

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ  
ΜΕΛΕΤΗ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΔΟΚΩΝ  
ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ  
ΜΕ GFRP  
ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ :  
ΣΤΑΥΡΟΥΛΛΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥ  
ΤΡΟΥΠΑΚΗ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ  
ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΜΠΑΞΕΒΑΝΗ ΕΛΕΝΗ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3679/1  
Ημερ. Εισ.: 6-06-2006  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ-ΠΜ  
2006  
ΣΤΑ

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	5
--	---

**1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ****Εισαγωγή**

1. Γενικά .....	7
-----------------	---

**2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ****Ινοπλισμένα πολυμερή**

2.1 Γνωρίζοντας τα FRP .....	9
2.1.1 Ρητίνες.....	9
2.1.2 Ίνες.....	12
2.1.3 Βασικές μηχανικές ιδιότητες συνθετικού οπλισμού.....	14
2.1.3.1 Συνεργασία FRP-Σκυροδέματος – Τάση συνάφειας .....	16
2.1.3.2 Συντελεστής θερμικής διαστολής των FRP .....	17
2.1.3.3 Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας .....	18
2.1.3.4 Ερπυσμός και χαλάρωση των ράβδων FRP.....	19
2.1.3.5 Διάρκεια ζωής των ράβδων FRP .....	20
2.1.3.6 Διατμητική αντοχή και παραμορφώσεις .....	21
2.1.3.7 Καμπτική αντοχή .....	22
2.1.3.8 Κόπωση των ράβδων FRP .....	23
2.1.3.9 Πλαστιμότητα.....	24

**3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ****Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραματικής έρευνας δοκών “ενισχυμένων” με ράβδους GFRP**

3.1	Ράβδοι GFRP .....	26
3.1.1	Διαδικασία κατασκευής και μορφοποίησης των ράβδων GFRP .....	27
3.1.2	Σύγκριση των ράβδων GFRP με τις αντίστοιχες ράβδους από χάλυβα.....	28
3.1.3	Χρήσεις .....	29
3.2	Πειραματικές μελέτες.....	31
3.2.1	Πείραμα 1 <sup>ο</sup> .....	31
3.2.1.1	Αποτελέσματα Πειράματος.....	33
3.2.1.2	Συμπεράσματα.....	34
3.2.2	Πείραμα 2 <sup>ο</sup> .....	36
3.2.2.1	Αποτελέσματα Πειράματος.....	38
3.2.2.2	Συμπεράσματα.....	40
3.2.3	Πείραμα 3 <sup>ο</sup> .....	42
3.2.3.1	Αποτελέσματα Πειράματος.....	44
3.2.3.2	Συμπεράσματα.....	46
3.2.4	Πείραμα 4 <sup>ο</sup> .....	47
3.2.4.1	Αποτελέσματα Πειράματος.....	49
3.2.4.2	Συμπεράσματα.....	50
3.2.5	Πείραμα 5 <sup>ο</sup> .....	50
3.2.5.1	Αποτελέσματα Πειράματος.....	52
3.2.5.3	Συμπεράσματα.....	53

**4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ****Αναλυτική περιγραφή πειραματικών προγραμμάτων**

4.1	Πείραμα 1ο : Δοκός ενισχυμένη με ράβδους GFRP.....	54
4.1.1	Περιγραφή πειράματος.....	54
4.1.2	Αποτελέσματα Πειράματος.....	58
4.2	Πείραμα 2ο : Δοκός ενισχυμένη με ράβδους χάλυβα.....	60

4.2.1	Περιγραφή πειράματος.....	60
4.2.2	Αποτελέσματα Πειράματος.....	68

## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Μοντέλα πρόβλεψης συμπεριφοράς δοκών υπό στατική μονοτονική φόρτιση

5.1	Μοντέλο πρόβλεψης συμπεριφοράς δοκών.....	70
5.1.1	Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων.....	70
5.1.1.1	Σκυρόδεμα.....	70
5.1.1.1.1	Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος.....	70
5.1.1.1.2	Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος.....	73
5.1.1.2	Χάλυβας.....	76
5.1.1.3	GFRP.....	79
5.1.2	Υπολογισμός θλιβόμενης ζώνης.....	80
5.1.3	Υπολογισμός ροπής κάμψεως.....	82
5.1.4	Υπολογισμός ροπής ρηγμάτωσης.....	83
5.1.5	Σημεία εφαρμογής δυνάμεων.....	83
5.1.5.1	Θλιπτική δύναμη σκυροδέματος.....	83
5.1.5.2	Εφελκυστική δύναμη σκυροδέματος.....	85
5.1.5.3	Εφελκυστική δύναμη χάλυβα.....	85
5.1.5.4	Εφελκυστική δύναμη GFRP.....	85
5.1.6	Υπολογισμός βέλους κάμψεως.....	85
5.1.7	Υπολογισμός ροπής αδρανείας $I_e$ .....	89
5.1.7.1	Μοντέλο ACI.....	90
5.1.7.2	Μοντέλο Branson.....	91
5.1.7.3	Μοντέλο Gao.....	92
5.1.7.4	Μοντέλο Benmokrane.....	93
5.1.7.5	Μέσω ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος.....	94
5.2	Μοντέλο πρόβλεψης συμπεριφοράς δοκών οπλισμένων με GFRP σύμφωνα με τον καναδέζικο κανονισμό ISIS [3].....	96



5.2.1	Εξιιώσεις σχεδιασμού.....	96
5.2.1.1	Θλιπτική δύναμη σκυροδέματος.....	96
5.2.1.2	Εφελκυστική δύναμη GFRP.....	98
5.2.1.3	Καμπτική ροπή $M$ .....	99
5.2.2	Υπολογισμός βέλους κάμψης.....	99
5.2.3	Υπολογισμός ροπής αδράνειας $I_e$ .....	100
5.3	Αποτελέσματα προγράμματος πρόβλεψης.....	100
5.3.1	Οπλισμένη δοκός με χάλυβα – GBIV (Πείραμα Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Υπεύθυνος : Κος Περδικάρης Φ.).....	100
5.3.2	Οπλισμένη δοκός με GFRP. Ομάδα δοκών GBI. (Πείραμα Πανεπιστημίου Alabama, Υπεύθυνος Houssam Toutanji, Yong Deng).....	104
5.3.3	Οπλισμένη δοκός με GFRP. Ομάδα δοκών GBII. (Πείραμα Πανεπιστημίου Alabama, Υπεύθυνος Houssam Toutanji, Yong Deng).....	108
5.3.4	Οπλισμένη δοκός με GFRP. Ομάδα δοκών GBIII. (Πείραμα Πανεπιστημίου Alabama, Υπεύθυνος Houssam Toutanji, Yong Deng).....	112
5.4	Παραμετρική ανάλυση.....	116
5.4.1	Ποσοστό οπλισμού.....	116
5.4.1.1	Συμπεράσματα.....	118
5.4.2	Είδος και μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού.....	118
5.4.2.1	Συμπεράσματα.....	122
5.4.3	Ποιότητα σκυροδέματος.....	122
5.4.3.1	Συμπεράσματα.....	126
5.4.4	Αύξηση διαστάσεων διατομής.....	126
5.4.4.1	Συμπεράσματα.....	130
<b>6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ</b>		
<b>Γενικά συμπεράσματα.....</b>		<b>131</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>134</b>

**Εννοιολογική σημασία των συμβόλων**

$b$	: πλάτος ορθογωνικής διατομής δοκού
$d_{\text{gfrp}}$	: στατικό ύψος οπλισμού από GFRP
$d_s$	: στατικό ύψος οπλισμού από χάλυβα
$F_c$	: δύναμη θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος
$f_{ck}$	: χαρακτηριστική θλιπτική τάση σκυροδέματος
$f_{\text{crack}}$	: εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
$F_{ct}$	: εφελκυστική δύναμη σκυροδέματος
$f_{ctm}$	: μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
$F_{\text{gfrp}}$	: δύναμη οπλισμού από GFRP
$F_s$	: δύναμη οπλισμού από χάλυβα
$f_{yk}$	: χαρακτηριστική τάση διαρροής χάλυβα
$h$	: ύψος ορθογωνικής διατομής δοκού
$L$	: στατικό μήκος δοκού
$n_{\text{gfrp}}$	: λόγος $E_{\text{gfrp}} / E_c$
$n_s$	: λόγος $E_s / E_c$
$x_u$	: ύψος θλιβόμενης ζώνης
$y_{F_c}$	: σημείο εφαρμογής της θλιβόμενης δύναμης σκυροδέματος
$y_{F_{ct}}$	: σημείο εφαρμογής της εφελκυστικής δύναμης σκυροδέματος
$y_{F_{\text{gfrp}}}$	: σημείο εφαρμογής της δύναμης οπλισμού από GFRP
$y_{F_s}$	: σημείο εφαρμογής της δύναμης οπλισμού από χάλυβα
$A_{\text{gfrp}}$	: εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού από GFRP
$A_s$	: εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού από χάλυβα
$\Delta$	: βέλος κάμψης
$\varepsilon_c$	: θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος
$E_c$	: μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος
$\varepsilon_{\text{crack}}$	: οριακή ανηγμένη παραμόρφωση ρηγμάτωσης σκυροδέματος

---

$\epsilon_{ct}$	: εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος
$\epsilon_{gfrp}$	: ανηγμένη παραμόρφωση οπλισμού από GFRP
$E_{gfrp}$	: μέτρο ελαστικότητας οπλισμού από GFRP
$\epsilon_s$	: ανηγμένη παραμόρφωση οπλισμού από χάλυβα
$E_s$	: μέτρο ελαστικότητας οπλισμού από χάλυβα
$I_g$	: ροπή αδρανείας της διατομής
$I_{cr}$	: ροπή αδρανείας ρηγμάτωσης της διατομής
$I_e$	: ενεργή ροπή αδρανείας της διατομής
$M_{cr}$	: ροπή ρηγμάτωσης ενισχυμένης δοκού
$M_n$	: ροπή αστοχίας ενισχυμένης δοκού
$M_y$	: ροπή διαρροής ενισχυμένης δοκού
$\rho$	: ποσοστό εφελκυσμένου οπλισμού
$\sigma_c$	: θλιπτική τάση σκυροδέματος
$\sigma_{ct}$	: εφελκυστική τάση σκυροδέματος
$\sigma_{gfrp}$	: εφελκυστική τάση οπλισμού από GFRP
$\sigma_s$	: εφελκυστική τάση οπλισμού από χάλυβα
$\varphi$	: καμπυλότητα διατομής



# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## Εισαγωγή

### 1. Γενικά

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια προσπάθεια αντικατάστασης του κοινού χάλυβα όπλισης των κατασκευών του σκυροδέματος από νέα συνθετικά υλικά. Ο λόγος της προσπάθειας αυτής είναι η ιδιαίτερα ευπαθής συμπεριφορά του ίδιου του χάλυβα σε διαβρωτικό περιβάλλον, με άμεση συνέπεια την μείωση της αντοχής της κατασκευής. Το κόστος για συντήρηση ή αποκατάσταση των κατασκευών στις οποίες ο χάλυβας οπλισμού έχει υποστεί ζημιές λόγω διάβρωσης είναι πολύ μεγάλο. Ιδιαίτερα ευπαθείς παρουσιάζονται οι κατασκευές σε παραθαλάσσια μέρη (λιμάνια, αποβάθρες, γέφυρες), κατασκευές σε όξινο περιβάλλον ή ακόμα κατασκευές που έρχονται σε επαφή με υγρό έδαφος ή χημικές ουσίες (γέφυρες, υπόγεια, σήραγγες, θεμέλια κ.λ.π.) [1].

Τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή υλικά (Fiber Reinforced Polymers-FRP) έχουν αρχίσει να παρουσιάζουν αυξανόμενη εφαρμογή στο ευρύτερο πεδίο των τεχνικών έργων τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται κυρίως στις πολύ καλές ιδιότητες των υλικών αυτών οι οποίες είναι:

- χαμηλό ίδιο-βάρος
- υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό
- χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- μεγάλη ευκαμψία άρα παραμορφωσιμότητα
- ουσιαστική αντίσταση στη διάβρωση και την κόπωση.

Η μεγάλη καθυστέρηση και διστακτικότητα με την οποία γίνονται αποδεκτά στον τομέα των κατασκευών, οφείλεται στο μέχρι πρότινος μεγάλο κόστος τους, στην έλλειψη ενός

κατάλληλου πλαισίου κανονισμών για σχεδιασμό με τα υπόψη υλικά, αλλά και στο ότι ως κατασκευαστικά υλικά δεν είναι ευρέως γνωστά. Σήμερα το κόστος των υλικών αυτών μειώνεται σημαντικά, καθώς διευρύνεται το πεδίο εφαρμογών τους, ενώ παράλληλα σε πολλές χώρες έχει ήδη δημοσιευθεί ο πρώτος κύκλος διατάξεων σχεδιασμού δομικών έργων από σκυρόδεμα με συνθετικό οπλισμό, με πρωτοπόρες την Ιαπωνία, Αμερική και Καναδά [2]. Οι περισσότερες δομικές εφαρμογές των FRP στα έργα του Πολιτικού Μηχανικού περικλείονται κυρίως σε δύο τομείς.

- Ο πρώτος περιλαμβάνει την αντικατάσταση των ράβδων οπλισμού από χάλυβα με ράβδους από ινοπλισμένα πολυμερή. Οι ράβδοι αυτοί μπορεί να είναι : από ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymers-CFRP), από ίνες γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymers –GFRP) ή από ίνες αραμιδίου, (οι πιο συνήθεις ράβδοι είναι αυτές από ίνες γυαλιού).
- Ο δεύτερος αποτελεί τον τομέα των επεμβάσεων και των ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών, η οποία βασίζεται στην χρήση ινοπλισμένων πολυμερών.

Ο οπλισμός από σύνθετα υλικά διατίθεται με τη μορφή ράβδων, πλεγμάτων, ελασμάτων και ινοφασμάτων. Διατίθενται σε ποικίλα σχήματα και είδη διατομών, τα οποία μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο φάσμα πρακτικών εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται επίσης και για την κατασκευή τενόντων προέντασης , αγκυρίων εδάφους, αλλά και κτιρίων ειδικής χρήσης, ελαφριών γεφυρών, silos, δεξαμενών κ.τ.λ.

Τα σύνθετα υλικά έχουν δοκιμαστεί για δεκαετίες στην αεροναυπηγική, ναυσιπλοΐα, αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και σε είδη σπορ, σε τμήματα ηλεκτρονικών συσκευών και μπορούν να τύχουν ευρείας χρήσης λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους.

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Ινοπλισμένα Πολυμερή

#### 2.1 Γνωρίζοντας τα FRP

Ο όρος ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber-Reinforced Polymers- FRP) περιγράφει μια ομάδα υλικών αποτελούμενα από οργανικές ή ανόργανες ίνες διαμέτρου 5-25 mm τοποθετημένες σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Οι ίνες αποτελούν το φορέα ανάληψης των δυνάμεων (κατά κανόνα εφελκυστικών), παράλληλα στη διεύθυνση τους.

Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετική υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά τους μέχρι τη θραύση τους. Οι συνηθέστερες ίνες που χρησιμοποιούνται είναι είτε από γραφίτη C (άνθρακα), είτε από γυαλί G και ενίοτε από αραμίδιο Ar. Οι ρητίνες συνήθως είναι πολυεστερικές, εποξικές, βινυλιεστερικές και πολυαιθιλενικές.

##### 2.1.1 Ρητίνες

Πολύ σημαντικό στην κατασκευή των σύνθετων υλικών είναι η επιλογή της κατάλληλης μήτρας, καθώς οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες της μήτρας έχουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του καθώς επίσης και στη διαδικασία κατασκευής. Προκειμένου να είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί την πλήρη αντοχή των ινών, η μήτρα πρέπει να αναπτύξει μια υψηλότερη αντοχή από τις ίνες [5]. Η μήτρα όχι μόνο καλύπτει τις ίνες και τις προστατεύει από τις μηχανικές εκδορές, αλλά και μεταφέρει τις τάσεις μεταξύ των ινών. Άλλοι πολύ σημαντικοί ρόλοι της μήτρας είναι μεταφορά της διελασματικής και επίπεδης τέμνουσας στο συνθετικό υλικό, και παροχή πλευρικής υποστήριξης στις ίνες έναντι στρέβλωσης, όταν υποβάλλεται σε συμπιεστικά φορτία (ACI 1995) [6].

Υπάρχουν δύο τύποι πολυμερών μήτρων που χρησιμοποιούνται ευρέως για τα σύνθετα υλικά : θερμοσκληρυνόμενες και θερμοπλαστικές.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή χρησιμοποιούνται συχνότερα από τα θερμοπλαστικά. Είναι υγρά με χαμηλό μοριακό βάρος, με πολύ χαμηλό ιξώδες (ACI 1995) και τα μόριά τους ενώνονται με χημικές ενώσεις. Ως εκ τούτου, διαμορφώνουν μια άκαμπτη τρισδιάστατη δομή που δεν μπορεί να αναδιαμορφωθεί με την εφαρμογή θερμότητας ή πίεσης.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή σώματα σε υγρή μορφή υποβάλλονται σε επεξεργασία για να εξασφαλίσουν την αποβολή των υγρών από τις ίνες. Μερικά συνήθως χρησιμοποιούμενα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι πολυεστέρες, βινυλιοεστέρες και εποξειδικά. Αυτά τα υλικά έχουν καλή θερμική σταθερότητα , χημική αντίσταση καθώς επίσης χαμηλό ερπυσμό και χαλάρωση.

Εντούτοις, έχουν σχετικά χαμηλή αντοχή μετά την αστοχία τους, με συνέπεια τη χαμηλή αντοχή σε κρούση. Δύο σημαντικά μειονεκτήματα είναι η σύντομη ζωή του προϊόντος και η μακροχρόνια κατασκευής τους.

Οι μηχανικές ιδιότητες μερικών θερμορρυθμιζόμενων ρητινών δίνονται στον πίνακα 2.1.

**Πίνακας 2.1 :** Μηχανικές ιδιότητες θερμορρυθμιζόμενων ρητινών [3]

Είδος Ρητίνης:	Ίδιο Βάρος (kN/m <sup>2</sup> )	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέγιστη Ανοιγμένη Παραμόρφωση (%)
Εποξειδικές	1.20-1.30	55.00-130.00	2.75-4.10	1.00-5.00
Πολυεστερικές	1.10-1.40	34.50-103.50	2.10-3.45	5.00-12.00
Βινυλιοεστερικές	1.12-1.32	73.00-81.00	3.00-3.35	5.40-10.30

Οι θερμοσκληρυνόμενες πολυμερικές μήτρες γίνονται από μόρια τα οποία βρίσκονται σε γραμμική δομική μορφή. Η ισχύς αυτών των αδύνατων δευτεροβάθμιων δεσμών, μπορεί να καταστραφεί από τη θερμότητα ή την πίεση. Μετά τη ψύξη τους αυτές οι μήτρες αποκτούν στερεά μορφή. Αν και μπορεί να υποβαθμίσει τις μηχανικές ιδιότητές τους, τα

θερμοπλαστικά πολυμερή σώματα μπορούν να ανασχηματιστούν θερμαίνοντας τα όσες φορές χρειάζεται ανάλογα με τις ανάγκες. Ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών σε σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα (fib 2001) παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2 :

**Πίνακας 2.2 :** Ιδιότητες εποξειδικών ρητινών [7]

Ιδιότητα (σε 20 °C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα (kg/ m <sup>3</sup> )	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	0,5-20	20-50	205
Μέτρο διάτμησης	0,2-8	8-21	80
Λόγος Poisson	0,3-0,4	0,2	0,3
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	9-30	1-4	200-600
Διατμητική αντοχή (MPa)	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική αντοχή (MPa)	55-110	25-150	200-600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)	0,5-5	0,015	20-25
Ενέργεια θραύσης (Jm <sup>-2</sup> )	200-1000	100	105-106
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 <sup>-6</sup> °C)	25-100	11-13	10-15
Υδαταπορροφητικότητα: 7 ημ.-25 °C (% κ.β.)	0,1-3	5	0
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)	50-80	-	-

### 2.1.2 Ίνες

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σύνθετων υλικών πρέπει να έχουν υψηλή αντοχή και δυσκαμψία, ανθεκτικότητα, διάρκεια και κατά προτίμηση χαμηλό κόστος. Η απόδοση των ινών επηρεάζεται από το μήκος, το σχήμα της διατομής και τη χημική σύνθεσή τους. Είναι διαθέσιμες σε διάφορες μορφές και μεγέθη. Συνηθέστερα χρησιμοποιημένες ίνες για FRPs, όπως προαναφέρθηκε, είναι άνθρακας, γυαλί και αραμίδιο.

Οι ίνες άνθρακα (πυκνότητα  $1800-1900 \text{ Kg/m}^3$ ) παρασκευάζονται είτε από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (PAN) είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου (pitch). Οι πρώτες χαρακτηρίζονται γενικά από μεγαλύτερες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας σε σύγκριση με τις δεύτερες.

Οι ίνες γυαλιού παρασκευάζονται από λιωμένο γυαλί, (πυκνότητα  $2300-2500 \text{ Kg/m}^3$ ) και μπορεί να είναι:

- τύπου E, που είναι ο κοινός και πλέον συνηθισμένος τύπος γυαλιού (με βασικό μειονέκτημα τη μείωση της αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως είναι αυτό του σκυροδέματος)
- τύπου S, με κύρια χαρακτηριστικά την υψηλή αντοχή και το υψηλό μέτρο ελαστικότητας.
- τύπου Z (ή AR), με μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον

Τέλος, οι ίνες αραμιδίου (πυκνότητα  $1450 \text{ Kg/m}^3$ ) που διατίθενται στη διεθνή αγορά διακρίνονται σε αυτές οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Kevlar, Twaron) και σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora). Κύριο πλεονέκτημα τους είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία, γι'αυτό και τα τελευταία χρόνια προτιμούνται (π.χ Μ. Βρετανία) για την κατασκευή μανδύων σε υποστυλώματα γεφυρών, όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης οχημάτων.

Οι ίνες γυαλιού και αραμιδίου παρουσιάζουν μικρότερο κόστος σε σχέση με τον γραφίτη, αλλά έχουν και χαμηλότερες μηχανικές αντοχές.

Για την κατασκευή ράβδων οπλισμού, τα υλικά αυτά συνδυάζονται με κατάλληλες ρητίνες για μήτρα με ανθεκτικότητα έναντι διαβρωτικών χημικών παραγόντων και έναντι



κόπωσης. Η μεθοδολογία παραγωγής του τελικού προϊόντος ποικίλει ανάλογα με τις πρώτες ύλες, τις επιθυμητές ιδιότητες και τη μορφή του τελικού προϊόντος.

Μερικές από αυτές τις ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3 :

**Πίνακας 2.3** Ιδιότητες ινών [2]

<b>Τύπος ίνας / υλικό</b>	<b>d<sub>f</sub> (μm)</b> Διάμετρος	<b>f<sub>tu</sub> (MPa)</b> Εφελκυστική Αντοχή	<b>E (GPa)</b> Μέτρο Ελαστικότητας	<b>ε<sub>tu</sub> %</b> Παραμόρφωση Θραύσης	<b>Ειδικό Βάρος (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Ανθρακας (PAN-HT)</b>	5-8	3500	200-240	1.3-1.8	1700-1800
<b>Ανθρακας (Pitch κοινές)</b>	9-18	780-1000	38-40	2.1-2.5	1600-1700
<b>Ανθρακας (Pitch-HM)</b>	9-18	3000-3500	400-800	0.4-1.5	1900-2100
<b>Kevlar 49 &amp; Twaron</b>	12	2800	130	2.3	1450
<b>Technora (Aramid)</b>	12	3500	74	4.6	1390
<b>Russian Aramid (SVM)</b>	15	2500-3800	130	3.5	1430
<b>E - Glass</b>	8-12	3500-3600	75	4.8	2600
<b>Alkali Resistant Glass</b>	8-12	1800-3500	70-76	2-3	2270
<b>Polyvinyl Alcohol</b>	14	2300	60	5	1300

Ο πίνακας 2.4 παρουσιάζει την απόδοση των ινών σε καταστροφικά περιβάλλοντα, όπως τα οξέα ( υδροχλωρικό οξύ, νιτρικό οξύ κ.α.) τα αλκάλια και τις οργανικές ενώσεις.

Πίνακας 2.4 Απόδοση ινών σε καταστροφικά περιβάλλοντα [4]

Τύπος Ίνας		Αντίσταση σε οξέα	Αντίσταση σε αλκάλια	Αντίσταση σε οργανικές ενώσεις
<b>Ανθρακας</b>				
<b>Pan</b>	Υψηλής αντοχής	Καλή	Άριστη	Άριστη
	Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	Άριστη	Άριστη	Άριστη
<b>Pitch</b>	Σύνηθες	Άριστη	Άριστη	Άριστη
	Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	Άριστη	Άριστη	Άριστη
<b>Αραμίδιο</b>				
<b>Kevlar 49</b>		Κακή	Καλή	Άριστη
<b>Technora</b>		Καλή	Καλή	Καλή
<b>Γυαλί</b>				
<b>E-Glass</b>		Κακή	Μέτρια	Άριστη
<b>S-Glass</b>		Καλή	Κακή	N/A
<b>Alkali Resistant Glass</b>		Καλή	Καλή	N/A
<b>Άλλα</b>				
<b>EC-Polyethylene</b>		Άριστη	Άριστη	Άριστη
<b>Polyvinyl Alcohol Fiber</b>		Καλή	Καλή	Καλή
<b>Steel Fiber</b>		Κακή	Άριστη	Άριστη

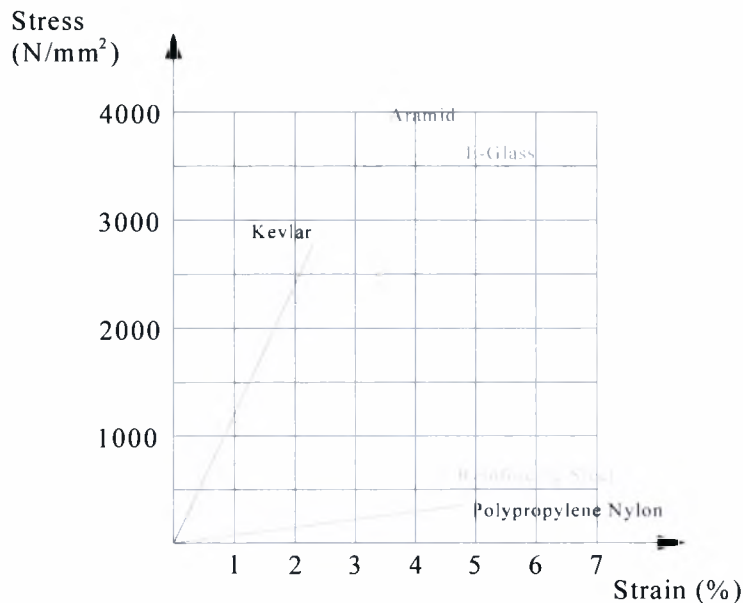
### 2.1.3 Βασικές μηχανικές ιδιότητες συνθετικού οπλισμού

Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες του συνθετικού οπλισμού, ποικίλουν ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και συνήθως δίδονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Ενδεικτικά οι συνήθεις ράβδοι οπλισμού από γραφίτη (carbon) έχουν χαρακτηριστική

εφελκυστική αντοχή  $1300\div 2000$  MPa, μέτρο ελαστικότητας  $100\div 130$  GPa και παραμόρφωση θραύσης 1.3%. Οι αντίστοιχες τιμές για ράβδους αραμιδίου (aramid) είναι 1300 MPa, 60 GPa και 2%, ενώ για ράβδους από ίνες αντιαλκαλικού γυαλιού (AR-glass) είναι  $400\div 800$  MPa,  $30\div 40$  GPa και 1.3÷2% αντίστοιχα [8], [9], [10], [11].

Η αντοχή και η δυσκαμψία των στοιχείων του οπλισμού αυτού εξαρτώνται από τον τύπο και το ογκομετρικό ποσοστό των ινών (συνήθως της τάξεως του 60% κ.ο.), την κλίση των ινών ως προς τον κύριο εφελκυστικό άξονα, το σχήμα της διατομής του τελικού προϊόντος και τη μήτρα συνοχής.

Η σχέση εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για τα περισσότερα σύνθετα προϊόντα είναι γραμμικά ελαστική μέχρι τη θραύση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1 :** Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων διαφόρων υλικών [2]

Για τις ράβδους σύνθετου οπλισμού τα χαρακτηριστικά του διαγράμματος σε αξονική θλίψη είναι παρόμοια με αυτά σε εφελκυσμό, η αντοχή όμως είναι μικρότερη σε θλίψη. Παρουσιάζουν μικρή αντοχή σε εγκάρσια πίεση (ορθογώνια προς την κατεύθυνση των ινών), της τάξεως του 30% της κύριας εφελκυστικής αντοχής. Για το λόγο αυτό οι διαστάσεις του συμβατικού ικανοτικού σχεδιασμού, που βασίζονται στη δράση βλήτρου του οπλισμού, πρέπει να ληφθούν με μεγάλο συντελεστή ασφαλείας, όταν ο κύριος οπλισμός του στοιχείου είναι μη μεταλλικός (για παράδειγμα η συμμετοχή του σκυροδέματος, VC, στην διατμητική αντοχή VRd3).

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής ράβδων FRP κατά την εγκάρσια διεύθυνση καθορίζεται από αυτόν της συνεκτικής μήτρας που συχνά είναι 5÷8 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του σκυροδέματος, ενώ κατά την διεύθυνση των ινών ( των ράβδων) εξαρτάται από τον τύπο των ινών. Άρα η αλληλεπίδραση των υλικών σε συνθήκες θερμοκρασιακών μεταβολών πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, ενώ στην περίπτωση συμβατικού οπλισμού αυτή η εντατική κατάσταση γενικά αγνοείται (αφού ο χάλυβας και το σκυρόδεμα είναι θερμοκρασιακώς συμβατά) [2].

### 2.1.3.1 Συνεργασία FRP-Σκυροδέματος – Τάση συνάφειας

Η τάση συνάφειας είναι το κλειδί της συνεργασίας του σκυροδέματος με τον οπλισμό για την ανάληψη των φορτίων της διατομής. Γι' αυτό άλλωστε η κατανόηση του τρόπου ανάπτυξης της είναι ένα από τα θεμελιώδη σημεία που πρέπει να εξεταστούν, ώστε τα FRP να καθιερωθούν ως στοιχεία όπλισης στις κατασκευές. Η τάση συνάφειας των FRP αναπτύσσεται με διαφορετικό τρόπο από ότι στον συμβατικό νευροχάλυβα εξαιτίας της διαφορετικής φύσεως του υλικού και της διαφορετικής υφής της εξωτερικής επιφάνειας τους. Είναι ένα σχετικά δύσκολο πρόβλημα και πολλοί μελετητές έχουν ασχοληθεί με αυτό.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους λόγω των διαφορετικών υλικών που υπάρχουν στην αγορά και των διαφορετικών τρόπων ελέγχου που εφαρμόζουν. Είναι όμως γενικά παραδεκτό ότι τα FRP αναπτύσσουν ικανοποιητική συνάφεια συγκρινόμενη με αυτή του νευροχάλυβα [12].

Έχει δειχθεί από ερευνητές [13] ότι για το ίδιο ποσοστό εξωτερικής περίσφιξης η αναπτυσσόμενη τάση συνάφειας μεταξύ των FRP (Glass) και του σκυροδέματος κυμαίνεται μεταξύ 67÷83% της αντίστοιχης του νευροχάλυβα.

Κάποια πειράματα [14] δίνουν ποσοστό μεταξύ 73÷96% ενώ άλλοι ερευνητές [15] υποστηρίζουν ότι η μέση τάση συνάφειας που αναπτύσσουν τα FRP (Glass) κατά το πείραμα εξόλκευσης ράβδου από στοιχείο σκυροδέματος (C30) είναι 12,9 MPa (νευροχάλυβας περίπου 15 MPa).

Ο ιαπωνικός κώδικας [16] δίνει τιμές σχεδιασμού για την τάση συνάφειας των FRP μεταξύ 3-4,5 MPa, ανάλογα με το είδος των ινών που χρησιμοποιούνται, ενώ για τον νευροχάλυβα δίνει 4 MPa ( για ράβδους ίσης διαμέτρου).

Σειρά ερευνητών καταλήγουν σε τιμές, οι οποίες είναι περίπου ίδιες, χρησιμοποιώντας υλικά διαφορετικής παραγωγής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού φαίνεται πως η διαδικασία παραγωγής, τηρουμένων φυσικά ορισμένων βασικών προϋποθέσεων, δεν επηρεάζει άμεσα την τιμή της τάσης συνάφειας που αναπτύσσουν τα FRP. Κάτι δηλαδή παρόμοιο με αυτό που συμβαίνει με τον χάλυβα και που τον έκανε γενικά αποδεκτό στις κατασκευές από σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση των σύνθετων ράβδων οπλισμού (που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα ως υποκατάστατα του συμβατικού μεταλλικού οπλισμού) η συνεργασία των ράβδων με το σκυρόδεμα εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας της ράβδου. Λόγω της χαμηλής διατμητικής αντοχής των FRP, οι κατασκευαστές σύνθετων ράβδων έχουν υιοθετήσει σειρά μεθόδων για την επίτευξη τραχύτητας, όπως [2] :

- **Τύπος α :** επίχριση της επιφάνειας της ράβδου με χοντρόκοκκη άμμο για αύξηση του συντελεστή τριβής,
- **Τύπος β :** δημιουργία νευρώσεων με ελικοειδή περιτύλιξη καλωδίων FRP κατά μήκος της ράβδου (οι νευρώσεις στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι είτε προεξοχές είτε εγκοπές)
- **Τύπος γ :** δημιουργία νευρώσεων με έκχυση ινοπλισμένης ρητίνης (οι νευρώσεις στην περίπτωση αυτή έχουν τη μορφή προεξοχών) .

Σημειώνεται εδώ ότι οι νευρώσεις τύπου (β) είναι βέλτιστες, όταν έχουν τη μορφή εγκοπών, γιατί μειώνουν το μέγεθος των τάσεων διάρρηξης και δίνουν ευνοϊκή συμπεριφορά ως προς την ικανότητα παραμόρφωσης του οπλισμένου στοιχείου. Αντίθετα, όταν έχουν τη μορφή προεξοχών, η αστοχία συνήθως επικεντρώνεται στο FRP με τη μορφή διατμητικής αποκόλλησης της ελικοειδούς καλωδιακής νευρώσεως [17].

### 2.1.3.2 Συντελεστής θερμικής διαστολής των FRP

Οι θερμικές ιδιότητες των ινών είναι διαφορετικές στις διαμήκεις και εγκάρσιες κατευθύνσεις, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.5 (ACI 2000):

**Πίνακας 2.5 :** Συντελεστές θερμικής διαστολής για υλικά ενίσχυσης

Συντελεστές Θερμικής Διαστολής ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )				
Κατεύθυνση:	Χάλυβας	GFRP	CFRP	AFRP
Διαμήκης	11.7	6 έως 10	-1 έως 0	-6 έως -2
Εγκάρσια	11.7	21 έως 23	22 έως 23	60 έως 80

Επομένως, οι ράβδοι FRP που κατασκευάζονται από αυτές τις ίνες έχουν διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής σε αυτές τις δύο κατευθύνσεις.

Τα θερμικά χαρακτηριστικά ποικίλλουν μεταξύ των προϊόντων, ανάλογα με τον τύπο ινών και μήτρων και την αναλογία όγκου ινών. Τα CFRP έχουν συντελεστή θερμικής διαστολής στη διαμήκη κατεύθυνση κοντά στο μηδέν [18]. Οι ίνες αραμιδίου (AFRP) έχουν αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής κατά την διαμήκη κατεύθυνση, δηλαδή τα AFRP συστέλλονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και διαστέλλονται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Τα GFRP έχουν συντελεστή θερμικής διαστολής κατά την διαμήκη κατεύθυνση συγκρίσιμο με αυτόν του σκυροδέματος, όμως ο συντελεστής κατά την εγκάρσια κατεύθυνση είναι περισσότερο από πέντε φορές μεγαλύτερος [19].

### 2.1.3.3 Επίδραση της υψηλής θερμοκρασίας

Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να έχουν αρνητική επίπτωση στην απόδοση των FRP. Επομένως, πρέπει να παίρνονται ειδικές προφυλάξεις όταν χρησιμοποιούνται τα FRP για κατασκευές όπου η πυροπροστασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού. Ακόμα κι αν τα FRP δεν μπορούν να καούν όταν ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα, λόγω έλλειψης οξυγόνου, η εποξειδική ρητίνη θα μαλακώσει. Η θερμοκρασία στην οποία το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται αναφέρεται ως θερμοκρασία μετάβασης γυαλιού,  $T_g$ . Η τιμή της θερμοκρασίας αυτής για τα σύνηθες υλικά της μήτρας είναι γύρω στους  $150^\circ\text{C}$  ( $300^\circ\text{F}$ ). Σε αυτή τη θερμοκρασία, το βέλος κάμψης και η τάση συνάφειας των ράβδων FRP θα επηρεαστεί.

Σύμφωνα με τον Katz et al (1998 και 1999) [20], [21], η τάση συνάφειας των ράβδων FRP μπορεί να μειωθεί μέχρι 40 τοις εκατό στους  $100^\circ\text{C}$  ( $210^\circ\text{F}$ ) και μέχρι 90 τοις εκατό



στους 200°C (390°F). Για τις ίνες GFRP, CFRP και AFRP αυτές οι θερμοκρασίες είναι 980°C (1800°F), 1650°C (3000°F), και 175°C (350°F), αντίστοιχα (ACI 2000).

Στις θερμοκρασίες πάνω από 100°C, τα FRPs μπορεί να χάσουν μερικούς από το συνδέσμους της ρητίνης. Οι Sayed-Ahmed και Shrive (1999) [22] επισημαίνουν ότι μετά από 24 ώρες στους 200°C και 300°C, η επιφάνεια Leadline ( είδος ράβδου FRP) είχε γίνει πιο σκούρα, δείχνοντας κάποια απώλεια ρητίνης. Εικοσιτέσσερις ώρες έκθεσης στους 400°C ανάγκασαν μερικές από τις ίνες στην επιφάνεια να γίνουν χαλαρότερες. Η έκθεση στους 500°C προκάλεσε την εξάτμιση της ρητίνης κυρίως μέσα στην πρώτη ώρα από την έκθεση, το οποίο μετέτρεψε την ράβδο σε μια δέσμη χαλαρών ινών.

#### 2.1.3.4 Ερπυσμός και χαλάρωση των ράβδων FRP

Η συμπεριφορά των περισσότερων υλικών FRP έναντι του φαινομένου του ερπυσμού χαρακτηρίζεται αρχικά ελαστική, που στη συνέχεια μεταβάλλεται σε μη γραμμική μέχρι την αστοχία. Όταν τα υλικά FRP υποβάλλονται σε μια σταθερή δύναμη, μπορούν να αστοχήσουν ξαφνικά. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως αστοχία λόγω ερπυσμού. Όσο μεγαλύτερη η αναλογία του μόνιμου φορτίου ως προς το κινητό, τόσο μικρότερη η αντοχή των FRP. Η αστοχία λόγω ερπυσμού επίσης εξαρτάται από την υπερίσθη ακτινοβολία, την υψηλή θερμοκρασία, την αλκαλικότητα, και τη διάβρωση.

Οι ράβδοι CFRP είναι οι λιγότερο ευαίσθητοι στην αστοχία λόγω ερπυσμού, οι ράβδοι AFRP περισσότερο και τέλος οι ράβδοι GFRP έχουν τον υψηλότερο κίνδυνο έναντι αυτού του φαινομένου. Για να αποφευχθεί η αστοχία λόγω ερπυσμού, οι παράγοντες αντίστασης των υλικών, έχουν ρυθμιστεί με έναν συντελεστή F σύμφωνα με τις συστάσεις CHBDC. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το λόγο R, που αποτελεί την αναλογία κινητών και μόνιμων φορτίων όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6 [3].

Πίνακας 2.6 : Τιμές συντελεστή F

Συντελεστής F			
Τύπος FRP	Λόγος R		
	0.5	1.0	2.0
<b>AFRP</b>	1.0	0.6	0.5
<b>CFRP</b>	1.0	0.9	0.9
<b>GFRP</b>	1.0	0.9	0.8

### 2.1.3.5 Διάρκεια ζωής των ράβδων FRP

Ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους οι ράβδοι FRP ενδείκνυνται για την ενίσχυση του σκυροδέματος είναι η διάβρωση των ράβδων χάλυβα όταν αυτό υποβάλλεται σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες, με συνέπεια απώλεια δύναμης και δομικής ακεραιότητας (ACI 2000). Το σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα αλκαλικό, έχοντας pH περίπου 12,5 έως 13,5, και η αλκαλικότητα αυτή μειώνεται με τη χρήση άνθρακα [23]. Οι δοκιμές διάρκειας γίνονται για να καθορίσουν τη μείωση αντοχής και ακαμψίας λόγω της φυσικής γήρανσης των ράβδων FRP σε κατάσταση λειτουργίας για διάρκεια ζωής 50 έως 100 έτη.

Μία απλή εικασία των αποτελεσμάτων από τα προγράμματα έκθεσης σε συνθήκες διάβρωσης, αν και εξαιρετικά πολύτιμα, δεν επαρκεί για να υποστηρίξει την ραγδαία αύξηση της χρήσης των ράβδων FRP. Απαιτείται κάποια μορφή επιταχυνόμενης διαδικασίας δοκιμής γήρανσης και μιας μεθόδου πρόβλεψης προκειμένου να παρασχεθούν οι κατάλληλες μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις αντοχής. Η έρευνα για το πως επηρεάζει η θερμοκρασία στη διάρκεια ζωής των ράβδων FRP σε ένα συγκεκριμένο αλκαλικό περιβάλλον δείχνει ότι ο συντελεστής επιτάχυνσης για κάθε θερμοκρασιακή μεταβολή μπορεί να καθοριστεί με τη χρησιμοποίηση των νόμων Arrhenius.

Αυτοί οι συντελεστές διαφέρουν για κάθε προϊόν, ανάλογα με τον τύπο ίνας, τον τύπο ρητίνης, και το μέγεθος των ράβδων. Επιπλέον, οι συντελεστές επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως την ηχορύπανση, τη θερμοκρασία, το pH, την υγρασία, και τον παγετό [24], [23], [25], [26].

### 2.1.3.6 Διατμητική αντοχή και παραμορφώσεις

Η διατμητική αντοχή μιας τυχαίας διατομής οπλισμένου σκυροδέματος θεωρείται ότι εξαρτάται από το συνδυασμό αντιστάσεων, οι οποίες προέρχονται από τη θλιβόμενη περιοχή σκυροδέματος, από την εφελκυστική περιοχή του σκυροδέματος και από τη συνάφεια του οπλισμού με το σκυρόδεμα. Όλες αυτές οι αντιστάσεις αναμένεται ότι θα ελαττωθούν με τη χρήση των FRP ως στοιχείων όπλισης. Η συνάφεια δεν αναμένεται να είναι καλύτερη στην περίπτωση των FRP, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος θα μειωθεί αφού η ρηγμάτωση του θα είναι πιο έντονη σε αυτή την περίπτωση, και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος επίσης θα μειωθεί, αφού ο ουδέτερος άξονας της διατομής θα πλησιάσει προς το θλιβόμενο άκρο της διατομής, αφήνοντας έτσι μικρότερη περιοχή σκυροδέματος να αναλαμβάνει την θλίψη. Επιπλέον, όλα αυτά μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά μεγαλύτερες διατμητικές παραμορφώσεις στα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Για να εξετασθεί η διατμητική αντοχή και ακαμψία, καθώς και τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά των στοιχείων από σκυρόδεμα με οπλισμό FRP, σειρά πειραμάτων βρίσκεται σε εξέλιξη στο Πανεπιστήμιο του Sheffield υπό το πρόγραμμα EUROCRETE. Στα πειράματα αυτά ελέγχονται δοκάρια στα οποία τοποθετήθηκαν συνδετήρες από Glass FRP. Με την χρήση ηλεκτρονικών επικουσιομέτρων μετρούνται οι επιμηκύνσεις πάνω στους συνδετήρες, καθώς επίσης και η ολική εγκάρσια διαστολή του στοιχείου.

Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό των συνδετήρων με FRP, η μία βασίζεται στη λογική της ισοδύναμης ακαμψίας με το χάλυβα και η άλλη στη λογική της ισοδύναμης αντοχής.

Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακά όργανα με σκοπό να μετρηθούν:

- το παραμορφωσιακό σχήμα των δοκών, με αρκετές μετρήσεις στρωφών της διατομής, ώστε να καταστεί δυνατός ο διαχωρισμός των διατμητικών και καμπτικών παραμορφώσεων.
- Οι παραμορφώσεις των συνδετήρων και των κυρίων οπλισμών σε διάφορα σημεία.

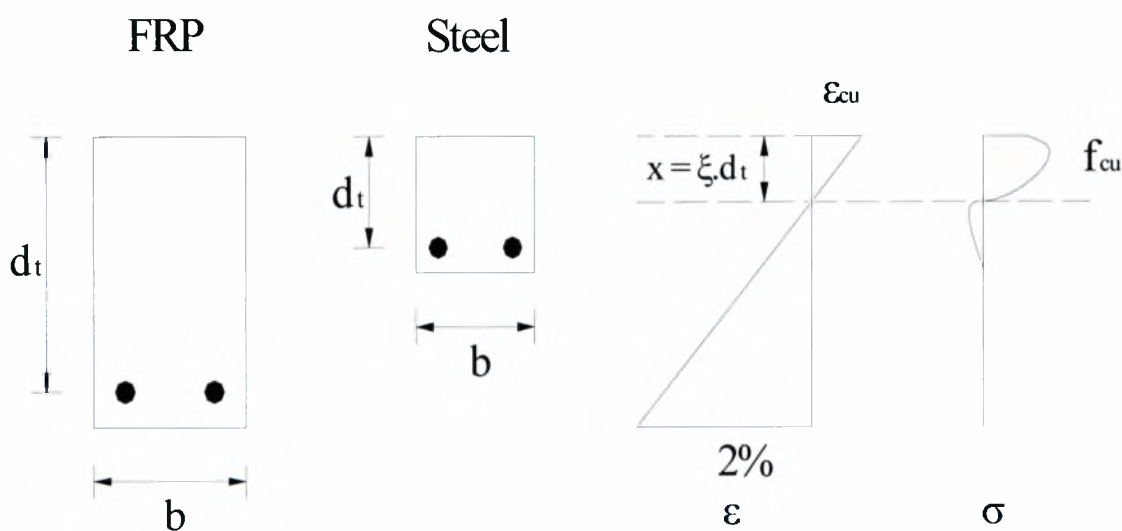
Προκαταρκτικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η διατμητική αντοχή των διατομών μπορεί να προβλεφθεί ικανοποιητικά από τους υπάρχοντες κώδικες υπό την προϋπόθεση όμως ότι

λαμβάνεται υπόψη η διαφορετική ακαμψία των FRP, αλλά σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διατομές του χάλυβα η πρόβλεψη μειονεκτεί. [27].

### 2.1.3.7 Καμπτική αντοχή

Εξαιτίας της μεγάλης εφελκυστικής αντοχής τους, τα FRP αναμένεται να οδηγήσουν σε ισχυρότερα δομικά στοιχεία. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα του οπλισμού κάμψης περιορίζεται όταν η διατομή γίνει "υπεροπλισμένη".

Για τον κοινό χάλυβα όπλισης, η αναλογία αντοχής ως προς την ακαμψία είναι ίση με την αντίστοιχη του σκυροδέματος, και επομένως ο ουδέτερος άξονας της τετραγωνικής διατομής βρίσκεται περίπου στο μέσο της. Για τον οπλισμό FRP, η τιμή της αναλογίας της αντοχής προς την ακαμψία είναι κατά μία τάξη μεγαλύτερη από αυτή του σκυροδέματος, και έτσι ο ουδέτερος άξονας της διατομής βρίσκεται πολύ κοντά στο θλιβόμενο άκρο της διατομής, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.2 :** Διαγράμματα τάσεων και παραμορφώσεων για διατομές οπλισμένες με FRP και χάλυβα αντίστοιχα

Η επίδραση των πιο πάνω είναι:

- Μεγάλο μέρος της διατομής υφίσταται εφελκυστικές παραμορφώσεις.
- Οι καμπτικές παραμορφώσεις της διατομής είναι αισθητά μεγαλύτερες όταν είναι οπλισμένες με ράβδους FRP από ότι όταν είναι οπλισμένη με χάλυβα.

- Οι διατμητικές παραμορφώσεις αναμένονται να μεγαλώσουν και η αντίστοιχη διατμητική αντοχή και ακαμψία να ελαττωθεί.
- Η αγκύρωση των FRP ράβδων μπορεί να γίνει δυσκολότερη.

Η χρήση προεντεταμένων FRP ράβδων θα λύσει αρκετά από τα πιο πάνω προβλήματα, αλλά η εφαρμογή της στο εργοτάξιο δημιουργεί επιπλέον πρακτικές δυσκολίες. Σκοπός λοιπόν δεν είναι να αντικατασταθεί ο χάλυβας όπλισης σε όλες ανεξαρτήτως τις κατασκευές, αλλά στις κατασκευές στις οποίες [27] :

(1) Ο χάλυβας είναι ουσιαστικά ακατάλληλος για χρήση όπως:

- σε εχθρικό περιβάλλον, από άποψη ανθεκτικότητας του χάλυβα
- σε κατασκευές όπου οι μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του χάλυβα δημιουργούν προβλήματα.
- σε κατασκευές όπου το βάρος του οπλισμού αποτελεί πρόβλημα.

(2) Τα δομικά πλεονεκτήματα του χάλυβα δεν είναι απαραίτητα όπως:

- σε μη φέροντα στοιχεία και οπλισμό,
- σε κατασκευές όπου οι μεγάλες παραμορφώσεις είναι πλεονέκτημα και όχι μειονέκτημα.
- σε κατασκευές όπου απαιτείται μεγάλη απόσβεση.
- σε κατασκευές όπου απαιτούνται καλά χαρακτηριστικά κόπωσης.
- σε τοξοειδείς κατασκευές

### 2.1.3.8 Κόπωση των ράβδων FRP

Η αντοχή έναντι κοπώσεως των ράβδων FRP ακόμα δεν έχει ερευνηθεί λεπτομερώς. Αυτή τη στιγμή, δεν υπάρχει καμία παγκοσμίως-αποδεκτή τεχνική για τα προϊόντα FRP ως εκ τούτου, κάθε αποτέλεσμα της δοκιμής πρέπει να συνοδευτεί από μια περιγραφή της χρησιμοποιούμενης τεχνικής.

Ο Tanigaki et al (1989) [28] δημοσίευσαν δοκιμές με ράβδους AFRP. Το χαμηλότερο όριο της τάσης ήταν ίσο με 50 % της πραγματικής και το ανώτερο όριο ήταν ποικίλο.

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τα αποτελέσματα από αυτήν την δοκιμή, η οποία εκτελέστηκε σε θερμοκρασία δωματίου [3].

Δοκιμή	Κάτω Όριο		Άνω Όριο		Διαφορά Τάσης (MPa)	Κύκλοι φόρτισης μέχρι την αστοχία $\times 10^3$
	Φορτίο (kN)	Τάση (MPa)	Φορτίο (kN)	Τάση (MPa)		
1	32,26	645,3	46,97	939,5	294,2	>2090
2	32,26	645,3	42,52	990,5	345,2	>3577
3	32,26	645,3	50,99	1019,9	374,6	>2063
4	32,26	645,3	54,43	1088,5	443,3	305

Η χαρακτηριστική τάση της ράβδου αυτής είναι 1255 MPa και εάν το ανώτερο όριο δεν υπερβαίνει το 80 τοις εκατό της τελικής τάσης, η θραύση δεν εμφανίζεται ακόμη και μετά από δύο εκατομμύρια κύκλους.

Τα CFRP έχουν την καλύτερη αντοχή έναντι κοπώσης. Για  $2 \times 10^6$  κύκλους, Leadline (χημική εταιρία της Mitsubishi) έχει ένα όριο αντοχής 1100 MPa σε μια αναλογία πίεσης 0,1.

### 2.1.3.9 Πλαστιμότητα

Η πλαστιμότητα των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι αρκετά σημαντική για τους μηχανικούς, οι οποίοι προτιμούν να βλέπουν πριν την αστοχία της κατασκευής κάποια προειδοποίηση, παρά να έχουν να αντιμετωπίσουν καταστάσεις ψαθυρής και απότομης θραύσης. Η προειδοποίηση αυτή, όπως συνήθως παρουσιάζεται με μεγάλες παραμορφώσεις, είναι πλασματική, αφού σε περίπτωση υπερβολικού φορτίου οι παραμορφώσεις αναπτύσσονται συνήθως πολύ γρήγορα και δεν υπάρχει το απαιτούμενο διάστημα να αντίληψης ότι η κατασκευή θα καταρρεύσει, ή πόσο μάλλον να παρθούν τα απαιτούμενα μέτρα αποφυγής της κατάρρευσης.

Σε αρκετές κατασκευές όπου, ο λυγισμός του θλιβόμενου χάλυβα ή η θλιπτική θραύση του σκυροδέματος αναμένονται ως αιτίες αστοχίας, οι κατασκευές σχεδιάζονται με τους ίδιους συντελεστές ασφαλείας όπως οι κατασκευές που αναμένονται να αστοχήσουν με πιο πλάστιμο τρόπο. Άρα, οι απότομες αστοχίες που αναμένονται σε κατασκευές που οπλίζονται με FRP πρέπει να εξεταστούν με το ίδιο πνεύμα και να μην απορρίπτονται από



τους μηχανικούς. Η αστοχία σε αυτές τις κατασκευές θα συνοδεύεται με μεγάλες παραμορφώσεις και εκτεταμένη ρηγμάτωση, σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι θα συνέβαινε στον χάλυβα, που θα λειτουργούν ως προειδοποίηση εφόσον η κατασκευή μπορεί να αντέξει ακόμη μεγαλύτερα φορτία.

Σε περιπτώσεις όπου η πλαστιμότητα είναι μέγιστης σημασίας, όπως για παράδειγμα σε σεισμογενείς περιοχές, υπάρχουν επιλογές με τις οποίες μπορεί να δοθεί στην κατασκευή η απαραίτητη πλαστιμότητα.

Τέτοιες επιλογές είναι:

- Η περίσφιξη της θλιπτικής ζώνης του σκυροδέματος της διατομής.
- Η χρησιμοποίηση σύνθετων ράβδων ή συνδυασμών ράβδων διαφορετικών FRP υλικών, ώστε να έχουμε διαδοχικές αστοχίες σε διαφορετικές τιμές παραμορφώσεων.
- Η εκμετάλλευση της πλαστικής συμπεριφοράς της συνάφειας των FRP.
- Η χρησιμοποίηση επιπλέον δομικών στοιχείων σε μια κατασκευή, τα οποία να είναι σχεδιασμένα ώστε να αστοχούν χωρίς να την επηρεάζουν και να δίνουν έτσι πλαστιμότητα στην κατασκευή.

Καμία από τις παραπάνω επιλογές δεν είναι εύκολη στην πράξη, και όλες απαιτούν καινούργιες τεχνικές και θεωρήσεις, που είναι όμως μέσα στις δυνατότητες του μηχανικού [27].

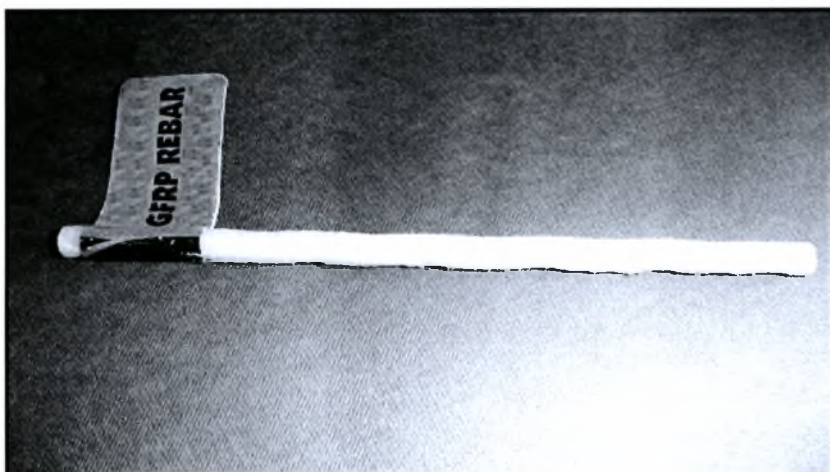
## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραματικής έρευνας δοκών οπλισμένες με ράβδους GFRP

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται πειράματα τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς και αφορούν δοκούς οπλισμένες αποκλειστικά με ράβδους GFRP έτσι ώστε να μελετηθούν και να καταγράφουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών, με έμφαση στο βέλος κάμψης το οποίο αποτελεί και το κύριο πρόβλημα σε αυτές τις δοκούς σε σχέση με τις δοκούς που έχουν οπλιστεί με χάλυβα.

#### 3.1 Ράβδοι GFRP

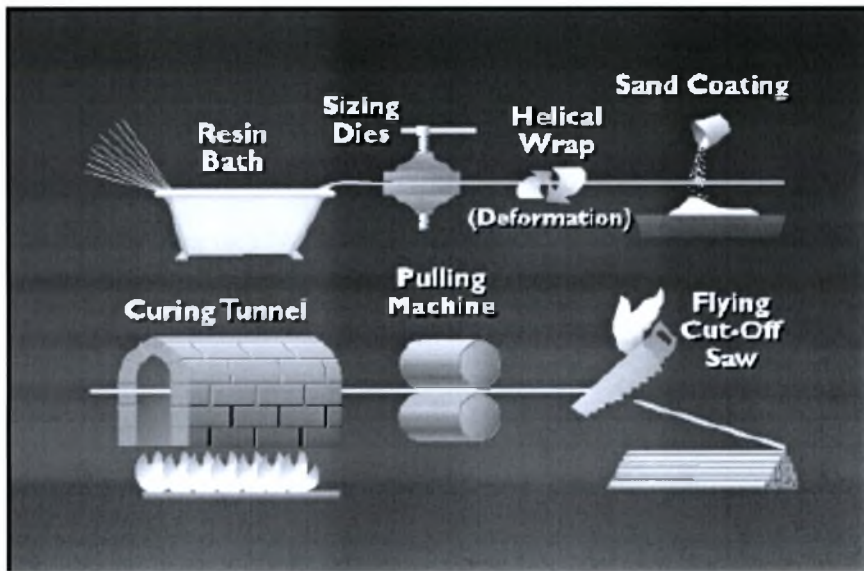
Μετά από πολλά έτη έρευνας και πειραματικής μελέτης αρχίζει η εμπορευματοποίηση των ράβδων από πολυμερή ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (GFRP). Οι ράβδοι αυτοί θα αποτελέσουν το κύριο στοιχείο έρευνας της εργασίας αυτής.



Σχήμα 3.1 : Δείγμα ράβδου GFRP εμπορίου

### 3.1.1 Διαδικασία κατασκευής και μορφοποίησης των ράβδων GFRP

Οι περισσότερες ράβδοι (GFRP) κατασκευάζονται από κάποια παραλλαγή της διαδικασίας πολτοποίησης. Οι ίνες γυαλιού σύρονται μέσω δοχείου που περιέχει ρητίνη και τραβιούνται εκτός αυτού μέσω κύβων. Στην συνέχεια το εξαγόμενο σύνθετο υλικό περνάει από επεξεργασία της επιφάνειας του που θα ενισχύσουν τα χαρακτηριστικά συνάφειας του με το σκυρόδεμα. Περιστρέφεται για να πάρει ελικοειδή μορφή και διαβρέχεται με άμμο στην εξωτερική του επιφάνεια. Έπειτα θερμαίνεται, περνάει από μια μηχανή εξέτασης και τέλος κόβεται στο επιθυμητό μήκος. Ανεξάρτητα από το τελικό προϊόν, οι ίνες γυαλιού είναι αυτές που παραλαμβάνουν την εφελκυστική δύναμη για το προϊόν, ενώ η μήτρα από πολυμερές είναι σύνδεσμος για να κρατήσει τις ίνες σε ένα σώμα [29].



**Σχήμα 3.2 :** Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής των ράβδων GFRP

Η υψηλή περιεκτικότητα του προϊόντος σε γυαλί οδηγεί στα βέλτιστα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Αν η περιεκτικότητα σε γυαλί είναι της τάξης του 75% κ.β. και 25% πολυμερική ρητίνη, τότε αποτελεί μια ιδανική αναλογία για το τελικό προϊόν.

Οι μεταβλητές της διαδικασίας παραγωγής όπως ο τύπος της χρησιμοποιούμενης ρητίνης, η ταχύτητα της διαδικασίας, η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε γυαλί και άλλες

μικρότερης σημασίας παράμετροι, διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην παραγωγή και στην ποιότητα των ράβδων GFRP.

### 3.1.2 Σύγκριση των ράβδων GFRP με τις αντίστοιχες ράβδους από χάλυβα

Πολλές από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ράβδων GFRP είναι διαφορετικές από αυτές του χάλυβα. Οι ράβδοι GFRP είναι μία με δύο φορές ανθεκτικότερες στον εφελκυσμό ως προς τις ράβδους χάλυβα και με μόνο το ένα τέταρτο του βάρους. Οι ράβδοι GFRP είναι διαπερατοί σε μαγνητικά πεδία και δεν είναι αγωγάιμοι. Είναι επίσης απολύτως αδρανείς στην ιονική υποβάθμιση του χλωριδίου.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των ράβδων GFRP είναι ότι το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι σημαντικά χαμηλότερο από αυτό του χάλυβα. Οι αδιαπέρατες ίνες γυαλιού στην ιονική επίδραση του χλωριδίου, εάν δεν τοποθετηθούν κατάλληλα στην πολυμερή ρητίνη, τότε είναι διαπερατές στην αλκαλική υποβάθμιση. Ενώ το μικρό του βάρος το καθιστά εύκολο στον χειρισμό, στο πεδίο εργασίας, ωστόσο η χαμηλή του πυκνότητα έχει ως συνέπεια να επιπλέει στο δονούμενο σκυρόδεμα κατά τη διαδικασία της σκυροδέτησης και γι' αυτό θα πρέπει να δεθεί στη σωστή θέση κατά την σκυροδέτηση. Κατά τον σχεδιασμό με ράβδους GFRP, οι διαφορές στις φυσικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά απόδοσης των ράβδων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Ο μηχανικός πρέπει να γνωρίζει ότι όλα τα GFRP είναι γραμμικά ελαστικά μέχρι την αστοχία και δεν παρουσιάζουν καμία ολκιμότητα ή διαρροή. Στο συνήθη σχεδιασμό του οπλισμένου με χάλυβα σκυροδέματος, υπάρχει ένα μέγιστο ποσοστό ενίσχυσης με χάλυβα έτσι ώστε ο χάλυβας να διαρρέει πριν την αστοχία του σκυροδέματος.

Στην περίπτωση όπλισης με χάλυβα για την επίτευξη όσο το δυνατόν πιο πλαστικής συμπεριφοράς κατά την αστοχία λόγω κάμψης, θα πρέπει η διαρροή του οπλισμού να προηγείται της θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος. Γι' αυτό και τα μέλη της κατασκευής θα πρέπει μ' αυτό τον τρόπο να “προειδοποιούν” πριν την κατάρρευση. Κατά χρησιμοποίηση ράβδων GFRP, οι διάφοροι κανονισμοί συνιστούν ένα ελάχιστο ποσοστό οπλισμού παρά ένα μέγιστο, όπως γίνεται στην περίπτωση όπλισης με χάλυβα. Εάν ένα μέλος της κατασκευής καταρρεύσει, τότε το σκυρόδεμα θα είναι αυτό που θα αστοχήσει πρώτο. Στην περίπτωση αυτή το σκυρόδεμα είναι αυτό που λειτουργήσει ως προειδοποίηση της αστοχίας και θα υπάρχει ακόμα αρκετή απομένουσα εφελκυστική ικανότητα στις ράβδους GFRP.

Μια άλλη θεμελιώδης διαφορά, είναι ότι κριτήριο για το σχεδιασμό με ράβδους GFRP σε σχέση με αυτές από χάλυβα, αποτελεί η κατάσταση λειτουργικότητας και όχι η κατάσταση αστοχίας. Λόγω του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητάς των ράβδων GFRP, το βέλος κάμψης και το πλάτος των ρωγμών έχουν επιπτώσεις στο σχεδιασμό. Τα μεγάλα βέλη κάμψης και πλάτη ρωγμών αποτελούν την πρόσθετη προειδοποίηση της αστοχίας πριν από την σύνθλιψη του σκυροδέματος. Σε πολλές περιπτώσεις, το βέλος κάμψης και το πλάτος των ρωγμών παίζουν πρωταρχικό ρόλο στο σχεδιασμό.

Οι ράβδοι GFRP μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε δομικό στοιχείο στο οποίο η όπλιση με χάλυβα θα ήταν ακατάλληλη λόγω χημικής ή ιονικής διάβρωσης του χλωριδίου. Επίσης, στη περίπτωση κατασκευής ενός δομικού στοιχείου σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, τότε η χρήση ράβδων GFRP προτιμάται έναντι αυτών του χάλυβα [29].

### 3.1.3 Χρήσεις

1) Γενικές εφαρμογές σε διαβρωτικό περιβάλλον στις οποίες το δομικό στοιχείο εκτίθεται σε απόψυξη αλάτων :

- καταστρώματα γεφυρών εθνικών οδών
- φράγματα
- αποβάθρες
- χώροι στάθμευσης
- διασταυρώσεις σιδηροδρόμου
- εγκαταστάσεις αποθήκευσης άλατος

2) Περιπτώσεις στις οποίες το σκυρόδεμα εκτίθεται σε θαλάσσια άλατα :

- κτήρια και κατασκευές κοντά στις προκυμαίες
- θαλάσσια πάρκα
- τεχνητοί σκόπελοι και κυματοθραύστες

3) Περιπτώσεις όπου το σκυρόδεμα εκτίθεται σε διάβρωση :

- σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται στις χημικές εγκαταστάσεις
- σωληνώσεις και χημικές εγκαταστάσεις διανομής
- πισίνες



4) Περιπτώσεις εφαρμογών ράβδων GFRP που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρομαγνητική διαπερατότητα τους :

- Στα νοσοκομεία
- Στα αεροδρόμια
- Ηλεκτρικοί υπόγειοι θάλαμοι μετασχηματιστών υψηλής τάσης
- Σκυρόδεμα κοντά στα καλώδια υψηλής τάσης και τους υποσταθμούς

Να σημειωθεί λοιπόν ότι, οι ράβδοι GFRP μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις κατασκευών όπου απαιτείται η ενίσχυση τους με εποξειδικές ράβδους χάλυβα, γαλβανισμένου χάλυβα ή ανοξείδωτου χάλυβα. Υπάρχει μια μικρή προκατάληψη για τις ράβδους GFRP όσον αφορά το κόστος, τις εφαρμογές και την εργασιμότητα τους στο πεδίο.

Γενικά, οι ράβδοι GFRP δε διαφέρουν πολύ στη τιμή από τον εποξειδικό χάλυβα, αλλά πρέπει να εξεταστεί εάν η ενίσχυση με το συγκεκριμένο χάλυβα απαιτείται. Σε αντίθεση με τον κοινό χάλυβα, οι ράβδοι GFRP πρέπει να μορφοποιηθούν στο εργοστάσιο παραγωγής τους.

Η περαιτέρω εμπορευματοποίηση των ράβδων GFRP θα βοηθηθεί από τη συγγραφή κανονισμών σχεδιασμού από το αμερικανικό ίδρυμα (ACI), τον Καναδά, την Ιαπωνία και τη Μεγάλη Βρετανία. Οι κυβερνητικοί οργανισμοί σε όλο τον κόσμο ενδιαφέρονται για τα πιθανά οφέλη που συνδέονται με τη βελτιωμένη μακροζωία των κατασκευών του πολιτικού μηχανικού που προσφέρει η χρήση ράβδων GFRP.

Εν κατακλείδι, οι ράβδοι GFRP και τα παράγωγα τους ήταν διαθέσιμα στην αγορά για αρκετά χρόνια, αλλά τώρα τελευταία έχει ξεκινήσει η αυξανόμενη χρήση τους σε δευτερεύοντα δομικά στοιχεία. Η έρευνα επικυρώνει την άριστη βραχυπρόθεσμη απόδοση τους. Πολλές έρευνες συμμετέχουν στην προσπάθεια να προβλεφθεί η διάρκεια και η μακροπρόθεσμη απόδοση δομικών στοιχείων ενισχυμένων με GFRP.

Οι νέοι κανονισμοί θα βοηθήσουν τους μηχανικούς στη χρήση αυτού του νέου υλικού, το οποίο απαιτεί νέους τρόπους μελέτης για την όπλιση κατασκευής από σκυρόδεμα.

Οι ράβδοι GFRP αποτελούν το δομικό υλικό της νέας χιλιετίας.



### 3.2 Πειραματικές μελέτες

Όπως ήδη έχει ειπωθεί ένα από τα κύρια προβλήματα όπου ο υπεύθυνος μηχανικός καλείται να αντιμετωπίσει κατά την μελέτη και εκτέλεση ενός δομικού έργου με ράβδους GFRP, ως κύρια όπλιση, είναι το βέλος κάμψης και τα πλάτη των ρωγμών.

Πρόβλημα το οποίο από πλευράς αισθητικής και συναισθήματος ανασφάλειας που προκαλεί η όψη ενός δομικού στοιχείου με μεγάλο βέλος κάμψης και μεγάλα πλάτη ρωγμών γίνεται ακόμη πιο αισθητό. Το κυριότερο όμως είναι ότι μπορεί να επιφέρει στην κατασκευή μέχρι και κατάρρευση.

Για το λόγο αυτό έχουν γίνει σειρά από πειραματικές μελέτες και ερευνητικά προγράμματα που προσπαθούν να εξετάζουν το πρόβλημα της κάμψης. Ενδεικτικά πειράματα τα οποία εξετάζουν την συμπεριφορά δοκών οπλισμένων με ράβδους GFRP κάτω από καμπτικό φορτίο παρουσιάζονται παρακάτω.

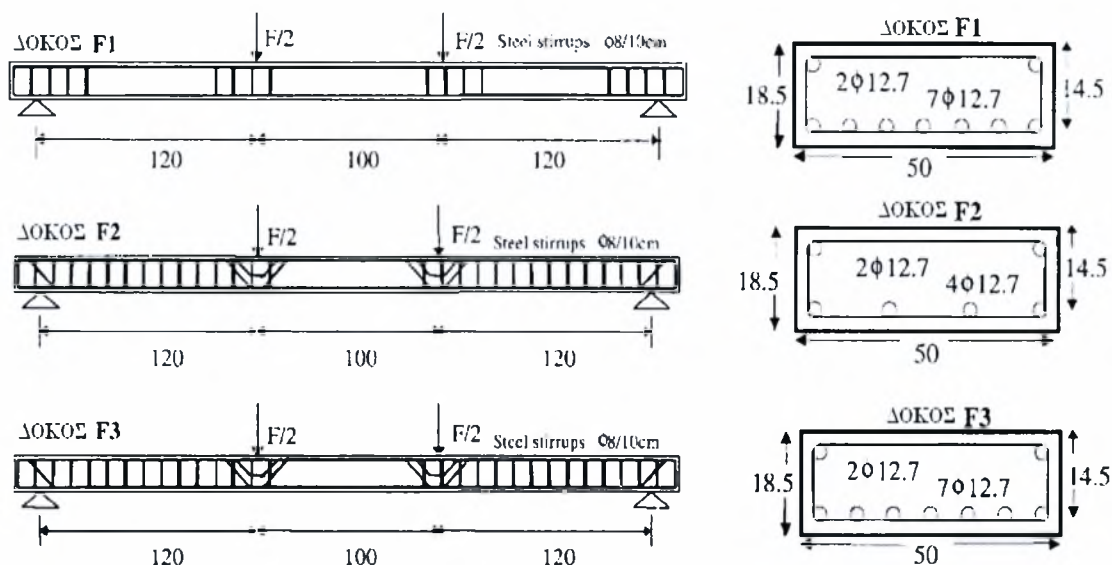
#### 3.2.1 Πείραμα από τους *M. Pece, G. Manfredi και E. Cosenza* [30] έτος 1996.

Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν τρεις δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος που ενισχύθηκαν με ράβδους GFRP. Οι δοκοί ονομάστηκαν F1, F2 και F3.

Η δοκός F1 και F3 ενισχύθηκαν με 2 ράβδους διαμέτρου  $\varnothing$  12.7 mm στην κορυφή ως θλιβόμενος οπλισμός και 7 ράβδους  $\varnothing$  12.7 mm στο κάτω μέρος ως εφελκυσόμενος οπλισμός.

Η δοκός F2 ενισχύθηκε και αυτή με 2 ράβδους διαμέτρου  $\varnothing$  12.7 mm θλιβόμενου οπλισμού και 4 ράβδους  $\varnothing$  12.7 mm εφελκυσόμενου οπλισμού. Για να αποφευχθεί τυχούσα αστοχία από τέμνουσα χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες από χάλυβα διαμέτρου 8 mm τοποθετημένοι ανά 100 mm.

Οι οπλισμοί τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Δοκοί F1, F2 και F3

Οι δοκοί είχαν μήκος 3400 mm, διαστάσεις διατομής 500 × 185 mm ( b × h ), στατικά ύψη d = 145 mm και d' = 40 mm. Οι δοκοί φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά εφαρμοσμένες ως προς το μέσο του ανοίγματος σε απόσταση 100 mm μεταξύ τους. Η αντοχή του σκυροδέματος μετά από δοκιμή τριών κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 150 mm και ύψους 300mm ήταν  $f_c = 30$  MPa. Οι ράβδοι GFRP είχαν εφελκυστική αντοχή  $f_u = 770$  MPa και μέτρο ελαστικότητας τους  $E_p = 42$  GPa.

Οι πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζουν συνοπτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις βασικές ιδιότητες των υλικών αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

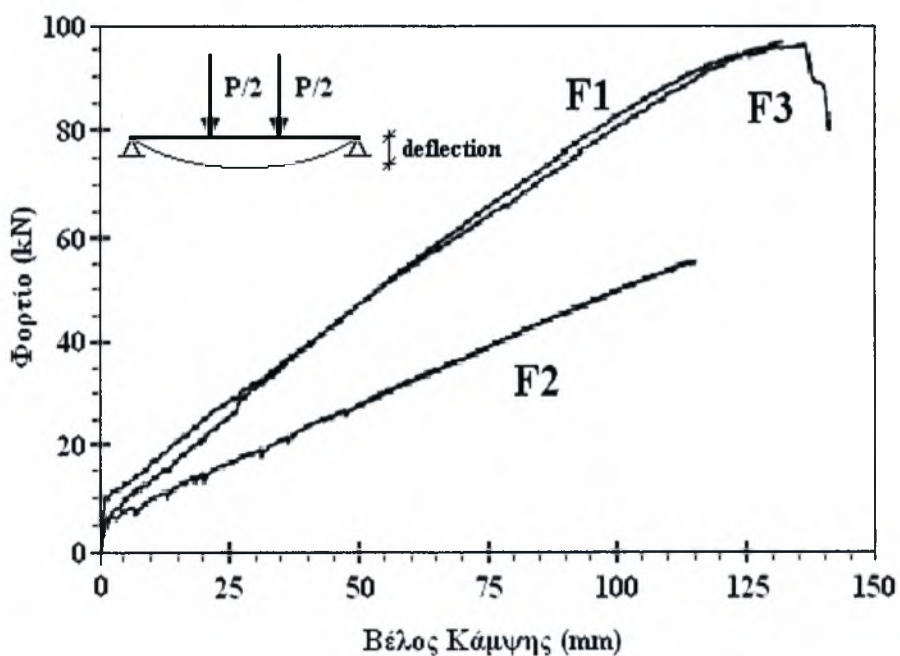
Ομάδα Δοκών	Τύπος Ενίσχυσης	Λεπτομέρειες Οπλισμών	As (mm <sup>2</sup> )	h (mm)	b (mm)	d (mm)
F1	GFRP	7 Ø 12.7	886	185	500	145
F2	GFRP	4 Ø 12.7	508	185	500	145
F3	GFRP	7 Ø 12,7	886	185	500	145

**Πίνακας 3.2 :** Μηχανικές ιδιότητες υλικών :

Δοκός	$f_c$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	E (MPa)
F1	30	770	42000
F2	30	770	42000
F3	30	770	42000

**3.2.1.1 Αποτελέσματα Πειράματος**

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος:

**Σχήμα 3.4:** Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης

### 3.2.1.2 Συμπεράσματα :

Η δοκός F1 παρουσίασε αστοχία λόγω διάτμησης στη ζώνη φόρτισης. Αυτή η αστοχία προκαλείται από την αλληλεπίδραση των ρωγμών λόγω κάμψης και των διαγώνιων ρωγμών λόγω της εφαρμογής του συγκεντρωμένου φορτίου ενώ, στην περιοχή μεταξύ του φορτίου και της στήριξης, οι ρωγμές είναι σχεδόν κάθετες. Αντίθετα, οι δοκοί F2 και F3, όπου η εγκάρσια ενίσχυση στη περιοχή φόρτωσης αυξήθηκε, αστόχησαν λόγω αστοχίας των ράβδων. Οι δοκοί F1 και F3 σχεδιάστηκαν για να αστοχούν λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος, αλλά στο πείραμα είχαμε αστοχία των ράβδων λόγω της χαμηλότερης αντοχής τους.

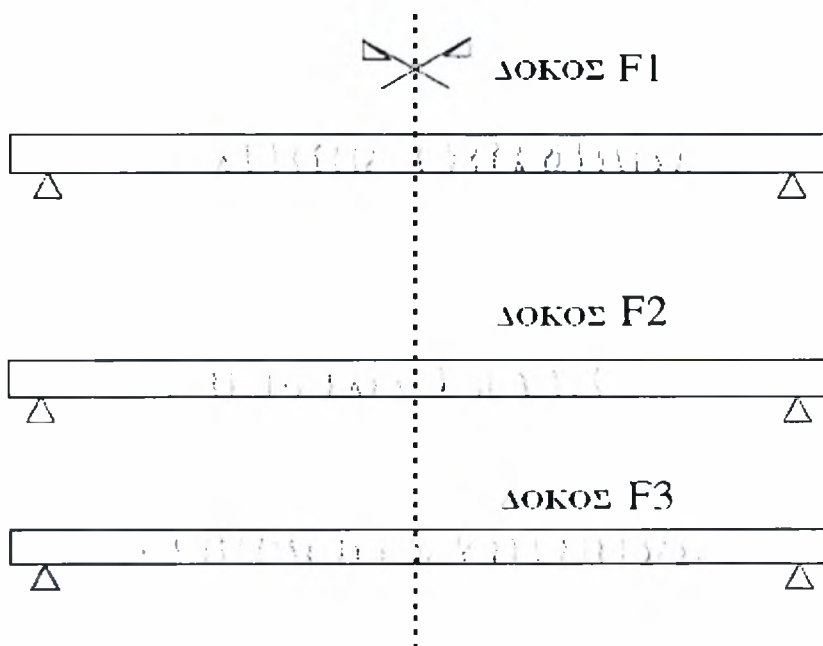
Η συμπεριφορά των δοκών συσχετίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό με τη σχέση φορτίου - βέλους κάμψης στο μέσο του ανοίγματος, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 3.4. Είναι φανερό ότι η αστοχία και για τις τρεις δοκούς ήταν ψαθυρή.

Οι δύο δοκοί με τον ίδιο διαμήκη οπλισμό (F1 και F3) παρουσιάζουν σχεδόν ίδια συμπεριφορά, εκτός από την στιγμή της αρχικής ρηγμάτωσης και τη στιγμή της αστοχίας. Ο πρώτος λόγος είναι ότι η προ-ρηγμάτωσης φάση για τη δοκό F3 δεν υπάρχει. Στο τελευταίο τμήμα των διαγραμμάτων φορτίου -βέλους κάμψης, οι διαφορετικές αστοχίες των δύο στοιχείων είναι σαφείς. Η αστοχία λόγω κάμψης και διάτμησης της δοκού F1 είχε ως αποτέλεσμα τη ξαφνική κατάρρευση της, δηλαδή ήταν ψαθυρή, σε αντίθεση με την αστοχία λόγω κάμψης που παρουσιάστηκε στη δοκό F3. Για το λόγο αυτό και παρουσιάζεται ο φθίνοντας κλάδος στο διάγραμμα φορτίου -βέλους κάμψης, που αντιστοιχεί στην προοδευτική αστοχία των ράβδων. Αν και είχαν διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας, οι δοκοί έφεραν το ίδιο μέγιστο φορτίο.

Συγκρίνοντας τις δοκούς F2 και F3, και οι δύο αστόχησαν λόγω αστοχίας των ράβδων τους. Η δοκός F3 παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά στο τελευταίο τμήμα του διαγράμματος λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος. Στη δοκό F2 ο μικρότερος αριθμός ράβδων προκάλεσε την ξαφνική αστοχία χωρίς καμιά προειδοποίηση. Διαφαίνεται ότι στις οπλισμένες με ράβδους GFRP δοκούς σκυροδέματος, παρουσιάζεται μια ψευδή ολκιμότητα λόγω του σκυροδέματος (Nanni 1993, ACI 1996b) [32], [31] κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός των στοιχείων είναι προτιμότερο να γίνεται με βάση πρώτα την αστοχία του σκυροδέματος (δηλ., το αντίθετο απ' ότι στο σχεδιασμό δοκών ενισχυμένες με ράβδους χάλυβα).

Τέλος, η παραμόρφωση της δοκού F2 είναι δύο φορές μεγαλύτερη από αυτή της δοκού F1. Άρα το ποσοστό ενίσχυσης μπορεί να είναι σημαντικό, όχι μόνο για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας, αλλά και για την εξασφάλιση της λειτουργικότητας (GangaRao και Vijay 1997) [33]. Στο σχήμα 3.5 οι ρωγμές μαρκάρονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής, για φορτία 29, 15, και 29 kN για τις δοκούς F1, F2, και F3, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές των φορτίων αντιστοιχούν σε τάση περίπου 170 MPa (που είναι περίπου το 30% του πειραματικού φορτίου) για τις ράβδους GFRP και για τις τρεις δοκούς.

Για το ίδιο επίπεδο τάσης των ράβδων, τα διαστήματα μεταξύ των ρωγμών είναι μεγαλύτερα στη δοκό F2. Οι μέσες τιμές των διαστημάτων ρωγμών στη περιοχή με σταθερή καμπτική ροπή είναι 100 mm για τις δοκούς F1 και F3 και 145 mm για τη δοκό F2.



Σχήμα 3.5: Καταγραφή ρωγμών

### 3.2.2 Πείραμα από τον *S.H. Alsayed* [34] έτος 1996

Πραγματοποιήθηκε στο τμήμα πολιτικών μηχανικών του πανεπιστημίου “King Saud University” στο Ριάντ της Σαουδικής Αραβίας.

Στο πείραμα αυτό εξετάστηκαν 12 δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος ομαδοποιημένες σε τέσσερις σειρές δοκών, με οπλισμό είτε από χάλυβα είτε από GFRP.

Οι δοκοί είχαν μήκος 2700 mm και διαστάσεις διατομής :

- Σειρά δοκών A (οπλισμός χάλυβας) :  $200 \times 210$  (b × h)
- Σειρά δοκών B (οπλισμός GFRP) :  $200 \times 210$
- Σειρά δοκών C (οπλισμός GFRP) :  $200 \times 260$
- Σειρά δοκών D (οπλισμός GFRP) :  $200 \times 250$

Χρησιμοποιήθηκε επιπλέον και θλιβόμενος οπλισμός αμελητέας ποσότητας, μία ράβδος διαμέτρου 6.25 mm, μόνο και μόνο για την σωστή στήριξη των συνδετήρων.

Για να αποφευχθεί τυχούσα αστοχία από τέμνουσα χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες από χάλυβα διαμέτρου 8 mm τοποθετημένοι ανά 120 mm.

Η ομάδα δοκών A είχε οπλιστεί με τρεις ράβδους χάλυβα διαμέτρου 14 mm ενώ οι ομάδες B, C και D είχαν οπλιστεί με τέσσερις ράβδους 19, 12.7 και 19 mm αντίστοιχα. Οι δοκοί φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά εφαρμοσμένες ως προς το μέσο του ανοίγματος σε απόσταση 100 mm μεταξύ τους.

Την ημέρα του πειράματος η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος για τις ομάδες δοκών A, B και C ήταν 31 MPa ενώ για την ομάδα D ήταν 41 MPa. Η τάση διαρροής του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 553 MPa ενώ οι ράβδοι GFRP με διάμετρο 12.7 mm είχαν μέγιστη τάση 886 MPa κι αυτές με διάμετρο 19 mm είχαν μέγιστη τάση 700 MPa.

Όλες οι δοκοί κατασκευάστηκαν έξω από το εργαστήριο, καλύφθηκαν με λινάτσες και ξεκαλουπώθηκαν 24 ώρες μετά.

Αποθηκεύτηκαν στο εργαστήριο για 14 ημέρες, διαβρέχοντας τα δύο φορές την ημέρα, και αφέθηκαν για άλλες 14 ημέρες έξω στην ατμόσφαιρα μέχρι την ημέρα της δοκιμής.



Πίνακας 3.3 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκών:

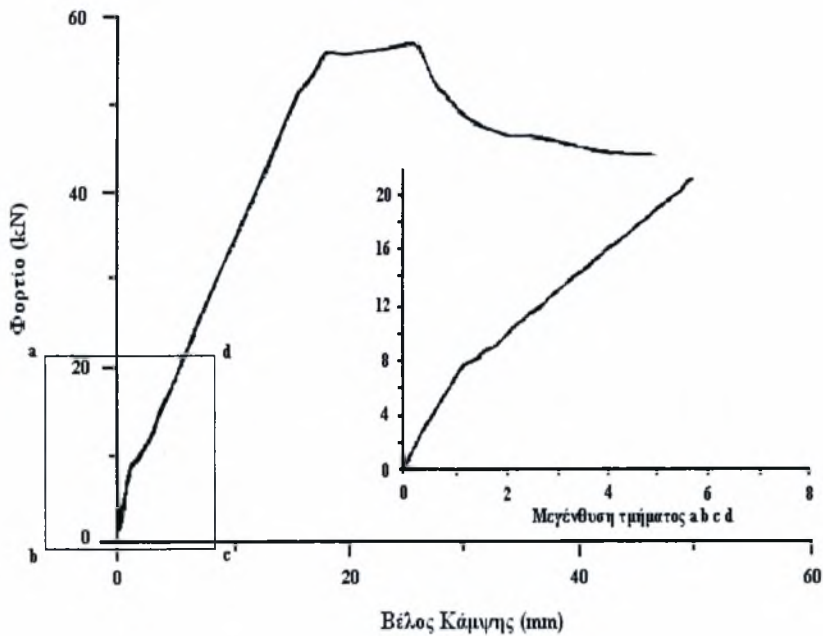
Ομάδα Δοκών	Τύπος Ενίσχυσης	Λεπτομέρειες Οπλισμών	As (mm <sup>2</sup> )	h (mm)	b (mm)	d (mm)
A	Χάλυβας	3 Ø 14	462	210	200	160
B	GFRP	4 Ø 19	1134	210	200	157,5
C	GFRP	4 Ø 12,7	507	260	200	210,7
D	GFRP	4 Ø 19	1134	250	200	197,5

Πίνακας 3.4: Μηχανικές ιδιότητες υλικών:

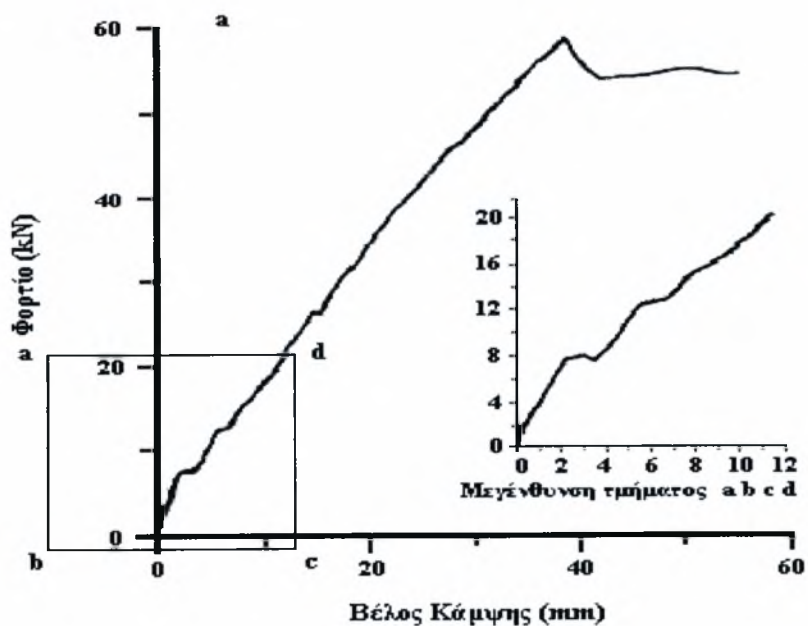
Ομάδα Δοκών	Διάμετρος Οπλισμών	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)
A	14	31	553	-
B	19	31	-	700
C	12,7	31	-	886
D	19	41	-	700

3.2.2.1 Αποτελέσματα Πειράματος

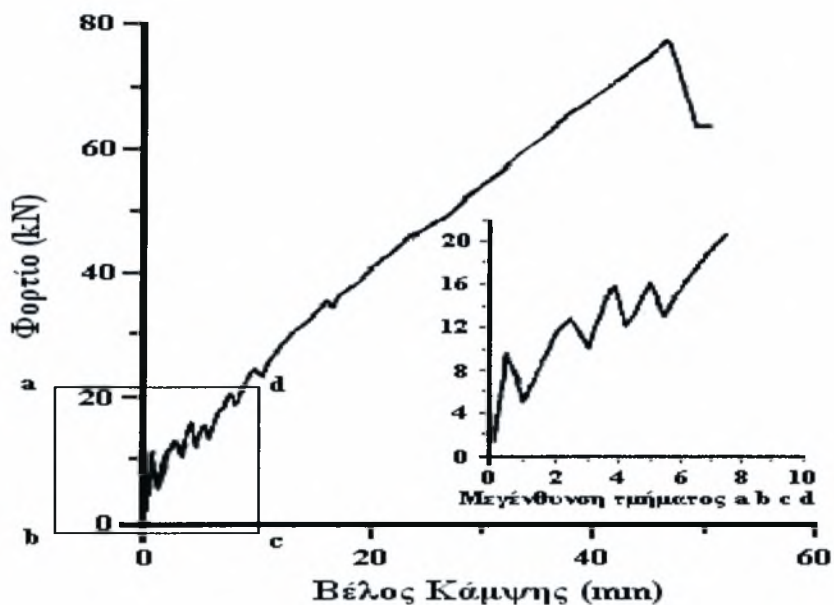
Στα διαγράμματα 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 και στο πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος:



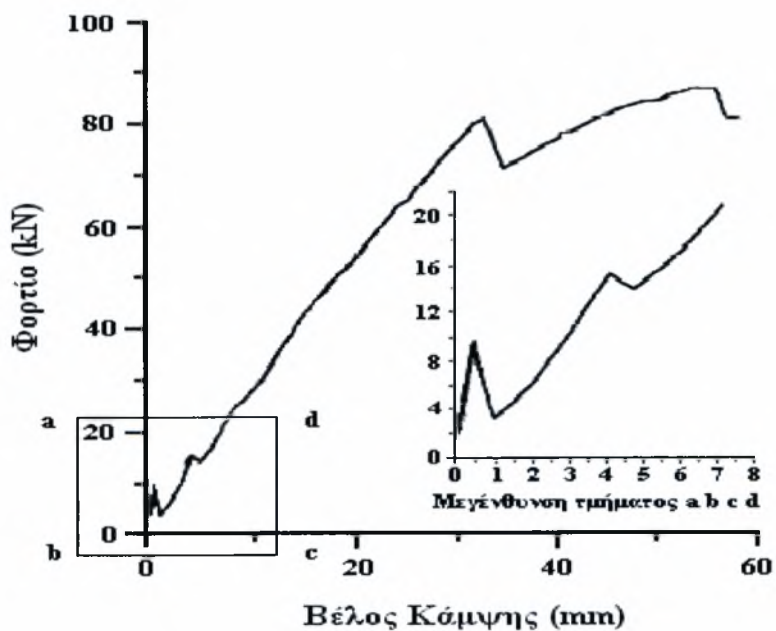
Σχήμα 3.6: Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τη σειρά δοκών Α



Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τη σειρά δοκών Β



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τη σειρά δοκών C



Σχήμα 3.9 : Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τη σειρά δοκών D

**Πίνακας 3.5:** Αποτελέσματα πειράματος

Ομάδα Δοκών	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Φορτίο Λειτουργίας (kN)	Βέλος Κάμψης στο Φορτίο Λειτουργίας (mm)	Φορτίο Ρηγμάτωσης (kN)	Βέλος Κάμψης στο Φορτίο Ρηγμάτωσης (mm)
A	56,54	20	5,44	7,42	1,12
B	58,4	20	10,64	7,56	2,00
C	76,96	20	8,79	9,22	0,56
D	86,37	20	5,80	9,20	0,44

**3.2.2.2 Συμπεράσματα :**

Ο μέσος όρος των καμπυλών φορτίου-βέλους κάμψης (κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει το μέσο όρο τριών καμπυλών) για τις δοκούς των σειρών A, B, C, και D παρουσιάζονται στα διαγράμματα 3.6÷3.9. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν ότι, σε αντίθεση με τις δοκούς που είναι ενισχυμένες με ράβδους χάλυβα, στις δοκούς με ράβδους GFRP υπάρχει μεγάλη μείωση στη σχέση φορτίου-βέλους κάμψης αμέσως μετά την αύξηση του φορτίου πέρα από το φορτίο ρηγμάτωσης. Μπορεί αυτό να αποδίδεται στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας,  $E_p$ , των ράβδων GFRP. Όταν το σκυρόδεμα στην εφελκόμενη ζώνη των δοκών με ράβδους GFRP ρηγματώνεται, το μεγαλύτερο μέρος της εφελκυστικής δύναμης παραλαμβάνεται από τις ράβδους οπλισμού.

Εντούτοις, δεδομένου ότι οι ράβδοι GFRP έχουν χαμηλό μέτρο ελαστικότητας  $E_p$ , η εφελκυστική δύναμη που μπορούν να παραλάβουν για να ανταποκριθούν στην παραμόρφωση λόγω ρηγμάτωσης είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή που παραλαμβάνεται από τη διατομή πριν αυτή ρηγματωθεί. Κατά συνέπεια, κατά μήκος της ρωγμής, η σχέση φορτίου-βέλους κάμψης παρουσιάζει κάποια ανωμαλία.. Γι' αυτό, καθώς οι παραμορφώσεις αυξάνονται, η εφελκυστική δύναμη που παραλαμβάνουν οι ράβδοι ενίσχυσης γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη και συνεχίζει να αυξάνεται έως ότου επέλθει η αστοχία.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα διαγράμματα 3.7÷3.9 επίσης δείχνουν ότι υπάρχουν μερικές περιστασιακές ανωμαλίες κατά μήκος των καμπυλών φορτίου-βέλους κάμψης των δοκών με ράβδους GFRP ακόμα και μετά από την ρηγμάτωση.

Εντούτοις αυτές οι ανωμαλίες μπορούν να αποδοθούν στη θραύση μερικών ιών των ράβδων ενίσχυσης ως αποτέλεσμα της επίδρασης της τέμνουσας λόγω επικάλυψης, το οποίο έγινε αντιληπτό από τον ήχο θραύσης που ακούστηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Τα μεγενθυμένα διαγράμματα φορτίου-βέλους κάμψης για τις δοκούς των σειρών A, B, C, και D μέχρι το φορτίο λειτουργίας της κάθε ελεγχόμενης σειράς (που υπολογίζεται ότι ήταν 20 kN το οποίο είναι περίπου το 35% του μέγιστου φορτίου των δοκών της σειράς A) παρουσιάζονται ως τμήμα των διαγραμμάτων 3.7÷3.9. Για να απλοποιηθεί η σύγκριση, τα μετρημένα βέλη κάμψης για φορτία λειτουργίας που αντιστοιχούν σε φορτίο 20 kN παρουσιάζονται επίσης στον πίνακα 3.5. Όπως φαίνεται στον πίνακα, όταν το εφαρμοσμένο φορτίο είναι 20 kN, το βέλος κάμψης των δοκών της σειράς B είναι σχεδόν δύο φορές αυτό των δοκών της σειράς A.

Επίσης, στα διαγράμματα 3.6 και 3.7 μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι όταν το εφαρμοσμένο φορτίο στις δοκούς της σειράς B είναι 12 kN (60% των 20 kN), το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος των δοκών της σειράς B είναι το ίδιο με το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος των δοκών της σειράς A όταν το εφαρμοσμένο σ' αυτές φορτίο είναι 20 kN. Αυτό σαφώς προτείνει ότι, σε καταστάσεις όπου το βέλος κάμψης για φορτία λειτουργίας είναι κρίσιμο, η αντικατάσταση των ράβδων χάλυβα με ράβδους GFRP χωρίς την αλλαγή των διαστάσεων της διατομής μπορεί να μην είναι η ενδεικτική λύση.

Επιπλέον, όταν το εφαρμοσμένο φορτίο είναι 20 kN, τα βέλη κάμψης στο μέσο του ανοίγματος των δοκών των σειρών C και D είναι 8,79 mm και 5,8 mm αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι σχεδόν ίσες με το μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος κάμψης για φορτία λειτουργίας για την απλά εδραζόμενη δοκό με μήκος 2700 mm και το βέλος κάμψης για φορτία λειτουργίας των δοκών της σειράς A, αντίστοιχα.

Τα μέγιστα καμπτικά φορτία που καταγράφονται για τις δοκούς δοκιμής σε όλες τις σειρές παρατίθενται στον πίνακα 3.5. Το βέλος κάμψης στο μέσο του ανοίγματος της σειράς A είναι 20 mm, ενώ αυτό των δοκών της σειράς B είναι 39 mm (βλ. διαγράμματα 3.6 και 3.7). Έτσι, για το ίδιο καμπτικό φορτίο, κατά την αντικατάσταση των ράβδων χάλυβα με ράβδους GFRP χωρίς αλλαγή των διαστάσεων της διατομής οδηγούμαστε στο διπλασιασμό του βέλους κάμψης που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο.

Έτσι, αφού το βέλος κάμψης καθορίζει την διαστασιολόγηση των δοκών των σειρών C και D, οι σειρές αυτές των δοκών θα χρειαστούν μεγαλύτερη διατομή από τις δοκούς της σειράς A.

Επομένως, οι σειρές των δοκών C και D επιτυγχάνουν υψηλότερα φορτία και βέλη κάμψης σε μέγιστο καμπτικό φορτίο από εκείνα που επιτεύχθηκαν από τις δοκούς της σειράς A (βλ.πίνακα 3.5). Η αύξηση του μέγιστου καμπτικού φορτίου των σειρών C και D πέρα από αυτήν της σειράς A είναι της τάξης του 36 και 53%, αντίστοιχα. Η αντίστοιχη αύξηση στα βέλη κάμψης σε μέγιστο φορτίο είναι της τάξης του 21 και 36%, αντίστοιχα.

Είναι σημαντικό εδώ να επισημανθεί ότι αφού η σειρά των δοκών A ήταν υποοπλισμένη (βλ. τον πίνακα 3.3) θα έχουμε αστοχία λόγω διαρροής της ενίσχυσης του εφελκυσμένου οπλισμού που ακολουθείται από σύνθλιψη σκυροδέματος. Αφ' ετέρου, οι δοκοί των σειρών B, C, και D που ήταν υπεροπλισμένες η αστοχία οφείλεται στη σύνθλιψη του σκυροδέματος. Εντούτοις, η αστοχία τους δεν ήταν ψαθυρή, όπως θα είχε συμβεί αν είχαμε αστοχία λόγω διαρροής των ράβδων GFRP, με τα βέλη κάμψης να φθάνουν σε τιμές μεγαλύτερες από 40 mm.

### 3.2.3 Πείραμα από τους *B. Benmokrane, O Chaallal*. και *R. Masmoudi* [35] έτος 1994

Πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο “ *Ecole de Technologie Superieure* ”, στο Μόντρεαλ του Καναδά.

Στο πείραμα αυτό εξετάστηκαν τρεις σειρές δοκών αποτελούμενες από δύο δοκούς οπλισμένες με ράβδους GFRP (Isorod bars), δύο δοκούς οπλισμένες με ράβδους GFRP (Kodiak bars) και δύο δοκούς οπλισμένες με ράβδους χάλυβα.

Οι δοκοί είχαν μήκος 3000 mm και διαστάσεις διατομής, πλάτος  $b = 200$  mm και ύψος 300, 450 και 550 mm για τις σειρές δοκών 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Κάθε δοκός ενισχύθηκε με δύο ράβδους διαμέτρου 19.1 mm Η αντοχή του σκυροδέματος ήταν  $f_c = 44$  MPa για τη σειρά 1, 55 MPa για τη σειρά 2 και 43 MPa για τη σειρά δοκών 3. Η εφελκυστική αντοχή των ράβδων GFRP ήταν  $f_u = 689$  MPa και το μέτρο ελαστικότητας τους  $E_p = 42$  GPa για τις Isorod GFRP ράβδους και  $E_p = 41 - 50$  GPa για τις Kodiak GFRP ράβδους.

Η τάση διαρροής των ράβδων χάλυβα ήταν 480 MPa και η μέγιστη αντοχή τους 600 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων χάλυβα ήταν  $E_p = 200$  GPa. Οι δοκοί φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά εφαρμοσμένες ως προς το μέσο του ανοίγματος.



Οι πίνακες 3.6 και 3.7 παρουσιάζουν συνοπτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις βασικές ιδιότητες των υλικών αντίστοιχα.

**Πίνακας 3.6:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκών:

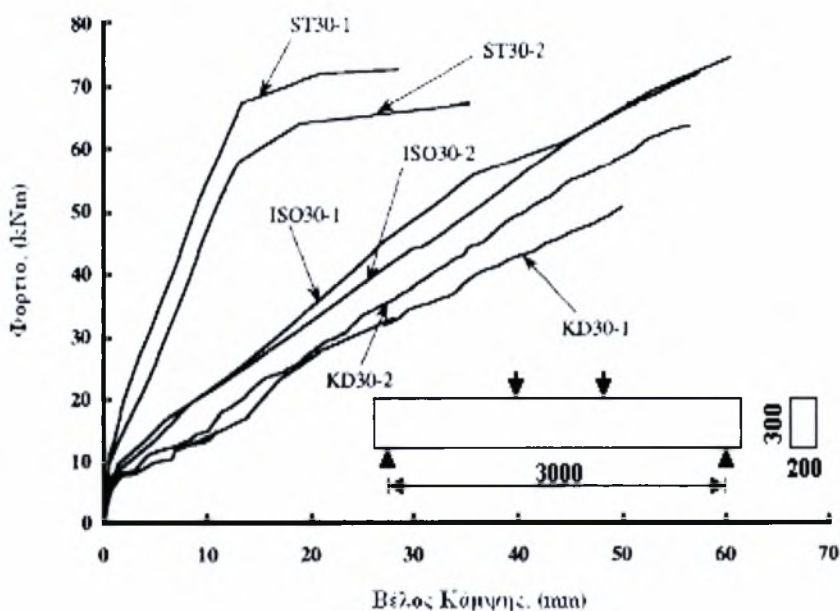
Σειρά Δοκών	Τύπος Όπλισης	Λεπτομέρειες Όπλισμών	A (mm <sup>2</sup> )	h (mm)	b (mm)
1	GFRP και Χάλυβας	2 Ø 19.1	573	300	200
2	GFRP και Χάλυβας	2 Ø 19.1	573	450	200
3	GFRP και Χάλυβας	2 Ø 19.1	573	550	200

**Πίνακας 3.7:** Μηχανικές ιδιότητες υλικών:

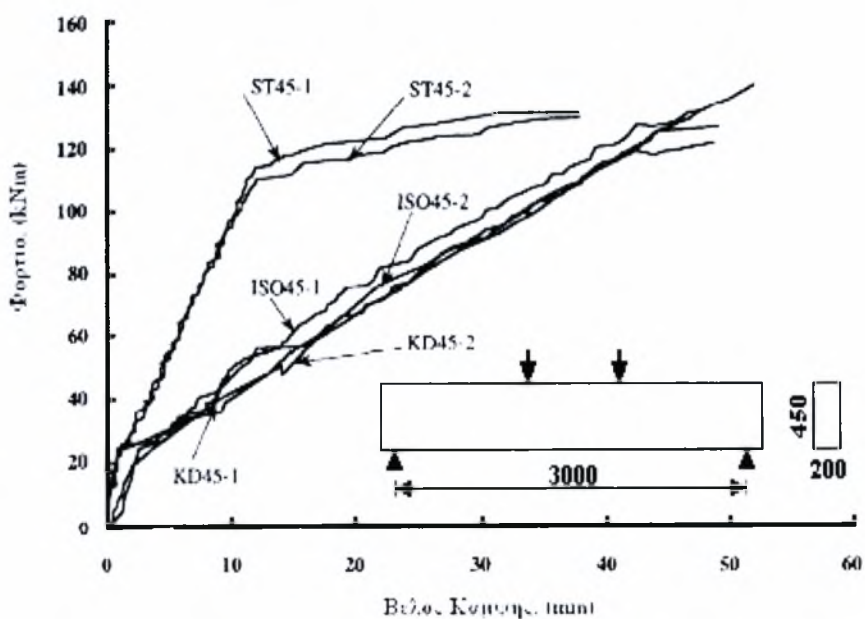
Σειρά Δοκών	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>u</sub> (MPa)	E (MPa)
1	44	689	42000 (Isorod GFRP) 41000-50000 (Kodiak GFRP)
2	55	689	42000 (Isorod GFRP) 41000-50000 (Kodiak GFRP)
3	43	689	42000 (Isorod GFRP) 41000-50000 (Kodiak GFRP)

### 3.2.3.1 Αποτελέσματα Πειράματος

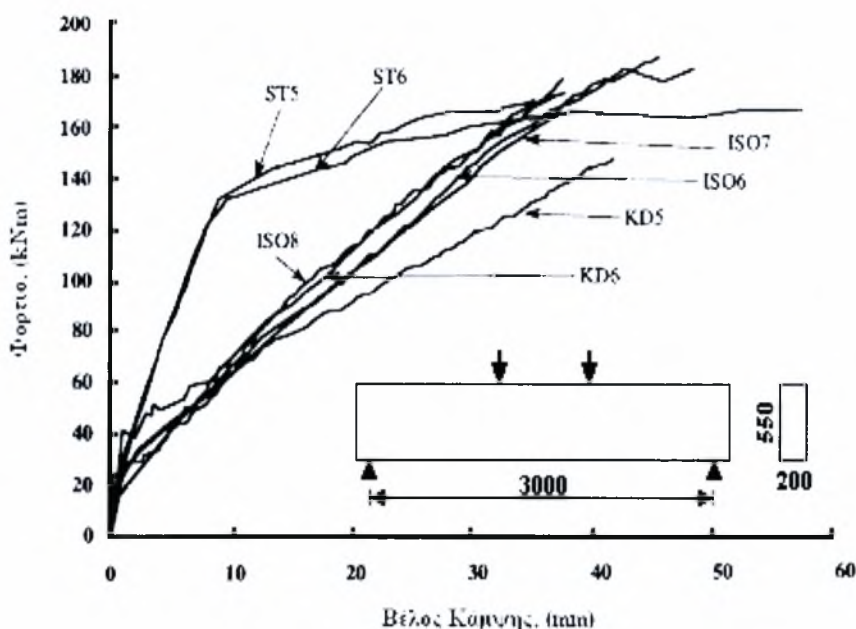
Στα διαγράμματα των σχημάτων 3.10, 3.11, 3.12 και στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος:



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τη σειρά 1



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τη σειρά 2



Σχήμα 3.12 : Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για τη σειρά 3

Πίνακας 3.8 : Αποτελέσματα πειράματος

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Μέγιστο Φορτίο (kNm)	Τρόπος Αστοχίας
ISO30-1	8.5	76.7	Διάτμηση
ISO30-2	8.5	80.4	Σύνθλιψη
KD30-1	9.5	50.6	Σύνθλιψη
KD30-2	9.0	63.8	Σύνθλιψη
ST30-1	8.5	79.7	Εφελκυσμός
ST30-2	8.5	80.0	Εφελκυσμός
ISO45-1	27,0	102	Διάτμηση
ISO45-2	17,0	122.5	Διάτμηση
KD45-1	25,0	10.6	Σύνθλιψη
KD45-2	23,1	113.0	Σύνθλιψη
ST45-1	25,0	103.0	Εφελκυσμός
ST45-2	25,0	106.0	Εφελκυσμός
ISO55-1	36,3	181.5	Εφελκυσμός
ISO55-2	35,2	181.5	Εφελκυσμός
KD55-1	28,1	146.9	Εφελκυσμός
KD55-2	35,0	172.5	Εφελκυσμός
ST55-1	36,3	169.4	Εφελκυσμός
ST55-2	35,2	165.0	Εφελκυσμός

### 3.2.3.2 Συμπεράσματα :

Η ρηγμάτωση στην περιοχή της κάμψης αποτελείται κυρίως από κάθετες ρωγμές στην κατεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης που προκαλείται από την ροπή. Η ρηγμάτωση έξω από την περιοχή της καθαρής κάμψης είχε αρχικά παρόμοια συμπεριφορά, αλλά καθώς το φορτίο αυξάνονταν είχαμε αύξηση διατμητικών τάσεων και ανάπτυγμα διαγώνιων ρωγμών. Ο σχηματισμός των ρωγμών ήταν ξαφνικός. Μετά τη πρώτη ρηγμάτωση, οι ρωγμές αναπτύσσονταν κατά μήκος της διατομής, στα σημεία εφαρμογής των φορτίων.

Όλες οι δοκοί παρουσίασαν σημειακά καμπτικά ρήγματα προτού οι διατμητικές ρωγμές συναντήσουν τις καμπτικές ρωγμές. Παρατηρήθηκε ότι οι ρωγμές είναι βαθύτερες και μεγαλύτερες στις δοκούς που ενισχύονται με ράβδους GFRP σε σχέση με εκείνες που ενισχύονται με το συμβατικό χάλυβα. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των ράβδων GFRP έναντι των ράβδων χάλυβα.

Σημειώνεται ότι όλες οι δοκοί με χάλυβα αστόχησαν λόγω εφελκυσμού όπως αναμενόταν. Εντούτοις, τρεις τύποι αστοχιών παρατηρήθηκαν στις δοκούς GFRP: εφελκυσμός των ράβδων ενίσχυσης (IS055 και KD55), διάτμηση (ISO30-01 και ISO45), και σύνθλιψη σκυροδέματος (IS030-2, KD30, και KD45).

Από τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης παρατηρείται ότι μετά τη στιγμή της ρηγμάτωσης η μείωση της ακαμψίας ήταν μεγαλύτερη στις δοκούς με GFRP έναντι στις δοκούς με χάλυβα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι ρωγμές είναι ευρύτερες και βαθύτερες στις δοκούς με GFRP έναντι των δοκών με χάλυβα, και επίσης στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των GFRP έναντι του χάλυβα. Σημειώνεται επίσης ότι στις δοκούς με χάλυβα, μετά τη διαρροή του, παρατηρείται απότομη αύξηση του βέλους κάμψης σε αντίθεση με την αύξηση του φορτίου που παραμένει σταθερή. Το γεγονός αυτό δεν συμβαίνει στις δοκούς με GFRP, οι οποίες παρουσιάζουν μία πλαστιμότητα παρ' όλη τη ψαθυρή φύση των ράβδων GFRP.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι το μέγιστο φορτίο που άντεξαν οι δοκοί με ράβδους GFRP ήταν συγκρίσιμο με αυτό των δοκών με χάλυβα και ότι οι δοκοί με GFRP παρουσίασαν τριπλάσιο βέλος κάμψης σε σχέση με τις δοκούς από χάλυβα. Όπως μπορεί να φανεί, όταν η αναλογία μήκους-ύψους μειώνεται, μειώνεται και η αναλογία βέλους κάμψης δοκών με GFRP με δοκούς με χάλυβα. Κατά συνέπεια, προκειμένου να ελεγχθούν το βέλος κάμψης και το πλάτος ρωγμών των δοκών που ενισχύονται με ράβδους GFRP, η αναλογία μήκους-ύψους θα διαδραματίσει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των δοκών.

Σημειώστε ότι οι δοκοί με χάλυβα για τις σειρές 1, 2 και 3 σχεδιάστηκαν για να αστοχήσουν σε εφελκυσμό, πράγμα το οποίο συνέβη κατά τη διάρκεια του πειράματος (όλκιμη αστοχία). Για τις δοκούς ISO και KD στη σειρά 1, είχαμε σύνθλιψη του σκυροδέματος πριν την αστοχία των ράβδων GFRP, η οποία μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή εφελκυστική αντοχή των ράβδων GFRP. Στη σειρά 2, οι δοκοί με ράβδους Isorod αστόχησαν σε διάτμηση, και οι δοκοί με ράβδους Kodiak αστόχησαν λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος. Για τη σειρά 3, εντούτοις, η αστοχία των ράβδων Isorod και Kodiak προηγήθηκε της σύνθλιψης του σκυροδέματος.

### 3.2.4 Πείραμα από τους *S.H. Alsayed, Y.A. Al-Salloum* και *T.H. Almusallam* [36] έτος 2000

Πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο " *King Saud University* ", στο Ριάντ της Σαουδικής Αραβίας.

Στην εργασία αυτή εξετάστηκαν συνολικά δεκαπέντε δοκοί κατηγοριοποιημένοι σε πέντε ομάδες. Κάθε ομάδα αποτελούνταν από τρεις δοκούς μήκους 2900 mm, αποστάσεως στηρίξεων 2700 mm και διαστάσεων διατομής, η πρώτη ομάδα 200 × 210 mm, η δεύτερη 200 × 210 mm, η τρίτη 200 × 260 mm, η τέταρτη 200 × 300 mm και η πέμπτη 200 × 250 mm (  $b \times h$  ). Για να αποφευχθεί τυχούσα αστοχία από τέμνουσα χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες από χάλυβα διαμέτρου 8 mm τοποθετημένοι ανά 100 mm.

Η πρώτη ομάδα δοκών είχε οπλιστεί με τρεις ράβδους από χάλυβα διαμέτρου 14 mm για να γίνει ο έλεγχος και η σύγκριση με της άλλες δοκούς. Η δεύτερη είχε οπλιστεί με τέσσερις ράβδους από GFRP διαμέτρου 19 mm, η τρίτη ομοίως με τέσσερις ράβδους GFRP διαμέτρου 12,7 mm, η τέταρτη με δύο ράβδους GFRP διαμέτρου 19 mm και τέλος η πέμπτη με τέσσερις ράβδους GFRP διαμέτρου 19 mm.

Οι ράβδοι GFRP ήταν τύπου E – glass με σύσταση 76,14 % γυαλί, 22,18% ρητίνη, υλικό πληρώσεως 1,26% και καταλύτες 0,37%. Οι δοκοί φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά εφαρμοσμένες ως προς το μέσο του ανοίγματος σε απόσταση 200 mm μεταξύ τους.

Οι πίνακες 3.9 και 3.10 παρουσιάζουν συνοπτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις βασικές ιδιότητες των υλικών αντίστοιχα.

Πίνακας 3.9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκών:

Ομάδα Δοκών	Τύπος Ενίσχυσης	Λεπτομέρειες Οπλισμών	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$h$ (mm)	$b$ (mm)	$d$ (mm)
I	Χάλυβας	3 Ø 14	462	210	200	160
II	GFRP	4 Ø 19	1134	210	200	157,5
III	GFRP	4 Ø 12,7	507	260	200	210,7
IV	GFRP	2 Ø 19	567	300	200	247,5
V	GFRP	4 Ø 19	134	250	200	197,5

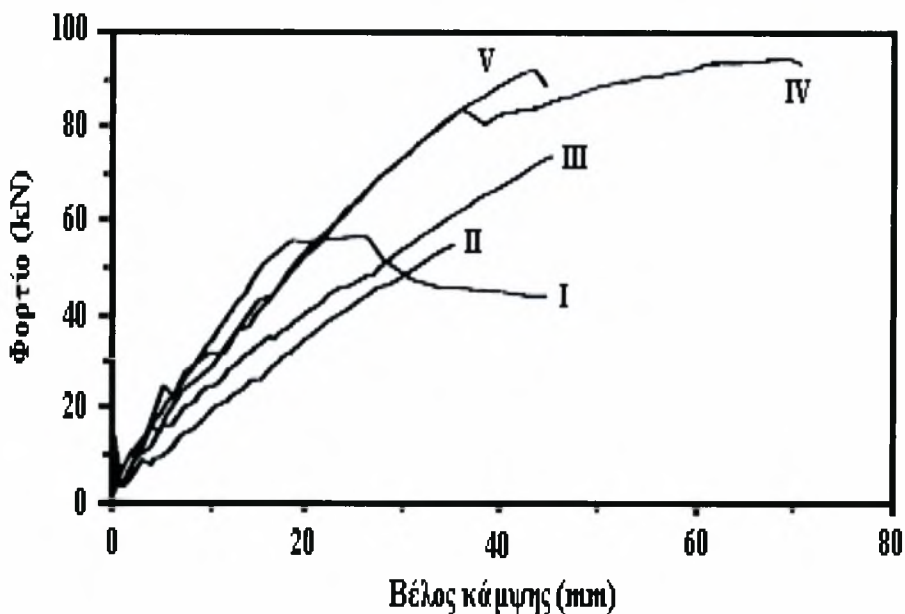
Πίνακας 3.10: Μηχανικές ιδιότητες υλικών:

Ομάδα Δοκών	Διάμετρος Οπλισμών	$f_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$E$ (MPa)
I	14	31,3	553	-	200000
II	19	31,3	-	700	35630
III	12,7	31,3	-	886	43370
IV	19	40,7	-	700	35630
V	19	40,7	-	700	35630



## 3.2.4.1 Αποτελέσματα Πειράματος

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.13 και στον πίνακα 3.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος:



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης για όλες τις ομάδες των δοκών

Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα πειράματος

Ομάδα Δοκών	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Μέγιστο Βέλος Κάμψης (mm)	Φορτίο Λειτουργίας (kN)	Βέλος Κάμψης στο Φορτίο Λειτουργίας (mm)
I	56,5	45,45	20	5,44
II	54,7	35,45	20	10,64
III	72,2	45,91	26	11,32
IV	94,7	70,67	40	14,23
V	91,2	44	33	11,81

### 3.2.4.2 Συμπεράσματα :

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ομάδες δοκών I και II παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια αντοχή. Η αύξηση του βέλους κάμψης είναι πραγματικά λιγότερη από ότι αναμενόταν. Πράγματι, αν και ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας  $E_s / E_p$  είναι μεγαλύτερη από 4, η αναλογία βελών κάμψης στο φορτίο λειτουργίας είναι 1,96. Εντούτοις, η διαστασιολόγηση των δοκών με GFRP πρέπει να γίνεται με γνώμονα τα βέλη κάμψης. Στο πίνακα 3.11, φαίνεται και το όφελος της δοκού III σε σχέση με την ομάδα II, αυξάνοντας το στατικό ύψος της διατομής  $d$ , και μειώνοντας τον οπλισμό.

Η αύξηση αυτή του στατικού ύψους ήταν της τάξης του 24% (260 έναντι 210 mm). Το όφελος της αύξησης αυτής περιλαμβάνει την μείωση της ανάγκης για ράβδους GFRP κατά 55% ( 4Ø19 σε σχέση με 4 Ø 12,7 mm) επομένως και μικρότερο κόστος, την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής κατά 32% (54,7 MPa σε σχέση με 72,2 MPa και τέλος τη μείωση του βέλους κάμψης για το ίδιο φορτίο 20 kN κατά 31% (10,64 έναντι 7,38 mm). Οι δοκοί IV και V παρουσίασαν την ίδια σχεδόν αντοχή και την ίδια συμπεριφορά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι δοκοί αστόχησαν λόγω αστοχίας του σκυροδέματος.

### 3.2.5 Πείραμα από τον *H.A. Abdalla* [37] έτος 2002

Πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο " Cairo University ", στο Κάιρο της Αιγύπτου.

Στο πείραμα αυτό εξετάστηκαν συνολικά πέντε δοκοί μήκους 2500 mm, αποστάσεως στηρίξεων 2300 mm και διαστάσεων διατομής  $500 \times 250$  mm (  $b \times h$  ).

Για να αποφευχθεί τυχούσα αστοχία από τέμνουσα χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες από χάλυβα διαμέτρου 9,5 mm τοποθετημένοι ανά 400 mm. Τρεις από τους δοκούς, ονομαζόμενοι I.4, I.6, και II.5 είχαν οπλιστεί με ράβδους από GFRP με αναλογία ενίσχυσης  $\rho = 0,4\%$ ,  $0,65\%$  και  $1,5\%$  αντίστοιχα.

Οι άλλες δύο δοκοί, καλούμενοι ως C.4 και C.8, ήταν ενισχυμένες και αυτές με ράβδους GFRP αναλογίας οπλισμού  $\rho = 0,4\%$  και  $0,8\%$  αντίστοιχα. Οι δοκοί φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά εφαρμοσμένες ως προς το μέσο του ανοίγματος σε απόσταση 700 mm μεταξύ τους.

Οι πίνακες 3.12 και 3.13 παρουσιάζουν συνοπτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις βασικές ιδιότητες των υλικών αντίστοιχα.

**Πίνακας 3.12:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκών:

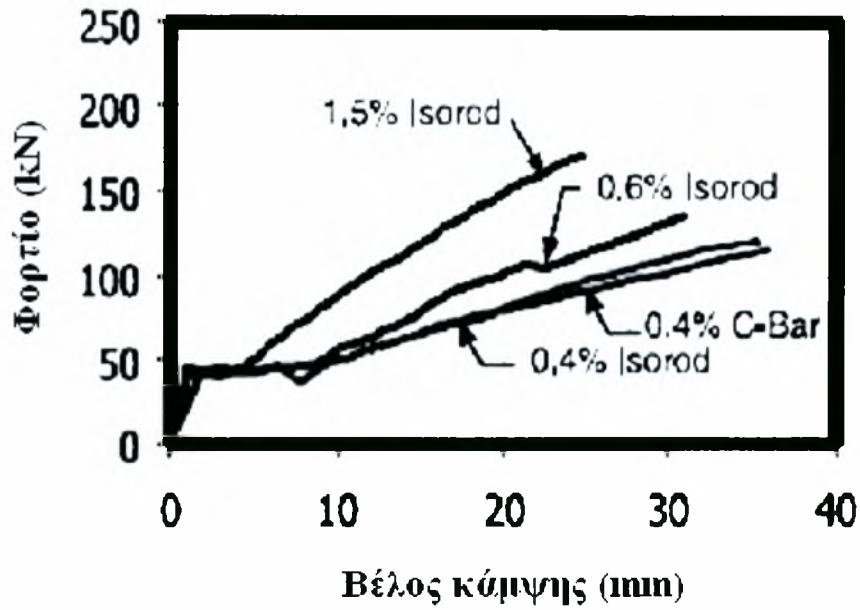
Δοκός	Τύπος Ενίσχυσης	Λεπτομέρειες Οπλισμών $\rho$ (%)	h (mm)	b (mm)
I.4	GFRP	0,4	250	500
I.6	GFRP	0,6	250	500
I.15	GFRP	1,5	250	500
C-4	GFRP	0,4	250	500
C-5	GFRP	0,8	250	500

**Πίνακας 3.13:** Μηχανικές ιδιότητες υλικών

Δοκός	$f_c$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	E (MPa)
I.4	32,5	692	42000
I.6	32,5	692	42000
I.15	32,5	692	42000
C-4	32,5	746	42000
C-5	32,5	746	42000

### 3.2.5.1. Αποτελέσματα Πειράματος

Στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος:



Πίνακας 3.14: Αποτελέσματα πειράματος

Ομάδα Δοκών	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Μέγιστο Βέλος Κάμψης (mm)
I.4	120.8	35.38
I.6	135	31.15
I.15	175	24.62
C-4	120.83	36.15

### 3.2.5.3 Συμπεράσματα :

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκών I.4, I.6 και II.5 συμπεραίνουμε ότι μετά την πρώτη ρηγμάτωση, αυξάνοντας το μηχανικό ποσοστό οπλισμού,  $\rho$ , ελαττώνεται το βέλος κάμψης . Το διάγραμμα δείχνει επίσης ότι μετά τη πρώτη ρηγμάτωση έχουμε μείωση της ακαμψίας το οποίο δικαιολογείται λόγω του μικρού μέτρου ελαστικότητας των GFRP.

Το μικρό μέτρο ελαστικότητας των GFRP επηρεάζει την ικανότητα των ράβδων να ελέγξουν την ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Αυτό μειώνει την εφελκυστική αντοχή και ακαμψία του σκυροδέματος στις ρωγμές με αποτέλεσμα τη μείωση της ροπής αδρανείας και κατ'επέκταση μεγάλα βέλη κάμψης.

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Αναλυτική περιγραφή πειραματικών προγραμμάτων

Οι μελέτες αυτές βασίζονται στη συμπεριφορά δοκών οπλισμένων είτε με ράβδους GFRP είτε με ράβδους χάλυβα, υπό στατική μονοτονική φόρτιση. Για το λόγο αυτό παρακάτω περιγράφονται δύο πειραματικές διαδικασίες καθώς και τα αποτελέσματά τους, που πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και στο Πανεπιστήμιο Αλαμπάμας των Ηνωμένων Πολιτειών αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στη προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων και θα συμβάλλουν στη επιβεβαίωση ενός μοντέλου πρόβλεψης “συμπεριφοράς” δοκών υπό καμπτικό φορτίο.

#### **4.1 Πείραμα 1<sup>ο</sup> :**

Δοκός ενισχυμένη με ράβδους GFRP

##### **4.1.1 Περιγραφή πειράματος**

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο κατασκευών του Πανεπιστημίου Αλαμπάμας στο Χάντσβιλ των Ηνωμένων Πολιτειών το έτος 2002 με υπεύθυνο τον Dr. Houssam Toutanji [38].

Κατά το πείραμα αυτό κατασκευάστηκαν τρεις σειρές ενισχυμένων δοκών σκυροδέματος από τσιμέντο Portland τύπου I.

Όλες οι δοκοί είχαν μήκος 3000mm και διαστάσεις διατομής 300mm ύψος (h) και 180mm πλάτος (b). Η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων ήταν 2800mm.

Κάθε σειρά δοκών περιελάμβανε δύο όμοια δοκάρια τα οποία ήταν ενισχυμένα με δύο, τρεις και τέσσερις ράβδους από GFRP και αναφέρονται ως σειρά GB1, GB2 και GB3, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1.1:



Πίνακας 4.1.1 : Λεπτομέρειες Δοκών

Αριθμός Σειράς	Αριθμός Δοκού	Αριθμός Ράβδων	$\rho$ (%)	$\rho_{bal}$ (%)	Σκυρόδεμα	
					$f_c$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
1	GB1-1	2	0,52	0,56	35	35
	GB1-2	2	0,52	0,56	35	35
2	GB2-1	3	0,79	0,56	35	35
	GB2-2	3	0,79	0,56	35	35
3	GB3-1	4	1,10	0,56	35	35
	GB3-2	4	1,10	0,56	35	35

Οι δοκοί σκυροδέματος κατασκευάστηκαν με την χρήση τσιμέντου τύπου I Portland και μεγαλύτερο μέγεθος χονδρόκοκκων αδρανών 12 mm . Η αναλογία τσιμέντου-νερού στη μάζα του σκυροδέματος ήταν 0.50. Όλες οι δοκοί καταβρέχονταν για 30 ημέρες σε θερμοκρασία 25°C και με σχετική υγρασία πάνω από 90%.

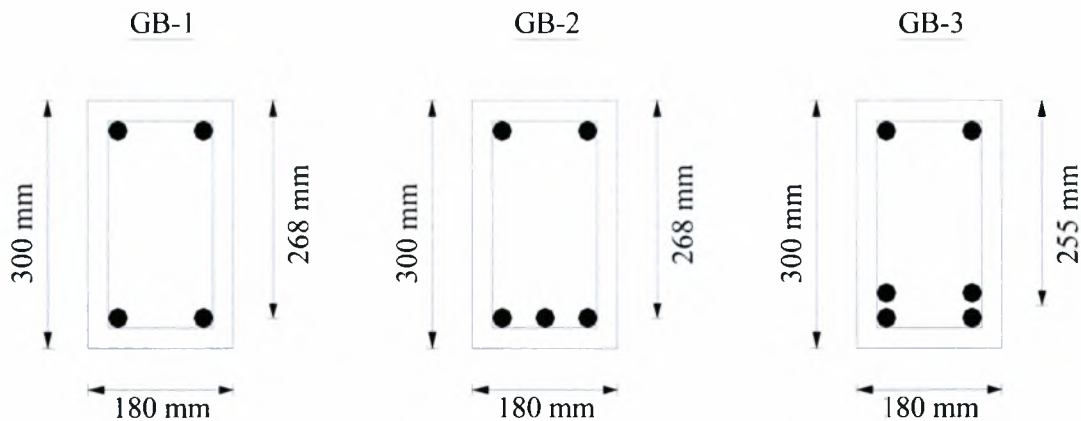
Δεκαοχτώ κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 160×320mm χύθηκαν και εξετάστηκαν για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Η μέση θλιπτική και καμπτική-εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μετά την 30<sup>η</sup> ημέρα ήταν περίπου 35 MPa και 3.1 MPa, αντίστοιχα. Το σκυρόδεμα είχε μέσο μέτρο ελαστικότητας 35 GPa.

Οι δοκοί σχεδιάστηκαν για να επιτύχουν δύο τρόπους αστοχίας:

- ταυτόχρονη διαρροή των ράβδων ενίσχυσης και σύνθλιψης του σκυροδέματος
- σύνθλιψη του σκυροδέματος ενώ οι ράβδοι ενίσχυσης παραμένουν στην ελαστική περιοχή.

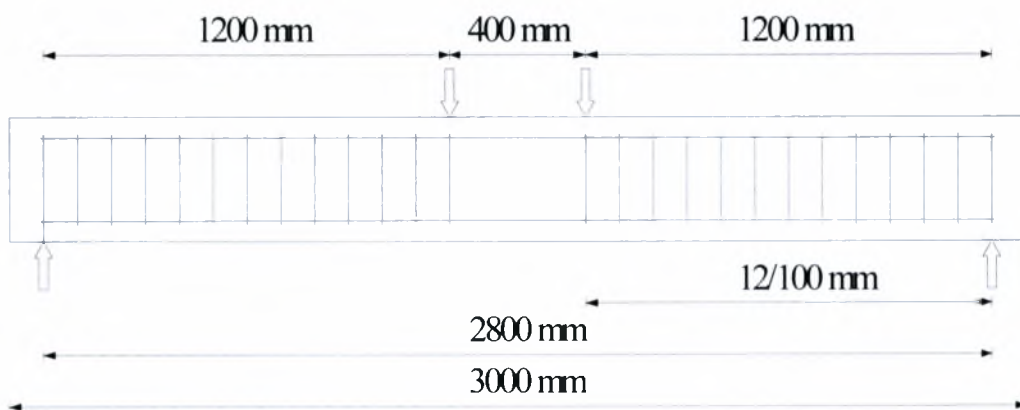
Το πρώτο επιτεύχθηκε με τη χρησιμοποίηση της αναλογίας ενίσχυσης ίσης με την ισορροπημένη αναλογία, και το δεύτερο αντί  $\rho_{bal}$  χρησιμοποιώντας την αναλογία ενίσχυσης μεγαλύτερη από  $\rho_{bal}$ .

Διατομές Δοκών



**Σχήμα 4.1.1 :** Τομή διατομών εξεταζόμενων δοκών

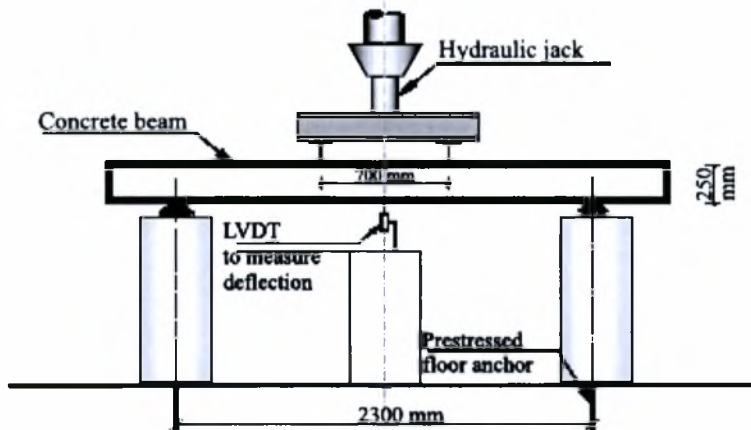
Οι ράβδοι περιέχουν περίπου 65% της συνολικής τους μάζας E-glass και 35% ρητίνη. Όλοι οι ράβδοι μετρήθηκαν 12.7 mm σε διάμετρο (ονομαστική αξία) και είχαν αντοχή σε εφελκυσμό και μέτρο ελαστικότητας 695 MPa και 40 GPa, αντίστοιχα. Οι δοκοί υποβλήθηκαν σε καμπτικό φορτίο τεσσάρων σημείων όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



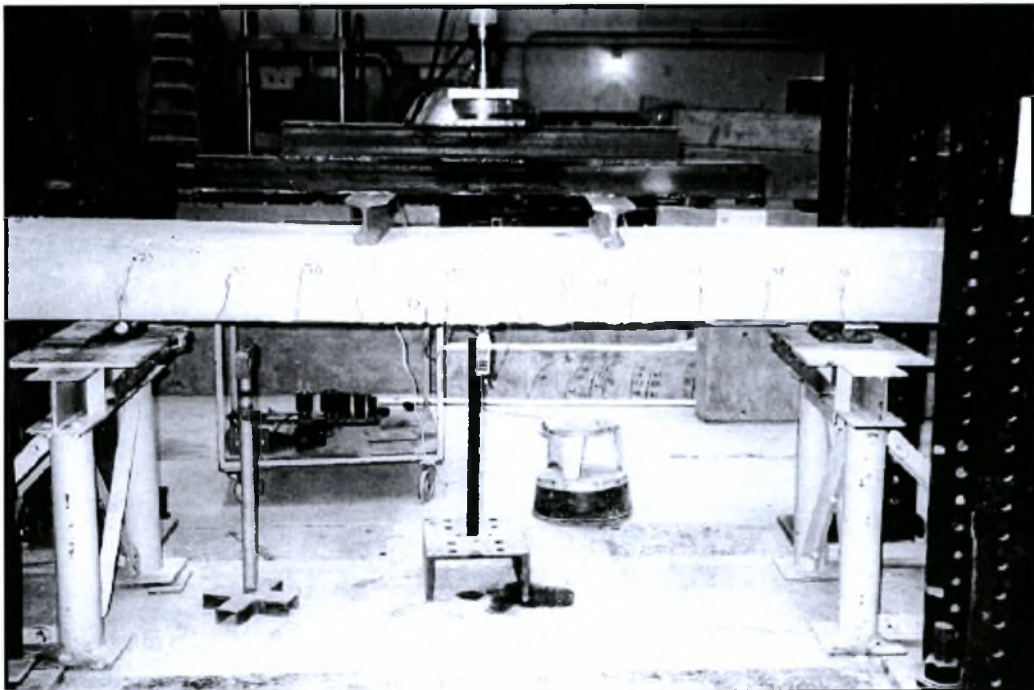
**Σχήμα 4.1.2 :** Τομή κατά μήκος της εξεταζόμενης δοκού

Οι δοκοί ευθυγραμμίστηκαν με τους γραμμικά μεταβλητούς διαφορικούς μετασχηματιστές (LVDT) που τοποθετούνται στο μέσο του ανοίγματος της δοκού και στα δύο σημεία φόρτισης για τον έλεγχο του βέλους κάμψης. Οι μετρητές πίεσης

εγκαταστάθηκαν στο σκυρόδεμα και στις επιφάνειες ενίσχυσης για να μετρήσουν την παραμόρφωση και την μετατόπιση. Τα δύο φορτία εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα με την χρήση υδραυλικών γρύλων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, οι ρωγμές και το πλάτος τους μαρκάρονται, καθώς και το διάστημα μεταξύ τους μετρούνται μέσα σε σταθερό χρόνο.



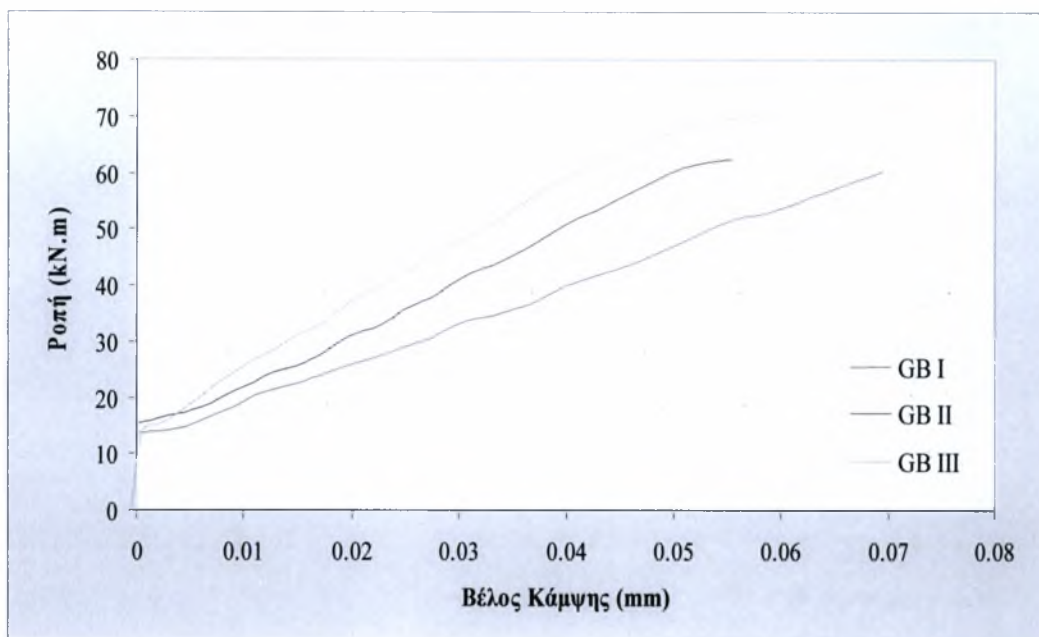
Σχήμα 4.1.3 : Ποιοτικό διάγραμμα πειραματικού εξοπλισμού



Σχήμα 4.1.4 : Μαρκάρισμα ρωγμών κατά τη διάρκεια του πειράματος

#### 4.1.2 Αποτελέσματα Πειράματος

Τα πειραματικά διαγράμματα ροπής-βέλους κάμψης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα για τη σειρά 1, 2 και 3:



Σχήμα 4.1.5 : Διάγραμμα φορτίου βέλους κάμψης για τις δοκούς GB1, GB2, GB3

Κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει το μέσο όρο των δύο δοκιμασμένων δοκών. Ο πίνακας 4.1.2 παρουσιάζει τις τιμές του  $\rho_{bal}$ , τις μέγιστες ροπές αντοχής και τις ροπές αστοχίας των δοκών που προέκυψαν από το πείραμα.

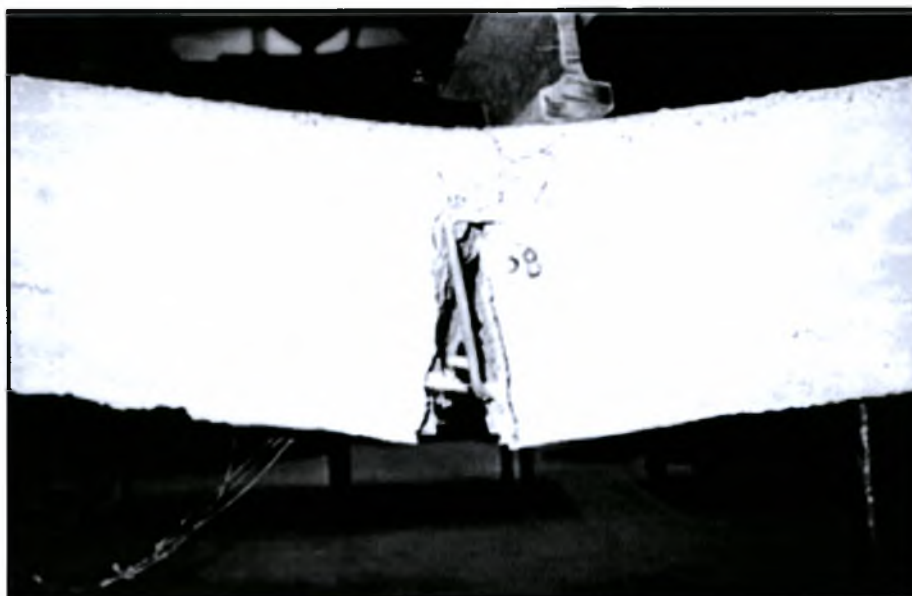
Πίνακας 4.1.2 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τιμών του πειράματος.

Αριθμός Δοκών	$\rho$ (%)	$\rho_{bal}$ (%)	$M_{cr}$ (kNm)	$M_{exp}$ (kNm)	$\Delta$ (mm)	Τρόπος Αστοχίας
GB1-1	0,52	0,56	11,7	60	70	Σύνθλιψη Σκυροδέματος
GB1-2	0,52	0,56	12,3	59	73	Σύνθλιψη Σκυροδέματος

<b>GB2-1</b>	0,79	0,56	13,4	65	60	Σύνθλιψη Σκυροδέματος
<b>GB2-2</b>	0,79	0,56	12,8	64,3	59	Σύνθλιψη Σκυροδέματος
<b>GB3-1</b>	1,10	0,56	11,8	71	61	Σύνθλιψη Σκυροδέματος
<b>GB3-2</b>	1,10	0,56	11,6	70,5	62	Σύνθλιψη Σκυροδέματος

Αρχικά, οι δοκοί είναι αρηγμάτωτες όταν βρίσκονται στο γραμμικό τμήμα του διαγράμματος ροπής-βέλους κάμψης. Αυτό αποδίδεται στα γραμμικά ελαστικά χαρακτηριστικά των ράβδων GFRP και του σκυροδέματος.

Με πρόσθετη φόρτιση και όταν η εφαρμοσμένη ροπή είναι μεγαλύτερη της ροπής ρηγμάτωσης εμφανίζονται ρωγμές στην κρίσιμη διατομή προκαλώντας μείωση της ακαμψίας. Αυτό οφείλεται στο ευρύτερο άνοιγμα των ρωγμών στις δοκούς από σκυρόδεμα ενισχυμένες με FRP, το οποίο αποδίδεται στο χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των GFRP.



Σχήμα 4.1.6 : Τελική μορφή δοκού μετά την αστοχία

## 4.2 Πείραμα 2<sup>ο</sup> :

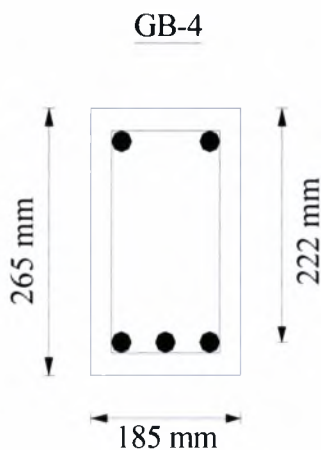
Δοκός ενισχυμένη με ράβδους χάλυβα.

### 4.2.1 Περιγραφή πειράματος

Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο κατασκευών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στις 20 Μαΐου 2005 με υπεύθυνο τον Δρ. Περδικάρη Φίλιππο στο πλαίσιο του μαθήματος Οπλισμένου Σκυροδέματος Ι.

Κατά το πείραμα αυτό κατασκευάστηκε μία οπλισμένη δοκός σκυροδέματος ονομαστικής αντοχής C20/25. Για λόγους ευκολίας ονομάζουμε τη δοκό αυτή GB4. Η δοκός είχε μήκος 1940 mm και διαστάσεις διατομής 265mm ύψος (h) και 185mm πλάτος (b). Ως εφελκόμενος διαμήκης οπλισμός τοποθετήθηκαν 3 ράβδοι χάλυβα S500 διαμέτρου 12 mm, ενώ τοποθετήθηκε και θλιβόμενος οπλισμός με δύο ράβδους διαμέτρου 10 mm για να συγκρατούνται και οι συνδετήρες.

Η δοκός σκυροδετήθηκε στις 28 Απριλίου 2005 και παρέμεινε κάτω από λινάτσες για να διατηρηθεί η δοκός κάτω από περιβάλλον υγρασίας για 23 ημέρες.

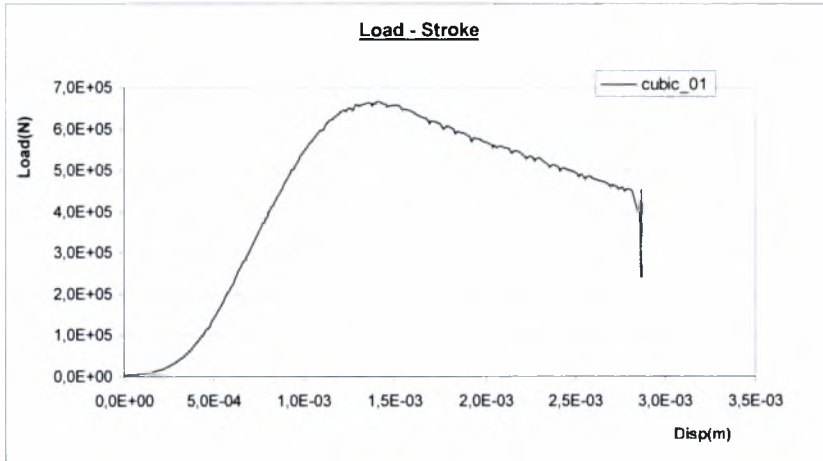


**Σχήμα 4.2.1 :** Τυπική διατομή δοκού

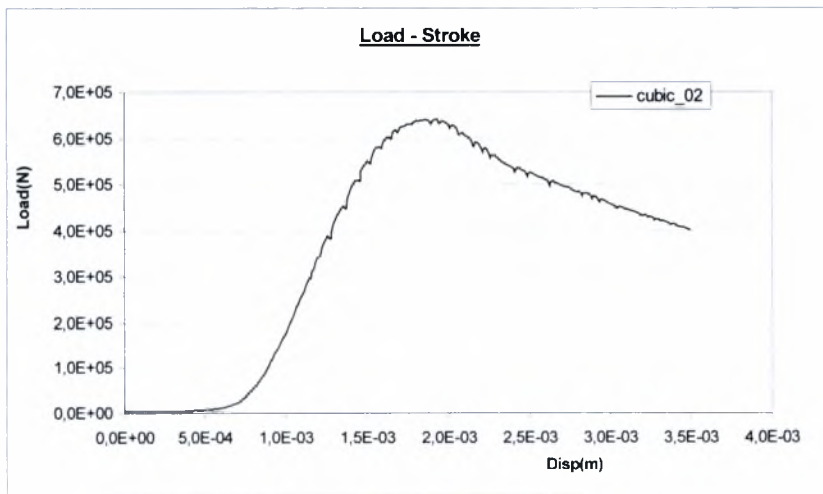
Πρόσθετα με τη δοκό κατασκευάστηκαν έξι κυλινδρικά και έξι κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150 mm διαμέτρου και ύψους 300 mm, και 150 mm × 150 mm αντίστοιχα από την ίδια παρτίδα σκυροδέματος. Τα δοκίμια παρέμειναν κάτω από βρεγμένες λινάτσες και πλαστικά για 28 ημέρες και εξετάστηκαν σε πρέσα τύπου DMG. Η θλιπτική αντοχή ( $f_c$ )



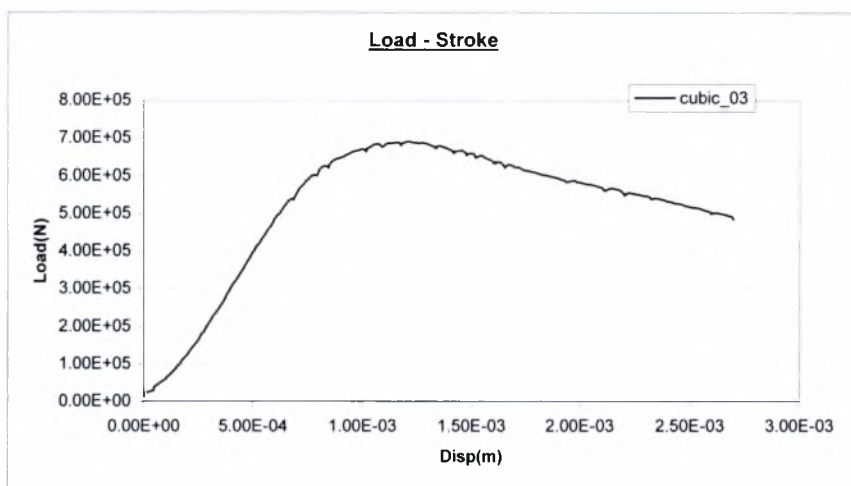
σκυροδέματος 28 ημερών για τα κυβικά δοκίμια παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.



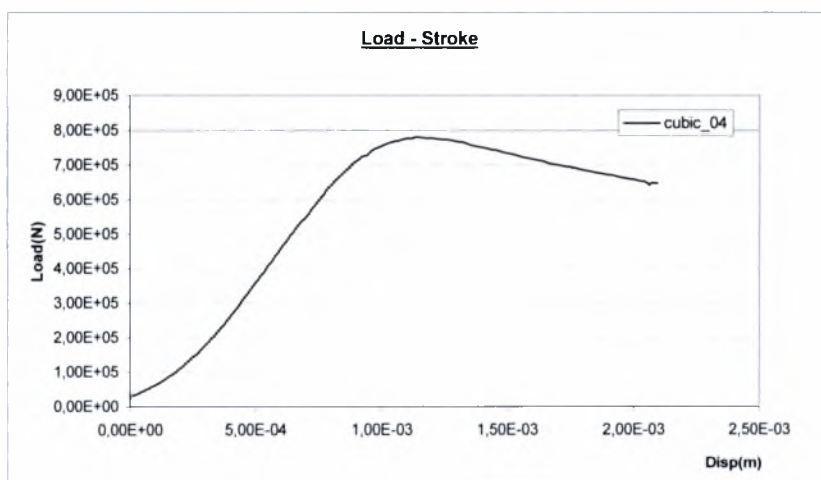
Σχήμα 4.2.2 : Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και θλιπτική αντοχή για το δοκίμιο 1



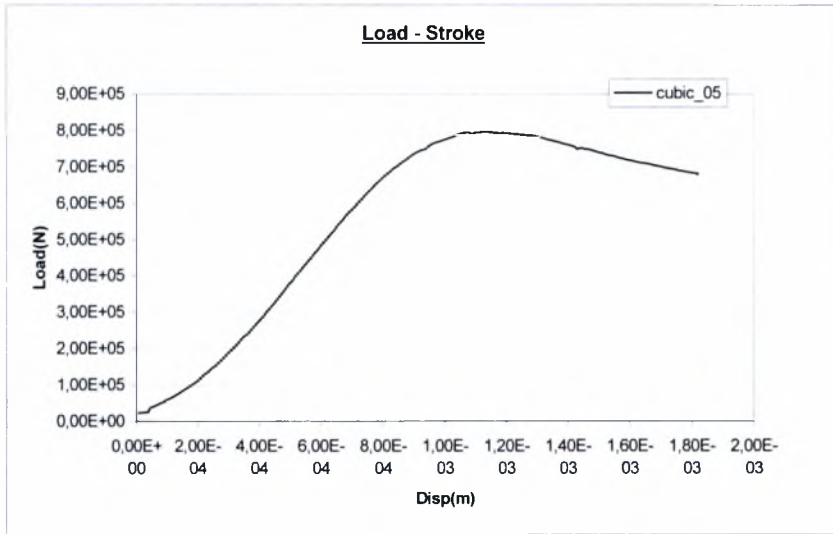
Σχήμα 4.2.3 : Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και θλιπτική αντοχή για το δοκίμιο 2



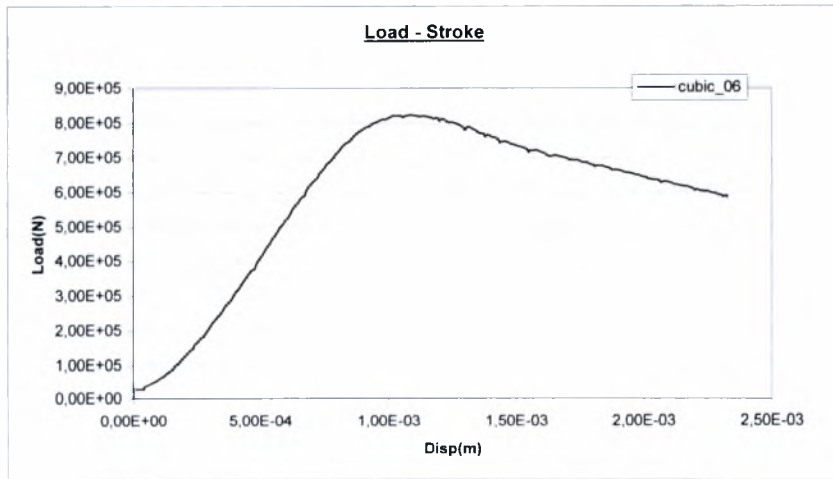
Σχήμα 4.2.4 : Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και θλιπτική αντοχή για το δοκίμιο 3



Σχήμα 4.2.5 : Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και θλιπτική αντοχή για το δοκίμιο 4



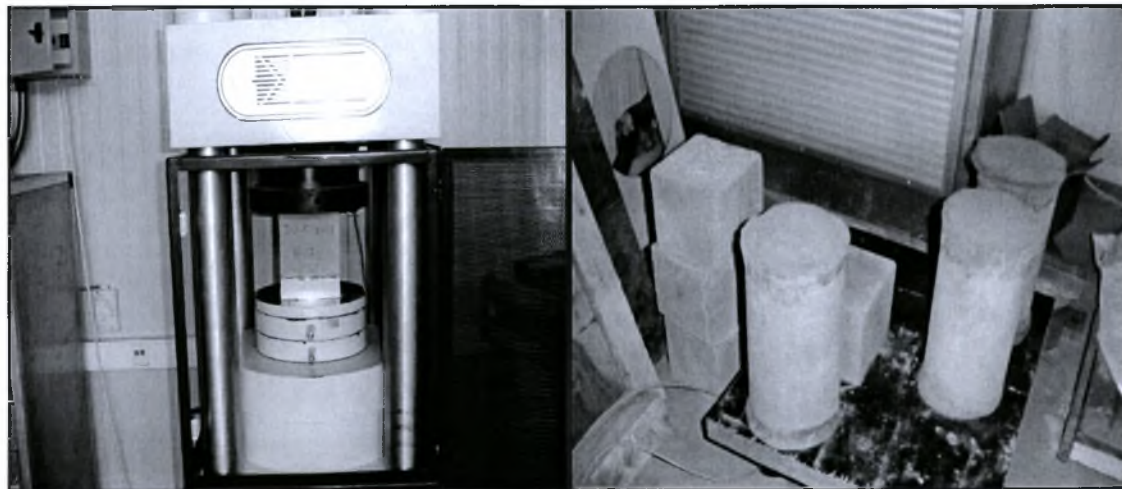
Σχήμα 4.2.6 : Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και θλιπτική αντοχή για το δοκίμιο 5



Σχήμα 4.2.7 : Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και θλιπτική αντοχή για το δοκίμιο 6

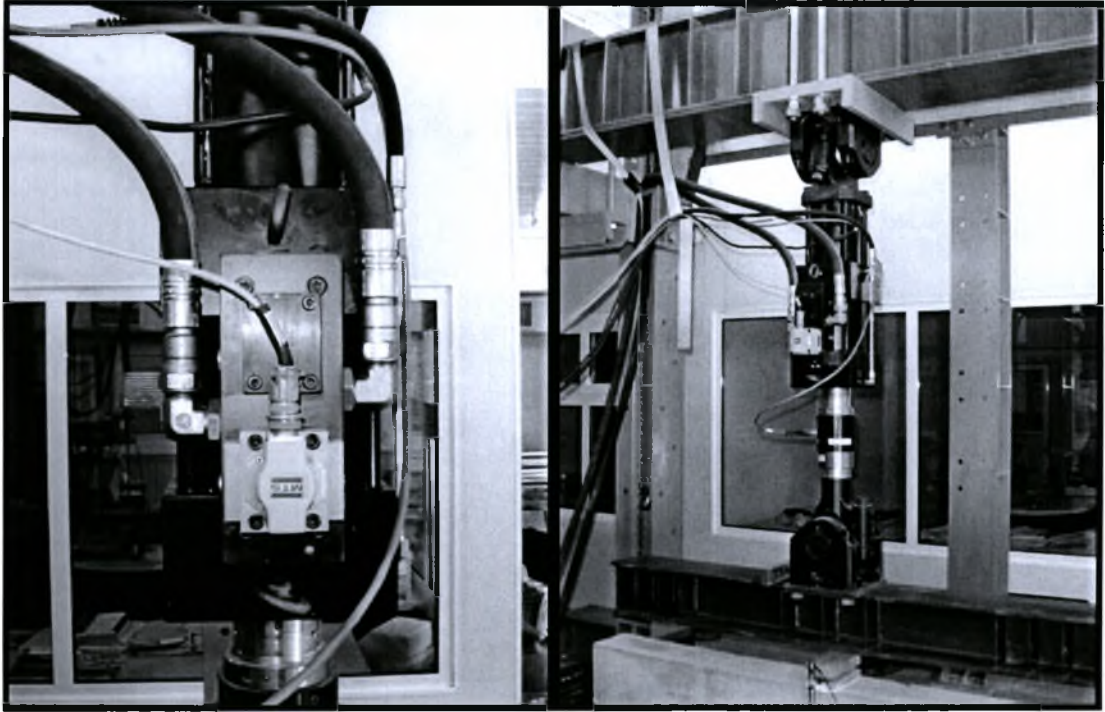
**Πίνακας 4.2.1 :** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των ποιοτικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος

Δοκίμιο	Εμβαδόν $A$ ( $m^2$ )	Φορτίο (N)	Θλιπτική Αντοχή $f_c$ (MPa)	Μέσος Όρος Θλιπτικής Αντοχής $f_c$ (MPa)
1	0,0225	666000	29,61	32,587  $E_c = 32750$ (από Ε.Κ.Ο.Σ)
2	0,0225	642000	28,53	
3	0,0225	690000	30,68	
4	0,0225	780000	34,67	
5	0,0225	797000	35,42	
6	0,0225	824000	36,60	



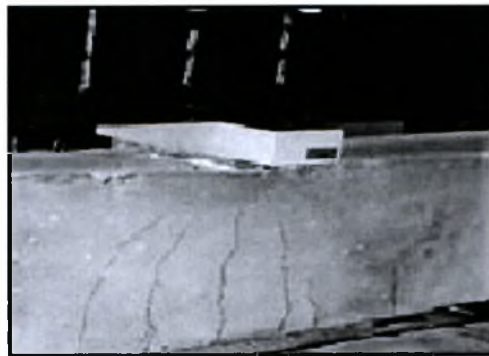
**Σχήμα 4.2.8 :** Κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια, πρέσα DMG

Η δοκός φορτίστηκε με μια δύναμη εφαρμοσμένη στο μέσω του ανοίγματος. Για την φόρτιση χρησιμοποιήθηκε πρέσα θραύσεως μονοαξονικής θλίψης μέγιστου φορτίου 3000 kN με ενεργοποιητή φορτίου MTS +250 kN ελεγχόμενο από ψηφιακό σερβουδραυλικό σύστημα λειτουργίας MTS 407.



**Σχήμα 4.2.9 :** Πρέσα θραύσεως μονοαξονικής θλίψης

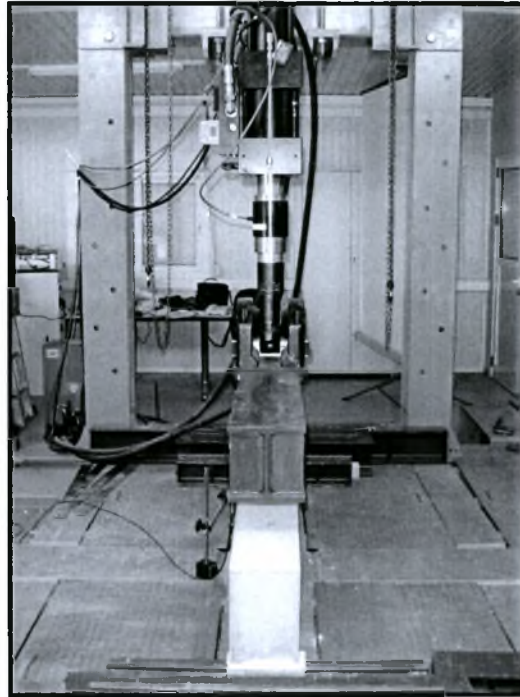
Για να αποφευχθεί η θραύση του σκυροδέματος λόγω συγκέντρωσης τάσεων χρησιμοποιήθηκαν μαρμάρινες πλάκες στο σημείο εφαρμογής της δύναμης και στις στηρίξεις. Επιπλέον στις στηρίξεις διασφαλίστηκαν συνθήκες αμφιέριστης δοκού με την χρήση πάλι μαρμάρινων πλακών οι οποίες συγκολλήθηκαν με τη δοκό με γύψο.



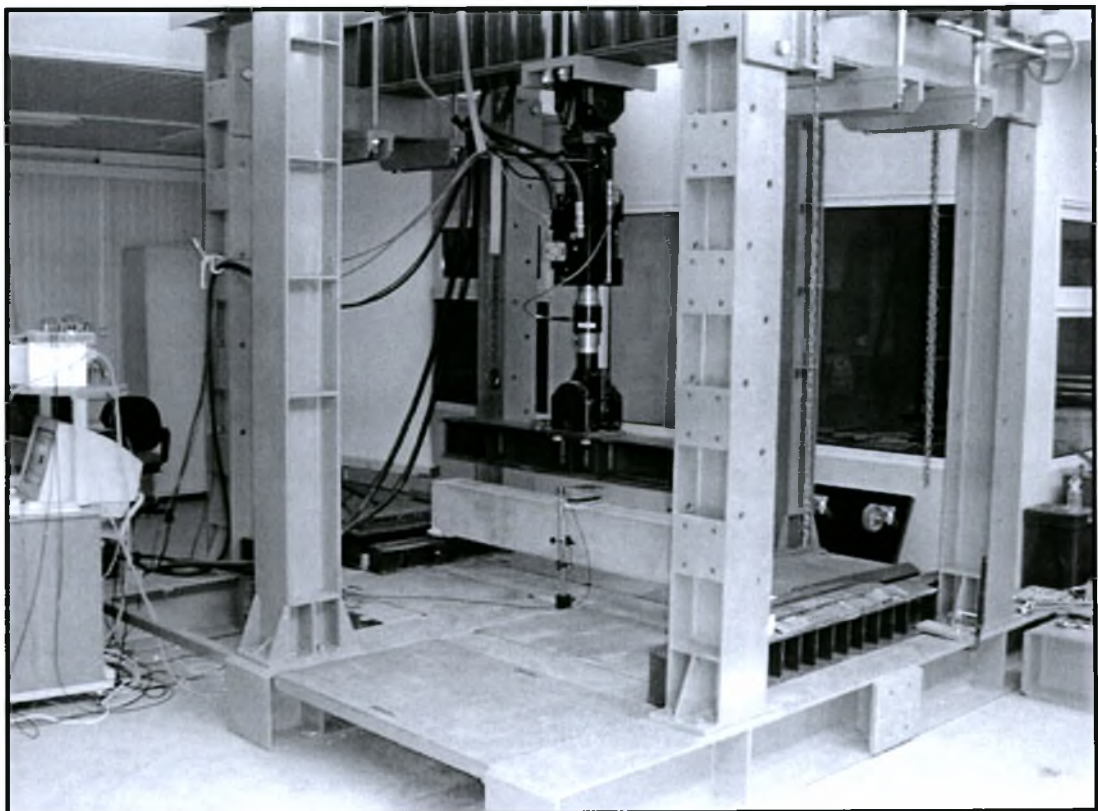
**Σχήμα 4.2.10 :** Μαρμάρινες πλάκες στο σημείο εφαρμογής της δύναμης

Όλος ο παραπάνω εξοπλισμός ήταν εφαρμοσμένος σε μεταλλικό πλαίσιο διαστάσεων: πλάτους 3000 mm , μήκους 3000 mm και ύψους 4000 mm.





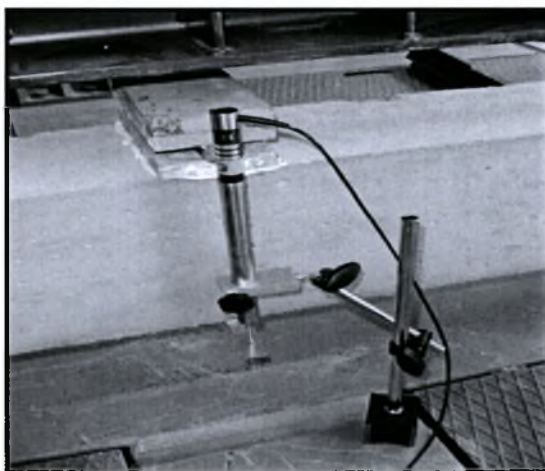
Σχήμα 4.2.11α : Μεταλλικό πλαίσιο



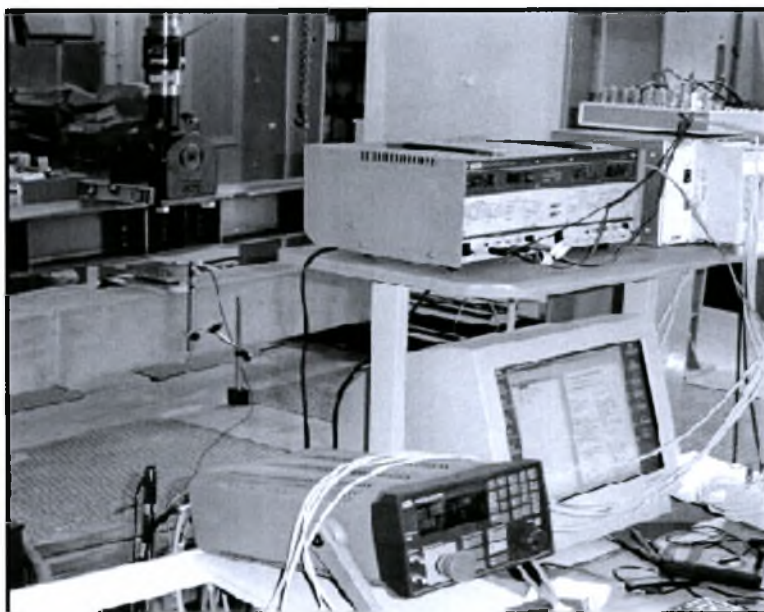
Σχήμα 4.2.11β : Μεταλλικό πλαίσιο



Για την μέτρηση της παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες LVDT σταθερού ρεύματος τάσεως 25 Volt με εύρος 10 cm όπου όλες οι μετρήσεις τους αποθηκεύονταν αυτόματα σε Η/Υ μέσω ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων.



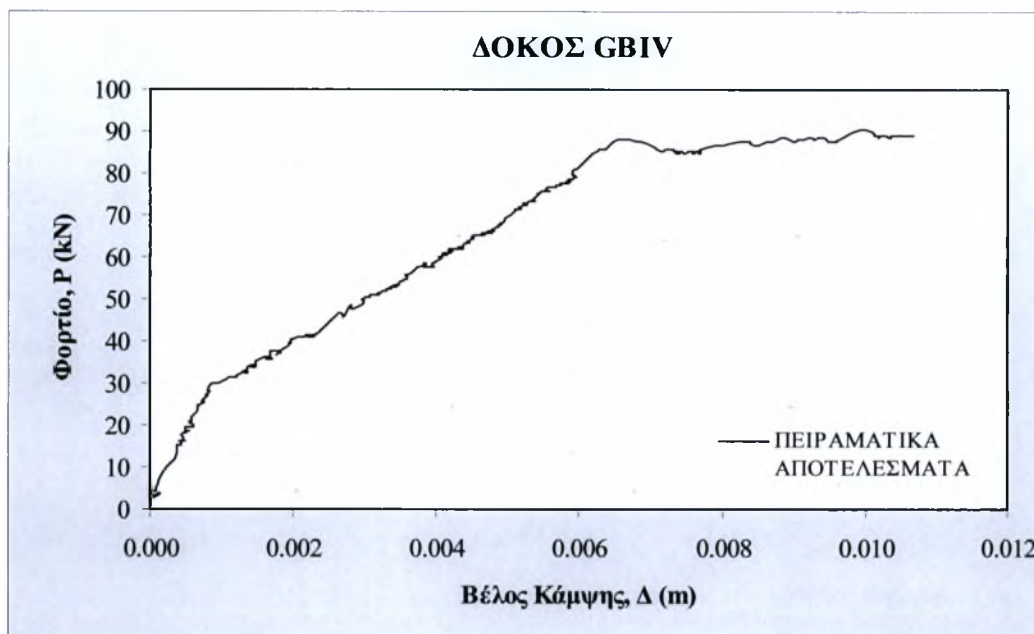
Σχήμα 4.2.12 : Αισθητήρας LVDT



Σχήμα 4.2.13 : Καταγραφή δεδομένων σε Η/Υ

### 4.2.2 Αποτελέσματα Πειράματος

Τα πειραματικό διάγραμμα ροπής-βέλους κάμψης παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.2.14:



Σχήμα 4.2.14 : Διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης

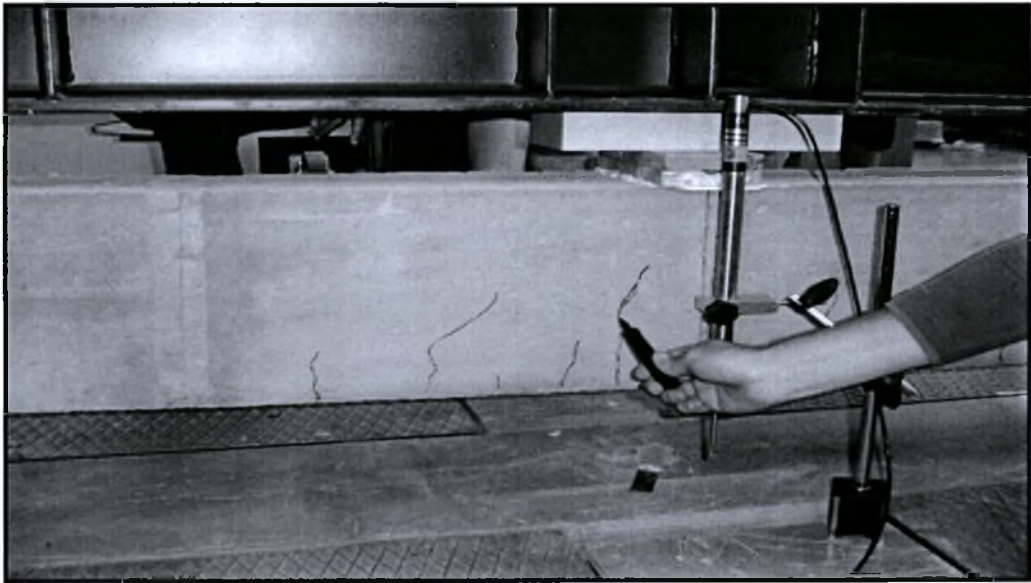
Πίνακας 4.2.2. : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τιμών του πειράματος.

Δοκός	Φορτίο Ρηγμάτωσης (kN)	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Φορτίο Διαρροής (kN)	Ροπή Διαρροής (kNm)	Φορτίο Αστοχίας (kN)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Διαρροής (mm)
GB4	15.45	7,49	88.1	42.7	88.9	43,12	0,45	6.53

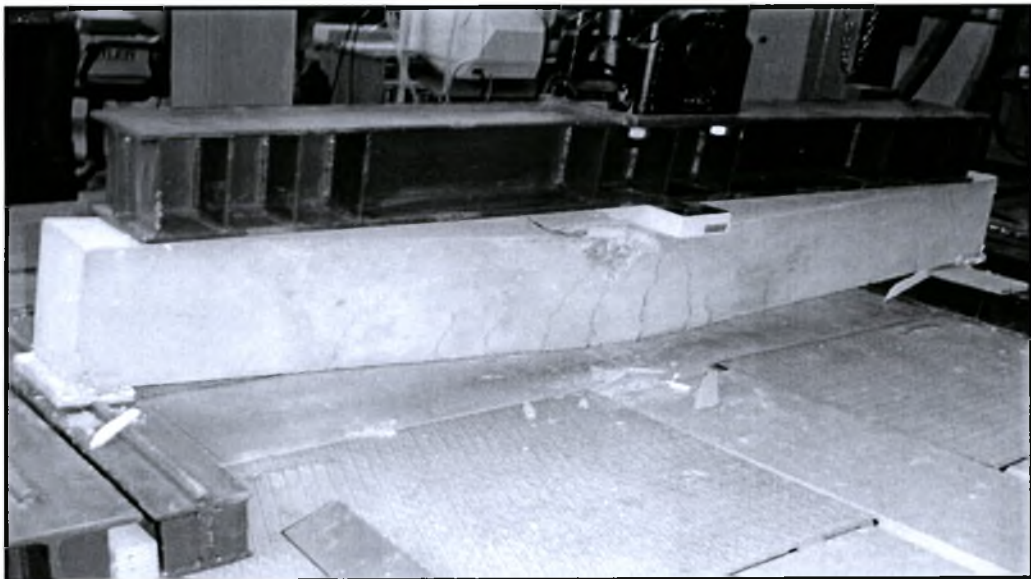
Στο σχήμα 4.2.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα. Για τη ρηγμάτωση προκύπτει ροπή 7,49 kNm. Επειδή δεν χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα στις ράβδους χάλυβα, εμπειρικά η

διαρροή τους παρατηρείται για τιμή ροπής σε kNm και βέλος κάμψης σε mm. Τέλος, λόγω κάποιων τεχνικών προβλημάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν μπόρεσε να καταγραφεί η βύθιση στην αστοχία, η οποία συμβαίνει για ροπή 43,12 kNm.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η εικόνα της δοκού κατά την διάρκεια της ρηγμάτωσης και μετά το τέλος του πειράματος.



**Σχήμα 4.2.15 :** Οι ρωγμές και το πλάτος τους μαρκάρονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής



**Σχήμα 4.2.16 :** Τελική μορφή δοκού μετά την αστοχία

## 5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Μοντέλα πρόβλεψης συμπεριφοράς δοκών υπό στατική μονοτονική φόρτιση

Για την ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου αναπτύσσεται ένα πρόγραμμα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δοκών οπλισμένων είτε με ράβδους χάλυβα, είτε με ράβδους GFRP.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος γίνεται και με τα μοντέλα που αναφέρει ο καναδέζικος κανονισμός “ISIS” [3] τα οποία και αυτά αναλύονται.

#### **5.1 Μοντέλο πρόβλεψης συμπεριφοράς δοκών**

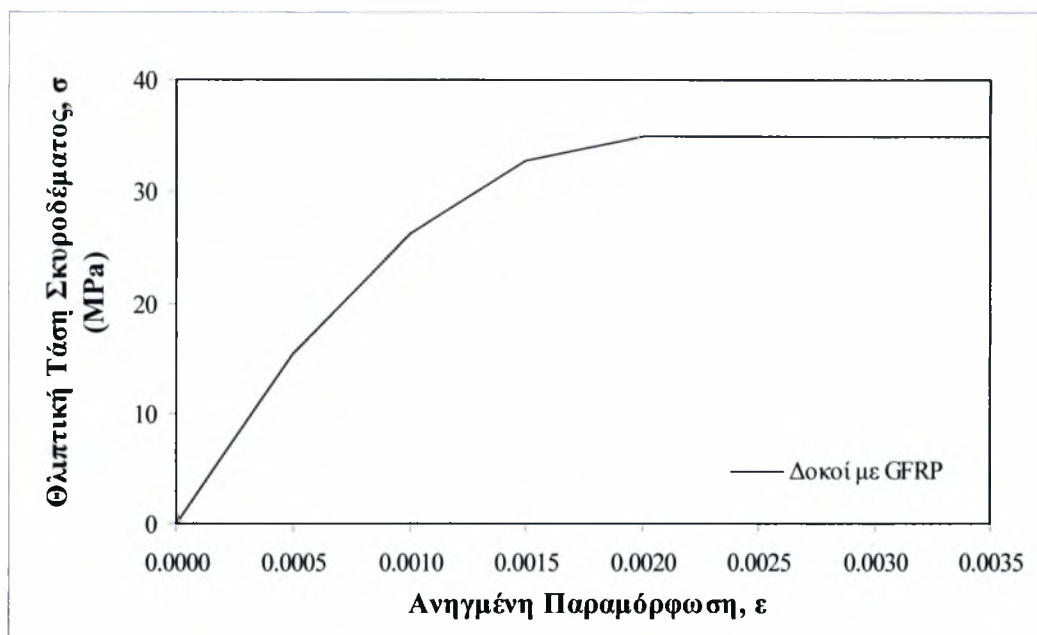
##### 5.1.1 Διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για το πρόγραμμα για κάθε υλικό ξεχωριστά για τον υπολογισμό των δυνάμεων που μπορούν να παραλάβουν τα υλικά.

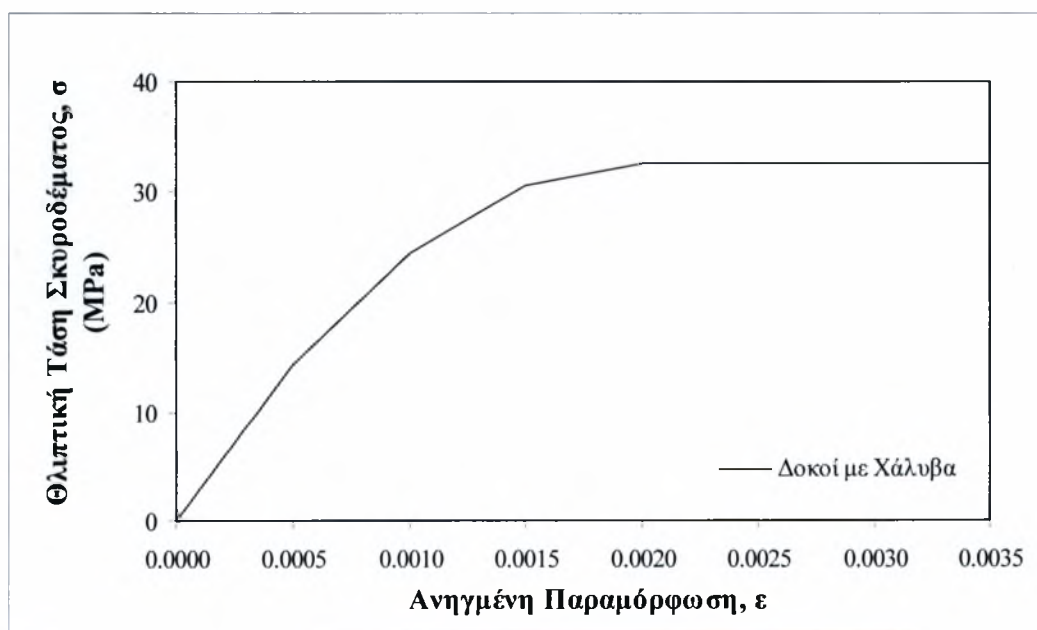
##### 5.1.1.1 Σκυρόδεμα

##### 5.1.1.1.1 Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Για τον υπολογισμό της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω συμβατικά διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων, για σκυρόδεμα αντοχής  $f_c = 35$  MPa και μέτρου ελαστικότητας  $E_c = 35$  GPa για την περίπτωση των δοκών που είναι οπλισμένες με GFRP και για σκυρόδεμα αντοχής  $f_c = 32,587$  MPa και μέτρου ελαστικότητας  $E_c = 32,57$  GPa για την περίπτωση των δοκών που είναι οπλισμένες με χάλυβα



Σχήμα 5.1.1 : Διάγραμμα θλιπτικών τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος για δοκούς με GFRP



Σχήμα 5.1.2 : Διάγραμμα θλιπτικών τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος για δοκούς με χάλυβα



Η εξίσωση που περιγράφει τις θλιπτικές τάσεις του σκυροδέματος σύμφωνα με τα διαγράμματα των σχημάτων 5.1.1 και 5.1.2 είναι :

$$\sigma_c = f_{ck} \times 1000 \times \varepsilon_c \times ((-250 \times \varepsilon_c) + 1) \quad \text{για } \varepsilon_c \leq 2 \text{ ‰}$$

και

$$\sigma_c = f_{ck} \quad \text{για } \varepsilon_c > 2 \text{ ‰}$$

Η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος  $F_c$  υπολογίζεται θεωρώντας κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής με βάση την εξίσωση:

$$\sigma_c (y) = f_{ck} \times 1000 \times \varepsilon_c (y) \times ((-250 \times \varepsilon_c (y)) + 1) \quad \text{για } \varepsilon_c \leq 2 \text{ ‰} \quad (1)$$

και

$$\sigma_c (y) = f_{ck} \quad \text{για } \varepsilon_c > 2 \text{ ‰} \quad (2)$$

και με βάση τη παραδοχή επιπεδότητας των διατομών (Bernoulli) η παραμόρφωση  $\varepsilon_c (y)$  ισούται:

$$\varepsilon_c (y) = (\varepsilon_c \times y) / x_u$$

Γνωρίζουμε ότι :

$$F_c = \int_0^{y=x} \sigma_c (y) \times b \, dy \quad \Rightarrow$$

$$F_c = b \times f_{ck} \times 1000 \times \varepsilon_c \times ((-250/3) \times \varepsilon_c + 0,5) \times x_u \quad \text{για } \varepsilon_c \leq 2 \text{ ‰} \quad (3)$$

και

$$F_c = x_1 \times f_{ck} \times b + \int_0^{y=x_2} \sigma_c (y) \times b \, dy \quad \Rightarrow$$



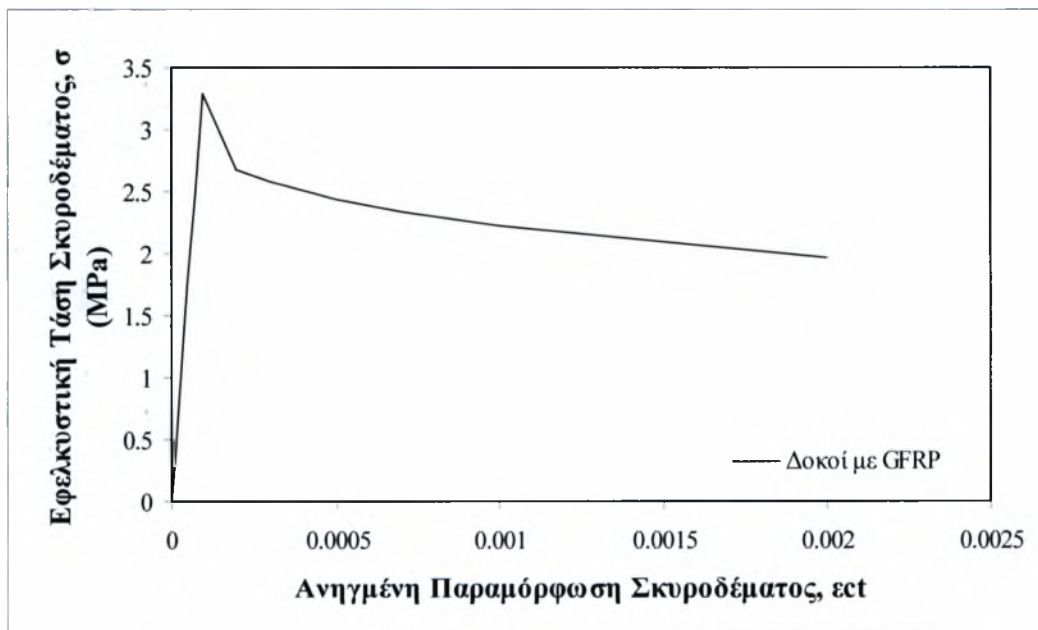
$$F_c = b \times f_{ck} \times ((3 \times \varepsilon_c - 0,002) / (3 \times \varepsilon_c)) \times x_u \quad \text{για } \varepsilon_c > 2 \text{ ‰} \quad (4)$$

όπου  $x_1, x_2$  όπως ορίζονται από το σχήμα 5.1.8, και 5.1.9

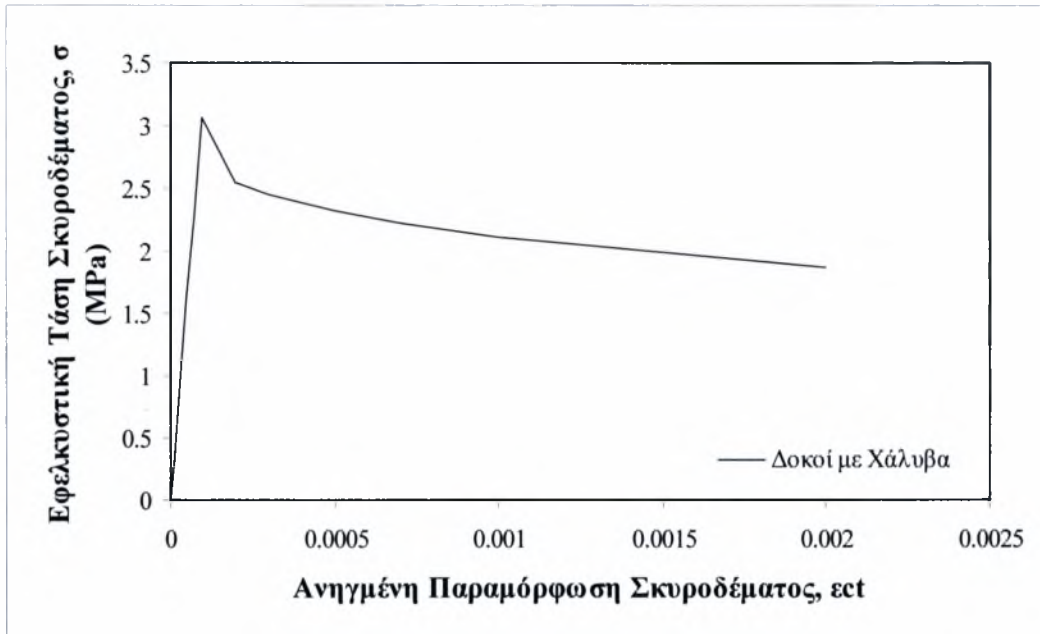
#### 5.1.1.1.2 Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Στο πρόγραμμα αυτό εκτός από την θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος, υπολογίζεται και η εφελκυστική δύναμη την οποία μπορεί να παραλάβει. Σημειώνεται ότι η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη θλιπτική.

Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω πειραματικά διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων ομοίως και για τις δύο περιπτώσεις:



**Σχήμα 5.1.3 :** Διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος για δοκούς με GFRP



**Σχήμα 5.1.4 :** Διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος για δοκούς με χάλυβα

Η εξίσωση που περιγράφει τις εφελκυστικές τάσεις του σκυροδέματος σύμφωνα με τα διαγράμματα των σχημάτων 5.1.3 και 5.1.4 είναι : (Veccio F. and Collins M. 1986 ) [40]

$$\sigma_{ct} = E_c \times \epsilon_{ct} \quad \text{για } \epsilon_{ct} \leq \epsilon_{crack}$$

και

$$\sigma_{ct} = f_{crack} / [1 + \sqrt{(200 \times \epsilon_{ct})}] \quad \text{για } \epsilon_{ct} > \epsilon_{crack}$$

Η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος προκύπτει:

$$F_{ct} = 0,5 \times b \times (h - x_u) \times E_c \times \epsilon_{ct} \quad \text{για } \epsilon_{ct} \leq \epsilon_{crack} \quad (5)$$

και

$$F_{ct} = 0,5 \times b \times (h - x_u) \times f_{crack} / [1 + \sqrt{(200 \times \epsilon_{ct})}] \quad \text{για } \epsilon_{ct} > \epsilon_{crack} \quad (6)$$

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος γίνεται με βάση τον τύπο του Ε.Κ.Ο.Σ [39] για τις δοκούς με χάλυβα και ισούται με:

$$f_{\text{crack}} = f_{\text{ctm}} = 0,30 \times f_{\text{ck}}^{2/3}$$

και  $\varepsilon_{\text{crack}} = f_{\text{crack}} / E_c$

και για τις δοκούς με GFRP από τον καναδέζικο κανονισμό [3] και ισούται με:

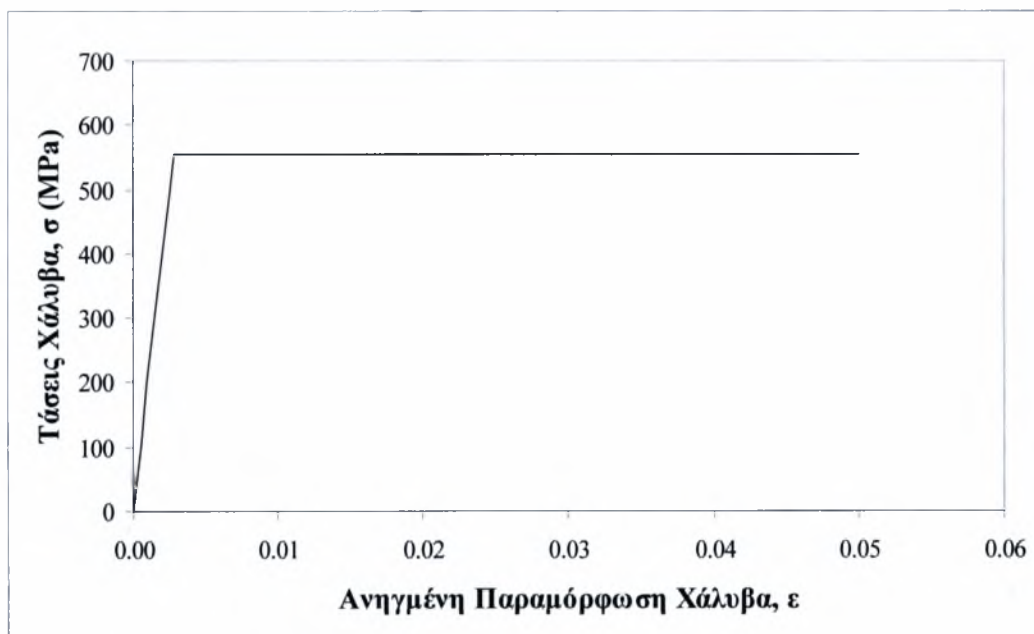
$$f_{\text{crack}} = f_{\text{ctm}} = 0,60 \times \sqrt{f_{\text{ck}}}$$

και

$$\varepsilon_{\text{crack}} = f_{\text{crack}} / E_c$$

## 5.1.1.2 Χάλυβας

Για τον υπολογισμό της δύναμης που παραλαμβάνει ο σπλισμός στην περίπτωση που αυτός είναι από χάλυβα χρησιμοποιήθηκε το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του Ελληνικού Κανονισμού:



**Σχήμα 5.1.5 :** Συμβατικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα

Η εξίσωση που περιγράφει τις τάσεις του χάλυβα σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 5.1.5 είναι:

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s \quad \text{για } \varepsilon_s < \varepsilon_y$$

και

$$\sigma_s = f_{yd} \quad \text{για } \varepsilon_s > \varepsilon_y$$

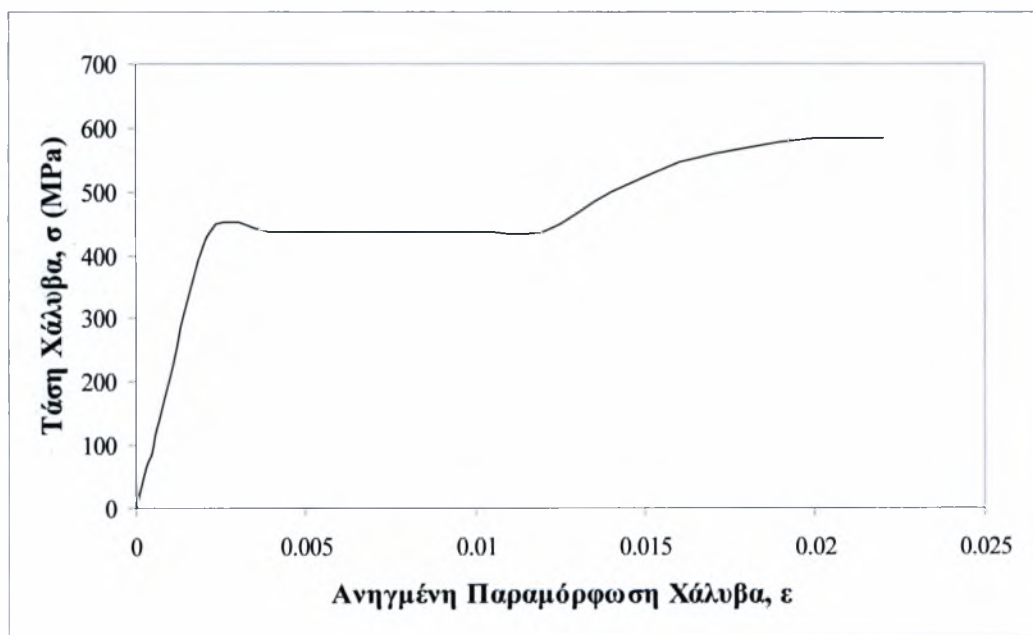
Η δύναμη του χάλυβα αυξάνεται ελαστικά μέχρι την διαρροή του οπλισμού και μετά παραμένει σταθερή. Ισούται:

$$F_s = A_s \times E_s \times \varepsilon_s \quad \text{για } \varepsilon_s < \varepsilon_y \quad (7)$$

και

$$F_s = A_s \times f_y \quad \text{για } \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (8)$$

Τα αποτελέσματα όμως που πήραμε χρησιμοποιώντας το διγραμμικό διάγραμμα του Ε.Κ.Ο.Σ. δεν ήταν ικανοποιητικά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω πειραματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για χάλυβα με  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$  [41]:



Σχήμα 5.1.6 : Πειραματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα

Σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 5.1.6 οι τάσεις δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s \quad \text{για } \varepsilon_s < \varepsilon_y$$

$$\sigma_s = f_{yd} \quad \text{για } \varepsilon_y < \varepsilon_s < 0,012$$

$$\sigma_s = -1961924458 \varepsilon_s^2 + 81364644 \varepsilon_s - 257120 \quad \text{για } \varepsilon_s > 0,012$$

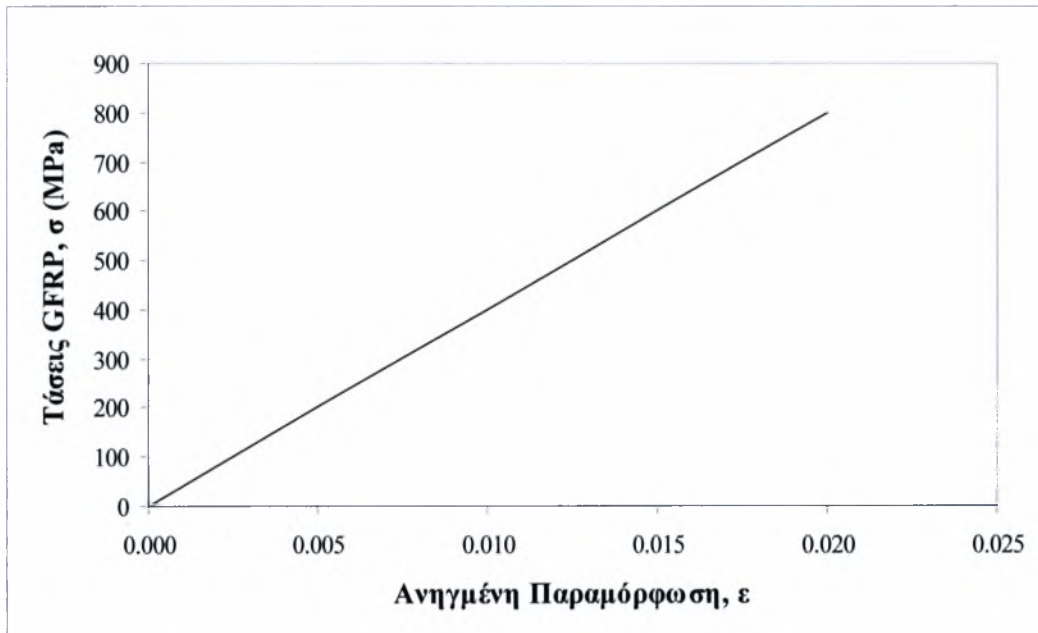
και η δύναμη του χάλυβα ισούται:

$$F_s = A_s \times \sigma_s$$



## 5.1.1.3 GFRP

Για τον υπολογισμό της δύναμης που παραλαμβάνει ο οπλισμός στην περίπτωση που αυτός είναι από GFRP χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων:



**Σχήμα 5.1.7 :** Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων GFRP

Οι τάσεις προκύπτουν από την εξίσωση:

$$\sigma_{\text{gfrp}} = E_{\text{gfrp}} \times \varepsilon_{\text{gfrp}}$$

Και η δύναμη που παραλαμβάνει ο οπλισμός από GFRP ισούται:

$$F_{\text{gfrp}} = A_{\text{gfrp}} \times \sigma_{\text{gfrp}} \quad (9)$$

## 5.1.2 Υπολογισμός θλιβόμενης ζώνης

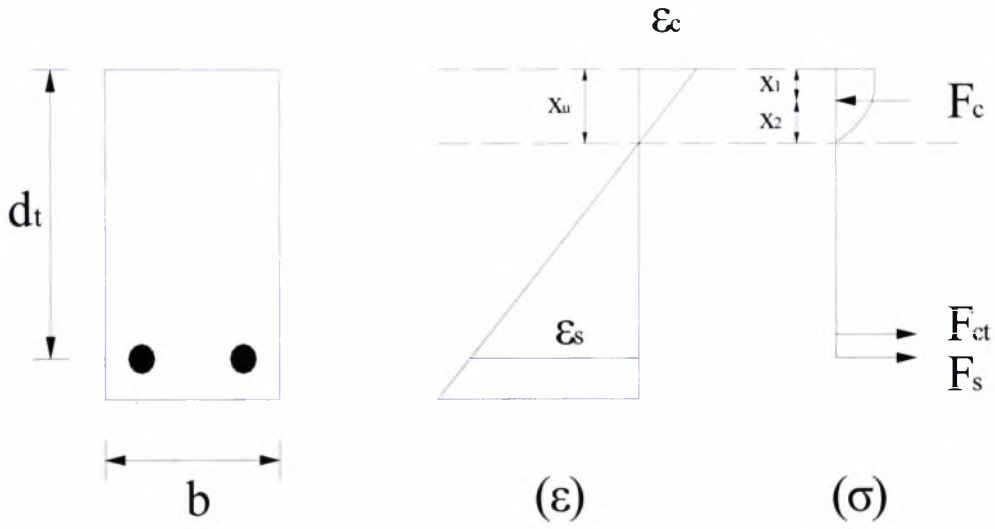
Για τον υπολογισμό της θλιβόμενης ζώνης επιλέγεται ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος από 0 έως 3,5 ‰ με βήμα 0,000035.

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x_u$  υπολογίζεται από την εξίσωση ισορροπίας των δυνάμεων  $\Sigma F_x = 0$

<u>Οπλισμός από χάλυβα</u>	<u>Οπλισμός από GFRP</u>
Πριν την ρηγμάτωση:	
$F_c = F_{ct} + F_s$	$F_c = F_{ct} + F_{gfrp}$
Μετά την ρηγμάτωση:	
$F_c = F_s$ αφού $F_{ct} \ll F_c, F_s$	$F_c = F_{gfrp}$ αφού $F_{ct} \ll F_c, F_{gfrp}$

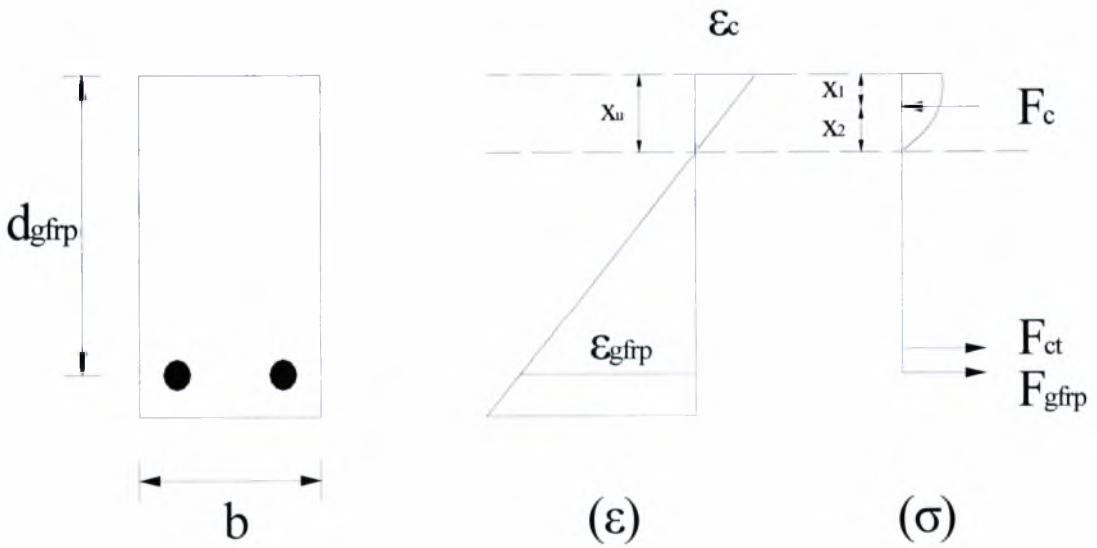
Από την παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας υπολογίζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις της ακραίας εφελκυόμενης ίνας του χάλυβα και του GFRP με βάση την παραδοχή επιπεδότητας των διατομών όπως παρακάτω:

Οπλισμός από γάλυβα:



**Σχήμα 5.1.8 :** Τυπικές διατομές με ράβδους γάλυβα

Οπλισμός από GFRP:



**Σχήμα 5.1.9 :** Τυπικές διατομές με ράβδους GFRP

Από τα παραπάνω προκύπτει:

$$\bullet \quad \varepsilon_s = \varepsilon_c \times (d_s - x_u) / x_u \quad (10)$$

$$\bullet \quad \varepsilon_{gfrp} = \varepsilon_c \times (d_{gfrp} - x_u) / x_u \quad (11)$$

$$\bullet \quad \varepsilon_{ct} = \varepsilon_c \times (h - x_u) / x_u \quad (12)$$

### 5.1.3 Υπολογισμός ροπής κάμψεως

Η ροπή κάμψεως της διατομής υπολογίζεται ως προς τον ουδέτερο άξονα και για κάθε δεδομένη παραμόρφωση σκυροδέματος  $\varepsilon_c$ .

Έτσι για  $\varepsilon_c < 2 ‰$

για οπλισμό με χάλυβα:

$$M = |F_c| \times y_{Fc} + F_{ct} \times y_{Fct} + F_s \times y_{Fs} \quad (13)$$

για οπλισμό με GFRP:

$$M = |F_c| \times y_{Fc} + F_{ct} \times y_{Fct} + F_{gfrp} \times y_{Fgfrp} \quad (14)$$

για  $\varepsilon_c > 2 ‰$

για οπλισμό με χάλυβα:

$$M = F_{c1} \times y_{Fc1} + F_{c2} \times y_{Fc2} + F_{ct} \times y_{Fct} + F_s \times y_{Fs} \quad (15)$$

για οπλισμό με GFRP:

$$M = F_{c1} \times y_{Fc1} + F_{c2} \times y_{Fc2} + F_{ct} \times y_{Fct} + F_{gfrp} \times y_{Fgfrp} \quad (16)$$

όπου  $y_{Fc}$ ,  $y_{Fc1}$ ,  $y_{Fc2}$ ,  $y_{Fct}$ ,  $y_{Fs}$ ,  $y_{Fgfrp}$  τα σημεία εφαρμογής της θλιπτικής και εφελκυστικής, δύναμης του σκυροδέματος, της δύναμης του χάλυβα και της δύναμης του GFRP τα οποία υπολογίζονται παρακάτω.

#### 5.1.4 Υπολογισμός ροπής ρηγμάτωσης

Η ροπή ρηγμάτωσης υπολογίζεται εξισώνοντας την εφελκυστική παραμόρφωση του σκυροδέματος,  $\epsilon_{ct}$ , με τη παραμόρφωση ρηγμάτωσης που είναι ίση με  $\epsilon_{crack} = f_{crack} / E_c$  όπου :

$$f_{crack} = f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} \quad \text{για τις δοκούς με χάλυβα}$$

και

$$f_{crack} = f_{ctm} = 0,60 \times \sqrt{f_{ck}} \quad \text{για τις δοκούς με GFRP από τον καναδέζικο κανονισμό [3]}$$

#### 5.1.5 Σημεία εφαρμογής δυνάμεων

##### 5.1.5.1 Θλιπτική δύναμη σκυροδέματος

Η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος όπως είναι γνωστό εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους της θλιβόμενης ζώνης. Η συντεταγμένη  $y$  του κέντρου βάρους δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$y = M_y / A \quad (17)$$

όπου  $M_y$  η πρώτη ροπή αδρανείας της επιφάνειας ως προς τον άξονα  $y$  και ισούται με:

$$M_y = \int_y y \, dA \quad (18)$$

και  $A$  η επιφάνεια:

$$A = \int_y dA \quad (19)$$

Η εξίσωση που περιγράφει τη θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος στη περίπτωση που η παραμόρφωση του είναι  $\varepsilon_c < 0,002$  είναι:

$$\sigma_c (y) = f_{ck} \times \varepsilon_c (y) \times ((-250 \times \varepsilon_c (y)) + 1) \quad \Rightarrow$$

$$\sigma_c (y) = f_{ck} \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} \times (y / x) \times [ (-250 \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} \times (y / x)) + 1 ] \quad (20)$$

Επίσης:

$$dA = \sigma_c (y) \times dy \quad (21)$$

Από τις εξισώσεις (17), (18), (19), (20) και (21) προκύπτει:

$$y_{F_c} = \left[ \int_Y y * \sigma_c (y) dY \right] / \left[ \int_Y \sigma_c (y) dY \right] \quad \Rightarrow$$

$$y_{F_c} = \left[ (1 / 3 - 250 \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} / 4) \times x_u \right] / \left[ 1 / 2 - 250 \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} / 3 \right] \quad (22)$$

Στη περίπτωση που η παραμόρφωση του σκυροδέματος είναι  $\varepsilon_c > 0,002$  η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος ορίζεται ως η συνισταμένη δύο επιμέρους δυνάμεων, των  $F_{c1}$  και  $F_{c2}$  οι οποίες εφαρμόζονται η μεν  $F_{c1}$  στο τμήμα  $x_1$  και η δε  $F_{c2}$  στο παραβολικό τμήμα  $x_2$ .

Τα τμήματα  $x_1$  και  $x_2$  για κάθε  $\varepsilon_c$  ορίζονται ως εξής:

$$x_1 = \left[ (\varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} - 0,002) / \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} \right] \times x_u \quad (23)$$

$$x_2 = (0,002 / \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}}) \times x_u \quad (24)$$

Επομένως το σημείο εφαρμογής της  $F_{c1}$  ισούται:

$$y_{F_{c1}} = (x_1 / 2) + x_2 \quad (25)$$

Και από τις εξισώσεις (17), (18), (19), (21), (23) και (24) το σημείο εφαρμογής της δύναμης  $F_{c2}$  ισούται με:

$$y_{F_{c2}} = 0,00125 \times (x_u / \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}}) \quad (26)$$

#### 5.1.5.2 Εφελκυστική δύναμη σκυροδέματος

Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της εφελκυστικής δύναμης που μπορεί να παραλάβει το σκυρόδεμα το σημείο εφαρμογής της δύναμης ισούται:

$$y_{F_{ct}} = (2 / 3) \times (h - x_u) \quad (27)$$

#### 5.1.5.3 Εφελκυστική δύναμη χάλυβα

Το σημείο εφαρμογής της δύναμης του χάλυβα ισούται:

$$y_{F_s} = (d_s - x_u) \quad (28)$$

#### 5.1.5.4 Εφελκυστική δύναμη GFRP

Το σημείο εφαρμογής της δύναμης του GFRP ισούται:

$$y_{F_{gfrp}} = (d_{gfrp} - x_u) \quad (29)$$

#### 5.1.6 Υπολογισμός βέλους κάμψεως

Θα μελετήσουμε δύο περιπτώσεις τρόπων υπολογισμού του βέλους κάμψης μιας δοκού. Στις δοκούς με GFRP που θέλουμε μεγαλύτερη ακρίβεια για την εξαγωγή συμπερασμάτων, θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο υπολογισμού του βέλους κάμψης το οποίο βασίζεται στο θεώρημα ροπής – επιφάνειας και για τις δοκούς με χάλυβα θα χρησιμοποιήσουμε τον απλοποιητικό τύπο βάση των καμπυλοτήτων.



Οπλισμός με GFRP:

Το βέλος κάμψεως στο μέσο της δοκού στη περίπτωση της όπλισης της με ράβδους από GFRP υπολογίζεται με βάση το ολοκλήρωμα της καμπυλότητας της διατομής σε κάθε μήκος  $x$ , κατά μήκος της δοκού [42]. Έχουμε:

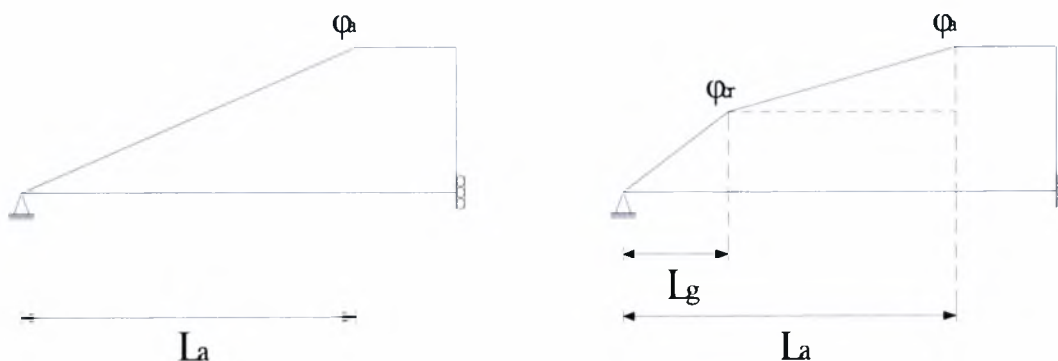
$$\Delta_{mid-span} = \int_0^{L/2} x \varphi(x) dx = \int_0^{L_g} x \varphi_{un}(x) dx + \int_{L_g}^{L/2} x \varphi_{pc}(x) dx = \delta_1 + \delta_2 \quad (30)$$

όπου

$\varphi_{un}(x) = M(x) / EI_g =$  η καμπυλότητα της διατομής της μη ρηγματωμένης περιοχής

και

$\varphi_{pc}(x) = \varphi_{cr} + [ (\varphi_n - \varphi_{cr}) / (M_n - M_{cr}) ] \times (M(x) - M_{cr}) =$  η καμπυλότητα της διατομής της ρηγματωμένης περιοχής, (σχήμα 5.1.10)



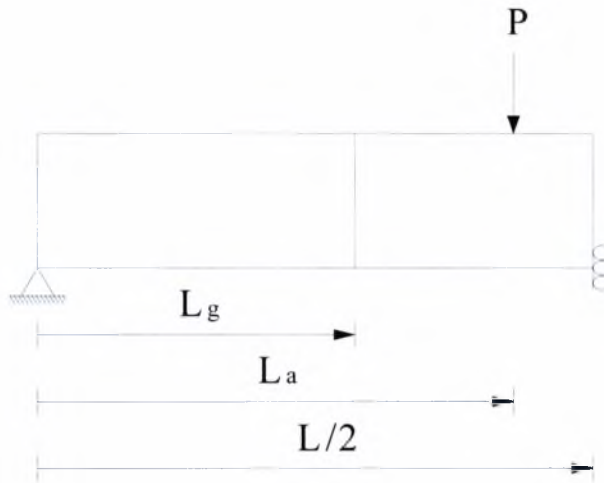
(α) Αρηγμάτωτη περιοχή

(β) Ρηγματωμένη περιοχή

**Σχήμα 5.1.10 :** Αρηγμάτωτη – ρηγματωμένη περιοχή

και

$L_g =$  το μήκος της μη ρηγματωμένης περιοχής, (σχήμα 5.1.11)



**Σχήμα 5.1.11 :** Μήκη διαφόρων περιοχών

Η συνεισφορά της αρηγμάτωτης περιοχής στο βέλος κάμψης στο μέσο της δοκού είναι:

$$\delta_1 = (1/3) \times \varphi_{cr} \times L_g^2 \quad (31)$$

όπου  $L_g = M_{cr}/P$ ,  $\varphi_{cr} = M_{cr}/E_c I_{cr}$ , (σχήμα 5.1.11)

Ολοκληρώνοντας την καμπυλότητα της διατομής στη ρηγματωμένη πλέον περιοχή έχουμε:

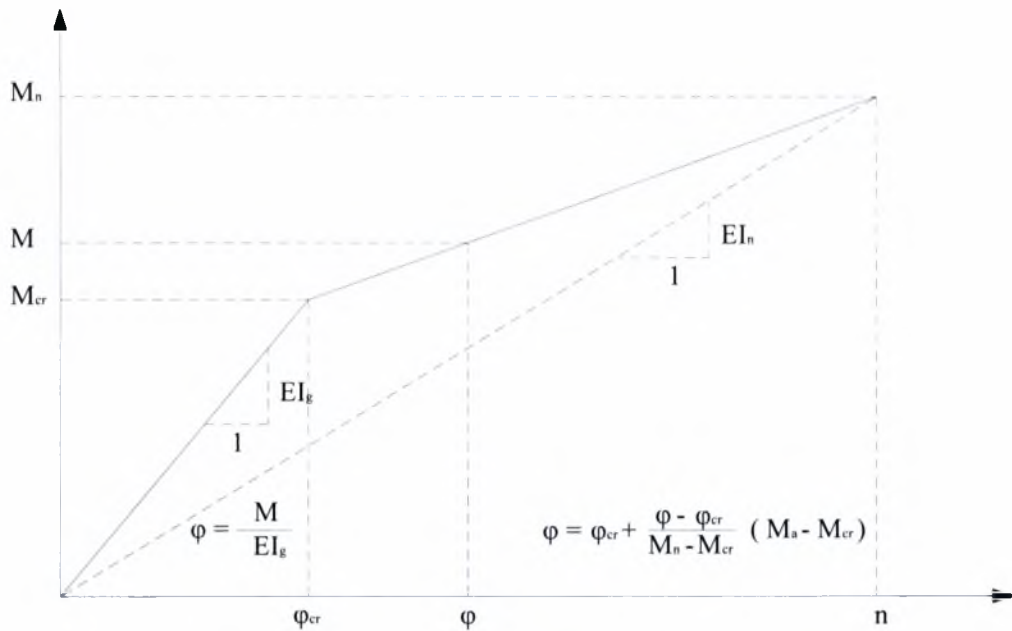
$$\delta_2 = (\varphi_a / 6) \times ( 3L^2/4 - L_a^2 - L_g L_a - L_g^2 ) + (\varphi_{cr} / 6) \times ( L_a^2 + L_g L_a - 2L_g^2 ) \quad (32)$$

Προσθέτοντας τους δύο όρους των εξισώσεων (31) και (32) έχουμε:

$$\Delta_{mid-span} = (\varphi_a / 24) \times ( 3L^2 - 4L_a^2 ) + [(L_a + L_g)/6] \times (\varphi_{cr} L_a - \varphi_a L_g) \quad (33)$$

όπου  $\varphi_a$  προκύπτει από τη γραμμική παρεμβολή μεταξύ της καμπυλότητας της ρηγματωμένης περιοχής ( $\varphi_{cr}$ ) και της καμπυλότητας τη στιγμή της αστοχίας,  $\varphi_n = M_n / E I_e$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.12:

$$\varphi_a = \varphi_{cr} + [ (\varphi_n - \varphi_{cr}) / ( M_n - M_{cr} ) ] \times ( M_a - M_{cr} ) \quad (34)$$



**Σχήμα 5.1.12 :** Διάγραμμα ροπών - καμπυλοτήτων

Στη περίπτωση που  $M_a < M_{cr}$  η εξίσωση (33) γίνεται:

$$\Delta_{mid-span} = (\varphi_a / 24) \times (3L^2 - 4L_a^2), \quad \varphi_a = PL_a / E_c I_g \quad (35)$$

Οπλισμός με γάλυβα:

Το βέλος κάμψεως δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta = (M \times L^2) / (12 \times E_c \times I) \quad (36)$$

όπου M η καμπτική ροπή αντοχής της δοκού και I η ροπή αδραειάς της

Επίσης για την ακραία θλιβόμενη ίνα ισχύει:

$$\sigma_c = M \times x_u / I \quad (37)$$

$$\sigma_c = E_c \times \varepsilon_c \quad (38)$$

Από (37), (38) :

$$E_c \times \varepsilon_c = M \times x_u / I \Rightarrow \varepsilon_c / x_u = M / (E_c \times I) \quad (39)$$

Για κάθε δεδομένη ανηγμένη παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος  $\varepsilon_c$  έχει υπολογιστεί το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, και άρα η καμπυλότητα της διατομής υπολογίζεται ως εξής:

$$\kappa = \varepsilon_c / x_u \quad (40)$$

Από (39), (40) :

$$\kappa = M / (E_c \times I) \quad (41)$$

και από (41), (36)

$$\Delta = \kappa \times L^2 / 12 \quad (42)$$

#### 5.1.7 Υπολογισμός ροπής αδράνειας $I_e$

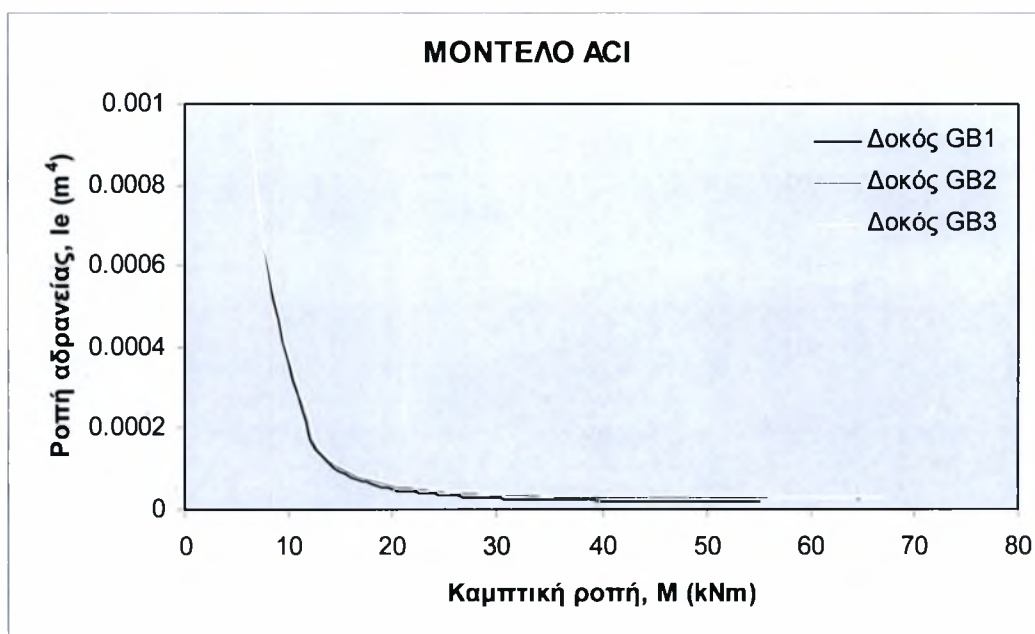
Για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας  $I_e$  μετά τη ρηγμάτωση χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά μοντέλα. Το μοντέλο του Branson [44], το μοντέλο του Gao [45], το μοντέλο του Benmokrane [46], αυτό που προτείνει ο αμερικάνικος κανονισμός ACI [43] και τέλος αυτό μέσω της ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος.

Σημειώνεται ότι στο πρόγραμμα πρόβλεψης για τις δοκούς με GFRP τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα τα έδωσε το μοντέλο του αμερικάνικου κανονισμού ACI.

## 5.1.7.1 Μοντέλο ACI

Σύμφωνα με το μοντέλο του αμερικάνικου κανονισμού ACI για οπλισμένες με χάλυβα δοκούς η ροπή αδρανειας  $I_e$  δίνεται από τον τύπο:

$$I_e = I_g \times (M_{cr} / M_a)^3 + I_{cr} \times (1 - (M_{cr} / M_a)^3) \quad (43)$$



Σχήμα 5.1.13 : Διάγραμμα ροπών – ροπών αδρανειας

## 5.1.7.2 Μοντέλο Branson

Σύμφωνα με το μοντέλο του Branson η ροπή αδρανείας  $I_e$  δίνεται από τον τύπο:

$$I_e = I_g \times (M_{cr} / M_a)^{5,5} + I_{cr} \times (1 - (M_{cr} / M_a)^{5,5}) \quad (44)$$

όπου

$$I_g = ((b \times h^3) / 12)$$

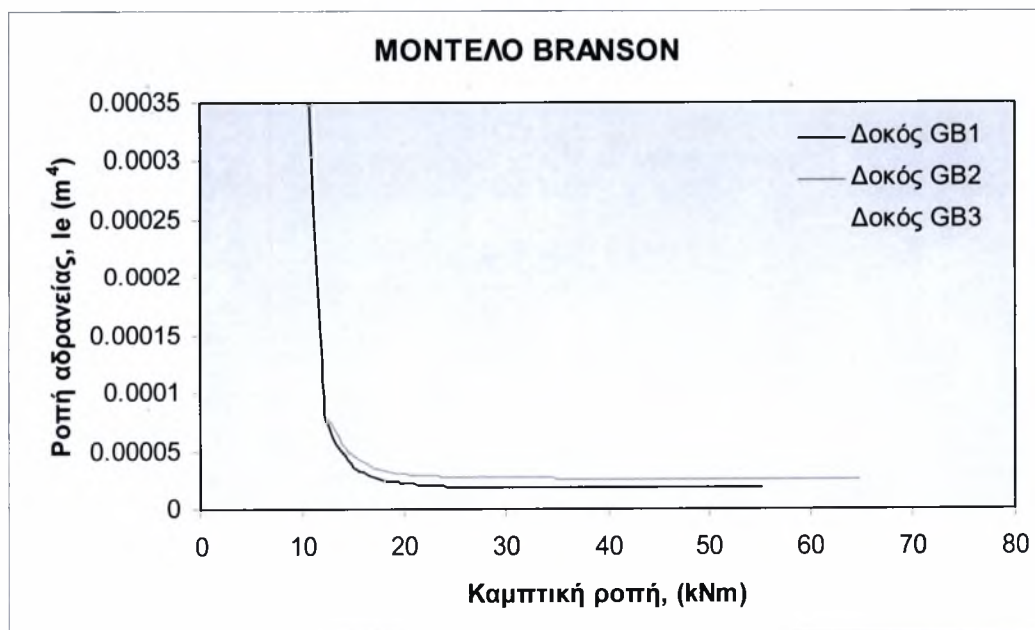
και

$$I_{cr} = (b \times x_{cr}^3) / 3 + n \times A \times (d - x_{cr})^2$$

όπου  $x_{cr}$  το βάθος της θλιβόμενης ζώνης τη στιγμή της ρηγμάτωσης

$$n = E_{ολικού} / E_c$$

όπου  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του εκάστοτε υλικού της ραβδου



Σχήμα 5.1.14 : Διάγραμμα ροπών – ροπών αδρανείας

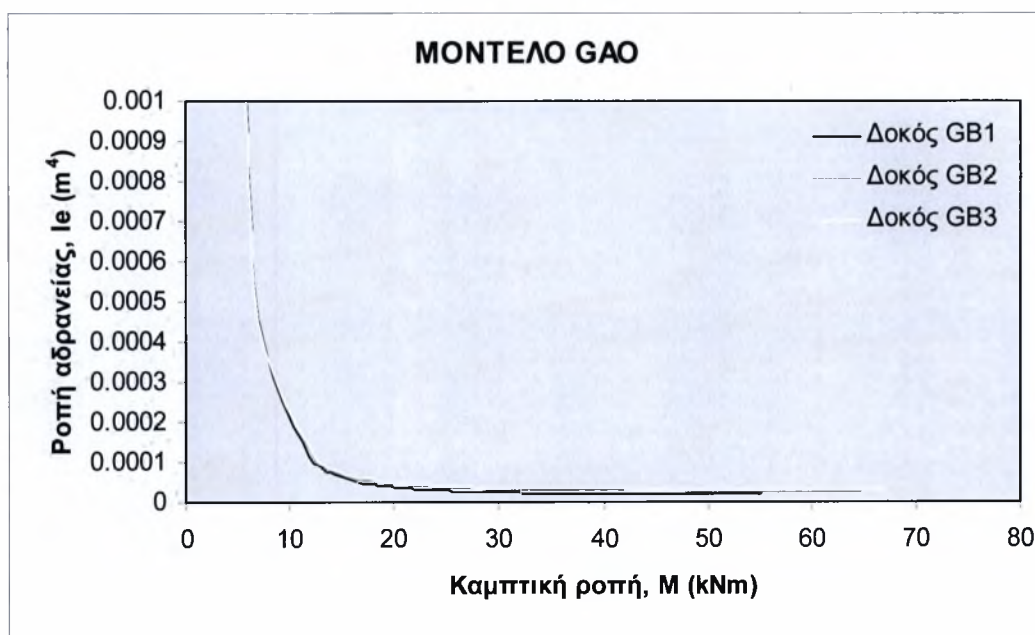
## 5.1.7.3 Μοντέλο Gao

Σύμφωνα με το μοντέλο του Gao η ροπή αδρανείας  $I_e$  δίνεται από τον τύπο:

$$I_e = \beta_d \times I_g \times (M_{cr} / M_a)^3 + I_{cr} \times (1 - (M_{cr} / M_a)^3) \quad (45)$$

όπου  $\beta_d = a_b \times ((E_{gfrp} / E_s) + 1)$

και  $a_b = 0,5$



Σχήμα 5.1.15 : Διάγραμμα ροπών – ροπών αδρανείας

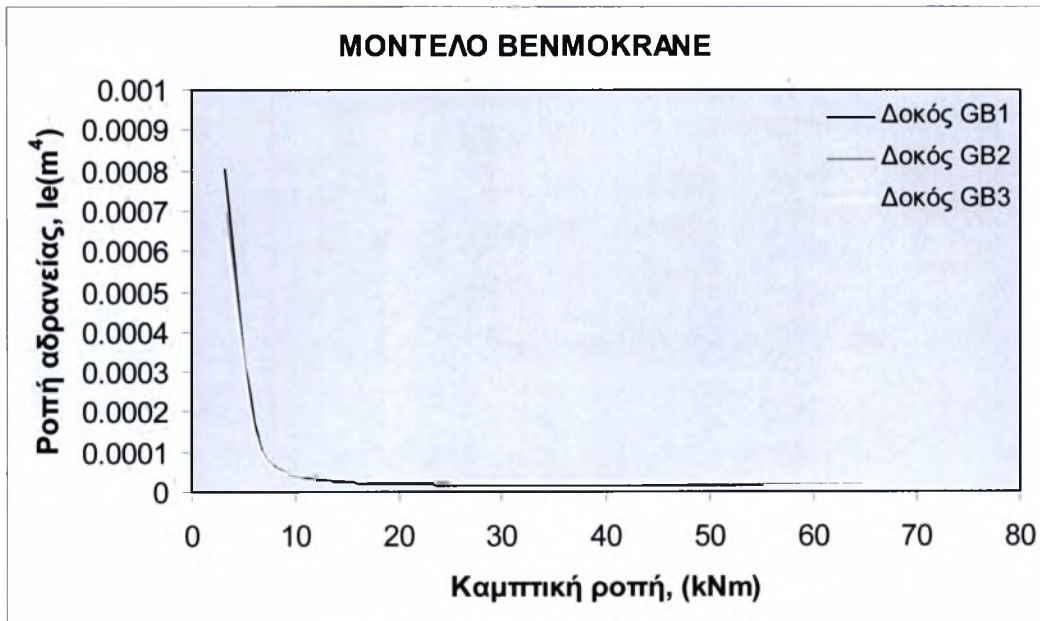


## 5.1.7.4 Μοντέλο Benmokrane

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες ο Benmokrane απέδειξε ότι η εξίσωση (40) αν χρησιμοποιηθεί σε μια δοκό οπλισμένη με GFRP υπερεκτιμά την ροπή αδρανείας  $I_e$  με συνέπεια την υποεκτίμηση του βέλους κάμψης. Επεξεργάζοντας λοιπόν την εξίσωση (40), κατάληξε στο συμπέρασμα ότι η ροπή αδρανείας  $I_e$  για δοκούς με GFRP μπορεί να υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_e = \alpha \times I_{cr} + ((I_g / \beta) - (\alpha I_{cr})) \times (M_{cr} / M_a)^3 \quad (46)$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  ισούνται με 0,84 και 7 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1.16 : Διάγραμμα ροπών – ροπών αδρανείας

5.1.7.5 Μέσω ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος

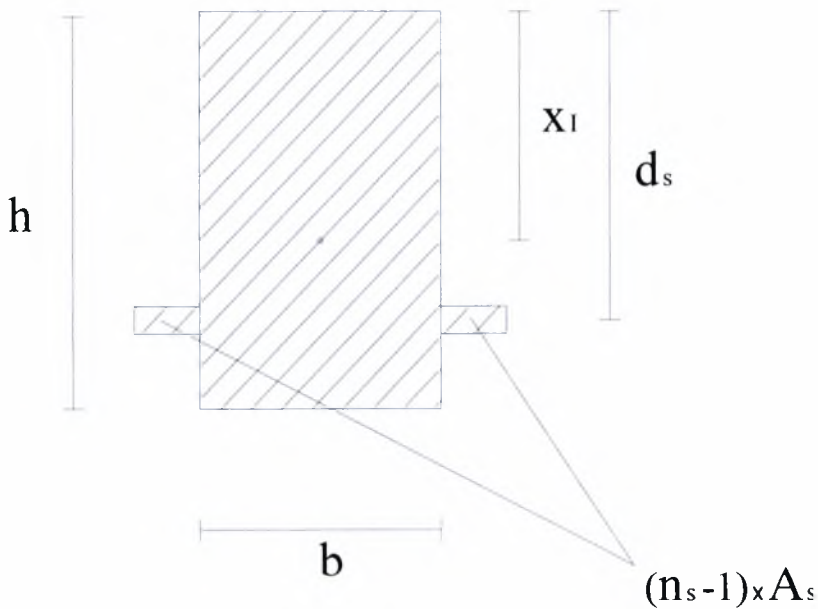
Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η ροπή αδρανείας πριν τη ρηγματώση δίνεται από τον τύπο

$$I = ((b \times h^3) / 12) + b \times h \times (x_I - (h / 2))^2 + (n - 1) \times A \times (d - x_I)^2 \quad (47)$$

ενώ μετά τη ρηγματώση η ροπή αδρανείας υπολογίζεται από τον τύπο:

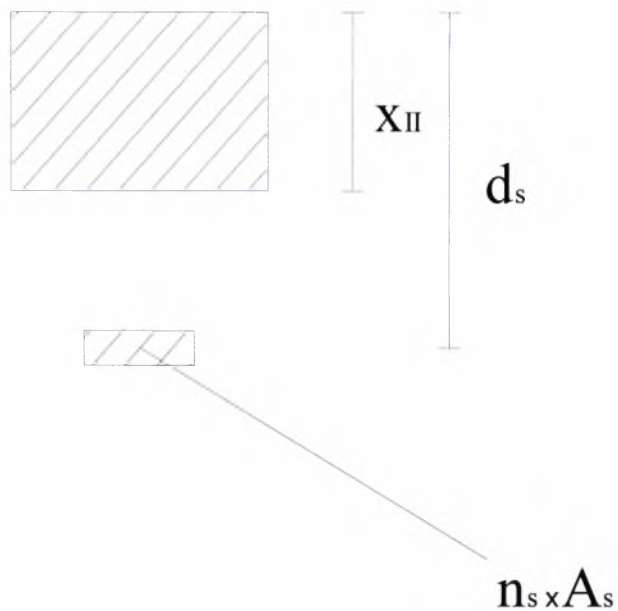
$$I = ((b \times x_{II}^3) / 3) + n \times A \times (d - x_{II})^2 \quad (48)$$

Όπου  $x_I, x_{II}$  προκύπτουν από τα σχήματα:

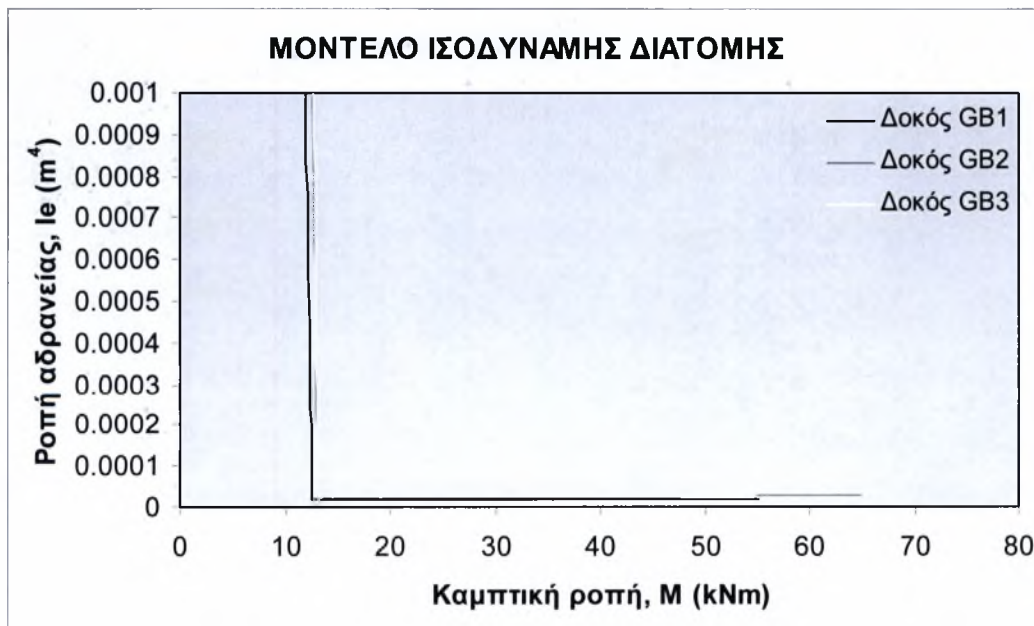


**Σχήμα 5.1.17 :** Ισοδύναμη μη ρηγματωμένη διατομή

όπου  $n_s$  ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας του εκάστοτε υλικού προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος



Σχήμα 5.1.18 : Ισοδύναμη ρηγματωμένη διατομή



Σχήμα 5.1.19 : Διάγραμμα ροπών – ροπών αδρανείας

## 5.2 Μοντέλο πρόβλεψης συμπεριφοράς δοκών οπλισμένων με GFRP σύμφωνα με τον καναδέζικο κανονισμό ISIS [3]

### 5.2.1 Εξισώσεις σχεδιασμού

#### 5.2.1.1 Θλιπτική δύναμη σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον καναδέζικο κανονισμό η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος δίνεται από τον τύπο:

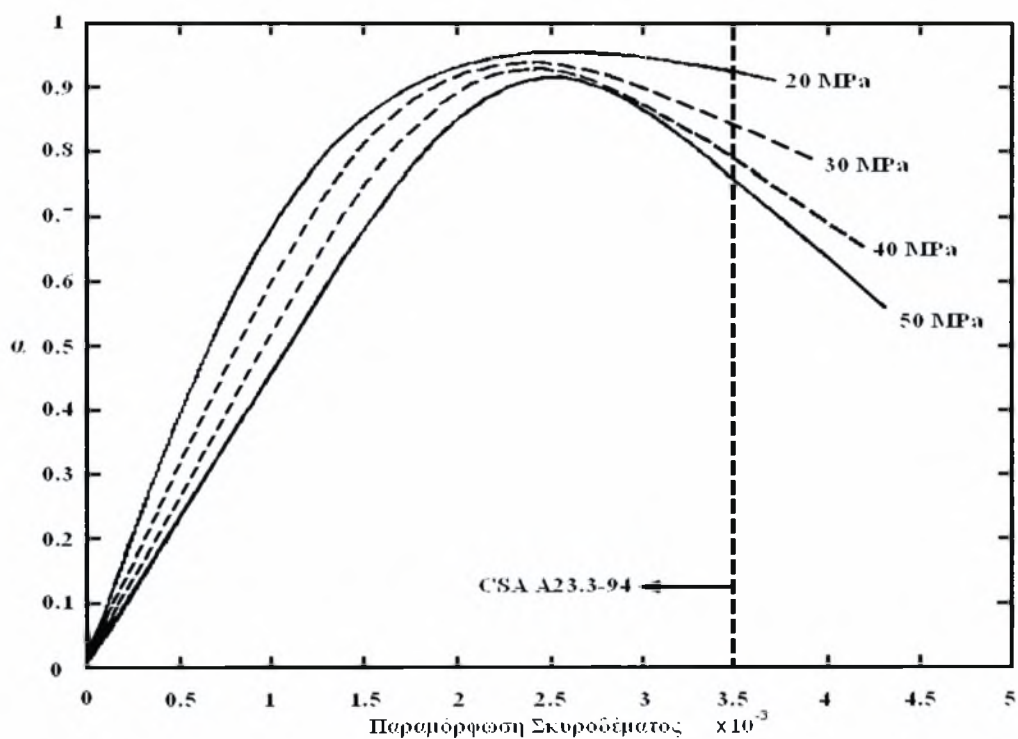
$$F_c = \alpha_1 \times f_c' \times \beta_1 \times x_u \times b \quad \text{για } \varepsilon_c = 0,0035 \quad (49)$$

όπου  $\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 \times f_c' \geq 0,67$  σε MPa

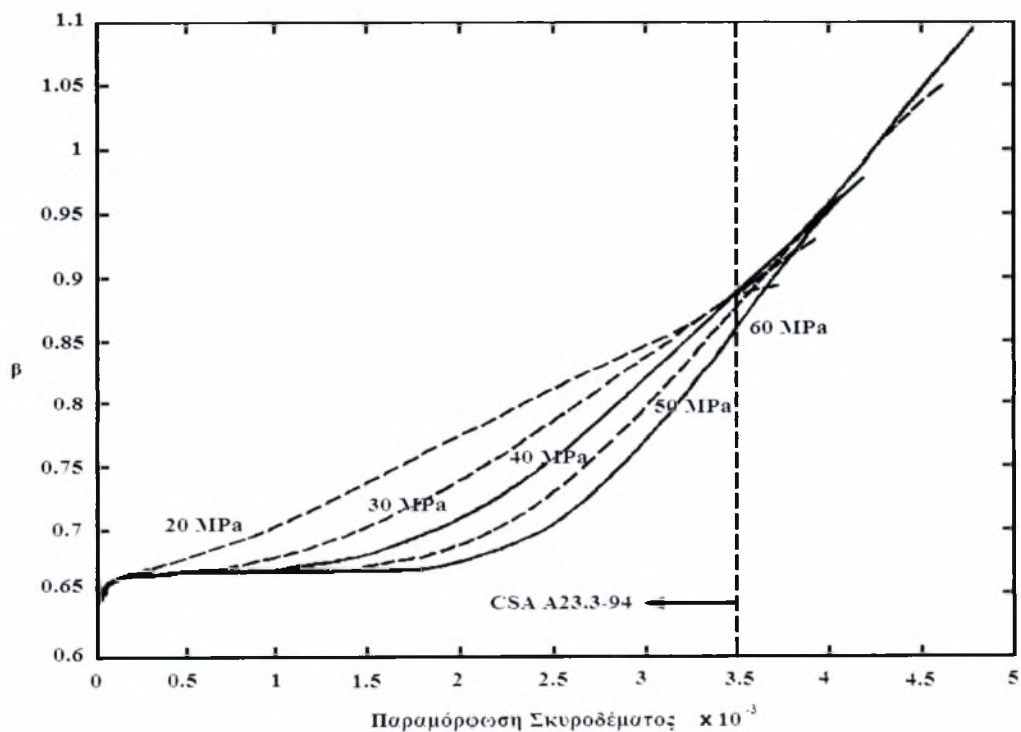
και  $\beta_1 = 0,97 - 0,0025 \times f_c' \geq 0,67$  σε MPa

$$\text{και } F_c = \alpha \times f_c' \times \beta \times x_u \times b \quad \text{για } \varepsilon_c < 0,0035 \quad (50)$$

όπου  $\alpha, \beta$  δίνονται από τα παρακάτω διαγράμματα όπως προκύπτουν από τον καναδέζικο κανονισμό

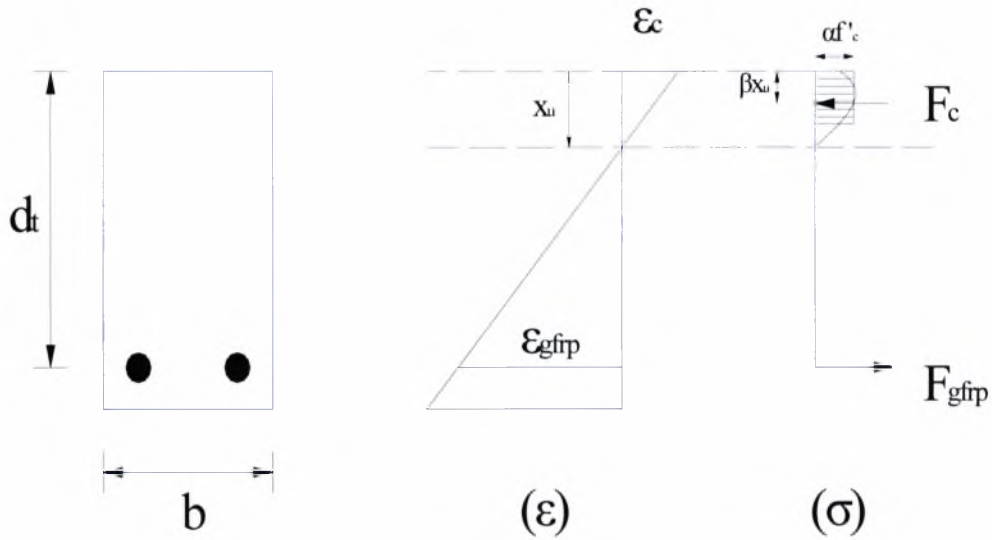


Σχήμα 5.2.1 : Διάγραμμα παραμορφώσεων – συντελεστή  $\alpha$



Σχήμα 5.2.2 : Διάγραμμα παραμορφώσεων – συντελεστή  $\beta$

Οι συντελεστές  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha$  και  $\beta$  εξομειώνουν το παραβολικό τμήμα στο διάγραμμα των τάσεων με τετραγωνικό, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.2.3 : Διάγραμμα παραμορφώσεων – τάσεων

Σημειώνεται ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σύμφωνα με τον καναδέζικο κανονισμό παραλείπεται.

5.2.1.2 Εφελκυστική δύναμη GFRP

Η εφελκυστική δύναμη που παραλαμβάνουν οι ράβδοι από GFRP ισούται:

$$F_{gfrp} = \epsilon_{gfrp} \times E_{gfrp} \times A_{gfrp} \tag{51}$$

Για κάθε δεδομένη παραμόρφωση σκυροδέματος  $\epsilon_c$  από 0 έως 0,0035 και με βήμα 0,00035, εξισώνοντας τις σχέσεις (49), (51), βρίσκουμε το βάθος της θλιβόμενης ζώνης  $x_u$  και επομένως τις δυνάμεις  $F_c$ ,  $F_{gfrp}$  και την καμπτική ροπή  $M$ .



5.2.1.3 Καμπτική ροπή  $M$ 

Η καμπτική ροπή  $M$  υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$M = F_{gfrp} \times (d - (\beta \times x_u) / 2) \quad \text{για } \varepsilon_c < 0,0035 \quad (52)$$

και

$$M = F_{gfrp} \times (d - (\beta_1 \times x_u) / 2) \quad \text{για } \varepsilon_c = 0,0035 \quad (53)$$

Η ροπή ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  βρίσκεται εάν στη σχέση (49) αντικαταστήσουμε το  $x_u$  με  $x_{crack}$ , το βάθος της θλιβόμενης ζώνης δηλαδή τη στιγμή της ρηγμάτωσης το οποίο ισούται με:

$$x_{crack} = d \times \left[ -n_{gfrp} \times \rho_{gfrp} + \sqrt{(n_{gfrp} \times \rho_{gfrp})^2 + 2 \times n_{gfrp} \times \rho_{gfrp}} \right] \quad (54)$$

$$\text{όπου } n_{gfrp} = E_{gfrp} / E_c$$

$$\text{και } \rho_{gfrp} = A_{gfrp} / (b \times d)$$

## 5.2.2 Υπολογισμός βέλους κάμψης

Το βέλος κάμψης στο μέσο μιας δοκού μήκους  $l$  σύμφωνα με τον καναδέζικο κανονισμό ισούται:

$$\Delta_{mid-span} = (10 \times \varphi \times l^2) / 96$$

Όπου  $\varphi$  η καμπλότητα της διατομής ίση με:

$$\varphi = M / E_c I_e$$

### 5.2.3 Υπολογισμός ροπής αδρανείας $I_e$

Σύμφωνα με το μοντέλο του καναδέζικου κανονισμού, η ροπή αδρανείας υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$I_e = (I_t \times I_{cr}) / ((I_{cr} + (1 - 0,5 \times (M_{cr} / M)^2)) \times (I_t - I_{cr}))$$

Όπου  $I_t$ ,

$$I_t = ((b \times h^3) / 12) + b \times h \times (k - (h / 2))^2 + (n_{gfrp} - 1) \times A_{gfrp} \times (d - k)^2$$

και

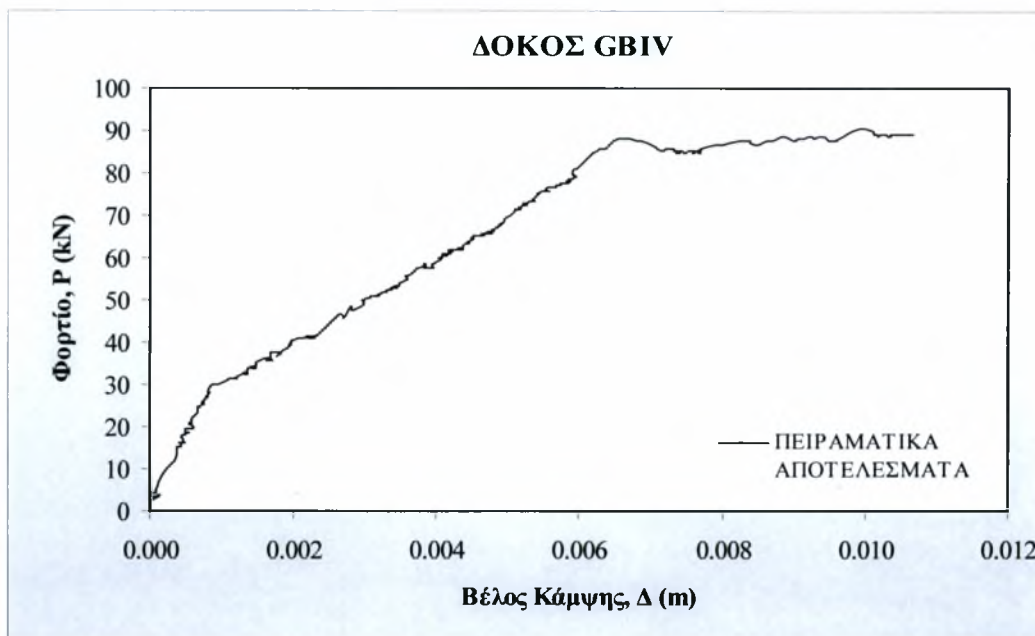
$$k = [(-n_{gfrp} \times \rho_{gfrp}) + ((2 \times n_{gfrp} \times \rho_{gfrp}) + (n_{gfrp} \times \rho_{gfrp})^2)] \times d$$

## 5.3 Αποτελέσματα προγράμματος πρόβλεψης

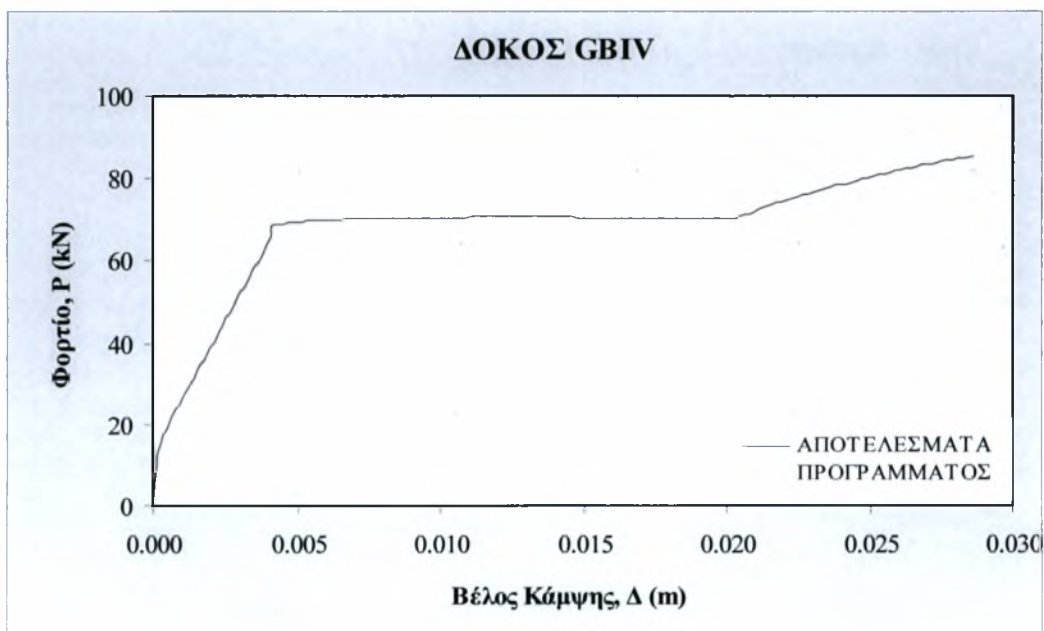
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος πρόβλεψης και του μοντέλου του καναδέζικου κανονισμού ISIS, συγκρινόμενα με τα πειραματικά δεδομένα για κάθε πείραμα ξεχωριστά.

### 5.3.1 Οπλισμένη δοκός με χάλυβα – GBIV (Πείραμα Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Υπεύθυνος Κος Περδικάρης)

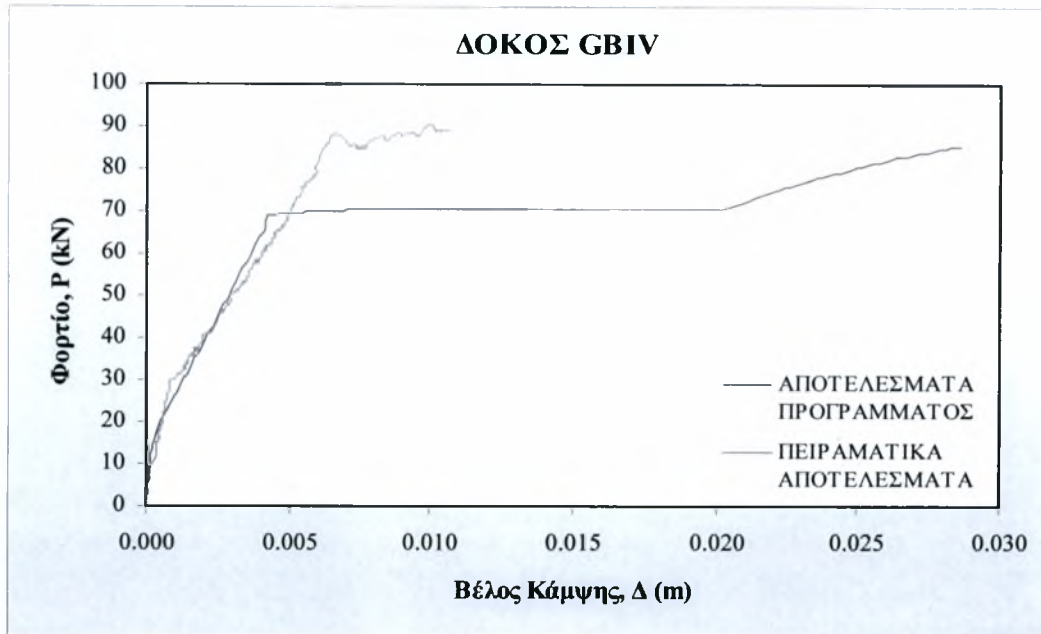
Η δοκός αυτή ήταν ενισχυμένη με χάλυβα και όχι με GFRP για να γίνει και η σύγκριση για τα δύο αυτά υλικά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και από το πρόγραμμα πρόβλεψης.



Σχήμα 5.3.1.1 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – φορτίο για τα πειραματικά Αποτελέσματα



Σχήμα 5.3.1.2 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – φορτίο για τα αποτελέσματα του προγράμματος



Σχήμα 5.3.1.3 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – φορτίο για το σύνολο των αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.3.1.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τιμών του πειράματος

	<b>Αποτελέσματα Πειράματος</b>	<b>Αποτελέσματα Προγράμματος</b>
<b>Φορτίο Ρηγμάτωσης</b>	15.45 kN	14,21 kN
<b>Φορτίο Διαρροής</b>	88.1 kN	69.14 kN
<b>Φορτίο Αστοχίας</b>	88.9 kN	85.37 kN
<b>Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης</b>	0,45 mm	0,23 mm
<b>Βέλος Κάμψης Διαρροής</b>	6.53 mm	4,51 mm
<b>Βέλος Κάμψης Αστοχίας</b>		28,6 mm

Συμπεράσματα:

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, το διάγραμμα φορτίου – βέλους κάμψης που προκύπτει από το πρόγραμμα πρόβλεψης συμπίπτει αρκετά με αυτό από τα πειραματικά δεδομένα όσον αφορά τη ρηγμάτωση.

Συγκεκριμένα, το φορτίο ρηγμάτωσης που προκύπτει από το πρόγραμμα αποκλίνει από τα πειραματικά δεδομένα κατά 8 %, με το πρόγραμμα να υποεκτιμά το φορτίο. Όσον αφορά το βέλος κάμψης, η διαφορά του προγράμματος και των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι περίπου 0.20 mm, με το πρόγραμμα να προβλέπει και εδώ μικρότερη τιμή από τη πειραματική.

Μετά τη ρηγμάτωση, και για ένα μεγάλο στάδιο του πειράματος, η συμπεριφορά των δύο δοκών (αυτή του προγράμματος και αυτή του πειράματος) είναι αρκετά ταυτόσημη. Φτάνοντας όμως στη διαρροή, το πρόγραμμα υποεκτιμά και πάλι το φορτίο, περίπου κατά 20 % ενώ το βέλος κάμψης, το βρίσκει και πάλι μικρότερο κατά 2 mm. Βέβαια λόγω κάποιων τεχνικών προβλημάτων κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι ακριβείς τιμές για τα βέλη κάμψης του πειράματος είναι αμφίβολες, οπότε η εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων είναι ριψοκίνδυνη.

Όπως προκύπτει από την ανάλυση της πρόβλεψης, θεωρώντας αστοχία για ανηγμένη παραμόρφωση 3,5 ‰ του σκυροδέματος, η παραμόρφωση του χάλυβα φτάνει το 16,6 ‰ μπαίνοντας στο παραβολικό τμήμα του πειραματικού διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα, με αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της πλαστιμότητας μετά τη διαρροή.

Ένας από τους λόγους τους οποίους το φορτίο διαρροής αποκλίνει, είναι ότι στο μοντέλο υπολογισμού δεν χρησιμοποιήθηκε ο θλιβόμενος οπλισμός. Βέβαια, η διαφορά στην αντοχή της δοκού δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την χρησιμοποίηση του θλιβόμενου οπλισμού. Η διαφορά για το φορτίο είναι της τάξης του 5 %.

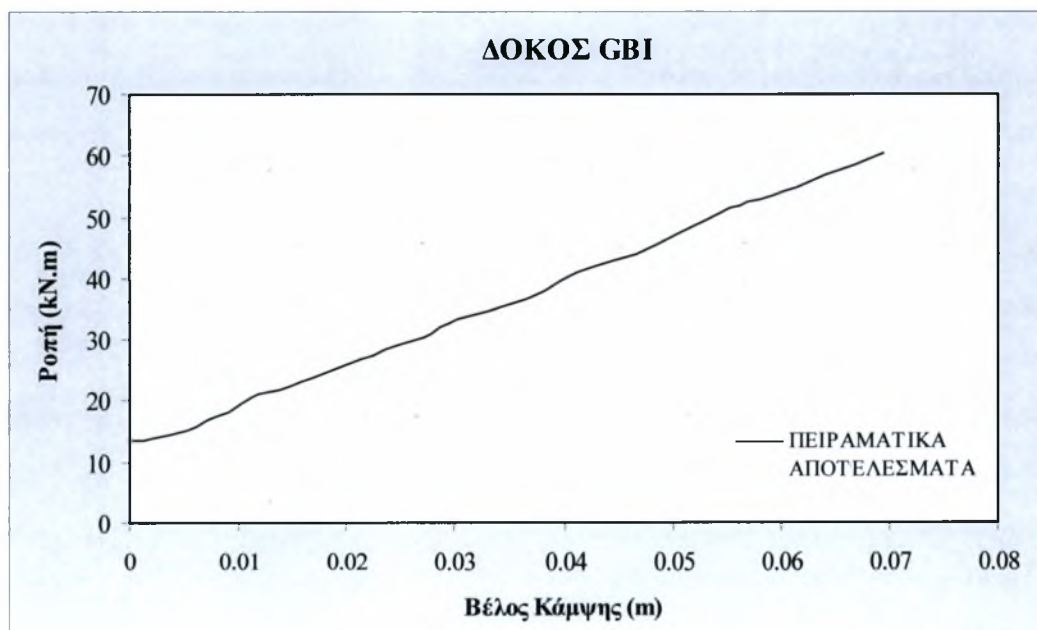
Επίσης, ένας άλλος λόγος που θα μπορούσε να επικαλεστεί κανείς για την απόκλιση αυτή, είναι στις εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων του μοντέλου δεν χρησιμοποιείται η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος, καθώς η διαφορά της, μετά τη ρηγμάτωση, με τις δυνάμεις του σκυροδέματος και του χάλυβα είναι αρκετά σημαντική, σχεδόν υποδεκαπλάσια.

Όσον αφορά την αστοχία, οι τιμές του προγράμματος και του πειράματος συμπίπτουν αρκετά, με μια απόκλιση της τάξης του 3,9 %, με το πρόγραμμα να υποεκτιμά και πάλι το φορτίο αστοχίας.

Όσον αφορά το βέλος κάμψης, σύμφωνα με το πρόγραμμα είναι 28,6 mm, ενώ για το πείραμα δεν είχαμε ακριβή τιμή λόγω των προαναφερθέντων προβλημάτων.

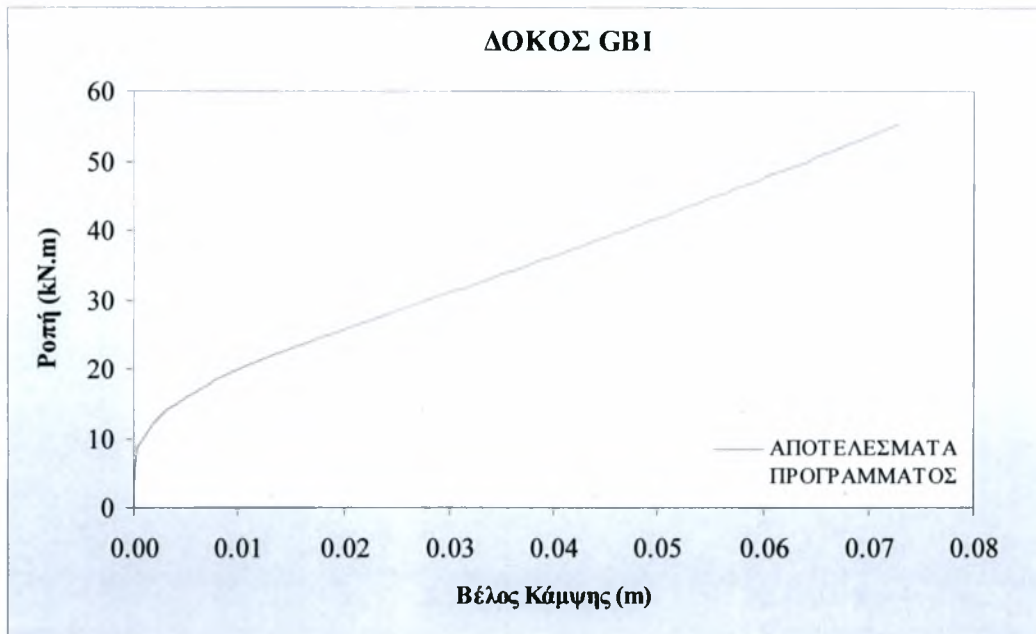
### 5.3.2 Οπλισμένη δοκός με GFRP. Ομάδα δοκών GBI. (Πείραμα Πανεπιστημίου Alabama, Υπεύθυνος Houssam Toutanji, Yong Deng)

Η δοκός αυτή ήταν ενισχυμένη με GFRP. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και από το πρόγραμμα πρόβλεψης και από τον καναδέζικο κανονισμό ISIS.

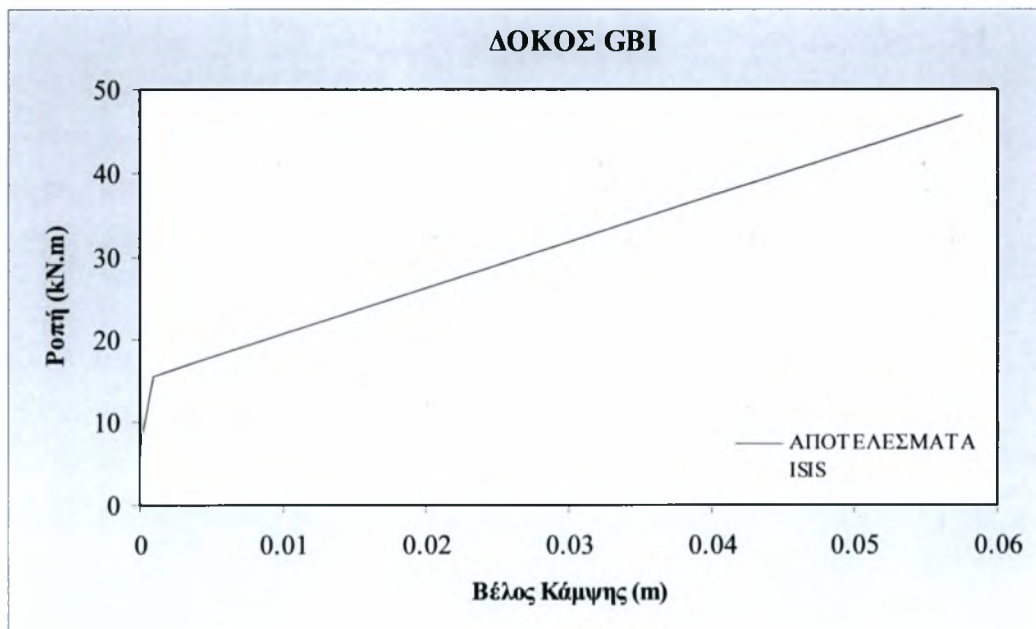


**Σχήμα 5.3.2.1 :** Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα πειραματικά αποτελέσματα

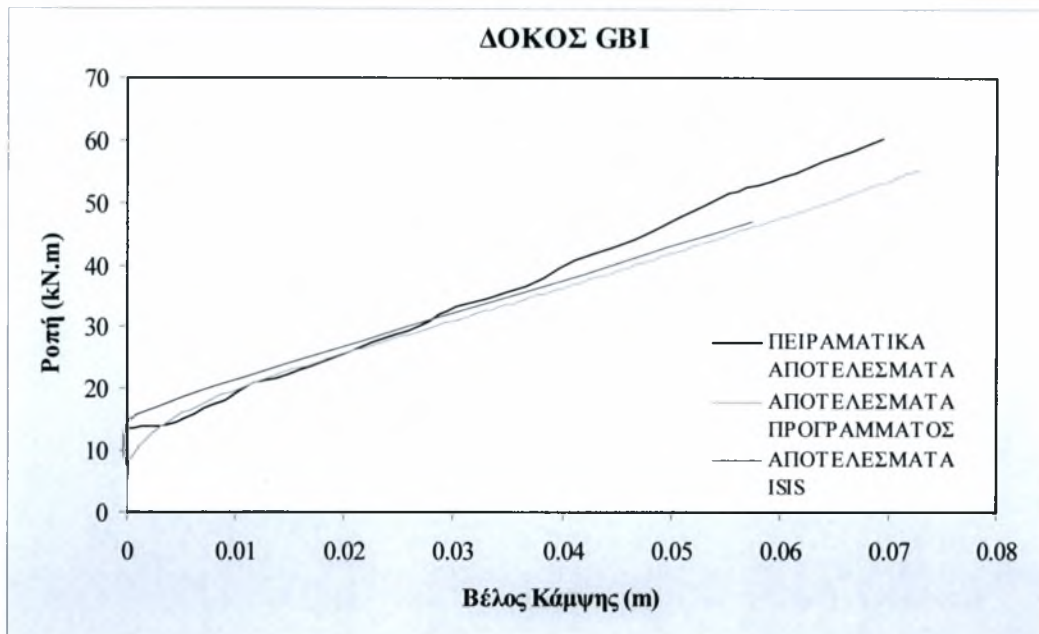




Σχήμα 5.3.2.2 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα αποτελέσματα του προγράμματος



Σχήμα 5.3.2.3 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα αποτελέσματα σύμφωνα με ISIS



Σχήμα 5.3.2.4 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για το σύνολο των αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.3.2.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBI:

	Αποτελέσματα Πειράματος	Αποτελέσματα Προγράμματος	Αποτελέσματα ISIS
<b>Ροπή Ρηγμάτωσης</b>	11,7 kNm	8,75 kNm	15,83 kNm
<b>Ροπή Αστοχίας</b>	60 kNm	55,22 kNm	46,915 kNm
<b>Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης</b>	0,27 mm	0,34 mm	0,93 mm
<b>Βέλος Κάμψης Αστοχίας</b>	70 mm	72,9 mm	60 mm

### Συμπεράσματα:

Οι τιμές που προκύπτουν από το πρόγραμμα πρόβλεψης όσο αφορά τη ροπή ρηγμάτωσης δεν είναι και τόσο ικανοποιητικές σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα (διαφορά περίπου 3 kNm). Αντίθετα, για το βέλος κάμψης ρηγμάτωσης η πρόβλεψη είναι αρκετά επιτυχής (διαφορά 0.07 mm).

Αντίθετα με το πρόγραμμα που υποεκτιμά τη ροπή ρηγμάτωσης, ο καναδέζικος κανονισμός ISIS την υπερεκτιμά και δίνει 15,83 kNm, διαφορά της τάξης του 24 % από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Το ίδιο συμβαίνει και για το βέλος κάμψης το οποίο για τη περιοχή της ρηγμάτωσης υπερεκτιμάται κατά πολύ. Ενδεικτικά ο καναδέζικος κανονισμός δίνει βέλος κάμψης 0,93 mm, ενώ το πείραμα και το πρόγραμμα δίνουν 0,27 mm και 0,34 mm αντίστοιχα.

Στην αστοχία η ροπή που προκύπτει από το πρόγραμμα πρόβλεψης παρουσιάζει απόκλιση της τάξης του 7,9 % ενώ το βέλος κάμψης παρουσιάζει μεγάλη σύγκλιση με το πείραμα, έχοντας διαφορά μόνο της τάξης του 3,9 %.

Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα πρόβλεψης υποτιμά τη ροπή και στις δύο φάσεις του πειράματος ενώ υπερεκτιμά το βέλος κάμψης στη ρηγμάτωση.

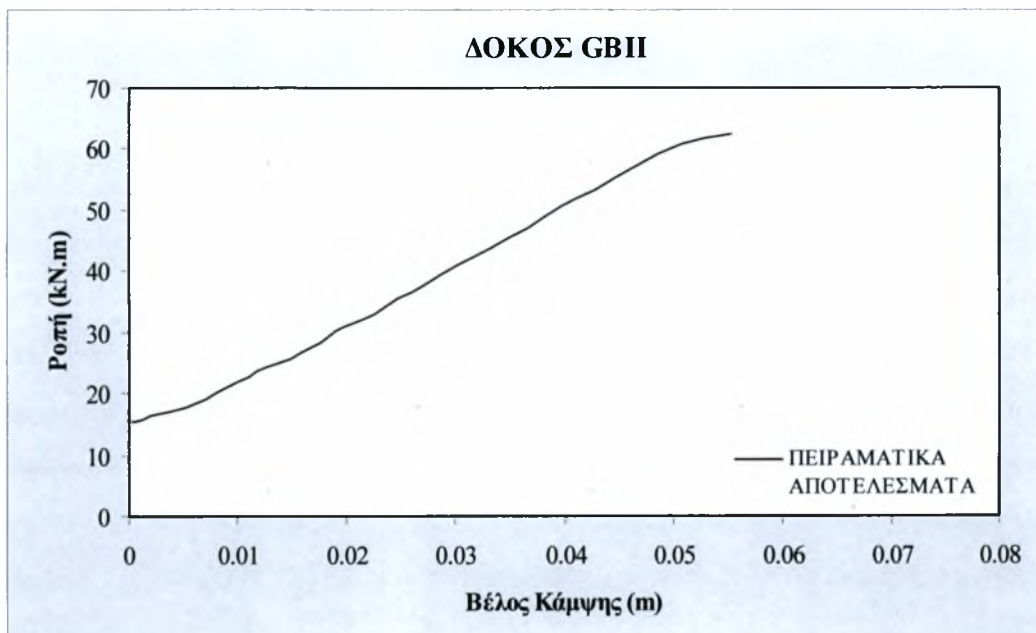
Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι το βέλος κάμψης στη ρηγμάτωση είναι αρκετά μικρό οπότε η εξαγωγή συμπερασμάτων είναι αρκετά ρισκοκίνδυνη.

Όσον αφορά τη ροπή αστοχίας που δίνει ο καναδέζικος κανονισμός είναι μικρότερη κατά 21,7 % και το βέλος κάμψης αστοχίας κατά 14 %.

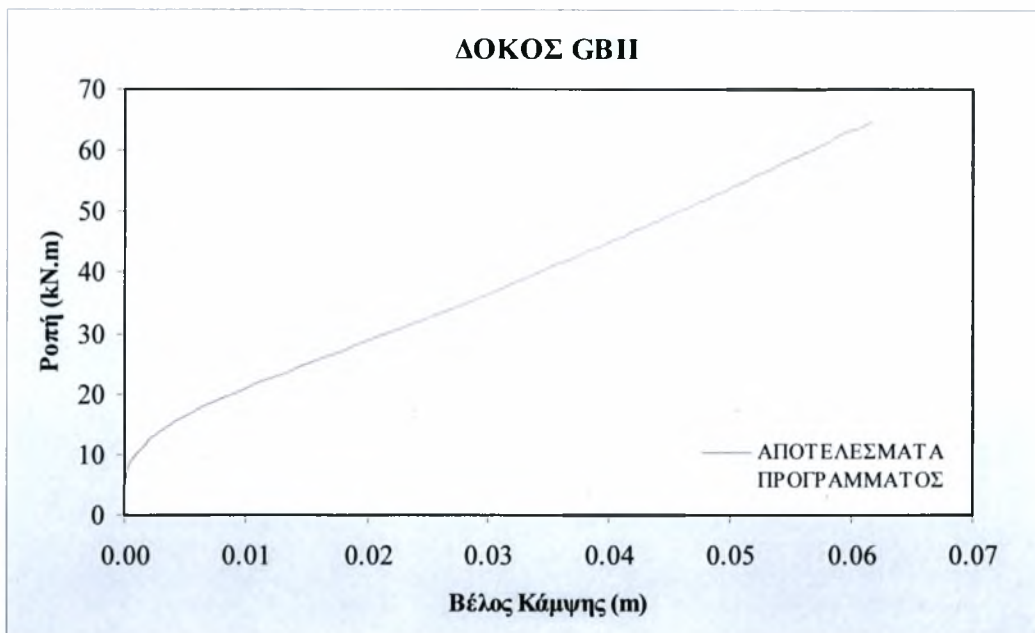
Παρατηρούμε δηλαδή ότι ο καναδέζικος κανονισμός δίνει αρκετά συντηρητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη ροπή και κατ' επέκταση το φορτίο που αντέχει η δοκός.

### 5.3.3 Οπλισμένη δοκός με GFRP. Ομάδα δοκών GBII. (Πείραμα Πανεπιστημίου Alabama, Υπεύθυνος Houssam Toutanji, Yong Deng)

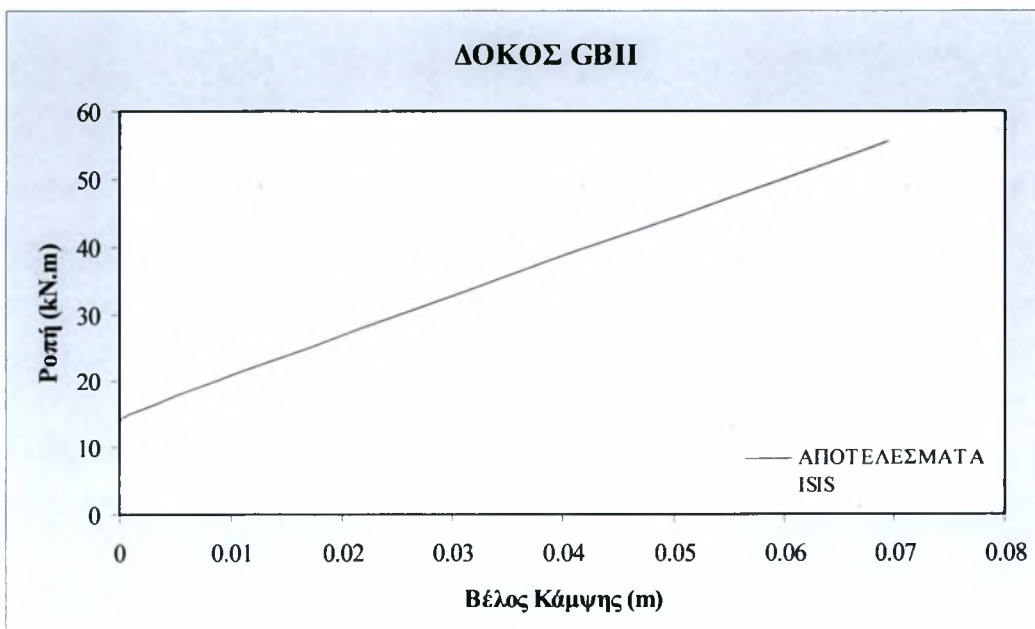
Ομοίως η δοκός αυτή ήταν ενισχυμένη με GFRP. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και από το πρόγραμμα πρόβλεψης και από τον καναδέζικο κανονισμό ISIS.



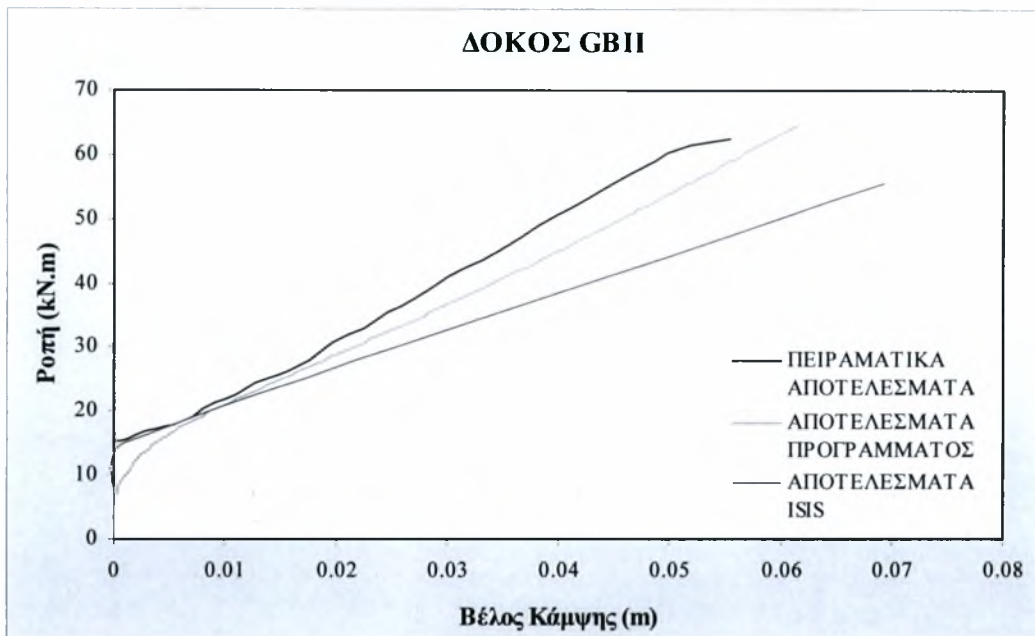
Σχήμα 5.3.3.1 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα πειραματικά αποτελέσματα



Σχήμα 5.3.3.2 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα αποτελέσματα του προγράμματος



Σχήμα 5.3.3.3 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα αποτελέσματα σύμφωνα με ISIS



Σχήμα 5.3.3.4 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για το σύνολο των αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.3.2.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBII:

	Αποτελέσματα Πειράματος	Αποτελέσματα Προγράμματος	Αποτελέσματα ISIS
<b>Ροπή Ρηγμάτωσης</b>	13,4 kNm	8,81 kNm	15,2 kNm
<b>Ροπή Αστοχίας</b>	65 kNm	64,8 kNm	55,53 kNm
<b>Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης</b>	0.548 mm	0,57 mm	0,89 mm
<b>Βέλος Κάμψης Αστοχίας</b>	60 mm	61,7 mm	69.4 mm

Συμπεράσματα:

Για τη δοκό GBII η ροπή ρηγμάτωσης που προκύπτει από το πρόγραμμα πρόβλεψης είναι περίπου μικρότερη κατά 5 kNm.

Ο καναδέζικος κανονισμός στη περίπτωση αυτή προβλέπει πιο καλά τη ροπή ρηγμάτωσης έχοντας απόκλιση 9,5%, υπερεκτιμώντας τη και πάλι.

Όσον αφορά το βέλος κάμψης στη περιοχή της ρηγμάτωσης, και εδώ το πρόγραμμα προβλέπει πολύ καλύτερα τη συμπεριφορά της δοκού σε σχέση με τον καναδέζικο κανονισμό, αφού η απόκλιση είναι της τάξης μόλις του 3,9 %.

Ο καναδέζικος κανονισμός υπερεκτιμά και πάλι κατά πολύ το βέλος κάμψης στη ρηγμάτωση βγάζοντας  $\Delta = 0,89$  mm.

Στη περιοχή της αστοχίας το πρόγραμμα πρόβλεψης για τη δοκό GBII δίνει αρκετά εντυπωσιακά αποτελέσματα, όσον αφορά τη ροπή, αφού η απόκλιση είναι της τάξης του 0,3 %, ενώ το βέλος κάμψης έχει απόκλιση της τάξης του 2,8 %.

Ο καναδέζικος κανονισμός υποτιμά και πάλι τη ροπή αστοχίας αφού αποκλίνει κατά 9,5%, ενώ το βέλος κάμψης αστοχίας υπερεκτιμάται κατά 13 %.

Σε σχέση με τη δοκό GBI, παρατηρούμε ότι η δοκός GBII παρουσιάζει μεγαλύτερη ροπή ρηγμάτωσης καθώς και μεγαλύτερη ροπή αστοχίας, ενώ παρουσιάζει μικρότερο βέλος κάμψης αστοχίας.

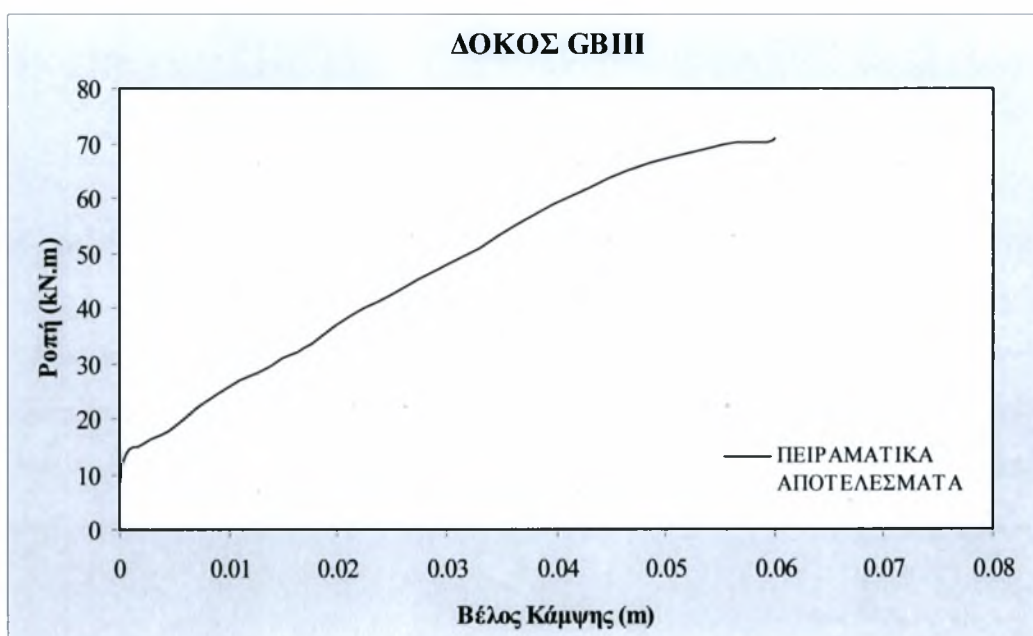
Αυτό οφείλεται προφανώς στην αύξηση του ποσοστού του οπλισμού, αφού η μεν δοκός GBI είναι οπλισμένη με δύο ράβδους GFRP, ενώ η δοκός GBII είναι οπλισμένη με τρεις ράβδους GFRP. Για 50% αύξηση του οπλισμού έχουμε περίπου 7,7% αύξηση της αντοχής και 14,3% μείωση τη πλαστιμότητας.

Έτσι με την αύξηση του οπλισμού αυξάνεται η δυσκαμψία της δοκού, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πλαστιμότητα της.

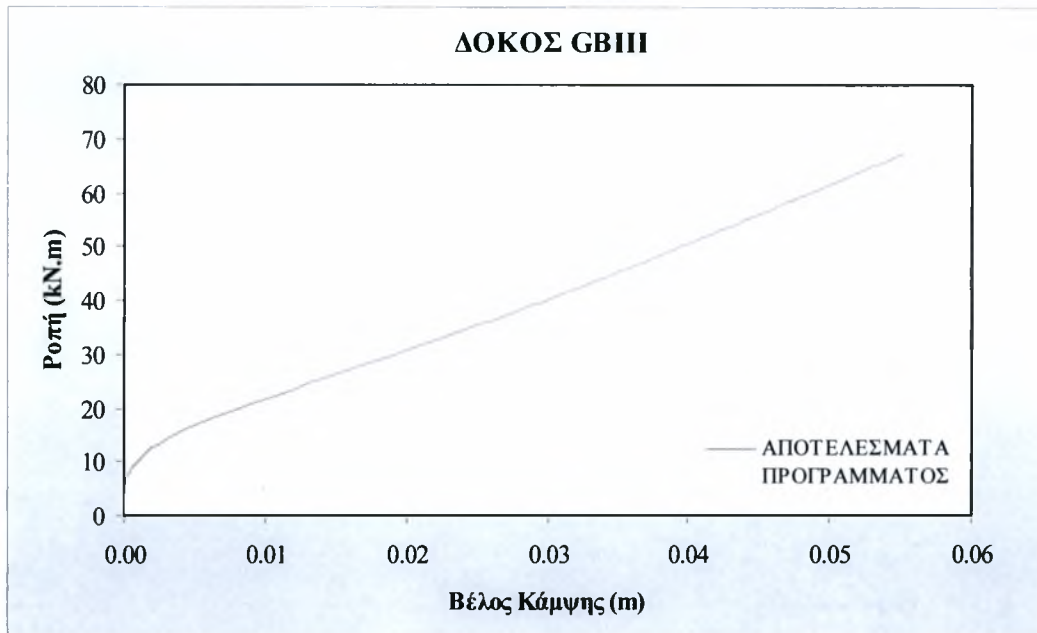


### 5.3.4 Οπλισμένη δοκός με GFRP. Ομάδα δοκών GBIII. (Πείραμα Πανεπιστημίου Alabama, Υπεύθυνος Houssam Toutanji, Yong Deng)

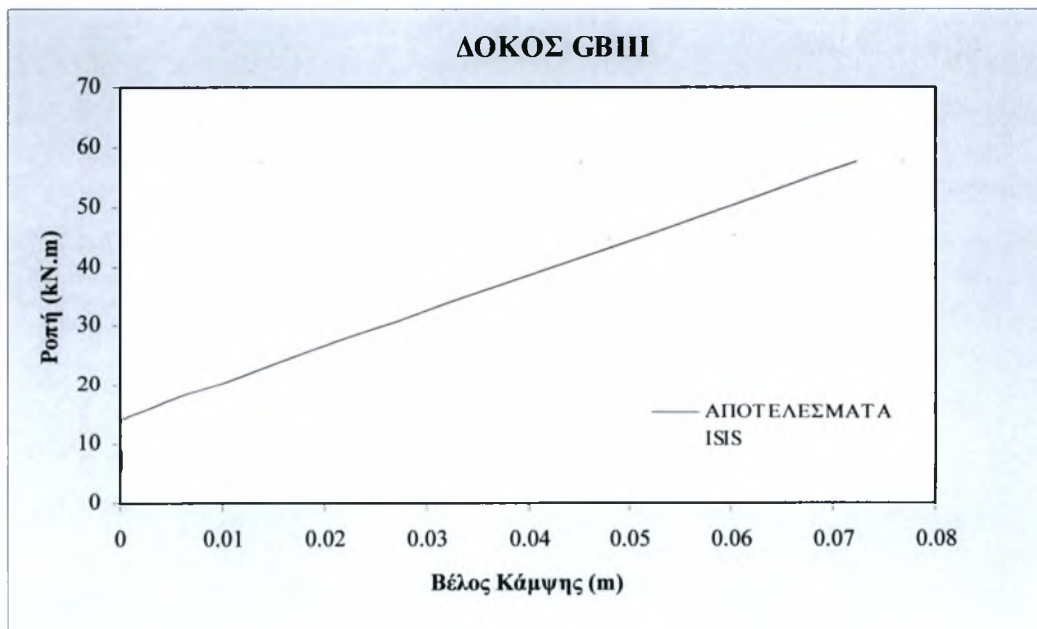
Ομοίως η δοκός αυτή ήταν ενισχυμένη με GFRP. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και από το πρόγραμμα πρόβλεψης και από τον καναδέζικο κανονισμό ISIS.



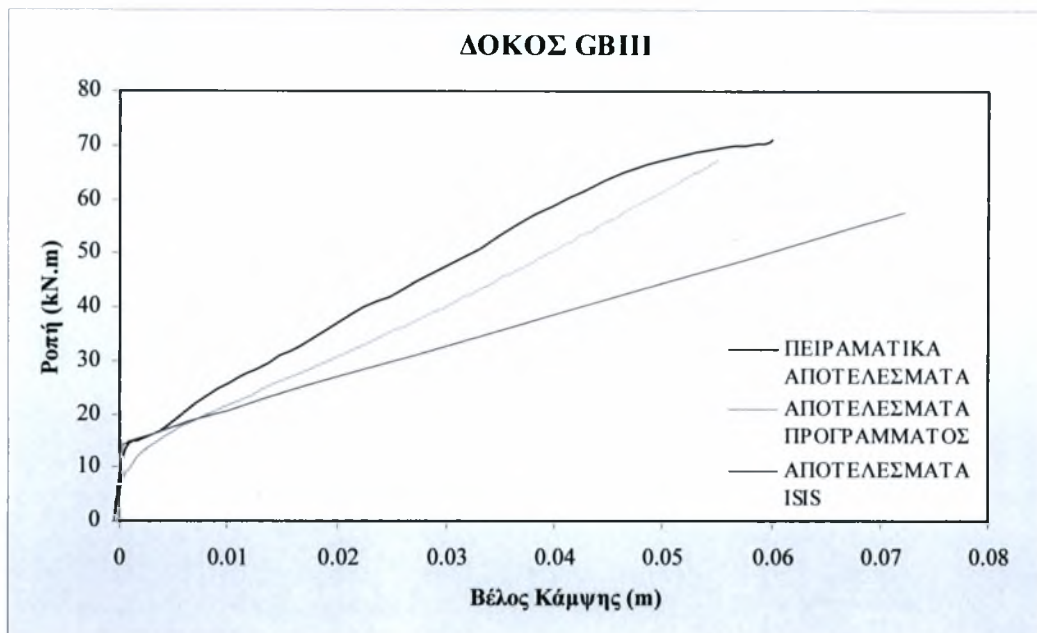
**Σχήμα 5.3.4.1 :** Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα πειραματικά αποτελέσματα



Σχήμα 5.3.4.2 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα αποτελέσματα του Προγράμματος



Σχήμα 5.3.4.3 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για τα αποτελέσματα σύμφωνα με ISIS



Σχήμα 5.3.4.4 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής για το σύνολο των αποτελεσμάτων

Πίνακας 5.3.2.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBIII

	Αποτελέσματα Πειράματος	Αποτελέσματα Προγράμματος	Αποτελέσματα ISIS
<b>Ροπή Ρηγμάτωσης</b>	11,8 kNm	8,82 kNm	14,8 kNm
<b>Ροπή Αστοχίας</b>	71 kNm	67,15 kNm	57,51 kNm
<b>Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης</b>	0.68 mm	0,56 mm	0,87 mm
<b>Βέλος Κάμψης Αστοχίας</b>	61 mm	55,1 mm	72,2 mm

## Συμπεράσματα:

Στη περίπτωση της GBIII δοκού η απόκλιση του προγράμματος πρόβλεψης για τη ροπή στη περιοχή της ρηγμάτωσης είναι της τάξης και πάλι των 3 kNm , με το πρόγραμμα να υποτιμά τη ροπή ρηγμάτωσης.

Ο καναδέζικος κανονισμός για τη ροπή στη ίδια περιοχή αποκλίνει της τάξης του 17,9%, υπερεκτιμώντας τη.

Το βέλος κάμψης τώρα στη ρηγμάτωση με βάση το πρόγραμμα αποκλίνει κατά 17 %, με το πρόγραμμα να το υποτιμά ενώ ο καναδέζικος κανονισμός το υπερεκτιμά και πάλι.

Όσον αφορά την αστοχία, η ροπή σύμφωνα με το πρόγραμμα είναι μικρότερη σε ποσοστό 5,5 %, ενώ σύμφωνα με τον καναδέζικο κανονισμό είναι μικρότερη κατά 19%.

Για το βέλος κάμψης στη περιοχή της αστοχίας, το πρόγραμμα πρόβλεψης δίνει μικρότερο αποτέλεσμα κατά 9,7 %, ενώ ο καναδέζικος κανονισμός δίνει μεγαλύτερο βέλος κάμψης κατά 15 %.

Επιβεβαιώνεται και εδώ ότι ο καναδέζικος κανονισμός δίνει αρκετά συντηρητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη ροπή και κατ' επέκταση το φορτίο που αντέχει η δοκός ενώ το βέλος κάμψης που προκύπτει από τις εξισώσεις του είναι συνήθως μεγαλύτερο.

## 5.4 Παραμετρική ανάλυση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για της δοκούς οπλισμένους με ράβδους από FRP.

Η παραμετρική ανάλυση βασίζεται στο πρόγραμμα πρόβλεψης που περιγράφεται στο παρών κεφάλαιο και θεωρείται ότι τα αποτελέσματα που προσφέρει είναι ρεαλιστικά αν η δοκός δεν αστοχήσει πρόωρα λόγω αποκόλλησης των ράβδων FRP, αλλά λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος ( $\varepsilon_u = 0.0035$ ).

Συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση των παρακάτω εξής χαρακτηριστικών μεγεθών:

- Ποσοστό οπλισμού
- Είδος και μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού
- Ποιότητα σκυροδέματος
- Διαστάσεις διατομής δοκού.

Σε κάθε περίπτωση ως δοκός ελέγχου αναφέρεται η αντίστοιχη δοκός με χαρακτηριστικά αυτά που περιγράφονται στο πείραμα της ενότητας 4.1 και η προβλεπόμενη συμπεριφορά της.

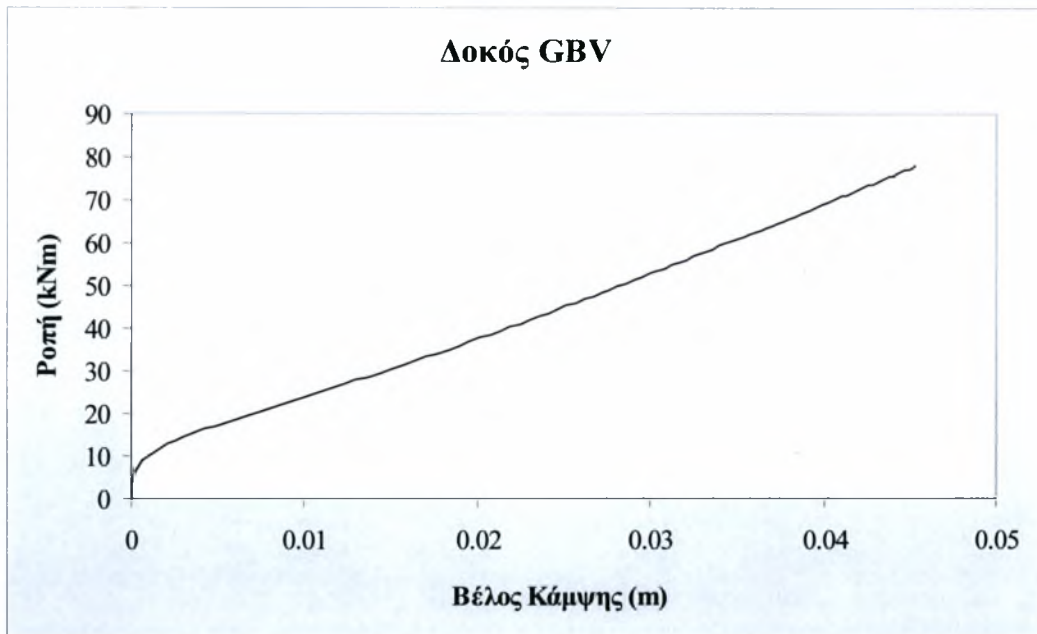
### 5.4.1 Ποσοστό οπλισμού

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση όταν ως μεταβλητή παράμετρος θεωρήθηκε το ποσοστό οπλισμού ράβδων GFRP.

Συγκεκριμένα για τη σύγκριση αυξάνουμε τον οπλισμό σε 6 ράβδους GFRP διαμέτρου 12,7 mm.

Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα αυξάνοντας το ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού:

Για να διακρίνεται η δοκός αυτή από της άλλες την ονομάζουμε δοκό GBV



**Σχήμα 5.4.1.1 :** Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής στη περίπτωση που η μεταβλητή παράμετρος είναι ο εφελκόμενος σπλισμός.

**Πίνακας 5.4.1.1** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBV

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBV	8,92	77,87	0,6	45,35

#### 5.4.1.1 Συμπεράσματα:

Από τα σχήματα 5.3.2.1, 5.3.3.1 5.3.4.1 και 5.4.1.1, προκύπτει ότι η αύξηση του οπλισμού ενίσχυσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και ταυτόχρονα τη μείωση της πλαστιμότητας, αποτέλεσμα αναμενόμενο.

Συγκεκριμένα για 100% αύξηση του οπλισμού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής ρηγμάτωσης κατά 1,3% (από 8,806 kNm σε 8,92 kNm) και της ροπής αστοχίας κατά 17% (από 64,8 kNm σε 77,87 kNm), ενώ η αύξηση είναι ανάλογη και για περαιτέρω αύξηση του οπλισμού ενίσχυσης.

Η μείωση του βέλους κάμψης για 100% αύξηση της ενίσχυσης ήταν της τάξης του 26,5% (από 61,7 mm σε 45,35 mm).

#### 5.4.2 Είδος και μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση όταν ως μεταβλητή παράμετρος θεωρήθηκε το είδος και μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού. Συγκεκριμένα για τη σύγκριση χρησιμοποιούμε ράβδους CFRP διαμέτρου 12,7 mm και μέτρου ελαστικότητας 111,1 GPa.

Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα αλλάζοντας το είδος και μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού:

Για να διακρίνονται οι δοκοί αυτοί από τις άλλες τις ονομάζουμε δοκό GBVI, GBVII και GBVIII οπλισμένες με δύο, τρεις και τέσσερεις ράβδους αντίστοιχα.

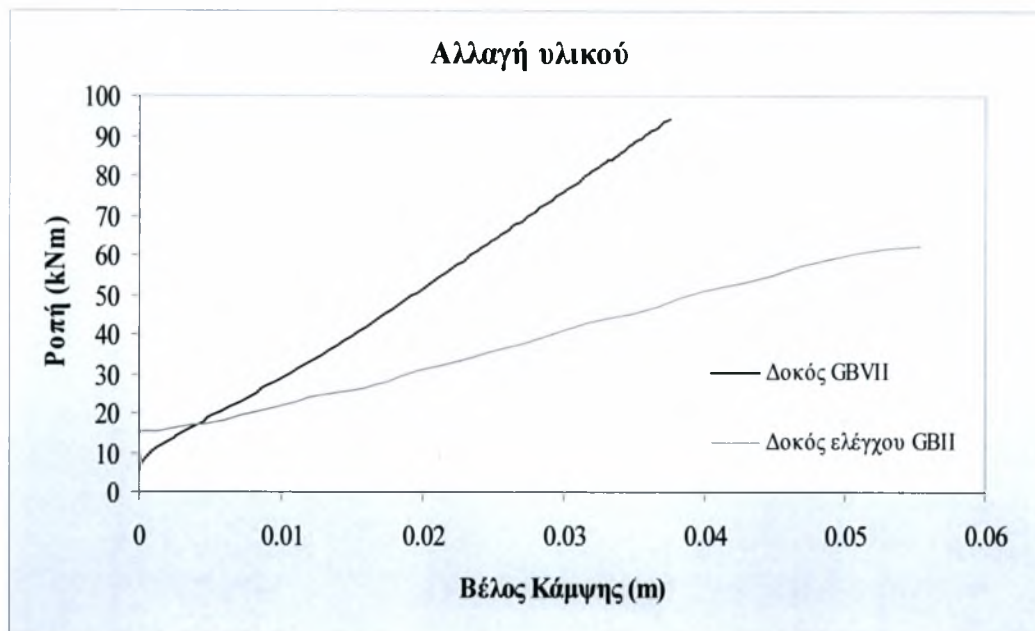




Σχήμα 5.4.2.1 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBI και GBVI

Πίνακας 5.4.2.1 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBI και GBVI

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBI (Δοκός ελέγχου)	11.7	60	0.27	70
GBVI	8.96	81.7	0.61	45.91



Σχήμα 5.4.2.2 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBII και GBVII

Πίνακας 5.4.2.2 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBII και GBVII

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBII (Δοκός ελέγχου)	13.4	65	0.548	60
GBVII	9.13	94,35	0.65	37.43



Σχήμα 5.4.2.3 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBIII και GBVIII

Πίνακας 5.4.2.3 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBIII και GBVIII

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBIII (Δοκός ελέγχου)	11.8	71	0.68	61
GBVII	9.17	96.08	0.65	33.3

#### 5.4.2.1 Συμπεράσματα:

Από τα διαγράμματα 5.4.2.1, 5.4.2.2 και 5.4.2.3 φαίνεται ότι το είδος οπλισμού και συγκεκριμένα η χρήση οπλισμού με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, 111,1 GPa έναντι 40 GPa, επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά της δοκού.

Όπως προκύπτει, όταν τριπλασιάζεται σχεδόν το μέτρο ελαστικότητας, η ροπή αστοχίας αυξάνεται σχεδόν κατά μέσο όρο 30%, ενώ το βέλος κάμψης στην αστοχία μειώνεται κατά μέσο όρο 37,5%. Η συμπεριφορά και των τριών δοκών ήταν ανάλογη.

Η αύξηση της αντοχής και η μείωση της πλαστιμότητας παρουσιάζεται κυρίως μετά τη ρηγμάτωση.

Συμπερασματικά αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού, αυξάνεται η δυσκαμψία της δοκού, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πλαστιμότητα της.

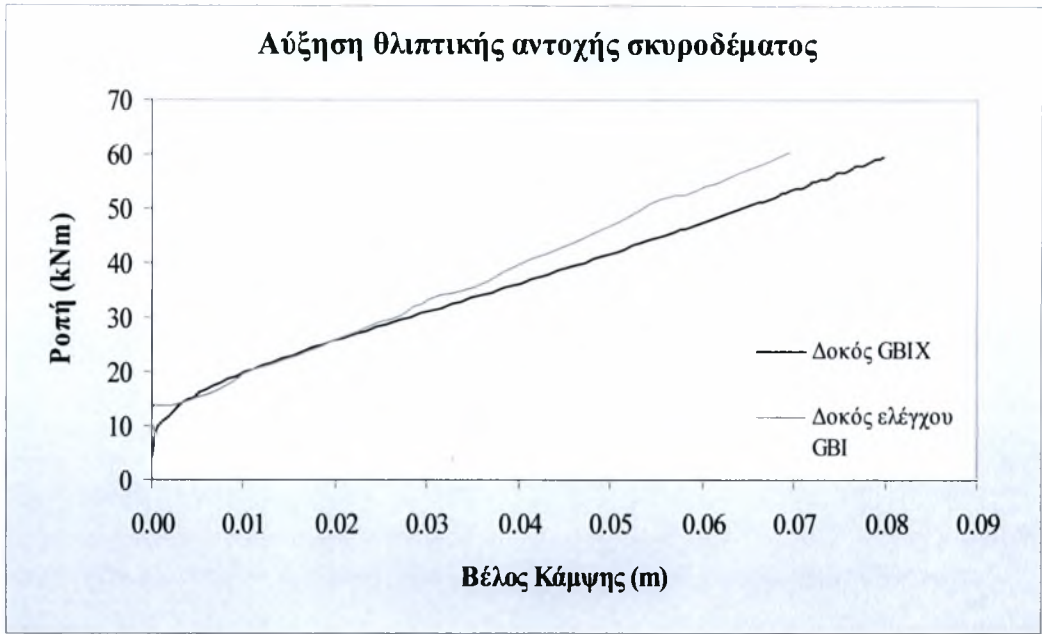
#### 5.4.3 Ποιότητα σκυροδέματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση όταν ως μεταβλητή παράμετρος θεωρήθηκε η ποιότητα του σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα για τη σύγκριση χρησιμοποιούμε σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 40 MPa αντί 35 MPa που χρησιμοποιείται στο πείραμα.

Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα αλλάζοντας τη ποιότητα του σκυροδέματος:

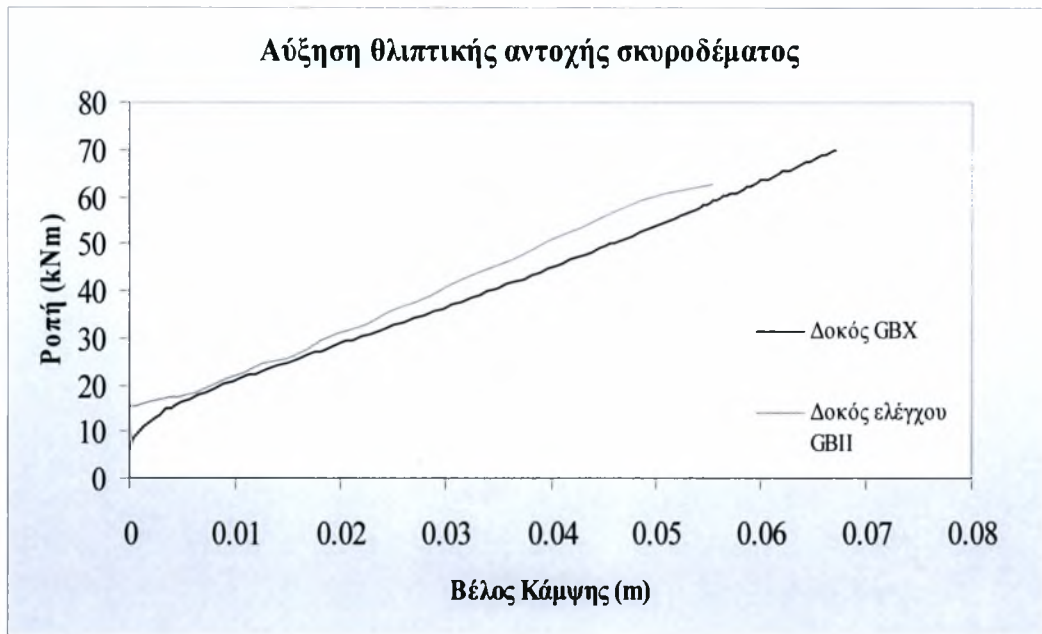
Για να διακρίνονται οι δοκοί αυτοί από τις άλλες τις ονομάζουμε δοκό GBIX, GBX και GBXI οπλισμένες με δύο, τρεις και τέσσερις ράβδους αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4.3.1 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBI και GBIX

Πίνακας 5.4.3.1 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBI και GBVI

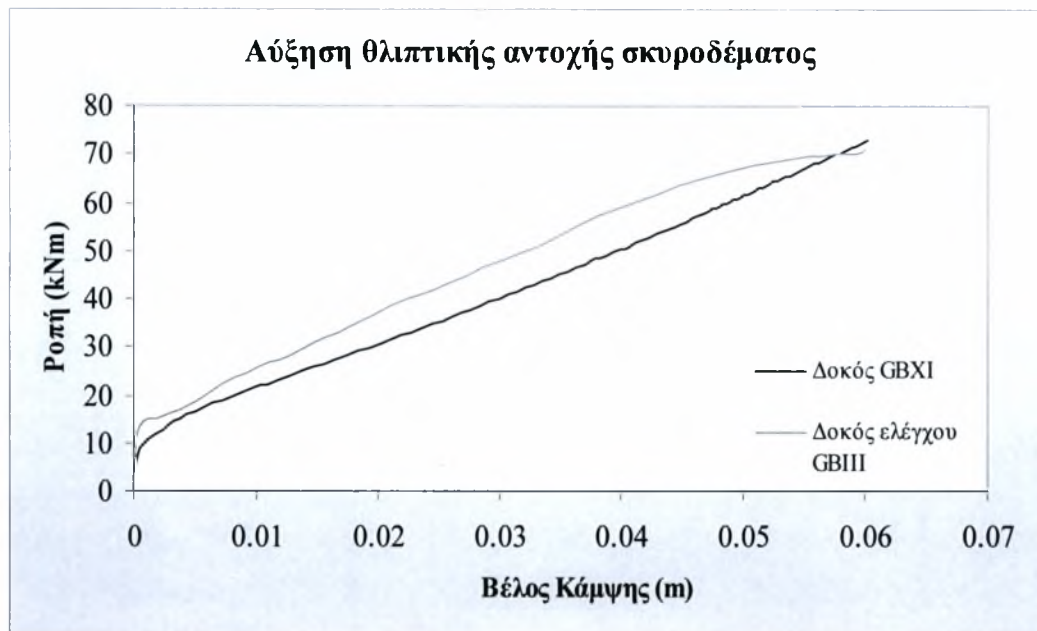
Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBI (Δοκός ελέγχου)	11.7	60	0.27	70
GBIX	9.88	59.59	0.89	79.97



Σχήμα 5.4.3.2 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBII και GBX

Πίνακας 5.4.3.2 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBII και GBX

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBII (Δοκός ελέγχου)	13.4	65	0.548	60
GBX	9.95	70,09	0.906	67.21



**Σχήμα 5.4.3.3 :** Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBIII και GBXI

**Πίνακας 5.4.3.3** Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBIII και GBVIII

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBIII (Δοκός ελέγχου)	11.8	71	0.68	61
GBVII	9.98	72.8	0.911	60.66



#### 5.4.3.1 Συμπεράσματα:

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 5.4.3.1, 5.4.3.2 και 5.4.3.3 η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση της αντοχής της διατομής.

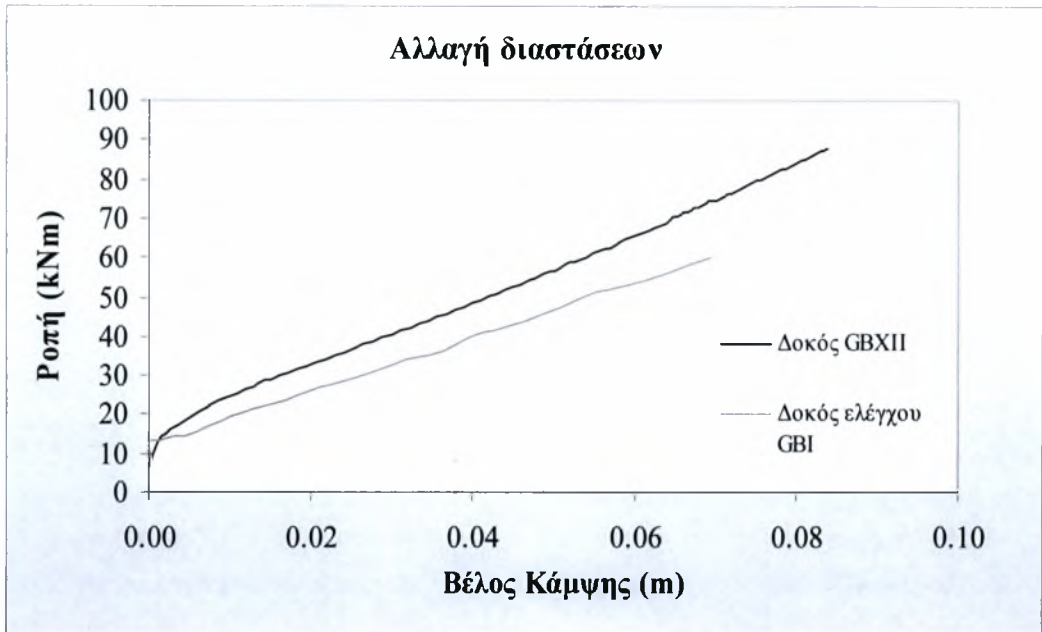
Επίσης προκύπτει αύξηση της πλαστιμότητας, αποτέλεσμα όχι ρεαλιστικό, αφού η συμπεριφορά του βελτιωμένου σκυροδέματος αναμένεται περισσότερο ψαθυρή.

Τα αποτελέσματα που προκύπτει οφείλονται στο ότι στο μοντέλο πρόβλεψης χρησιμοποιείται το συμβατικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος με οριακή ανηγμένη παραμόρφωση ίση με 3,5 ‰ για κάθε τύπο σκυροδέματος.

#### 5.4.4 Αύξηση διαστάσεων διατομής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση όταν ως μεταβλητή παράμετρος θεωρήθηκε η ροπή αδρανείας της διατομής. Συγκεκριμένα για τη σύγκριση χρησιμοποιούμε δοκούς με διατομή 25 × 35 cm αντί 18 × 30 cm που χρησιμοποιείται στο πείραμα.

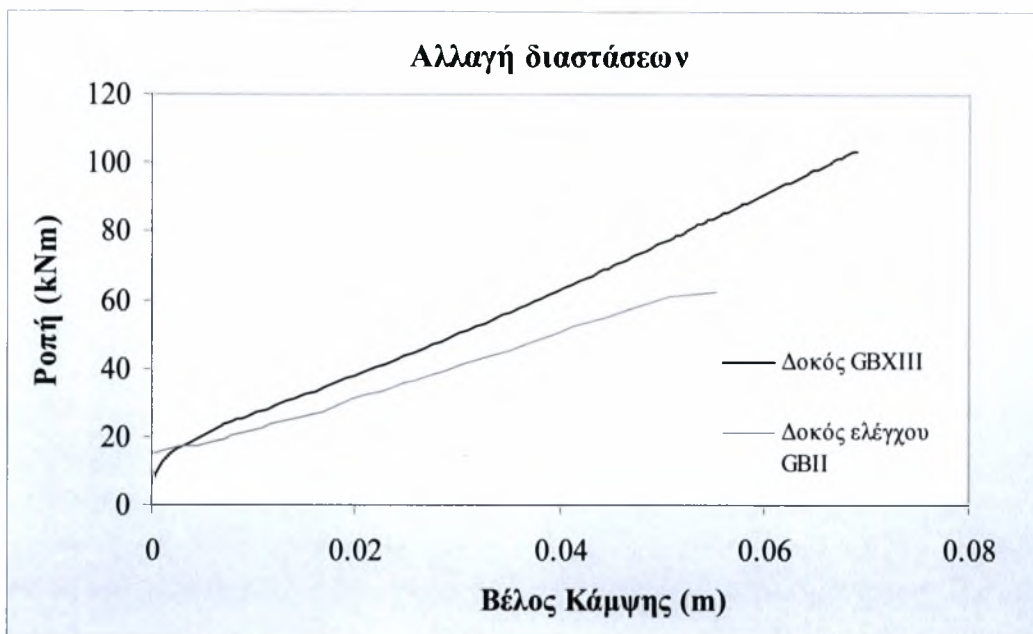
Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα αλλάζοντας τις διαστάσεις των δοκών: Για να διακρίνονται οι δοκοί αυτοί από τις άλλες τις ονομάζουμε δοκό GBXII, GBXIII και GBXIV οπλισμένες με δύο, τρεις και τέσσερις ράβδους αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4.4.1 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBI και GBXII

Πίνακας 5.4.4.1 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBI και GBXII

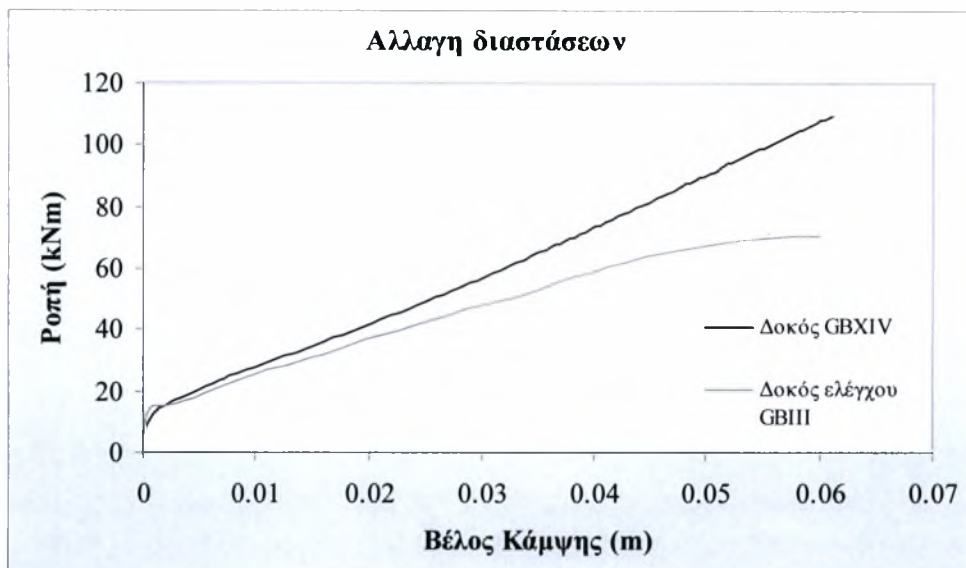
Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBI (Δοκός ελέγχου)	11.7	60	0.27	70
GBXII	16.45	87.9	2.71	83.9



Σχήμα 5.4.4.2 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBII και GBXIII

Πίνακας 5.4.4.2 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBII και GBXIII

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBII (Δοκός ελέγχου)	13.4	65	0.548	60
GBXIII	16.53	103,72	2.58	68.96



Σχήμα 5.4.4.3 : Διάγραμμα βέλους κάμψης – ροπής δοκών GBIII και GBXI

Πίνακας 5.4.4.3 Συγκεντρωτικός και συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για την ομάδα δοκών GBIII και GBXIV

Δοκός	Ροπή Ρηγμάτωσης (kNm)	Ροπή Αστοχίας (kNm)	Βέλος Κάμψης Ρηγμάτωσης (mm)	Βέλος Κάμψης Αστοχίας (mm)
GBIII (Δοκός ελέγχου)	11.8	71	0.68	61
GBXIV	16.56	109.48	2.5	61.05

#### 5.4.4.1 Συμπεράσματα:

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 5.4.4.1, 5.4.4.2 και 5.4.4.3 η αύξηση των διαστάσεων της διατομής από  $18 \times 30$  cm σε  $25 \times 35$  cm είχε ως αποτέλεσμα την κατά πολύ αύξηση της αντοχής της δοκού με ταυτόχρονη μικρή αύξηση του βέλους κάμψης.

Η συμπεριφορά αυτή είναι πολύ εντονή πριν τη ρηγμάτωση αφού η ροπή ρηγμάτωσης αυξάνεται κατά μέσο όρο και για τις τρεις δοκούς κατά 35%.

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Γενικά συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της έρευνας αυτής, θα επικεντρωθούν σε δύο τομείς: Πρώτον στη σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκών που έχουν οπλιστεί με ράβδους χάλυβα και ράβδους GFRP και δεύτερον στην ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του προγράμματος πρόβλεψης σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα που προβλέπουν οι διατάξεις σχεδιασμού δομικών έργων από σκυρόδεμα με συνθετικό οπλισμό του Καναδά.

Συγκρίνοντας τις δύο δοκούς ως προς τη συμπεριφορά τους υπό στατική μονοτονική φόρτιση, παρατηρήθηκε ότι μέχρι τη στιγμή της ρηγμάτωσης ήταν παρόμοια. Μετά τη ρηγμάτωση όμως, λόγω του μικρού μέτρου ελαστικότητας των ράβδων του συνθετικού οπλισμού σε σχέση με αυτό του χάλυβα ( 40 GPa έναντι 200 GPa ), στις δοκούς που έχουν οπλιστεί με ράβδους GFRP, έχουμε ανάπτυξη διατμητικών τάσεων με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν βαθύτερες και ευρύτερες ρωγμές. Χαρακτηριστικές είναι οι φωτογραφίες 4.1.4 και 4.2.15, 4.1.6 και 4.2.16.

Μετά τη ρηγμάτωση πάλι, στις δοκούς με GFRP, παρουσιάζεται μεγάλη μείωση στη σχέση φορτίου - βέλους κάμψης (μείωση της ακαμψίας), το οποίο οφείλεται στο μικρό μέτρο ελαστικότητας των ράβδων από συνθετικό οπλισμό καθώς επίσης και στις βαθύτερες και ευρύτερες ρωγμές που παρουσιάζουν αυτοί οι δοκοί.

Παρατηρείται επίσης ότι οι δοκοί με GFRP είχαν μεγαλύτερη αλλά συγκρίσιμη αντοχή με αυτές που είχαν οπλιστεί με χάλυβα. Το βέλος κάμψης όμως που παρουσίαζαν οι δοκοί με τον συνθετικό οπλισμό είναι σχεδόν κατά μέσο όρο τρεις φορές μεγαλύτερο.

Οι δοκοί με χάλυβα μετά το πέρας της διαρροής, παρουσιάζουν μια απότομη αύξηση του βέλους κάμψης, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.3.1.2. Αυτό όμως δεν συμβαίνει στις δοκούς με GFRP, οι οποίες παρουσιάζουν μια σταθερή πλαστιμότητα παρ' όλη τη σταθερή φύση των ράβδων GFRP.

Επίσης, τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης στις δοκούς με GFRP, παρουσιάζουν κάποιες ανωμαλίες, πράγμα το οποίο οφείλεται στη θραύση ορισμένων ινών

των ράβδων, ως αποτέλεσμα της τέμνουσας λόγω επικάλυψης, σε αντίθεση με τις δοκούς με χάλυβα στις οποίες δεν παρατηρείται η ανωμαλία αυτή.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το βέλος κάμψης για τις δοκούς με συνθετικό οπλισμο διαδραματίζει ίσως τον σημαντικότερο ρόλο για το σχεδιασμό τους.

Τα αποτελέσματα των προγραμμάτων πρόβλεψης όπως παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο, είναι αποδεκτά όπως προκύπτει κατά τη σύγκρισή τους με τα πειραματικά δεδομένα του τετάρτου κεφαλαίου. Σημειώνεται ότι για το μοντέλο πρόβλεψης λαμβάνονται υπόψη το συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος ( Ε.Κ.Ο.Σ ), ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος 0,35 % και το πειραματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα. Επίσης για τον υπολογισμό της καμπτικής ροπής λαμβάνεται υπόψη η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των προγραμμάτων πρόβλεψης θεωρούνται ρεαλιστικά όταν έχει εξασφαλιστεί η αντοχή έναντι τέμνουσας. Το πρόγραμμα πρόβλεψης δεν λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε ολίσθηση των ράβδων GFRP.

Για τον υπολογισμό του προβλεπόμενου βέλους κάμψης, χρησιμοποιήθηκαν τρία μοντέλα. Ο απλοποιητικός τύπος υπολογισμού για τις δοκούς με χάλυβα, ο αναλυτικός τύπος για τις δοκούς με GFRP και τέλος ο απλοποιητικός τύπος που δίνει ο καναδέζικος κανονισμός ( ISIS ) πάλι για τις δοκούς με GFRP.

Δοκιμάζοντας το μοντέλο με τον απλοποιητικό τύπο από τον Ευρωκώδικα, παρατηρούμε ότι υπερεκτιμά το βέλος κάμψης προσδίδοντας μεγαλύτερη πλαστιμότητα από τη πραγματική.

Αντίθετα το μοντέλο που βασίζεται στον αναλυτικό τύπο προσφέρει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό φαίνεται και στις τρεις περιπτώσεις των δοκών που μελετήσαμε, όπου η απόκλιση είναι της τάξης του 5 % κατά μέσο όρο (για την αστοχία).

Ο καναδέζικος κανονισμός πάλι υπερεκτιμά το βέλος κάμψης. Η απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα που προκύπτει είναι της τάξης του 15 %.

Συγκρίνοντας τα διάφορα μοντέλα για τις ροπές αδρανείας  $I_e$ , ικανοποιητικότερο αποτέλεσμα μας έδωσε αυτό του αμερικάνικου κανονισμού ( ACI ). Όλα τα υπόλοιπα έδιναν μικρότερη ροπή αδρανείας με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται το βέλος κάμψης συγκριτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Όπως προκύπτει από τη παραμετρική ανάλυση το είδος του υλικού του συνθετικού οπλισμού και κατ' επέκταση το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά της δοκού.



Όπως προκύπτει, όταν χρησιμοποιήσαμε ράβδους με CFRP (άνθρακα), οι οποίες είχαν σχεδόν τριπλάσιο μέτρο ελαστικότητας, η ροπή αστοχίας αυξήθηκε σχεδόν κατά 30 %, ενώ το βέλος κάμψης στην αστοχία μειώθηκε κατά 37,5 %. Συμπερασματικά αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που χρησιμοποιείται για οπλισμό, αυξάνεται η δυσκαμψία της δοκού κυρίως μετά τη ρηγμάτωση, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πλαστιμότητα της.

Κλείνοντας αυτή τη πειραματική έρευνα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εισαγωγή στον τεχνικό κόσμο ενός νέου τύπου υλικού όπως είναι ο συνθετικός οπλισμός, χρειάζεται περισσότερη πειραματική αναζήτηση και θέσπιση αναλυτικότερων και πιο εμπειριστατωμένων διατάξεων σχεδιασμού τα οποία θα βοηθήσουν στην αξιοποίηση αυτού του νέου υλικού.

Τα βήματα προόδου που σημειώνονται τα τελευταία χρόνια στο τομέα αυτό είναι αρκετά και σημαντικά και όλα δείχνουν ότι το νέο αυτό υλικό με τις πολλές και ποικίλες ιδιότητες του, θα αντικαταστήσει σε πολλές χρήσεις τον συμβατικό χάλυβα οπλισμού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αχιλλίδης Ζήνωνας και Πηλακούτας Κύπρος, “ Τάση Συνάφειας ράβδων όπλισης από FRP (Fiber Reinforced Plastics) με το Σκυρόδεμα ”.
- [2] Αθανάσιος Καραμπίνης και Σταυρούλα Πανταζόπουλου, “ Η Χρήση των Σύνθετων Υλικών στο Σχεδιασμό και την Ενίσχυση Στοιχείων Ο.Σ. ”, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, 1, τεύχ. 3 2000.
- [3] ISIS Canada, Design Manual No .3, “ Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers ”, September 2004.
- [4] Banthia N. and MacDonald R. (1996), “ Durability of Fiber-Reinforced Plastics and Concretes ”, Part 1: Durability of Components, Submitted to ACMBS Network of Canada, 25 p.
- [5] Phillips, L.G. (1989). “ Design with Advanced Composite Materials ”, Springer-Verlag.
- [6] ACI (1995). “ State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures ”.
- [7] Τριανταφύλλου, Α., (2003), “ Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά ”
- [8] McKenna J. K. and Erki M. A.: “ Strengthening of R. C. Flexural Members using Externally Applied Steel Plates and Fiber Composite Sheets – a Survey ”, Canadian Journal of Civil Engineering, 21 (1), 1994 pp.16-24.
- [9] Meier U., “ Composites for Structural Repair and Retrofitting ”. Proceedings, 1<sup>st</sup> International Conference on Composites in Infrastructure, Tuscon, Arizona, U.S., 1996, pp.1202-1216.
- [10] Nanni A. et al., “ Tensile Properties of Braided FRP Rods for Concrete Reinforcement ”, Cement and Concrete Composites, 1993, pp.121-129.
- [11] Uomoto, T., Hodhod, H.: “ Evaluation of Tensile Strength of FRP Rods Aligned Continuous Fibres ”, Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference on Advanced Comp. Materials in Bridges and Structures, (Eds:) K.W. Neale and P.Labossiere, Sherbrooke, Canada, 1992, pp.63-72.

- [12] Nanni A. et al, “ Bond of FRP reinforcement to concrete – Experimental results ”, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, ed. L. Taerwe, Aug 95, pp. 137-145.
- [13] Malvar J. L., “ Tensile and Bond Properties of GFRP Reinforcing Bars ”, ACI Materials Journal, V. 92, No. 3, May-June 1995, pp. 276-285.
- [14] Larralde J. Silva-Rodriqez R., “ Bond and slip of FRP repairs in concrete ”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 5, No 1, Feb 93.
- [15] Chaallal O., Benmokrane B., “ Pullout and bond of glass-fiber rods embedded in concrete and cement grout ”, Materials and Structures, 1993, Vol 26, pp. 167-175.
- [16] “ Guidelines for Structural Design of FRP Reinforced Concrete Building Structures” (Draft), FRP Reinforced Concrete Research Group, Building Research Institute, Japanese Ministry of Construction, July 1995.
- [17] Tepfers R., Hedlund G., Rosinski B.: “ Pull-out and Tensile Reinforcement Splice Tests with GFRP Bars ”, Second International Conference on Composites in Infrastructure, Vol. II, Tuscon AZ, 1998, pp.37-51.
- [18] Erki, M.-A., and Rizkalla, S.H. (1993). “ FRP Reinforcements for Concrete Structures: A Sample of International Production ,” Concrete International, V.15, No. 6, June 1993, pp. 48-53.
- [19] Chaallal, O. and Benmokrane, B. (1993). “ Physical and Mechanical Performance of an Innovative Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod, ” Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.20, No. 2, pp. 254-268.
- [20] Katz, A., Berman, N., and Bank, L.C. (1998). “ Effect of Cyclic Loading and Elevated Temperature on the Bond Properties of FRP Rebars,” International Conference on the Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, Sherbrooke, Quebec, pp. 403-413.
- [21] Katz, A., Berman, N., and Bank, L.C. (1999). “ Effect of High Temperature on the Bond Strength of FRP Rebars,” Journal of Composites for Construction, May 1999
- [22] Sayed-Ahmed E.Y., and Shrive N.G. (1999). “ Smart FRP Prestressing Tendons: Properties and Prospects, ” Proceedings of the Second Middle East Symposium on Structural Composites for Infrastructure Applications, Edited by Hosny, Mahfouz and Sarkani, pp. 80-93.

- [23] Coomarasamy, A. and Goodman, S. (1997). Investigation of the Durability Characteristics of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Materials in Concrete Environment, America Society for Composites-Twelfth Technical Conference, Dearborn, Michigan.
- [24] Gerritse, A. (1992). “ Durability Criteria for Non-Metallic Tendons in an Alkaline Environment, ” Proceedings of the First International Conference on Advance Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-I), Canadian Society of Civil Engineers, Sherbrooke, Quebec, pp. 129-137.
- [25] Porter, M.L., Mehus, J., Young, K.A., O’Neil, E.F., and Barnes, B.A. (1997). “ Aging of Fiber Reinforcement in Concrete, ” Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, V. 2, pp. 59-66.
- [26] Porter, M.L., and Barnes, B.A. (1998). “ Accelerated Durability of FRP Reinforcement for Concrete Structures, ” Proceedings of the First International Conference on Composites for Construction (CDCC 1998), Sherbrooke, Quebec, pp. 191-198.
- [27] Αχιλλίδης Ζήνωνας και Πηλακούτας Κύπρος, “ Χρησιμοποίηση ινο-οπλισμένων πλαστικών στην όπλιση σκυροδέματος ”.
- [28] Tanigaki, M., Okamoto, T., Tamura, T., Matsubara, S., and Nomura, S. (1989). “ Study of Braided Aramid Fiber Rods for Reinforcing Concrete, ” Braided Aramid Rods for Reinforcing Concrete, FiBRA.
- [29] Commercialization of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebars, Doug Gremel, Hughes Brothers, July 1999, SEA0H Convention 1999 Concrete for the New Millenium
- [30] Pecce, M., Manfredi, G., and Cosenza, E. “ Experimental Response and Code Models of GFRP RC Beams in Bending ”, Journal of Composites for Construction, November 2000, pp. 182-190.
- [31] American Concrete Institute (ACI). (1996b). “ State of Art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures. ” ACI 440R-96, Detroit.
- [32] Nanni, A. (1993). “ Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP reinforcement. ” J. Struct. Engrg., ASCE, 119(11), pp. 3344-3359.

- [33] GangaRao, H. V. S., and Vijay, P. V. (1997). “Design of Concrete Members Reinforced with GFRP bars. ” Proc., 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer for Concrete Struct., Japan Concrete Institute, Tokyo, pp. 143-150.
- [34] Alsayed, S. H. (1996). “ Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars ”, Cement and Concrete Composites 20 (1998), pp. 1-11.
- [35] Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R. (1994) “ Glass Fibre Reinforced Plastic (GFRP) Rebars for Concrete Structures ”, Construction and Building Materials, Vol. 9, No 6, pp. 353-364.
- [36] Alsayed, S. H., Al-Salloum, Y. A., Almusallam, T.H. “ Performance of Glass Fibre Reinforced Plastic bars as a Reinforcing Material for Concrete Structures ”, Composites: Part B 31 (2000), PP. 555-567.
- [37] Abdalla, H. A., “Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars ”, Composite Structure 56 (2002), pp. 63-71.
- [38] Toutanji, H., Deng, Y., “Deflection and Crack- Width Prediction of Concrete Beams Reinforced with Glass FRP Rods ”, Construction and Building Materials 17 (2003), PP. 69-74.
- [39] Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος (Ε.Κ.Ο.Σ)
- [40] Vecchio, F., Collins, M., (1986) “ The Modified Compression – Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear ”, ACI Journal, No. 83-22, pp. 219-231.
- [41] Fyfe, E. R., Gee, D.J., Milligan, P.B., “ Composite Materials for Rehabilitation of Civil Structures and Seismic Applications ”, 6<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-13.
- [42] Rasheed, H. A., Nayal, R., Melhem, H., “ Response Prediction of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars ”, Composite Structures 65 (2004), pp. 193-204.
- [43] ACI 318-99. “ Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary ”. ACI Committee 318, American Concrete Institute, Detroit, 1999, 391 p.
- [44] ACI Committee 318, “ Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary ” (ACI 318-92/ACI 318R-92). American Concrete Institute, Detroit, 1992, 353 p

- [45] Gao, D., Benmokrane, B., Masmoudi, R. A Calculating Method of Flexural Properties of FRP- Reinforced Concrete Beams. Part 1: Crack Width and Deflection. Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 1998, 24 p.
- [46] Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R. Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars. ACI Struct. J 1996;93(1): pp. 46-55.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074836