναλυτική προσομοίωση διαβρωμένων δοκών ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά FRP

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

Αρκετές κατασκευές που εκτίθενται σε συνθήκες περιβάλλοντος με έντονη υγρασία αλλά και σε παραθαλάσσιες περιοχές, παρουσιάζουν προβλήματα ανθεκτικότητας και ασφάλειας πολύ νωρίτερα από την προσδοκώμενη ζωή τους. Η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα υποβάθμισης των κατασκευών και έτσι κρίνεται απαραίτητη η αποκατάσταση, επισκευή ή και ενίσχυσή τους. Πολλές μελέτες αφορούν στην επίδραση της διάβρωσης του χάλυβα στην ικανότητα των κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα (ΩΣ). Η διάβρωση οδηγεί σε απομείωση της διατομής του διαθέσιμου χαλύβδινου οπλισμού και της πλαστιμότητας, με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία του χάλυβα (Andrade et al. 1991, Almusallam 2001). Επιπρόσθετα, η εξάπλωση των προϊόντων που προκαλούν διάβρωση έχει ως αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος και την απώλεια συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος, με άμεση επιρροή στην καμπτική δυσκαμψία των στοιχείων από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Εκτενής έρευνα έχει διεξαχθεί ώστε να μπορεί να προβλεφθεί ο βαθμός διάβρωσης σε όρους απώλειας μάζας του χαλύβδινου οπλισμού. Η εμφάνιση της αρχικής ρωγμής στην επικάλυψη του σκυροδέματος που προκαλούν τα προϊόντα της διάβρωσης, αποτελεί σημαντική ένδειξη για την κατάσταση των διαβρωμένων κατασκευών στο επίπεδο της λειτουργικότητας. Οι ρωγμές λόγω διάβρωσης έχουν μετρηθεί από αρκετούς ερευνητές, προκειμένου να τη συσχετίσουν με το επίπεδο του βαθμού διάβρωσης.

Η διαδικασία της διάβρωσης είναι συνήθως μια επιταχυνόμενη διαδικασία με την εφαρμογή σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος στον εφελκόμενο οπλισμό, ώστε οι ρωγμές στο σκυρόδεμα να δημιουργηθούν σε μικρό χρονικό διάστημα (Andrade et al. 1993, Liu and Weyers 1998). Οι Liu and Weyers (1998) προσομοίωσαν τον χρόνο που απαιτείται ώστε να δημιουργηθεί η πρώτη ρωγμή, βασιζόμενοι στην ποσότητα των προϊόντων διάβρωσης που απαιτείται ώστε να ρηγματωθεί το σκυρόδεμα και λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο που απαιτείται ώστε να γεμίσει η ζώνη του πορώδους γύρω από την ράβδο πριν δημιουργηθούν εσωτερικές τάσεις στο γύρω σκυρόδεμα. Οι Li et al. (2006) πρότειναν αναλυτικό προσομοίωμα του εύρους της ρωγμής λόγω διάβρωσης ως συνάρτηση του χρόνου, μελετώντας διάφορες παραμέτρους. Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος λόγω διάβρωσης i_{corr} αποτέλεσε τον σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει τον χρόνο και το άνοιγμα της ρωγμής λόγω διάβρωσης. Η γεωμετρία και οι ιδιότητες του ωπλισμένου σκυροδέματος επηρέασαν επίσης τον χρόνο

δημιουργίας της ρωγμής. Οι Alonso et al. (1998) και οι Torres-Acosta and Sagues (2000) επεσήμαναν ως παράγοντα με την σημαντικότερη επιρροή στην έναρξη της ρηγματώσης του σκυροδέματος τον λόγο της επικάλυψης του σκυροδέματος προς την διάμετρο της ράβδου c/D . Ωστόσο, δεν το συσχέτισαν με την ανάπτυξη της ρωγμής. Οι Vidal et al. (2004) συσχέτισαν επίσης την ρηγματώση λόγω διάβρωσης με τον λόγο c/D , την διάμετρο της ράβδου και την ποιότητα της διεπιφάνειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος. Ο Cabrera (1996) κατέληξε ότι όταν η επικάλυψη του σκυροδέματος στις πλευρές και στο εφελκούμενο πέλμα της δοκού διαφέρει, οι ρηγματώσεις εμφανίζονται στην πλευρά που είναι πιο κοντά στην διαβρωμένη ράβδο. Όταν η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι ίση προς όλες τις πλευρές, είτε εμφανίζεται ρωγμή στην πλευρά της δοκού, είτε στο εφελκούμενο πέλμα της αλλά όχι και στις δύο πλευρές.

Η εφελκυστική αντοχή και ο ερπυσμός του σκυροδέματος επηρεάζουν σημαντικά την ρηγματώση στο σκυρόδεμα σύμφωνα με τους Ueda et al. (1998). Ο Weyers (1998) επεσήμανε ότι δεν συμβάλλουν όλα τα προϊόντα διάβρωσης στις διογκωτικές τάσεις στο σκυρόδεμα, αλλά κάποια από τα προϊόντα γεμίζουν τους πόρους και τα κενά γύρω από την χαλύβδινη ράβδο και κάποια μετακινούνται μακριά από την διεπιφάνεια του χάλυβα μέσω πόρων στο σκυρόδεμα.

Οι Khan et al. (2014) διερεύνησαν την επιρροή των συνδετήρων και κατέληξαν ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του εύρους της ρωγμής και της απώλειας διατομής του συνδετήρα λόγω της διάβρωσης. Οι Coronelli and Gambarova (2004) συνδύασαν την πίεση που ασκείται λόγω διάβρωσης με την πίεση που παράγεται λόγω συνάφειας προκειμένου να προσδιορίσουν την τάση στο σκυρόδεμα.

Η πειραματική διαδικασία και οι συνθήκες φόρτισης επηρεάζουν σημαντικά τις ρωγμές που δημιουργούνται λόγω διάβρωσης. Δοκοί που υποβάλλονται σε ταυτόχρονη διαδικασία διάβρωσης και σταθερή φόρτιση αναμένεται να εμφανίσουν διαφορετικά μοτίβα ρηγματώσεων και ποικίλα εύρη ρωγμών. Οι El Maaddawy and Soudki (2007) πρότειναν προσομοίωμα πρόβλεψης του χρόνου που απαιτείται ώστε τα προϊόντα διάβρωσης να γεμίζουν τη ζώνη του πορώδους (έναρξη διάβρωσης) πριν αρχίσουν να ασκούν διογκωτικές τάσεις στο σκυρόδεμα που περιβάλλει την ράβδο (ρηγματώση λόγω διάβρωσης). Οι Malumbela et al. (2011a) διερεύνησαν την ποσότητα που απαιτείται ώστε να γεμίσει η ζώνη του πορώδους και πρότειναν σχέση για την μέγιστη διόγκωση του σκυροδέματος γύρω από την διαβρωμένη περιοχή εξαιτίας των προϊόντων διάβρωσης. Καθώς η διαδικασία της διάβρωσης προχωρά, το μοτίβο των ρηγματώσεων αλλάζει (El Maaddawy and Soudki 2007, Malumbela et al. 2011b). Σε αρκετές περιπτώσεις, στο εφελκούμενο πέλμα των δοκών σε περιοχές κατά μήκος των ράβδων οπλισμού δημιουργούνται ποικίλες ρωγμές λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ των ράβδων. Η επιταχυνόμενη διαδικασία διάβρωσης περιλαμβάνει συχνά και κύκλους διαβροχής των δοκών με χλωριούχο διάλυμα και κύκλους χωρίς διαβροχή. Όσο μεγαλύτερη η διάρκεια των κύκλων χωρίς διαβροχή, τόσο μεγαλύτερη απώλεια μάζας του χάλυβα επιτυγχάνεται, ενώ το μοτίβο και ο ρυθμός που αυξάνεται το εύρος των ρωγμών φαίνεται να μην επηρεάζεται (El Maaddawy and Soudki 2007).

Οι Zhang et al. (2010) διαίρεσαν την διαδικασία της ρηγματώσης λόγω διάβρωσης σε τρεις φάσεις ανάλογα με την εξέλιξη του μοτίβου των ρωγμών και την σχέση που συνδέει την διάβρωση του οπλισμού με το εύρος της ρωγμής. Κατά την έναρξη της ρηγματώσης, το μοτίβο χαρακτηρίζεται από τοπικά σκασίματα. Κατά την διάδοση της ρηγματώσης, τα σημάδια της διάβρωσης έχουν ασυνέχειες κατά μήκος των ράβδων και το εύρος της ρωγμής συσχετίζεται με την μέγιστη διάβρωση που εντοπίζεται στον οπλισμό. Σε επόμενη φάση, παρουσιάζονται ρωγμές μεγαλύτερου εύρους και μετατρέπουν την διάβρωση κατά μήκος των ράβδων σε πιο ομοιογενή. Έτσι, το εύρος της ρωγμής

συσχετίζεται με την μέση απώλεια μάζας της διατομής του χάλυβα. Οι Wu et al. (2014) πρότειναν προσομοίωμα το οποίο εξαιρεί την παράμετρο του χρόνου και χαρακτηρίζεται ως γεωμετρικό προσομοίωμα που συσχετίζει την σκουριά, το πορώδες και τις ρωγμές. Μια γραμμική σχέση προέκυψε μεταξύ εύρους ρωγμής και βαθμού διάβρωσης, με την κλίση της να βασίζεται στις πειραματικές δοκιμές που εφάρμοσαν. Το προσομοίωμα των Balafas and Burgoyne (2011) αφορά τον ρυθμό που παράγονται τα προϊόντα σκουριάς, βασιζόμενο στην μηχανική της θραύσης και τις ενέργειες των παραμορφώσεων. Η αναλυτική πρόβλεψη του εύρους της ρωγμής από τους Xia and Jin (2014) έγινε με την θεώρηση της επικάλυψης του σκυροδέματος και του βάθους διείσδυσης της διάβρωσης, σύμφωνα με τα πειραματικά τους αποτελέσματα.

Η παρούσα έρευνα έχει ως στόχο την πρόταση αναλυτικού προσομοιώματος εκτίμησης του βαθμού διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού πριν και μετά την ρηγμάτωση της επικάλυψης του σκυροδέματος. Η συνεχής εναπόθεση των προϊόντων λόγω διάβρωσης κοντά στην διεπιφάνεια σκυροδέματος-χάλυβα οδηγεί σε ανάπτυξη τάσεων λόγω διόγκωσης και κατά συνέπεια σε ρηγμάτωση στην επικάλυψη του σκυροδέματος. Συνολικά θεωρούνται τρία διαφορετικά στάδια. Η χαλύβδινη ράβδος και το σκυρόδεμα που περικλείει την ράβδο, το βάθος της επικάλυψης του σκυροδέματος, η διάμετρος της ράβδου και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος αποτελούν παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στην θεώρηση. Στην συνέχεια, μπορούν να εκτιμηθούν η αντίστοιχη καμπτική ικανότητα των δοκών στην διαρροή και αστοχία. Οι προβλέψεις του προτεινόμενου προσομοιώματος συγκρίνονται με πειράματα της διεθνούς βιβλιογραφίας με και χωρίς ενίσχυση με FRP.

Προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα

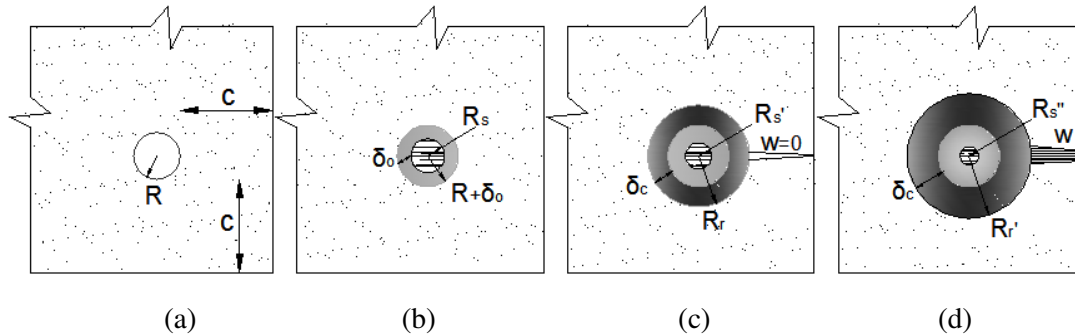
Το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα περιλαμβάνει σχέσεις προσδιορισμού της μέσης διατομής μιας ομοιόμορφα διαβρωμένης ράβδου οπλισμού μέσω της απώλειας μάζας του χάλυβα. Το σκυρόδεμα γύρω από την διαβρωμένη ράβδο ως ομογενές ελαστικό υλικό, προσομοιώνεται ως κύλινδρος με πλατιά τοιχώματα (Liu and Weyers 1998). Συνολικά θεωρούνται τρία διαφορετικά στάδια. Κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου, το μη-ρηγματωμένο σκυρόδεμα γύρω από την ράβδο παρέχει το διαβρωτικό περιβάλλον (διείσδυση χλωριόντων ή/και ενανθρακωμένο σκυρόδεμα κλπ) ενώ η ράβδος αρχίζει να οξειδώνεται, χάνοντας τη μάζα της. Θεωρείται ότι η σκουριά από τη ράβδο γεμίζει τη ζώνη του πορώδους γύρω από αυτήν πριν αρχίσει να ασκεί εσωτερικές πιέσεις στο περιβάλλον σκυρόδεμα (Weyers 1998). Η διάβρωση του χάλυβα προκαλεί αύξηση του όγκου από 2-6 φορές, σύμφωνα με τα σύνθετα ένυδρα της σκουριάς. Στο προτεινόμενο προσομοίωμα γίνεται η θεώρηση ότι ο όγκος της σκουριάς είναι 2 φορές μεγαλύτερος από τον όγκο της διαβρωμένης ράβδου. Στο σχήμα 1a) απεικονίζεται η αρχική διάμετρος της ράβδου R πριν διαβρωθεί. Οι εσωτερικές ακτινικές πιέσεις που ασκούνται λόγω διάβρωσης υπολογίζονται σύμφωνα με την σχέση που προτείνουν οι El Maaddawy and Soudki (2007):

$$P_{corr} = \frac{m_i E_{cf} D}{90.9(1+\nu+\psi)(D+2\delta_o)} - \frac{2\delta_o E_{cf}}{(1+\nu+\psi)(D+2\delta_o)} \quad (1)$$

όπου m_i είναι η ποσοστιαία απώλεια μάζας του χάλυβα, E_{cf} είναι το ενεργό μέτρο Ελαστικότητας του κυλίνδρου, $D=2R$ η διάμετρος της ράβδου, δ_o είναι το πάχος της ζώνης του πορώδους, ν ο λόγος Poisson, $\psi=D^2/[2c(c+D)]$ και c η επικάλυψη του σκυροδέματος.

Η έναρξη της ρηγμάτωσης γίνεται με την διείσδυση των χλωριόντων στην επικάλυψη του σκυροδέματος, τα οποία βαθμιαία γεμίζουν την ζώνη του πορώδους γύρω από τον χάλυβα και την επιφάνεια του σκυροδέματος. Όταν οι εσωτερικές ακτινικές πιέσεις είναι μηδενικές, ένα ποσοστό της

μάζας του χάλυβα χάνεται και τα προϊόντα σκουριάς έχουν γεμίσει την ζώνη του πορώδους. Η εναπομένουσα ακτίνα R_s και η συνολική ακτίνα της διαβρωμένης ράβδου $R+\delta_o$ απεικονίζονται στο σχήμα 1b).



Σχ. 1 a) Αρχική χαλύβδινη ράβδος, b) απώλεια μάζας χάλυβα έως να γεμίσει η ζώνη του πορώδους, c) απώλεια μάζας χάλυβα έως να ξεπεραστεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, d) άνοιγμα ρωγμής στην εξωτερική επιφάνεια.

Κατά το δεύτερο στάδιο, επιπρόσθετα προϊόντα σκουριάς ασκούν πίεση στο περιβάλλον σκυρόδεμα, η ακτινική τάση υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και έτσι η επικάλυψη του σκυροδέματος αρχίζει να ρηγματώνεται. Η διεπιφάνεια μεταξύ σκουριάς και σκυροδέματος είναι μετατοπισμένη από ακτίνα $R+\delta_o$ σε ακτίνα $R_r=R+\delta_o+\delta_c$ (σχήμα 1c). Η προκαλούμενη ακτινική μετατόπιση του σκυροδέματος της διεπιφάνειας στην οπή κατά την έναρξη της ρηγμάτωσης υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση των El Maaddawy and Soudki (2007) ως εξής:

$$\delta_c = k * P_{corr} \quad (2)$$

Η ευκαμψία της οπής ορίζεται ως

$$k = \frac{(1+\nu+\psi)(D_s+2\delta_o)}{2E_{ef}} \quad (3)$$

όπου $D_s=2R_s$ η εναπομένουσα διάμετρος της ράβδου.

Το περιβάλλον σκυρόδεμα θεωρείται υπό επιβαλλόμενη ομοιόμορφη παραμόρφωση και επομένως υπό ακτινική πίεση. Η ρηγμάτωση του σκυροδέματος συμβαίνει όταν η ακτινική πίεση ισοδυναμεί με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος:

$$P_{corr} = p_{rad} = \frac{2 f_{tm} c}{D_s} \quad (4)$$

όπου f_{tm} η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η αντίστοιχη απώλεια μάζας του χάλυβα υπολογίζεται ως:

$$m_l = p_{rad} * \frac{90.9(1+\nu+\psi)(D_s+2\delta_o)}{E_{ef} D_s} + \frac{90.9 * 2\delta_o}{D_s} \quad (5)$$

Στο σχήμα 1c) φαίνεται η εναπομένουσα ακτίνα της ράβδου, ενώ R_r-R_s' είναι το πάχος της περιοχής των προϊόντων σκουριάς στην οριακή κατάσταση της έναρξης της ρηγμάτωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της ρωγμής είναι ίσο με μηδέν στο επίπεδο της εξωτερικής επιφάνειας ($w=0$). Η ρωγή έχει ήδη ανοίξει, δίπλα στην διεπιφάνεια σκουριάς-σκυροδέματος.

Κατά την διάρκεια του τρίτου σταδίου, επιπρόσθετη ακτινική διαστολή της διαβρωμένης ράβδου, μετρούμενη ως η μεταβολή της εξωτερικής ακτίνας R_r' , προκαλεί αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής,

όπως μετράται από την εξωτερική επιφάνεια. Η εναπομένουσα ακτίνα της ράβδου είναι τελικά R_s'' , ενώ w είναι το εύρος της ρωγμής (σχήμα 1d). Για το παρόν προσομοίωμα γίνεται η θεώρηση ότι η ευκαμνία του γύρω σκυροδέματος είναι παρόμοια, καθώς και ο ρυθμός μεταβολής του όγκου λόγω της σκουριάς είναι παρόμοιος, παρά την ρηγμάτωση του σκυροδέματος και την μερική απώλεια προϊόντων σκουριάς από τις υπάρχουσες ρωγμές. Επίσης, δεν λαμβάνονται υπόψη ρωγμές λόγω επιβαλλόμενης φόρτισης των δοκών (καμπτικές κτλ). Τελικά, η συνολική ποσοστιαία απώλεια μάζας του χαλύβδινου οπλισμού λόγω διάβρωσης μετά την έναρξη ρηγμάτωσης του σκυροδέματος μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα από το εύρος της ρωγμής λόγω διάβρωσης σύμφωνα με την προτεινόμενη σχέση:

$$m_l (\%) = \frac{w + \delta_c}{\delta_c} (m_{l,porous} + m_{l,prad}) \quad (6)$$

όπου $m_{l,porous}$ είναι η ποσοστιαία απώλεια μάζας του χάλυβα μέχρι να γεμίσει η ζώνη του πορώδους και $m_{l,prad}$ είναι η ποσοστιαία απώλεια μάζας του χάλυβα έως ότου ξεπεραστεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η απώλεια μάζας σύμφωνα με το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα βασίζεται στην εξής υπόθεση ως προς την συμβατότητα της παραμόρφωσης μετά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος: επιπλέον ακτινική διάγκωση της διαβρωμένης ράβδου μετρούμενη ως η μεταβολή της εξωτερικής ακτίνας, προκαλεί αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής (ή των ρωγμών), θεωρώντας παρόμοια ευκαμνία στην γύρω περιοχή.

Σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων με πειραματικά αποτελέσματα

Από πειράματα που είναι διαθέσιμα στην διεθνή βιβλιογραφία, αξιοποιούνται όλα τα δεδομένα που λαμβάνει υπόψη το αναλυτικό προσομοίωμα προκειμένου να εκτιμηθεί η απώλεια μάζας του εφελκυσμένου χάλυβα. Για τη χρήση του αναλυτικού προσομοιώματος θεωρείται ότι το πάχος της ζώνης του πορώδους κυμαίνεται μεταξύ 10-20 μm (λαμβάνεται ίσο με 10 μm), ο λόγος του Poisson είναι ίσος με $\nu=0.20$ και ο συντελεστής ερπυσμού του σκυροδέματος $\phi_{cr}=2.35$. Η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος λαμβάνονται ίσα με αυτά που δίνονται πειραματικά, διαφορετικά υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις που προτείνει ο CEB/FIP *fib* Model Code 2010. Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι ίση με $f_{ck,max}=1.30*0.30*f_{ck}^{2/3}$ (MPa) για κατηγορία σκυροδέματος $\leq C50$. Το μέτρο Ελαστικότητας σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών είναι ίσο με $E_{ci}=E_{co}*a_E*(f_{cm}/10)^{1/3}$, όπου $f_{cm}=0.30*f_{ck}^{2/3}$ η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για κατηγορία $\leq C50$, $E_{co}=21.5*10^3$ (MPa) και $a_E=1.00$.

Για την εφαρμογή του προσομοιώματος, εκτός από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται επίσης η διάμετρος των εφελκυσμένων ράβδων, η επικάλυψη του σκυροδέματος και το εύρος της διαμήκου ρωγμής που δημιουργείται λόγω διάβρωσης. Για το εύρος της ρωγμής λαμβάνεται η μέγιστη τιμή κατά μήκος των ρωγμών και συνήθως συναντάται στο εφελκυσμένο πέλμα των δοκών. Η ποσοστιαία απώλεια μάζας του χάλυβα συγκρίνεται τελικά με την αντίστοιχη που αναφέρεται βιβλιογραφικά και συνήθως έχει μετρηθεί πειραματικά.

Εφαρμογή του προσομοιώματος σε διαβρωμένες δοκούς από ΩΣ της διεθνούς βιβλιογραφίας

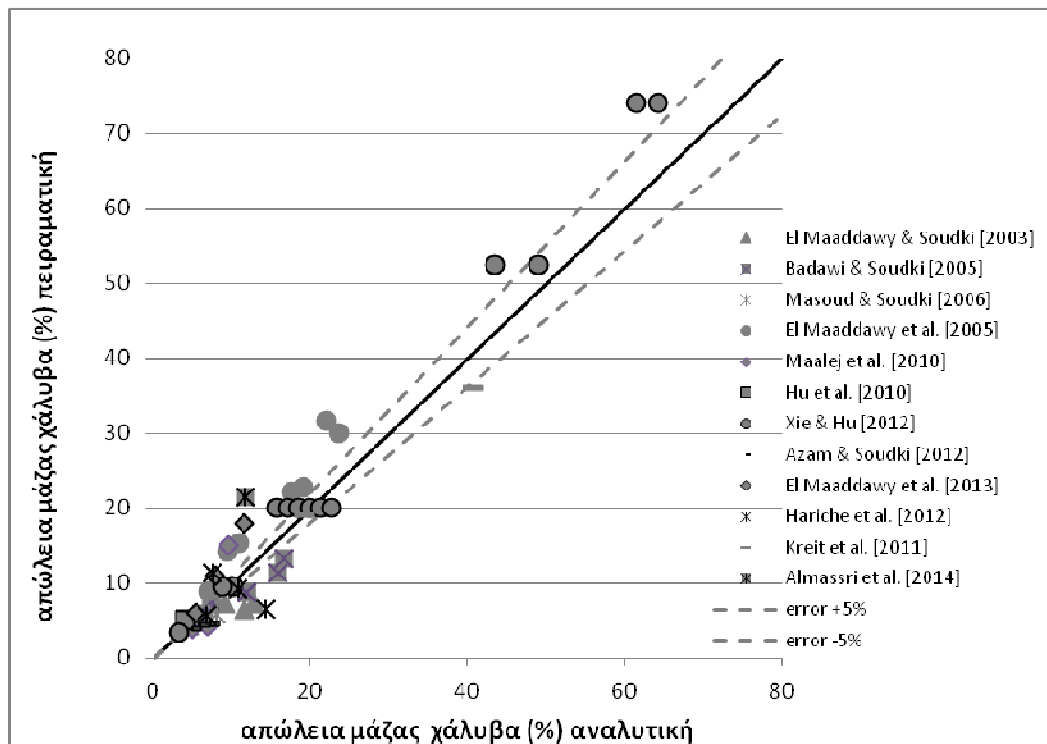
Οι εκτιμήσεις της απώλειας μάζας του χάλυβα αξιολογούνται με βάση τον λόγο των αναλυτικών προς τα πειραματικά αποτελέσματα:

$$R = \frac{m_{l,anal}}{m_{l,exp}} \quad (8)$$

και με βάση το απόλυτο σφάλμα:

$$AE = \frac{|m_{l,anal} - m_{l,exp}|}{m_{l,exp}} 100 (\%) \quad (9)$$

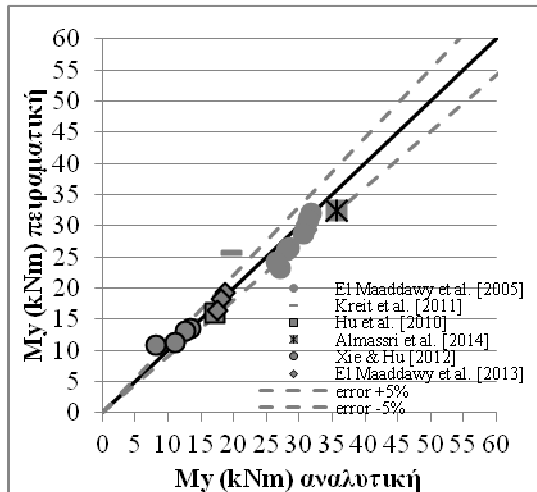
Η σύγκριση αφορά 51 συνολικά δοκούς από ΩΣ της διεθνούς βιβλιογραφίας. Το διαθέσιμο εύρος ρωγμών κυμαίνεται μεταξύ 0.20-4.60 mm, η διάμετρος των ράβδων από 11.3-25.4 mm, η επικάλυψη του σκυροδέματος από 10-40 mm, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από 30-55 MPa και η απώλεια μάζας του χάλυβα μεταξύ 3.5-74 %. (από λιγότερο έως εντονότερο βαθμό διάβρωσης). Το μέσο απόλυτο σφάλμα της προβλεπόμενης απώλειας μάζας για όλες τις δοκούς προκύπτει τελικά ίσο με $AAE=26.27\%$ και ο μέσος λόγος των αναλυτικών εκτιμήσεων προς τα πειραματικά αποτελέσματα $AR=1.06$. Στο σχήμα 3 συγκρίνονται τα αναλυτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα.



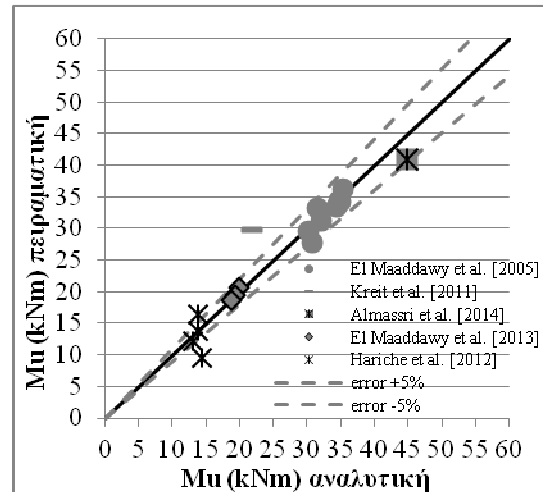
Σχ. 3 Πειραματική απώλεια μάζας χάλυβα (%) έναντι αναλυτικής απώλειας μάζας (%).

Προκύπτει ότι οι αναλυτικές προβλέψεις της ποσοστιαίας απώλειας μάζας του χάλυβα είναι ικανοποιητικές συγκρινόμενες με τα πειραματικά αποτελέσματα, τόσο για χαμηλή όσο και για υψηλού βαθμού απώλεια μάζας οπλισμού. Σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχουν μερικές αποκλίσεις στις εκτιμήσεις, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε υπόλοιπες άγνωστες παραμέτρους που επηρεάζουν την απώλεια μάζας του χάλυβα. Επιπρόσθετα, οι διαφορετικές προσεγγίσεις στις μετρήσεις του μέγιστου εύρους ρωγμής και της απώλειας μάζας μεταξύ των ερευνητών, ενδέχεται να επηρεάζουν τα εξαγόμενα σφάλματα.

Η εκτιμώμενη απώλεια μάζας του χάλυβα αντιστοιχεί σε εναπομένονσα διάμετρο του οπλισμού, εάν γίνει η θεώρηση ότι η διάβρωση είναι ομοιόμορφη κατά την περίμετρο και κατά μήκος της ράβδου. Η εκτιμώμενη καμπτική αντοχή στην διαρροή 18 δοκών από ΩΣ της διεθνούς βιβλιογραφίας χωρίς ενίσχυση παρουσιάζει μέσο απόλυτο σφάλμα $AAE=7.46\%$ και $AR=1.01$. Η αντίστοιχη προβλεπόμενη καμπτική ικανότητα κατά την αστοχία 17 δοκών από ΩΣ μη ενισχυμένων παρουσιάζει μέσο απόλυτο σφάλμα $AAE=8.61\%$ και $AR=1.02$. Στα σχήματα 4, 5 απεικονίζεται η πειραματική έναντι της αναλυτικής καμπτικής αντοχής αντίστοιχα, παρουσιάζοντας ικανοποιητική σύγκλιση.



Σχ. 4 Πειραματική καμπτική αντοχή στην διαρροή έναντι αναλυτικής καμπτικής αντοχής στην διαρροή διαβρωμένων δοκών.



Σχ. 5 Πειραματική καμπτική αντοχή στην αστοχία έναντι αναλυτικής καμπτικής αντοχής στην αστοχία διαβρωμένων δοκών.

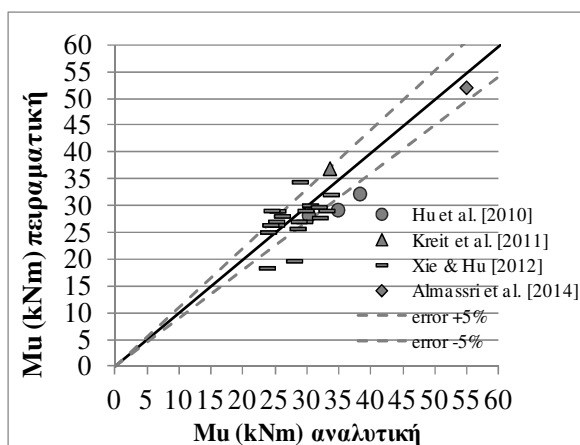
Οι διαβρωμένοι συνδετήρες έχουν κάποια επιρροή στις διαβρωμένες εφελκόμενες ράβδους και στην μεταβολή του εύρους της ρωγμής, όμως στην παρούσα έρευνα η επιρροή τους θεωρείται αμελητέα. Η διαθέσιμη διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει δοκούς είτε με διαβρωμένους συνδετήρες, είτε με συνδετήρες που έχουν μονωθεί ώστε να μην διαβρωθούν.

Εφαρμογή του προσομοιώματος σε διαβρωμένες δοκούς από ΩΣ ενισχυμένες με σύνθετα υλικά FRP της διεθνούς βιβλιογραφίας

Η χρήση ινωπλισμένων πολυμερών (FRP) στην ενίσχυση και αποκατάσταση στοιχείων από ωπλισμένο σκυρόδεμα, έχει αποκτήσει ευρεία αποδοχή τα τελευταία χρόνια, τα οποία φαίνεται να είναι πολύ αποτελεσματικά στην αποκατάσταση αλλά και αύξηση της καμπτικής ικανότητας των στοιχείων. Η ύπαρξη υφασμάτων FRP μειώνει τον βαθμό διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού καθώς μειώνεται η διείσδυση χλωριούχων στο σκυρόδεμα, όπως αναφέρουν οι Soudki et al. (2007). Τα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα (CFRP) υπό μορφή υφασμάτων αλλά και ελασμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως στην ενίσχυση δοκών που έχουν υποστεί διάβρωση του χάλυβα. Σύνολο 24 διαβρωμένων δοκών από ΩΣ ενισχυμένων με σύνθετα υλικά, από την διεθνή βιβλιογραφία, συγκρίνονται με το αντίστοιχο αναλυτικό προσομοίωμα. Οι δοκοί που μελετήθηκαν ενισχύονται καμπτικά με εξωτερικά επικολλούμενα σύνθετα υλικά από άνθρακα (μέθοδος EBR), αλλά και με μία νέα τεχνική όπου εγκοπές ανοίγονται στο εφελκόμενο πέλμα, ο οπλισμός από σύνθετα υλικά

(ελάσματα) εισέρχεται στις εγκοπές και στην συνέχεια γεμίζονται με ρητίνη (μέθοδος οπλισμού NSM). Σημαντική παράμετρο μελέτης αποτελεί και η επισκευή του υποστρώματος του σκυροδέματος που έχει διαβρωθεί. Στις περισσότερες εργασίες η εφαρμογή των σύνθετων υλικών γίνεται απευθείας στο διαβρωμένο σκυρόδεμα, ενώ σε ελάχιστες μελέτες αφαιρείται το σαθρό υπόστρωμα και εφαρμόζεται επισκευαστικό τσιμεντοειδές κονίαμα προκειμένου να αποκατασταθεί η συνάφεια μεταξύ των διαβρωμένων ράβδων και του σκυροδέματος. Κατά την διάρκεια της επισκευής του υποστρώματος, μπορούν να εφαρμοστούν σημαντικές μέθοδοι ώστε να αποτραπεί περεταίρω διάβρωση, όπως εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης, καθοδική προστασία κλπ.

Με την εφαρμογή του αναλυτικού προσομοιώματος εκτιμήθηκε η απώλεια μάζας του εφελκόμενου χάλυβα (και αντιστοίχως της διαμέτρου της διαβρωμένης ράβδου) και στην συνέχεια προσδιορίστηκε η εναπομένουσα καμπτική αντοχή των ενισχυμένων δοκών με σύνθετα υλικά. Το μέσο απόλυτο σφάλμα προέκυψε ίσο με $AAE=11.52\%$, ενώ ο μέσος λόγος των αναλυτικών προς τις πειραματικές αντοχές ίσος με $AR=1.04$. Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται η πειραματική έναντι της αναλυτικής καμπτικής ικανότητας των διαβρωμένων ενισχυμένων δοκών και τα αποτελέσματα φαίνεται να συγκλίνουν ικανοποιητικά.



Σχ. 6 Πειραματική καμπτική αντοχή έναντι αναλυτικής καμπτικής αντοχής διαβρωμένων ενισχυμένων δοκών.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία προτείνεται αναλυτικό προσομοίωμα εκτίμησης της απώλειας μάζας διαβρωμένου χάλυβδινου οπλισμού δοκών έως και πέρα από τη διαμήκη ρηγμάτωση του σκυροδέματος λόγω διάβρωσης. Το προτεινόμενο προσομοίωμα βασίζεται στον οπτικό έλεγχο του μοτίβου των ρωγμών σκυροδέματος λόγω διάβρωσης και στην μέτρηση του εύρους αυτών. Το προσομοίωμα λαμβάνει υπόψη τρία διαφορετικά στάδια. Μετά την έναρξη της διάβρωσης του οπλισμού, η σκουριά γεμίζει την ζώνη του πορώδους γύρω από τις ράβδους. Η περαιτέρω αύξηση του όγκου λόγω των προϊόντων σκουριάς προκαλεί πίεση στο περιβάλλον σκυρόδεμα. Η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος οδηγεί στη ρηγμάτωσή του. Η εσωτερική ακτινική πίεση σε αυτό το στάδιο υπολογίζεται και συσχετίζεται με τον βαθμό διάβρωσης ως συνάρτηση της απώλειας

μάζας του χάλυβα. Ακολουθείται η υπόθεση ότι παρά την ρηγμάτωση του σκυροδέματος και τη μερική απώλεια προϊόντων σκουριάς λόγω των ρωγμών που δημιουργήθηκαν, η ευκαμψία του γύρω σκυροδέματος είναι παρόμοια, όπως παρόμοιος είναι και ο ρυθμός μεταβολής του όγκου της σκουριάς. Δεν λαμβάνονται υπόψη ρωγμές που δημιουργούνται λόγω φόρτισης, όπως είναι οι καμπτικές ρωγμές. Το αναλυτικό προσομοίωμα συμπεριλαμβάνει παράγοντες όπως τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, την διάμετρο της ράβδου και την επικάλυψη του σκυροδέματος. Έτσι, για δεδομένο εύρος ρωγμής που δημιουργήθηκε λόγω της διάβρωσης, εκτιμάται το ποσοστό απώλειας μάζας του οπλισμού.

Πειραματικά αποτελέσματα απώλειας μάζας χάλυβα όπως παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία, συγκρίνονται με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις του αναλυτικού προσομοιώματος και συγκλίνουν ικανοποιητικά. Οι απώλεια μάζας του εφελκυσμένου οπλισμού αντιστοιχεί σε εναπομένουσα διάμετρο ράβδου, βάσει της οποίας μπορεί να υπολογιστεί η καμπτική ικανότητα δοκών. Έτσι, συγκρίνεται η καμπτική αντοχή 18 διαβρωμένων δοκών της διεθνούς βιβλιογραφίας κατά την διαρροή και αστοχία, με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις του προσομοιώματος και τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Αντίστοιχη σύγκριση γίνεται και με την καμπτική αντοχή 24 διαβρωμένων δοκών της βιβλιογραφίας που έχουν ενισχυθεί με ινωπλισμένα πολυμερή, και τα αποτελέσματα είναι εξίσου ικανοποιητικά.

Ευχαριστίες

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

Βιβλιογραφία

- Almassri B., Kreit A., Al Mahmoud F., Francois R. (2014), “Mechanical behavior of corroded RC beams strengthened by NSM CFRP rods.” *Composites:Part B*, 64:97-107.
- Almusallam A. (2001), “Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars”, *Construction and Building Materials*, 15:361-368.
- Alonso C., Andrade C., Rodriguez J., Diez J.M. (1998), “Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion.”, *Materials and Structures*, 31(8):435-441.
- Andrade C., Alonso C., Garcia D., Rodriguez J. (1991), “Remaining lifetimes of reinforced concrete structures : effect of corrosion on the mechanical properties of the steel.”, NACE, Cambridge, IK, pp 546-557.
- Andrade C., Molina F.J., Alonso C. (1993), “Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I- Experiment Test.”, *Materials and Structures*, 26:453-464.
- Azam R., Soudki K. (2012), “Structural performance of shear-critical RC deep beams with corroded longitudinal steel reinforcement.” *Cement & Concrete Composites*, 34:946-957.
- Badawi M., Soudki K. (2005), “Control of Corrosion-Induced Damage in Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates.” *Journal of Composites for Construction*, 9(2):195-201.
- Balafas I., Burgoyne C. (2011), “Modeling the Structural Effects of Rust in Concrete Cover.”, *Journal of Engineering Mechanics*, 137(3):175-185.
- Cabrera JG. (1996), “Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion.”, *Cement & Concrete Composites*, 18:47-59.
- Coronelli D., Gambarova P. (2004), “Structural Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams: Modeling Guidelines”, *Journal of Structural Engineering*, 130(8):1214-1224.
- El Maaddawy T., Soudki K. (2003). “Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of steel Reinforcement in Concrete.” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1):41-47.

- El Maaddawy T., Soudki K., Topper T. (2005), “Long-Term Performance of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams.” *ACI Structural Journal*, 102(5):649-656.
- El Maaddawy T., Soudki K. (2007), “A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking.”, *Cement & Concrete Composites*, 29:168-175.
- El Maaddawy T., Nessabi A., El-Dieb A. (2013), “Flexural Response of Corroded Reinforced Concrete Beams Strengthened with Powder-Actuated Fastened Composites.” *Journal of Composites for Construction*, 17.
- Federation International du Beton (2012), *fib Model Code 2010*.
- Hariche L., Ballim Y., Bouhicha M., Kenai S. (2012), “Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behavior of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion.” *Cement & Concrete Composites*, 34:1202-1209.
- Hu R., Su L., Wang Y., Xie J. “Experimental study on flexural capacity of corrosion-damaged RC beams repaired with different layers of CFRP.” *Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*, China June 20-25 2010.
- Khan I., Francois R., Castel A. (2014), “Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams.”, *Cement & Concrete Research*, 56:84-96.
- Kreit A., Al Mahmoud F., Castel A., Francois R. (2011), “Repairing corroded RC beam with near-surface mounted CFRP rods.” *Materials and Structures*, 44:1205-1217.
- Li C., Melchers R.E., Zheng J. (2006), “Analytical model for corrosion-induced crack width in reinforced concrete structures.”, *ACI Structural Journal*, 103(4):479-487.
- Liu T., Weyers R. (1998), “Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated concrete structures.”, *ACI Structural Journal*, 95 (6):675-681.
- Maalej M., Chhoa C., Quek S. (2010), “Effect of cracking, corrosion and repair on the frequency of RC beams.” *Construction and Building Materials*, 24:719-731.
- Malumbela G., Alexander M., Moyo P. (2011a), “Model for cover cracking of RC beams due to partial surface steel corrosion.”, *Construction & Building Materials*, 25:987-991.
- Malumbela G., Moyo P., Alexander M. (2011b), “Influence of corrosion crack patterns on the rate of crack widening of RC beams, *Construction & Building Materials*, 25:2450-2553.
- Masoud S., Soudki K. (2006), “Evaluation of corrosion activity in FRP repaired RC beams.” *Cement & Concrete Composites*, 28:969-977.
- Soudki K., El-Salakawy E., Craig B. (2007), “Behavior of CFRP Strengthened Reinforced Concrete Beams in Corrosive Environment.”, *Journal of Composites for Construction*, 11:291-298.
- Torres-Acosta A., Sagues A. (2000), “Concrete cover cracking with localized corrosion of reinforcing steel.”, V.M. Malhotra (Ed.) *Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, Barcelona, Spain, (1):591-611
- Ueda T., Sato Y., Kakuta Y., Kameya H., (1998), Analytical study on concrete cover due to reinforcement corrosion.”, *Concrete Under Severe Condition 2, Proceedings of International Conference*, Tromso, Norway, 678-687.
- Vidal T., Castel A., Francois R. (2004), “Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete.”, *Cement and Concrete Research*, 34:165-174.
- Weyers R. (1998), “Service life model for concrete structures in chloride laden environments.”, *ACI Material Journal*, 95(4):445-453.
- Wu F., Gong J., Zhang Z., (2014), “Calculation of corrosion rate for reinforced concrete beams based on corrosive crack width.”, *Journal of Zhejiang University-Science A(Applied Physics & Engineering)*, 15 (3):197-207
- Xia J., Jin W. (2014), “Prediction of Corrosion-Induced Crack Width of Corroded Reinforced Concrete Structures.”, *4th International Conference on the Durability of Concrete Structures*, Purdue University, West Lafayette, USA , 24-26 July.
- Xie J., Hu R. (2012), “Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer.” *Construction and Building Materials*, 38:708-716.
- Zhang R., Castel A., Francois R. (2010), “Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process.”, *Cement & Concrete Research* , 40(3):415-425.