



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΦΥΣΙΚΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ,  
ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ C-FRP. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΔΟΚΟ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ Σ. ΜΑΥΡΟΔΑΚΟΣ**

**Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**Αθήνα, Μάρτιος 2012**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας αυτής, είναι η θεωρητική και πειραματική ανάλυση της καμπτικής συμπεριφοράς, δοκών σκυροδέματος φυσικού μεγέθους, οπλισμένων με διαφορετικό είδος ράβδων, χαλύβδινων και C-FRP. Σκοπός της είναι να μελετηθεί η συμπεριφορά των ράβδων οπλισμού από C-FRP και να ελεγχθεί η ακρίβεια των εξισώσεων που έχουν προταθεί. Μετά από πειραματικές δοκιμές, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. (Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών) του Ε.Μ.Π., κάμψης τεσσάρων σημείων, σε δύο δοκούς σκυροδέματος, που είχαν ίδια ποιότητα σκυροδέματος και ίδια ποσότητα οπλισμού, προσδιορίστηκαν τα εξής στοιχεία: η ροπή ρηγμάτωσης, η καμπτική ροπή αντοχής, ο τρόπος και η απόσταση σχηματισμού των ρωγμών, το εύρος των ρωγμών και η βύθιση της δοκού, συναρτήσει της ασκούμενης φόρτισης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από αριθμητική εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων και εν τέλει παρουσιάζεται η μελέτη των αποτελεσμάτων αυτής της σύγκρισης.

## **ABSTRACT**

The purpose of this study is the theoretical and experimental analysis of flexural behavior of concrete beam-size, armed with different types of bars, steel bars and C-FRP bars. Its primary goal is to study the behavior of C-FRP reinforcing bars and to check the accuracy of the equations that have been proposed. Experimental trials were conducted at the Laboratory of Structural Mechanics S.R.S.E. (School of Rural and Survey Engineering) N.T.U.A.. The experiment was the four-point bending in two concrete beams, which had the same quality of concrete and same quantity of reinforcement bars. The following factors were identified: the cracking moment, the bending moment resistance, the manner of the formation of cracks and the space between them, the extent of cracks and the bending of the beams versus the applied load. The results were compared with those obtained by numerical application of theoretical models and there is presented the study results of this comparison.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μαρίνο Καττή για την εξαιρετική μας συνεργασία και όλους τους συναδέλφους στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ., ιδιαίτερα το συνάδελφο Νίκο Καραλή για την πολύτιμη βοήθειά του στα δύσκολα «τεχνικά» ζητήματα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους Αποστόλη Μανδέλη και Ηλία Καραχάλιο για τη βοήθεια, και της επίσης εξαιρετική συνεργασία μας.

Για την ολοκλήρωση της ζωής μου ως φοιτητής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την απεριόριστη βοήθεια που μου πρόσφεραν, ευρύτερα το οικογενειακό μου περιβάλλον για τη στήριξη και καθοδήγησή που μου παρείχαν και όλους μου τους φίλους για τις πιο ωραίες και αξιομνημόνευτες στιγμές της φοιτητικής μου ζωής.

Τελευταία μόνο στη σειρά και όχι στην ουσία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους αγωνιστές «καταληψίες» συναδέλφους με τους οποίους παλέψαμε και θα συνεχίσουμε να παλεύουμε για ένα δημόσιο, δωρεάν, δημοκρατικό και ζωντανό πανεπιστήμιο, για επιστημονική έρευνα στις ανάγκες του λαού και όχι της αγοράς και γενικότερα για μια κοινωνία απαλλαγμένη από κάθε εκμετάλλευση και καταπίεση.

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....</b>	<b>1</b>
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ FRP .....	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
1.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....</b>	<b>4</b>
Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	4
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
2.2 ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΕΩΝ- ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	4
2.2.1 Βασικές υποθέσεις .....	4
2.2.2 Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος .....	6
2.2.3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του οπλισμού από χάλυβα .....	7
2.2.4 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων του οπλισμού από FRP.....	8
2.3 Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ .....	9
2.4 Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ .....	12
2.4.1 Η κατάσταση της ισόρροπης διατομής .....	12
2.4.2 Η καμπτική αντοχή διατομής.....	15
2.5 Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ ΑΠΟ C-FRP .....	17
2.5.1 Η κατάσταση της ισόρροπης διατομής .....	17
2.5.2 Αστοχία από θρυμματισμό σκυροδέματος .....	21
2.5.3 Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού FRP .....	22

---

2.6	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ .....	25
2.6.1	Ροπή ρηγμάτωσης στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα .....	25
2.6.2	Ροπή ρηγμάτωσης στη δοκό με οπλισμό C-FRP .....	26
2.7	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ EC2 .....	28
2.7.1	Ροπή αντοχής στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα .....	28
2.7.2	Ροπή αντοχής στη δοκό με οπλισμό από C-FRP .....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>		<b>31</b>
	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ.....	31
3.1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΡΩΓΜΩΝ .....	31
3.1.1	Εύρος ρωγμών για οπλισμό από χάλυβα σύμφωνα με EC2 .....	31
3.1.2	Εύρος ρωγμών για οπλισμό από C-FRP .....	33
3.2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ .....	35
3.2.1	Βύθιση δοκού με οπλισμό από χάλυβα.....	35
3.2.2	Βύθιση δοκού με οπλισμό C-FRP .....	35
3.3	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΡΩΓΜΩΝ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ .....	36
3.3.1	Εύρος ρωγμών στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα.....	36
3.3.2	Εύρος ρωγμών στη δοκό με οπλισμό από C-FRP .....	39
3.4	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ .....	42
3.4.1	Μέγιστη βύθιση στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα .....	42
3.4.2	Βέλος κάμψης στη δοκό με οπλισμό από C-FRP .....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>		<b>48</b>
	Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....	48
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	48

---

4.2	ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ.....	49
4.3	ΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ .....	52
4.4	Η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ .....	54
4.5	Η ΡΟΠΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ.....	57
4.6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ.....	57
4.7	ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ.....	59
4.8	Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ .....	60
4.9	ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ.....	61
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>64</b>
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	64
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	64
5.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....	70
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	72
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Πειραματικές μετρήσεις μέγιστης βύθισης .....	73
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Πειραματικές μετρήσεις του εύρους ρωγμών .....	78

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ FRP

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια προσπάθεια, σε διεθνές επίπεδο, να μελετηθούν τύποι οπλισμού, για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, εναλλακτικές από τον παραδοσιακό χαλύβδινο οπλισμό. Οι αιτίες αυτής της προσπάθειας είναι πολλές. Η μακροχρόνια εμπειρία από τη χρήση των ράβδων οπλισμού από χάλυβα, έχει αποκαλύψει αρκετά μειονεκτήματα του συγκεκριμένου οπλισμού, που σε ερευνητικό επίπεδο γίνεται προσπάθεια να ξεπεραστούν. Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα του οπλισμού αυτού, είναι η υποβάθμιση της αντοχής που υφίσταται, όταν είναι εκτεθειμένος σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η διάβρωση του οπλισμού, πέρα από την υποβάθμιση της αντοχής των οπλισμένων δομικών στοιχείων, προξενεί ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα λόγω της αύξησης του όγκου του χαλύβδινου οπλισμού. Το πρόβλημα της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού, έχει καταγραφεί ως το βασικότερο σε έκταση πρόβλημα στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, πρόβλημα διάβρωσης έχει υποστεί το 70% του συνόλου των γεφυρών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο/Σ), ενώ στην Ευρώπη, το κόστος επισκευών των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω διάβρωσης του οπλισμού, θα ξεπεράσει τα 600 εκατομμύρια δολάρια ετησίως.

Για το ξεπέρασμα των προβλημάτων της διάβρωσης, σε συνδυασμό με την προσπάθεια που γίνεται για την αύξηση της αντοχής των δομικών στοιχείων Ο/Σ, έχει εισαχθεί, εδώ και λίγα χρόνια, ένα νέο είδος οπλισμού, γνωστό ως οπλισμός FRP. Αυτό το υλικό, όπως και κάθε νέο υλικό που εισάγεται στη βιομηχανία, θα πρέπει να μελετηθεί εκτενώς ώστε να αναπτυχθεί η απαραίτητη τεχνογνωσία, για την ασφαλή χρήση του στην πράξη. Μέχρι τώρα, το FRP, χρησιμοποιείται εκτενώς, για την επισκευή ή ενίσχυση υφιστάμενων



δομικών στοιχείων κατασκευών Ο/Σ, ως εξωτερικός οπλισμός με τη μορφή φύλλων ή ελασμάτων. Ράβδοι οπλισμού έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ, στον Καναδά, την Ιαπωνία και σε άλλες χώρες, κυρίως σε τεχνικά έργα υποδομής, όπως σήραγγες ή γέφυρες.

Το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI), η Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών (JSCE), η Καναδική Ένωση Προτύπων και το Καναδικό δίκτυο (ISIS), αλλά και στην Αγγλία, την Ιταλία και την Αίγυπτο, έχουν αναπτύξει την «πρώτη γενιά» οδηγιών σχεδιασμού για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με οπλισμό FRP. [1,2,3]

## 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς δοκών σκυροδέματος με οπλισμό FRP. Η θεωρητική διερεύνηση θα περιλαμβάνει:

- Την παρουσίαση των μοντέλων, που έχουν εισαχθεί στην βιβλιογραφία για την περιγραφή της καμπτικής αντοχής και της λειτουργικότητας δοκών σκυροδέματος οπλισμένων με ράβδους FRP και χάλυβα.
- Χρήση των μοντέλων αυτών για την θεωρητική πρόβλεψη της συμπεριφοράς δοκών συγκεκριμένων διαστάσεων και ποσοστού οπλισμού που θα χρησιμοποιηθούν στην πειραματική έρευνα.
- Την εκτέλεση πειραματικών δοκιμών σε δοκούς φυσικού μεγέθους, για να μελετηθεί η καμπτική τους αντοχή, ο τρόπος σχηματισμού καμπτικών ρωγμών, το εύρος των ρωγμών και η κατακόρυφη βύθιση των καμπτόμενων δομικών στοιχείων.

## 1.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 της εργασίας, περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές θεωρίες καμπτικής αντοχής δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα και C-FRP. Παρουσιάζονται οι βασικές υποθέσεις και παραδοχές των θεωριών αυτών και δείχνονται τα διαγράμματα τάσεων-

παραμορφώσεων που χρησιμοποιούνται στις θεωρίες αυτές. Στη συνέχεια, με βάση τις θεωρίες αυτές, γίνεται ο θεωρητικός προσδιορισμός της καμπτικής αντοχής και της ροπής ρηγμάτωσης των δοκών που χρησιμοποιούνται στα πειραματικά προγράμματα της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές θεωρίες για τον προσδιορισμό του εύρους ρωγμών και της εγκάρσιας βύθισης δοκών σκυροδέματος, με σπλισμό χάλυβα και C-FRP.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται το πειραματικό έργο της παρούσας εργασίας, που εκτελέστηκε στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ. Περιγράφεται η παρασκευή των πειραματικών δοκιμίων, η διαδικασία εκτέλεσης των πειραματικών δοκιμών και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

# **Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τις βασικές θεωρίες καμπτικής αντοχής δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα και C-FRP και στη συνέχεια με βάση τις θεωρίες αυτές, θα αναλύσουμε τις τρεις δοκούς που χρησιμοποιήσαμε στην πειραματική έρευνα. Συγκεκριμένα, θα παρουσιάσουμε τις εξισώσεις που διέπουν την κατάσταση της ισόρροπης διατομής ενός δομικού στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος και στη συνέχεια, τις εξισώσεις με τις οποίες προσδιορίζεται η θεωρητική καμπτική αντοχή μιας διατομής για τα δύο είδη οπλισμού που προαναφέρθηκαν. Επίσης, θα παρουσιάσουμε τις εξισώσεις, που περιγράφουν την καμπτική συμπεριφορά της δοκού πριν και αμέσως μετά τη ρηγμάτωση.

### **2.2 ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

#### **2.2.1 Βασικές υποθέσεις**

Η ανάπτυξη των θεωριών καμπτικής αντοχής δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό χάλυβα ή C-FRP, στηρίζεται στις παρακάτω παραδοχές και υποθέσεις:

- Το δομικό στοιχείο είναι πρισματικό και βρίσκεται σε καθαρή κάμψη.
- Οι ορθές παραμορφώσεις σε κάθε σημείο της διατομής του δομικού στοιχείου, συμπεριλαμβανόμενης και της διατομής του οπλισμού, είναι ανάλογες με τις αποστάσεις τους από τον ουδέτερο άξονα της διατομής.
- Το σκυρόδεμα του δομικού στοιχείου θεωρείται με μη γραμμική συμπεριφορά. Οι ράβδοι οπλισμού από χάλυβα θεωρούνται με ελαστοπλαστική συμπεριφορά, ενώ οι ράβδοι οπλισμού από FRP θεωρούνται με γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. Η συμπεριφορά του σκυροδέματος και των ράβδων οπλισμού προσομοιώνεται με απλοποιημένα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων, που αποκτώνται στο εργαστήριο από τις δοκιμές της μονοαξονικής θλίψης, για το σκυρόδεμα, και του μονοαξονικού εφελκυσμού, για τις ράβδους οπλισμού. Οι χαρακτηριστικές μορφές των διαγραμμάτων αυτών θα παρουσιαστούν αμέσως παρακάτω.
- Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, συγκρινόμενη με την θλιπτική του αντοχή, είναι πολύ μικρή. Έτσι στις τεχνικές θεωρίες κάμψης των δομικών στοιχείων σκυροδέματος, στα πλαίσια των οριακών καταστάσεων, οι εφελκυσόμενες περιοχές θεωρούνται ρηγματωμένες και επομένως, δε παραλαμβάνουν εφελκυστικές τάσεις.
- Κατά την ανάλυση της διατομής του δομικού στοιχείου, για τον υπολογισμό της καμπτικής της αντοχής, υποθέτουμε πως υπάρχει “τέλειο” δέσιμο μεταξύ των ράβδων οπλισμού FRP και του σκυροδέματος που τις περιβάλλει.
- Οι διατομές των δομικών στοιχείων παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα του δομικού στοιχείου και μετά την παραμόρφωση του. Αυτό υποθέτουμε ότι συμβαίνει μέχρι την τελική αστοχία του δομικού στοιχείου.

Παρακάτω, θα παρουσιάσουμε τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος, των ράβδων του χάλυβα, όπως αυτά προτείνονται από τον EC2 για το σχεδιασμό δομικών στοιχείων σκυροδέματος. Για το διάγραμμα FRP χρησιμοποιούμε τη γραμμική συμπεριφορά που επιδεικνύει και εισάγουμε στο διάγραμμα αυτό, τους γενικούς όρους και συμβολισμούς που προτείνει ο EC2.

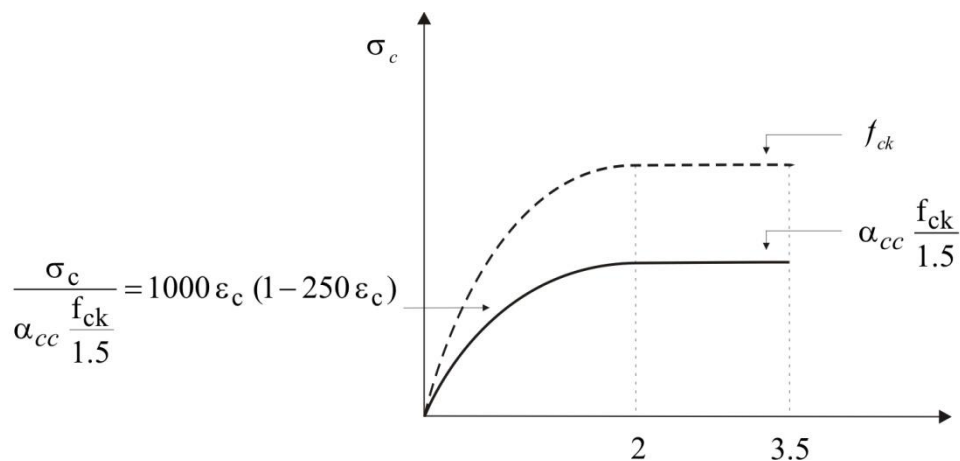
### 2.2.2 Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος, που χρησιμοποιείται στην ανάλυση της καμπτικής αντοχής ενός οπλισμένου δομικού στοιχείου σκυροδέματος, δείχνεται στο Σχήμα 2-1. Στο διάγραμμα αυτό, η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων προσομοιώνεται από έναν παραβολικό ανερχόμενο κλάδο και από έναν οριζόντιο κλάδο. Ο οριζόντιος κλάδος του διαγράμματος αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική τιμή  $f_{ck}$  της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Το σημείο που ενώνονται οι δύο κλάδοι, αντιστοιχεί σε θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος ίση με 2‰. Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση που μπορεί να αναπτυχθεί στο σκυρόδεμα είναι 3.5‰. Πέρα από την τιμή αυτή θεωρείται ότι το σκυρόδεμα έχει θρυμματιστεί.

Στο Σχήμα 2-1:

- το  $f_{ck}$  δηλώνει τη χαρακτηριστική τιμή αντοχής του σκυροδέματος,
- το  $f_{cd}$  δηλώνει την αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος. Η αντοχή αυτή ορίζεται με τη σχέση  $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ , όπου  $\gamma_c$  είναι ο μερικός συντελεστής ασφαλείας του σκυροδέματος.
- Ο συντελεστής  $a_{cc}$  εισάγεται για να δηλώσει τη μείωση της θλιπτικής αστοχίας του σκυροδέματος, λόγω μακροχρόνιας και επαναλαμβανόμενης δράσης των φορτίων.

Στην παρούσα εργασία, στον προσδιορισμό καμπτικής συμπεριφοράς των πειραματικών δοκών θα ληφθούν  $\gamma_c = 1$  και  $a_{cc} = 1$ .



Σχήμα 2-1 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα

### 2.2.3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του οπλισμού από χάλυβα.

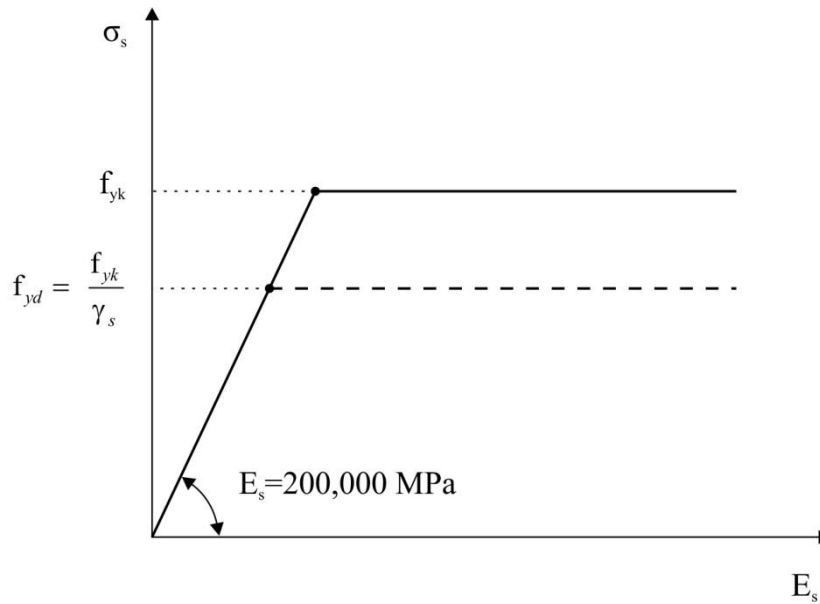
Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων των ράβδων οπλισμού από χάλυβα, που χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση φαίνεται στο Σχήμα 2-2. Η συμπεριφορά του χάλυβα θεωρείται πανομοιότυπη και σε εφελκυσμό και σε θλίψη. Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων συντίθεται από δύο γραμμικούς κλάδους: τον ελαστικό κλάδο που είναι κεκλιμένος ως προς τον άξονα των παραμορφώσεων, και τον πλαστικό κλάδο που είναι οριζόντιος. Οι δύο αυτοί κλάδοι περιγράφουν την ελαστική και πλαστική συμπεριφορά του χάλυβα, το σημείο που ενώνονται οι δύο κλάδοι ορίζει το σημείο διαρροής του υλικού. Η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής δηλώνεται με  $f_{yk}$  και ονομάζεται χαρακτηριστική τάση διαρροής. Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής δηλώνεται  $\varepsilon_{yk}$  και ονομάζεται χαρακτηριστική παραμόρφωση διαρροής. Οι αντίστοιχες

τιμές σχεδιασμού των δύο αυτών ποσοτήτων είναι οι  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  και  $\varepsilon_{yd} = \varepsilon_{yk} / \gamma_s$ , όπου

$\gamma_s$  είναι ο μερικός συντελεστής ασφάλειας. Στην παρούσα ανάλυση θα θεωρήσουμε  $\gamma_s = 1$ . Για όλες τις ποιότητες του χάλυβα, η κλίση του πρώτου κλάδου της καμπύλης που δηλώνει το μέτρο ελαστικότητας  $E_s$  του χάλυβα είναι σταθερή και λαμβάνεται ίση με  $E_s = 200000$  MPa. Επομένως, η παραμόρφωση διαρροής για σχεδιασμό, που

αντιστοιχεί στην τάση διαρροής για σχεδιασμό, θα είναι  $\varepsilon_{yd} = f_{yk} / \gamma_s E_s$ .

Αν και ο EC2 επιτρέπει τη χρήση εναλλακτικής καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για το χάλυβα, που έχει κεκλιμένο τον άνω κλάδο, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε οριζόντιο τον άνω κλάδο.



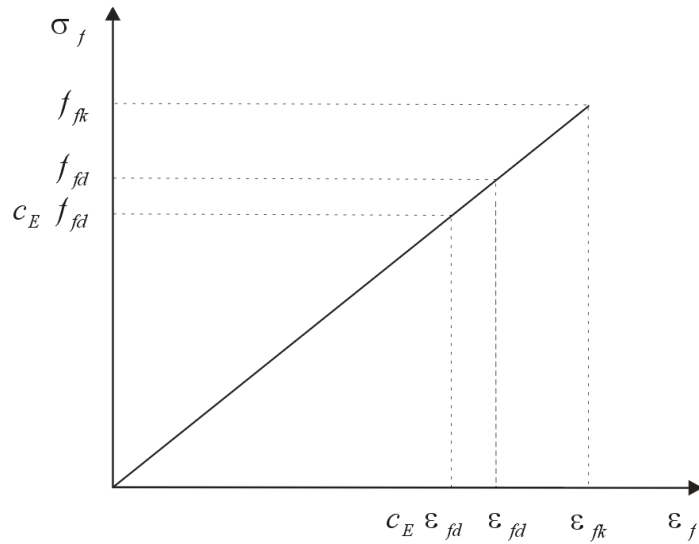
Σχήμα 2-2 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το χάλυβα

#### 2.2.4 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων του οπλισμού από FRP

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για μια ράβδο FRP που υιοθετούμε στην παρούσα εργασία δείχνεται στο Σχήμα 2-3. Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων των ράβδων FRP είναι γραμμική μέχρι τη θραύση τους. Η θραύση της ράβδου FRP αντιστοιχεί στην τάση  $f_{fk}$ , που είναι η χαρακτηριστική (εφελκυστική) αντοχή και αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική παραμόρφωση  $\epsilon_{fk}$ . Η αντοχή σχεδιασμού των ράβδων FRP δηλώνεται με  $f_{fd}$  και είναι ίση με  $f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f}$ .

Η αντίστοιχη τιμή παραμόρφωσης σχεδιασμού υπολογίζεται από το νόμο του Hooke  $\epsilon_{fd} = \frac{f_{fd}}{E_f}$ , όπου  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων FRP.

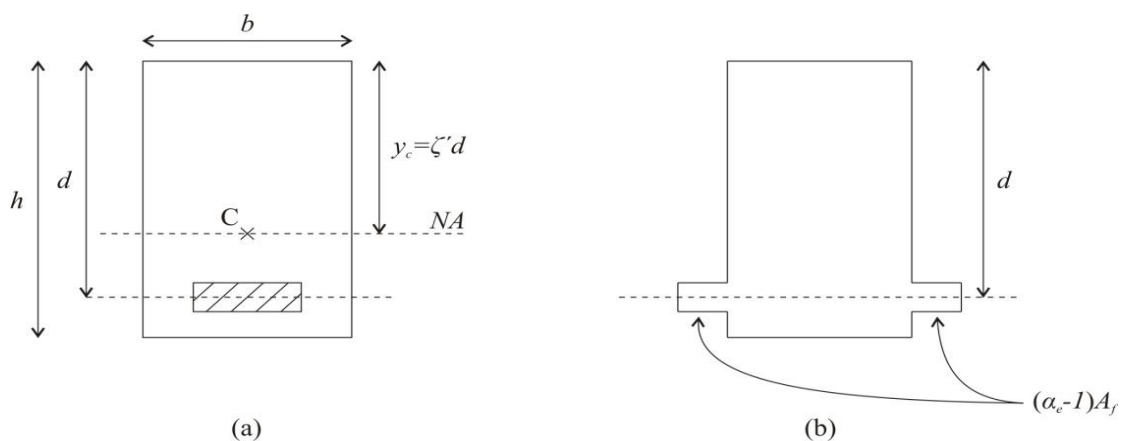
Επίσης, για πληρότητα αναφέρουμε μια επιπρόσθετη μείωση που γίνεται στην τάση σχεδιασμού λόγω του φαινομένου του ερπυσμού. Η μείωση αυτή γίνεται με το συντελεστή  $c_E$  που φαίνεται στο διάγραμμα. Στην ανάλυση της καμπτικής αντοχής του που θα γίνει παρακάτω θα χρησιμοποιήσουμε το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων που δείχνεται στο Σχήμα 2-3 για  $\gamma_f = 1$  και  $c_E = 1$



Σχήμα 2-3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων FRP

### 2.3 Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ

Η καμπτική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων πριν τη ρηγμάτωση είναι καθαρά ελαστική, ανεξάρτητα από τον τύπο οπλισμού. Στην περίπτωση αυτή, η ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων στη διατομή, γίνεται με το μετασχηματισμό της συνήθους διατομής, που αποτελείται από σκυρόδεμα και οπλισμό, σε μια ισοδύναμη διατομή μόνο από σκυρόδεμα.



Σχήμα 2-4 (α) Η διατομή των δοκών, (β) η ισοδύναμη μετασχηματισμένη διατομή

Έτσι, αν έχουμε την ορθογωνική διατομή του Σχήματος 2-4(a), που έχει διαστάσεις  $bh$  και εμβαδόν οπλισμού  $A_f$ , η ισοδύναμη μετασχηματισμένη διατομή, είναι αυτή που



δείχνεται στο Σχήμα 2-4(b). Στα Σχήματα αυτά, το  $d$  είναι το στατικό ύψος της διατομής, που είναι η απόσταση της πάνω επιφάνειας της διατομής από το κέντρο βάρους του οπλισμού. Η απόσταση του κέντρου βάρους της ισοδύναμης διατομής από την πάνω επιφάνεια της διατομής, είναι ίση με:

$$y_c = \zeta' d, \quad (2.1\alpha)$$

$$\text{όπου } \zeta' = \frac{0.5(h/d)^2 + (a_e - 1)\rho_r}{h/d + (a_e - 1)\rho_r}. \quad (2.1\beta)$$

Στη σχέση αυτή έχουν εισαχθεί οι παράμετροι:

$$\alpha_e = \frac{E_r}{E_c}, \quad \rho_r = \frac{A_r}{bd} \quad (2.2)$$

Η παράμετρος  $\alpha_e$  είναι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας των ράβδων οπλισμού προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, ενώ η παράμετρος  $\rho_r$  είναι το ποσοστό οπλισμού της διατομής. Η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης αυτής διατομής, ως προς τον άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους του οπλισμού και είναι παράλληλος στην πάνω και κάτω επιφάνεια της διατομής, παρέχεται από τη σχέση:

$$I_{ut} = \frac{bh^3}{12} + \left(0.5 - \zeta' \frac{d}{h}\right)^2 bh^3 + (1 - \zeta')^2 (\alpha_e - 1) A_r d^2 \quad (2.3)$$

Πριν τη ρηγμάτωση, η μεταβολή των τάσεων κατά το ύψος της διατομής, βρίσκεται από τη γνωστή σχέση κάμψης της αντοχής υλικών:

$$\sigma = \frac{M}{I_{ut}} y \quad (2.4)$$

όπου το  $y$  μετριέται από την ουδέτερη γραμμή. Η πρώτη ρωγμή στο σκυροδέμα θα εμφανιστεί, όταν η εφελκυστική τάση στην κάτω ίνα, που απέχει απόσταση  $y_t$  από τον ουδέτερο άξονα, γίνει ίση με την εφελκυστική αντοχή  $f_{ct}$  του σκυροδέματος, δηλαδή, όταν

$$\sigma_{(y=y_t)} = f_{ct} \quad (2.5)$$

Η καμπτική ροπή, που αντιστοιχεί στην εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, δηλώνεται με  $M_{cr}$ . Έτσι, από τις σχέσεις (2.4) και (2.5) προκύπτει:

$$\frac{M_{cr}}{I_{ut}} y_t = f_{ct} \quad (2.6)$$

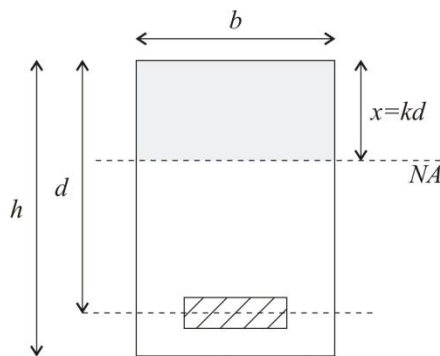
απ' όπου

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} I_{ut}}{y_t} \quad (2.7)$$

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, μπορεί να εκτιμηθεί από την εμπειρική σχέση

$$f_{ct} = f_{ck} = 0.3(f_{ck})^{2/3} \quad (2.8)$$

Όπου το  $f_{ck}$  δηλώνει τη χαρακτηριστική τιμή του σκυροδέματος. Αμέσως μετά το σχηματισμό της πρώτης ρωγμής στη διατομή, η διανομή των τάσεων καθ' ύψος, δείχνεται στο Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5 Η ρηγματωμένη διατομή της δοκού

Με το σχηματισμό της πρώτης ρωγμής στη διατομή, οι τάσεις της εφελκυσόμενης ζώνης, μεταβιβάζονται όλες στον οπλισμό, ενώ η διανομή των θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα παραμένει τριγωνική. Έτσι, αν οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στον οπλισμό, είναι  $\sigma_r$ , τότε η δύναμη στον οπλισμό θα είναι  $\sigma_r A_r$ , όπου  $A_r$  είναι το εμβαδόν του οπλισμού. Συνεπώς, η δύναμη αυτή μαζί με τη συνισταμένη του τριγωνικού διαγράμματος, συνθέτουν ένα ζεύγος δυνάμεων, με μοχλοβραχίονα

$$z = d - k \frac{d}{3} = \left(1 - \frac{k}{3}\right)d = \zeta d \quad (2.9)$$

όπου

$$k = \sqrt{(\rho_r \alpha_e)^2 + 2\rho_r \alpha_e} - \rho_r \alpha_e, \quad \zeta = 1 - \frac{k}{3} \quad (2.10)$$

Συνεπώς, η ροπή του ζεύγους αυτού θα είναι ίση με τη ροπή ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  δηλαδή

$$M_{cr} = (\sigma_r A_r) z \quad (2.11)$$

Από τη σχέση αυτή λαμβάνοντας υπόψη τη (2.9) προκύπτει

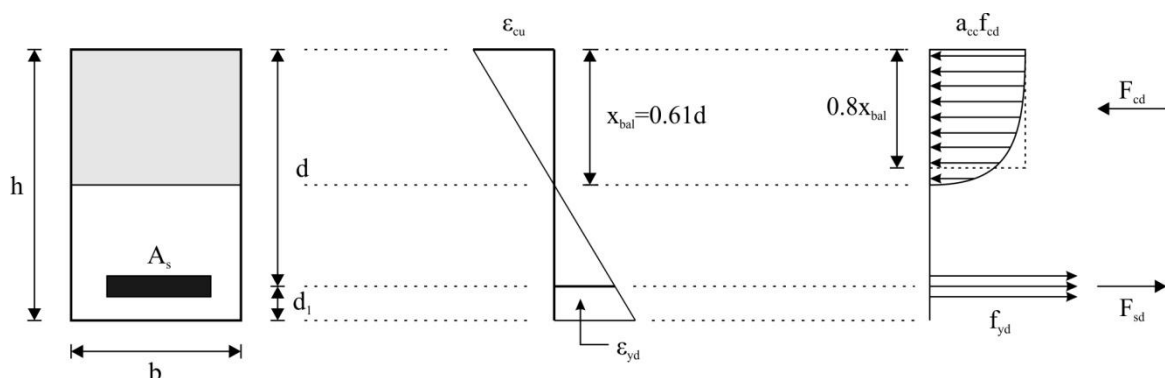
$$\sigma_r = \frac{M_{cr}}{A_r \zeta d} \quad (2.12)$$

## 2.4 Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

### 2.4.1 Η κατάσταση της ισόρροπης διατομής

Η καμπτική αντοχή δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό από χάλυβα θα αναλυθεί με βάση μια δοκό ορθογωνικής διατομής που δείχνεται στο Σχήμα 2-4. Η διατομή της δοκού έχει διαστάσεις  $b \times h$  και καταπονείται από καμπτική ροπή, χωρίς την παρουσία αξονικής δύναμης  $N$ . Η εντατική κατάσταση που αντιπροσωπεύει τη διατομή είναι αυτή της ρηγματωμένης δοκού, όπου οι εφελκυστικές ρωγμές «γεφυρώνονται» από τον οπλισμό του χάλυβα. Πριν ορίσουμε την έννοια της καμπτικής αντοχής της διατομής, θα συζητήσουμε μια ειδική κατάσταση της διατομής, που ορίζεται ως κατάσταση της ισόρροπης διατομής.

Γενικά, από τις υποθέσεις που προαναφέραμε, η διανομή των παραμορφώσεων  $\varepsilon$ , μεταβάλλεται γραμμικά στο ύψος της δοκού. Ανεξάρτητα, λοιπόν, από το αν η διατομή είναι ρηγματωμένη ή όχι, η διανομή των παραμορφώσεων κατά το ύψος της δοκού είναι σαν αυτή που δείχνεται στο Σχήμα 2-6.



Σχήμα 2-6 Η Ισόρροπη διατομή

Στο σχήμα αυτό με  $A_s$ , δηλώνεται το εμβαδό των ράβδων οπλισμού της διατομής που είναι τοποθετημένες στην κάτω επιφάνεια της δοκού. Η απόσταση του κέντρου βάρους της διατομής του οπλισμού από την πάνω πλευρά της διατομής ορίζει το στατικό ύψος  $d$  της διατομής. Η απόσταση του κέντρου βάρους της διατομής του οπλισμού από την κάτω πλευρά της διατομής δηλώνεται με  $d_1$ .

Η γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων είναι αποτέλεσμα των υποθέσεων, που έχουμε κάνει παραπάνω, που είναι κοινές για οποιοδήποτε είδος οπλισμού. Στο διάγραμμα αυτό, η ακραία πάνω τιμή, που είναι αρνητική, αντιστοιχεί στη μέγιστη παραμόρφωση που αναπτύσσεται λόγω της ροπής στο σκυρόδεμα, ενώ η ακραία κάτω τιμή που είναι θετική, αντιστοιχεί στη μέγιστη παραμόρφωση του χάλυβα.

Η μέγιστη παραμόρφωση (κατά απόλυτη τιμή) του σκυροδέματος θα δηλώνεται με  $\varepsilon_c$ . Πρακτικά, λόγω της παραδοχής για τη συμβιβαστικότητα των παραμορφώσεων του οπλισμού και του σκυροδέματος, η παραμόρφωση της διατομής στη θέση του χάλυβα θα αντιπροσωπεύει τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή που μπορεί να αναπτυχθεί στη διατομή. Η παραμόρφωση αυτή θα δηλώνεται με  $\varepsilon_s$ .

Η κατάσταση της ισόρροπης διατομής ορίζεται ως η κατάσταση εκείνη όπου η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος έχει προσεγγίσει την τιμή  $\varepsilon_{cu} = 3.5\%$ , ενώ την ίδια στιγμή η εφελκυστική παραμόρφωση του χαλύβδινου οπλισμού εισέρχεται στη διαρροή  $\varepsilon_{yd}$ .

Έχοντας ορίσει την κατάσταση της ισόρροπης διατομής και με δεδομένη τη γεωμετρία της διατομής και τον υπάρχοντα οπλισμό, θα αναζητήσουμε παρακάτω την καμπτική ροπή της διατομής που επιτυγχάνει αυτή την κατάσταση. Την καμπτική αυτή αντοχή, θα τη δηλώνουμε με  $M_{Rd,bal}$ , ενώ τον οπλισμό που αντιστοιχεί στην κατάσταση αυτή, με  $A_{s,bal}$ . Θα συζητήσουμε πρώτα ποια είναι η διανομή των ορθών τάσεων που αναπτύσσονται στη διατομή. Λόγω της υπόθεσης, ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι αμελητέα στο τμήμα της διανομής των θετικών παραμορφώσεων, οι τάσεις στο σκυρόδεμα θα είναι μηδενικές. Η μόνη μη μηδενική τάση στην περιοχή αυτή είναι η τάση στον χάλυβα. Επειδή η παραμόρφωση στο χάλυβα, για την ισόρροπη διατομή, υποθέτουμε ότι προσεγγίζει την τιμή  $\varepsilon_{yd}$ , δηλαδή  $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$ , η τάση θα είναι ίση με  $f_{yd} = E_s \varepsilon_{yd}$

$$(2.13)$$

Το πλάτος της διατομής που καταπονείται θλιπτικά, μπορεί να προσδιοριστεί με βάση το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, του Σχήματος 2-2. Το πλάτος αυτό, βρίσκεται ότι είναι:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} d \quad (2.14)$$

Στην περιοχή αυτή οι τάσεις βρίσκονται από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος. Οι τάσεις στην περιοχή αυτή έχουν κατανομή σαν αυτή που δείχνεται στο Σχήμα 2-1 και προσεγγιστικά η τιμή τους προκύπτει,

$$f_{cd} = a_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.15)$$

Η καμπυλόγραμμη μορφή των τάσεων στην περιοχή αυτή προσεγγίζεται με μια ομοιόμορφη διανομή τάσεων ίση με  $f_{cd}$  που εκτείνεται σε ένα πλάτος ίσο με  $0.8x_{bal}$ . Με μια τέτοια παραδοχή η συγκεντρωμένη δύναμη που καταπονεί όλη τη θλιπτική περιοχή του σκυροδέματος είναι ίση με

$$F_{cd} = 0.8x_{bal} b f_{cd} \quad (2.16)$$

Αντίστοιχα η συγκεντρωμένη δύναμη που εφελκύει τον οπλισμό θα είναι ίση με

$$F_{sd} = f_{yd} A_{s,bal} \quad (2.17)$$

Από την ισορροπία κατά τον άξονα της δοκού, θα έχουμε

$$F_{cd} = F_{sd} \quad (2.18)$$

Από τη σχέση αυτή παίρνοντας υπόψη τις (2.16), (2.17) έχουμε

$$f_{yd} A_{s,bal} = 0.8x_{bal} b f_{cd} \quad (2.19)$$

από όπου

$$A_{s,bal} = 0.8x_{bal} b \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \quad (2.20)$$

Για τον οπλισμό αυτό, η καμπτική ροπή που επιφέρει την κατάσταση της ισορροπίας διατομής είναι

$$M_{Rd,bal} = F_{sd} z_1 = F_{cd} z \quad (2.21)$$

από όπου

$$M_{Rd,bal} = 0.8x_{bal}bf_{cd}(d - 0.4x_{bal}) \quad (2.22)$$

ή

$$M_{Rd,bal} = f_{yd}A_{s,bal}(d - 0.4x_{bal}) \quad (2.23)$$

Η ροπή αυτή, όταν εφαρμόζεται στη διατομή επιφέρει την κατάσταση της ισόρροπης διατομής.

### 2.4.2 Η καμπτική αντοχή διατομής

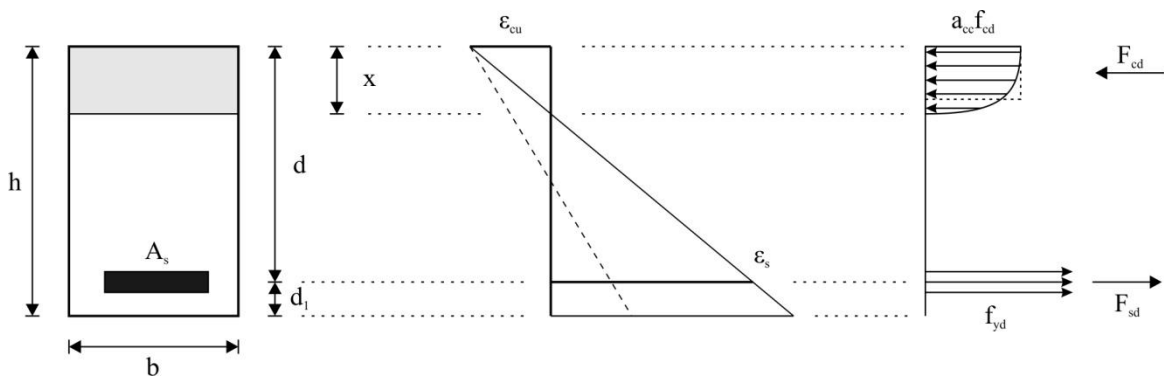
Όταν ο οπλισμός της διατομής είναι μικρότερος από τον οπλισμό που αντιστοιχεί στην ισόρροπη διατομή, δηλαδή όταν,

$$A_s < A_{s,bal} \quad (2.24)$$

τότε η διατομή είναι υπό-οπλισμένη. Σε αυτή την περίπτωση, η παραμόρφωση των ράβδων οπλισμού ικανοποιεί τη σχέση:

$$\varepsilon_s > \varepsilon_{yd} \quad (2.25)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η διανομή των παραμορφώσεων κατά το ύψος της διατομής είναι αυτή που δείχνεται στο Σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7 Η υπό-οπλισμένη διατομή

Προκειμένου να υπάρχει πλαστιμότητα στη διατομή, για να έχουμε δηλαδή μεγάλες παραμορφώσεις του δομικού στοιχείου πριν τη θραύση του, το δομικό στοιχείο θα πρέπει να είναι υπό-οπλισμένο, δηλαδή θα πρέπει να ισχύει η σχέση (2.24). Οι κανονισμοί απαιτούν ένα ορισμένο πάχος της θλιβόμενης ζώνης, πολύ μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί στην ισόρροπη διατομή.

Στην ισόρροπη διατομή για οπλισμό από χάλυβα, Κατηγορίας 500, η τάση διαρροής για σχεδιασμό είναι

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.15} = \frac{500}{1.15} = 434 \text{ MPa} \quad (2.26)$$

Για την τάση αυτή, η παραμόρφωση διαρροής για σχεδιασμό, θα είναι:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434}{200000} = 2.17\text{‰} \quad (2.27)$$

Συνεπώς το πάχος της θλιβόμενης ζώνης της ισόρροπης διατομής είναι

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} d = \frac{3.5\text{‰}}{3.5\text{‰} + 2.17\text{‰}} d = 0.61d \quad (2.28)$$

Για την επίτευξη της πλαστιμότητας ο EC2 θέτει ως όριο το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης να ικανοποιεί τη σχέση

$$x < 0.45d \quad (2.29)$$

Ο αντίστοιχος αμερικάνικος κανονισμός ACI-318 θέτει ένα αντίστοιχο όριο με έμμεσο τρόπο, απαιτώντας ο υπάρχων οπλισμός να ικανοποιεί τη σχέση

$$\rho = \frac{A_s}{bd} < 0.75\rho_{bal} = 0.75 \frac{A_{s,bal}}{bd} \quad (2.30)$$

Συνεπώς όταν η δοκός είναι υπό-οπλισμένη υπάρχει μια διανομή ορθών τάσεων όπως αυτό που δείχνεται στο Σχήμα 2-7.. Στη διατομή αυτή αντιστοιχεί μια διανομή θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα, όπως αυτή που δείχνεται στο Σχήμα 2-7. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Whitney, όπου προσεγγίζουμε τη μη γραμμική κατανομή των τάσεων με μια ισοδύναμη ομοιόμορφη διανομή μεγέθους  $\alpha_{cc}f_{cd}$  που επενεργεί πάνω στην περιοχή  $0.8x_b$  της διατομής, η θλιπτική δύναμη που καταπονεί το σκυρόδεμα είναι

$$F_c = \alpha_{cc}f_{cd}(0.8xb) \quad (2.31)$$

Η εφελκυστική δύναμη που επενεργεί στον οπλισμό θα είναι

$$F_s = A_s f_{yd} \quad (2.32)$$

Από τη συνθήκη ισορροπίας

$$F_c = F_s \quad (2.33)$$

βρίσκουμε το πάχος της θλιβόμενης ζώνης από τη σχέση

$$A_s f_{yd} = a_{cc} f_{cd} (0.8xb) \quad (2.34)$$

Η καμπτική αντοχή της διατομής που αντιστοιχεί σε αυτή την κατάσταση είναι

$$M_{Rd} = F_s z = F_c z \quad (2.35)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι

$$\frac{M_{Rd}}{bd^2 f_{ck}} = \frac{1}{\gamma_s} \rho \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \left(1 - 0.5 \frac{\gamma_c}{\gamma_s} \rho \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right) \quad (2.36)$$

## 2.5 Η ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ ΑΠΟ C-FRP

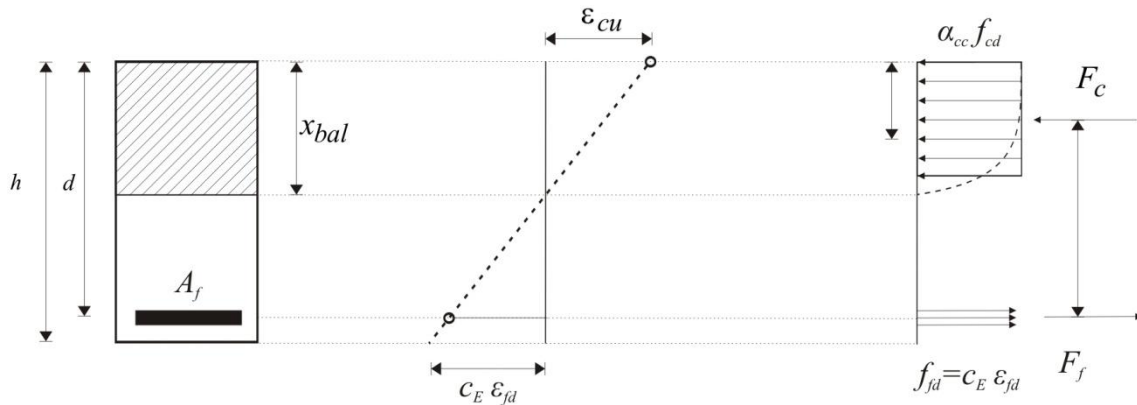
### 2.5.1 Η κατάσταση της ισόρροπης διατομής

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω έχουν εξαχθεί στο [6] και αναφέρονται σε ορθογωνική διατομή σκυροδέματος με οπλισμό C-FRP, που έχει τοποθετηθεί σε μια στρώση. Λόγω της γραμμικής συμπεριφοράς του οπλισμού C-FRP μέχρι τη θραύση του, η συμπεριφορά του οπλισμένου με C-FRP δομικού στοιχείου καθίσταται μη πλάστιμη. Αυτό σημαίνει ότι το δομικό στοιχείο κατά τη θραύση του, συμπεριφέρεται με ψαθυρό τρόπο, δηλαδή εκδηλώνεται ξαφνικά, χωρίς έντονα σημεία παραμόρφωσης. Σε αντίθεση με την αστοχία μιας διατομής με οπλισμό από χάλυβα, στην περίπτωση του οπλισμού FRP αστοχία θα έχουμε

- είτε από θραύση του σκυροδέματος,
- είτε από θραύση του οπλισμού FRP.

Όταν η διατομή υποστεί ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος και οπλισμού, τότε θα λέμε ότι η διατομή βρίσκεται στην ισόρροπη κατάσταση. Παρακάτω, θα παρουσιάσουμε τις εξισώσεις, που περιγράφουν την ισόρροπη κατάσταση, αναφερόμενοι στο Σχήμα 2-8 .





Σχήμα 2-8 Η Ισορροπη διατομή

Η ορθογωνική διατομή διαστάσεων  $b$  και  $h$  έχει οπλιστεί με ράβδους C-FRP, των οποίων ο οπλισμός είναι  $A_f$ . Η μονοαξονική συμπεριφορά των ράβδων FRP, περιγράφεται με το διάγραμμα του Σχήματος 2-3. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, η ράβδος C-FRP αστοχεί όταν η τάση σε αυτή φτάσει την τιμή σχεδιασμού  $\sigma_{fd}$  που ορίζεται με τη σχέση

$$\sigma_{fd} = \frac{\sigma_{fk}}{\gamma_f} \quad (2.37)$$

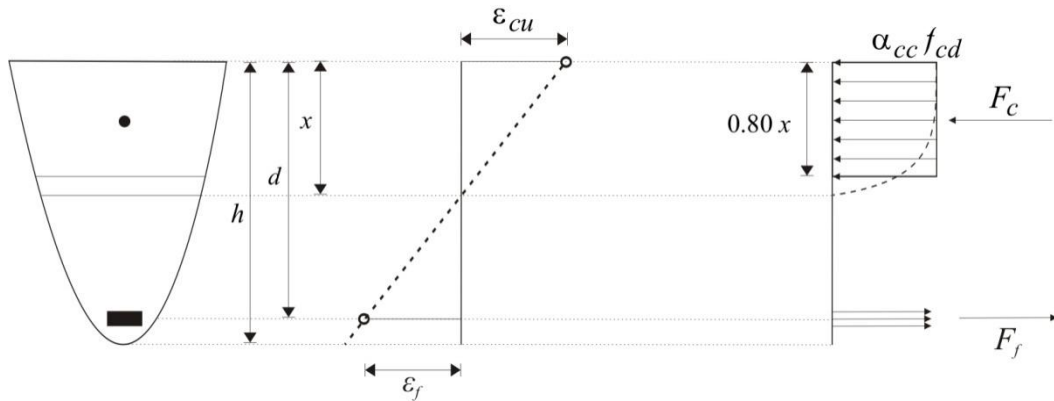
Στην τάση αυτή, με το νόμο του Hooke αντιστοιχεί η παραμόρφωση σχεδιασμού  $\epsilon_{fd}$  που είναι ίση με  $\epsilon_{fd} = \sigma_{fd} / E_f$  όπου  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου FRP. Στην ανάλυση της διατομής, χρησιμοποιούμε τις παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές για τη διανομή των τάσεων.

- Η διανομή των θλιπτικών τάσεων είναι ομοιόμορφη και εκτείνεται σε ένα μήκος  $0.80x$ , όπου  $x$  είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης.
- Η ομοιόμορφη διανομή των θλιπτικών τάσεων έχει τιμή ίση με  $\frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}$ .

Στη συνέχεια, θα εισάγουμε τα κριτήρια αστοχίας των δομικών στοιχείων με οπλισμό FRP. Ένα δομικό στοιχείο σκυροδέματος με οπλισμό FRP θα αστοχήσει:

- είτε, όταν η μέγιστη τιμή της θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος προσεγγίσει την τιμή  $\epsilon_{cu} = 3.5\%$ , ή
- όταν η εφελκυστική αντοχή παραμόρφωσης σε μια ράβδο FRP προσεγγίσει την εφελκυστική αντοχή  $c_E \epsilon_{fd}$ .

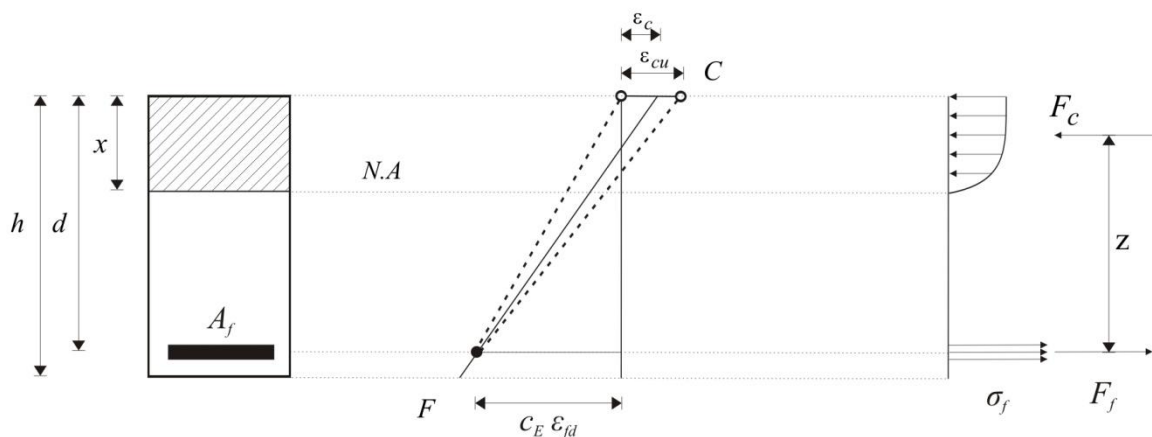
Ο πρώτος τύπος αστοχίας θα συμβεί λόγω θρυμματισμού του σκυροδέματος, ο δε δεύτερος τύπος από διάρρηξη του οπλισμού FRP. Όπως προαναφέρθηκε, όταν οι δύο αυτές καταστάσεις συμβούν ταυτόχρονα, τότε έχουμε την κατάσταση της ισόρροπης διατομής.



Σχήμα 2-9 Ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος

Στο Σχήμα 2-10, παρουσιάζεται γραφικά, ο πρώτος τύπος της καμπτικής αστοχίας, που περιγράψαμε παραπάνω. Ο τύπος αστοχίας 1, πραγματοποιείται, όταν η  $\epsilon_f$  (εφελκυστική παραμόρφωση) της ράβδου FRP, πλησιάσει τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή της ράβδου. Πρέπει να σημειώσουμε ότι, η αστοχία του τύπου 1, προσομοιάζεται σε αντίστοιχο διάγραμμα παραμόρφωσης της διατομής, που διέρχεται από το σημείο  $F$ , στο οποίο

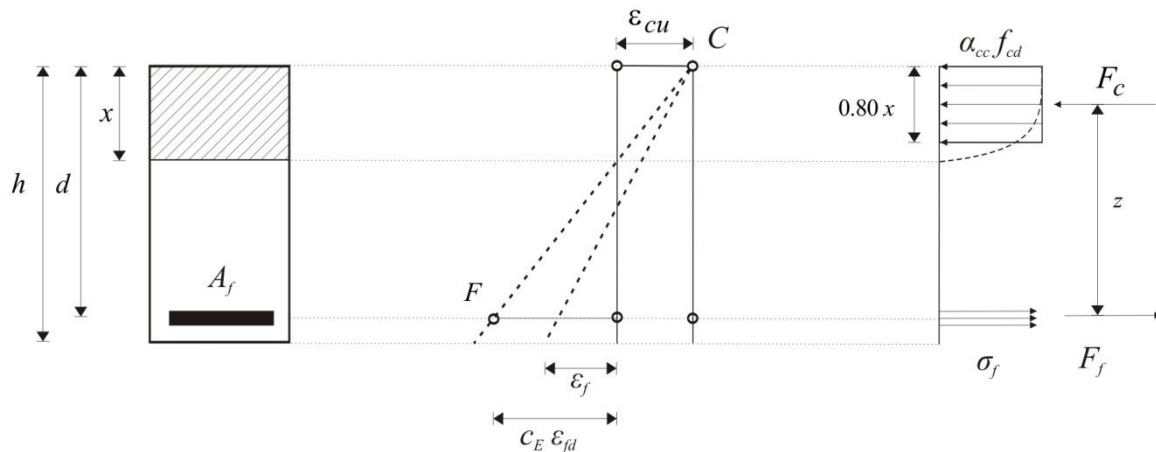
$$\epsilon_f = c_E \epsilon_{fd}$$



Σχήμα 2-10 Τύπος αστοχίας 1

Στο Σχήμα 2-11 παρουσιάζεται αντίστοιχα, η αστοχία τύπου 2. Εδώ θα λέγαμε ότι, η μέγιστη παραμόρφωση στο σκυρόδεμα, έχει προσεγγίσει την παραμόρφωση αντοχής του

σκυροδέματος  $\varepsilon_{cu}$  και η εφελκυστική παραμόρφωση  $\varepsilon_f$ , στον οπλισμό FRP, είναι μικρότερη από την εφελκυστική της αντοχή (δηλαδή την τιμή  $c_E \varepsilon_{fd}$ ). Τελικά στο Σχήμα 2-11, μπορούμε να παρατηρήσουμε την παραμορφωσιακή κατάσταση της ισόρροπης διατομής. Γραφικά βλέπουμε ότι είναι η γραμμή που χωρίζει τις δύο περιοχές και διέρχεται από τα σημεία F και C.



Σχήμα 2-11 Τύπος αστοχίας 2

Η καμπτική αντοχή της διατομής ενός δομικού στοιχείου εξαρτάται από το αν η αστοχία διέπεται από τον θρυμματισμό του σκυροδέματος ή από τη διάρρηξη του οπλισμού FRP. Ο τύπος αστοχίας που θα προκληθεί προσδιορίζεται από τη σύγκριση του λόγου  $\rho_f = A_f/bd$  με το λόγο οπλισμού  $\rho_{f,bal}$ , που παρέχεται από τη σχέση.

$$\rho_{f,bal} = \frac{A_{f,bal}}{bd} = \frac{2,38E_f}{3,5E_f + 1000c_E f_{fd}} \frac{f_{cd}}{c_E f_{fd}} \quad (2.38)$$

Το πάχος της θλιβόμενης ζώνης που αντιστοιχεί στην ισόρροπη κατάσταση, είναι το

$$\left(\frac{x}{b}\right)_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + c_E \varepsilon_{fd}} \quad (2.39)$$

όπου  $\varepsilon_{cu} = 3.5\%$ .

Οι παραπάνω σχέσεις προκύπτουν από την ισορροπία των δυνάμεων στη διατομή και από τη γεωμετρία των παραμορφώσεων κατά το ύψος της διατομής, που δείχνεται στο Σχήμα 2-11.

### 2.5.2 Αστοχία από θρυμματισμό σκυροδέματος

Η αστοχία αυτή συμβαίνει όταν ισχύει η σχέση  $\rho_f > \rho_{f,bal}$ . Στην περίπτωση αυτή, η τάση που αναπτύσσεται στις ράβδους οπλισμού FRP δεν πρέπει να ξεπεράσει την τάση σχεδιασμού  $c_E f_{fd}$ . Η τάση αυτή προκύπτει από την ισορροπία των δυνάμεων κατά τη διεύθυνση του άξονα της δοκού, στη μορφή

$$\sigma_f = \varepsilon_f E_f = \sqrt{\left(\frac{1.75 E_f}{1000}\right)^2 + \frac{2.8 E_f \alpha_{cc} f_{cd}}{1000 \rho_f}} - \frac{1.75 E_f}{1000}. \quad (2.40)$$

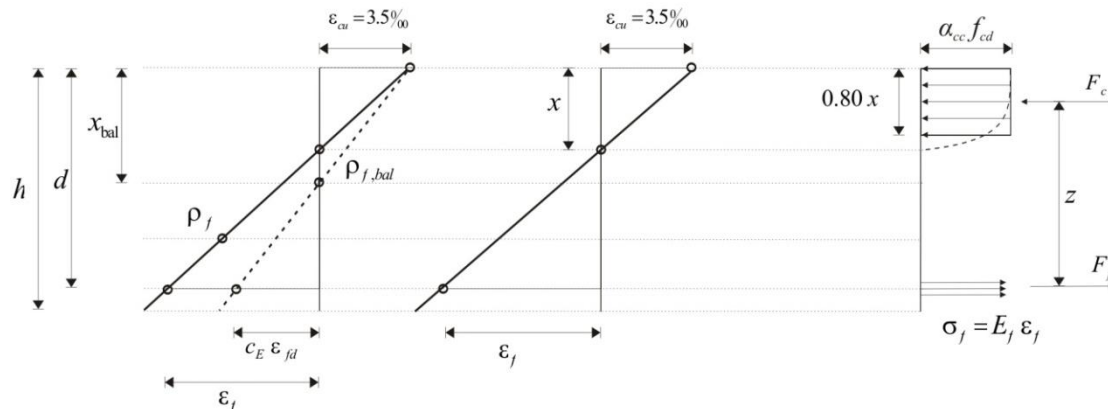
Στην περίπτωση αυτή, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης είναι

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f}. \quad (2.41)$$

Έχοντας υπολογίσει την τάση που καταπονεί τον οπλισμό FRP διατομής, η καμπτική ροπή αντοχής σχεδιασμού  $M_{Rd}$  βρίσκεται από τη σχέση:

$$\frac{M_{Rd}}{b d^2} = \rho_f \sigma_f \left(1 - 0.50 \frac{\rho_f \sigma_f}{\alpha_{cc} f_{cd}}\right) \quad (2.42)$$

Παρακάτω στο Σχήμα 2-12 παρουσιάζονται τα ανωτέρω δεδομένα:



Σχήμα 2-12 Αστοχία από θρυμματισμό του σκυροδέματος

### 2.5.3 Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού FRP

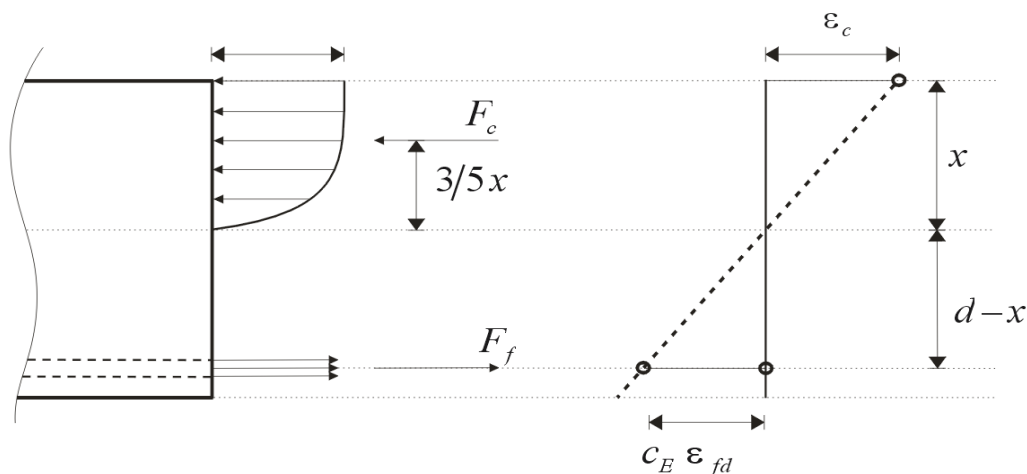
Όταν  $\rho < \rho_{f,bal}$ , η αστοχία του δομικού στοιχείου θα προξενηθεί από τη διάρρηξη του οπλισμού FRP. Στην περίπτωση αυτή, το σκυρόδεμα δεν έχει φθάσει στη μέγιστη αντοχή του και επομένως, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο ορθογωνικό στερεό των τάσεων. Η εφελκυστική τάση  $\sigma_f$ , που αναπτύσσεται στον οπλισμό FRP, έχει προσεγγίσει την τιμή  $c_E \varepsilon_{fd}$ , ενώ η τάση στο σκυρόδεμα  $\sigma_c$  είναι μικρότερη από την τιμή  $\alpha_{cc} f_{cd}$  ( $\sigma_c < \alpha_{cc} f_{cd}$ ).

Στην παραέρα ανάλυση διακρίνουμε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί σε μέγιστη παραμόρφωση σκυροδέματος που βρίσκεται στον παραβολικό κλάδο του διαγράμματος ( $0 \leq \varepsilon_c \leq 2\text{‰}$ ) και η δεύτερη περίπτωση αντιστοιχεί σε μέγιστη τάση σκυροδέματος στον οριζόντιο κλάδο του διαγράμματος ( $2\text{‰} \leq \varepsilon_c \leq 3,5\text{‰}$ ).

**Περίπτωση 1:**  $\varepsilon_c < \varepsilon_{c0} = 2\text{‰}$

Στην περίπτωση αυτή το πάχος της θλιβόμενης ζώνης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c \varepsilon_{c0}}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} \quad (2.43)$$



Σχήμα 2-13 Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού

Η μέγιστη θλιπτική τάση  $\sigma_{cd}$  που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα βρίσκεται από τη σχέση:

$$\sigma_{cd} = \alpha_{cc} f_{cd} \varepsilon_c \left( 1 - \frac{1}{4} \varepsilon_c \right) \quad (2.44)$$

Στη σχέση αυτή η παραμόρφωση υπεισέρχεται με θετικό πρόσημο. Από την ισορροπία των δυνάμεων στην διεύθυνση του άξονα του δομικού στοιχείου προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για τον προσδιορισμό άγνωστης παραμόρφωσης  $\varepsilon_c$ .

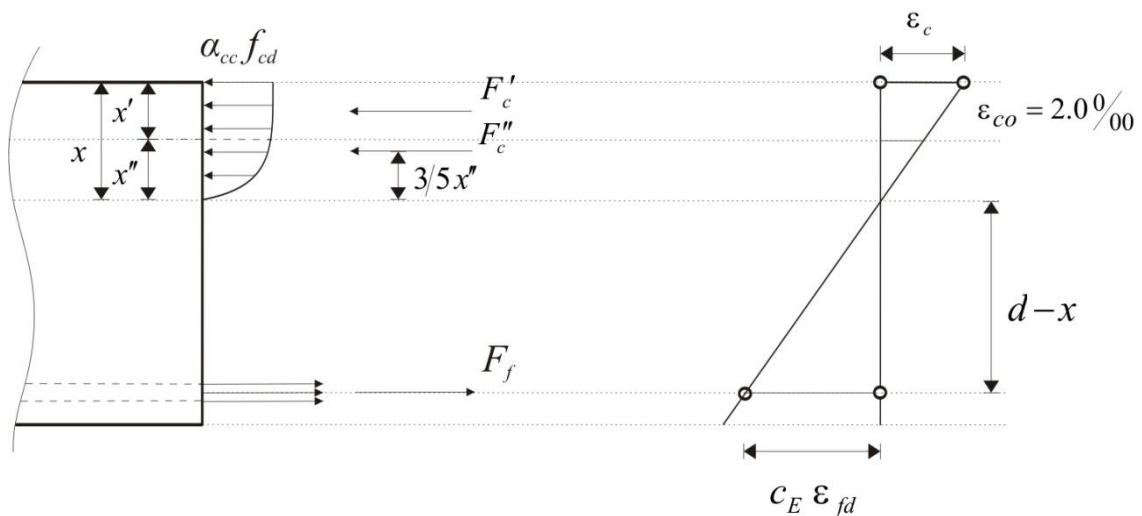
$$0.167 \varepsilon_c^3 - 0667 \varepsilon_c^2 + \rho c_E \frac{f_{fd}}{\alpha_{cc} f_{cd}} \varepsilon_c + \rho c_E^2 \frac{f_{fd}^2}{E_f f_{cd} \alpha_{cc}} = 0 \quad (2.45)$$

Βρίσκοντας την  $\varepsilon_c$ , από την επίλυση της παραπάνω εξίσωσης μπορούμε να υπολογίσουμε το πάχος της θλιβόμενης ζώνης με τη σχέση (2.43) και στη συνέχεια τη ροπή αντοχής  $M_{Rd}$  που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{M_{Rd}}{b d^2} = \rho_f c_E f_{fd} \left( 1 - 0.40 \frac{x}{d} \right). \quad (2.46)$$

**Περίπτωση 2:**  $\varepsilon_{co} = 2\text{‰} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 3.5\text{‰}$

Για την περίπτωση αυτή, η παραμορφωσιακή και εντατική κατάσταση περιγράφεται στο Σχήμα 2-14.



Σχήμα 2-14 Αστοχία από διάρρηξη του οπλισμού

Οι θλιπτικές τάσεις που αντιστοιχούν στην ομοιόμορφη κατανομή καλύπτουν το πλάτος  $x'$  της θλιβόμενης ζώνης, ενώ εκείνες με την παραβολική κατανομή το πλάτος  $x''$ . Είναι

$$x' + x'' = x \quad (2.47)$$

όπου  $x$  είναι το συνολικό πλάτος της θλιβόμενης ζώνης. Από το διάγραμμα παραμορφώσεων του Σχήματος 2-14, έχουμε

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}}, \quad \frac{x''}{d} = \frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} \quad (2.48)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$\frac{x'}{d} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_c + c_E \varepsilon_{fd}} \quad (2.49)$$

Επομένως, το πάχος της θλιβόμενης ζώνης είναι

$$\frac{x}{d} = \frac{x'}{d} + \frac{x''}{d} \quad (2.50)$$

Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_c = \frac{\rho_f c_E^2 f_{fd}^2 + 0.66 E_f (\alpha_{cc} f_{cd} / 1000)}{E_f (\alpha_{cc} f_{cd} - \rho_f c_E f_{fd})} \quad (2.51)$$

Η τιμή της παραμόρφωσης που θα προκύψει από τη σχέση αυτή, θα πρέπει να βρίσκεται στα όρια που έχουν τεθεί, δηλαδή  $\varepsilon_{co} = 2\% < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 3.5\%$ . Στην περίπτωση αυτή, η ροπή αντοχής παρέχεται από τη σχέση:

$$\frac{M_{Rd}}{b d^2} = \frac{x'}{d} \alpha_{cc} f_{cd} \left(1 - 0.5 \frac{x'}{d}\right) + \frac{x''}{d} 0.66 \alpha_{cc} f_{cd} \left(1 - \frac{x}{d} + 0.6 \frac{x''}{d}\right) \quad (2.52)$$

Ο σχεδιασμός στην οριακή κατάσταση αντοχής απαιτεί την ικανοποίηση της συνθήκης:

$$M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad (2.53)$$

## 2.6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ

### 2.6.1 Ροπή ρηγμάτωσης στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Δεδομένα:

- Διαστάσεις δοκού: 200x300 mm ( $b = 200$  mm,  $h = 300$  mm)
- Οπλισμός κάμψης: 2Φ14
- Οπλισμός διάτμησης: Φ10/10
- Κατηγορία χάλυβα: S500 ( $f_{yk} = 500$  MPa)
- Ποιότητα σκυροδέματος: C30/37 ( $f_{ck} = 30$  MPa)
- Πάχος επικάλυψης:  $C_{nom} = 20$  mm
- Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα:  $E_s = 200000$  MPa

Στατικό ύψος:

$$d = h - C_{nom} - \Phi_l - \frac{D}{2} = 263 \text{ mm}$$

Εμβαδό οπλισμού:

$$A_s = n \frac{\pi D^2}{4} = 308 \text{ mm}^2$$

Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος:

$$E_c = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 34330.797 \text{ MPa}$$

Λόγος μέτρων ελαστικότητας και ποσοστό οπλισμού:

$$a_e = \frac{E_r}{E_c} = 5.83$$

$$\rho_r = \frac{A_s}{bd} = 5.9\%$$

Κέντρο βάρους διατομής:



$$\zeta' = \frac{0.5(h/d)^2 + (a_e - 1)\rho_r}{h/d + (a_e - 1)\rho_r} = 0.58$$

$$y_c = \zeta' d = 152.73 \text{ mm}$$

Ροπή αδράνειας της διατομής:

$$I_{ut} = \frac{bh^3}{12} + \left(0.5 - \zeta' \frac{d}{h}\right)^2 bh^3 + (1 - \zeta')^2 (\alpha_e - 1) A_r d^2 = 418916748 \text{ mm}^4$$

Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_{ct} = 0.3(f_{ck})^{2/3} = 2.896 \text{ MPa}$$

Απόσταση εφελκόμενης ίνας από κέντρο βάρους:

$$y_t = h - y_c = 147.27 \text{ mm}$$

Ροπή ρηγμάτωσης:

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} I_{ut}}{y_t} = 8.24 \text{ kNm}$$

## 2.6.2 Ροπή ρηγμάτωσης στη δοκό με οπλισμό C-FRP

Με τον ίδιο τρόπο θα υπολογίσουμε τη ροπή ρηγμάτωσης στη δοκό με οπλισμό C-FRP για τα παρακάτω δεδομένα:

- Διαστάσεις δοκού: 200x300 mm ( $b = 200 \text{ mm}$ ,  $h = 300 \text{ mm}$ )
- Οπλισμός κάμψης: 3Φ12.7
- Οπλισμός διάτμησης: Φ10/10
- Ποιότητα σκυροδέματος: C30/37 ( $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ )
- Πάχος επικάλυψης:  $C_{nom} = 20 \text{ mm}$
- Μέτρο ελαστικότητας C-FRP:  $E_f = 130000 \text{ MPa}$

Στατικό ύψος:

$$d = h - C_{nom} - \Phi_l - \frac{D}{2} = 264 \text{ mm}$$

Εμβαδό οπλισμού:

$$A_f = n \frac{\pi D^2}{4} = 380 \text{ mm}^2$$

Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος:

$$E_c = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 34330.797 \text{ MPa}$$

Λόγος μέτρων ελαστικότητας και ποσοστό οπλισμού:

$$a_e = \frac{E_r}{E_c} = 3.79$$

$$\rho_r = \frac{A_f}{bd} = 7.2\%$$

Κέντρο βάρους διατομής:

$$\zeta' = \frac{0.5(h/d)^2 + (a_e - 1)\rho_r}{h/d + (a_e - 1)\rho_r} = 0.58$$

$$y_c = \zeta' d = 151.97 \text{ mm}$$

Ροπή αδράνειας της διατομής:

$$I_{ut} = \frac{bh^3}{12} + \left( 0.5 - \zeta' \frac{d}{h} \right)^2 bh^3 + (1 - \zeta')^2 (a_e - 1) A_r d^2 = 427727096$$

Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_{ct} = 0.3(f_{ck})^{2/3} = 2.896 \text{ MPa}$$

Απόσταση εφελκόμενης ίνας από κέντρο βάρους:

$$y_t = h - y_c = 148.03 \text{ mm}$$

Ροπή ρηγμάτωσης:

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} I_{ut}}{y_t} = 8.37 \text{ kNm}$$

## 2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ EC2

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα υπολογίσουμε τη ροπή αντοχής, σύμφωνα με τον EC2, χρησιμοποιώντας τους τύπους των κεφαλαίων 2.3 και 2.4.

### 2.7.1 Ροπή αντοχής στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Στην ενότητα αυτή, θα υπολογίσουμε τη ροπή αντοχής στη δοκό με οπλισμό χάλυβα, με τους τύπους του κεφαλαίου 2.3. Η δοκός με οπλισμό από χάλυβα, όπως κατασκευάστηκε και μελετήθηκε στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών έχει τα εξής στοιχεία:

- Διαστάσεις δοκού: 200x300 mm (πλάτος διατομής  $b = 200$  mm, ύψος διατομής  $h = 300$  mm)
- Οπλισμός κάμψης: 2Φ14
- Ποιότητα χάλυβα: S500  $f_{yk} = 500$  MPa
- Ποιότητα σκυροδέματος: 30/37  $f_{ck} = 30$  MPa
- Στατικό ύψος: όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 2.5.1  $d = 263$  mm
- Εμβαδό οπλισμού:  $A_s = 308$  mm<sup>2</sup>

Το ποσοστό οπλισμού για την ισόρροπη διατομή θα υπολογιστεί, θεωρώντας συντελεστές ασφάλειας  $\gamma_s = \gamma_c = 1$ . Για την περίπτωση αυτή έχουμε:

Χαρακτηριστική παραμόρφωση διαρροής:

$$\varepsilon_{yk} = \frac{f_{yk}}{E_s} = \frac{500}{200000} = 2.5\%$$

Το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης:

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yk}} d = \frac{3.5}{3.5 + 2.5} 263 = 153.4 \text{ mm}$$

Οπλισμός ισόρροπης διατομής:

$$A_{s,bal} = 0.8 x_{bal} b \frac{f_{ck}}{f_{yk}} = 0.8 \cdot 153.4 \cdot 200 \frac{30}{500} = 1473 \text{ mm}^2 > A_s = 308 \text{ mm}^2$$

Συνεπώς η ροπή αντοχής της διατομής προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{M_{Rd}}{bd^2 f_{ck}} = \frac{1}{\gamma_s} \rho \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \left(1 - 0.5 \frac{\gamma_c}{\gamma_s} \rho \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right)$$

Από τη σχέση αυτή για

$$\gamma_s = \gamma_c = 1$$

προκύπτει:

$$\frac{M_{Rd}}{bd^2 f_{ck}} = \frac{1}{1} 0.0065 \frac{500}{30} \left(1 - 0.5 \frac{1}{1} 0.0065 \frac{500}{30}\right) = 0.102$$

$$M_{Rd} = 0.102 bd^2 f_{ck} = 0.102 \cdot 200 \cdot 263^2 \cdot 30 = 42331428 = 42.3 \text{ kNm}$$

### 2.7.2 Ροπή αντοχής στη δοκό με οπλισμό από C-FRP

Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής σε δοκό με οπλισμό από C-FRP, γίνεται με σχετικά διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τη δοκό με οπλισμό χάλυβα, όπως δείξαμε και στο κεφάλαιο 2.4, κάτι που φαίνεται και από το διαφορετικό τρόπο, από τον οποίο προκύπτουν και οι αντίστοιχοι τύποι. Αυτό, εξηγείται από το γεγονός ότι η συμπεριφορά των ράβδων FRP, παρουσιάζουν γραμμικότητα, κάτι που στερεί την πλαστιμότητα των δομικών στοιχείων του FRP.

Η διαδικασία υπολογισμού όμως, είναι ανάλογη όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

Δεδομένα:

- Διαστάσεις δοκού: 200x300 mm (πλάτος διατομής  $b = 200$  mm, ύψος διατομής  $h = 300$  mm)
- Οπλισμός κάμψης: 3Φ12.7 (όπου  $n = 3$  αριθμός ράβδων)
- Οπλισμός διάτμησης: Φ10/10
- Ποιότητα σκυροδέματος: 30/37  $f_{ck} = 30$  MPa
- Στατικό ύψος:  $d = 263.65$  mm
- Εμβαδό οπλισμού:  $A_f = 380.03$  mm<sup>2</sup>
- Μέτρο ελαστικότητας C-FRP:  $E_f = 130000$  MPa

- Εφελκυστική αντοχή:  $f_{fk} = 2300 \text{ MPa}$

$$\text{Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος: } E_c = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 34330.797 \text{ MPa}$$

$$\text{Λόγος μέτρων ελαστικότητας } a_e = \frac{E_r}{E_c} = 3.78669$$

$$\rho_r = \frac{A_s}{bd} = 7.2\%$$

$$\begin{aligned} \rho_{f,bal} &= \frac{A_{f,bal}}{bd} = \frac{2.38 E_f}{3.5 E_f + 1000 c_E f_{fk}} \frac{f_{ck}}{c_E f_{fk}} = \\ &= \frac{2.38 \cdot 130000}{3.5 \cdot 130000 + 1000 \cdot 1 \cdot 2300} \frac{30}{1 \cdot 2300} = 0.0015 = 1.5\% \end{aligned}$$

Επειδή:

$$\rho_r > \rho_{f,bal}$$

Η τάση που αναπτύσσεται στον οπλισμό θα υπολογιστεί για  $\gamma_s = \gamma_c = a_{cc} = 1$ . Έχουμε:

$$\begin{aligned} \sigma_f = \varepsilon_f E_f &= \sqrt{\left( \frac{1.75 E_f}{1000} \right)^2 + \frac{2.8 E_f \alpha_{cc} f_{ck}}{1000 \rho_f}} - \frac{1.75 E_f}{1000} = \\ &= \sqrt{\left( \frac{1.75 \cdot 130000}{1000} \right)^2 + \frac{2.8 \cdot 130000 \cdot 1 \cdot 30}{1000 \cdot 0.0072}} - \frac{1.75 \cdot 130000}{1000} = \\ &= 1024.87 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Ισχύει ότι η τάση αυτή θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\sigma_f < c_E f_{fd} = 1 \cdot 2300 = 2300 \text{ MPa}. \text{ Άρα η σχέση ικανοποιείται.}$$

Έχοντας υπολογίσει την τάση, μπορούμε να υπολογίσουμε τελικά τη ροπή αντοχής:

$$\frac{M_{Rd}}{bd^2} = \rho_f \sigma_f \left( 1 - 0.50 \frac{\rho_f \sigma_f}{\alpha_{cc} f_{ck}} \right) = 0.0072 \cdot 1024.87 \left( 1 - 0.50 \frac{0.0072 \cdot 1024.87}{1 \cdot 30} \right) = 6.47$$

Συνεπώς προκύπτει ότι:

$$M_{Rd} = 6.47 \cdot b d^2 = 6.47 \cdot 200 \cdot 263.65^2 = 89.97 \text{ kNm}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΥΡΟΥΣ ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ

### 3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

#### 3.1.1 Εύρος ρωγμών για οπλισμό από χάλυβα σύμφωνα με EC2

Σε ένα δομικό στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμών  $w_k$ , ο EC2 προτείνει την παρακάτω σχέση

$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm})$$

όπου

- $s_{r,\max}$  είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πρωτεύουσών ρωγμών
- $\varepsilon_{fm}$  είναι η μέση παραμόρφωση στον οπλισμό, και
- $\varepsilon_{cm}$  είναι η μέση παραμόρφωση του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών.

Η ισοδύναμη παραμόρφωση  $\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}$  υπολογίζεται από την σχέση

$$\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t}{E_s} \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff}) \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (3.1)$$

όπου

$$\alpha_e = E_s / E_{cm} \quad (3.2)$$

με

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} \quad (3.3)$$

και  $E_s$ , το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα. Ως  $f_{ck}$  ορίζουμε τον τύπο του σκυροδέματος. Το  $f_{ct,eff}$  υπολογίζεται από τον τύπο  $f_{ct,eff} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 2.9$ .

Ο υπολογισμός της τάσης  $\sigma_s$  που είναι η τάση στον εφελκόμενο οπλισμό και βασίζεται στην ρηγματωμένη διατομή παρέχεται από τον εξής τύπο:

$$\sigma_s = \frac{M}{\left(d - \frac{x}{3}\right) A_s} \quad (3.4)$$

όπου το  $x$  είναι το πλάτος της οπλισμένης ζώνης, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$bx \frac{x}{2} = a_e A_s (d - x). \quad (3.5)$$

Στη σχέση αυτή το  $A_s$ , είναι το εμβαδόν οπλισμού της διατομής και  $d$  το στατικό ύψος της δοκού.

Στη σχέση (3.1), το  $k_t = 0.6$  για φόρτιση μικρής διάρκειας, ή  $k_t = 0.4$  για φόρτιση μακράς διάρκειας. Το ισοδύναμο ποσοστό οπλισμού ορίζεται με την σχέση:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{p,eff}} \quad (3.6)$$

όπου  $A_{p,eff}$  είναι η επιφάνεια του σκυροδέματος που περιβάλλει τον οπλισμό σε πλάτος 2.5 φορές την αξονική απόσταση του οπλισμού από την εφελκόμενη επιφάνεια. Το πλάτος αυτό θα πρέπει να είναι μικρότερο του  $h/2$  για εφελκόμενα δομικά στοιχεία. Η επιφάνεια του σκυροδέματος  $A_{p,eff}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_{p,eff} = bh_{p,eff} \quad (3.7)$$

όπου

$$h_{p,eff} = \min \begin{cases} 2.5(h-d) \\ \frac{h-x}{3} \\ \frac{h}{2} \end{cases} . \quad (3.8)$$

Σε περίπτωση που η απόσταση μεταξύ των κέντρων των ράβδων οπλισμού μέσα στην εφελκυσμένη ζώνη είναι μικρότερη από  $5(c + \phi/2)$ , τότε η μέγιστη απόσταση ρωγμών (σε mm) παρέχεται από την σχέση:

$$s_{r,max} = 3.4c + 0.425k_1k_2 \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (3.9)$$

όπου το  $k_2$  είναι ίσο με 1 για καθαρό εφελκυσμό και 0.5 για κάμψη. Η τιμή του  $k_1$  είναι ίση με 0.8 για ράβδους με νευρώσεις, και με 1.6 για λείες ράβδους. Όταν τα διάστημα μεταξύ των κέντρων των ράβδων οπλισμού υπερβαίνει την τιμή  $5(c + \phi/2)$ , τότε:

$$s_{r,max} = 1.3(h-x) \quad (3.10)$$

όπου  $x$  το πάχος της θλιβόμενης ζώνης.

### 3.1.2 Εύρος ρωγμών για οπλισμό από C-FRP

Σε ένα δομικό στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος με οπλισμό FRP, για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμών  $w_k$ , η παρακάτω σχέση [6]:

$$w_k = \beta s_{r,max} \varepsilon_{fm} \quad (3.11)$$

$s_{r,max}$  είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των πρωτεύουσών ρωγμών.

$\varepsilon_{fm}$  είναι η μέση παραμόρφωση του οπλισμού FRP,

$\beta$  είναι ένας συντελεστής που παίρνει τιμές, ανάλογα με το είδος του οπλισμού.

Η μέση παραμόρφωση  $\varepsilon_{fm}$  παρέχεται από την σχέση:



$$\varepsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \left[ 1 - \frac{M_{cr}}{M} \left( 1 - \left( \frac{M - M_{cr}}{M_C - M_{cr}} \right)^m \right) \right] \quad (3.12)$$

όπου  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του FRP. Η παράμετρος  $m$  στη σχέση αυτή, λαμβάνεται ίση με 2 και η παράμετρος  $M_C$  ίση με την τιμή  $M_{Rd}$ . Το  $M_{cr}$  είναι η ροπή ρηγμάτωσης της δοκού και  $M$  είναι η καμπτική ροπή της δοκού για τα φορτία λειτουργίας.

Ο υπολογισμός της τάσης  $\sigma_f$ , που είναι η τάση στον εφελκόμενο οπλισμό και βασίζεται στην ρηγματωμένη διατομή, γίνεται με τη σχέση:

$$\sigma_f = \frac{M}{\left(d - \frac{x}{3}\right)A_f} \quad (3.13)$$

όπου  $x$  είναι το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης και υπολογίζεται με την επίλυση της εξίσωσης:

$$bx \frac{x}{2} = a_e A_f (d - x) \quad (3.14)$$

Η μέγιστη απόσταση ρωγμών  $s_{r,max}$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$s_{r,max} = 3.4c + k_m k_f \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad (3.15)$$

Στην παραπάνω σχέση, το  $k_m$  είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τον τύπο του FRP. Στην παρούσα εργασία, προτείνεται η τιμή  $k_m = 0.159$  για το C-FRP. Η τιμή του  $k_f$  είναι ίση με 1.4 για τις ράβδους οπλισμού C-FRP. Το ισοδύναμο ποσοστό οπλισμού, όπως και στο χάλυβα, ορίζεται με την σχέση:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_f}{A_{p,eff}} \quad (3.16)$$

## 3.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ

### 3.2.1 Βύθιση δοκού με οπλισμό από χάλυβα

Για τον υπολογισμό ενός μεγέθους παραμόρφωσης  $\alpha$  σε ένα δομικό στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, ο EC2 προτείνει την παρακάτω προσεγγιστική εξίσωση:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \quad (3.17)$$

όπου  $\zeta$  είναι ένας συντελεστής που παρέχεται από την σχέση:

$$\zeta = 1 - \beta \frac{M_{cr}^2}{M^2} \quad (3.18)$$

Στη Σχέση (3.17), τα  $\alpha_I$ ,  $\alpha_{II}$  είναι οι τιμές της παραμέτρου που αντιστοιχούν στη μη ρηγματωμένη και τη ρηγματωμένη διατομή, αντίστοιχα. Στην παραπάνω σχέση, το  $\beta$  παίρνει υπόψη την διάρκεια της φόρτισης, και είναι  $\beta = 1$  για φόρτιση σύντομης διάρκειας και  $\beta = 0.5$  για φόρτιση μακράς διάρκειας, ή επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Το  $M_{cr}$  είναι η ροπή στην οποία προξενείται η ρηγμάτωση και  $M$  είναι η μέγιστη ροπή που επενεργεί στο στοιχείο. Παρακάτω, η έκφραση (3.19) θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της καμπυλότητας μιας διατομής  $\phi (= 1/r)$ , για την περίπτωση φορτίσεων μικρής διάρκειας. Στην περίπτωση αυτή, η (3.17) γράφεται:

$$\phi = \left( 1 - \frac{M_{cr}^2}{M^2} \right) \phi_{II} + \frac{M_{cr}^2}{M^2} \phi_I \quad (3.19)$$

### 3.2.2 Βύθιση δοκού με οπλισμό C-FRP

Στην αναφορά [6] για τον υπολογισμό της μέσης καμπυλότητας  $\phi$  δοκού με οπλισμό C-FRP, έχει προταθεί η παρακάτω σχέση:

$$\varphi = \frac{M_{cr}}{M} \left[ 1 - \left( \frac{M - M_{cr}}{M_C - M_{cr}} \right)^m \right] \varphi_I + \left[ 1 - \frac{M_{cr}}{M} \left( 1 - \left( \frac{M - M_{cr}}{M_C - M_{cr}} \right)^m \right) \right] \varphi_{II} \quad (3.20)$$

Στη σχέση αυτή, η παράμετρος  $m$  είναι ίση με 2, ενώ η  $M_C$  λαμβάνεται ίση με την καμπτική αντοχή  $M_{Rd}$  της δοκού.

### 3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΡΩΓΜΩΝ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ

Στη συνέχεια, με βάση το θεωρητικό πλαίσιο που περιγράφηκε προηγούμενα, θα υπολογιστεί το μέγιστο εύρος ρωγμών που προβλέπεται να αναπτυχθεί στις δύο πειραματικές δοκούς που περιγράφουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Το εύρος ρωγμών θα υπολογιστεί συναρτήσει του φορτίου που θα επιβληθεί στις πειραματικές δοκούς, προκειμένου τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να συγκριθούν με αυτά που θα εξαχθούν στο πείραμα.

#### 3.3.1 Εύρος ρωγμών στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της πειραματικής δοκού με οπλισμό από χάλυβα είναι:

- Πλάτος διατομής:  $b = 200 \text{ mm}$
- Ύψος διατομής:  $h = 300 \text{ mm}$
- Οπλισμός 2Φ14
- Πλάτος επικάλυψης:  $c_{nom} = 20 \text{ mm}$
- Διάμετρος οπλισμού διάτμησης:  $\phi_L = 10 \text{ mm}$
- Κατηγορία σκυροδέματος C30/35 οπότε:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα κατηγορίας S500:  $E_s = 200000 \text{ MPa}$

Στατικό ύψος:  $d = h - c - \phi_L - \frac{\phi}{2} = 263 \text{ mm}$

Εμβαδό οπλισμού:  $A_s = n \frac{\pi d^2}{4} = 307.88 \text{ mm}^2$

Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος:

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 34178.36 \text{ MPa}$$

Λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι:  $a_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.85$

Θέση του ουδέτερου άξονα:  $bx \frac{x}{2} = a_e A_f (d - x) \Rightarrow x = 60.4 \text{ mm}$

Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_{ct,eff} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 2.9$$

Πλάτος ισοδύναμης εφελκυστικής περιοχής σκυροδέματος:

$$h_{p,eff} = \min \begin{cases} 2.5(h-d) \\ \frac{h-x}{3} \\ \frac{h}{2} \end{cases} = \min \begin{cases} 92.5 \\ 79.9 \\ 150 \end{cases} = 79.9 \text{ mm}$$

Εμβαδό ισοδύναμης εφελκυστικής περιοχής διατομής:

$$A_{p,eff} = bh_{p,eff} = 15980 \text{ mm}^2$$

Ποσοστό οπλισμού στην ισοδύναμη εφελκυστική περιοχή:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{p,eff}} = 0.019$$

Μέγιστη απόσταση πρωτεύουσών ρωγμών:

$$s_{r,max} = 3.4c + \frac{0.425k_1k_2\phi}{\rho_{p,eff}} = 191.53 \text{ mm}$$

Τάση στον οπλισμό για ροπή  $M_1 = 28.94 \text{ kNm}$

$$\sigma_s = \frac{M_1}{(d - \frac{x}{3})A_s} = 387.09 \text{ MPa}$$

$$\text{Η παραμόρφωση } (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t}{E_s} \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + a_\varepsilon \rho_{p,eff}) = 0.00144 \geq \frac{\sigma_s}{E_s} = 0.001162$$

που ισχύει.

Εύρος ρωγμών:

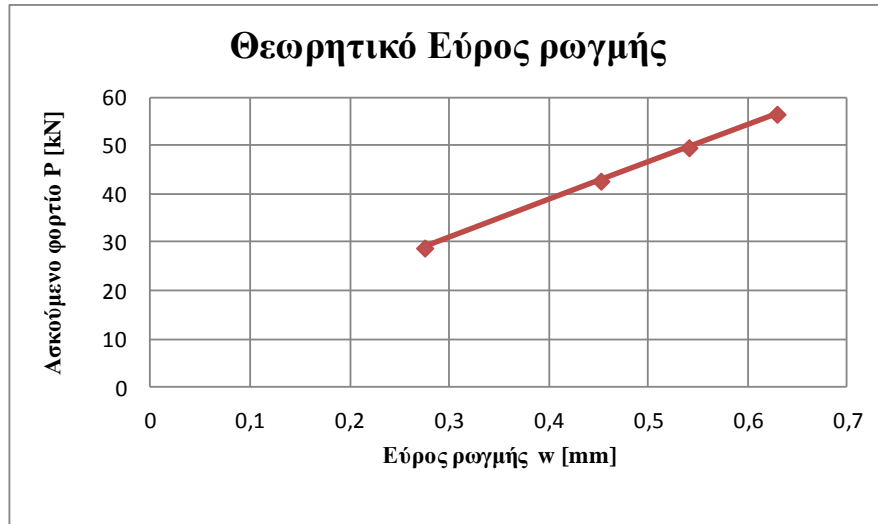
$$w_{k_1} = s_{r,max} (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) = 0.275 \text{ mm}$$

Με την ίδια διαδικασία υπολογίζονται τα εύρη ρωγμών για της διάφορες τιμές της καμπτικής ροπής  $M_i$ , που διαθέτουμε πειραματικές μετρήσεις για τα εύρη ρωγμών. Τα αποτελέσματα καταχωρούνται στον Πίνακα 3-1:

**Πίνακας 3-1** Πειραματικές μετρήσεις εύρους ρωγμής στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Ροπή $M_i$ [kNm]	Εύρος ρωγμής $w_{k_i}$ [mm]
28.944	0.275
42.768	0.452
49.68	0.54
56.592	0.63

Στο Σχήμα 3-1 δείχνεται σε μορφή διαγράμματος η μεταβολή των θεωρητικών ευρών ρωγμών συναρτήσει της ροπής που καταπονεί τη δοκό:



Σχήμα 3-1 Θεωρητικό εύρος ρωγμής στη δοκό με οπλισμό χάλυβα

### 3.3.2 Εύρος ρωγμών στη δοκό με οπλισμό από C-FRP

Τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της πειραματικής δοκού με οπλισμό από χάλυβα είναι:

- Πλάτος διατομής:  $b = 200 \text{ mm}$
- Ύψος διατομής:  $h = 300 \text{ mm}$
- Οπλισμός 3Φ12.7
- Πλάτος επικάλυψης:  $c_{nom} = 20 \text{ mm}$
- Διάμετρος οπλισμού διάτμησης:  $\phi_L = 10 \text{ mm}$
- Κατηγορία σκυροδέματος C30/35 οπότε:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Μέτρο ελαστικότητας C-FRP:  $E_f = 140000 \text{ MPa}$

$$\text{Στατικό ύψος: } d = h - c - \phi_L - \frac{\phi}{2} = 263.65 \text{ mm}$$

$$\text{Εμβαδό οπλισμού: } A_f = n \frac{\pi d^2}{4} = 380.03 \text{ mm}^2$$

Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος:

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 34178.36 \text{ MPa}$$

Λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι:  $a_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = 3.8$

Θέση του ουδέτερου άξονα:  $bx \frac{x}{2} = a_e A_f (d - x) \Rightarrow x = 54.9 \text{ mm}$

Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_{ct,eff} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 2.9$$

Πλάτος ισοδύναμης εφελκυστικής περιοχής σκυροδέματος:

$$h_{p,eff} = \min \begin{cases} 2.5(h - d) \\ \frac{h - x}{3} \\ \frac{h}{2} \end{cases} = \min \begin{cases} 90.9 \\ 81.7 \\ 150 \end{cases} = 81.7 \text{ mm}$$

Εμβαδό ισοδύναμης εφελκυστικής περιοχής διατομής:

$$A_{p,eff} = bh_{p,eff} = 16340 \text{ mm}^2$$

Ποσοστό οπλισμού στην ισοδύναμη εφελκυστική περιοχή:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{p,eff}} = 0.023$$

Μέγιστη απόσταση πρωτεύουσών ρωγμών:

$$s_{r,max} = 3,4c + \frac{0.425k_1k_2\phi}{\rho_{p,eff}} = 189.55 \text{ mm}$$

Τάση στον οπλισμό για ροπή  $M_1 = 35.86 \text{ kNm}$

$$\sigma_f = \frac{M_1}{\left(d - \frac{x}{3}\right)A_s} = 384.55 \text{ MPa}$$

$$\text{Η παραμόρφωση } \varepsilon_{fm} = \frac{\sigma_f}{E_f} \left\{ 1 - \frac{M_{cr}}{M_i} \left[ 1 - \left( \frac{M_i - M_{cr}}{M_{Rd} - M_{cr}} \right)^m \right] \right\} = 0.00235$$

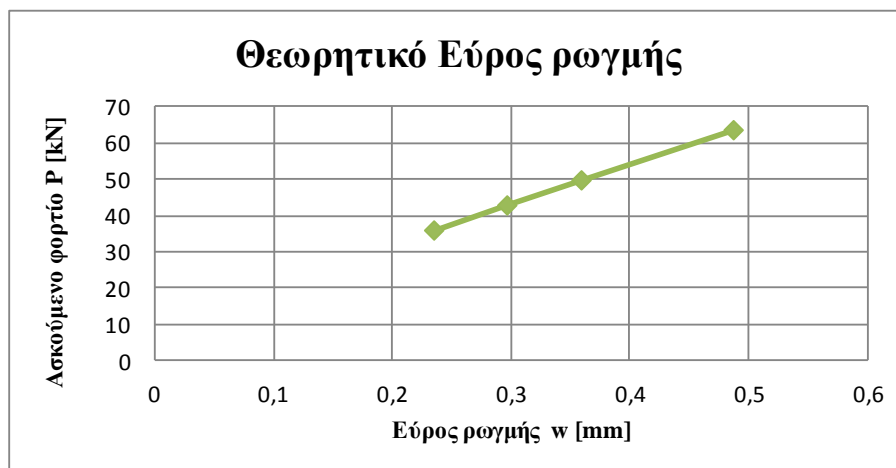
Εύρος ρωγμών:

$$w_{k_i} = s_{r,\max} (\varepsilon_{fm} - \varepsilon_{cm}) = 0.235 \text{ mm}$$

Με την ίδια διαδικασία υπολογίζονται τα εύρη ρωγμών για τις διάφορες τιμές της καμπτικής ροπής  $M$ , που διαθέτουμε πειραματικές μετρήσεις για τα εύρη ρωγμών. Τα αποτελέσματα καταχωρούνται στον Πίνακα 3-2:

Πίνακας 3-2 Πειραματικές μετρήσεις εύρους ρωγμής στη δοκό με οπλισμό από C-FRP

Ροπή $M_i$ [kNm]	Εύρος ρωγμής $w_{k_i}$ [mm]
35.856	0.235
42.768	0.296
49.68	0.359
63.504	0.487



Σχήμα 3-2 Θεωρητικό εύρος ρωγμής στη δοκό με οπλισμό C-FRP



### 3.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΒΥΘΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ

#### 3.4.1 Μέγιστη βύθιση στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της δοκού με οπλισμό από χάλυβα είναι:

- Πλάτος διατομής:  $b = 200 \text{ mm}$
- Ύψος διατομής:  $h = 300 \text{ mm}$
- Οπλισμός 2Φ14
- Πλάτος επικάλυψης:  $c_{nom} = 20 \text{ mm}$
- Διάμετρος οπλισμού διάτμησης:  $\phi_L = 10 \text{ mm}$
- Στατικό ύψος:  $d = 263 \text{ mm}$
- Εμβαδό οπλισμού:  $A_s = n \frac{\pi d^2}{4} = 307.88 \text{ mm}^2$
- Κατηγορία σκυροδέματος C30/35 οπότε:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα κατηγορίας S500:  $E_s = 200000 \text{ MPa}$
- $E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 34178.36 \text{ MPa}$
- $a_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.85$
- $x = 60.4 \text{ mm}$

Ροπή αδράνειας ρηγματωμένης διατομής ως προς τον ουδέτερο άξονα:

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b x^3 + (\alpha_e A_f d^2 - \alpha_e A_f x^2) = 88639137.61 \text{ mm}^4$$

Ροπή αδράνειας μη ρηγματωμένης διατομής:

$$I_{ucr} = \frac{b h^3}{12} + \left( 0.5 - \zeta' \frac{d}{h} \right)^2 b h^3 + (1 - \zeta')^2 (\alpha_e - 1) A_f d^2 = 468609869.5 \text{ mm}^4$$

$$\zeta' = \frac{0.5(h/d)^2 + (a_e - 1)\rho_s}{h/d + (a_e - 1)\rho_s} = 0.581$$

Ποσοστό οπλισμού

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd} = 0.0059$$

Για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας της διατομής, για μια ενδεικτική τιμή της ασκούμενης δύναμης έστω:

$$\Sigma F = 60.33 \text{ kN}$$

προκύπτει ροπή

$$M = Pa = \frac{\Sigma F}{2} a = 28.96 \text{ kNm} = 28958400 \text{ Nmm}$$

χρησιμοποιούμε τους συντελεστές

$$\varphi_{II} = \frac{M}{E_{cm} I_{cr}} = 9.56 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

και

$$\varphi_I = \frac{M}{E_{cm} I_{ucr}} = 1.81 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$$

και εν τέλει η καμπυλότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi = \frac{M_{cr}}{M} \left( 1 - \left( \frac{M - M_{cr}}{M_C - M_{cr}} \right)^m \right) \varphi_I + \left[ 1 - \frac{M_{cr}}{M} \left( 1 - \left( \frac{M - M_{cr}}{M_C - M_{cr}} \right)^m \right) \right] \varphi_{II} = 8.93 \cdot 10^{-6}$$

Όπου ο συντελεστής k της δοκού είναι:

$$k = 0.125 - \frac{a^2}{6} = 0.105$$

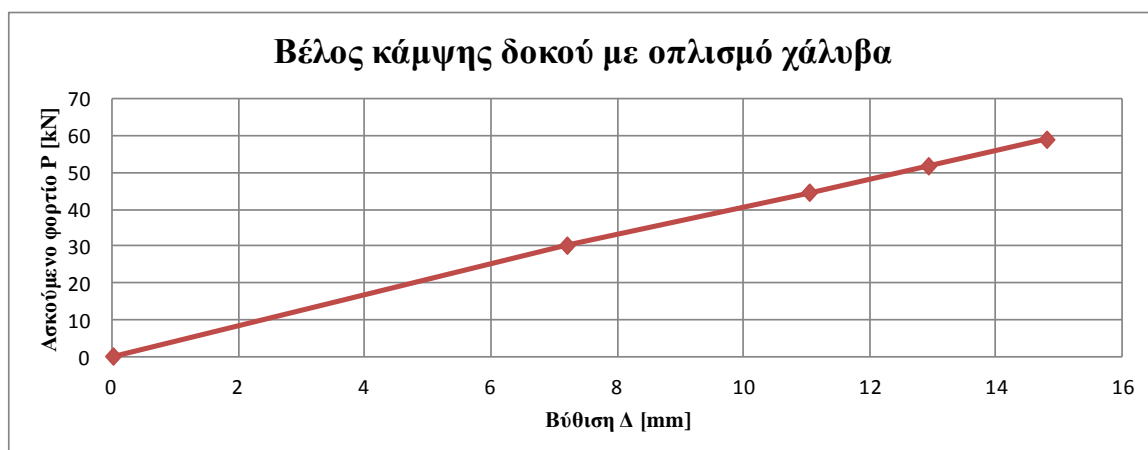
Η μέγιστη βύθιση προκύπτει:

$$\Delta = kl^2 \phi = 7.19 \text{ mm}$$

Με την ίδια διαδικασία, υπολογίζουμε τις μέγιστες βυθίσεις της δοκού για διάφορες τιμές των φορτίων  $P/2$  που επιβάλλονται στη δοκό. Τα αποτελέσματα σε μορφή πίνακα δείχνονται στον Πίνακα 3-4 και διαγραμματικά στο Σχήμα 3-4:

Πίνακας 3-3 Προσδιορισμός βυθίσεων στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2})$ [kN]	Ροπή $M$ [kNm]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{th}$ [mm]	Καμπυλότητα $\Phi$
60.3	30.15	28.9584	7.190163	8.9262E-06
89.1	44.55	42.792	11.02921	1.36922E-05
103.5	51.75	49.7088	12.91463	1.60328E-05
117.9	58.95	56.6208	14.78841	1.8359E-05



Σχήμα 3-3 Λιάγραμμα P-Δ στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

### 3.4.2 Βέλος κάμψης στη δοκό με οπλισμό από C-FRP

- Με βάση και τους υπολογισμούς που έγιναν σε παραπάνω στάδια της παρούσας εργασίας, τα δεδομένα μας, προκύπτουν ως εξής:
- Πλάτος διατομής:  $b = 200$  mm
- Ύψος διατομής:  $h = 300$  mm
- Οπλισμός 3Φ12.7

- Πλάτος επικάλυψης:  $c_{nom} = 20 \text{ mm}$
- Διάμετρος οπλισμού διάτμησης:  $\phi_L = 10 \text{ mm}$
- Προκύπτει στατικό ύψος:  $d = 263.65 \text{ mm}$
- Επίσης προκύπτει εμβαδό οπλισμού:  $A_f = n \frac{\pi d^2}{4} = 380.03 \text{ mm}^2$
- Τύπο σκυροδέματος C30/35 οπότε:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Μέτρο ελαστικότητας C-FRP:  $E_f = 130000 \text{ MPa}$
- $E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 34178.36 \text{ MPa}$
- $a_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = 3.8$
- $x = 54.9 \text{ mm}$

Ροπή αδράνειας ρηγματωμένης διατομής ως προς τον ουδέτερο άξονα:

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b x^3 + (\alpha_e A_f d^2 - \alpha_e A_f x^2)$$

Ροπή αδράνειας μη ρηγματωμένης διατομής:

$$I_{ucr} = \frac{b h^3}{12} + \left( 0.5 - \zeta' \frac{d}{h} \right)^2 b h^3 + (1 - \zeta')^2 (\alpha_e - 1) A_f d^2$$

$$\zeta' = \frac{0.5(h/d)^2 + (\alpha_e - 1)\rho_f}{h/d + (\alpha_e - 1)\rho_f}$$

Και ποσοστό οπλισμού:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$$

χρησιμοποιούμε τους συντελεστές

$$\varphi_{II} = \frac{M}{E_{cm} I_{cr}}$$

και

$$\varphi_I = \frac{M}{E_{cm} I_{ucr}}$$

και εν τέλει η καμπυλότητα δίνεται από τη σχέση:

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

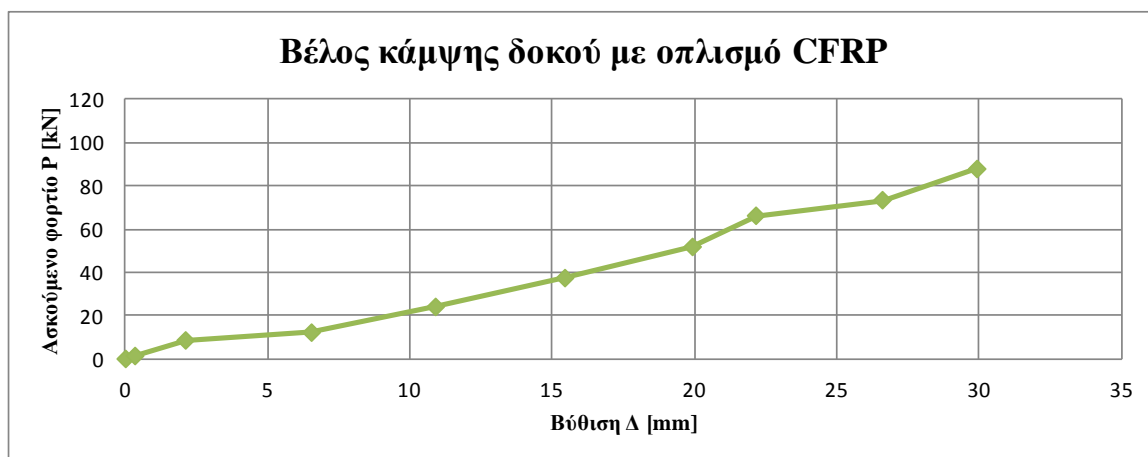
Η μέγιστη βύθιση προκύπτει από τη σχέση:

$$\Delta = kl^2 \phi$$

Με την ίδια διαδικασία, υπολογίζουμε τις μέγιστες βυθίσεις της δοκού για διάφορες τιμές των φορτίων P/2 που επιβάλλονται στη δοκό. Τα αποτελέσματα σε μορφή πίνακα δείχνονται στον Πίνακα 3-5 και διαγραμματικά στο Σχήμα 3-5:

**Πίνακας 3-4 Προσδιορισμός βυθίσεων στη δοκό με οπλισμό από C-FRP**

Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2})$ [kN]	Ροπή $M$ [kNm]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{th}$ [mm]	Καμπυλότητα $\Phi$
0	0	0	0	0
2.70	1.35	1296000	0.330177	
17.10	8.55	8208000	2,107078	4.09896E-07
24.30	12.15	11664000	6.532686	2.61582E-06
48.06	24.03	23068800	10.89383	8.10998E-06
74.70	37.35	35856000	15.44081	1.35241E-05
103.50	51.75	49680000	19.92448	1.91689E-05
132.30	66.15	63504000	22.15422	2.47352E-05
146.70	73.35	70416000	26,59943	2.75033E-05
175.50	87.75	84240000	29.92497	3.30218E-05
197.10	98.55	94608000		



Σχήμα 3-4 Διάγραμμα P-Δ στη δοκό με οπλισμό από C-FRP

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν οι πειραματικές δοκιμές που εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και στοιχείων Τεχνικών Έργων, της Σ.Α.Τ.Μ του Ε.Μ.Π.. Ο σκοπός του πειράματος, ήταν η παρατήρηση της κατακόρυφης μετατόπισης - βέλους κάμψης (βύθισης) δύο δοκών σε φυσικό μέγεθος, με διαφορετικό οπλισμό (C-FRP και χάλυβα). Παράλληλα, η παρατήρηση της εμφάνισης της πρώτης ρωγμής (για τον υπολογισμό της ροπής ρηγμάτωσης), όπως επίσης και το σχηματισμό των καμπτικών ρωγμών. Από το σχηματισμό αυτό θα μπορούσαμε τελικά να μετρήσουμε την απόσταση των ρωγμών μεταξύ τους, αλλά και το εύρος τους.

Για το πείραμα αυτό, κατασκευάστηκαν τρεις δοκοί με διαστάσεις φυσικού μεγέθους, που θα παρουσιαστούν παρακάτω. Ο οπλισμός που τοποθετήθηκε, αποτελούνταν από ράβδους συγκεκριμένων διαστάσεων, αλλά και συνδετήρες. Οι δοκοί αυτοί αποτελούνταν από σκυρόδεμα συγκεκριμένης αντοχής, όπως ακριβώς παραγγέλθηκε από εταιρεία οικοδομικών υλικών. Η κατασκευή τους έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε στις δοκούς FRP να εμφανιστεί αστοχία στο σκυρόδεμα, ενώ στη δοκό από χάλυβα να εμφανιστεί διαρροή οπλισμού.

Οι δοκοί αυτοί, ανυψώθηκαν με γερανό και τοποθετήθηκαν στην εργαστηριακή κατασκευή του Εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής και στοιχείων Τεχνικών Έργων, το οποίο αποτελείται από δομικό σύστημα μεταλλικού πλαισίου και με το σύστημα φόρτισης, θα ασκούσε πίεση στις δοκούς και θα τις έθετε υπό κάμψη.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν, μηχανικά και ηλεκτρονικά βελόμετρα, καθώς και οπτικοακουστικά μέσα.

Η διαδικασία, οι πειραματικές μετρήσεις-αποτελέσματα, τα στοιχεία των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν και των δοκών που κατασκευάστηκαν, θα παρουσιαστούν αναλυτικά στα παρακάτω κεφάλαια.

## 4.2 ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Για την εκτέλεση των πειραματικών έργων της παρούσας εργασίας, κατασκευάστηκαν δύο πειραματικές δοκοί σκυροδέματος, με οπλισμό χάλυβα και C-FRP. Η κατασκευή των καλουπιών, η όπλιση των δοκών και η σκυροδέτηση, έγινε στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και στοιχείων Τεχνικών Έργων της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ. Τα καλούπια με τον οπλισμό πριν τη σκυροδέτηση, δείχνονται στο Σχήμα 4-1. Οι δοκοί σχεδιάστηκαν να έχουν τις ίδιες διαστάσεις προκειμένου να γίνει και σύγκριση στη μεταξύ τους καμπτική συμπεριφορά. Επίσης, οι ράβδοι οπλισμού που τοποθετήθηκαν, επιλέχθηκαν έτσι ώστε το εμβαδό οπλισμού και στις τρεις δοκούς να είναι περίπου το ίδιο. Για το λόγο αυτό, στη δοκό με οπλισμό CFRP, τοποθετήθηκαν τρεις ράβδοι διαμέτρου 12.7 mm, ενώ στη δοκό με οπλισμό χάλυβα, δύο ράβδοι διαμέτρου 14 mm (Σχήματα 4-2 έως 4-3). Τοποθετήθηκε, επίσης, σε όλες τις δοκούς διατμητικός οπλισμός (μεταλλικοί συνδετήρες), Φ10/. Στις δοκούς δεν τοποθετήθηκε δευτερεύων οπλισμός, για να μην υπάρξουν ευνοϊκές επιδράσεις στην καμπτική αντοχή των δοκών.





Σχήμα 4-1 Τα καλούπια πριν τη σκυροδέτηση



Σχήμα 4-2 Ο οπλισμός ράβδων χάλυβα και ο διατμητικός οπλισμός



Σχήμα 4-3 Ο οπλισμός ράβδων C-FRP και ο διατμητικός οπλισμός



Σχήμα 4-4 Τα πειραματικά δοκίμια μετά τη σκυροδέτηση

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των δοκών, παραγγέλθηκε από βιομηχανική εταιρεία σκυροδέματος, με κυλινδρική θλιπτική αντοχή  $f_{ck}$  30 MPa.

Στους Πίνακες 4-1 και 4-2, παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4-1 Γεωμετρία και μηχανικές ιδιότητες των ράβδων οπλισμού

	C-FRP	Χάλυβας
Ονομαστική διάμετρος, mm	12.7	12
Εμβαδόν διατομής, mm <sup>2</sup>	380.03	307.88
Ειδικό βάρος, g/m	187.5	887
Εφελκυστική αντοχή, MPa	2300	500
Ονομαστικό Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	130	200
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Διαμήκη Διεύθυνση, K <sup>-1</sup>	$0.8 \times 10^{-6}$	$10^{-5}$

Πίνακας 4-2 Γεωμετρικά στοιχεία διατομών και οπλισμού των πειραματικών δοκών

Τύπος Οπλισμού	Ονομασία Δοκού	Επικάλυψη [mm]	Κύριος Οπλισμός	Ποσοστό Οπλισμού %
C-FRP	C-Beam	20	3Φ12.7	7.21
Χάλυβας	S-Beam	20	2Φ14	5.85

Στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ., εκτιμάται ότι, η θερμοκρασία που έγιναν οι πειραματικές δοκιμές, ήταν περίπου στους 20° C και η υγρασία δεν ξεπερνούσε το 90%. Προκειμένου να αποκτήσει το σκυρόδεμα την ολική αντοχή του, αφού έγινε η σκυροδέτηση, τα πειραματικά δοκίμια παρέμειναν για 28 ημέρες στα καλούπια, ενώ τηρήθηκαν όλες οι απαραίτητες προδιαγραφές προκειμένου να μην επηρεαστεί η πειραματική δοκός, από την αύξηση της θερμοκρασίας που συντελείται στο σκυρόδεμα, μετά τη σκυροδέτηση.

### 4.3 ΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι πειραματικές δοκιμές εκτελέστηκαν αφού είχε περάσει το χρονικό όριο των 28 ημερών από την κατασκευή των πειραματικών δοκών. Το πείραμα για τη δοκό με οπλισμό C-FRP (C-Beam), διεξήχθη 174 μέρες μετά τη σκυροδέτηση των δοκών, ενώ το πείραμα για τη δοκό με οπλισμό χάλυβα (S-Beam) 182 μέρες μετά τη σκυροδέτηση. Για το χρονικό αυτό διάστημα, θεωρούμε ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, παρέμεινε στα 30 MPa.

Οι στηρίξεις των δοκών απείχαν μεταξύ τους 277 cm και 21.5 cm από τα άκρα τους η καθεμία. Στις δοκούς επιβλήθηκαν δύο ίσες δυνάμεις, μέσω του συστήματος φόρτισης του μεταλλικού πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές, η περιγραφή του οποίου θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο. Οι δυνάμεις αυτές, είχαν απόσταση μεταξύ τους 85 cm. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήσαμε όρους ώστε να προξηνηθεί καθαρή κάμψη στο μεσαίο τμήμα της δοκού. Η φόρτιση ήταν αυξανόμενη με συγκεκριμένες παύσεις, προκειμένου να παρθούν οι αντίστοιχες μετρήσεις. Η φόρτιση της δοκού γινόταν βαθμιαία και με αυξανόμενο τρόπο, μέχρι την αστοχία των δοκών.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν, είχαν σκοπό τη μέτρηση των παρακάτω τιμών:

- της βύθισης των δοκών σε τρία σημεία, το ένα σημείο βρισκόταν στο μέσο της δοκού και τα άλλα δύο σε θέσεις που απείχαν 50 cm από το κέντρο,
- της φόρτισης της δοκού από τη μηχανή κάμψης,
- του εύρους των σχηματιζόμενων ρωγμών,
- της απόστασης των σχηματιζόμενων ρωγμών μεταξύ τους.

Η βύθιση των δοκών μετριόταν με τρία βελόμετρα, ένα μηχανικό, και δύο ηλεκτρονικά LVDT, που είχαν τοποθετηθεί με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω (Σχήματα 4-5 και 4-6). Η φόρτιση καταγραφόταν μέσω του πιεσόμετρου, που διέθετε η μηχανή κάμψης του εργαστηρίου, που ήταν τοποθετημένη στην ηλεκτροϋδραυλική αντλία της (Σχήμα 4-7). Το εύρος των ρωγμών μετριόταν με οπτικό μικροσκόπιο (Σχήμα 4-8). Οι αποστάσεις των σχηματισμένων ρωγμών μετρήθηκαν στο τέλος του κάθε πειράματος με κλιμακόμετρο.



Σχήμα 4-5 Τα μηχανικά βελόμετρα για τη μέτρηση της βύθισης των δοκών



Σχήμα 4-6 Τα ηλεκτρονικά βελόμετρα για τη μέτρηση της βύθισης



Σχήμα 4-7 Αντλία και το πιεσόμετρο της αντλίας



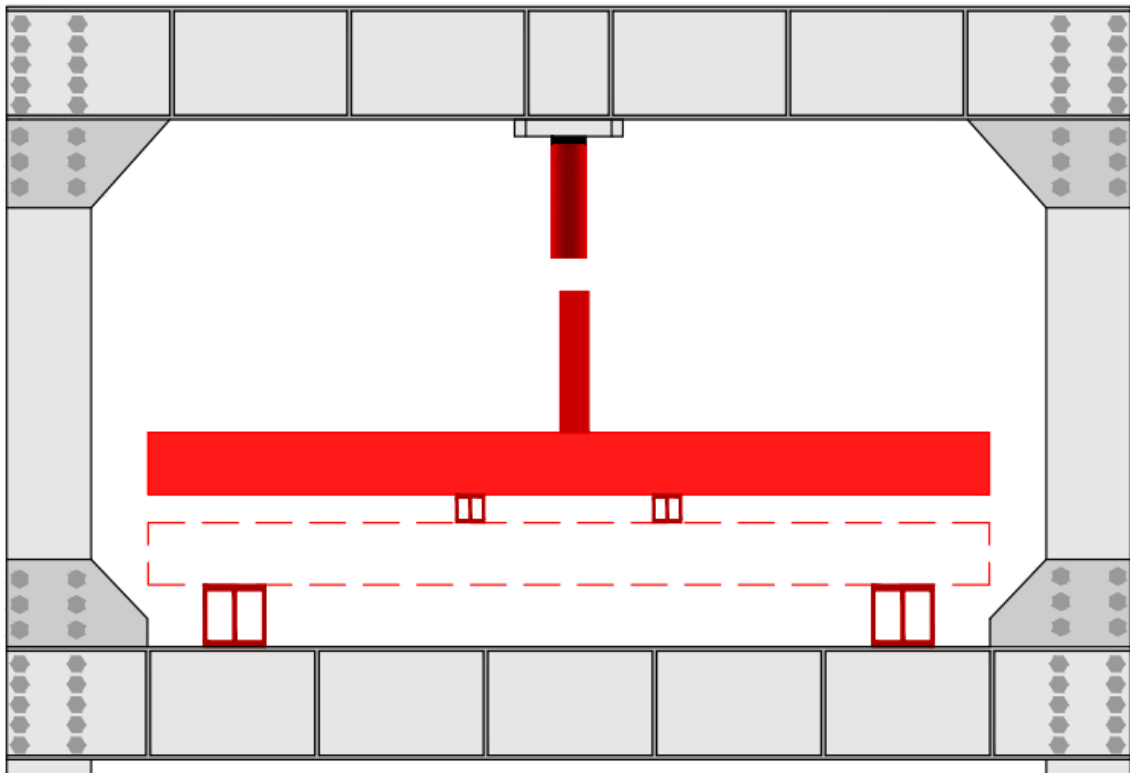
Σχήμα 4-8 Το οπτικό μικροσκόπιο

#### 4.4 Η ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

Η εργαστηριακή κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη των πειραματικών δοκιμών, κατασκευάστηκε πρόσφατα από το Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. Το μεταλλικό πλαίσιο της εργαστηριακής κατασκευής των δοκιμών, το σύστημα φόρτισης και καταγραφής, δείχνονται στα Σχήματα 4-9, 4-10, 4-11.



Σχήμα 4-9 Το μεταλλικό πλαίσιο, η πειραματική δοκός και το σύστημα φόρτισης

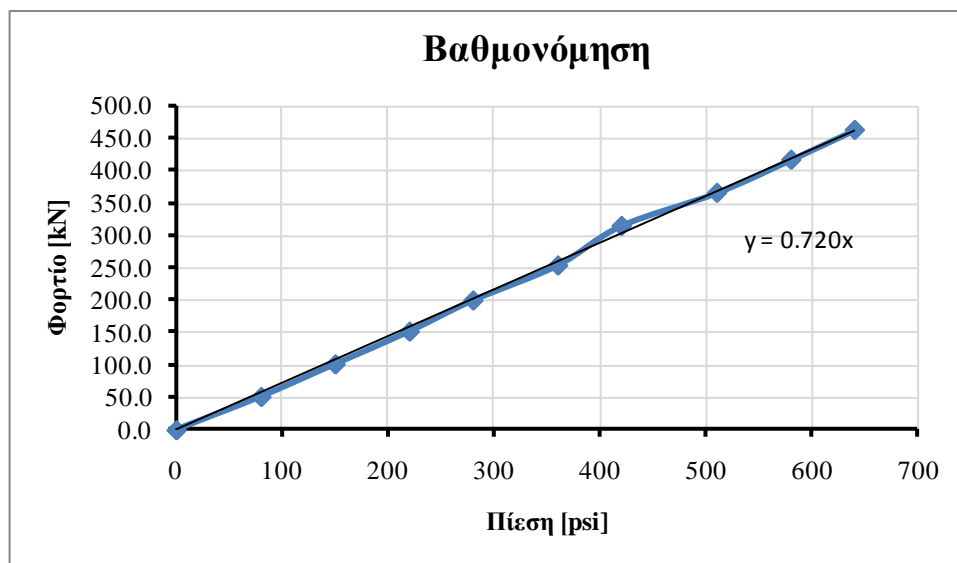


Σχήμα 4-10 Η διάταξη του συστήματος φόρτισης



Σχήμα 4-11 (αριστερά) η ηλεκτρο-υδραυλική αντλία και σωλήνες υψηλής πίεσης και (δεξιά) το έμβολο διπλής κατεύθυνσης και ταχυσύνδεσμοι

Στο Σχήμα 4-12, δείχνει τη σχέση μεταξύ της πίεσης που καταγράφει το πιεσόμετρο της αντλίας και του επιβαλλόμενου φορτίου από το έμβολο της μηχανής. Η αναλυτική σχέση μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών, είναι  $y = 0.720x$ .



Σχήμα 4-12 Η γραφική παράσταση της βαθμονόμησης της μηχανής

#### 4.5 Η ΡΟΠΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ

Οι δοκοί που κατασκευάστηκαν, υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Αυτό επιτεύχθηκε, με το σύστημα φόρτισης που αναφέρθηκε παραπάνω.

Όπως προαναφέραμε στις ενότητες 2.2.5 και 2.5, όταν η εφελκυστική αντοχή στην κάτω ίνα που βρίσκεται σε απόσταση  $y_i$  από τον ουδέτερο άξονα γίνει ίση με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, τότε εμφανίζεται η πρώτη ρωγμή στο σκυρόδεμα, η οποία συμβολίζεται ως ροπή  $M_{cr}$ . Σε αυτά τα κεφάλαια, παρουσιάσαμε τους τύπους με τους οποίους μπορούμε να υπολογίσουμε θεωρητικά τη ροπή ρηγμάτωσης. Έτσι μπορούμε να κάνουμε μία σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών τιμών, εξάγοντας έτσι τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Στον Πίνακα 4-3, που παραθέτουμε παρακάτω, παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές  $M_{cr,th}$  που υπολογίστηκαν με διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 2.5, καθώς επίσης και οι πειραματικές τιμές  $M_{cr,exp}$ , όπως καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

Παρατηρούμε ότι, ως προς τις θεωρητικές τιμές, υπάρχει μικρή διαφορά των τιμών  $M_{cr,th}$  για τους διαφορετικούς τύπος οπλισμού. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με τις πειραματικές τιμές, βλέπουμε ότι οι θεωρητικές τιμές των ροπών ρηγμάτωσης, είναι μικρότερες των αντίστοιχων πειραματικών.

Πίνακας 4-3 Θεωρητικές και πειραματικές ροπές ρηγμάτωσης των πειραματικών δοκών

Τύπος οπλισμού	Δοκός	Λόγος οπλισμού $\rho_f$ , [%]	$M_{cr,th}$ kNm	$M_{cr,exp}$ kNm
C-FRP	C-Beam	7.21	8.37	5.2
Χάλυβας	S-Beam	5.85	8.24	5.0

#### 4.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ

Η φόρτιση των δοκών, ήταν αυξανόμενη, ενώ πραγματοποιήθηκαν κάποιες παύσεις, έτσι ώστε να γίνουν οι καταγραφές του σχηματισμού των ρωγμών, αλλά και του εύρους τους.



Μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, παρατηρήθηκε ο σχηματισμός ρωγμών στα διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Οι φωτογραφίες από το σχηματισμό ρωγμών, δείχνονται στα Σχήματα 4-13 και 4-14 για κάθε δοκό ξεχωριστά. Οι ρωγμές, εμφανίστηκαν στο μεσαίο τμήμα της δοκού και ήταν κατακόρυφες. Αυτό συνέβη επειδή στο τμήμα αυτό υπήρχε καθαρή κάμψη με τις κύριες εφελκυστικές τάσεις σε οριζόντια διεύθυνση. Η διεύθυνση λοιπόν των ρωγμών ήταν κάθετη προς τη διεύθυνση των εφελκυστικών τάσεων. Όσο αυξανόταν το φορτίο, το μήκος των υπαρχουσών ρωγμών αυξανόταν έως τη θλιβόμενης ζώνη των δοκών, ενώ σχηματιζόνταν νέες ρωγμές. Στις νέες ρωγμές, η διεύθυνσή τους φαινομενικά φαινόταν να αλλάζει και να κατευθύνεται προς το σημείο που εμφανίστηκε η τελική θραύση της δοκού. Στην πραγματικότητα, η διεύθυνσή τους, παρέμεινε κάθετη, ως προς τις εφελκυστικές τάσεις. Η απόσταση των ρωγμών μεταξύ τους, τόσο στις δοκούς FRP, αλλά και στη δοκό με οπλισμό χάλυβα, ήταν περίπου 200 mm.

**Πίνακας 4-4 Θεωρητικές και πειραματικές αποστάσεις, μεταξύ των προτεουσών ρωγμών**

Τύπος οπλισμού	Δοκός	$s_{r,max,th}$ [mm]	$s_{r,max,exp}$ [mm]
C-FRP	C Beam	200,56	200
Χάλυβας	S Beam	191,53	200



**Σχήμα 4-13 Οι κύριες ρωγμές στη δοκό με οπλισμό C-FRP**



Σχήμα 4-14 Οι κύριες ρωγμές στη δοκό με οπλισμό χάλυβα

#### 4.7 ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, καταγράφηκαν με λεπτομερή τρόπο, οι βυθίσεις των τριών πειραματικών δοκών. Για επιβεβαίωση της λειτουργίας του συστήματος, αλλά και της πειραματικής διαδικασίας ως προς την εγκάρσια βύθιση, καταγράφηκαν και μετρήσεις σε δύο πλάγιες θέσεις, όπως αναφέραμε παραπάνω.

Στο Παράρτημα I, παρουσιάζονται λεπτομερώς, οι πειραματικές μετρήσεις της βύθισης των τριών δοκών, στους Πίνακες I-1 έως I-6 και στα αντίστοιχα διαγράμματα των Σχημάτων I-1 έως I-6.

Στην πρώτη στήλη των πινάκων αυτών, έχουν καταχωρηθεί οι τιμές  $p_i$  της πίεσης της αντλίας σε μονάδες  $psi$ .

Στη δεύτερη στήλη, έχουν καταχωρηθεί οι τιμές  $F_i$  σε  $kN$  της δύναμης που εξασκείται στη δοκό και αντιστοιχεί στην πίεση  $p_i$ .

Στην τρίτη στήλη, έχουν καταχωρηθεί οι τιμές  $P_i = F_i + w$ , όπου  $w = 2.69$   $kN$  το σταθερό βάρος του μεταλλικού στοιχείου, που χρησιμοποιείται στο μεταλλικό πλαίσιο για το διαμερισμό της δύναμης που εξασκεί το έμβολο σε  $N$ .

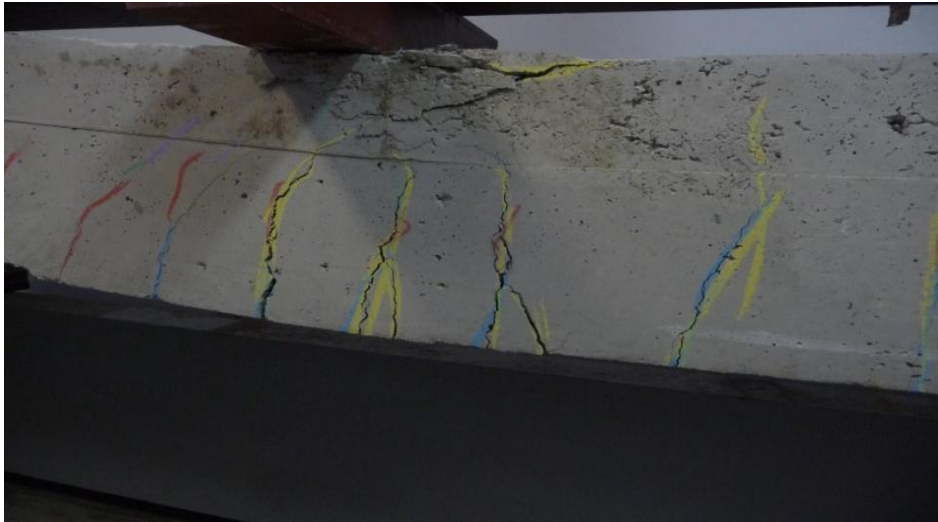
Τέλος, οι διάφορες τιμές στην τέταρτη στήλη, έχουν καταχωρηθεί, ως οι τιμές των βυθίσεων που καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, σε *mm*.

#### 4.8 Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των πειραματικών δοκών, έγιναν έτσι ώστε να εμφανιστεί αστοχία από θρυμματισμό σκυροδέματος στις δοκούς με οπλισμό FRP και διαρροή οπλισμού στη δοκό από χάλυβα. Η πειραματική διαδικασία, επιβεβαίωσε τον παραπάνω σχεδιασμό. Τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης *P-Δ* δείχνουν το μέγιστο φορτίο, αλλά και τη μέγιστη ροπή αντίστοιχα, που μπορεί να καταπονήσει τις δοκούς. Το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη ροπή, είναι το σημείο που εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο στο αντίστοιχο διάγραμμα. Πρόκειται για τη στιγμή που προκαλείται ουσιαστικά αστοχία από θρυμματισμό σκυροδέματος στη δοκό με οπλισμό FRP και η διαρροή οπλισμού, αντίστοιχα, στη δοκό με οπλισμό χάλυβα. Πειραματικά, αυτό φάνηκε με το θρυμματισμό σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη των δοκών. Από αυτό το χρονικό σημείο και μετά θεωρήσαμε ότι η δοκός έχει καταρρεύσει και σταματήσαμε να καταπονούμε τις δοκούς με φορτίο. Στα Σχήματα 4-15 και 4-16 δείχνεται η αστοχία των τριών πειραματικών δοκών.



Σχήμα 4-15 Η θραύση στη δοκό με οπλισμό C-FRP



Σχήμα 4-16 Η θραύση στη δοκό με οπλισμό χάλυβα

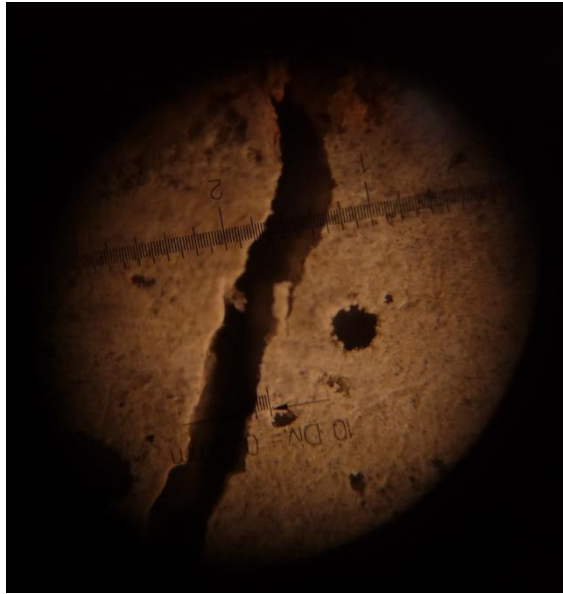
Στον Πίνακα 4-5 παρουσιάζονται οι τιμές που καταγράφηκαν από την πειραματική διαδικασία για τις τρεις διαφορετικές δοκούς, καθώς και οι τιμές που είχαμε προβλέψει στη θεωρητική ανάλυση, που πραγματοποιήσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, με τις σχέσεις που αναπτύξαμε. Στη θεωρητική επεξεργασία, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι οι συντελεστές ασφάλειας και οι άλλοι παράμετροι των σχέσεων, λήφθηκαν ίσοι με τη μονάδα δηλαδή  $\gamma_s = \gamma_c = 1$  για το χάλυβα και  $\gamma_s = \gamma_c = a_{cc} = 1$  για το C-FRP καθώς επιδιώκαμε πειραματικά τη θραύση των δοκών. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι σχέσεις που χρησιμοποιήσαμε, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς τις τιμές που προκύπτουν για την καμπτική ροπή αντοχής των δοκών.

Πίνακας 4-5 Θεωρητικές και πειραματικές τιμές, της καμπτικής αντοχής, των πειραματικών δοκών

Τύπος οπλισμού	Δοκός	$M_{Rd,th}$ [kNm]	$M_{Rd,exp}$ [kNm]
C-FRP	C-Beam	90	84
Χάλυβας	S-Beam	42	53

#### 4.9 ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

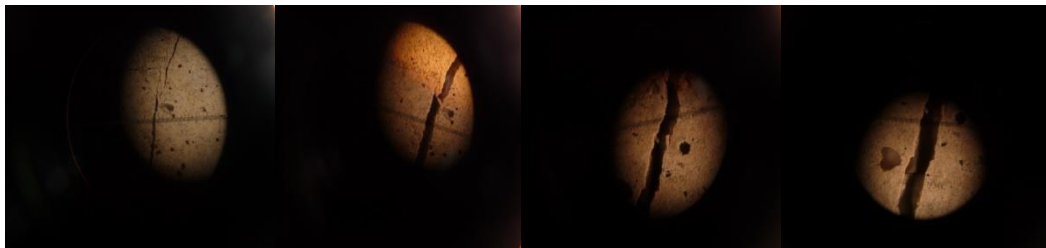
Κατά την πειραματική διαδικασία, το εύρος των ρωγμών στις δοκούς μετρήθηκε στη μεσαία πρωτεύουσα ρωγμή, που δείχνεται στο Σχήμα 4-17, στα διαστήματα που πραγματοποιήσαμε παύση εφαρμογής του φορτίου.



Σχήμα 4-17 Ρωγμή όπως παρατηρήθηκε σε οπτικό μικροσκόπιο

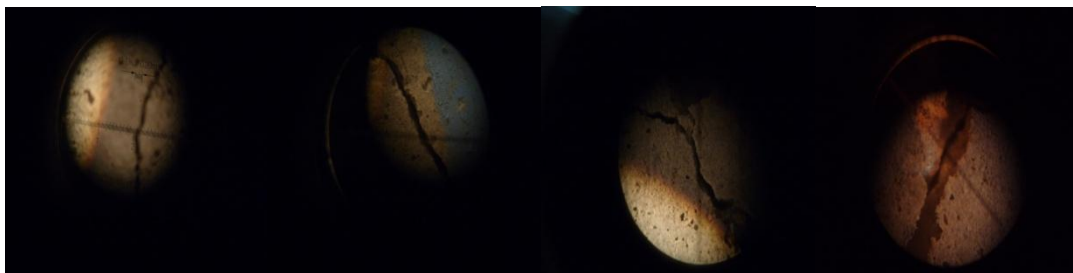
Ενδεικτικές φωτογραφίες των ρωγμών που παρατηρήθηκαν στις δοκούς, καθώς και η εξέλιξη του εύρους τους για τις δύο πειραματικές δοκούς, δείχνονται στις φωτογραφίες των Σχημάτων 4-18 και 4-19.

*Δοκός C-FRP*



Σχήμα 4-18 Η μεταβολή του εύρους ρωγμής στη δοκό με σπλισμό C-FRP

*Δοκός χάλυβα*



Σχήμα 4-19 Η μεταβολή του εύρους ρωγμής στη δοκό με σπλισμό χάλυβα

Οι τιμές του εύρους ρωγμών που καταγράφηκαν, έχουν καταχωρηθεί στους Πίνακες Π-1 έως Π-2 του Παραρτήματος ΙΙ. Στην πρώτη στήλη των πινάκων αυτών, έχουν καταχωρηθεί οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου  $P_i$  στις δοκούς σε  $kN$  και στη δεύτερη στήλη, οι τιμές του εύρους της ρωγμής της μέτρησης  $w_k$  σε  $mm$ . Επίσης, οι τιμές του εύρους των ρωγμών που μετρήθηκαν παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων εύρους, στα Σχήματα Π-1 έως Π-2 στο Παράρτημα ΙΙ. Από τα διαγράμματα και από τους πίνακες, φαίνεται η αυξητική μεταβολή του εύρους των ρωγμών, όταν αυξάνεται το φορτίο, όπως αναμενόταν. Αυτή η μεταβολή, προφανώς σταμάτησε, όταν συντελέστηκε η θραύση των δοκών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας, ήταν η πειραματική και θεωρητική ανάλυση της καμπτικής συμπεριφοράς, δοκών σκυροδέματος φυσικού μεγέθους, οπλισμένων με διαφορετικό είδος ράβδων. Η πειραματική ανάλυση έγινε στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. χρησιμοποιώντας για πρώτη φορά μια εργαστηριακή συσκευή που κατασκευάστηκε πρόσφατα. Συγκεκριμένα, έγιναν δύο πειραματικές δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δύο δοκούς σκυροδέματος, που είχαν ίδια ποιότητα σκυροδέματος, ίδια ποσότητα οπλισμού, αλλά διαφορετικά είδη οπλισμού. Η μία ράβδος ήταν οπλισμένη με χάλυβα και η άλλη με νέο οπλισμό C-FRP. Η θεωρητική και πειραματική ανάλυση που έγινε εστίασε στα παρακάτω θέματα:

- Στη ροπή ρηγμάτωσης των δοκών
- Στην καμπτική αντοχή των δοκών
- Στον τρόπο σχηματισμού της καμπτικής ρηγμάτωσης
- Στην απόσταση σχηματισμού ρωγμών
- Στο εύρος των ρωγμών συναρτήσει της φόρτισης
- Στη μέγιστη βύθιση συναρτήσει της φόρτισης

Για όλα τα παραπάνω θέματα, με τη σειρά που αναφέρθηκαν, τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συνδυασμένη θεωρητική και πειραματική ανάλυση παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω:

- Έγινε ο αναλυτικός προσδιορισμός της ροπής ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  με τη χρήση των γνωστών εξισώσεων της μηχανικής του οπλισμένου σκυροδέματος. Οι πειραματικές τιμές της ροπής ρηγμάτωσης των δοκών που εκτιμήθηκαν στις δύο πειραματικές δοκιμές βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις θεωρητικές τιμές. Οι θεωρητικές και πειραματικές τιμές για τις δύο δοκούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1 Θεωρητικές και πειραματικές τιμές της ροπής ρηγμάτωσης

Τύπος οπλισμού	Δοκός	$M_{cr,th}$ [kNm]	$M_{cr,exp}$ [kNm]
C-FRP	C-Beam	8.37	5.2
Χάλυβας	S-Beam	8.24	5.0

- Για το θεωρητικό προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής  $M_{Rd}$  χρησιμοποιήθηκαν οι σχετικές εξισώσεις που έχουν παραχθεί στη βιβλιογραφία για δοκούς σκυροδέματος από χάλυβα και FRP. Συγκεκριμένα, για τη δοκό με χαλύβδινο οπλισμό, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που έχουν προταθεί από τον EC2, ενώ στις δοκούς με οπλισμό C-FRP χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ.. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν για τις καμπτικές αντοχές των δύο δοκών και τα θεωρητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-2. Από τη σύγκριση των θεωρητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, προκύπτει πολύ καλή συμφωνία. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ορθότητα των θεωρητικών εξισώσεων για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής δοκών με οπλισμό FRP.



Πίνακας 5-2 Θεωρητική και πειραματική καμπτική ροπή αντοχής

Τύπος Οπλισμού	Ονομασία Δοκού	Θεωρητική Ροπή Θραύσης [kNm]	Πειραματική Ροπή Θραύσης [kNm]
C-FRP	C-Beam	89.97	84.24
Χάλυβας	S-Beam	42.3	53.136

- Κατά την εξέλιξη των πειραματικών δοκιμών καταγράφηκε, ο τρόπος σχηματισμού των καμπτικών ρωγμών. Οι ρωγμές αυτές σχηματίστηκαν στην περιοχή της καθαρής κάμψης, έτσι όπως θεωρητικά αναμενόταν. Η πρώτη ρωγμή σχηματίστηκε περίπου στο κέντρο της δοκού, και εν συνεχεία, άρχισαν να εμφανίζονται οι υπόλοιπες, αριστερά και δεξιά από την κεντρική, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Αρχικά, σε όλες τις δοκούς, οι πρωτεύουσες ρωγμές, σχηματίστηκαν σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, περίπου 200 cm, και ακολούθως, σχηματίστηκαν οι δευτερεύουσες στα μεσοδιαστήματα των πρωτευουσών. Οι ρωγμές αυτές εκτείνονταν, όσο μεγάλωνε η φόρτιση, σε όλο το ύψος της εφελκόμενης ζώνης, μέχρι τον ουδέτερο άξονα της διατομής. Λίγο πριν τη θραύση, παρατηρήθηκε και ο σχηματισμός των διατμητικών ρωγμών. Η απόσταση μεταξύ των πρωτευουσών ρωγμών  $s_{r,max}$  εκτιμήθηκε και θεωρητικά και πειραματικά, με τα αποτελέσματα να είναι σχεδόν ταυτόσημα. Αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3:

Πίνακας 5-3 Αποστάσεις πρωτευουσών ρωγμών

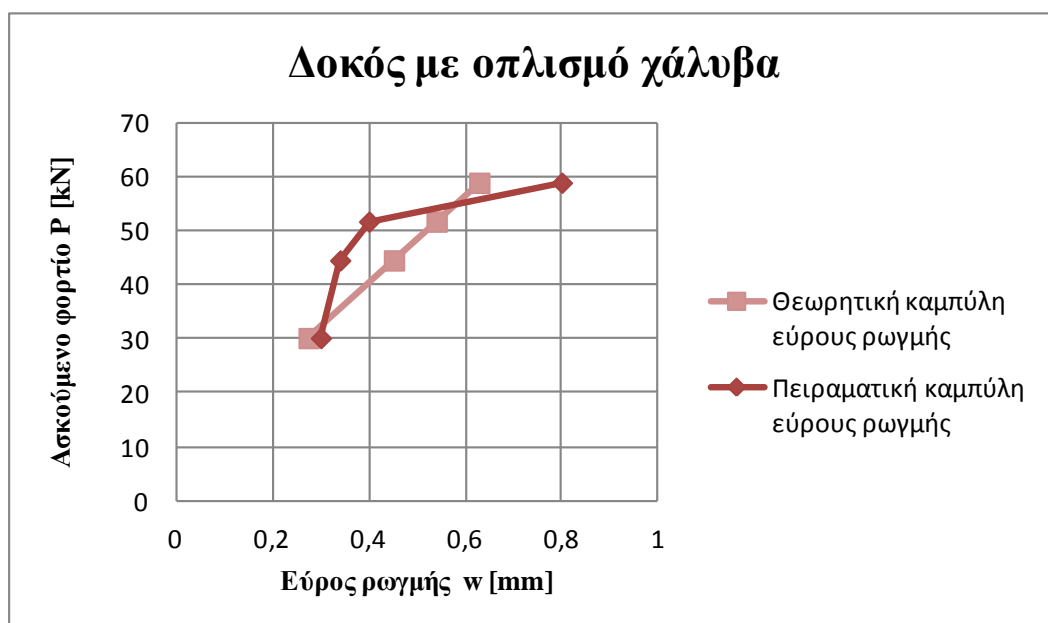
Τύπος οπλισμού	Δοκός	$S_{r,max,th}$ [mm]	$S_{r,max,exp}$ [mm]
C-FRP	C Beam	200.26	200
Χάλυβας	S Beam	191.53	200

- Ο θεωρητικός προσδιορισμός του εύρους των ρωγμών  $w_k$ , έγινε με χρήση των εξισώσεων που προτείνονται από τον EC2 για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα και με τις τροποποιημένες εξισώσεις του EC2 για τις δοκούς με οπλισμό C-FRP. Το πειραματικό εύρος των ρωγμών, προσδιορίστηκε συναρτήσει της φόρτισης της

δοκού με οπτικό μικροσκόπιο ακρίβειας 0.1mm. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, πειραματικών και θεωρητικών, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5-4 είναι πολύ καλή.

Πίνακας 5-4 Θεωρητικό και πειραματικό εύρος ρωγμών για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

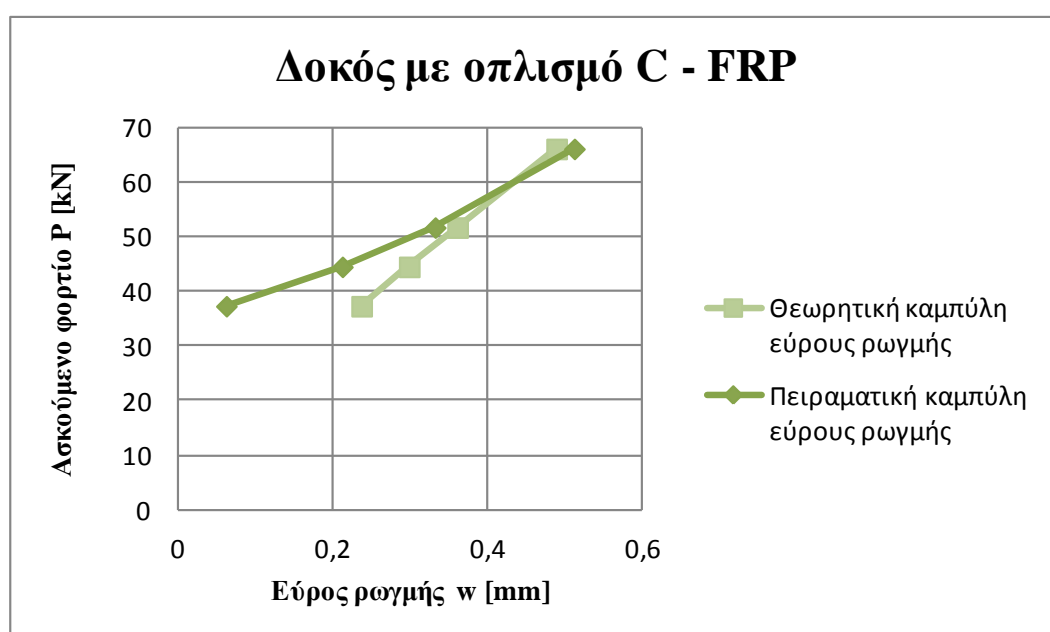
Ασκούμενο φορτίο P (=ΣF/2) [kN]	Ροπή M [kNm]	$W_{k,th}$ [mm]	$W_{k,exp}$ [mm]
30.15	28.94	0.275	0.3
44.55	42.77	0.452	0.34
51.75	49.68	0.540	0.4
58.95	56.59	0.629	0.8



Σχήμα 5-1 Σύγκριση θεωρητικού και πειραματικού εύρους ρωγμών για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Πίνακας 5-5 Θεωρητικό και πειραματικό εύρος ρωγμών για τη δοκό με οπλισμό από C-FRP

Ασκούμενο φορτίο P (=ΣF/2) [kN]	Ροπή M [kNm]	$w_{k,th}$ [mm]	$w_{k,exp}$ [mm]
37.35	35.86	0.235	0.06
44.55	42.77	0.296	0.21
51.75	49.68	0.359	0.33
66.15	63.50	0.487	0.51

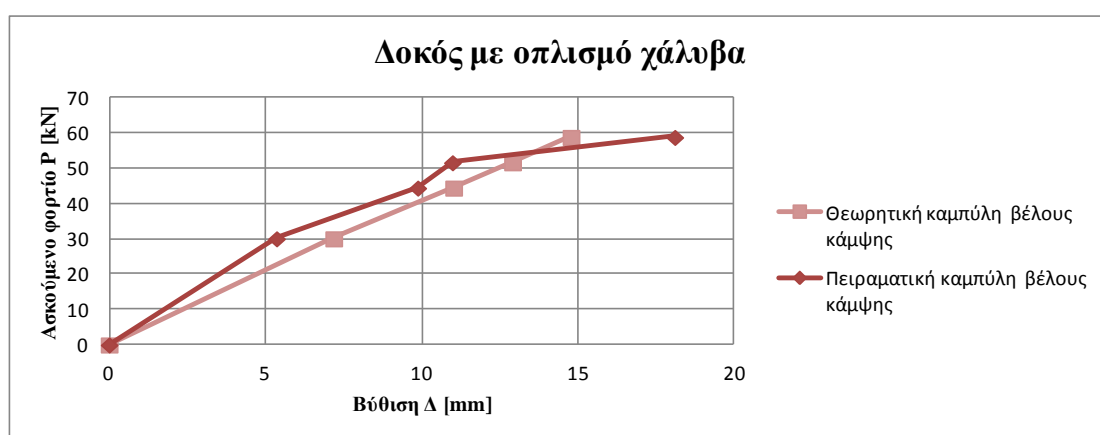


Σχήμα 5-2 Σύγκριση θεωρητικού και πειραματικού εύρους ρωγμών για τη δοκό με οπλισμό από C-FRP

- Ο θεωρητικός προσδιορισμός του βέλους κάμψης  $\Delta$  των δοκών, έγινε με βάση τις σχέσεις του EC2 για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα και με τις σχέσεις που έχουν εξαχθεί στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. για τη δοκό με οπλισμό C-FRP. Για τη μέτρηση της βύθισης, χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά και ηλεκτρονικά βελόμετρα. Με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συντάχθηκαν συγκριτικοί πίνακες και διαγράμματα φόρτισης-βύθισης (P- $\Delta$ ) τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Προέκυψε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα θεωρητικά.

Πίνακας 5-6 Θεωρητικές και πειραματικές τιμές βύθισης για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

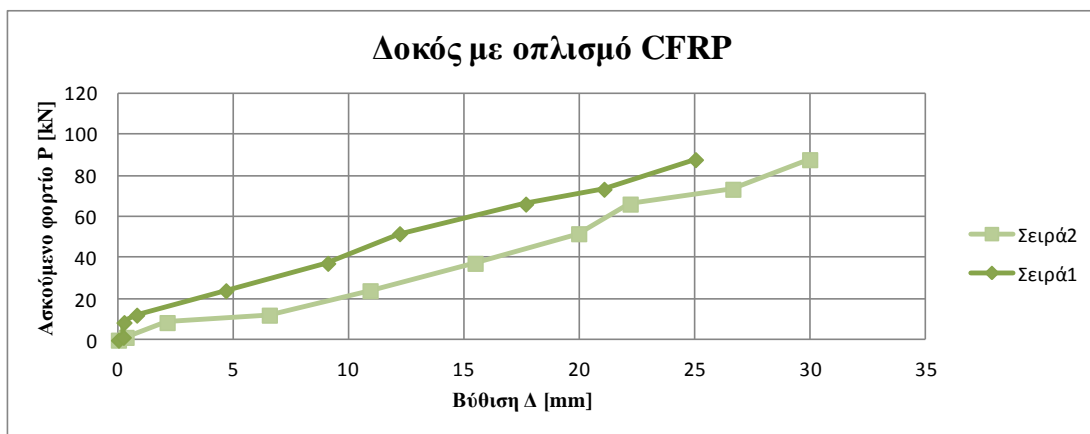
Ασκούμενο φορτίο $P_1$ ( $=\Sigma F/2$ ) [kN]	Ροπή $M$ [kNm]	$\Delta_{th}$ [mm]	$\Delta_{exp}$ [mm]
30.15	28.96	7.190	5.36
44.55	42.79	11.029	9.88
51.75	49.71	12.915	10.99
58.95	56.62	14.788	18.11



Σχήμα 5-3 Η βύθιση συναρτήσει του φορτίου για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Πίνακας 5-7 Θεωρητικές και πειραματικές τιμές βύθισης για τη δοκό με οπλισμό από C-FRP

Ασκούμενο φορτίο $P$ ( $=\Sigma F/2$ ) [kN]	Ροπή $M$ [kNm]	$\Delta_{th}$ [mm]	$\Delta_{exp}$ [mm]
0	0	0	0
1.35	1.30	0.330	0.21
8.55	8.21	2.107	0.24
12.15	11.66	6.533	0.79
24.03	23.07	10.894	4.65
37.35	35.86	15.441	9.06
51.75	49.68	19.924	12.17
66.15	63.50	22.154	17.63
73.35	70.42	26.599	21.02
87.75	84.24	29.925	24.98
98.55	94.61		



Σχήμα 5-4 Η βύθιση συναρτήσει του φορτίου για τη δοκό με οπλισμό από C-FRP

## 5.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Ως συνέχεια της έρευνας που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προτείνονται τα παρακάτω:

- Να γίνει παραμετρικός προσδιορισμός  $\beta$ ,  $k_f$  και  $k_m$  που υπεισέρχονται στις σχέσεις προσδιορισμού του εύρους ρωγμών, που προτείνονται στην ενότητα 3.3, σε όρους του μέτρου ελαστικότητας των ράβδων *FRP* και του ποσοστού οπλισμού. Η ανάπτυξη των σχετικών σχέσεων για τις παραμέτρους αυτές προϋποθέτει εκτεταμένη πειραματική ανάλυση της καμπτικής παραμορφωσιακής συμπεριφοράς δοκών με οπλισμό *FRP*, για διάφορους τύπους ράβδων και ποσοστών οπλισμού.
- Θα πρέπει να συνεχιστεί η πειραματική έρευνα, πάνω σε δοκίμια φυσικού μεγέθους δοκών για την παραπέρα μελέτη της καμπτικής αλλά και της διατμητικής συμπεριφοράς. Η θεωρητική και πειραματική ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς δοκών φυσικού μεγέθους, είναι μία εξαιρετικά χρήσιμη έρευνα. Αυτό, επειδή η πλειονότητα των πειραματικών δοκιμών που έχουν εκτελεστεί στο παρελθόν, αφορούν δοκίμια πειραματικού μεγέθους, τα οποία ενδεχομένως παρουσιάζουν αποκλίνουσα συμπεριφορά ως προς το μέγεθος των αποτελεσμάτων, σε σχέση με αυτά του φυσικού μεγέθους. Το φαινόμενο αυτό

συναντάται με τον όρο “size effects”. Τελικά, μία τέτοια εμπάθυνση, θα συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των θεωρητικών μοντέλων που αναπτύσσονται.

- Διαπιστώνοντας τις εκάστοτε αδυναμίες, που επιδεικνύουν, οι ράβδοι FRP, όπως για παράδειγμα το μεγάλο βέλος κάμψης χωρίς την αντίστοιχη εκμετάλλευση της μεγάλης αντοχής που παρέχουν, καθιστούν εξαιρετικά ενδιαφέροντα την ανάπτυξη σύνθετων-υβριδικών υλικών, που να συνδυάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των οπλισμών FRP, με αυτές του χάλυβα.
- Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε, ότι είναι αναγκαία η βελτίωση-αναβάθμιση, των μέσων που παρέχει το Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Τεχνικών Έργων της Σ.Α.Τ.Μ., σε σχέση με την εκπόνηση πειραματικών δοκιμών. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι οι δυσκολίες που εμφανίστηκαν, κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, είχαν σχέση με τις ελλείψεις, σύγχρονων καταγραφικών συστημάτων και τεχνικού εξοπλισμού. Ενώ στο αποτέλεσμα της εργασίας δεν φαίνεται κάτι αντίστοιχο, είναι εμφανές για το δυναμικό που εργάζεται, ότι η επιστημονική επεξεργασία και έρευνα που πραγματοποιείται, μένει αναξιοποίητη, όσο δεν συνδυάζεται με την αντίστοιχη τεκμηρίωση που προκύπτει από τις πειραματικές δοκιμές.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Kenneth Lee Deyoung, P.E., 2007. Flexure shear response in fatigue of fiber reinforced concrete beams with FRP tensile reinforcement, [1]

Agostino Monteleone, 2008. Numerical Analysis of Crack Induced Debonding Mechanism in FRP-Strengthened RC Beams, [2]

Trishanu Shit, 2011. Experimental and numerical study on behavior of externally bonded RC T-Beams using G-FRP composites, [3]

Mosley Bill, Bungey John, Hulse Ray, 2007. Reinforced concrete design to Eurocode 2 [4]

Martin L.H., Purkiss J.A., 1996. Concrete Design to EN 1992 [5]

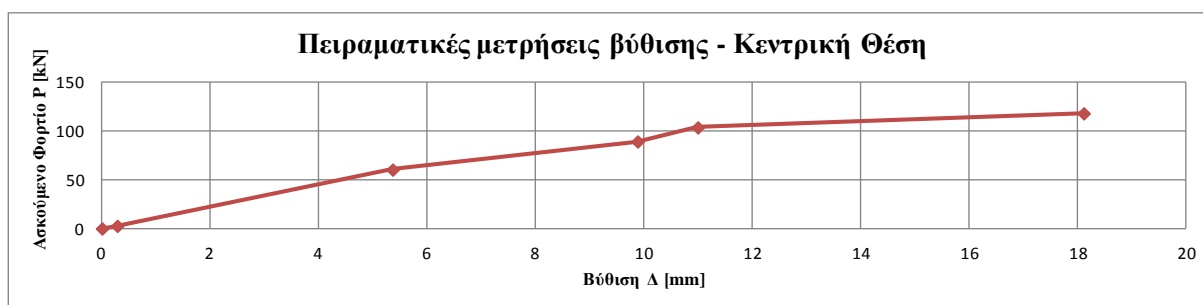
Καρατζαφέρης Βασίλειος, Διδακτορική Διατριβή, 2008. Ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σκυροδέματος, οπλισμένων με σύνθετες ράβδους [6]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: Πειραματικές μετρήσεις μέγιστης βύθισης

### I-1 Το βέλος κάμψης στη δοκό με οπλισμό

Πίνακας I-1 Πειραματικές μετρήσεις της μέγιστης βύθισης της δοκού, με οπλισμό από χάλυβα, στην κεντρική θέση μετρήσεων

Ασκούμενη πίεση $p_i$ [bar]	Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2})$ [kN]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{exp}$ [mm]
0	0	0	0
0	0	2.7	0.28
80	57.6	60.3	5.36
120	86.5	89.1	9.88
140	100.8	103.5	10.99
160	115.2	117.9	18.11

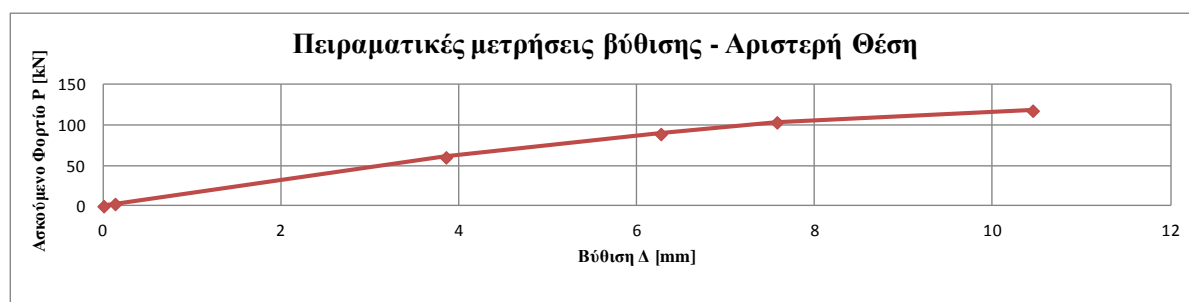


Σχήμα I-1



Πίνακας Ι-2 Πειραματικές μετρήσεις της μέγιστης βύθισης της δοκού, με οπλισμό από χάλυβα, στην αριστερή θέση μετρήσεων

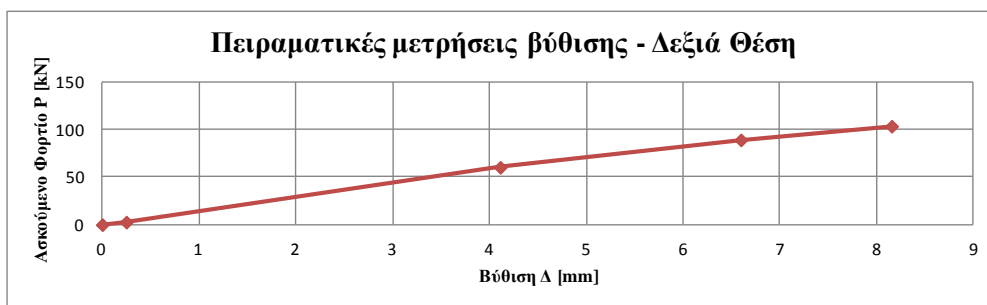
Ασκούμενη πίεση $p_i$ [bar]	Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2} + w)$ [kN]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{exp}$ [mm]
0	0	0	0
0	0	2.70	0.128
80	57.63	60.33	3.847
120	86.45	89.15	6.262
140	100.86	103.56	7.567
160	115.26	117.96	10.442



Σχήμα Ι-2

Πίνακας Ι-3 Πειραματικές μετρήσεις της μέγιστης βύθισης της δοκού, με οπλισμό από χάλυβα, στη δεξιά θέση μετρήσεων

Ασκούμενη πίεση $p_i$ [bar]	Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2} + w)$ [kN]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{exp}$ [mm]
0	0	0	0
0	0	2.70	0.248
80	57.63	60.33	4.11
120	86.45	89.15	6.595
140	100.86	103.56	8.152
160	115.26	117.96	

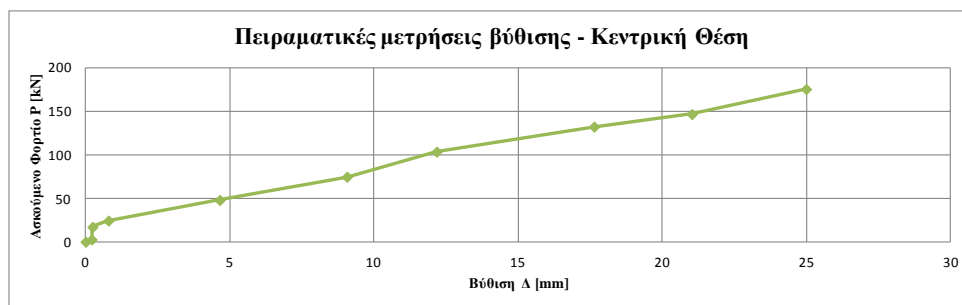


Σχήμα Ι-3

## I-2 Το βέλος κάμψης στη δοκό με οπλισμό C-FRP

Πίνακας Ι-4 Πειραματικές μετρήσεις της μέγιστης βύθισης της δοκού, με οπλισμό από C-FRP, στην κεντρική θέση μετρήσεων

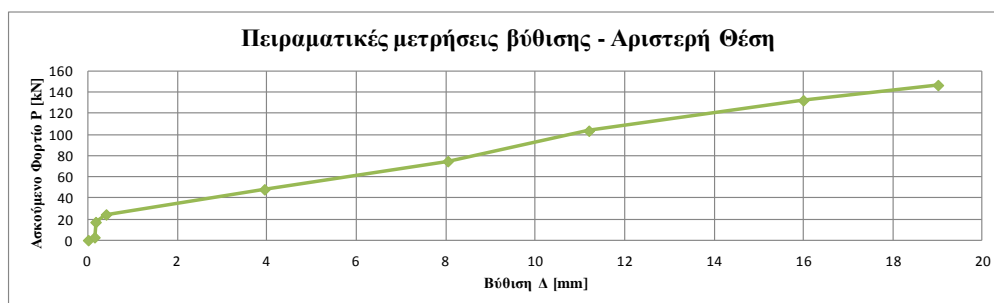
Ασκούμενη πίεση $p_i$ [bar]	Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2} + w)$ [kN]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{exp}$ [mm]
0	0	0	0
0	0	2.7	0.21
20	14.40	17.1	0.24
30	21.60	24.3	0.79
63	45.36	48.1	4.65
100	72.00	74.7	9.06
140	100.80	103.5	12.17
180	129.60	132.3	17.63
200	144.00	146.7	21.02
240	172.80	175.5	24.98
270	194.40	197.1	



Σχήμα Ι-4

Πίνακας Ι-5 Πειραματικές μετρήσεις της μέγιστης βύθισης της δοκού, με οπλισμό από C-FRP, στην αριστερή θέση μετρήσεων

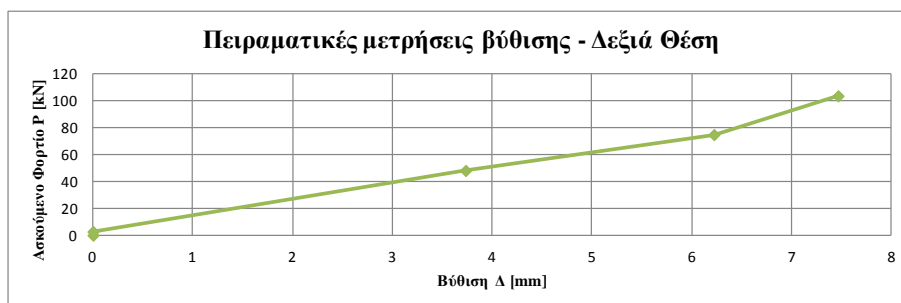
Ασκούμενη πίεση $p_i$ [bar]	Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2} + w)$ [kN]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{exp}$ [mm]
0	0	0	0
0	0	2.70	0.14
20	14.40	17.10	0.17
30	21.60	24.30	0.40
60	45.36	48.06	3.94
100	72.00	74.70	8.04
140	100.80	103.50	11.20
180	129.60	132.30	15.99
200	144.00	146.70	19.01
240	172.80	175.50	
270	194.40	197.10	



Σχήμα Ι-5

Πίνακας Ι-6 Πειραματικές μετρήσεις της μέγιστης βύθισης της δοκού, με οπλισμό από C-FRP, στη δεξιά θέση μετρήσεων

Ασκούμενη πίεση $p_i$ [bar]	Ασκούμενη δύναμη $\Sigma F$ [kN]	Ασκούμενο Φορτίο $P_i (= \frac{\Sigma F}{2} + w)$ [kN]	Βέλος Κάμψης $\Delta_{exp}$ [mm]
0	0	0	0
0	0	2.70	0
60	45.36	48.06	3.73
100	72.00	74.70	6.22
140	100.80	103.50	7.47



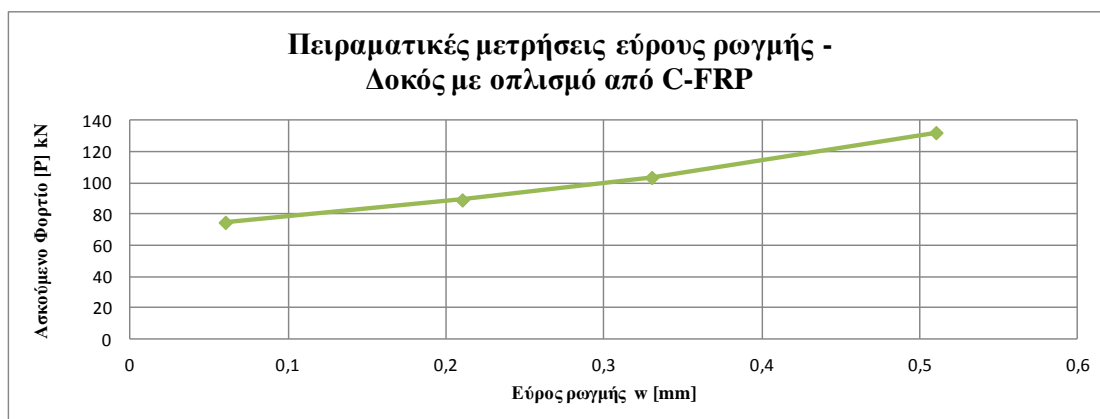
Σχήμα Ι-6

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: Πειραματικές μετρήσεις του εύρους ρωγμών

### ΙΙ-1 Το εύρος ρωγμής στη δοκό με οπλισμό από C-FRP

Πίνακας ΙΙ-1 Μετρήσεις του εύρους ρωγμής για τη δοκό με οπλισμό από C-FRP

Ασκούμενο Φορτίο $P_i$ [kN]	$w_{k,exp}$ [mm]
37.35	0.06
44.55	0.21
51.75	0.33
66.15	0.51

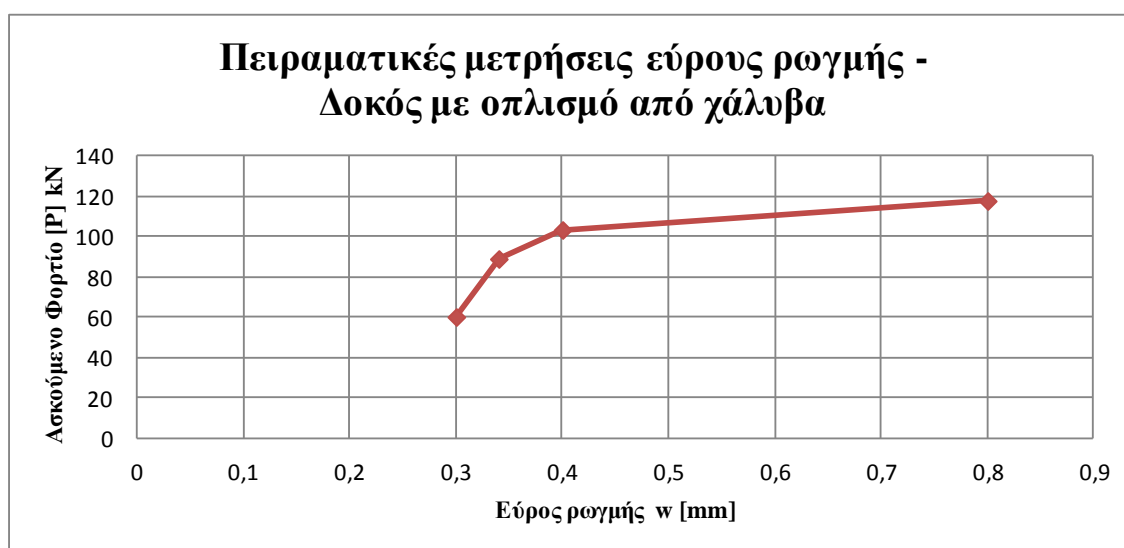


Σχήμα ΙΙ-1 Η πειραματική καμπύλη του εύρους ρωγμής, συναρτήσει του φορτίου  $P$  για τη δοκό με οπλισμό από C-FRP

## ΙΙ-2 Το εύρος ρωγμής στη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Πίνακας ΙΙ-1 Μετρήσεις του εύρους ρωγμής για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα

Ασκούμενο Φορτίο $P_i$ [kN]	$w_{k,exp}$ [mm]
60.3	0.3
89.1	0.34
103.5	0.4
117.9	0.8



Σχήμα ΙΙ-2 Η πειραματική καμπύλη του εύρους ρωγμής, συναρτήσει του φορτίου  $P$  για τη δοκό με οπλισμό από χάλυβα