

Μοντέλα βύθισης και εύρους ρωγμών για καμπτόμενες δοκούς σκυροδέματος οπλισμένες με ράβδους FRP

Deflection and crack width models for concrete beams reinforced with FRP

Βασίλης ΚΑΡΑΤΖΑΦΕΡΗΣ¹, Μαρίνος ΚΑΤΤΗΣ², Νεφέλη ΜΗΤΣΟΠΟΥΛΟΥ³, Βασίλης ΤΣΙΤΣΟΣ⁴

Λέξεις κλειδιά: ράβδοι FRP, βύθιση δοκού, εύρος ρωγμών,
Keywords: FRP bars, beam deflection, crack width

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία, προτείνονται δύο νέα μοντέλα για την πρόβλεψη της βύθισης και του εύρους ρωγμών μιας καμπτόμενης δοκού σκυροδέματος που είναι οπλισμένη με ράβδους FRP. Στα μοντέλα αυτά, η επίδραση της εφελκυστικής ακαμψίας των ράβδων οπλισμού, τόσο στην καμπτική βύθιση όσο και στο εύρος ρωγμής, εισάγεται ορίζοντας την συνάρτηση βαθμού βλάβης της ρηγματωμένης δοκού. Οι προβλέψεις των προτεινόμενων μοντέλων ελέγχονται πειραματικά διεξάγοντας δέκα πειραματικές δοκιμές σε δοκούς σκυροδέματος που είναι οπλισμένες με ράβδους CFRP, GFRP και χάλυβα. Συγκεκριμένα, οι δοκοί υποβάλλονται σε κάμψη τεσσάρων σημείων, και οι μετρούμενες βυθίσεις και εύρη ρωγμών αναλύονται και συγκρίνονται με αυτά που προβλέπουν τα προτεινόμενα μοντέλα. Προκύπτει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αυτά που παρέχουν τα προτεινόμενα μοντέλα.

ABSTRACT: In this work, two new models are proposed to predict the deflection and crack width of a FRP reinforced concrete beam. In these models, the effect of the tension stiffening of the reinforcement bars on both bending and cracking widths is taken into account by defining the damage degree function of a cracked beam. The predictions of the proposed models are checked

¹ Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Διδάκτωρ ΕΜΠ, email: vkaratzafelis@gmail.com

² Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, email: mkattis@central.ntua.gr

³ Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψήφια Διδάκτωρ, ΕΜΠ, email: nmitsopoulou@central.ntua.gr

⁴ Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ, vsitsos@hotmail.com

experimentally by conducting experimental tests on ten concrete beams reinforced with CFRP, GFRP and steel bars. Specifically, the beams are subjected to a four-point bending and the measured deflections and crack widths are analyzed and compared with those predicted by the proposed models. It is found that the experimental results are in good agreement with those predicted by the proposed models.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός δοκών σκυροδέματος οπλισμένων με ράβδους FRP διέπεται από τις απαιτήσεις λειτουργικότητας και όχι από τις απαιτήσεις αντοχής, όπως συμβαίνει στην περίπτωση δοκών σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα. Αυτό οφείλεται στην γραμμική ελαστική συμπεριφορά που επιδεικνύουν οι ράβδοι οπλισμού FRP μέχρι την αστοχία τους, που, σε συνδυασμό με το χαμηλό μέτρο ελαστικότητάς τους και την υψηλή εφελκυστική αντοχή τους, οδηγεί, μετά την ρηγμάτωση των δοκών, σε σημαντική αύξηση της παραμόρφωσής τους και σε σημαντική μείωση της ακαμψίας τους. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη μη αποδεκτών επιπέδων βύθισης και εύρους ρωγμών στις δοκούς, ακόμη και στην περίπτωση υπεροπλισμού τους. Τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την εκτίμηση της καμπτικής βύθισης και του εύρους ρωγμών σε δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό FRP (Benmokrane et al., 1996; Masmoudi et al., 1998; Pecce et al., 2000; Toutanji and Saafi, 2000; Bischoff, 2005; Alsayed et al., 2000; Rafi et al., 2008). Τα περισσότερα από τα μοντέλα αυτά αποτελούν τροποποιήσεις εκείνων που έχουν αναπτυχθεί για δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα, εισάγοντας κατάλληλους συντελεστές για να προσαρμόσουν τις προβλέψεις τους στα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο, η αξιοπιστία των μοντέλων αυτών είναι αμφισβητήσιμη, διότι η ανάπτυξή τους δεν βασίζεται στην ποιοτικά διαφορετική συμπεριφορά που εμφανίζουν οι ράβδοι FRP σε σύγκριση με εκείνη του χάλυβα.

Η καμπτική συμπεριφορά δοκών σκυροδέματος με οπλισμό FRP καθορίζεται κυρίως από τις πρωτεύουσες ρωγμές που εμφανίζονται στην εφελκυσόμενη περιοχή τους, που είναι σχεδόν κάθετες στον άξονά τους. Όσο αυξάνεται το φορτίο των δοκών, ο αριθμός των πρωτευουσών ρωγμών αυξάνεται προοδευτικά, μέχρι να επιτευχθεί μια σταθεροποιημένη μορφή ρηγμάτωσης. Στη συνέχεια, με την αύξηση του φορτίου, οι πρωτεύουσες ρωγμές διευρύνονται και επιμηκύνονται μέχρι να συμβεί η αστοχία των δοκών. Η υποβάθμιση της συμπεριφοράς των δοκών λόγω ρηγμάτωσης μπορεί να αξιολογηθεί με τη μέγιστη βύθιση και το μέγιστο εύρος ρωγμών που εμφανίζονται σε αυτές κάτω από την δράση των φορτίων λειτουργίας τους.

Στην μοντελοποίηση της συμπεριφοράς μιας ρηγματωμένης δοκού, η συνεισφορά της ρηγμάτωσης, τόσο στην καμπτική βύθιση όσο και στο εύρος ρωγμών, μπορεί να παρθεί υπόψη μέσω της εφελκυστικής ακαμψίας των ράβδων οπλισμού FRP.

Στην παρούσα εργασία, προτείνονται δύο νέα μοντέλα για την πρόβλεψη της καμπτικής βύθισης και του εύρους ρωγμών μιας δοκού με οπλισμό FRP. Στα μοντέλα αυτά, η επίδραση της εφελκυστικής ακαμψίας, τόσο πάνω στην καμπτική βύθιση όσο και στο εύρος ρωγμής, παίρνεται υπόψη με την συνάρτηση βλάβης της ρηγματωμένης δοκού. Οι προβλέψεις των προτεινόμενων μοντέλων ελέγχονται πειραματικά με τα αποτελέσματα δέκα πειραματικών δοκιμών σε δοκούς σκυροδέματος που έχουν οπλισθεί με ράβδους CFRP, GFRP και χάλυβα. Συγκεκριμένα, οι δοκοί υποβάλλονται σε κάμψη τεσσάρων σημείων στο εργαστήριο, και οι μετρούμενες βυθίσεις και εύρη ρωγμών αναλύονται και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που παρέχουν τα προτεινόμενα μοντέλα. Προκύπτει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με αυτά που παρέχουν τα μοντέλα.

ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΥΘΙΣΗΣ ΚΑΙ ΕΥΡΟΥΣ ΡΩΓΜΩΝ

Τα μοντέλα βύθισης και εύρους ρωγμών σε δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό FRP που παρουσιάζονται παρακάτω, περιγράφονται με βάση το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας $M-\varphi$ ενός τυπικού στοιχείου των δοκών αυτών, που δείχνεται στο Σχήμα 1. Το αρχικό γραμμικό τμήμα της καμπύλης του διαγράμματος αυτού αντιστοιχεί στην μη ρηγματωμένη κατάσταση του στοιχείου, ενώ το υπόλοιπο τμήμα αντιστοιχεί στην ρηγματωμένη κατάστασή του. Για μια ροπή M , που εφαρμόζεται στις ακραίες διατομές του στοιχείου, η καμπυλότητα $\varphi (=1/r)$ του στοιχείου στην ρηγματωμένη κατάστασή του μπορεί να εκφρασθεί με την σχέση

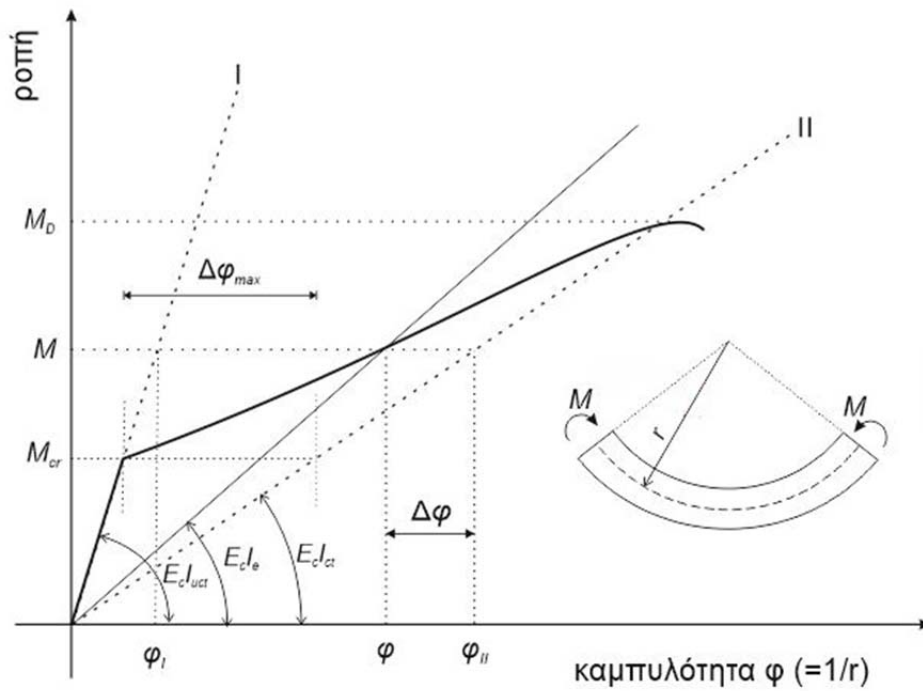
$$\varphi = \frac{g(\omega)}{\omega} \varphi_I + \left[1 - \frac{g(\omega)}{\omega} \right] \varphi_{II}, \quad (1)$$

όπου

$$\varphi_I = \frac{M}{E_c I_{uct}}, \quad \varphi_{II} = \frac{M}{E_c I_{ct}}, \quad g(\omega) = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \varphi_{\max}}. \quad (2)$$

Στην σχέση 1, η $g(\omega)$ είναι μια συνάρτηση της μεταβλητής $\omega = M / M_{cr}$, που εκφράζει την μείωση της εφελκυστικής ακαμψίας των ράβδων οπλισμού της δοκού με την αύξηση της ροπής. Η συνάρτηση αυτή ορίζει την συνάρτηση βλάβης του στοιχείου της δοκού. Οι ποσότητες φ_I , φ_{II} είναι οι καμπυλότητες που θα μπορούσε να επιδείξει το στοιχείο της δοκού κάτω από την εφαρμοσμένη ροπή

$M (> M_{cr})$, αν ήταν μη ρηγματωμένο και πλήρως ρηγματωμένο, αντίστοιχα. Το E_c είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και τα I_{uct}, I_{ct} είναι οι ροπές αδρανείας της διατομής του στοιχείου στην μη ρηγματωμένη και ρηγματωμένη κατάσταση του, αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων

Η ποσότητα $1-g(\omega)$ εκφράζει τον βαθμό βλάβης που έχει υποστεί το στοιχείο της δοκού στην στάθμη φόρτισης $\omega = M / M_{cr}$. Στην στάθμη φόρτισης $\omega = 1$, όταν δηλαδή $M = M_{cr}$, το στοιχείο θεωρείται χωρίς βλάβη, που σημαίνει ότι $g(1) = 1$. Η πλήρης βλάβη του στοιχείου θεωρείται ότι λαμβάνει χώρα στην στάθμη $\omega = \omega_D$, όταν δηλαδή $M = M_D$, όπου M_D αντιπροσωπεύει την ροπή που προξενεί την πλήρη βλάβη του στοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι $g(\omega_D) = 0$. Στα προτεινόμενα μοντέλα, η συνάρτηση βλάβης που επιλέγεται έχει την μορφή

$$g(\omega) = 1 - \left(\frac{\omega - 1}{\omega_D - 1} \right)^m, \quad \omega_D = \frac{M_D}{M_{cr}}. \quad (3)$$

όπου m είναι μια παράμετρος που επιλέγεται πειραματικά από την μορφή του κλάδου της καμπύλης μετά την ρηγμάτωση.

Εισάγοντας την (3) στην (1), προκύπτει

$$\varphi = \frac{M_{cr}}{M} \left(1 - \left(\frac{M - M_{cr}}{M_D - M_{cr}} \right)^m \right) \varphi_I + \left[1 - \frac{M_{cr}}{M} \left(1 - \left(\frac{M - M_{cr}}{M_D - M_{cr}} \right)^m \right) \right] \varphi_{II}. \quad (4)$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζει την καμπυλότητα ($\varphi=1/r$) του στοιχείου της δοκού σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης ροπής M στις ακραίες διατομές του (Σχήμα 1). Με βάση την σχέση αυτή, μπορεί να προσδιορισθεί άμεσα η βύθιση μιας καμπτόμενης δοκού χρησιμοποιώντας γνωστές μεθόδους της στατικής.

Για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμής w_k μιας δοκού σκυροδέματος με οπλισμό FRP, προτείνεται η παρακάτω σχέση

$$w_k = s_{r,\max} \Delta \varepsilon_{fcm} \quad (5)$$

όπου $s_{r,\max}$ είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των διαδοχικών πρωτευουσών ρωγμών που σχηματίζονται στην καμπτόμενη δοκό και $\Delta \varepsilon_{fcm}$ είναι η μέση διαφορά παραμόρφωσης μεταξύ των ράβδων οπλισμού FRP και του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η μέγιστη απόσταση ρωγμών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$s_{r,\max} = 3.4c + 0.213k_f \frac{\varphi_f}{\rho_{ef}} \quad (6)$$

όπου c είναι το πάχος επικάλυψης σκυροδέματος, φ_f η διάμετρος των ράβδων οπλισμού και ρ_{ef} είναι ο ισοδύναμος λόγος οπλισμού σε εφελκυσμό που δίνεται από την σχέση $\rho_{ef} = A_f / A_{c,ef}$. Στην σχέση αυτή, $A_{c,ef}$ είναι η ισοδύναμη επιφάνεια σκυροδέματος σε εφελκυσμό, που παρέχεται από την σχέση $A_{c,ef} = 2.5(h-d)b$, και A_f , το εμβαδό οπλισμού της διατομής. Μεταξύ των πρωτευουσών ρωγμών με την μέγιστη απόσταση, η ποσότητα $\Delta \varepsilon_{fcm}$ θεωρείται ότι μεταβάλλεται σύμφωνα με την σχέση

$$\Delta \varepsilon_{fcm} = \beta \varepsilon_f [1 - g(\omega)], \quad (7)$$

όπου ε_f είναι η διαμήκης παραμόρφωση των ράβδων οπλισμού στην διατομή με ρωγμές, $g(\omega)$ είναι η συνάρτηση βλάβης που παρέχεται από την σχέση 3 και β μια σταθερά. Αντικαθιστώντας την (3) στην (7), προκύπτει

$$\Delta\varepsilon_{fcm} = \beta \frac{\sigma_f}{E_f} \left[1 - \frac{M_{cr}}{M} \left(1 - \left(\frac{M - M_{cr}}{M_D - M_{cr}} \right)^m \right) \right] \quad (8)$$

όπου $\sigma_f (= E_f \varepsilon_f)$ είναι η τάση των ράβδων οπλισμού στο ρηγματωμένο στοιχείο και E_f το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων FRP. Για την εκτίμηση των παραμέτρων m , β και k_f των παραπάνω σχέσεων, έγιναν εκτεταμένες παραμετρικές αναλύσεις με πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας. Με βάση τις αναλύσεις αυτές, προτείνονται $m = 1$, $\beta = 1.5$, $k_f = 1.4$ και $M_D = M_R$.

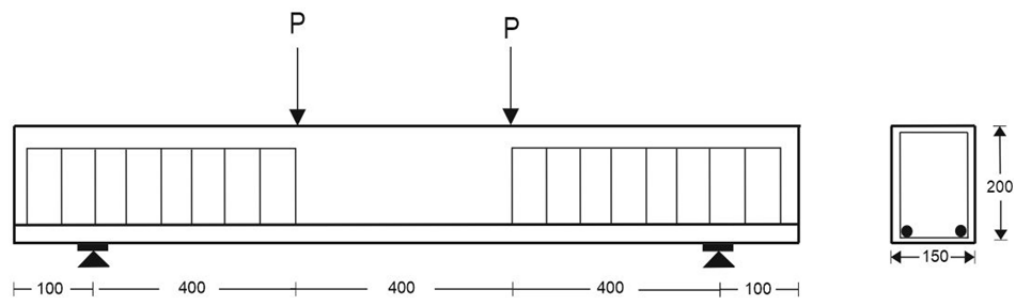
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

Για τον έλεγχο των προβλέψεων που παρέχουν τα προτεινόμενα μοντέλα διεξήχθη πειραματική έρευνα για τον πειραματικό προσδιορισμό της βύθισης και του εύρους ρωγμών που αναπτύσσονται σε καμπτόμενες δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό FRP. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν δέκα πειραματικές δοκιμές σε δοκούς σκυροδέματος με οπλισμό GFRP, CFRP, και μια δοκιμή σε δοκό με συμβατικό χάλυβα. Τα γεωμετρικά στοιχεία των δοκών και η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην δοκιμή δείχνονται στο Σχήμα 2. Οι δοκοί είχαν συνολικό μήκος 1400 mm και ορθογώνια διατομή διαστάσεων 150x200 mm. Ο οπλισμός των δοκών, μαζί με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Οι γεωμετρικές διαστάσεις και η ποσότητα του οπλισμού στις δοκούς επιλέχθηκαν, έτσι ώστε να αστοχήσουν από θρυμματισμό σκυροδέματος. Στην κάμψη τεσσάρων σημείων, το άνοιγμα των δοκών ήταν 1200 mm και το μήκος της ζώνης καθαρής κάμψης 400 mm. Για να αποφευχθεί διατμητική αστοχία των δοκών, οι διατμητικές περιοχές των δοκών οπλίσθηκαν με συνδετήρες χάλυβα διαμέτρου 10 mm ανά 100 mm, ενώ το πεδίο ανάμεσα στα δύο εφαρμοζόμενα φορτία ήταν χωρίς διατμητικό οπλισμό. Στις διατμητικές περιοχές των δοκών, για κατασκευαστικούς λόγους, τοποθετήθηκαν δυο ράβδοι χάλυβα διαμέτρου 8 mm ως άνω οπλισμός. Το φορτίο στις δοκούς εφαρμόσθηκε με υδραυλική πρέσα μέσω μιας βοηθητικής δοκού. Για την μέτρηση των βυθίσεων, χρησιμοποιήθηκαν τρία γραμμικά βελόμετρα και για την συλλογή των δεδομένων φόρτισης και βύθισης, ένα σύστημα αυτόματης καταγραφής.

Πίνακας 1. Γεωμετρία και αντοχή των ράβδων οπλισμού

	GFRP	CFRP	ΧΑΛΥΒΑΣ
Ονομαστική διάμετρος, mm	15.88	12.7	12
Εμβαδόν διατομής, mm ²	197.9	126.7	113
Εφελκυστική αντοχή/ Τάση διαρροής, MPa	761	2300	500
Ονομαστικό Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	46.7	130	200

Στις δοκιμές, η φόρτιση στις δοκούς εφαρμοζόταν αργά και αυξητικά, σε βήματα των 10 KN. Στο τέλος κάθε βήματος, καταγραφόταν η εξέλιξη των ρωγμών και μετριοτάταν το εύρος των ρωγμών με μικροσκόπιο στο μέσον των δοκών.



Σχήμα 2. Γεωμετρικά στοιχεία των δοκών και η διάταξη δοκιμής

Η πρώτη ρωγή στις δοκούς εμφανίσθηκε, όταν η μέγιστη τάση στις κάτω ίνες των δοκών, στη ζώνη καθαρής κάμψης, έφθασε στην εφελκυστική αντοχή κάμψης του σκυροδέματος. Η μέγιστη εφελκυστική τάση που προκαλεί τη πρώτη ρωγή στις δοκούς αντιστοιχεί σε μια ροπή κάμψης των δοκών, που είναι γνωστή ως ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} . Καθώς το φορτίο αυξανόταν μονοτονικά, ο σχηματισμός και η εξέλιξη των ρωγμών στην ζώνη καθαρής κάμψης των δοκών ακολουθούσε την ίδια διαδικασία για όλες τις δοκούς. Στην ζώνη αυτή, οι πρωτεύουσες ρωγμές κατευθύνονταν κάθετα στον άξονα των δοκών με τα άνω άκρα τους να περατώνονταν στην περιοχή θλίψης των δοκών. Μετά τον σχηματισμό της πρώτης πρωτεύουσας ρωγμής, με την αύξηση του φορτίου, εμφανίζονταν επιπρόσθετες ρωγμές μέχρις ότου επιτυγχάνονταν μια σταθεροποιημένη κατάσταση κυρίων ρωγμών. Στην σταθεροποιημένη κατάσταση των πρωτεύουσών ρωγμών στις δοκούς, οι μέσες αποστάσεις ρωγμών

μετρήθηκαν στις τιμές 200 mm, 210 mm και 200 mm για τις δοκούς CB-1, GB-2 και SB-3, αντίστοιχα. Οι πειραματικές τιμές των αποστάσεων των ρωγμών, μαζί με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη σχέση 6, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Θεωρητικές και πειραματικές τιμές μέγιστης απόστασης ρωγμών.

ΔΟΚΟΙ	$s_{r,max}^{th}$ [mm]	$s_{r,max}^{exp}$ [mm]
CB-1	200	200
GB-2	210	210
SB-3	192	200

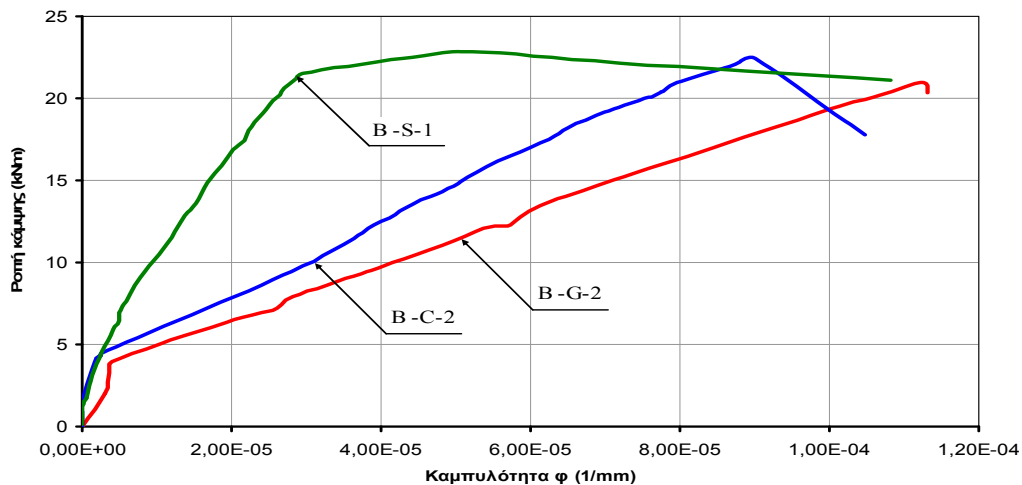
Με βάση τα δεδομένα για τα υλικά και την γεωμετρία των δοκών, οι ροπές ρηγμάτωσης των δοκών υπολογίστηκαν ακολουθώντας μια τυπική διαδικασία. Οι θεωρητικές τιμές των ρωγμών ρηγμάτωσης M_{cr}^{th} , μαζί με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές M_{cr}^{exp} που καταγράφηκαν στις δοκιμές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Από τα αποτελέσματα του πίνακα αυτού συνάγεται ότι οι ροπές ρηγμάτωσης βρίσκονται πολύ κοντά στις πειραματικές.

Στο Σχήμα 3, δείχνονται οι καμπυλότητες που αναπτύσσονται στο μέσον των δοκών B-G-2, B-C-2 και B-S-1 σαν συνάρτηση της εφαρμοσμένης ροπής. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες αυτές, η αρχική απόκριση των δοκών είναι γραμμική και δύσκαμπτη, επειδή οι δοκοί είναι χωρίς ρωγμές. Όταν η εφαρμοζόμενη φόρτιση υπερβαίνει την ροπή ρηγμάτωσης, μια ποιοτικά διαφορετική απόκριση βύθισης εμφανίζεται, που είναι αποτέλεσμα της ρηγμάτωσης των δοκών.

Πίνακας 3. Θεωρητικές και πειραματικές ροπές ρηγμάτωσης και αντοχής των πειραματικών δοκών

Οπλισμός	Δοκός	ρ_f	M_{cr}^{th}	M_{cr}^{exp}	M_R^{th}	M_R^{exp}
		[%o]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
GFRP	B-G-1	9.55	2.91	4.5	23.06	21
	B-G-2	9.55	2.91	4.4	23.06	22.5
	B-G-3	9.55	2.91	4.5	23.06	21.5
	B-G-4	15.31	2.93	4.4	27.07	25.5
	B-G-5	15.31	2.93	4.3	27.07	23
CFRP	B-C-1	9.55	3.08	3.2	33.45	28.5
	B-C-2	9.55	3.08	4.6	33.45	23.5
	B-C-3	3.56	2.96	3.8	24.03	20
	B-C-4	3.56	2.96	4.5	24.03	23.5
ΧΑΛΥΒΑΣ	B-S-1	8.42	3.18	3.4	14.60	17

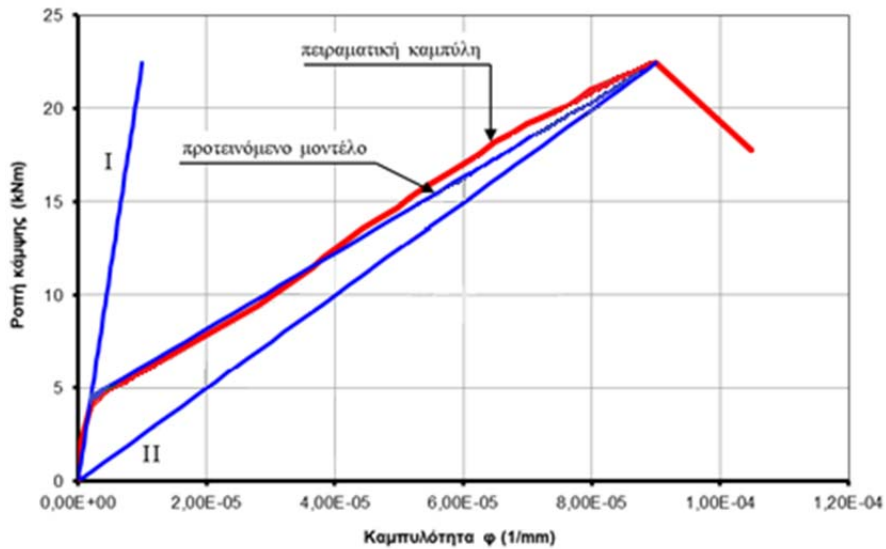
Από το Σχήμα 3 γίνεται φανερό ότι, μετά την ρηγμάτωση, η καμπύλη βύθισης $\varphi - M$ των δοκών με οπλισμό FRP αποτελείται από δύο διακριτούς κλάδους: έναν σχεδόν γραμμικό κλάδο που καλύπτει ένα ευρύ διάστημα μετά την ρηγμάτωση, και ένα μη γραμμικό κλάδο που βρίσκεται στην περιοχή της συνολικής ροπής αντοχής των δοκών.



Σχήμα 3. Πειραματικές καμπύλες ροπών-καμπυλοτήτων στο μέσο των δοκών B-G-2, B-C-2 και B-S-1

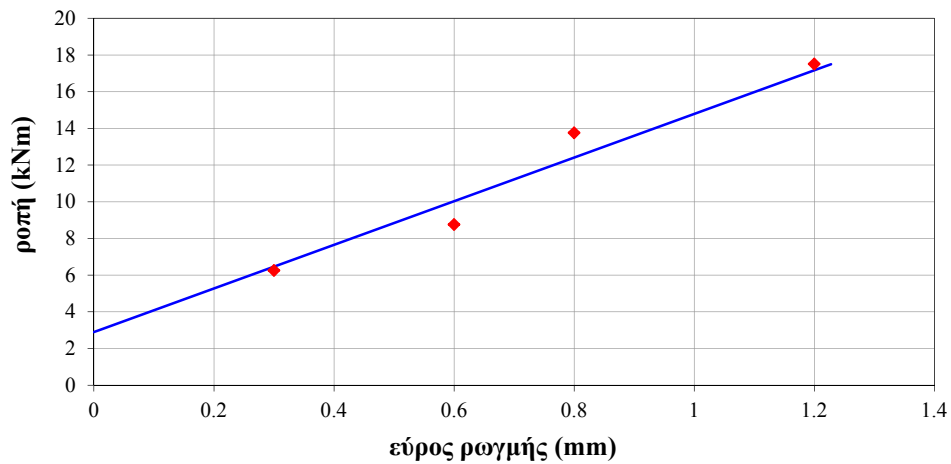
Ο πρώτος κλάδος μπορεί να αποδοθεί στην γραμμική συμπεριφορά που επιδεικνύουν τόσο οι ράβδοι οπλισμού όσο και το σκυρόδεμα στην θλιπτική περιοχή των δοκών. Ο μη γραμμικός κλάδος των καμπυλών στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω και αντιστοιχεί στην μη γραμμική απόκριση του σκυροδέματος. Τα κατερχόμενα τμήματα των καμπυλών περιγράφουν μια ασταθή συμπεριφορά των δοκών, που εκδηλώνεται όταν ξεπερασθεί η καμπτική αντοχή των δοκών. Αντίθετα, η δοκός με οπλισμό από χάλυβα επιδεικνύει μια ισχυρή μη γραμμική συμπεριφορά αμέσως μετά την ρηγμάτωση. Όπως αναμενόταν, όλοι οι δοκοί αστόχησαν από θρυμματισμό σκυροδέματος. Οι πειραματικές τιμές της ροπής αντοχής M_R^{exp} που καταγράφηκαν στις δοκιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 μαζί με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές M_R^{th} που υπολογίσθηκαν χρησιμοποιώντας την σχετική σχέση που προτάθηκε από τον Καρατζαφέρη (2009). Τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 δείχνουν ότι οι θεωρητικές τιμές της καμπτικής αντοχής βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Για λόγους σύγκρισης, οι πειραματικές καμπύλες $\varphi - M$ των δοκών με οπλισμό FRP, μαζί με τις αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες που προβλέπονται από το προτεινόμενο μοντέλο, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Οι θεωρητικές καμπύλες υπολογίσθηκαν χρησιμοποιώντας τις θεωρητικές τιμές M_{cr}^{th}

και M_R^{th} που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3, υποθέτοντας ότι ο κλάδος της καμπύλης $\varphi-M$ μετά την ρηγμάτωση είναι γραμμικός μέχρι την αστοχία της δοκού. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν να υπάρχει μια καλή συμφωνία



θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Σχήμα 4. Θεωρητική και πειραματική καμπύλη ροπών-καμπυλοτήτων για τη δοκό BC-2.



Σχήμα 5. Διάγραμμα ροπής-εύρους ρωγμών για την δοκό B-G-1.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές του εύρους των ρωγμών που μετρήθηκαν στο μέσο της δοκού B-G-1 στις διάφορες στάθμες της επιβαλλόμενης ροπής. Η συμπαγής γραμμή δείχνει τις θεωρητικές τιμές του εύρους ρωγμής που υπολογίστηκε με την σχέση 5. Όπως δείχνει το Σχήμα 5 υπάρχει μια καλή συμφωνία των θεωρητικών τιμών με τα πειρατικά αποτελέσματα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Alsayed, S.H., Al-Salloum Y.A. & Almusallam, T.H. “Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures”. *Composites Part B: Engineering*, Vol.31 (2000) 555-567

Benmokrane, B., Chaallal, O., & Masmoudi, R., “Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars”. *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 2, (1996) 46–55

Bischoff, P.H. “Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars”. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No 5 (2005) 752-767

Masmoudi, R., Theriault, M., & Benmokrane, B., “Flexural behavior of concrete beams reinforced with deformed fiber reinforced plastic reinforcing rods”. *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 6 (1998) 665-676

Pecce, M., Manfredi, G. & Cosenza E., “Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending”. *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 4, No 4 (2000) 182-190

Rafi, M.M., Nadjai, A. & Talamona, D., “Aspects of behavior of CFRP reinforced concrete beams in bending”. *Construction and Building Materials*, Vol.22 (2008) 277-285

Toutanji, H. & Saafi, M., “Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars”. *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No 5 (2000) 712-719

Καρατζαφέρης, Β., “Ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σκυροδέματος οπλισμένων με σύνθετες ράβδους”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα (2009)