



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ**

---

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-  
ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ GFRP ΣΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΤΗΝ  
ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΓΙΑ ΜΟΝΟΤΟΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Δράκος Δημήτριος**

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

**Αθήνα, Μάρτιος 2013**

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>3</b>
<b>Κεφάλαιο 1.....</b>	<b>9</b>
<b>ΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>9</b>
1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	9
1.2 ΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ.....	10
1.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	14
<b>Κεφάλαιο 2.....</b>	<b>21</b>
<b>Η ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ.....</b>	<b>21</b>
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	21
2.1.1 Η γεωμετρία της δοκού-δοκιμίου και η πειραματική διάταξη.....	21
2.1.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής.....	23
2.1.3 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού-δοκιμίου .....	26
2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	26
2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ.....	30
2.3.1 Ο προσδιορισμός τάσης συνάφειας.....	30
2.3.2 Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης.....	32
<b>Κεφάλαιο 3.....</b>	<b>33</b>
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ .....</b>	<b>33</b>
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ-ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	33
3.2 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	39
3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ...	42
<b>Κεφάλαιο 4.....</b>	<b>45</b>
<b>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>45</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
4.2 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ FRP	45

4.3	Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	49
4.3.1	Η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης των στοιχείων σκυροδέματος της δοκού-δοκιμίου .....	49
4.3.2	Η καμπύλη συνάφειας - ολίσθησης.....	51
<b>Κεφάλαιο 5.....</b>		<b>54</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>		<b>54</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>		<b>55</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....</b>		<b>59</b>
I.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	59
I.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	61

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, έχει αρχίσει να γίνεται χρήση των ράβδων FRP, ως εναλλακτικού οπλισμού σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, όμως, το κόστος του υλικού αυτού, η έλλειψη της απαραίτητης τεχνογνωσίας δεν έχει επιτρέψει την ευρεία χρήση τους. Η ανάπτυξη της απαραίτητης τεχνογνωσίας για τον οπλισμό αυτό δημιουργεί την ανάγκη για μια συνδυασμένη θεωρητική και πειραματική έρευνα, προκειμένου να προσδιορισθεί η μηχανική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό FRP, όταν αυτά καταπονούνται με εξωτερικά φορτία.

Στην πλειονότητά τους οι κατασκευές από σκυρόδεμα χρησιμοποιούν ως οπλισμό το χάλυβα, ο οποίος είναι αποτελεσματικός και αποδοτικός από πλευράς κόστους. Οι μηχανικές του ιδιότητες, όπως η αντοχή και η πλαστιμότητα του, τον καθιστούν κατάλληλο για χρήση ως οπλισμό στο σκυρόδεμα. Όμως, σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, η διάβρωση μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα στην αντοχή και τη λειτουργικότητα των κατασκευών, κυρίως αυτών που είναι εκτεθειμένες σε υγρό περιβάλλον, όπως, για παράδειγμα, γέφυρες και κατασκευές σε λιμάνια. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη για ανάπτυξη νέων εναλλακτικών τεχνικών για ανθεκτικότερο στη διάβρωση οπλισμό, όπως είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, οι ράβδοι με εποξειδική επίστρωση και ράβδοι από FRP. Η χρήση των FRP, ως οπλισμού στις κατασκευές, προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση, καθώς το υλικό αυτό έχει ήδη χρησιμοποιηθεί ευρέως σε άλλους τομείς με επιτυχία. Επίσης έχει δοκιμαστεί ως υλικό ενίσχυσης σε υπάρχουσες κατασκευές. Παρόλα αυτά όμως, εξαιτίας της διαφορετικής συμπεριφοράς που παρουσιάζει ο οπλισμός από FRP σε σύγκριση με τον κλασικό οπλισμό από χάλυβα προκύπτουν αρκετά προβλήματα, που απαιτούν παραπέρα ερευνά για να επιλυθούν. Πιο συγκεκριμένα, το βασικότερο πρόβλημα των υλικών αυτών είναι το μικρό μέτρο ελαστικότητας και η γραμμική συμπεριφορά μέχρι την θραύση τους, που έχουν ως αποτέλεσμα την έλλειψη πλαστιμότητας.

Στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων σκυροδέματος, ένα από τα βασικότερα θέματα για έρευνα είναι η διασαφήνιση του μηχανισμού με τον οποίο μεταβιβάζονται οι δυνάμεις από το σκυρόδεμα στις ράβδους οπλισμού FRP και αντίστροφα. Η μεταβίβαση δυνάμεων μεταξύ του σκυροδέματος και των ράβδων οπλισμού γίνεται, κυρίως μέσω της μηχανικής σύνδεσης των δύο υλικών που αναπτύσσεται λόγω τριβής. Η συμπεριφορά αυτής της σύνδεσης περιγράφεται με τη σχέση που συνδέει την τάση συνάφειας, που είναι η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια, με την σχετική ολίσθηση, που είναι η σχετική μετατόπιση δύο συνδεδεμένων επιφανειών.

Το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης για μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση για συγκεκριμένους τύπους οπλισμού FRP του εμπορίου. Ο προσδιορισμός αυτός θα γίνει με την εκτέλεση του απαιτούμενου πειραματικού έργου στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ, χρησιμοποιώντας μια νέα δοκιμή, που έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο αυτό. Συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία, που είναι τμήμα ενός ευρύτερου συλλογικού ερευνητικού έργου που εκτελέστηκε στο εργαστήριο της Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων του ΕΜΠ, θα εστιάσει στη μελέτη των ράβδων FRP από ίνες γυαλιού και θα παρουσιαστούν τα σχετικά αποτελέσματα.

### **Οι έννοιες της μονότονης και ανακυκλιζόμενης φόρτισης**

Σε μια κατασκευή, τα φορτία που την καταπονούν επιβάλλονται είτε αργά και βαθμιαία μέχρι να πάρουν την τελική τους τιμή, είτε δυναμικά, όπου το μέγεθος και η διεύθυνσή τους μεταβάλλονται με τον χρόνο. Στην πρώτη περίπτωση, τόσο η αναπτυσσόμενη τάση συνάφειας ράβδων οπλισμού-σκυροδέματος, όσο και η αντίστοιχη αξονική δύναμη στη ράβδο, αναπτύσσονται αργά και αυξητικά μέχρι να πάρουν την τελική τους τιμή. Σε αυτή την περίπτωση η φόρτιση της ράβδου οπλισμού ορίζεται ως μονότονη φόρτιση. Εκτός εξαιρέσεων, τα επιβαλλόμενα δυναμικά φορτία επιπροστίθενται στα ήδη υπάρχοντα στατικά φορτία της κατασκευής. Τέτοια περίπτωση είναι τα δυναμικά κατακόρυφα φορτία μηχανών και τα σεισμικά φορτία.

Το συνιστάμενο αποτέλεσμα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις στην ράβδο οπλισμού να μεταβάλλονται με το χρόνο μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής. Οι φορτίσεις αυτές ονομάζονται ανακυκλιζόμενες και διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι φορτίσεις χαμηλών κύκλων ή φορτίσεις που αντιστοιχούν σε λίγους κύκλους, λιγότερους των 100. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων φορτίσεων είναι οι σεισμικές φορτίσεις. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι φορτίσεις υψηλών κύκλων ή φορτίσεις κόπωσης, οι οποίες περιλαμβάνουν πολλούς κύκλους (τυπικά εκατοντάδες ή εκατομμύρια). Τέτοιες φορτίσεις υφίστανται μέλη γεφυρών, παράκτιες κατασκευές και κατασκευές που υποβαστάζουν ταλαντούμενες μηχανές. Στο στάδιο λειτουργίας της κατασκευής παρουσιάζονται οι φορτίσεις υψηλών κύκλων και οι φορτίσεις χαμηλών κύκλων δημιουργούν προβλήματα στην κατάσταση οριακής αντοχής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχοληθήκαμε με την δεύτερη περίπτωση φορτίσεων, δηλαδή, τις ανακυκλιζόμενες και πιο συγκεκριμένα τις ανακυκλιζόμενες φορτίσεις χαμηλών κύκλων.

### **Βιβλιογραφική ανασκόπηση**

Η έρευνα στο πεδίο των ράβδων οπλισμού FRP είναι πολύ πρόσφατη, παρόλο αυτά η Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών JSCE (JSCE Recommendations for the Design and Construction of Fiber Reinforced Materials - JSCE 1997), το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος ACI (ACI 440.IR), η Καναδική Ένωση Προτύπων, το Καναδικό δίκτυο ISIS (ISIS Design Manual 3) και το Ινστιτούτο των Δομικών Μηχανικών του Ηνωμένου Βασιλείου (Interim Guidance of the Design of Reinforcing Concrete structures using FRP CStruct) έχουν αναπτύξει την πρώτη γενιά οδηγιών σχετικά με το σχεδιασμό κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με οπλισμό FRP. Πρόσφατα, εκτός από τις προαναφερθείσες ενώσεις, και η Ιταλία και η Αίγυπτος (Egyptian Ministry of Housing, Utilities, and Urban Development 2005), ανέπτυξαν τις δικές τους οδηγίες και συστάσεις για τη χρήση του οπλισμού αυτού σε κατασκευές σκυροδέματος. Όλες οι παραπάνω οδηγίες βασίζονται σε ήδη υπάρχοντες κανονισμούς που αφορούν στις κατασκευές με οπλισμό από χάλυβα.

Οι κύριες κατευθύνσεις των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί είναι η αντοχή συνάφειας και οι παράγοντες της εξωτερικής επιφάνειας των ράβδων που επηρεάζουν τη συνάφεια, η επίδραση της αντοχής σκυροδέματος και άλλων παραμέτρων στην αντοχή συνάφειας, η συμπεριφορά της συνάφειας σε φόρτιση μακράς διάρκειας και η σταθερή τάση απόσχισης των ράβδων FRP.

Όσον αφορά τη σχέση μεταξύ συνάφειας και ολίσθησης, οι πειραματικές δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί παρατίθενται παρακάτω. Ο Filippou (1983,1986) πραγματοποίησε πειραματικές δοκιμές μελετώντας τα παραμορφωσιακά μεγέθη κατά μήκος της ράβδου οπλισμού και το σκυρόδεμα που την περιβάλλει, διασαφηνίζοντας τον τρόπο μεταβίβασης των τάσεων από τις ράβδους οπλισμού στο σκυρόδεμα και πρότεινε μοντέλα σχετικά με την ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ο Daniali (1992) εξέτασε τη συμπεριφορά των ράβδων με νευρώσεις. Οι νευρώσεις των ράβδων κατασκευάστηκαν με τύλιγμα μιας δέσμης από ίνες γυαλιού σε ένα ελικοειδές σχήμα 45 μοιρών. Εξετάστηκαν 30 δοκίμια και παρατηρήθηκαν οι αστοχίες εξόλκευσης της θραύσης της ράβδου. Οι Terpers et al. (1992), παρουσίασαν δοκιμές εξόλκευσης με μικρό μήκος αγκύρωσης ερευνώντας τη μέγιστη αντοχή συνάφειας των ράβδων FRP με του σκυροδέματος και τη διερεύνηση της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης. Ο Faoro (1992) παρουσίασε πειράματα εξόλκευσης με μικρό μήκος έμπηξης προκειμένου να συγκρίνει τη συμπεριφορά συνάφειας των ράβδων GFRP των οποίων η επιφάνεια ήταν καλυμμένη με κόκκους σε σχέση με αυτή των ράβδων GFRP που η επιφάνεια τους έχει υποστεί διάφορες εξωτερικές διεργασίες (π.χ ράβδοι με επικάλυψη εποξεικής σκόνης, ράβδοι με πολυαμιδική επένδυση). Ο Machida (1993) στο περιοδικό του JSCE, συγκέντρωσε αποτελέσματα από την Ιαπωνία πάνω σε δοκιμές εξόλκευσης όπου χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι FRP. Οι δοκιμές παρουσιάστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του JSCE. Για ράβδους με ελικοειδείς ίνες ως νευρώσεις στην επιφάνεια τους αναφέρει ότι η ολίσθηση του ελευθέρου άκρου των ράβδων FRP με ραβδώσεις είναι μεγαλύτερη από αυτήν των ράβδων χάλυβα με ραβδώσεις και ότι μετά από κατάλληλη επεξεργασία των νευρώσεων οι ράβδοι FRP είναι ικανές να έχουν αντοχή συνάφειας 10 MPa και πάνω. Οι Shima et al. (1993) χρησιμοποίησαν ράβδους με πλέξεις αραμιδίου, τένοντες αποτελούμενους από 7 σύρματα από άνθρακα και συμβατικά 7-σύρματος τένοντες από χάλυβα σε δοκιμές εξόλκευσης μιας πλευράς. Οι Shima και Suga (1993) ερεύνησαν μέσω δοκιμών συνάφειας με προένταση τη τοπική σχέση συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων με ίνες

αραμιδίου τυλιγμένες στην επιφάνεια τους. Οι Alunno Rossetti et al. (1995) ερεύνησαν τις τοπικές σχέσεις τάσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων GFRP εμπηγμένες σε σκυρόδεμα με σκοπό την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων για την ανάπτυξη ενός μοντέλου της σχέσης τάσης-ολίσθησης και την εκτίμηση του μήκους αγκύρωσης. Επιπλέον, Ο Den Uijl (1995) έκανε δοκιμές εξόλκευσης σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση, μελετώντας τις ιδιότητες συνάφειας της κόπωσης των τενόντων αραμιδίου (35 kN φορτίο θραύσης) με μήκη έμπηξης 50, 100 και 150 mm. Επιλέχθηκαν σχετικά μεγάλες διαστάσεις διατομών του σκυροδέματος ( $f_{cu}=50$  MPa), για να αποφευχθεί η απόσχιση του. Ο ρυθμός της φόρτισης στις στατικές δοκιμές ήταν 10 kN/min και στις δυναμικές δοκιμές, εφαρμόστηκε μια ημιτονοειδή φόρτιση με συχνότητα 50Hz. Η ολίσθηση μετρήθηκε στο ελεύθερο και στο φορτισμένο άκρο. Οι Hattori et al. (1995) διερεύνησαν τη συμπεριφορά ερπυσμού (συρσίματος) της συνάφειας σε δύο είδη ράβδων FRP, εμπηγμένων σε σκυρόδεμα, με την πραγματοποίηση δοκιμών ερπυσμού σε εξόλκευση, σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος και μετρώντας την αύξηση της ολίσθησης στο ελεύθερο άκρο για 8.000 ώρες. Οι Al-Zahrani et al. (1996) με πειράματα άμεσης εξόλκευσης μελέτησαν την συμπεριφορά ράβδων γυαλιού-βινυλοεστέρα, άνθρακα-βινυλοεστέρα και άνθρακα-εποξειδίου παρατηρώντας ότι μετά την διάτμηση των νευρώσεων, η τριβή μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος κυριαρχούσε στον μηχανισμό συνάφειας και είχαν συγκρίσιμα διαγράμματα τάσης-ολίσθησης και παρουσίασαν τον ίδιο τρόπο αστοχίας. Τέλος, ο Καρατζαφέρης (2009) πραγματοποίησε μια θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σκυροδέματος με οπλισμό FRP. Ανέπτυξε ορισμένα μοντέλα για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας ράβδων οπλισμού FRP-σκυροδέματος, της καμπτικής αντοχής διατομών, του σχηματισμού καμπτικών ρωγμών, και της κατακόρυφης βύθισης καμπτόμενων δομικών στοιχείων. Επίσης, εισήγαγε μια νέα πειραματική δοκιμή-δοκού για τον καθορισμό των καμπύλων συνάφειας-ολίσθησης, που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας FRP-σκυροδέματος, τόσο για μονότονη όσο και για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία για τον πειραματικό προσδιορισμό των καμπύλων συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων FRP που εξετάζονται.



## Η δομή της εργασίας

Η διπλωματική περιλαμβάνει την εισαγωγή, πέντε κεφάλαια και ένα παράρτημα. Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση παράλληλα με μία ιστορική αναδρομή της χρήσης των υλικών FRP στη δομική βιομηχανία και τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επιπλέον παρουσιάζονται οι φυσικές και οι μηχανικές τους ιδιότητες και η σύγκριση τους με αυτές του χάλυβα, και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Στο Κεφάλαιο 2, περιγράφεται η πειραματική δοκιμή-δοκού, που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της σχολής ΣΑΤΜ του ΕΜΠ, για τον πειραματικό προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η θεωρητική βάση της δοκιμής και περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής των καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης από τις πειραματικές μετρήσεις, που γίνονται κατά τη δοκιμή.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται το πειραματικό έργο που έγινε συλλογικά στο εργαστήριο για τον προσδιορισμό των καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης για τις ράβδους FRP.

Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και κατασκευάζονται οι σχετικές πειραματικές καμπύλες. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η αναζήτηση της θεωρητικής καμπύλης που μπορεί να περιγράψει μαθηματικά τις πειραματικές καμπύλες.

Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και γίνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντικές έρευνες.

Τέλος στο Παράρτημα παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα των μετρήσεων.

## Κεφάλαιο 1

# ΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

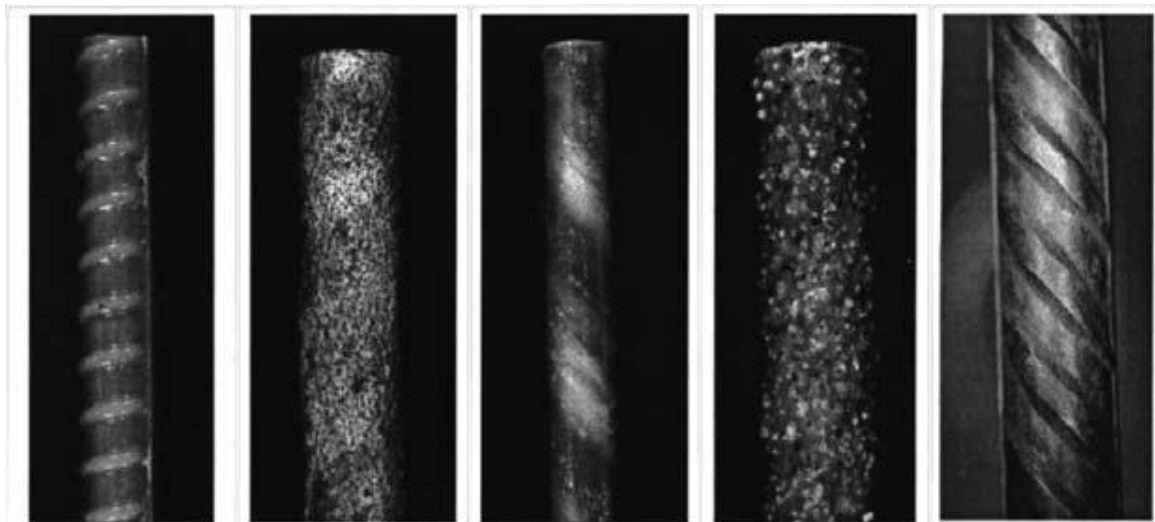
Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ράβδων χάλυβα από άποψη ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η διάβρωσή τους. Η διάβρωση οφείλεται στις εναλλαγές πήξεως-τήξεως του νερού των πόρων ή λόγω προσβολής αδρανών από την αλκαλικότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Οι τρεις βασικοί λόγοι διάβρωσης του χάλυβα είναι η ενθράκωση του σκυροδέματος, η επίδραση χλωριόντων και οι ρωγμές. Η διάβρωση των ράβδων χάλυβα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου τους, που έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και ρηγματώσεων. Η βλάβη που προκαλείται στο δομικό στοιχείο είναι διπλή : από τη μια μειώνεται η ενεργός διατομή του χαλύβδινου οπλισμού, και αρα μειώνεται η στατική επάρκεια του δομικού στοιχείου, και από την άλλη δημιουργούνται προϋποθέσεις για νέες ρηγματώσεις στο δομικό στοιχείο που επιταχύνουν τη διάβρωση του οπλισμού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κατασκευές που βρίσκονται σε περιβάλλον με έντονη υγρασία, οι απαιτούμενες παρεμβάσεις για τη συντήρηση απαιτούν ένα πολύ υψηλό κόστος.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, το πρόβλημα αυτό της διάβρωσης φαίνεται να αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με τη χρήση ενός νέου οπλισμού στις κατασκευές που είναι γνωστός ως οπλισμός FRP. Ο οπλισμός αυτός βασίζεται στη χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών, που συντίθενται από ίνες άνθρακα, αραμιδίου ή γυαλιού που είναι ένθετες σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά από FRP παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές στις ιδιότητές τους συγκριτικά με τον χάλυβα. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι, η συντήρηση των δομικών κατασκευών από σκυρόδεμα με οπλισμό από χάλυβα είναι μια αναγκαία προϋπόθεση για την διατήρηση της στατικής τους επάρκειας.

## 1.2 ΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Τα σύνθετα δομικά υλικά έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης της γνώσης της τεχνολογίας των υλικών και της ανάγκης σχεδιασμού υλικών, με βάση τις ανάγκες που καθορίζουν οι εκάστοτε υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές. Δύο ή περισσότερα διακριτά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας ένα σύνθετο υλικό, το οποίο να κατέχει βελτιωμένες ιδιότητες, σε σχέση με τις ιδιότητες των συστατικών υλικών του για ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.

Ένας τύπος σύνθετου δομικού υλικού είναι τα ινοπλισμένα πολυμερή (που είναι γνωστά ως FRP). Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μια δέσμη ινών, που είναι ενσωματωμένη σε μια μήτρα ρητίνης. Ο όρος FRP περιγράφει μια ομάδα υλικών τα οποία κατασκευάζονται από συνθετικές και οργανικές ίνες συγκολλημένες με ρητίνη. Οι ίνες, οι οποίες αναλαμβάνουν κυρίως εφελκυστικές τάσεις παράλληλα στη διεύθυνσή τους, είναι εμποτισμένες με κάποιο θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρας κ.α.), του οποίου τα χαρακτηριστικά δεν είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες κάτω των 60°C. Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες αυτού του σύνθετου υλικού είναι τα FRP από άνθρακα (CFRP), από αραμίδιο (AFRP) και από γυαλί (GFRP). Διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία διαμέτρων, ανάλογη με αυτή που ισχύει για το συμβατικό χάλυβα (Σχήμα 1.1) (Katz et al. 1999).



Σχήμα 1-1: Είδη ράβδων FRP

Οι ίνες παρέχουν αντοχή και ακαμψία στο σύνθετο υλικό και γενικά φέρουν τα περισσότερα από τα εφαρμοζόμενα φορτία. Η μήτρα ενεργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε

να συνδέει και να προστατεύει τις ίνες, καθώς και να μεταβιβάζει τις τάσεις από ίνα σε ίνα μέσω διατμητικών τάσεων. Η μήτρα καθορίζει και αρκετές από τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως είναι η αντοχή του υλικού κάθετα στη διεύθυνση των ινών, και η αντοχή του σύνθετου υλικού σε θλίψη και διάτμηση.

Οι ρητίνες θα πρέπει να είναι, τουλάχιστον, σε αντοχή μια τάξη μικρότερου μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζεται. Η συνάφεια μεταξύ των ινών και της ρητίνης, είναι απαραίτητη προκειμένου να αναπτυχθεί μια ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση των δύο αυτών φάσεων, καθώς επίσης πρέπει να υπάρχει και χημική συμβατότητα των φάσεων αυτών προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις. Οι ρητίνες είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στη πυρκαγιά και περισσότερο ευαίσθητες στο νερό από ότι οι ίνες. Η διάρρηξη των ινοπλισμένων πολυμερών λόγω ερπυσμού, είναι μια τυπική μορφή αστοχίας τους και οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται ως μήτρες στα σύνθετα υλικά είναι οι εποξειδικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές.

Ο οπλισμός FRP που διατίθεται στο εμπόριο έχει την μορφή ράβδων κυκλικής διατομής, επιμήκων ελασμάτων, μικρά πάχη πλεγμάτων και λεπτών μεμβρανών. Επίσης ο οπλισμός FRP έχει εδραιωθεί με τη μορφή υφασμάτων από ίνες των οποίων η χρήση απαιτεί εμποτισμό σε ρητίνες.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι στη δημιουργία σύνθετων υλικών, ένα άκαμπτο, ανθεκτικό και υψηλής αντοχής υλικό, εμβαπτίζεται σε ένα εύκαμπτο και πλαστικό υλικό. Το πρώτο, αποτελεί τον "οπλισμό" και λειτουργεί ως φορέας παραλαβής των φορτίων, ενώ το δεύτερο αποτελεί τη μήτρα που προσδίδει συνοχή στο σύνθετο υλικό και μεταβιβάζει τα ασκούμενα φορτία στον οπλισμό (ACI Committee 440 XR, 2006).

Η ιδέα για κατασκευή κτιρίων με σύνθετα υλικά προϋπήρχε από τα αρχαία χρόνια. Πολιτισμοί σε όλο τον κόσμο έχουν χρησιμοποιήσει βασικά στοιχεία του περιβάλλοντα χώρου στη δημιουργία οικημάτων, συμπεριλαμβανομένης της λάσπης (ίλος), του αχύρου, του ξύλου και του πηλού (άργιλος). Οι πλίνθοι κατασκευάζονταν από λάσπη και άχυρο, με τη λάσπη να ενεργεί όπως η ρητίνη στο σύνθετο υλικό από FRP, και το άχυρο να ενεργεί ως "οπλισμός". Ο "οπλισμός" αυτός συγκρατεί την πλίνθο αρηγμάτωτη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης και συστολής της (ACI Committee 440 XR, 2006).

Ενώ η ιδέα των σύνθετων υλικών υπήρχε για αρκετές χιλιετίες, η ένταξη της τεχνολογίας των σύνθετων FRP στο βιομηχανικό κόσμο έγινε περίπου πριν από έναν αιώνα. Τα υλικά αυτά εμφανίστηκαν στο προσκήνιο αμέσως μετά το 1900, με τη χημική βιομηχανία να κάνει μεγάλα βήματα ώστε να δημιουργήσει πλαστικά υλικά από ίνες (βινύλιο, πολυεστέρας και ίνες γυαλιού), με υψηλότερη αντοχή, μεγαλύτερη ακαμψία και μικρότερη πυκνότητα. Η ραγδαία ανάπτυξή τους οφείλεται κυρίως στις μεγάλες ανάγκες που δημιουργήθηκαν στην αεροναυπηγική για την εξερεύνηση του διαστήματος (Bakis et al. 2002).

Με κίνητρο τις ανάγκες της ηλεκτρονικής και αμυντικής τεχνολογίας και των τεχνολογιών του διαστήματος, οι ερευνητές δημιούργησαν προϊόντα από τα υλικά αυτά με ιδιαίζουσες ιδιότητες, όπως το αλεξίσφαιρο γιλέκο Kavelan. Το πρώτο γνωστό προϊόν με υλικά FRP ήταν ένα κάλυμμα βάρκας, το οποίο κατασκευάστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1930.

Από αυτή την αφετηρία, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών FRP δημιούργησαν στη συνέχεια ένα επαναστατικό κύμα στη δομική βιομηχανία. Τα σύνθετα υλικά FRP κάνουν ουσιαστικά την εμφάνιση τους στις αρχές της δεκαετίας του 1940, με εφαρμογές κυρίως στην αεροναυπηγική και στο πολεμικό ναυτικό. Η αεροπορία και το ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής επένδυσαν σε σύνθετα FRP, με υψηλό λόγο αντοχής βάρους, και με μεγάλη αντοχή σε περιβάλλον διάβρωσης, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, η θάλασσα και γενικά το υφάλμυρο περιβάλλον. Από το 1945 και μετά, πάνω από 3,2 εκατομμύρια kg από ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν σε στρατιωτικές εφαρμογές.

Σύντομα, τα οφέλη των FRP, ιδιαίτερα των ικανοτήτων αντοχής τους στη διάβρωση, έγιναν ευρέως γνωστά. Σωλήνες από ίνες γυαλιού, για παράδειγμα, πρωτοεμφανίστηκαν το 1948 και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως από τις πετρελαιοβιομηχανίες. Τα σύνθετα FRP αποδείχθηκαν μία αξιόλογη εναλλακτική λύση σε σχέση με άλλα παραδοσιακά υλικά, ακόμα και σε συνθήκες υψηλής πίεσης και με μεγάλες διαμέτρους σε περιπτώσεις χημικών επεξεργασιών. Εκτός από την υψηλή αντοχή σε διάβρωση, ο σωλήνας FRP προσφέρει επίσης διάρκεια στο χρόνο και αντοχή, συνεπώς ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εσωτερική επένδυση, εξωτερική επίστρωση και καθοδική προστασία.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, τα FRP χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως εξοπλισμός σε χημικές επεξεργασίες, σε πολτοποίηση χαρτιού, σε επεξεργασία

αποβλήτων, και σε βιομηχανίες κατασκευών. Πάρα πολλά προϊόντα και εγκαταστάσεις από FRP βοήθησαν στο να γίνει μία αποδοτική αρχή σε αυτά τα πεδία εφαρμογής.

Στις μετέπειτα από το 1940 δεκαετίες, εισήχθησαν νέες και συχνά επαναστατικές εφαρμογές των FRP. Η ίδια τεχνολογία, η οποία παρήγαγε τους πλαστικούς οπλισμούς που απαιτήθηκαν για το πυρηνικό ερευνητικό έργο του Manhattan στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, οδήγησε στην εξέλιξη των υψηλής απόδοσης σύνθετων υλικών για κινητήρες πυραύλων και για δεξαμενές, τις δεκαετίες του 1960 και 1970. Πιο συγκεκριμένα, δεξαμενές με τοιχώματα από ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν από το εργαστήριο Skylab ώστε να παρέχουν οξυγόνο σε αστροναύτες (ACI Committee 440 XR, 2006). Το 1953, το πρώτο αυτοκίνητο Chevrolet Corvette με πλαίσια γυαλιού, μπήκε στη γραμμή παραγωγής.

Τη δεκαετία του 1960 το ναυτικό της Βρετανίας και των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποίησε ναρκαλιευτικά σκάφη βασισμένα στα FRP, επειδή τα υλικά αυτά είναι αντιμαγνητικά και συμπεριφέρονται καλύτερα από άλλα, όταν καλούνται να λειτουργήσουν σε έντονα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Στις εφαρμογές αυτές παρατηρήθηκε ότι ένα από τα χαρακτηριστικά των FRP είναι η ικανότητά τους να μειώνουν τη δυνατότητα ανίχνευσης με radar ενός πλοίου ή αεροσκάφους. Υψηλής απόδοσης σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν σε αεροσκάφη προηγμένης τεχνολογίας, όπως είναι τα F-117 Stealth Fighter και B-2 Bomber. Επί του παρόντος, σύνθετα FRP χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές και συμπεριλαμβάνονται σε διάφορες προκαταρκτικές δοκιμές της NASA.

Ως προς τη ζήτηση των σύνθετων υλικών, η ναυτιλιακή αγορά ήταν ο μεγαλύτερος καταναλωτής τη δεκαετία του 1960. Τη δεκαετία του 1970, η αγορά αυτοκινήτων, ξεπερνώντας τη ναυτιλιακή αγορά, κατέλαβε την πρώτη θέση την οποία και διατήρησε.

Ενώ η πλειοψηφία των ιστορικών δεδομένων σχετικά με τις κατασκευές από FRP προέρχεται από τις αεροναυπηγικές, τις ναυτιλιακές καθώς και τις βιομηχανίες που σχετίζονται με αντιδιαβρωτικά υλικά, τα FRP χρησιμοποιούνται ως υλικά κατασκευών εδώ και αρκετές δεκαετίες. Πρωτοεμφανίστηκαν ως οπλισμός σε κατασκευές από σκυρόδεμα στα μέσα της δεκαετίας του 1950, ξεκινώντας από ημιμόνιμες κατασκευές και συνεχίζοντας με την αποκατάσταση ιστορικών μνημείων

και διάφορες άλλες κατασκευαστικές εφαρμογές. Τα βασικά προϊόντα που αναπτύχθηκαν ήταν θόλοι, καλύμματα και εξωτερικά πλαίσια κτιρίων.

Μία σπουδαία εξέλιξη των FRP, αναφορικά με την επιστήμη του πολιτικού μηχανικού, ήταν η εφαρμογή τους σε αποκαταστάσεις και ενισχύσεις κατασκευών από σκυρόδεμα. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές του 1980, πολλές εφαρμογές με οπλισμό FRP πραγματοποιήθηκαν σε Ευρώπη και Ασία. Κατά το τέλος της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές του 1990, καθώς το κόστος των υλικών FRP μειωνόταν συνεχώς και η ανάγκη για ανταγωνιστική ανανέωση των υποδομών γινόταν όλο και πιο ξεκάθαρη στον ανεπτυγμένο κόσμο, αυξήθηκε η πίεση για χρήση τέτοιων νέων υλικών, ώστε να δημιουργηθούν μεγαλύτερες προσδοκίες αναφορικά με τη λειτουργικότητα των υποδομών. Με την υποστήριξη ερευνητικών προγραμμάτων, τα οποία χρηματοδοτήθηκαν από βιομηχανίες και κυβερνήσεις ανά τον κόσμο, τα υλικά από FRP βρήκαν ευρεία αποδοχή από τη χαρακτηριστικά συντηρητική βιομηχανία των κατασκευών σε περιπτώσεις ειδικών απαιτήσεων, όπως σε κατασκευές οι οποίες υπόκειντο σε έντονο χημικό περιβάλλον (ACI Committee 440 XR, 2006).

### **1.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ**

Τα χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών εξαρτώνται κυρίως από την κατ' όγκο περιεκτικότητά τους σε ίνες. Η χρήση των FRP ως υλικά οπλισμού έχει τα πλεονεκτήματα του μικρού βάρους, της υψηλής εφελκυστικής αντοχής, της αντοχής στη διάβρωση, της ελαστικότητας και της ηλεκτρομαγνητικής αντίστασης. Τα μειονεκτήματα των FRP είναι το μικρό μέτρο ελαστικότητας, το υψηλό κόστος, η μικρή αστοχία παραμόρφωσης, οι μέθοδοι αγκύρωσής του, η συνάφεια με το σκυρόδεμα και η ευαισθησία του στην υπεριώδη ακτινοβολία (Khalifa et al. 1998).

Τα ινοπλισμένα πολυμερή, για όλους τους τύπους ινών, δεν προσβάλλονται από τα χλωριόντα και έχουν αντοχή σε όξινο περιβάλλον, το βάρος τους είναι ίσο περίπου με το 1/4-1/5 του βάρους των μεταλλικών οπλισμών, είναι ανεπηρέαστα από μαγνητικά πεδία και ραδιοσυχνότητες, και τέλος είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Επιπλέον, στα FRP από ίνες γυαλιού (GFRP) η πυκνότητα κυμαίνεται

από 1,25-2,10 g/cm<sup>3</sup>, στα FRP από ίνες άνθρακα (CFRP) 1,50-1,60 g/cm<sup>3</sup> και στα FRP από ίνες αραμιδίου (AFRP) 1,25-1,40 g/cm<sup>3</sup> (Choo, 2005). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ίνες γυαλιού έχουν μειωμένη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον, και οι ίνες αραμιδίου έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία (Τριανταφύλλου, 2006).

Τα FRP από ίνες άνθρακα και αραμιδίου έχουν υψηλά χαρακτηριστικά κόπωσης, που είναι τριπλάσια από αυτά του χάλυβα. Τα χαρακτηριστικά κόπωσης του FRP από ίνες γυαλιού είναι, γενικά, μικρότερα από αυτά του χάλυβα. Η κόπωση των ράβδων οπλισμού GFRP είναι περίπου η μισή από την αντοχή τους (Brown et al. 1993). Από τους τρεις τύπους FRP, που αναφέρθηκαν παραπάνω, το FRP από άνθρακα (CFRP) έχει τη μεγαλύτερη εφελκυστική ικανότητα. Το FRP από αραμίδιο (AFRP) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση και επηρεάζεται πολύ από το νερό και από την υπεριώδη ακτινοβολία. Τα υλικά FRP αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 225F (107 °C). Στη θερμοκρασία των 400F (752 °C), ο οπλισμός από FRP χάνει μερική από την ελαστική ικανότητά του (Brown, 1997). Σε θερμοκρασίες της τάξης των 250 °C περίπου, η εφελκυστική αντοχή των ράβδων CFRP και GFRP μειώνεται κατά 20% (Micelli and Nanni, 2001). Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως αυτές που αναπτύσσονται σε περίπτωση πυρκαγιάς, προκαλείται πλήρη αποσύνθεση των ρητινών, και συνεπώς, οι ράβδοι FRP δεν μπορούν να μεταφέρουν τάσεις. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, επειδή οι ράβδοι οπλισμού βρίσκονται μέσα στα μέλη σκυροδέματος, λόγω έλλειψης οξυγόνου, δεν κινδυνεύουν να καούν. Όμως, σε υψηλές θερμοκρασίες, η συνάφεια οπλισμού FRP με σκυρόδεμα εμφανίζεται μειωμένη, που έχει ως αποτέλεσμα την κατάρρευση της κατασκευής σε περίπτωση πολύ υψηλών θερμοκρασιών (Τριανταφύλλου, 2006).

Για την ίδια διάμετρο, η οριακή αντοχή των ράβδων FRP είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα, ωστόσο αντίθετα από το χάλυβα, η θλιπτική αντοχή τους είναι μικρότερη από την εφελκυστική. Η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει την εξωτερική στρώση ρητίνης επιφέροντας ενδεχομένως μείωση της αντοχής των σύνθετων ράβδων μέχρι και 40%. Όμως το πρόβλημα αυτό παρακάμπτεται με τη χρήση πρόσμικτων ουσιών στις ρητίνες (Micelli and Nanni, 2001). Η καμπτική αντοχή των ράβδων δεν επηρεάζεται από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Οι καμπτικές δυνάμεις μεταφέρονται μέσω της ρητίνης στις ίνες. Τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τα FRP δείχνουν ότι είναι γραμμικώς ελαστικά υλικά μέχρι τη θραύση τους. Οι τάσεις



στις ράβδους FRP με ίνες από γυαλί, είναι αρκετά μικρότερες της οριακής, όταν προκύψει αστοχία. Η κάμψη των ράβδων δεν μπορεί να γίνει στο εργοτάξιο. Αν για κάποιο έργο απαιτούνται κεκαμμένες ράβδοι αυτό θα πρέπει να γίνει κατά τη διαδικασία παραγωγής τους.

Το μέτρο ελαστικότητας τους ισούται με το ένα τέταρτο του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα και μπορεί να οδηγήσει στην οριακή κατάσταση αστοχίας (Curtis, 1997).

Το ειδικό βάρος των FRP είναι το ένα τέταρτο του ειδικού βάρους του χάλυβα και επιπλέον τα υλικά αυτά έχουν τους ίδιους συντελεστές θερμικής διαστολής με το σκυρόδεμα, ιδιότητες που τα καθιστούν ευκολότερα στο χειρισμό. Η αντοχή συνάφειας των ράβδων οπλισμού FRP δεν είναι τόσο υψηλή, όσο αυτή των ράβδων από χάλυβα. Αυτό οφείλεται στη μειωμένη χημική πρόσφυση του υλικού με το σκυρόδεμα και στη μειωμένη μηχανική εμπλοκή (αδυναμία της επιφάνειας των ράβδων μεταφοράς σημαντικών τάσεων λόγω της χαμηλής διατμητικής αντοχής της ρητίνης) (Γαστάνη και Πανταζοπούλου, 2000). Η αντοχή συνάφειας δε φαίνεται να επηρεάζεται από τη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (σε αντίθεση με τις χαλύβδινες ράβδους). Επίσης έχουν χαμηλή διατμητική αντοχή συγκριτικά με τους μεταλλικούς οπλισμούς (Micelli and Nanni, 2001).

Σε όξινο περιβάλλον, η παρουσία διαφόρων τύπων αλάτων σε συνδυασμό με θερμοκρασιακούς παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ράβδων (Micelli and Nanni, 2001). Σε αλκαλικό περιβάλλον τα σύνθετα υλικά από άνθρακα είναι περισσότερο ανθεκτικά, ενώ αυτά με ίνες γυαλιού είναι τα λιγότερο ανθεκτικά και τα υλικά με ίνες αραμιδίου βρίσκονται ενδιάμεσα (Micelli, and Nanni, 2001). Επιπλέον τα σύνθετα υλικά έχουν πολύ καλή συμπεριφορά στην υγρασία. Ωστόσο μετα από μακροχρόνια έκθεση κάποιοι συνδυασμοί ινών-ρητίνης μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα. Όμως, τις περισσότερες φορές, το σκυρόδεμα αποτελεί αποτελεσματική ασπίδα προστασίας για τους οπλισμούς (Τριανταφύλλου, 2006).

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως η μακροχρόνια συμπεριφορά των σύνθετων υλικών επηρεάζεται από τον ερπυσμό. Κατά τη φόρτιση των ράβδων FRP υπό σταθερή εφελκυστική τάση για κάποιο χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο αντοχής τους, είναι πιθανό να αστοχήσουν λόγω ερπυστικής διάρρηξης (creep rupture). Ο συμβατικός χάλυβας μπορεί να έχει τέτοιου είδους αστοχία μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς. Ο τύπος της

αστοχίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τύπο των ινών των ράβδων (Choo, 2005). Τα ανθρακονήματα φαίνεται να έχουν πρακτικά μηδενικές ερπυστικές παραμορφώσεις, ενώ οι ίνες γυαλιού αντιμετωπίζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα (Micelli and Nanni, 2001). Στον Πίνακα 1-1 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα τυπικά χαρακτηριστικά των ινών συγκριτικά με αυτά του χάλυβα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

**Πίνακας 1-1:** Τυπικές ιδιότητες ινών σύνθετων υλικών

Ίνες	Πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3 \times 10^3$ )	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)
<b>Άνθρακα</b>				
Υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-4800	1.40-2.00
Πολύ υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-6000	1.50-2.30
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.90	350-500	2500-3100	0.50-0.90
Πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.90	500-700	2100-2400	0.20-0.40
<b>Γυαλιού</b>				
Τύπου E	2.55	70-75	1900-3000	3.00-4.50
Τύπου S	2.45	85-90	3500-4800	4.50-5.50
<b>Αραμιδίου</b>				
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας	1.45	70-80	3500-4100	4.30-5.00
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.45	115-130	3500-4000	2.50-3.50
<b>Χάλυβας</b>	7.86	200	400-1700	12.0-25.0

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων τους, καθώς και των προβλημάτων διάβρωσης που δημιουργεί η χρήση χάλυβα στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, τα FRP επιλέχθηκαν ως υλικά οπλισμού στην κατασκευή έργων από τις ΗΠΑ, κάποιες Ασιατικές και Ευρωπαϊκές χώρες. Στα πλαίσια του πεδίου κατασκευών μεγάλων έργων, διάφορα νέα κατασκευαστικά συστήματα με υλικά FRP έχουν προταθεί, σχεδιαστεί και πειραματικά επαληθευτεί. Αυτά περιλαμβάνουν καταστρώματα γεφυρών προς αποκατάσταση και επανακατασκευή υφισταμένων, καθώς και κατασκευή νέων (Mirmiran et al. 2000; Karbhari et al. 2000). Ωστόσο, στα προηγούμενα χρόνια δόθηκε μεγαλύτερο ενδιαφέρον στα καταστρώματα γεφυρών, λόγω των εγγενών πλεονεκτημάτων τους στην αντοχή και ακαμψία ανά μονάδα

βάρους, σε σύγκριση με τα καταστρώματα γεφυρών από σκυρόδεμα, οπλισμένων με χάλυβα. Μειώνοντας το βάρος των προς αποκατάσταση καταστρωμάτων στις εργασίες επισκευής, εμφανίζεται η δυνατότητα γρήγορης αντικατάστασης και μείωσης του νεκρού φορτίου, με συνέπεια να αυξάνεται η τιμή του ωφέλιμου φορτίου της κατασκευής.

Γέφυρες με καταστρώματα από σκυρόδεμα και οπλισμό από χάλυβα αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο τμήμα των κατασκευών που υφίστανται μεγάλες φθορές. Μία συνήθης αιτία στην οποία οφείλονται αυτές οι φθορές, είναι το γεγονός ότι ο οπλισμός από χάλυβα, που χρησιμοποιείται για ενίσχυση της καμπτικής ικανότητας των κατασκευών, είναι επιρρεπής στη διάβρωση. Ο χαλύβδινος οπλισμός διαβρώνεται, όταν βρίσκεται σε υφάλμυρα και υψηλής υγρασίας περιβάλλοντα. Όταν ο χάλυβας διαβρώνεται, η σκουριά εξαπλώνεται, και δημιουργεί εφελκυστικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα. Καθώς το σκυρόδεμα φτάνει το όριο του εφελκυσμού του, αρχίζει να ρηγματώνεται και να θρυμματίζεται. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα περιβάλλον στο οποίο η διάβρωση μπορεί να επεκταθεί. Η διάβρωση των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού στα καταστρώματα γεφυρών από σκυρόδεμα, η οποία οδηγεί σε υπερβολική ρηγμάτωση, θρυμματισμό, μειωμένη αντοχή και έλλειψη κατασκευαστικής αρτιότητας, αποτελεί σοβαρό πρόβλημα όταν μετράται σε σχέση με το κόστος αποκατάστασης και τις διακοπές της κυκλοφορίας (Brown et al. 1993).

Το κατάστρωμα μίας γέφυρας είναι ένα στοιχείο της κατασκευής, το οποίο μεταφέρει τα φορτία κάθετα τόσο στις στηρίξεις, όσο και στις διαμήκεις δοκούς ή στα τόξα που στηρίζονται στα βάθρα. Η σύνδεση του καταστρώματος με αυτά τα υποστηρίγματα, γίνεται μέσω της εφαρμογής ράβδων διάτμησης ή μέσω μίας κοχλιωτής σύνδεσης στην περίπτωση απλής στήριξης (Bakis et al. 2002). Πρέπει να σημειωθεί ότι η πλάκα του καταστρώματος από σκυρόδεμα είναι το πιο ευαίσθητο στοιχείο της γέφυρας στη διάβρωση, διότι είναι άμεσα εκτεθειμένο σε μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του χιονιού και του πάγου.

Ο χαλύβδινος οπλισμός με εποξειδική επικάλυψη θεωρήθηκε ως μία λύση στο παραπάνω πρόβλημα. Παρόλα αυτά δεν είχε τον αναμενόμενο βαθμό απόδοσης. Συμπληρωματικές μέθοδοι για παράταση του χρόνου ζωής της κατασκευής, ή μέθοδοι που παρέχουν προστασία στις γέφυρες, είναι η χρήση στεγανωτικών υλικών, η αύξηση του βάθους επίστρωσης, η αύξηση της πυκνότητας του σκυροδέματος και η

χρήση προσθετικών υλικών προς επιβράδυνση της χημικής διαδικασίας (Bedard, 1992; Brown and Bartholomew, 1993).

Κατασκευαστές και προμηθευτές σύνθετων υλικών ανέπτυξαν ταχύτατα, προϊόντα για έργα υποδομής, τα οποία θεωρούνται το πεδίο εφαρμογής της μεγαλύτερης εν δυνάμει αγοράς FRP. Η επισκευή και ο οπλισμός σκυροδέματος, η επισκευή καταστρώματος γεφυρών, η τεχνολογία υβριδικών σύνθετων υλικών (η συνένωση σύνθετων υλικών με σκυρόδεμα, ξύλο και χάλυβα) και οι αναβαθμισμένες τεχνικές κατασκευής προβλητών είναι μόνο μερικά από τα πεδία εφαρμογής των FRP. Χρησιμοποιώντας ράβδους οπλισμού από FRP, που δεν υφίστανται διάβρωση σε καταστρώματα γεφυρών από σκυρόδεμα, μπορούμε να παρατείνουμε τη διάρκεια λειτουργίας της γέφυρας και να μειώσουμε το κόστος συντήρησής της.

Η ανθεκτικότητα των FRP εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος των ινών, ο όγκος και η προέλευσή τους, ο τύπος της ρητίνης, η κατασκευαστική μέθοδος που ακολουθείται καθώς και τα υλικά σύνδεσης που χρησιμοποιούνται στο τελικό στάδιο παραγωγής τους. Στον Πίνακα 1-2 παρουσιάζεται μια ποιοτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των σύνθετων υλικών.

Πίνακας 1-2: Ποιοτική αξιολόγηση ινοπλισμένων πολυμερών

Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Άνθρακας	ΙΟΠ-Αραμιδίου	ΙΟΠ-Γυαλιού
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	πολύ καλή	καλή	οριακή
Αντοχή σε κόπωση	πολύ καλή	καλή	οριακή
Ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον	πολύ καλή	καλή	ακατάλληλο υλικό
Αντοχή σε κρούση	μικρή	πολύ καλή	καλή
Αντοχή σε φθορά λόγω τριβής	μέτρια	πολύ καλή	καλή
Γαλβανικό φαινόμενο	ναι	όχι	όχι
Αντοχή σε υπεριώδεις ακτινοβολίες	καλή	μικρή	καλή
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> )	1.80	2.50	1.50
Κόστος (συγκριτικά μεταξύ τους)	υψηλό	μέτριο	χαμηλό

Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι τα υλικά αυτά είναι ψαθυρά με αποτέλεσμα το στοιχείο που οπλίζεται με αυτού του είδους τα υλικά αναμένεται να έχει ψαθυρή αστοχία. Αν η αστοχία προέλθει από υπέρβαση της αστοχίας του σύνθετου υλικού στην εφελκόμενη ζώνη τότε η αστοχία αυτή είναι ξαφνική και καταστροφική. Αντίθετα αν η αστοχία προέλθει από υπέρβαση της αντοχής του σκυροδέματος στη

θλιβόμενη ζώνη, αν και ψαθυρή, έχει μικρό βαθμό πλαστιμότητας και είναι λιγότερο καταστροφική. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η θλιπτική αντόχη των ράβδων είναι σημαντικά μικρότερη από την εφελκυστική τους αντοχή και δεν συνιστάται η χρήση τους για ανάληψη θλιπτικών δυνάμεων.

## Κεφάλαιο 2

# Η ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ

### 2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

#### 2.1.1 Η γεωμετρία της δοκού-δοκιμίου και η πειραματική διάταξη

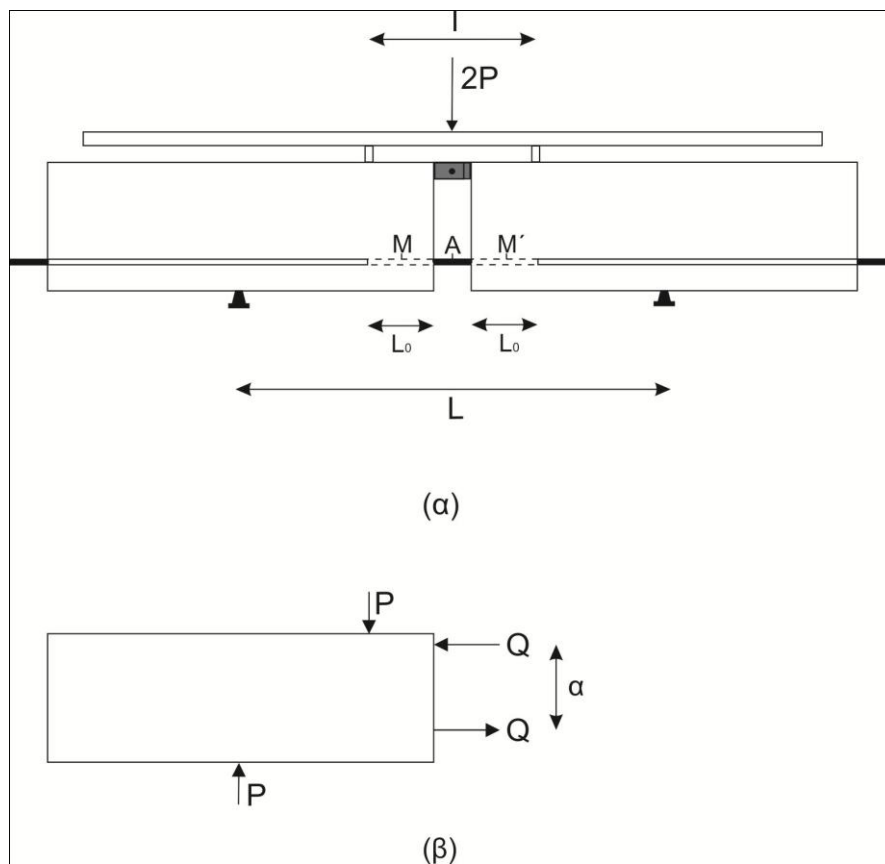
Για τον πειραματικό προσδιορισμό της σχέσης συνάφειας-ολίσθησης των ράβδων FRP για ανακυκλιζόμενη φόρτιση εφαρμόστηκε η εργαστηριακή δοκιμή-δοκού, που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ.

Η δοκιμή εκτελείται σε ένα δοκίμιο-δοκό, που αποτελείται από δύο στοιχεία σκυροδέματος σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου διαστάσεων 15x20x60 εκατοστών. Τα στοιχεία του δοκιμίου συνδέονται μεταξύ τους με μία μηχανική άρθρωση κατασκευασμένη από χάλυβα και με μία ράβδο οπλισμού. Η μεταλλική άρθρωση είναι τυποποιημένων διαστάσεων και αγκυρώνεται με μεταλλικές ράβδους στα δύο στοιχεία του σκυροδέματος, που έχουν επαρκή μήκη αγκύρωσης. Η ράβδος οπλισμού είναι αγκυρωμένη σε ένα μήκος αγκύρωσης 10 εκατοστών στα δύο στοιχεία, ενώ παραμένει ασύνδετη στο υπόλοιπο τμήμα τους.

Η δοκιμή γίνεται με μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων. Η δοκός-δοκίμιο, αφού τοποθετηθεί στη μηχανή, καταπονείται με δύο κατακόρυφες δυνάμεις που επιβάλλονται από τη μηχανή. Η επιβολή των δυνάμεων αυτών γίνεται μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου, που διαθέτει μετακινούμενες θέσεις των σημείων εφαρμογής των δυνάμεων. Με το μεταλλικό στοιχείο η ολική δύναμη της μηχανής διαμοιράζεται σε δύο ίσες δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στο

καθένα από τα δύο στοιχεία του δοκιμίου. Η απόσταση ανάμεσα στις θέσεις εφαρμογής των δυνάμεων είναι δυνατόν να μεταβάλλεται.

Η πειραματική δοκιμή εκτελείται ως εξής: η δοκός-δοκίμιο τοποθετείται στη μηχανή κάμψης σχηματίζοντας μια αμφι-προέχουσα αμφιέριστη δοκό με συγκεκριμένο άνοιγμα  $L$  (Σχήμα 2-1). Στη συνέχεια, ρυθμίζοντας το μεταλλικό στοιχείο της μηχανής, η δοκός φορτίζεται με δύο ίσες κατακόρυφες δυνάμεις  $P$  που απέχουν μεταξύ τους μια επιλεγμένη απόσταση  $l$ , η οποία είναι μικρότερη από το άνοιγμα του δοκιμίου.



**Σχήμα 2-1:** Η πειραματική διάταξη στη φάση εφελκυσμού της ράβδου FRP. Οι δυνάμεις  $P$  που εφαρμόζονται στη δοκό βρίσκονται μεταξύ των στηριγμάτων της δοκού.

Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια κατάσταση καθαρής κάμψης στο τμήμα της δοκού ανάμεσα στις δύο δυνάμεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην διατομή της άρθρωσης, να αναπτύσσεται ένα ζεύγος δυνάμεων  $Q$ , που έχει ροπή ίση με τη σταθερή καμπτική ροπή της δοκού. Επομένως στα δύο τμήματα της δοκού ασκούνται

δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις  $Q$ . Η θλιπτική δύναμη  $Q$  ασκείται στην άρθρωση και η εφελκυστική δύναμη  $Q$  στη ράβδο οπλισμού (Σχήμα 2-1(β)). Το μέγεθος αυτών των δύο δυνάμεων υπολογίζεται από το Σχήμα 2-1(β). Από την ισορροπία των τμημάτων της δοκού που δείχνεται στο Σχήμα 2-1(β) βρίσκεται.

$$Q = P \frac{L-l}{2a}, \quad (2.1)$$

όπου  $a$  είναι ο μογλοβραχίονας του ζεύγους δυνάμεων  $Q$ .

Η μεταβολή της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των δύο στοιχείων του δοκιμίου μετρείται με το βελόμετρο, που τοποθετείται στο μέσο της δοκού και συγκρατείται στα δύο τμήματα της δοκού με σφιγκτήρες. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης της δοκού χρησιμοποιούνται μηκυσιόμετρα, τα οποία έχουν επικολληθεί σε διάφορα σημεία της ενσωματωμένης ράβδου. Επιπλέον, τοποθετούνται βελόμετρα στα εξέχοντα άκρα της ράβδου, για τη μέτρηση των μετακινήσεων της ράβδου οπλισμού στα άκρα αυτά.

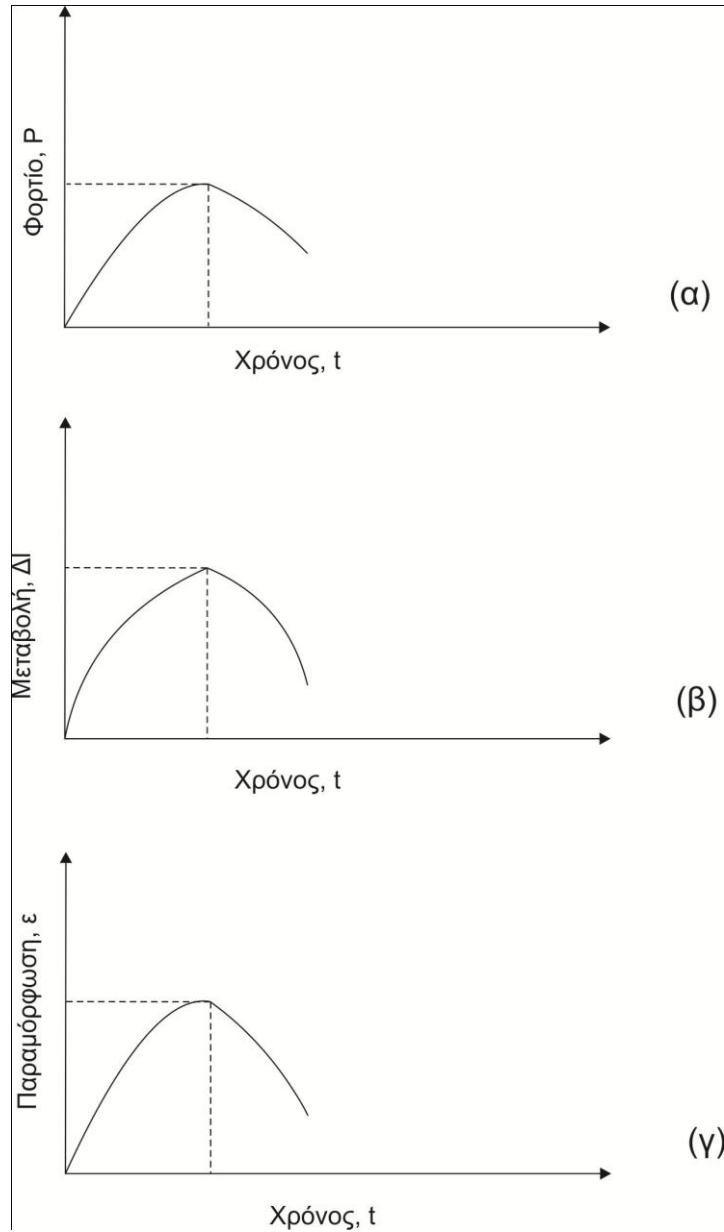
### 2.1.2 Η διαδικασία της πειραματικής δοκιμής

Η πειραματική δοκιμή εκτελείται ως εξής. Αφού η δοκός-δοκίμιο τοποθετηθεί στη μηχανή, έτσι ώστε οι δύο δυνάμεις της μηχανής να εφαρμόζονται εσωτερικά των στηρίξεων, αρχίζει η επιβολή των δυνάμεων στη δοκό-δοκίμιο. Η επιβολή των δυνάμεων γίνεται σιγά-σιγά και αυξητικά, προκειμένου να αποφεύγονται δυναμικά φαινόμενα. Από την έναρξη επιβολής της δύναμης και σε κάθε χρονική στιγμή από την έναρξη επιβολής της δύναμης καταγράφονται:

- Το επιβαλλόμενο φορτίο  $P$  της μηχανής στη δοκό από την έναρξη της επιβολής της φόρτισης.
- Οι μετατοπίσεις  $\Delta l_u$  των εσωτερικών ακραίων διατομών των δύο ορθογωνίων στοιχείων της δοκού, στο ύψος του οπλισμού από την αρχική τους θέση.
- Η παραμόρφωση  $\varepsilon_{f,0}$  του μη αγκυρωμένου τμήματος του οπλισμού, που βρίσκεται στο ενδιάμεσο τμήμα της δοκού.



- Οι παραμορφώσεις  $\varepsilon_{f,M}$  του οπλισμού στα δύο ενδιάμεσα σημεία, που αντιστοιχούν στα αγκυρωμένα τμήματα του οπλισμού της δοκού.
- Οι μετατοπίσεις  $\Delta l_{u,e}$  των δύο ελεύθερων άκρων της ράβδου του οπλισμού.

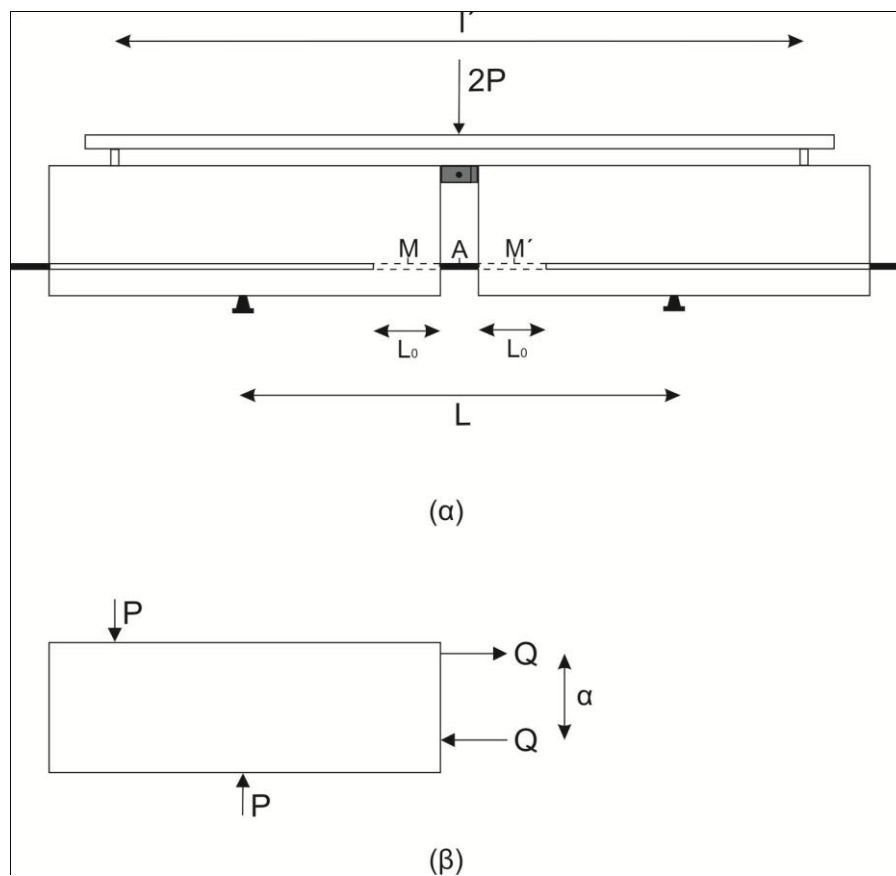


Σχήμα 2-2: Οι καμπύλες που λαμβάνονται κατά την δοκιμή ως συνάρτηση του χρόνου.

Οι μετρήσεις αυτές γίνονται σε κάθε χρονική στιγμή εκτέλεσης του πειράματος. Αν η επιβαλλόμενη δύναμη μεταβάλλεται αυξητικά, τότε έχουμε φόρτιση της δοκού, και ο αντίστοιχος κλάδος της καμπύλης αποτελεί το κλάδο φόρτισης. Κατά την εξέλιξη της

δοκιμής μπορούμε να πάρουμε κλάδους αποφόρτισης της δοκού ως εξής. Σε κάποια χρονική στιγμή, που το φορτίο αντιστοιχεί σε μία τιμή  $P$ , αρχίζουμε να μειώνουμε το φορτίο της μηχανής, μέχρι τη μηδενική του τιμή. Κατά την αποφόρτιση, καταγράφονται οι τιμές των μετρούμενων μεγεθών, έως ότου το φορτίο μηδενιστεί. Οι καμπύλες που λαμβάνονται κατά την πειραματική διαδικασία θα είναι της μορφής που δείχνεται στο Σχήμα 2-2.

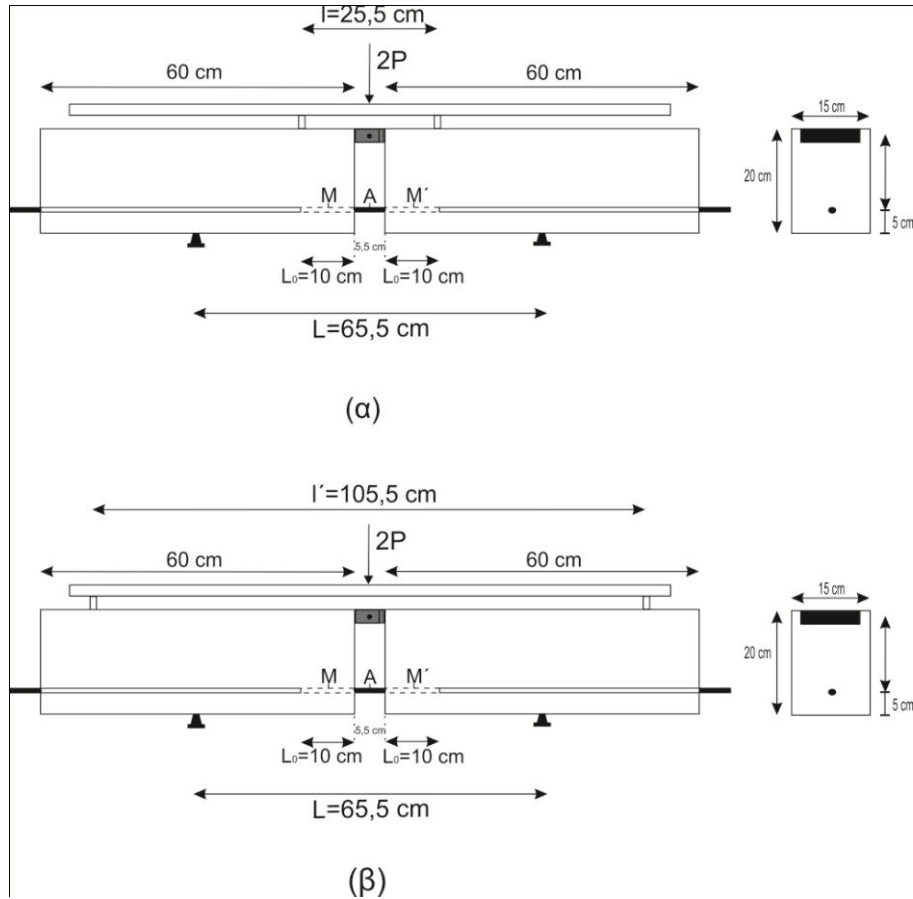
Μετά το μηδενισμό της φόρτισης, μπορεί να γίνει ανακύκλιση της φόρτισης. Για να πραγματοποιηθεί ανακύκλιση της φόρτισης, ρυθμίζεται η απόσταση των επιβαλλόμενων δυνάμεων να είναι ίση με  $l'$ , που είναι μεγαλύτερη από το άνοιγμα  $L$  του δοκιμίου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται πάλι μια κατάσταση καθαρής κάμψης μεταξύ των στηριγμάτων της δοκού. Οι ροπές έχουν αντίθετο πρόσημο από τις προηγούμενες, με συνέπεια οι δύο δυνάμεις που αναπτύσσονται στην άρθρωση και στη ράβδο να έχουν αντίθετη φορά.



**Σχήμα 2-3:** Η πειραματική διάταξη στη φάση θλίψης της ράβδου FRP. Οι δυνάμεις  $P$  που εφαρμόζονται στη δοκό βρίσκονται έξω από τα στηρίγματα της δοκού.

### 2.1.3 Οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού-δοκιμίου

Από τη σχετική ανάλυση, που έχει γίνει από τον Καρατζαφέρη (2009), έχουν προταθεί οι τυποποιημένες διαστάσεις της δοκού-δοκιμίου που δείχνονται στο Σχήμα 2-4. Οι διαστάσεις αυτές έχουν επιλεγθεί έτσι ώστε να αποφευχθούν τοπικά φαινόμενα συγκέντρωσης τάσεων και επίδρασης ανεπιθύμητων φορτίσεων στη ράβδο σπλισμού στο αγκυρωμένο τμήμα.



**Σχήμα 2-4:** Οι τυποποιημένες διαστάσεις της πειραματικής δοκού : (α) στην περίπτωση του εφελκυσμού της ράβδου FRP και (β) στην περίπτωση θλίψης της ράβδου FRP.

## 2.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Από τα πειραματικά στοιχεία που προκύπτουν από την εκτέλεση της δοκιμής, και συγκεκριμένα

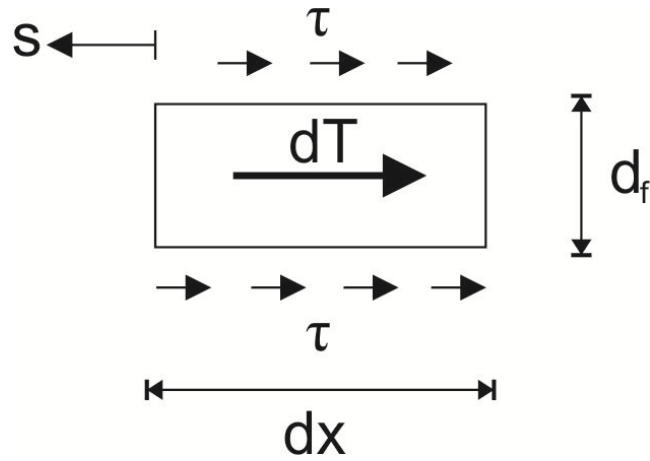
- από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων, που υφίσταται η ράβδος οπλισμού στα σημεία  $A$  και  $M$ , και
- από τη μέτρηση της οριζόντιας μετακίνησης  $\Delta l_u$  των δύο ορθογωνίων τμημάτων της δοκού,

προσδιορίζονται οι ολισθήσεις των δύο εμπηγμένων τμημάτων της ράβδου οπλισμού σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ , ή διαφορετικά, για κάθε τιμή της εξωτερικής φόρτισης  $P$ .

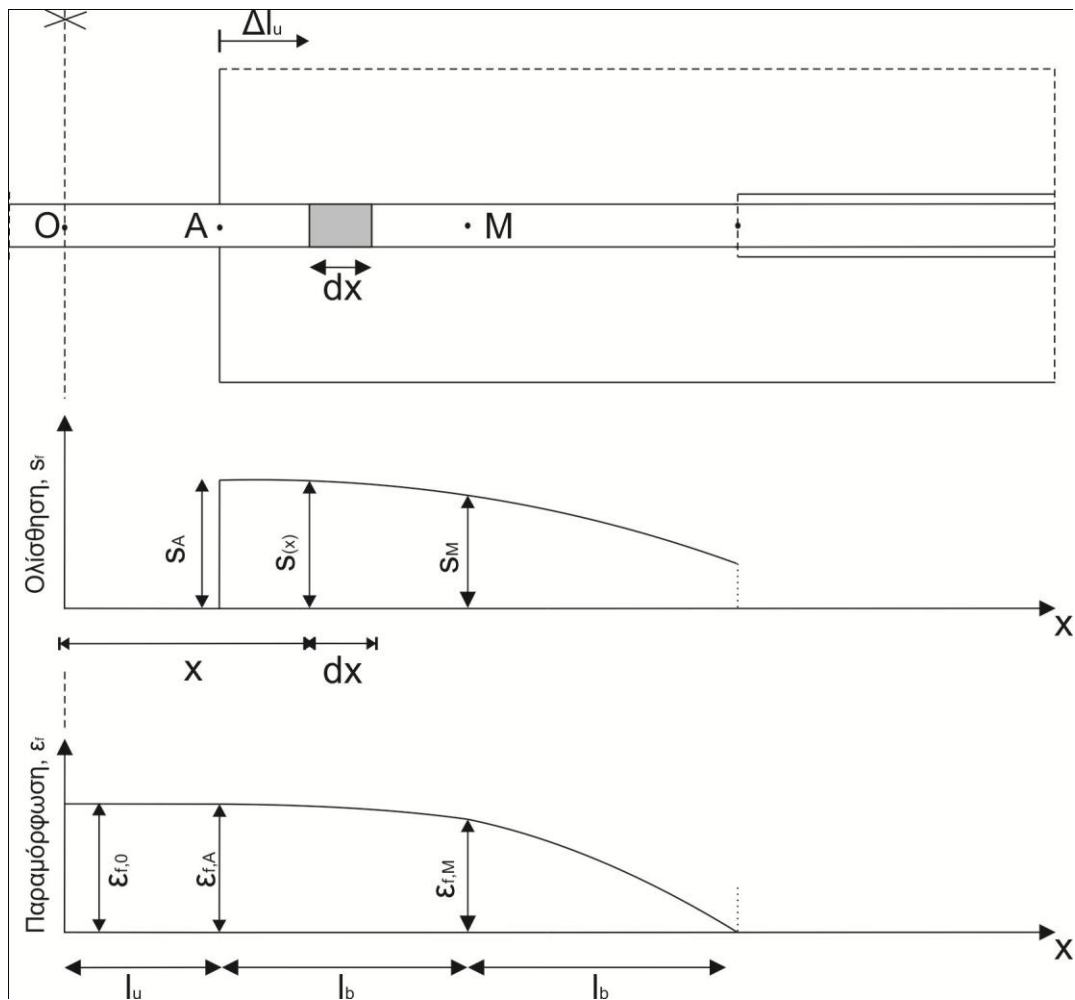
Για τον προσδιορισμό της ολίσθησης γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Η παραμόρφωση που υφίστανται τα δύο στοιχεία της δοκού από σκυρόδεμα είναι αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί. Τα στοιχεία αυτά συμπεριφέρονται ως απόλυτα άκαμπτα σώματα.
- Η ράβδος οπλισμού παραμορφώνεται και η καταστατική συμπεριφορά της είναι γνωστή από σχετικές πειραματικές δοκιμές. Η συμπεριφορά αυτή είναι μια σχέση μεταξύ της ορθής τάσης  $\sigma_f$ , που καταπονεί τη ράβδο, και της ορθής παραμόρφωσης  $\varepsilon_f$ , δηλαδή μια σχέση  $\sigma_f = f(\varepsilon_f)$ . Στην περίπτωση του οπλισμού FRP, η σχέση αυτή θεωρείται γραμμική, δηλαδή  $\sigma_f = E_f \varepsilon_f$ , όπου  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας.

Η μηχανική συμπεριφορά της σύνδεσης των δύο υλικών, δηλαδή του σκυροδέματος και της ράβδου οπλισμού, προσομοιώνεται με μια συνεχή διανομή ελατηρίων, αμελητέου πάχους, που είναι διανεμημένα πάνω στη διεπιφάνεια. Για ένα απειροστό τμήμα  $dx$  της ράβδου οπλισμού, αντιστοιχεί μια εξωτερική απειροστή επιφάνεια  $dS = \pi d_f dx$ . Τα ελατήρια, που είναι διανεμημένα πάνω σε αυτήν την απειροστή επιφάνεια, αναπτύσσουν μια δύναμη  $dT = \tau dS$  και επιμηκύνονται όλα κατά  $s$ . Η επιμήκυνση  $s$  αντιπροσωπεύει την ολίσθηση στη θέση  $x$  της ράβδου, που βρίσκεται το απειροστό τμήμα  $dx$ .



Σχήμα 2-5: Η ολίσθηση  $s$ , οι τάσεις συνάφειας  $\tau$  και η δύναμη συνάφειας  $T$  στο απειροστό τμήμα της ράβδου FRP



Σχήμα 2-6: Η κατανομή της ολίσθησης κατά μήκος του εμπηγμένου τμήματος της ράβδου.

Η ολίσθηση υπολογίζεται από τη μέση τιμή των ολισθήσεων, που αναπτύσσονται μεταξύ των σημείων  $A$  και  $M$  των εμπηγμένων τμημάτων της ράβδου οπλισμού. Η μεταβολή της ολίσθησης κατά μήκος του τμήματος  $AM$  της ράβδου δείχνεται στο Σχήμα 2-6. Αν η διανομή της ολίσθησης στο τμήμα της ράβδου μεταξύ των σημείων  $A$  και  $M$  προσεγγισθεί γραμμικά, τότε η μέση τιμή της ολίσθησης θα είναι ίση με

$$s_{ave} = \frac{s_A + s_M}{2} \quad (2.2)$$

όπου  $s_A$  και  $s_M$  είναι οι ολισθήσεις των σημείων  $A$  και  $M$ , αντίστοιχα.

Μεταξύ των σημείων  $O$  και  $A$ , η παραμόρφωση που υφίσταται η ράβδος είναι σταθερή και ίση με  $\varepsilon_{f,0}$ . Αυτό συμβαίνει, επειδή η δύναμη που καταπονεί τη ράβδο μεταξύ των σημείων αυτών είναι σταθερή. Μεταξύ των σημείων  $A$  και  $M$ , η παραμόρφωση είναι μια φθίνουσα συνάρτηση. Η μεταβολή της παραμόρφωσης κατά μήκος της ράβδου δείχνεται στο Σχήμα 2-6. Αν η μεταβολή της παραμόρφωσης στο τμήμα  $AM$  θα προσεγγισθεί γραμμικά, τότε η μέση παραμόρφωση στο τμήμα αυτό θα είναι

$$\varepsilon_{ave} = \frac{\varepsilon_{f,A} + \varepsilon_{f,M}}{2}. \quad (2.3)$$

Το αρχικό μήκος  $OM$  της ράβδου οπλισμού είναι

$$OM = l_u + l_b \quad (2.4)$$

Το μήκος αυτό μετά την παραμόρφωση θα είναι

$$OM' = (l_u + \varepsilon_{f,0}l_u) + (l_b + \varepsilon_{f,ave}l_b) \quad (2.5)$$

Η ολίσθηση του σημείου  $M$  της ράβδου θα είναι ίση με

$$s_M = (l_u + l_b + \Delta l_u) - OM' = \Delta l_u - \varepsilon_{f,0}l_u - \varepsilon_{f,ave}l_b \quad (2.6)$$

όπου  $\Delta l_u$  είναι η οριζόντια μετακίνηση του δεξιού τμήματος της ράβδου, που αντιστοιχεί σε κίνηση απολύτως στερεού σώματος και έχει υπολογισθεί πειραματικά σε κάθε χρονική στιγμή της πειραματικής διαδικασίας. Η απόσταση του δεξιού τμήματος της δοκού από το κέντρο της θα είναι ίση με  $l_u + \Delta l_u$ . Το μήκος αυτό θα αντιστοιχεί στο άθροισμα του παραμορφωμένου μη εμπηγμένου τμήματος της ράβδου  $(l_u + \varepsilon_{f,0}l_u)$  και της ολίσθησης  $s_A$  του σημείου  $A$ , δηλαδή θα ισχύει

$$l_u + \Delta l_u = (l_u + \varepsilon_{f,0}l_u) + s_A \quad (2.7)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει

$$s_A = \Delta l_u - \varepsilon_{f,0} l_u \quad (2.8)$$

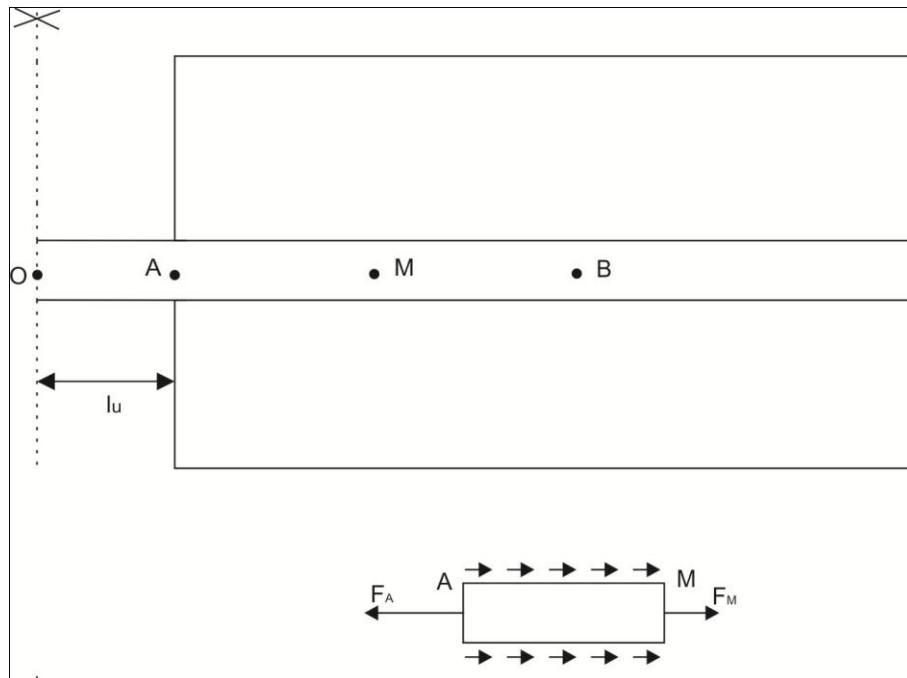
Έτσι από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) προκύπτει η μέση ολίσθηση της ράβδου

$$s_{ave} = \Delta l_u - \varepsilon_{f,0} l_u - \frac{l}{2} \varepsilon_{f,ave} l_b \quad (2.9)$$

## 2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

### 2.3.1 Ο προσδιορισμός τάσης συνάφειας

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η μέση διατμητική τάση που αναπτύσσεται στο τμήμα  $AM$  του εμπηγμένου τμήματος της ράβδου της δοκού-δοκιμίου, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $t$  της πειραματικής διαδικασίας. Η μέση αυτή διατμητική τάση είναι η (μέση) τάση συνάφειας της αγκυρωμένης ράβδου και δηλώνεται με  $\tau_{ave}$ .



Σχήμα 2-7: Οι δυνάμεις  $F_A$ ,  $F_M$  και οι τάσεις συνάφειας στο εμπηγμένο τμήμα  $AM$

Για την εκτίμηση της τάσης αυτής θεωρείται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος του τμήματος  $AM$  της ράβδου, που δείχνεται στο Σχήμα 2-6. Στο σχήμα αυτό επενεργούν οι δυνάμεις  $F_A$  και  $F_M$  στις διατομές  $A$  και  $M$ , που προέρχονται από τις ορθές τάσεις της ράβδου  $\sigma_{f,A}$  και  $\sigma_{f,M}$  στις διατομές αυτές. Αν  $d_f$  η διάμετρος της ράβδου οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$F_A = \frac{\pi d_f^2}{4} \sigma_{f,A}, \quad F_M = \frac{\pi d_f^2}{4} \sigma_{f,M} \quad (2.10)$$

Αν η συμπεριφορά της ράβδου οπλισμού διέπεται από το γραμμικό νόμο του Hooke, όπως συμβαίνει με τις ράβδους FRP, τότε οι τάσεις  $\sigma_{f,A}$  και  $\sigma_{f,M}$  υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$\sigma_{f,A} = E_f \varepsilon_{f,A}, \quad \sigma_{f,M} = E_f \varepsilon_{f,M}. \quad (2.11)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις αυτές, οι δυνάμεις  $F_A$  και  $F_M$  παίρνουν τη μορφή

$$F_A = \frac{\pi d_f^2}{4} E_f \varepsilon_{f,A}, \quad F_M = \frac{\pi d_f^2}{4} E_f \varepsilon_{f,M} \quad (2.12)$$

Σε κάθε στοιχειώδες μήκος  $dx$  του τμήματος  $AM$ , αναπτύσσεται μια διατμητική τάση  $\tau$ , που αντιστοιχεί σε μια δύναμη  $dT = (\tau \pi d_f) dx$ , όπου ο όρος στην παρένθεση αντιπροσωπεύει την εξωτερική επιφάνεια του στοιχειώδους κυλινδρικού τμήματος  $dx$  της ράβδου. Η δύναμη αυτή προέρχεται από τα διεπιφανειακά ελατήρια του τμήματος  $dx$ . Η συνολική δύναμη που αναπτύσσεται από τα ελατήρια που είναι διανεμημένα στο τμήμα  $AM$  της ράβδου είναι

$$T = \int_A^M \tau \pi d_f dx. \quad (2.13)$$

Από την ισορροπία του τμήματος  $AM$  της ράβδου προκύπτει η σχέση

$$T = F_A - F_M \quad (2.14)$$

Παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις (2.13), (2.14) η δύναμη  $T$  γράφεται στη μορφή

$$T = \frac{\pi d_f^2}{4} E_f (\varepsilon_{f,A} - \varepsilon_{f,M}). \quad (2.15)$$

Η μέση διατμητική τάση  $\tau_{ave}$  πάνω στο τμήμα  $AM$  ορίζεται με τη σχέση

$$\tau_{ave} = \frac{T}{\pi d_f l_b}, \quad (2.16)$$



όπου η ποσότητα  $pd_f l_b$  αντιπροσωπεύει την εξωτερική επιφάνεια στο τμήμα  $AM$  της ράβδου. Αντικαθιστώντας τη σχέση (2.15) στη (2.16), προκύπτει

$$\tau_{ave} = \frac{d_f E_f}{4l_b} (\varepsilon_{f,A} - \varepsilon_{f,M}). \quad (2.17)$$

Έτσι, γνωρίζοντας από τις πειραματικές μετρήσεις, τις τιμές της παραμόρφωσης στις θέσεις  $A$  και  $M$  της ράβδου του δοκιμίου από τις πειραματικές μετρήσεις, η μέση τάση συνάφειας για τη χρονική στιγμή  $t$ , που αντιστοιχούν οι μετρήσεις αυτές, υπολογίζονται από τη σχέση (2.17).

### 2.3.2 Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης

Παρουσιάστηκε παραπάνω, πως από τις πειραματικές μετρήσεις που γίνονται κατά τη διαδικασία της πειραματικής δοκιμής-δοκού, υπολογίζονται η μέση ολίσθηση  $s_{ave}$  και η μέση διατμητική τάση (συνάφεια)  $\tau_{ave}$  σε κάθε τιμή της δύναμης  $P$  της μηχανής. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει για κάθε επιβαλλόμενη φόρτιση  $P$  και να προσδιοριστούν οι καμπύλες  $s_{ave} = s_{ave}(P)$  και  $\tau_{ave} = \tau_{ave}(P)$ , ως συναρτήσεις της δύναμης  $P$ .

Απαλείφοντας την παράμετρο του χρόνου από τις σχέσεις αυτές προκύπτει η καμπύλη  $\tau_{ave} = f(s_{ave})$ , που είναι η πειραματική καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης της συγκεκριμένης ράβδου που χρησιμοποιήθηκε.

## Κεφάλαιο 3

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

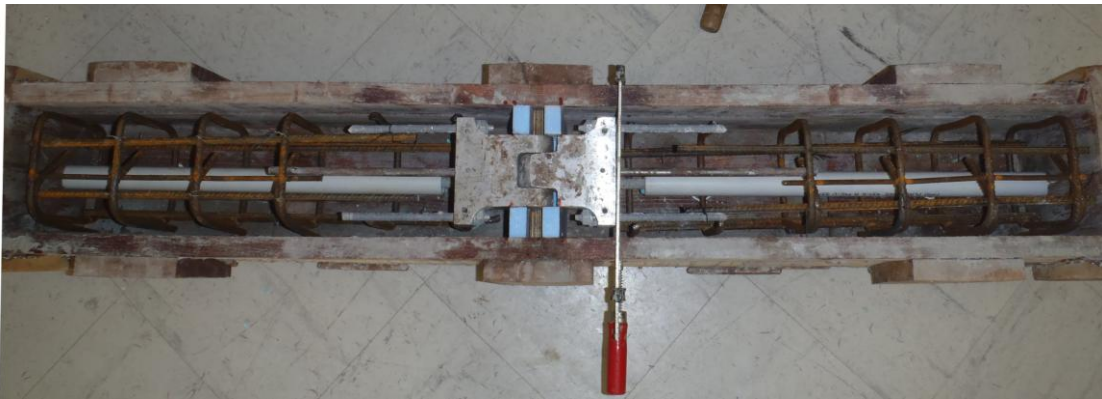
#### 3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ-ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός των καμπυλών συνάφειας-ολίσθησης συγκεκριμένων τύπων ράβδων οπλισμού του εμπορίου, χρησιμοποιώντας την πειραματική δοκιμή-δοκού, που έχει αναπτυχθεί εξ' ολοκλήρου στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της ΣΑΤΜ του ΕΜΠ. Επειδή η εκτέλεση του πειραματικού έργου απαιτεί συλλογική εργασία, η κατασκευή των δοκιμών έγινε με ομαδική συνεργασία στο εργαστήριο. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται το συλλογικό πειραματικό έργο και παρουσιάζονται τα ατομικά πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα που αφορούν την μονότονη φόρτιση ράβδων FRP από γυαλί.

Για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών κατασκευάστηκαν πέντε δοκίμια με τις τυποποιημένες διαστάσεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Όλα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν είχαν την ίδια γεωμετρία και την ίδια περίπου ποιότητα σκυροδέματος. Η διαφοροποίησή τους ήταν μόνο ως προς τον τύπο της ράβδου που χρησιμοποιήθηκε ως οπλισμός σε καθένα από αυτά. Συγκεκριμένα, σε τρία από τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ράβδοι FRP από ίνες γυαλιού (GFRP) διαφορετικών διαμέτρων, στο τέταρτο δοκίμιο τοποθετήθηκε ράβδος από ίνες άνθρακα (CFRP) και στο τελευταίο δοκίμιο επικολλήθηκε έλασμα άνθρακα με τη χρήση εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών. Η κατασκευή τους έγινε στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της σχολής ΣΑΤΜ του ΕΜΠ.

**Ευλότυποι του δοκιμίου**

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν πέντε τυποποιημένα ξύλινα καλούπια από 'ΜΠΕΤΟΦΟΡΜ'. Τα καλούπια έχουν κατασκευασθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν αφού πρώτα η δοκός-δοκίμιο τοποθετηθεί στη μηχανή κάμψης. Αυτό γίνεται για την αποφυγή της διατάραξης της δοκού-δοκιμίου. Προκειμένου να δημιουργηθούν τα δύο τμήματα της δοκού, στο κέντρο του καλουπιού τοποθετήθηκε συμπιεσμένο χαρτί πάχους 5,5 cm, όπως προβλέπεται από την τυποποίηση της γεωμετρίας των δοκιμίων.



**Σχήμα 3-1:** Δοκίμιο πριν τη σκυροδέτηση

**Κατασκευαστικός οπλισμός του δοκιμίου**

Στις δοκούς-δοκίμια χρησιμοποιήθηκε κατασκευαστικός οπλισμός προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες αστοχίες από διάτμηση και κάμψη. Ο κατασκευαστικός οπλισμός, που χρησιμοποιήθηκε στα δύο τμήματα της δοκού-δοκιμίου, ήταν συνδεδεμένες διαμέτρου 8 mm οι οποίοι τοποθετήθηκαν ανά 10 cm ( $\Phi 8/10$  cm) κατά μήκος των δύο τμημάτων του. Ο κατασκευαστικός οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 3-2 .



Σχήμα 3-2: Οι συνδετήρες του δοκιμίου

### Άρθρωση

Οι συνδέσεις των δύο τμημάτων των δοκών-δοκιμίων έγιναν με μεταλλικές αρθρώσεις, που τοποθετήθηκαν στο πάνω μέρος τους. Οι αρθρώσεις που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τυποποιημένη γεωμετρία και έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα υψηλής αντοχής. Οι μεταλλικές αρθρώσεις έχουν κατασκευαστεί με τέτοιες διαστάσεις έτσι ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις στις διεπιφάνειες κατά τη διάρκεια της δοκιμής να είναι μικρές και να αποφευχθούν αστοχίες και φαινόμενα αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 3-3: Η μεταλλική άρθρωση της δοκού-δοκιμίου

Επίσης, οι αρθρώσεις αγκυρώθηκαν με μεταλλικές ράβδους στα δύο στοιχεία σκυροδέματος της δοκού-δοκιμίου με επαρκή μήκη αγκύρωσης, ώστε να μπορούν να

παραλαμβάνουν με ασφάλεια τις εφελκυστικές δυνάμεις, που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της δοκιμής. Μια μεταλλική άρθρωση δείχνεται στο καλούπι της δοκού-δοκιμίου κατά το στάδιο πριν τη σκυροδέτηση.

### **Οπλισμός FRP**

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης σε μονότονη φόρτιση για ράβδους FRP από γυαλί της εταιρίας Concrete Protection Products Inc.



**Σχήμα 3-4:** Ράβδος FRP της εταιρίας Concrete Protection Products Inc

Οι ράβδοι που χρησιμοποιήθηκαν έχουν διάμετρο 14 mm και 16 mm, μετρημένη με παχύμετρο. Η μέθοδος για την κατασκευή των ράβδων ήταν η διαδικασία της ψυχρής έλασης. Λόγω της διαδικασίας αυτής, οι ράβδοι αμέσως μετά την παραγωγή τους, παρουσιάζουν μια λεία επιφάνεια. Για την επίτευξη της απαιτούμενης αύξησης της συνάφειας, η επιφάνεια αυτή έχει επικαλυφθεί με ένα επίστρωμα κόκκων άμμου. Με τον τρόπο αυτό έχουν δημιουργηθεί οι απαιτούμενες ‘νευρώσεις’ στην εξωτερική επιφάνεια.

Η ράβδος FRP της κάθε δοκού-δοκιμίου αγκυρώθηκε σε ένα μήκος 10 cm στα δύο τμήματα της δοκού ενώ στο υπόλοιπο τμήμα παρέμεινε ασύνδετη. Στο ασύνδετο τμήμα η ράβδος τοποθετήθηκε μέσα σε πλαστικό σωλήνα.

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της ράβδου FRP όπως αυτές δίνονται από την εταιρία κατασκευής της, έχουν καταχωρηθεί στους Πίνακες 3-1 και 3-2.

Πινάκας 3-1: Φυσικές ιδιότητες της ράβδου FRP

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	GFRP 1	GFRP 2
Ονομαστική διάμετρος, mm	14	16
Εμβαδόν διατομής, mm <sup>2</sup>	153,86	200,96
Ειδικό βάρος, g/n	284,1	284,1

Πινάκας 3-2: Μηχανικές ιδιότητες της ράβδου FRP

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	GFRP
Εφελκυστική αντοχή, MPa	839
Ονομαστικό Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	46
Διατμητική αντοχή, MPa	213
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Διαμήκη Διεύθυνση, K <sup>-1</sup>	8,88*10 <sup>-6</sup>
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Εγκάρσια Διεύθυνση, K <sup>-1</sup>	41*10 <sup>-6</sup>
Μέγιστη Παραμόρφωση, %	1,8

### Σύνθεση του σκυροδέματος και σκυροδέτηση

Η σκυροδέτηση όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε επί τόπου στο εργαστήριο. Η παρασκευή του σκυροδέματος έγινε με τη χρήση ηλεκτρικού αναδευτήρα (μπετονιέρα), η δε συμπύκνωσή του στα καλούπια με δόνηση χειρονακτικά μεταλλικής ράβδου.



Σχήμα 3-5: Δοκίμια κατά τη σκυροδέτηση

Για την κατασκευή του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μέγιστη διάμετρο 12mm και ο λόγος νερού προς τσιμέντο 0,5. Η σύνθεση του σκυροδέματος των δοκιμών έγινε με αναλογία υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-3.

**Πίνακας 3-3:** Αναλογία υλικών σκυροδέματος ανά  $m^3$

<b>Υλικά</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>Μονάδες Μέτρησης</b>
Νερό	118	Kg
Τσιμέντο	236	Kg
Άμμος	919	Kg
Χαλίκια	1249	Kg
Αέρας	2	%

Χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω αναλογίες προκειμένου να επιτευχθεί ποιότητα αντοχής σκυροδέματος  $C_{30}$ . Για τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λήφθηκε κυβικό δοκίμιο διαστάσεων 150x150x150mm στο οποίο πραγματοποιήθηκε δοκιμή θλίψης. Μετά από τον έλεγχο η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προσδιορίστηκε στην τιμή των 25,5 MPa, για τη δοκό με τη ράβδο διαμέτρου 16mm, και 15 MPa για τη δοκό με τη ράβδο διαμέτρου 14mm.

Οι δοκοί-δοκίμια ύστερα από την σκυροδέτησή τους, καταβρέχονταν για μια εβδομάδα με νερό ώστε να διατηρηθούν σε ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας περίπου 20°C και σχετικής υγρασίας η οποία δεν ξεπερνούσε το 90%. Η χρονική διάρκεια που μεσολάβησε ανάμεσα στην κατασκευή των δοκιμών και της εκτέλεσης του πειράματος ήταν πέντε μήνες.



Σχήμα 3-6: Δοκιμή θλίψης κυβικού δοκιμίου

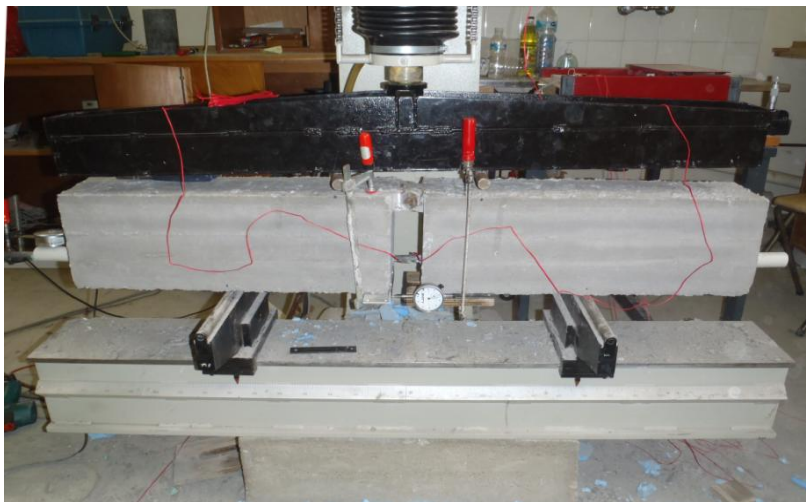
### 3.2 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πέντε μήνες μετά την κατασκευή των δοκών-δοκιμίων, η κάθε δοκός τοποθετήθηκε καλουπωμένη, στη μηχανή κάμψης τεσσάρων σημείων όπου και ξεκαλουπώθηκε.

Οι δυνάμεις ασκούνται στη δοκό-δοκίμιο, μέσω ενός κατάλληλου μεταλλικού στοιχείου, που προσαρμόζεται για το σκοπό αυτό στη μηχανή κάμψης τριών σημείων.

Με αυτό το στοιχείο, η συνολική δύναμη της μηχανής διαιρείται σε δύο ίσες δυνάμεις, οι οποίες εξασκούνται σε συμμετρικές θέσεις στα δύο τμήματα της δοκού.

Το μεταλλικό αυτό στοιχείο απεικονίζεται στο Σχήμα 3-7 και το όργανο ανάγνωσης του επιβαλλόμενου φορτίου από τη μηχανή κάμψης στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3-7: Το δοκίμιο στη μηχανή κάμψης





**Σχήμα 3-8:** Σύστημα ανάγνωσης επιβαλλόμενου φορτίου

### Μηκυνσιόμετρα

Για να μετρηθεί η διαμήκης παραμόρφωση της ράβδου έγινε χρήση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων (strain gages). Τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα κολλήθηκαν πάνω στην επιφάνεια της ράβδου και συγκεκριμένα στο μέσο του ελεύθερου τμήματος της ράβδου ανάμεσα στα δυο τμήματα σκυροδέματος του δοκιμίου, αφού πρώτα λειάνθηκε με τη βοήθεια μιας λίμας. Τοποθετήθηκαν δυο ηλεκτρομηκυνσιόμετρα πάνω στη ράβδο, στο πάνω και στο κάτω μέρος της αντίστοιχα, από τα όποια μετρήθηκε η παραμόρφωση της ράβδου. Η παραμόρφωση λήφθηκε ως ο μέσος όρος των ενδείξεων των παραμορφώσεων των δύο ηλεκτρομηκυνσιομέτρων.



**Σχήμα 3-9:** Τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα επικολλημένα στη ράβδο

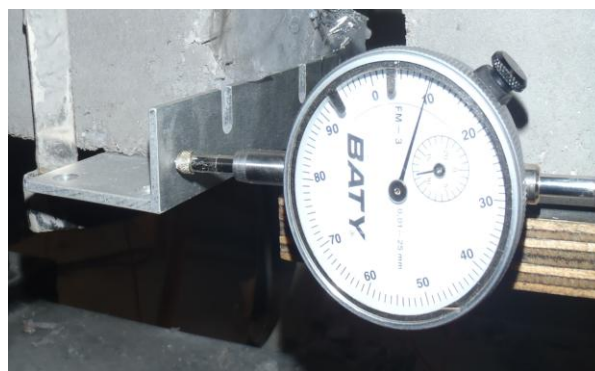
Τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα τοποθετήθηκαν στη ράβδο μετά τη σκυροδέτηση. Μετά τη λείανση της επιφάνειας της ράβδου, επικολλήθηκαν με κόλλα και επικαλύφθηκαν με σιλικόνη για την προστασία τους από την υγρασία. Τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας KYOWA, έχουν μήκος 5 mm και αντίσταση 120 Ω. Οι ενδείξεις των ηλεκτρομηκυσιομέτρων λαμβάνονταν μέσω ηλεκτρονικού καταγραφέα.



Σχήμα 3-10: Σύστημα καταγραφής μετρήσεων των ηλεκτρομηκυσιομέτρων

### Βελόμετρα

Η μέτρηση της μεταβολής της οριζόντιας απόστασης, μεταξύ των δυο στοιχείων σκυροδέματος του κάθε δοκιμίου, έγινε με βελόμετρο, που τοποθετήθηκε στο μέσο της δοκού και πακτώθηκε με μεταλλικούς σφιγκτήρες.



Σχήμα 3-11: Τα βελόμετρα τοποθετημένα στο δοκίμιο

Επίσης ένα βελόμετρο τοποθετήθηκε στο (ελεύθερο από τάσεις) εξέχον άκρο της ράβδου, βιδωτό στον πλαστικό σωλήνα. Με αυτό το βελόμετρο μετρήθηκε η σχετική μετατόπιση ράβδου-σκυροδέματος στο ελεύθερο άκρο της ράβδου.



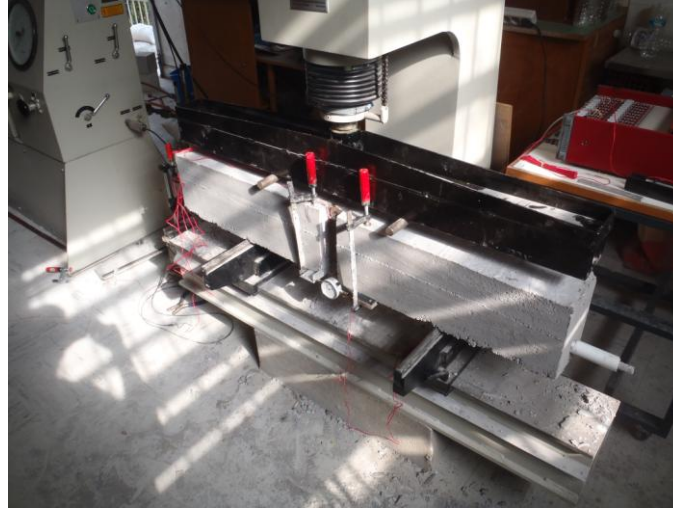
Σχήμα 3-12: Τα βελόμετρα τοποθετημένα στο δοκίμιο

Θεωρούμε ότι η μετατόπιση αυτή, αντιστοιχεί στην ολίσθηση της ράβδου στο άκρο της αγκύρωσης (σημείο  $B$  Σχήμα 2-6). Αυτό διότι, σε όλο το τμήμα της ράβδου, από το ελεύθερο εξέχον άκρο της, στο οποίο γίνεται η παρατήρηση, ως και το σημείο που αρχίζει να αγκυρώνει στο σκυροδέμα, δεν υπάρχουν αξονικές καταπονήσεις (άρα ούτε και παραμορφώσεις), καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Επομένως η σχετική μετατόπιση ράβδου-σκυροδέματος, στο  $B$  (δηλαδή η ολίσθηση στο σημείο αυτό), μεταφέρεται ακριβώς στο σημείο της μέτρησης.

### 3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για να προσδιοριστεί η σχέση συνάφειας-ολίσθησης πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 2.1. Αρχικά τοποθετήθηκαν πάνω στο κάθε δοκίμιο τα βελόμετρα και τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα για την καταγραφή των μετρήσεων με τον τρόπο που αναφέρθηκε. Για τον υπολογισμό της ολίσθησης και της συνάφειας μετρήθηκαν οι εξωτερικές δυνάμεις  $P$  που επιβάλλονται από τη μηχανή, η παραμόρφωση στο σημείο  $A$  στο μέσο του κεντρικού μη εμπηγμένου τμήματος της δοκού και η μεταβολή της απόστασης, μεταξύ των δυο

τμημάτων του δοκιμίου. Οι τιμές των μεγεθών αυτών καταγράφονταν ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια του πειράματος.



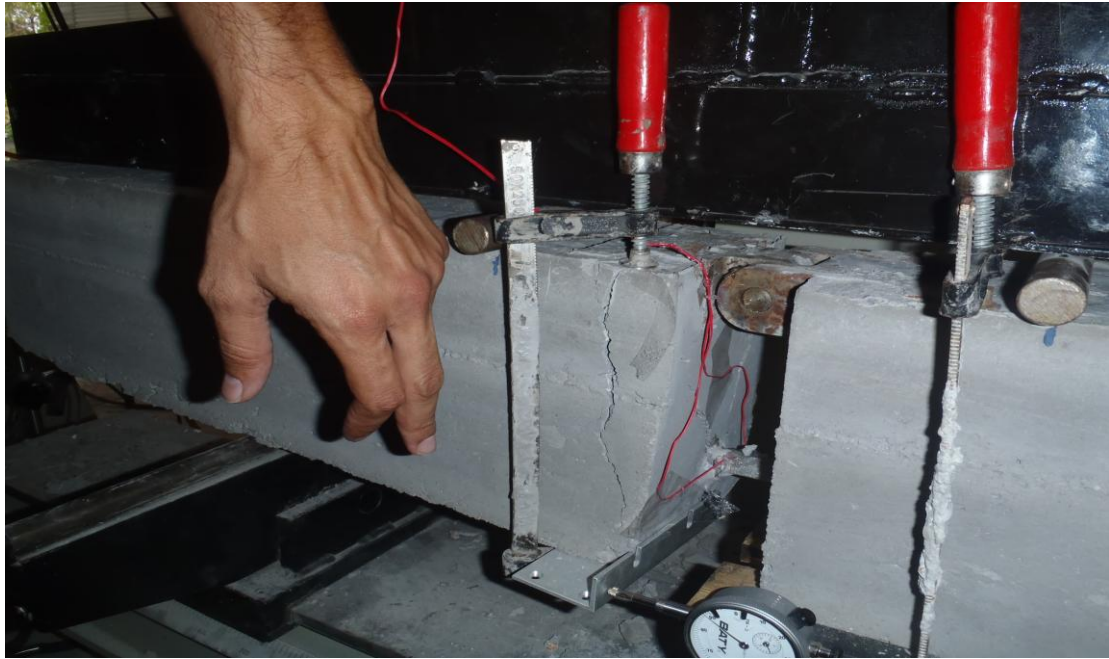
Σχήμα 3-13: Η δοκός-δοκίμιο στη μηχανή κάμψης

Με την τοποθέτηση του κάθε δοκιμίου πάνω στη μηχανή κάμψης, τοποθετήθηκαν τα μεταλλικά στοιχεία που ασκούν το φορτίο σε απόσταση 10 cm από το κάθε άκρο του κάθε τμήματος σκυροδέματος δηλαδή 12,75 cm από το μέσο του δοκιμίου. Πρώτη τοποθετήθηκε η δοκός με τη ράβδο GFRP διαμέτρου 16 mm. Η δοκός φορτίστηκε με αργό ρυθμό μέχρι τη θραύση της, η οποία επήλθε για τιμή συνολικού φορτίου μηχανής 42,5 KN.

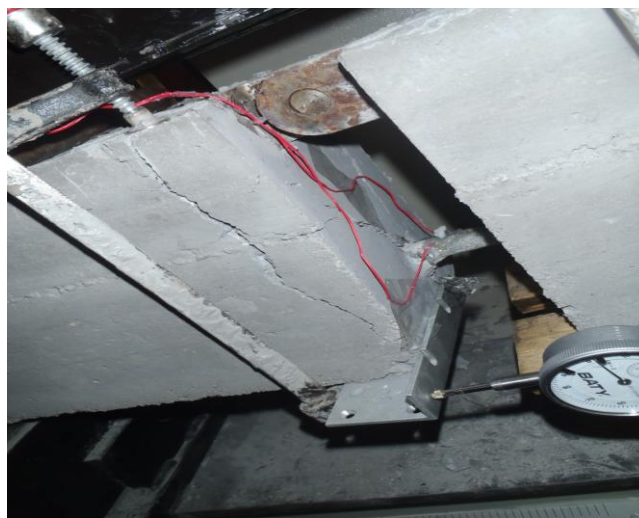


Σχήμα 3-14: Αστοχία δοκού (ράβδος 16mm)

Η δεύτερη δοκός με ράβδο GFRP διαμέτρου 14 mm, φορτίστηκε αρχικά μέχρι τα 17,5 KN και αποφορτίστηκε πλήρως ως την τιμή 0. Ακολούθησε δεύτερη φόρτιση της δοκού μέχρι την τιμή 22,5KN, αποφόρτιση ως την τιμή 0 και η τρίτη και τελευταία φόρτιση μέχρι τη θραύση της στην τιμή 32,5 KN.



Σχήμα 3-15: Αστοχία δοκού (ράβδος 14mm)



Σχήμα 3-16: Αστοχία δοκού (ράβδος 14mm)

## Κεφάλαιο 4

# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

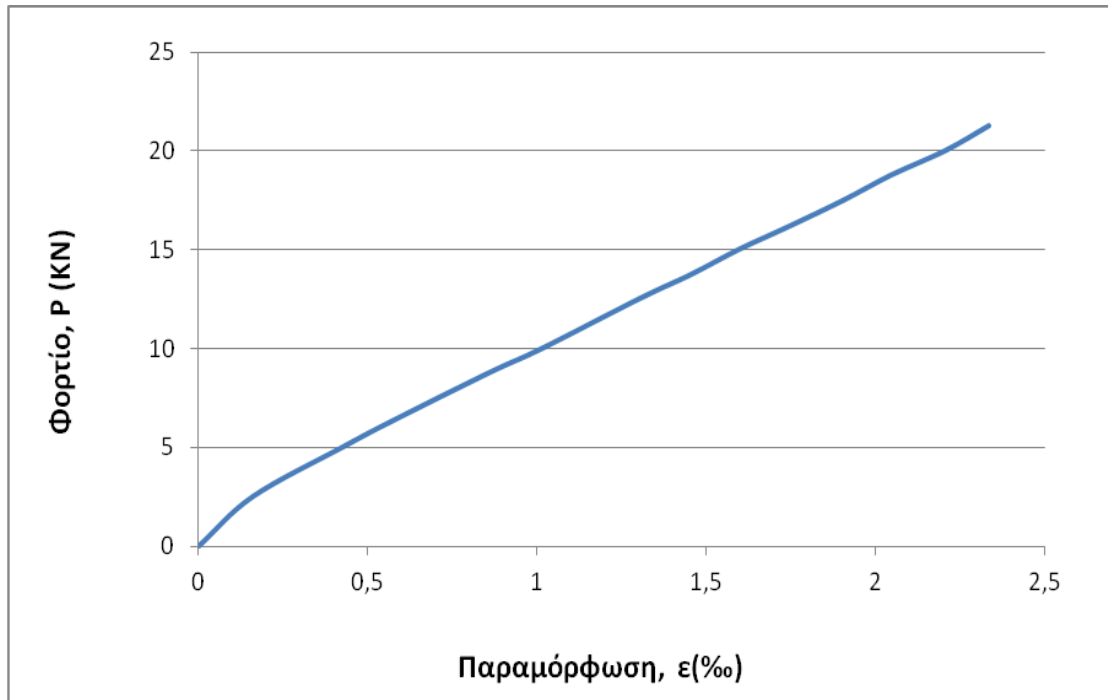
### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται η θεωρητική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων, που αποκτήθηκαν κατά την εκτέλεση του πειραματικού έργου, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Στο κεφάλαιο αυτό, θα κατασκευασθεί η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης με την διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2 καθώς και η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, που περιγράφει την συμπεριφορά της ράβδου οπλισμού. Επίσης, για την περίπτωση φόρτισης-αποφόρτισης, θα γίνει μια συζήτηση πάνω στη μορφή της καμπύλης τάσης συνάφειας-ολίσθησης σε σχέση με την κατάσταση διεπιφανειακής βλάβης.

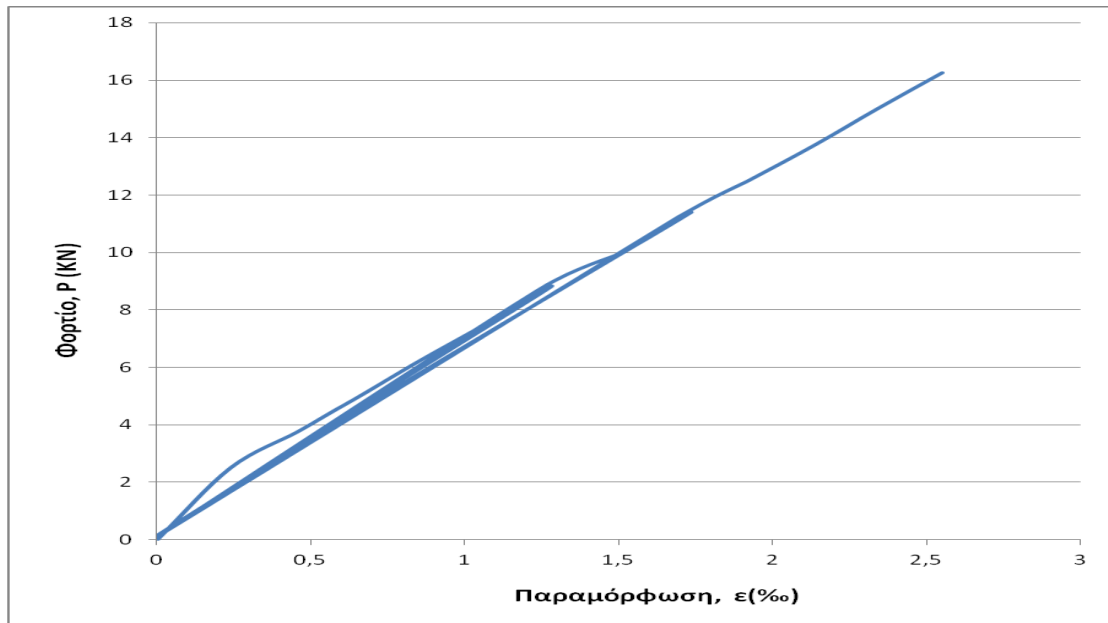
### 4.2 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ FRP

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δύο ράβδων οπλισμού GFRP στο μη εμπηγμένο τμήμα τους, δηλαδή σε αυτό που βρίσκεται μεταξύ των δυο τμημάτων τους, αντιπροσωπεύουν τον καταστατικό νόμο του υλικού FRP. Οι καμπύλες αυτές θα κατασκευασθούν από τις μετρήσεις της παραμόρφωσης που έχουν γίνει και βρίσκονται στον Πίνακα I-1 του Παραρτήματος I. Στα Σχήματα 4-1α και 4-1β δείχνονται οι καμπύλες της μετρηθείσας παραμόρφωσης  $\varepsilon_{f0}$  στο κέντρο του μη

εμπηγμένου τμήματος, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου  $P$  σε κάθε τμήμα της πειραματικής δοκού για την κάθε δοκό δοκίμιο .



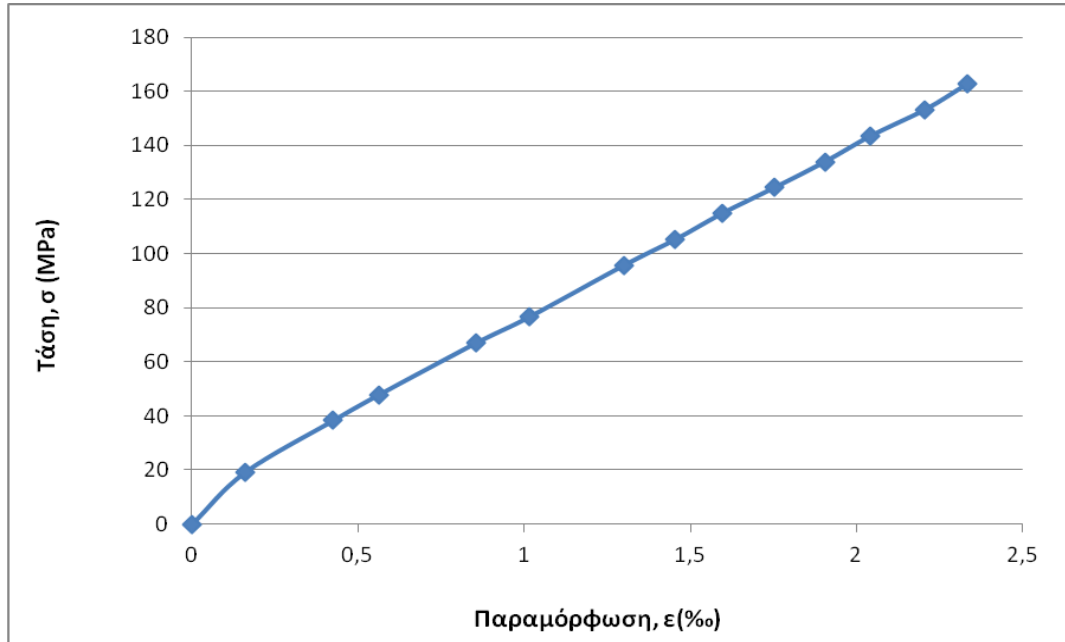
(α)



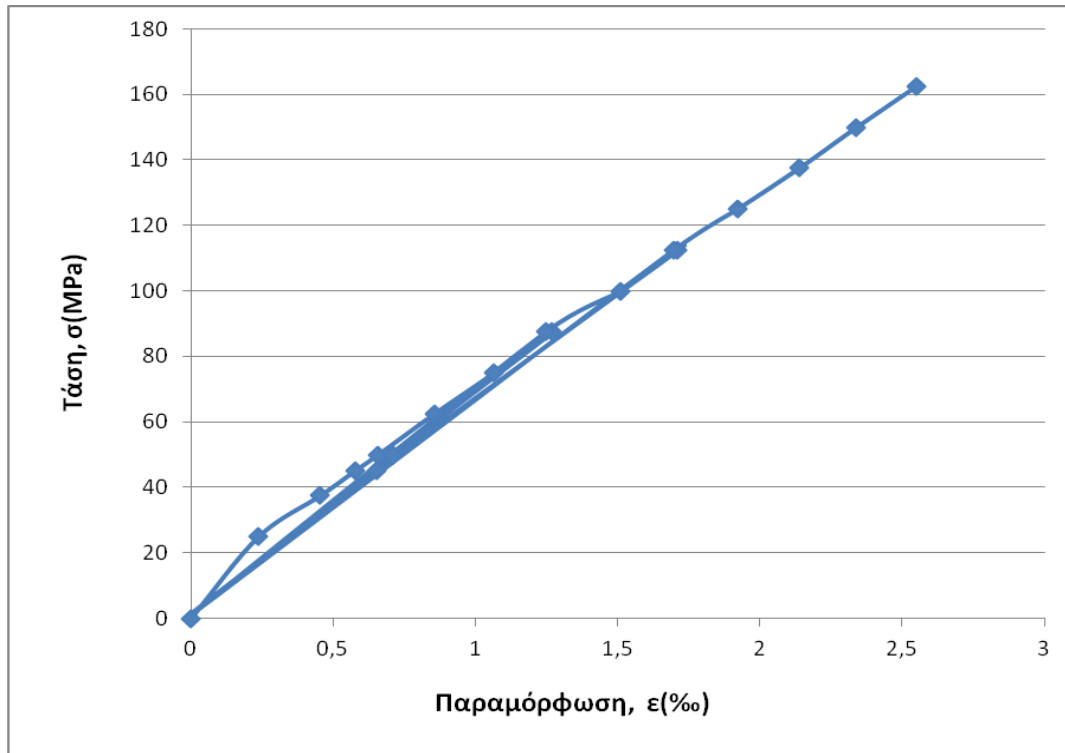
(β)

**Σχήμα 4-1:** Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης (α ράβδος 16 mm, β ράβδος 14 mm)

Στα διαγράμματα του Σχήματος 4-2 δείχνονται οι καμπύλες της παραμόρφωσης  $\epsilon_{f,0}$  συναρτήσει της ορθής τάσης που αναπτύσσεται στη ράβδο στο μη εμπηγμένο τμήμα της.



(α)



(β)

Σχήμα 4-2: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (α ράβδος 16 mm, β ράβδος 14 mm)



Η ορθή τάση  $\sigma$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$\sigma = \frac{Q}{A_f}, \quad (4.1)$$

όπου η  $Q$  υπολογίζεται από την σχέση (2.1) για  $l = 25,5 \text{ cm}$ ,  $L = 65,5 \text{ cm}$ ,  $l' = 105,5 \text{ cm}$ . Για τις ράβδους που έχουν χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο πείραμα οι διατομές έχουν διαμέτρους  $d_{f1} = 14 \text{ mm}$  και  $d_{f2} = 16$  εμβαδό

$$A_f = \frac{\pi 14^2}{4} = 153 \text{ mm}^2 \quad A_f = \frac{\pi 16^2}{4} = 200,96 \text{ mm}^2.$$

Οι τιμές των δυνάμεων  $Q$  και της ορθής τάσης  $\sigma$  που υπολογίζονται για κάθε μέτρηση καταχωρούνται στις στήλες 2 και 3 του Πίνακα I.2. Στη στήλη 1 καταχωρείται η δύναμη  $P$  που εξασκείται σε κάθε τμήμα της δοκού-δοκιμίου.

Οι τιμές της παραμόρφωσης της ράβδου  $\varepsilon_{f0}$  καταχωρούνται στη στήλη 4 του Πίνακα I.1.

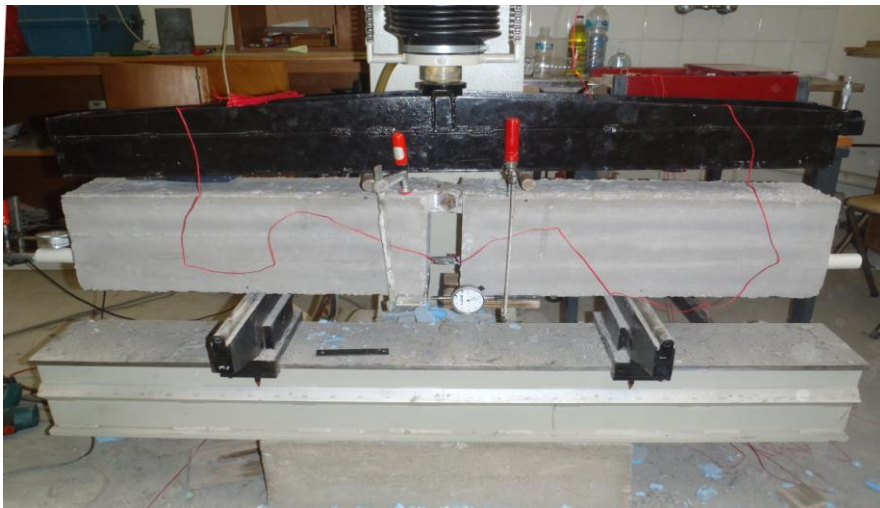
Το διάγραμμα αυτό αποτελεί πειραματικό προσδιορισμό του νόμου τάσης-παραμόρφωσης της ράβδου FRP για συγκεκριμένο εύρος τιμών των δυο αυτών μεγεθών. Επειδή λόγω της φύσης του πειράματος, η αγκύρωση της ράβδου αστοχεί πριν αστοχήσει η ίδια η ράβδος, δεν έχουμε τη δυνατότητα προσδιορισμού του νόμου αυτού για όλο το εύρος τιμών της παραμόρφωσης της ράβδου, δηλαδή μέχρι τη θραύση της.

Το διάγραμμα του Σχήματος 4-2 δείχνει ότι η συμπεριφορά της ράβδου οπλισμού FRP που χρησιμοποιείται στη δοκό-δοκίμιο είναι γραμμική και ότι οι κλάδοι φόρτισης και αποφόρτισης πρακτικά ταυτίζονται. Από την κλίση των διαγραμμάτων αυτών προκύπτουν τα μέτρα ελαστικότητας της κάθε ράβδου GFRP  $E_{f1} = 70 \text{ GPa}$  και  $E_{f2} = 65 \text{ GPa}$ . Η τιμές αυτές αποκλίνουν της ονομαστικής τιμής  $E_f = 46 \text{ GPa}$  που παρέχει η βιομηχανία που παράγει τις συγκεκριμένες ράβδους.

### 4.3 Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΜΟΝΟΤΟΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

#### 4.3.1 Η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης των στοιχείων σκυροδέματος της δοκού-δοκιμίου

Σε όλη τη διάρκεια επιβολής των δυνάμεων στη δοκό, καταγράφονται οι ενδείξεις του βελομέτρου, που τοποθετήθηκε μεταξύ των δύο στοιχείων του δοκιμίου, όπως δείχνεται στην εικόνα του Σχήματος 4-3.

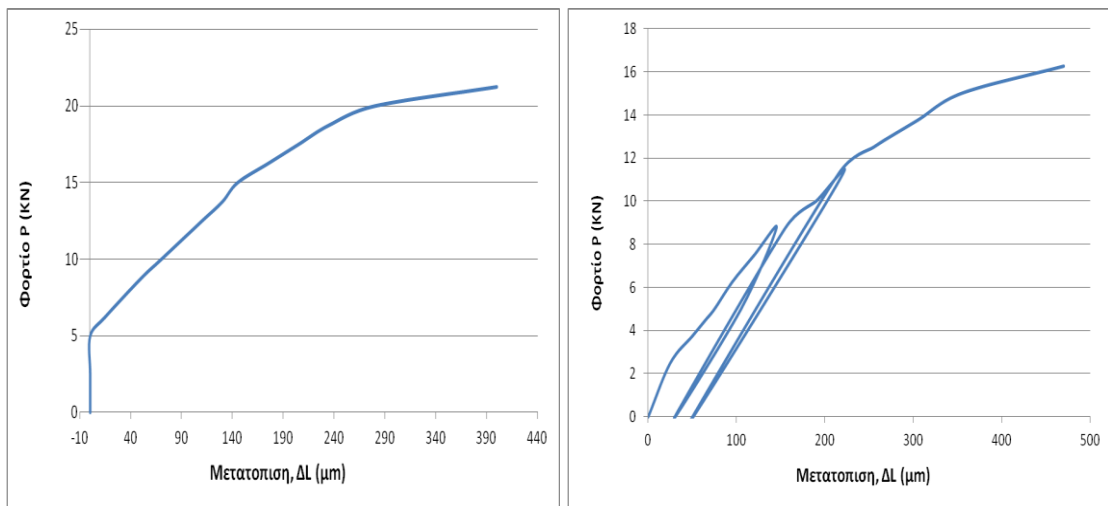


Σχήμα 4-3: Το δοκίμιο στη μηχανή κάμψης

Οι μετρήσεις αυτές αντιστοιχούν στη μεταβολή της απόστασης των δύο ορθογωνίων στοιχείων σκυροδέματος. Λόγω συμμετρίας της διάταξης, θεωρούμε ότι η μεταβολή αυτή οφείλεται σε ίση (κατ' απόλυτη τιμή) και αντίθετη μετατόπιση, για το κάθε στοιχείο χωριστά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, για μεγαλύτερη ακρίβεια, η μέτρηση γίνεται στο χαμηλότερο σημείο του δοκιμίου, που αντιστοιχεί στη μέγιστη απόσταση από τον άξονα περιστροφής της άρθρωσης, όπου η μεταβολή της απόστασης των δύο στοιχείων είναι η μέγιστη. Συγκεκριμένα, η αναλογία της απόστασης του κέντρου της διατομής της ράβδου και της απόστασης του χαμηλότερου σημείου του δοκιμίου είναι 13 προς 18. Καθώς η διατομή έχει ύψος 20

cm, ο άξονας περιστροφής της άρθρωσης βρίσκεται 2 cm χαμηλότερα από το ψηλότερο σημείο της διατομής της δοκού-δοκιμίου και η επικάλυψη είναι 5 cm. Η μεταβολή της απόστασης στο ύψος του κέντρου της διατομής της ράβδου, όπου γίνεται ο προσδιορισμός της ολίσθησης, υπολογίζεται παίρνοντας υπόψη την αναλογία 13/18. Οι τιμές των μετακινήσεων  $\Delta l_u$  για κάθε μέτρηση που έχει ληφθεί, ανηγμένη ως προς την θέση της ράβδου οπλισμού, έχουν καταχωρηθεί στη στήλη 6 του Πίνακα I.2 του Παραρτήματος I.

Μετά την αναγωγή των μετρήσεων, έχει σχηματιστεί μια ακολουθία τιμών  $\Delta l_u(t)$ ,  $P(t)$  ( για κάθε χρονική στιγμή καταγραφής  $t$ ). Στο διάγραμμα εισάγονται όλα τα ζεύγη τιμών  $\Delta l_u$ ,  $P$  με τετμημένη τη μετατόπιση και τεταγμένη το φορτίο. Έτσι σε κάθε χρονική στιγμή παρατήρησης αντιστοιχεί ένα σημείο ( $\Delta l_u$ ,  $P$ ) στο διάγραμμα. Η γραμμή που ενώνει τα σημεία είναι η ζητούμενη καμπύλη, η οποία ακολουθεί τη χρονική σειρά των μετρήσεων. Από την καμπύλη που σχηματίζεται γίνεται φανερό πότε έχουμε φόρτιση και πότε αποφόρτιση. Από το σύνολο των μετρήσεων προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.



**Σχήμα 4-4:** Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης (α ράβδος 16 mm, β ράβδος 14 mm)

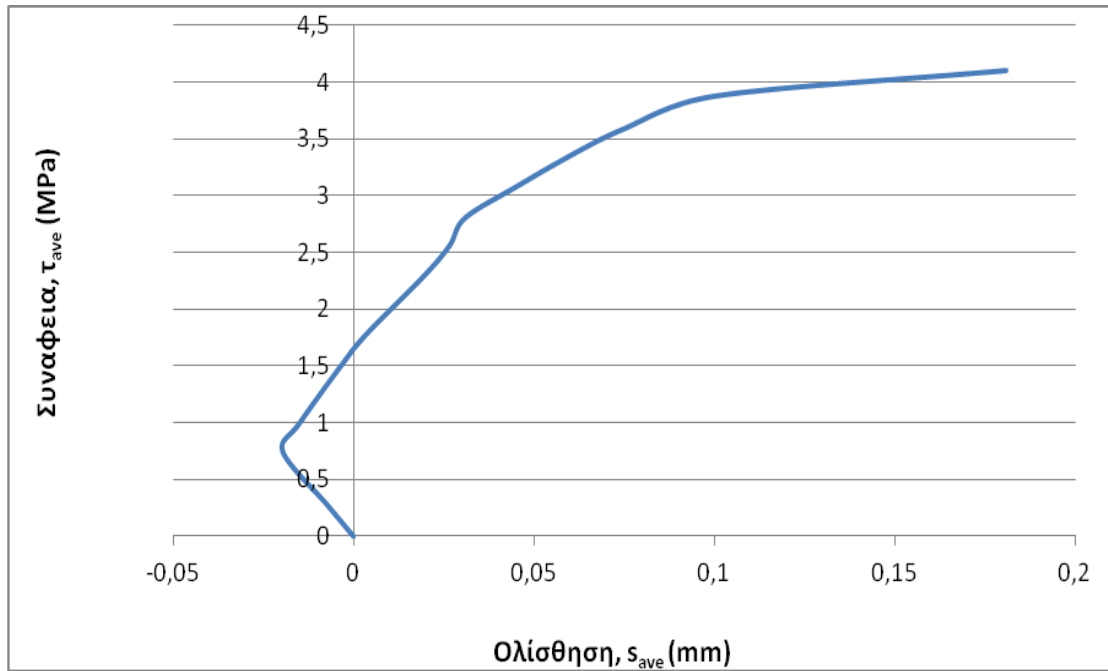
### 4.3.2 Η καμπύλη συνάφειας - ολίσθησης

Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης θα κατασκευασθεί με βάση όσα έχουν αναφερθεί στην ενότητα 2.2 και 2.3, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.9) και (2.17). Λόγω έλλειψης μετρήσεων στη θέση  $M$  της ράβδου, από τη θεώρηση της γραμμικής κατανομής της ορθής παραμόρφωσης της ράβδου στο εμπηγμένο τμήμα της, η τιμή αυτή έχει ληφθεί ίση με  $\varepsilon_M (= \frac{\varepsilon_{f,0}}{2})$ . Οι τιμές αυτές έχουν καταχωρηθεί στη στήλη 5 Πίνακα I.2. Από τις τιμές της στήλης 4 ( $\varepsilon = \varepsilon_{f,0}$ ), της στήλης 6 ( $\Delta l_u$ ) και για  $l_u = 5,5$  cm,  $l_b = 5$  cm, με τη σχέση (2.9) υπολογίστηκε, για κάθε μέτρηση η μέση ολίσθηση  $s_{ave}$ . Οι τιμές αυτές έχουν καταχωρηθεί στη στήλη  $s_{ave}$ .

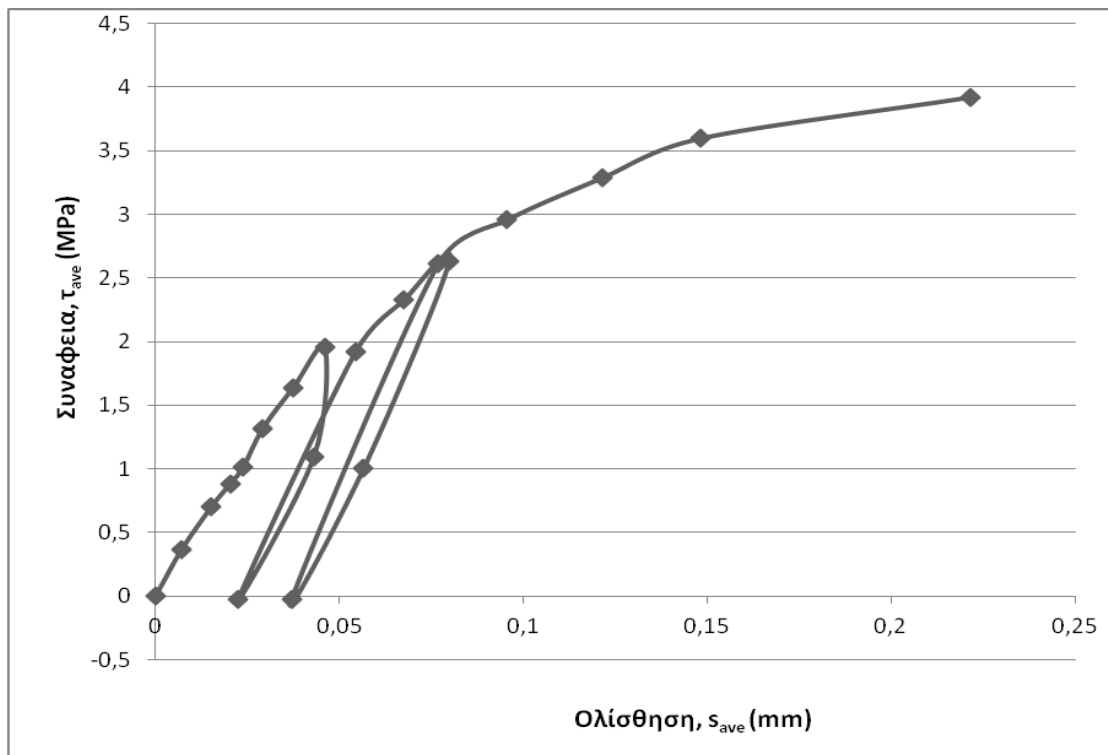
Η τάση συνάφειας  $\tau_{ave}$  υπολογίζεται από τη σχέση (2.17). Στη σχέση αυτή, η παραμόρφωση  $\varepsilon_{f,A}$  παίρνεται ίση με τις τιμές  $\varepsilon$  της κάθε μέτρησης που έχει καταχωρηθεί στη στήλη 4 του Πίνακα I.2,  $\varepsilon_f$ , ενώ η παραμόρφωση  $\varepsilon_{f,M}$  παίρνεται ίση με  $\frac{\varepsilon}{2}$ , με την παρατήρηση που έχει γίνει παραπάνω. Ο υπολογισμός της μέσης τάσης  $\tau_{ave}$  χρησιμοποιεί τις τιμές  $l_b = 5$  cm,  $d_{f1} = 16$  mm  $d_{f2} = 14$  mm και  $E_{f1} = 70$  GPa  $E_{f2} = 65$  GPa. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για κάθε μέτρηση έχουν καταχωρηθεί στη στήλη 8. Από τις τιμές των στηλών 7 και 8 του Πίνακα I.2 κατασκευάστηκε η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης που δείχνεται στο διάγραμμα 4-5.

Το διάγραμμα του σχήματος 4-5α αντιστοιχεί στην περίπτωση της ράβδου GFRP με διάμετρο 16 mm και το διάγραμμα του σχήματος 4-5β στη ράβδο με διάμετρο 14 mm. Και στις δύο περιπτώσεις η αστοχία των δοκιμίων προέκυψε με την δημιουργία ρωγμών γύρω από την περιοχή της ράβδου οπλισμού. Στην περίπτωση της ράβδου με διάμετρο 14 mm η μέγιστη τάση συνάφειας που παρατηρήθηκε ήταν περίπου  $\tau_{max} = 4$  MPa που αντιστοιχεί σε μια μέγιστη ολίσθηση  $s_{max} = 0.22$  mm. Στην περίπτωση της ράβδου με διάμετρο 16 mm, η μέγιστη τάση συνάφειας είναι  $\tau_{max} = 4,1$  MPa που αντιστοιχεί σε μια ολίσθηση  $s_{max} = 0.18$  mm. Στη δοκιμή της δοκού δοκιμίου με οπλισμό 14 mm έγιναν ενδιάμεσα δύο αποφορτίσεις χωρίς

αντιστροφή της φόρτισης. Στην πρώτη αποφόρτιση προέκυψε μία παραμένουσα ολίσθηση 0,022 mm, ενώ στην δεύτερη 0,037 mm.



(α)



(β)

Σχήμα 4-5: Καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης (α ράβδος 16 mm, β ράβδος 14 mm)

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι, και στις δύο αποφορτίσεις οι κλάδοι φόρτισης αποφόρτισης είναι σχεδόν παράλληλοι στο αρχικό τμήμα της καμπύλης, που είναι σχεδόν ευθύγραμμο. Αυτό που παρατηρείται στη δοκιμή αυτή είναι ότι, η συμπεριφορά της ράβδου είναι ανάλογη με τη συμπεριφορά της δοκιμής εφελκυσμού μιας ράβδου, όταν η αποφόρτιση της γίνει μετά το όριο διαρροής του υλικού.

## Κεφάλαιο 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στην εργασία αυτή κατασκευάστηκαν δύο δοκοί-δοκίμια για την εκτέλεση της δοκιμής δοκού, προκειμένου να προσδιορισθεί πειραματικά η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης μιας ράβδου FRP από γυαλί σε μονότονη φόρτιση.
- Οι δοκοί-δοκίμια έγιναν με σκυρόδεμα που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο, που είχε θλιπτική αντοχή 25,5 MPa και 15 MPa αντίστοιχα. Η θλιπτική αντοχή προσδιορίστηκε με τη μηχανή θλίψης του εργαστηρίου χρησιμοποιώντας κυβικά δοκίμια που λήφθηκαν κατά τη σκυροδέτηση της δοκού-δοκιμίου.
- Η δοκιμή δοκού εκτελέστηκε σύμφωνα με τις σχετικές προδιαγραφές πέντε μήνες από την κατασκευή των δοκιμίων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν είναι :

- Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων της κάθε ράβδου GFRP
- Η καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης της κάθε ράβδου GFRP

Το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων GFRP, που υπολογίστηκε, αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική τιμή, που παρέχει η εταιρία για τη συγκεκριμένη ράβδο.

Η πειραματική καμπύλη συνάφειας-ολίσθησης σε μονότονη φόρτιση, που προσδιορίστηκε, εμφανίζει τους χαρακτηριστικούς κλάδους, που έχουν προκύψει σε προηγούμενες σχετικές έρευνες του Εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής του ΕΜΠ.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

ACI Committee 440 XR, 2006, "Report on Fiber-reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", pp. 8-15, ACI 440.XR (to replace 440R), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

Alunno Rossetti V., Galeota D. και Giammatteo M.M., 1998, "Local bond stress-slip relationships of glass fibre reinforced plastic bars embedded in concrete", *Materials and Structures*, Vol. 48, No. 6, pp 340-344.

Al-Zahrani M. M., Nanni A., Al-Dulaijan S. U., Bakis C. E., 1996, "Bond of FRP to concrete in reinforcement rods with axisymmetric deformations," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M. M. El-Badry, Editor, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Quebec 1996, pp. 853-859.

Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H., and Triantafillou T. C., 2002, "Fiber Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review," *Journal of composites for construction*, pp.1-85.

Bedard Claude, 1992, "Composite Reinforcing Bars: Assessing their use in Construction," *Concrete International: Design and Construction*, V.14, No.1, pp. 55-59.

Brown V. L. and Bartholomew C., 1993, "FRP Reinforcing Bars in Reinforced Concrete Members," *ACI Materials Journal (American Concrete Industry)*, V.90, No.1, pp. 34-39.

Brown V. L, 1997, "Sustained Load Deflections in GFRP-Reinforced Concrete Beams," *Proceedings of the Third International Symposium on NonMetallic*



(FRP)Reinforcement for Concrete Structures V.2, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japan, pp. 495-470.

Choo C. C., 2005, "Investigation of Rectangular Concrete Columns Reinforced or Prestressed with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars or Tendons," University of Kentucky, pp. 20-30.

Curtis B. B., May 1997, "A Load-Deflection Study of Fiber Reinforced Plastics as Reinforcement in Concrete Bridge Decks", Master of Science in Civil Engineering, Blacksburg, Virginia. <http://www.acmanet.org/professionals/2005-Composites-IndustryStatistics.pdf>

Daniali S., 1992, "Development Length for Fibre-Reinforced Plastic Bars. Proceedings of the 1st International Conference of Advanced Composite Materials in Bridge & Structures," Sherbrooke, Quebec, Canada.

Faoro M., 1996, "The Influence of Stiffness and bond of FRP Bars and Tendons on the Structural Behaviour of Reinforced Concrete members," Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 2nd International Conference, Montreal, Quebec, Canada, August 11-14, 1996, pp. 885-892.

Filippou, F.C, 1986, "A Simple Model For Reinforcing Bar Anchorages Under Cyclic Excitations," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 7, July 1986, pp.1639-1659.

Filippou, F.C., Popov, E.P., Bertero, V.V., 1983, "Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints," Report No, UCB/EERC33-19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, Aug. 1983a.

International Federation for Structural Concrete (fib), 2000, "Bond of reinforcement in concrete State-of-Art Report",

Karbhari V. M., Seible F., Burgueno R., Davol A., Wernli M., and Zhao L., 2000, "Structural characterization of fiber-reinforced composite short and medium-span bridge systems", *Appl. Compos. Mater.*, 7(2) pp. 151–182.

Καρατζαφέρης Βασίλειος, 2009, «Ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων σκυροδέματος οπλισμένων με σύνθετες ράβδους», Διδακτορική διατριβή.

Katz A., Berman N. and Bank L.C., 1999, "Effect of High Temperature on the Bond Strength of FRP Rebars", *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 3, No. 2, pp. 73-81

Khalifa A., Gold W. J, Nanni A., and Aziz A., 1998, "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members", *Journal of composites for construction* V.2, No.4, pp.195-202.7

Machida A., 1993, "Second Research Committee on CFRM," Japan Society of Civil Engineers, State-of the Art Report on Continuous Fibre Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series 3, Tokyo, October 1993, pp. 15-26.

Micelli, F. and A. Nanni, 2001, "Issues Related to Durability of FRP Reinforcement for RC Structures Exposed to Accelerated Ageing Tests", ASC 16<sup>th</sup> Annual Conference -Virginia Tech, Blacksburg, VA, Sept. 9-12, 2001, M.W. Hyer and A.C. Loos, Eds.,Paper 056, 12 pp.

Mirmiran A., Naguib W., and Shahawy M., 2000, "Principles and analysis of concrete-filled composite tubes", *J. Adv. Mater.*, 32(4) pp. 16–23.

Shima, H., Suga, T. and Honma M.: "Local bond stress-slip relationship of continuous fiber reinforcing materials obtained by pull bond tests with long embedment," *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol.15, 1993, pp.297-304

Tastani S. and Pantazopoulou S.J., 2001, “Experimental investigation of GFRP-bar anchorages in concrete,” Proceedings of the CCC 2001 conference of composites in construction, Porto-Portugal, Oct. 2001, pp. 193-198.

Tepfers R., Molander I., Thalenius K., 1992, “Experience from testing of concrete reinforced with carbon and aramid fibre strands,” XIV, Nordic Concrete Congress & Nordic Concrete Industry Meeting, 6-8 August 1992, Icelandic Concrete Association, Reykjavik. pp. 337-347.

Τριανταφύλλου Αθανάσιος Χ., 2006 , “Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά,” Κεφ 2 και 10.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

### Ι.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Πίνακας Ι-1: Καταγραφή μετρήσεων (α) διάμετρος 16 mm, (β) διάμετρος 14 mm

(α)

1	2	3
2P [KN]	Βελόμετρο 1 [μm]	$\epsilon_{f,0}$ [ppm]
0	500	0
5	500	0,159
10	500	0,424
12,5	470	0,562
17,5	400	0,855
20	360	1,014
25	280	1,3
27,5	240	1,455
30	210	1,595
32,5	150	1,753
35	90	1,905
37,5	30	2,043
40	-60	2,205
42,5	-300	2,333

(β)

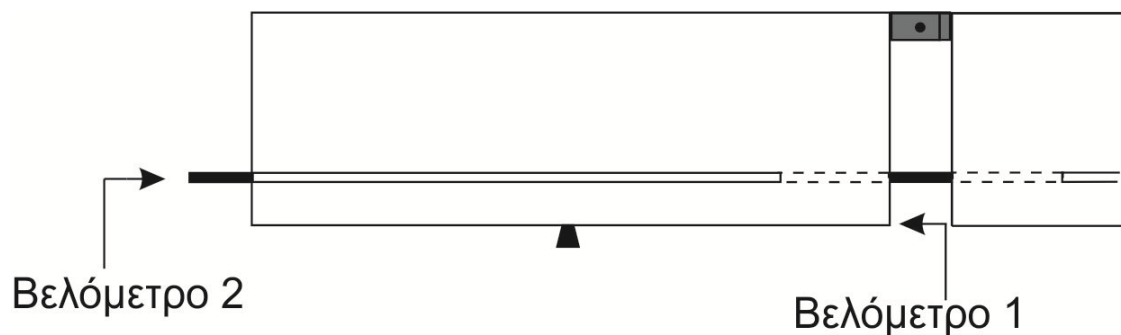
1	2	3	4	
2P [KN]	Βελόμετρο 1 [μm]	Βελόμετρο 2 [μm]	$\epsilon_{f,0}^{(1)}$ [ppm]	$\epsilon_{f,0}^{(2)}$ [ppm]
0	17000	2540	0	0
5	16950	2540	0,218	0,257
7,5	16900	2540	0,418	0,49
9	16870	2540	0,53	0,62
10	16850	2540	0,605	0,71
12,5	16810	2540	0,79	0,92
15	16760	2540	0,99	1,14
17,5	16710	2550	1,18	1,36
10	16790	2550	0,66	0,76
0	16940	2550	-0,028	-0,005
17,5	16690	2550	1,152	1,34
20	16620	2560	1,4	1,62
22,5	16560	2560	1,58	1,84
9	16760	2560	0,583	0,719
0	16900	2555	-0,04	0,005
22,5	16570	2570	1,57	1,821
25	16490	2570	1,763	2,076
27,5	16390	2580	1,962	2,311
30	16290	2590	2,153	2,523
32,5	16060	2640	2,334	2,762

Στην στήλη 1 έχουν καταχωρηθεί οι τιμές της συνολικής επιβαλλόμενης δύναμης της μηχανής 2P σε KN.

Στην στήλη 2 έχουν καταχωρηθεί οι ενδείξεις του βελομέτρου 1 σε  $\mu\text{m}$  (Σχήμα I-1).

Στην στήλη 3 έχουν καταχωρηθεί οι ενδείξεις του βελομέτρου 2 σε  $\mu\text{m}$  (Σχήμα I-1).

Στην στήλη 4 έχουν καταχωρηθεί οι παραμορφώσεις των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων στις θέσεις 1 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα Ι-1: Οι θέσεις των ληφθεισών μετρήσεων

## Ι.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πίνακας Ι-2: Αποτελέσματα υπολογισμού μεγεθών: (α) διάμετρος 16 mm, (β) διάμετρος 14 mm

(α)

1	2	3	4	5	6	7	8
P [kN]	Q [kN]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [‰]	$\epsilon_M$ [‰]	$\Delta l_u$ [mm]	s [mm]	$\tau$ [MPa]
0	0	0	0	0	0	0	0
2,5	3,846154	19,1389	0,159	0,0795	0	-0,00735	0,27984
5	7,692308	38,2778	0,424	0,212	0	-0,01961	0,74624
6,25	9,615385	47,84726	0,562	0,281	0,010833	-0,01516	0,98912
8,75	13,46154	66,98616	0,855	0,4275	0,036111	-0,00343	1,5048
10	15,38462	76,55561	1,014	0,507	0,050556	0,003658	1,78464
12,5	19,23077	95,69451	1,3	0,65	0,079444	0,019319	2,288
13,75	21,15385	105,264	1,455	0,7275	0,093889	0,026595	2,5608
15	23,07692	114,8334	1,595	0,7975	0,104722	0,030953	2,8072
16,25	25	124,4029	1,753	0,8765	0,126389	0,045313	3,08528

17,5	26,92308	133,9723	1,905	0,9525	0,148056	0,059949	3,3528
18,75	28,84615	143,5418	2,043	1,0215	0,169722	0,075233	3,59568
20	30,76923	153,1112	2,205	1,1025	0,202222	0,100241	3,8808
21,25	32,69231	162,6807	2,333	1,1665	0,288889	0,180988	4,10608

(β)

1	2	3	4	5	6	7	8
P [KN]	Q [KN]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [‰]	$\epsilon_M$ [‰]	$\Delta l_u$ [mm]	s [mm]	$\tau$ [MPa]
0	0	0	0	0	0	0	0
2,5	3,846154	24,99775	0,2375	0,11875	0,018056	0,007071	0,36575
3,75	5,769231	37,49663	0,454	0,227	0,036111	0,015114	0,69916
4,5	6,923077	44,99595	0,575	0,2875	0,046944	0,020351	0,8855
5	7,692308	49,9955	0,6575	0,32875	0,054167	0,023757	1,01255
6,25	9,615385	62,49438	0,855	0,4275	0,068611	0,029067	1,3167
7,5	11,53846	74,99325	1,065	0,5325	0,086667	0,03741	1,6401
8,75	13,46154	87,49213	1,27	0,635	0,104722	0,045985	1,9558
5	7,692308	49,9955	0,71	0,355	0,075833	0,042996	1,0934
0	0	0	-0,0165	-0,00825	0,021667	0,02243	-0,02541
8,75	13,46154	87,49213	1,246	0,623	0,111944	0,054317	1,91884
10	15,38462	99,991	1,51	0,755	0,137222	0,067385	2,3254
11,25	17,30769	112,4899	1,71	0,855	0,158889	0,079801	2,6334
4,5	6,923077	44,99595	0,651	0,3255	0,086667	0,056558	1,00254
0	0	0	-0,0175	-0,00875	0,036111	0,03692	-0,02695
11,25	17,30769	112,4899	1,6955	0,84775	0,155278	0,076861	2,61107
12,5	19,23077	124,9888	1,9195	0,95975	0,184167	0,09539	2,95603
13,75	21,15385	137,4876	2,1365	1,06825	0,220278	0,121465	3,29021
15	23,07692	149,9865	2,338	1,169	0,256389	0,148256	3,60052
16,25	25	162,4854	2,548	1,274	0,339444	0,221599	3,92392