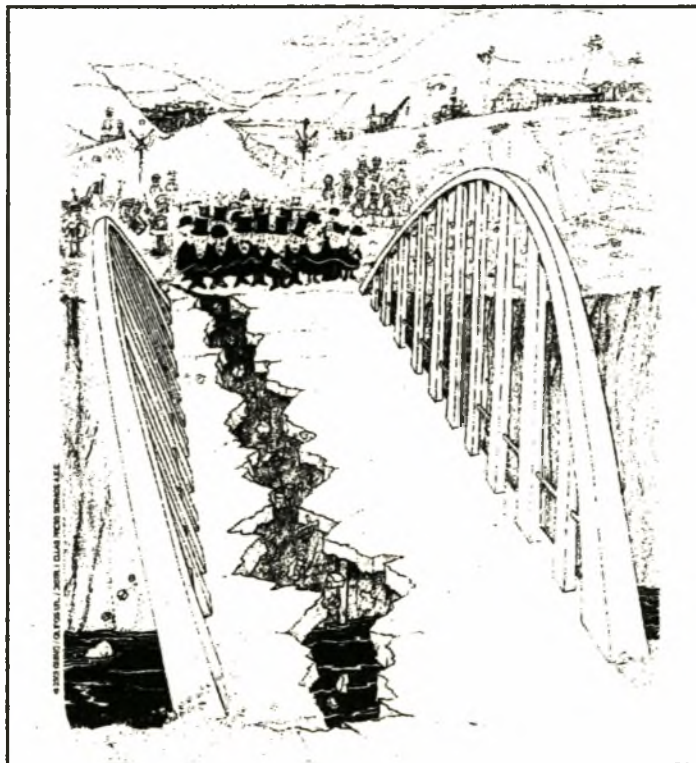




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## «ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ»



### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όνομα φοιτητή: ΕΛΕΝΗ ΦΛΑΣΚΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. ΜΙΧΑΗΛ ΠΕΤΡΟΥ

Επιτροπή:

Δρ. ΜΠΑΞΕΒΑΝΗ Ε.

Δρ. ΠΕΡΔΙΚΑΡΗΣ Φ.

Δρ. ΠΕΤΡΟΥ Μ.



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

Αριθ. Εισ.: 2411/1

Ημερ. Εισ.: 09-03-2004

Δωρεά: \_\_\_\_\_

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΠΜ

2003

ΦΛΑ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072545

## *Ευχαριστίες*

*Ευχαριστώ θερμά τον κ. Πέτρου Μιχάλη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τη συνεχή επιστημονική και ηθική υποστήριξη του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ για τις εύστοχες παρατηρήσεις, διορθώσεις και συμβουλές του, οι οποίες υπήρξαν καθοριστικές για την βελτίωση αυτού του συγγράμματος αλλά και για τις απαραίτητες γνώσεις που μου μετέφερε στο αντικείμενο που διαπραγματεύεται η παρούσα εργασία.*

*Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή του τμήματος και μέλος της επιτροπής κ. Περδικάρη Φίλιππο για τις συμβουλές και το ενδιαφέρον που επέδειξε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς και την διδάσκουσα του τμήματος και μέλος της επιτροπής κ. Μπαξεβάνη Ελένη για τις παρατηρήσεις της.*

*Αισθάνομαι την ανάγκη, στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω και όλους τους καθηγητές μου, για το υψηλό επίπεδο γνώσεων που προσφέρουν στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και για την προσπάθεια που καταβάλουν να διαμορφώσουν μηχανικούς με ψυχή και πνεύμα.*

*Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υπομονή και την απέραντη συμπαράσταση.*

*... στον θείο μου Βασίλη*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετάται η ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers). Συγκεκριμένα ερευνούνται τρεις διαφορετικοί τρόποι ενίσχυσης δοκών με σύνθετα υλικά και προκύπτουν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία κάθε μεθόδου. Οι μέθοδοι εφαρμογής των ινοπλισμένων πολυμερών περιγράφονται παρακάτω :

1. Εξωτερικά επικολλούμενα ινοπλισμένα πολυμερή στο υπό ενίσχυση πέλαμα του στοιχείου, με χρήση ρητίνης (Conventional Adhesive Applied FRP's).
2. Τοποθέτηση και επικόλληση των ινοπλισμένων πολυμερών κατακόρυφα σε εγκοπές που κατασκευάζονται στο υπό ενίσχυση πέλαμα του στοιχείου, με χρήση ρητίνης.( Near Surface Mount FRP applications)
3. Εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών στο υπό ενίσχυση πέλαμα του στοιχείου μέσω ήλων.( Powder-Actuated Fastened FRP applications)

Η εργασία βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα και στην σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση προγραμμάτων πρόβλεψης για κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Συγκεκριμένα εξετάζεται η καμπτική συμπεριφορά υποοπλισμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος μετά την ενίσχυση τους, όταν η διατμητική αστοχία δεν είναι η κρίσιμη πριν και μετά την καμπτική ενίσχυση.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι και τα τρία συστήματα ενίσχυσης προσφέρουν αύξηση της καμπτικής αντοχής σε ποσοστό περίπου 30% . Περισσότερο αποτελεσματική μέθοδος ενίσχυσης στην αύξηση της καμπτικής αντοχής και την απόδοση της αγκύρωσης του εξωτερικού οπλισμού αποδείχθηκε η δεύτερη μέθοδος ενίσχυσης (NSM), ενώ



περισσότερο αποδοτική όσο αφορά την πλαστιμότητα της ενισχυμένης δοκού η τρίτη μέθοδος ενίσχυσης (PAF). Κατά την σύγκριση των πειραματικών και προβλεπόμενων αποτελεσμάτων προκύπτουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και άρα οι εξεταζόμενες μέθοδοι ενίσχυσης και τα μοντέλα πρόβλεψης χαρακτηρίζονται αξιόπιστα.

Η διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος, κ. Πέτρου Μιχαήλ.



## ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

- $b$  : πλάτος ορθογωνικής διατομής δοκού
- $b_{pl}, b_b$  : πλάτος ελάσματος ινοπλισμένου πολυμερούς
- $d_1, d_s$  : στατικό ύψος εφελκυσμένου σπλισμού
- $d_{pl}$  : στατικό ύψος ινοπλισμένου πολυμερούς
- $F_c$  : δύναμη θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος
- $f_{ck}$  : χαρακτηριστική θλιπτική τάση σκυροδέματος
- $f_{crack}$  : εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
- $F_{ct}$  : εφελκυστική δύναμη σκυροδέματος
- $f_{ctm}$  : μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
- $F_{pl}$  : δύναμη ινοπλισμένου πολυμερούς
- $F_s$  : δύναμη χάλυβα
- $f_{yk}$  : χαρακτηριστική τάση διαρροής χάλυβα
- $h$  : ύψος ορθογωνικής διατομής δοκού
- $L$  : στατικό μήκος δοκού
- $L_{pl}, L_b$  : μήκος ινοπλισμένου πολυμερούς
- $n_{pl}$  : λόγος  $E_{pl} / E_c$
- $n_s$  : λόγος  $E_s / E_c$
- $t_{pl}$  : πάχος ελάσματος ινοπλισμένου πολυμερούς



$x$	: ύψος θλιβόμενης ζώνης
$A_{pl}$	: εμβαδόν διατομής οπλισμού ενίσχυσης
$A_s$	: εμβαδόν διατομής διαμήκους οπλισμού
$\delta$	: ολίσθηση
$\Delta, f$	: βέλος κάμψης
$\epsilon_c$	: θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος
$E_c$	: μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος
$\epsilon_{crack}$	: οριακή ανηγμένη παραμόρφωση ρηγμάτωσης σκυροδέματος
$\epsilon_{ct}$	: εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος
$\epsilon_{pl}$	: ανηγμένη παραμόρφωση ινοπλισμένου πολυμερούς
$E_{pl}$	: μέτρο ελαστικότητας ινοπλισμένου πολυμερούς
$E_s$	: μέτρο ελαστικότητας χάλυβα
$\Theta$	: στροφή διατομής
$I$	: ροπή αδράνειας
$M_{crack}$	: ροπή ρηγμάτωσης ενισχυμένης δοκού
$M_n$	: ροπή αστοχίας ενισχυμένης δοκού
$M_{yield}$	: ροπή διαρροής ενισχυμένης δοκού
$\sigma_c$	: θλιπτική τάση σκυροδέματος
$\sigma_{ct}$	: εφελκυστική τάση σκυροδέματος
$\sigma_{pl}$	: εφελκυστική τάση ινοπλισμένου πολυμερούς
$\sigma_s$	: εφελκυστική τάση χάλυβα
$\sigma_y(x)$	: ορθές τάσεις διεπιφάνειας σκυροδέματος-συστήματος FRP
$\tau(x)$	: διατμητικές τάσεις διεπιφάνειας σκυροδέματος-συστήματος FRP
$\tau_a(x)$	: τάσεις συνάφειας





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	I
ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΣΗΜΑΣΙΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	V
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Παραδοσιακές Μέθοδοι Επεμβάσεων σε Δοκούς.....	2
<u>1.2.1 Επισκευές με κόλλες ή επισκευαστικά κονιάματα.....</u>	<u>2</u>
<u>1.2.2 Τοπικές αποκαταστάσεις ίσης διατομής.....</u>	<u>2</u>
<u>1.2.3 Καμπτική ενίσχυση με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος.....</u>	<u>3</u>
<u>1.2.4 Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά φύλλα από χάλυβα (steel plates).....</u>	<u>5</u>
<u>1.2.5 Καμπτική ενίσχυση με χρήση σύνθετων υλικών (FRP).....</u>	<u>5</u>
1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας.....	5
<b>2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....</b>	<b>8</b>
2.1 Σύσταση Ινοπλισμένων Πολυμερών.....	8
2.2 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα Ινοπλισμένων Πολυμερών.....	9
2.3 Μηχανικές Ιδιότητες.....	9
<u>2.3.1 Τύπος Ινών.....</u>	<u>9</u>
<u>2.3.2 Ογκομετρικό Ποσοστό Ινών:.....</u>	<u>10</u>
<u>2.3.3 Τελικό Προϊόν.....</u>	<u>10</u>
2.3.3.1 <i>Ράβδοι Σύνθετου Οπλισμού.....</i>	<i>11</i>



2.3.3.2	<i>Ελάσματα, Ταινίες, Ινουφάσματα</i>	11
2.3.3.2.1	<i>Συστήματα Υγρής Εφαρμογής</i>	12
2.3.3.2.2	<i>Προκατασκευασμένα Υλικά</i>	12
2.3.4	<i>Ιδιότητες Κόλλας</i>	13
2.4	<i>Ανθεκτικότητα Ινοπλισμένων Πολυμερών</i>	14
2.4.1	<i>Θερμοκρασία</i>	14
2.4.2	<i>Υγρασία</i>	14
2.4.3	<i>Υπεριώδης Ακτινοβολία</i>	15
2.4.4	<i>Γαλβανική διάβρωση</i>	15
2.4.5	<i>Κόπωση, Ερπυσμός</i>	15
2.5	<i>Πειραματικά Δεδομένα από την Διεθνή Βιβλιογραφία</i>	15
2.5.1	<i>Επικολλούμενα σύνθετα υλικά με εποξειδική ρητίνη (Conventional Adhesive Applied FRP's)</i>	15
2.5.1.1	<i>Ritchie, Thomas, Lu and Connelly (1991)</i>	16
2.5.1.2	<i>Takeda, Mitsui, Murakami, Sakai, and Nakamura (1996)</i>	22
2.5.1.3	<i>Fanning and Kelly (2001)</i>	24
2.5.1.4	<i>Stalling, Tedesco, El-Mihilmy, McCauley (2000)</i>	28
2.5.1.5	<i>Hag-Elsafi, Alampalli, and Kunin (2001)</i>	29
2.5.2	<i>Τοποθέτηση και επικόλληση σύνθετων υλικών, μέσω ρητίνης, σε εγκοπές (NSM FRP applications)</i>	31
2.5.2.1	<i>Taljsten (2002)</i>	31
2.5.2.2	<i>De Lorenzis, Micelli, and La Tegola (2002)</i>	33
2.5.2.3	<i>Korff and Scherer (2002)</i>	34
2.5.2.4	<i>Taljsten (2002)</i>	36
2.5.3	<i>Εφαρμογή σύνθετων υλικών μέσω ήλων (Powder-Actuated Fastened FRP applications)</i>	36
2.5.3.1	<i>Ray, Scott, Lamanna, and Bank (2000)</i>	37
2.5.3.2	<i>Borowicz (2002)</i>	39
2.6	<i>Μοντέλα Αστοχίας Ενισχυμένων Δοκών με Ινοπλισμένα Πολυμερή</i>	44



<b>2.6.1 1<sup>ο</sup> Τύπος Αστοχιών</b> .....	<b>44</b>
2.6.1.1 Διαρροή του χάλυβα ακολουθούμενη από αστοχία του FRP ...	44
2.6.1.2 Διαρροή του χάλυβα ακολουθούμενη από συντριβή του σκυροδέματος:..	
.....	44
2.6.1.3 Σύνθλιψη σκυροδέματος πριν τη διαρροή του χάλυβα.....	45
2.6.1.4 Διατμητική αστοχία .....	45
2.6.1.5 Αστοχία από υπερβολικό βέλος κάμψης .....	45
<b>2.6.2 2<sup>ο</sup> Τύπος Αστοχιών</b> .....	<b>46</b>
2.6.2.1 Εξωτερικά επικολλούμενα FRP's μέσω ρητίνης .....	46
2.6.2.1.1 Απώλεια συνάφειας στο πέρας του FRP:	47
2.6.2.1.2 Απώλεια συνάφειας στο μέσο του ανοίγματος:	48
2.6.2.2 Τοποθέτηση και επικόλληση του FRP μέσα σε εγκοπές μέσω ρητίνης ...	
.....	50
2.6.2.2.1 Αποκόλληση του FRP(μια σειρά)	50
2.6.2.2.2 Αποκόλληση του FRP (περισσότερες από μία σειρές)	50
2.6.2.3 Εφαρμογή του FRP εξωτερικά στο πέλμα, μέσω ήλων	51
2.6.2.3.1 Διατμητική αστοχία ήλων(ψαλιδισμός)	51
2.6.2.3.2 Εφελκυστική αστοχία ήλων (εξόλκευση)	52
2.6.2.3.3 Κόπωση	52
<b>3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ</b> .....	<b>53</b>
3.1 Περιγραφή δοκιμών .....	53
3.2 Διαδικασία Ενίσχυσης των Δοκών .....	57
3.2.1 Εξωτερικά επικολλούμενα ελάσματα από FRP μέσω εποξειδικής ρητίνης	58
3.2.2 Τοποθέτηση και επικόλληση FRP σε εγκοπές μέσω ρητίνης.....	62
3.2.3 Εφαρμογή FRP μέσω ήλων.....	64
3.3 Ονομασία δοκιμών.....	65
3.4 Προετοιμασία πειράματος .....	66
3.5 Πειραματικά αποτελέσματα.....	68



<u>3.5.1 Δοκίμιο U-S:</u>	<u>71</u>
<u>3.5.2 Δοκίμιο C-S:</u>	<u>72</u>
<u>3.5.3 Δοκίμιο N-S:</u>	<u>74</u>
<u>3.5.4 Δοκίμιο P - S</u>	<u>76</u>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>-

### ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΩΝ ..... 78

4.1 Διαγράμματα Τάσεων - Παραμορφώσεων .....	78
<u>4.1.1 Σκυρόδεμα .....</u>	<u>79</u>
4.1.1.1 <i>Θλιπτική Δύναμη Σκυροδέματος</i>	79
4.1.1.2 <i>Εφελκυστική Δύναμη Σκυροδέματος</i>	81
<u>4.1.2 Χάλυβας .....</u>	<u>82</u>
<u>4.1.3 Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP).....</u>	<u>84</u>
4.2 Εξισώσεις Σχεδιασμού.....	85
<u>4.2.1 Υπολογισμός Θλιβόμενης Ζώνης.....</u>	<u>85</u>
<u>4.2.2 Σημείο Εφαρμογής Δυνάμεων .....</u>	<u>87</u>
4.2.2.1 <i>Θλιπτική δύναμη Σκυροδέματος :</i>	87
4.2.2.2 <i>Εφελκυστική Δύναμη Σκυροδέματος:</i>	89
4.2.2.3 <i>Δύναμη Εφελκυσμένου Χάλυβα / Ινοπλισμένου Πολυμερούς</i>	89
<u>4.2.3 Υπολογισμός Ροπής Κάμψης .....</u>	<u>90</u>
4.2.3.1 <i>Υπολογισμός Ροπής Ρηγμάτωσης:</i>	90
4.2.3.2 <i>Υπολογισμός Ροπής Διαρροής :</i>	91
4.3 Πρόβλεψη Καμπτικής Συμπεριφοράς Δοκών .....	91
<u>4.3.1 Υπολογισμός Στροφής Διατομής <math>\theta</math> .....</u>	<u>91</u>
<u>4.3.2 Υπολογισμός Βέλους Κάμψης <math>\Delta</math>.....</u>	<u>92</u>
4.3.2.1 <i>Απλοποιητικός Τύπος :</i>	92
4.3.2.2 <i>Αναλυτικός Τύπος :</i>	94
<u>4.3.3 Υπολογισμός Φορτίου P .....</u>	<u>97</u>
<u>4.3.4 Κατασκευή Διαγραμμάτων M -<math>\theta</math> και P - <math>\Delta</math> .....</u>	<u>97</u>



4.4 Υπολογισμός Ροπής Αδράνειας .....	99
4.4.1 1 <sup>ος</sup> Τρόπος Υπολογισμού, με Βάση τη Στροφή $\theta$ της Διατομής	99
4.4.2 2 <sup>ος</sup> Τρόπος Υπολογισμού, Μέσω Ισοδύναμης Διατομής Σκυροδέματος	100
4.4.3 3 <sup>ος</sup> τρόπος υπολογισμού, με βάση τον ACI .....	102
4.4.4 4 <sup>ος</sup> Τρόπος Υπολογισμού, με Βάση τον Αναλυτικό Τύπο του Βέλους Κάμψης	103
4.4.5 Συγκριτικά Διαγράμματα I - M .....	104
4.5 Πρόβλεψη Διατμητικής Συμπεριφοράς Δοκού.....	107
4.6 Πρόβλεψη Άλλων Μορφών Αστοχίας .....	108
4.6.1 Μέθοδος ενίσχυσης CAA: .....	108
4.6.1.1 Αποκόλληση του FRP στο πέρας του	109
4.6.1.2 Αποκόλληση του FRP στην κρίσιμη περιοχή	111
4.6.1.3 Αποκόλληση FRP σε τυχαία διατομή	112
4.6.1.4 Υπολογισμός διατμητικών τάσεων αντοχής	113
4.6.2 Μέθοδος ενίσχυσης NSM .....	115
4.6.3 Μέθοδος Ενίσχυσης PAF .....	115
4.7 Αποτελέσματα Προγράμματος Πρόβλεψης .....	116
4.7.1 Μη Ενισχυμένη Δοκός U - S.....	116
4.7.2 Ενισχυμένη δοκός C-S .....	120
4.7.3 Ενισχυμένη δοκός N-S.....	125
4.7.4 Ενισχυμένη δοκός P -S: .....	126
4.8 Σχόλια - συμπεράσματα .....	132
4.9 Παραμετρική Ανάλυση.....	134
4.9.1 Ινοπλισμένο Πολυμερές.....	134
4.9.1.1 Είδος Οπλισμού Ενίσχυσης.....	135
4.9.1.2 Ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης.....	136
4.9.1.3 Συμπεράσματα.....	138
4.9.2 Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής.....	139



4.9.2.1 Συγκριτικά Αποτελέσματα.....	139
4.9.2.2 Συμπεράσματα.....	140
4.9.3 Εσωτερικός Οπλισμός.....	141
4.9.3.1 Συγκριτικά αποτελέσματα.....	142
4.9.3.2 Συμπεράσματα.....	142
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>143</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>147</b>



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### « ΕΙΣΑΓΩΓΗ »

#### 1.1 Γενικά

Το πεδίο των επεμβάσεων σε υφιστάμενες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, έχει αρχίσει να απασχολεί ιδιαίτερα τον τεχνικό κόσμο, για λόγους που σχετίζονται κυρίως με την απομένουσα σεισμική ικανότητα μιας κατασκευής και τις βλάβες που έχει υποστεί, κυρίως σε μια ιδιαίτερα σεισμική χώρα όπως η Ελλάδα. Και σε παγκόσμιο επίπεδο όμως, λόγοι όπως η αναβάθμιση κατασκευών λόγω παλαιότητας, φθοράς, ή αλλαγής χρήσης καθιστούν αναγκαία την επέμβαση και συγκεκριμένα την ενίσχυση των κατασκευών αυτών.

Με τον όρο επέμβαση εννοούμε είτε την επισκευή, δηλαδή την επαναφορά ενός βλαβέντος δομικού στοιχείου ή κτίσματος στην αρχική αντοχή, ακαμψία και πλαστιμότητα, προ της βλάβης, είτε την ενίσχυση, δηλαδή την αναβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών του δομικού στοιχείου ή κτίσματος μέχρι ενός επιθυμητού ή απαιτητού επιπέδου (ΟΑΣΠ «Συστάσεις για Προσεισμικές και Μετασεισμικές Επεμβάσεις σε Κτίρια» ,2002).

Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια περίπου, έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνική ενίσχυσης η οποία βασίζεται στην χρήση προηγμένων - σύνθετων υλικών γνωστά και ως ινοπλισμένα πολυμερή (Fiber Reinforced Polymers-FRP).

Τα σύνθετα υλικά έχουν δοκιμαστεί για δεκαετίες στην αεροναυπηγική, την ναυσιπλοΐα, την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και σε είδη σπορ, σε τμήματα ηλεκτρονικών συσκευών και τυχαίνουν ευρείας χρήσης ,λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους. Επίσης στο πεδίο των τεχνικών έργων τα τελευταία 20 χρόνια,



έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή τενόντων προέντασης, ράβδων οπλισμού, αγκυρίων εδάφους, αλλά και κτιρίων ειδικής χρήσης, ελαφρών γεφυρών, δεξαμενών, σιλό κ.λ.π.(Α. Τριανταφύλλου,2003). Κυρίως όμως τα τελευταία λίγα χρόνια λόγω της ιδιαίτερα ευρείας χρήσης τους στο πεδίο των ενισχύσεων, σε όλο τον κόσμο, ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής σύνθετων υλικών απορροφάται στα τεχνικά έργα με προβλεπόμενο ρυθμό αύξησης της τάξης του 3%.(Business Communications Co., Inc. 2002)

## **1.2 Παραδοσιακές Μέθοδοι Επεμβάσεων σε Δοκούς**

Για τις επισκευές δοκών χρησιμοποιούνται ανάλογα με το βαθμό βλάβης οι εξής μέθοδοι όπως καταγράφεται στο τεύχος του Ο.Α.Σ.Π. «Συστάσεις για Προσεισμικές και Μετασεισμικές Επεμβάσεις σε Κτίρια» :

### **1.2.1 Επισκευές με κόλλες ή επισκευαστικά κονιάματα**

Χρησιμοποιούνται για ελαφριές βλάβες, όταν δηλαδή εμφανίζονται ρηγματώσεις ή αποφλοιώσεις σκυροδέματος, χωρίς αποδιοργάνωση του περισφιγμένου τμήματος της δοκού. Οι κόλλες χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των ρηγματώσεων, ενώ τα επισκευαστικά κονιάματα στην περίπτωση των επιφανειακών αποφλοιώσεων του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα από τα κονιάματα ,τα ρητινοκομιάματα έχουν ευρύτερη εφαρμογή επειδή συνήθως οι αποφλοιώσεις είναι μικρού πάχους. Για μεγαλύτερο πάχος αποδιοργανωμένου σκυροδέματος, που σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να επεκτείνεται και στο εντός του συνδετήρα τμήμα της διατομής, χρησιμοποιούνται μη συρρικνούμενα κονιάματα με βάση το τσιμέντο.

### **1.2.2 Τοπικές αποκαταστάσεις ίσης διατομής**

Επεμβάσεις με καθαίρεση και αποκατάσταση εφαρμόζονται όταν οι βλάβες είναι σοβαρές, όταν δηλαδή εμφανίζεται αποδιοργάνωση του σκυροδέματος. Οι ενέργειες που απαιτούνται για την αποκατάσταση περιλαμβάνουν: Καθαίρεση και απομάκρυνση κάθε υλικού σκυροδέματος σε περιοχή μεγαλύτερη από την βλαβείσα, απομάκρυνση συνδετήρων, ηλεκτροσυγκόλληση νέων τμημάτων διαμήκων ράβδων,

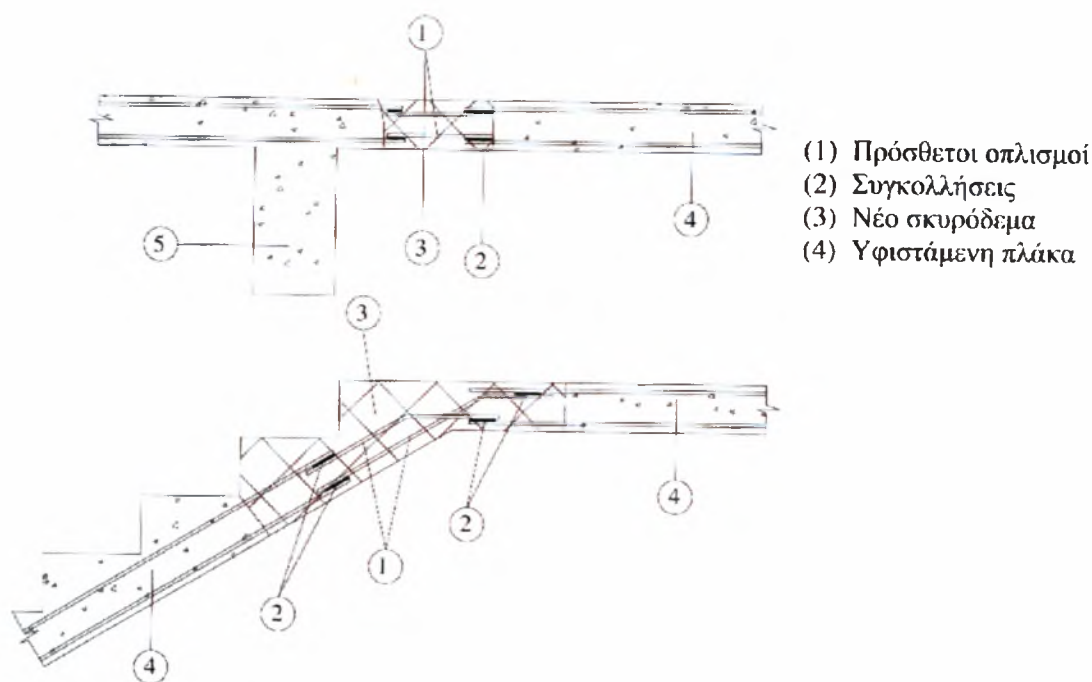




τοποθέτηση νέων συνδετήρων και τέλος σκυροδέτηση του καθαιρέντος τμήματος(σχήμα 1.1).

Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή για να αντιμετωπιστεί η συστολή ξήρανσης του νέου σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται είτε ειδικά πρόσμικτα, είτε ειδικές συνθέσεις σκυροδέματος στις οποίες το τσιμέντο έχει αντικατασταθεί από μη συρρικνούμενες κονίες, κάτω από τις αυστηρές οδηγίες των προμηθευτών για τα πρόσμικτα και τις κονίες.

Συχνά μετά από μια επισκευή τέτοιου είδους, ακολουθεί η ενίσχυση με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 1.1 Τοπική αποκατάσταση ίσης διατομής (Ο.Α.Σ.Π. , 2001)

### 1.2.3 Καμπτική ενίσχυση με πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται συχνά για ενισχύσεις δοκών στο εφελκόμενο ή στο θλιβόμενο πέλμα.

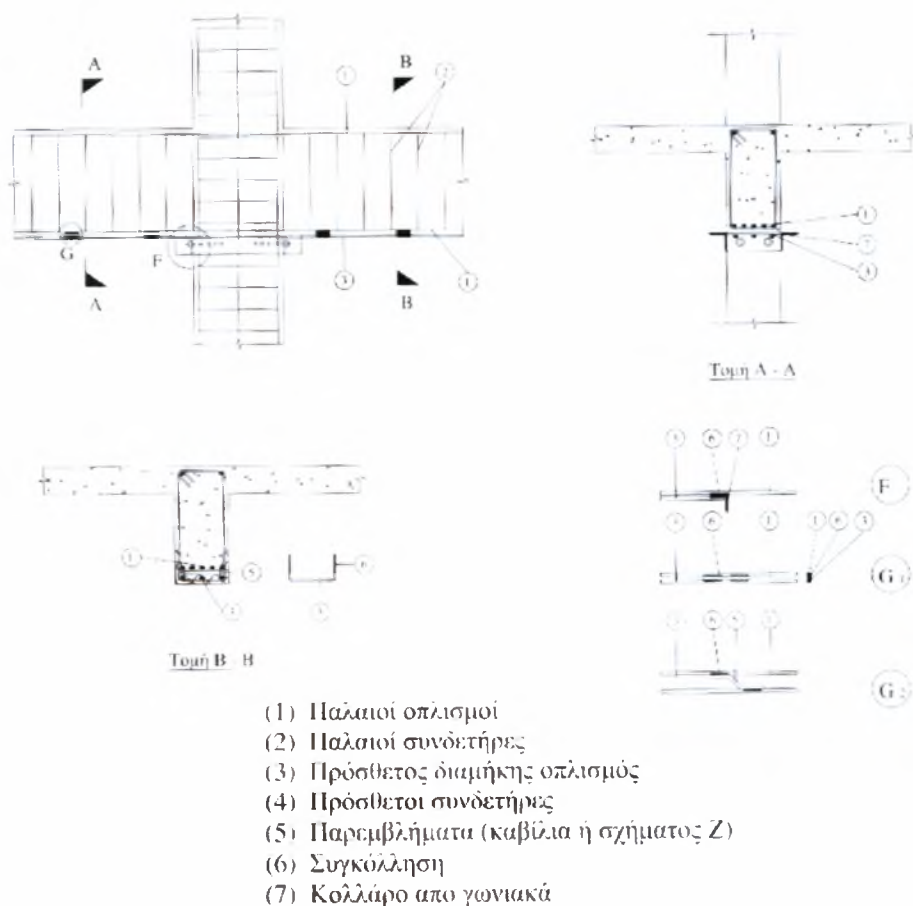
Η ενίσχυση στο εφελκόμενο πέλμα γίνεται με νέους οπλισμούς που καλύπτονται από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με πάχος συνήθως 50-100 mm, σε όλο το πλάτος της δοκού. Στις ενισχύσεις στο θλιβόμενο πέλμα, που μπορεί να γίνουν



και χωρίς πρόσθετους οπλισμούς, χρησιμοποιείται είτε εκτοξευόμενο είτε έγχυτο σκυρόδεμα .

Η συνεργασία της νέας στρώσης σκυροδέματος με τη δοκό γίνεται με χρήση διατμητικών συνδέσμων που συνήθως είναι χαλύβδινα βλήτρα (με ένα ή δύο σκέλη) ή ηλεκτροσυγκολλήσεις νέων και παλαιών ράβδων οπλισμού μέσω παρεμβλημάτων. Η επιφάνεια της δοκού, σε όλο το μήκος επαφής της με την νέα στρώση σκυροδέματος πρέπει να έχει εκτραχυνθεί επιμελώς με υδροβολή ή χρήση ειδικού μηχανικού εξοπλισμού, για να αποκαλυφθούν τα αδρανή (σχήμα 1.2).

Σημειώνεται ότι τα χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης των νέων υλικών, πρέπει να είναι συμβατικά με τα χαρακτηριστικά του αρχικού στοιχείου.



Σχήμα 1.2 Καμπτική ενίσχυση δοκού με πρόσθετη στρώση σκυροδέματος  
(Ο.Α.Σ.Π. 2001)



#### 1.2.4 Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά φύλλα από χάλυβα (steel plates)

Με την χρήση χαλύβδινων φύλλων επιτυγχάνεται αύξηση της καμπτικής αντοχής, σημαντική αύξηση της καμπτικής ακαμψίας, καθώς και μείωση των παραμορφώσεων και της αναμενόμενης ρηγμάτωσης. Η αστοχία των δοκών που ενισχύονται με χαλύβδινα φύλλα παρατηρείται, κατά κύριο λόγο, στα άκρα του φύλλου με απόσχιση του σκυροδέματος, η οποία εκδηλώνεται με μια οριζόντια ρωγμή και ταυτόχρονα αποκόλληση. Παρόλο που παρουσιάζεται ως ξαφνική αστοχία, η αποκόλληση συμβαίνει αφού ο εξωτερικός οπλισμός έχει διαρρεύσει και άρα έχει αποκτήσει την αντοχή του. Αυτό αναδεικνύει πλάστιμη συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού. Προϋπόθεση της πλάστιμης συμπεριφοράς αποτελεί η σωστή εφαρμογή της μεθόδου, κατάλληλα προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος και αποφυγή υπερδιαστασιολόγησης (υπεροπλισμένη δοκού). Βασικά μειονεκτήματα της χρήσης χαλύβδινων φύλλων είναι η ευαισθησία διάβρωσης του χάλυβα όταν τα φύλλα μείνουν απροστάτευτα και η δυσκολία κατά την εφαρμογή τους λόγω του βάρους τους το οποίο καθιστά απαραίτητη την χρήση ειδικών μηχανημάτων για την ανάληψη και τοποθέτησή τους στα υπό ενίσχυση στοιχεία.

#### 1.2.5 Καμπτική ενίσχυση με χρήση σύνθετων υλικών (FRP)

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση των σύνθετων υλικών στην καμπτική ή και διατμητική ενίσχυση των δοκών, γίνεται ιδιαίτερα συχνή λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων των υλικών αυτών έναντι των παραδοσιακών μεθόδων. Συγκεκριμένα, τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται, είναι είτε τύπου ελάσματος πάχους 1,0-1,5 mm και πλάτους αρκετών χιλιοστών (π.χ. 50-100mm) είτε τύπου υφάσματος πάχους 0,1-0,5mm. Οι ίνες είναι τις περισσότερες φορές από άνθρακα ή γυαλί και σπανιότερα από αραμίδιο.

### 1.3 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται την ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών. Αποτελείται συνολικά από πέντε κεφάλαια.



Συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο (εισαγωγή) παρουσιάζεται ο ορισμός της ενίσχυσης και η διαφοροποίηση της από την επισκευή δομικών στοιχείων, καθώς και οι παραδοσιακές μέθοδοι επισκευών και ενισχύσεων δοκών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια ποιοτικά χαρακτηριστικά των ινοπλισμένων πολυμερών, όπως η σύσταση τους και μηχανικές ιδιότητες και στη συνέχεια γίνεται μια ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με πειραματικές μελέτες και πραγματικές κατασκευές όπου έχουν χρησιμοποιηθεί τα ινοπλισμένα πολυμερή, με τρεις διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης:

1. Εξωτερικά επικολλούμενα ινοπλισμένα πολυμερή στο υπό ενίσχυση πέλαμα του στοιχείου, με χρήση ρητίνης.
2. Τοποθέτηση και επικόλληση των ινοπλισμένων πολυμερών κατακόρυφα σε εγκοπές που κατασκευάζονται στο υπό ενίσχυση πέλαμα του στοιχείου, με χρήση ρητίνης.
3. Εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών στο υπό ενίσχυση πέλαμα του στοιχείου μέσω ήλων.

Επίσης παρουσιάζονται και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από κάθε πείραμα.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται πλήρης περιγραφή ενός συγκεκριμένου πειράματος που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο κατασκευών του πανεπιστημίου της Νότιας Καρολίνας τον Ιούνιο του 2002. Το πείραμα αφορούσε την συμπεριφορά δοκών ενισχυμένων με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) με τις παραπάνω τρεις μεθόδους, κάτω από στατική φόρτιση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα μοντέλα πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της συμπεριφοράς της μη ενισχυμένης δοκού καθώς και των τριών ενισχυμένων δοκών. Η πρόβλεψη βασίζεται στον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΟΣ, 2000), στον Αμερικάνικο Κανονισμό (ACI), στον Ευρωκώδικα 2 οπλισμένου σκυροδέματος, σε πρόσφατες δημοσιεύσεις και σε πειραματικά δεδομένα (διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων χάλυβα). Συγκεκριμένα στα μοντέλα συμπεριλαμβάνεται η πρόβλεψη της καμπτικής συμπεριφοράς των δοκών καθώς και οι



έλεγχοι αστοχίας λόγω αποκόλλησης του FRP. Επίσης το τέταρτο κεφάλαιο συμπεριλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την σύγκριση των πειραματικών δεδομένων και των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων και τέλος τα συμπεράσματα που προέκυψαν από μια παραμετρική ανάλυση που βασίζεται στο πρόγραμμα πρόβλεψης, για καθεμιά από τις ενισχυμένες και μη, δοκούς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται περιληπτικά, τα συνολικά συμπεράσματα που προκύπτουν κατά τη μελέτη και σύγκριση των τριών διαφορετικών μεθόδων ενίσχυσης δοκών που διαπραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία.



## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### «ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ »

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά κάποια ποιοτικά χαρακτηριστικά των ινοπλισμένων πολυμερών και συγκεκριμένα η σύσταση, οι μηχανικές ιδιότητες και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των ινοπλισμένων πολυμερών, και στη συνέχεια κάποια πειραματικά δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία, που αφορούν την καμπτική ενίσχυση δοκών με σύνθετα υλικά. Τα υλικά αυτά εφαρμόζονται με μία από τις προαναφερόμενες μεθόδους. Τα πειράματα αναφέρονται σε στατική φόρτιση των δοκών και παρουσιάζονται αναλυτικά τα συμπεράσματα από κάθε εργασία.

#### 2.1 Σύσταση Ινοπλισμένων Πολυμερών

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από ίνες, διαμέτρου 5-25 μm, σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Το υλικό των ινών είναι είτε άνθρακας (carbon) είτε αραμίδιο (aramid) είτε βασάλτης είτε αντιαλκαλικό γυαλί (AR-glass), κατά κανόνα ισχυρότερο από αυτό του χάλυβα. Οι μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος, όμως, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από αυτές της ρητίνης. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται, είναι εποξειδικές (epoxy), πολυεστέριες (polyester), βινυλεστερικές (vinyl-ester), πολυεθυλενικές (polyethylene) και συνδέουν και προστατεύουν τις ίνες. Πρόκειται δηλαδή για υλικά που αποτελούνται από δύο φάσεις, όπου οι ίνες (1<sup>η</sup> φάση) παρέχουν την αντοχή και η μήτρα (2<sup>η</sup> φάση) παρέχει την συνεκτικότητα στο σύνθετο υλικό (Καραμπίνης Α, Πανταζοπούλου Σ, 2000).



Ο οπλισμός από σύνθετα υλικά διατίθεται με την μορφή ράβδων, πλεγμάτων, ελασμάτων, ινοϋφασμάτων και τενόντων προέντασης και μπορούν να καλύψουν μεγάλο φάσμα πρακτικών εφαρμογών λόγω της διάθεσης τους σε ποικιλία σχημάτων και είδη διατομών.

## 2.2 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα Ινοπλισμένων Πολυμερών

Τα σύνθετα υλικά διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (της τάξεως 500-2000 ΜΡα), μεγάλη ευκαμψία και άρα παραμορφωσιμότητα, μικρό ειδικό βάρος σε σχέση με τα μέταλλα, δεν προσβάλλονται από τους συνηθεις παράγοντες διάβρωσης του χάλυβα και είναι μαγνητικώς αδρανή. Μειονεκτήματα τους είναι η συμπεριφορά τους στις υψηλές θερμοκρασίες, το μεγάλο κόστος τους, το οποίο όμως μειώνεται με μεγάλους ρυθμούς και η έλλειψη πλάστιμης συμπεριφοράς. Επίσης η διστακτικότητα και η καθυστέρηση με την οποία γίνονται αποδεκτά τα υλικά αυτά στα έργα πολιτικού μηχανικού οφείλεται στην έλλειψη ενός κατάλληλου πλαισίου κανονισμών και διατάξεων για τον σχεδιασμό με τα υπόψη υλικά. (Καραμπίνης Α , Πανταζοπούλου Σ , 2000).

## 2.3 Μηχανικές Ιδιότητες

Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών ποικίλλουν ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους, την σύσταση τους δηλαδή τον τύπο και το ογκομετρικό ποσοστό των ινών, την κλίση των ινών ως προς τον κύριο εφελκυστικό άξονα, το σχήμα της διατομής του τελικού προϊόντος και τις ιδιότητες της κόλλας.

### 2.3.1 Τύπος Ινών

Όπως προαναφέρθηκε οι ίνες των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, μπορεί να είναι είτε από άνθρακα, είτε από αραμιδίο, είτε από γυαλί με τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Τριανταφύλλου Α, 2003):



- Οι ίνες άνθρακα ( με πυκνότητα  $1800-1900 \text{ kg/m}^3$  ) παρασκευάζονται είτε από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου, είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου. Οι πρώτες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αντοχή και μέτρα ελαστικότητας σε σύγκριση με τις δεύτερες.
- Οι ίνες γυαλιού, παρασκευάζονται από λειωμένο γυαλί (με πυκνότητα  $2300-2500 \text{ kg/m}^3$ ) και μπορεί να είναι 1<sup>ο</sup>) τύπου E, που είναι ο κοινός και πλέον συνηθισμένος τύπος γυαλιού με βασικό μειονέκτημα την μείωση της αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον 2<sup>ο</sup>) τύπου Z με μεγάλη αντοχή στο αλκαλικό περιβάλλον 3<sup>ο</sup>) τύπου S, με κύρια χαρακτηριστικά την υψηλή αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας. Οι ίνες γυαλιού έχουν αρκετά χαμηλότερο κόστος.
- Οι ίνες αραμιδίου (με πυκνότητα  $1450 \text{ Kg/m}^3$  ) προέρχονται είτε από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ) είτε από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora). Βασικό πλεονέκτημα των ινών αραμιδίου είναι η αντοχή τους σε κρουστικά φορτία ενώ βασικό μειονέκτημα, η δυσμενής επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας.

### 2.3.2 Ογκομετρικό Ποσοστό Ινών:

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών με ίνες κυρίως σε μια διεύθυνση, μετρούνται πειραματικά ή μπορούν να εκτιμηθούν βάσει των αντίστοιχων για τις ίνες και την μήτρα μέσω της σχέσης:

$$E_f = E_{fib} \times V_{fib} + E_m \times V_m$$

Όπου  $E_{fib}$  ,  $V_{fib}$  το μέτρο ελαστικότητας και το ογκομετρικό ποσοστό των ινών αντίστοιχα και  $E_m$  ,  $V_m$  το μέτρο ελαστικότητας και το ογκομετρικό ποσοστό της μήτρας αντίστοιχα.

### 2.3.3 Τελικό Προϊόν





### 2.3.3.1 *Ράβδοι Σύνθετου Οπλισμού*

Πρόκειται για ράβδους από σύνθετα υλικά που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα ως υποκατάστατα του συμβατικού μεταλλικού οπλισμού (Καραμπίνης Α, Πανταζοπούλου Σ, 2000). Για τις ράβδους αυτές :

- Η σχέση τάσης - παραμόρφωσης είναι γραμμική ελαστική.
- Η αντοχή σε αξονική θλίψη είναι μικρότερη από την αντοχή σε εφελκυσμό .
- Παρουσιάζουν μικρή αντοχή σε εγκάρσια πίεση (ορθογώνια προς την κατεύθυνση των ινών) της τάξεως του 30% της κύριας εφελκυστικής αντοχής.
- Ο συντελεστής θερμικής διαστολής κατά την εγκάρσια διεύθυνση καθορίζεται από αυτόν της μήτρας που συχνά είναι πέντε έως οχτώ φορές μεγαλύτερος από αυτόν του σκυροδέματος ,ενώ κατά την διεύθυνση των ινών καθορίζεται από τον τύπο των ινών.
- Παρουσιάζουν χαμηλή διατμητική αντοχή για το λόγω αυτό έχουν υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι για την επίτευξη τραχύτητας και μηχανικής αγκύρωσης στο σκυρόδεμα όπως επίχριση της επιφάνειας της ράβδου με χονδρόκοκκη άμμο για αύξηση του συντελεστή τριβής, ή δημιουργία νευρώσεων με ελικοειδή περιτύλιξη καλωδίων FRP κατά μήκος της ράβδου.

### 2.3.3.2 *Ελάσματα, Ταινίες, Ινουφάσματα*

Πρόκειται για ιδιαίτερα εύχρηστα υλικά που επικολλούνται εξωτερικά στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων (Τριανταφύλλου Α ,2003). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται είτε ως πρόσθετος εφελκυστικός ή διατμητικός οπλισμός είτε ως οπλισμός περίσφιγξης. Είναι δισδιάστατα προϊόντα (έχουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις τους ) και η κύρια μηχανική λειτουργία τους είναι σε επίπεδη ένταση. Είναι εύκαμπτα, ενώ συνδυάζουν μεγάλη μηχανική αντοχή και δυσκαμψία στο επίπεδό τους. Συνήθως είναι ορθοτροπικά υλικά (ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους) με μια κύρια και μια δευτερεύουσα κατεύθυνση αντοχής και δυσκαμψίας. Έτσι είναι συνήθως



η χρήση διαφορετικού τύπου ινών στην κύρια από τη δευτερεύουσα κατεύθυνση δράσης του σύνθετου υλικού. Συγκεκριμένα:

#### 2.3.3.2.1 Συστήματα Υγρής Εφαρμογής

- Ταινίες ή υφάσματα αποτελούμενα είτε από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσεως, είτε από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις (για παράδειγμα σε 0° και 90° ή +45° και -45° σε σχέση με τον υπό ενίσχυση άξονα) και στις δύο περιπτώσεις **χωρίς μήτρα** («ξηρή» κατάσταση). Για την εφαρμογή τους απαιτείται η εφαρμογή «ασταρώματος» στο σκυρόδεμα και ακολούθως ο εμποτισμός των ινών με μια από τις παρακάτω μεθόδων:
  - Εφαρμογή της ρητίνης στο σκυρόδεμα και τοποθέτηση των ινών απευθείας στη ρητίνη.
  - Προεμποτισμός των ινών με ρητίνη και επικόλληση στο υπό ενίσχυση στοιχείο.
- Φύλλα ή υφάσματα αποτελούμενα είτε από ίνες μίας διεύθυνσης είτε τουλάχιστον δύο διευθύνσεων προεμποτισμένα με **ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή**. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επιπλέον ρητίνη .

#### 2.3.3.2.2 Προκατασκευασμένα Υλικά

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα ελάσματα (plates). Διατίθενται συνήθως σε μορφή ρολών και αποτελούνται από ίνες μίας ή και δύο διευθύνσεων ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους.
- Προκατασκευασμένα κελύφη (shells) ή μανδύες (jackets) που χρησιμοποιούνται περιμετρικά σε υποστυλώματα με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης ή της διατμητικής αντοχής, ή γωνίες (angles) που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση της τέμνουσας (για παράδειγμα σε πλακοδοκούς).

Για την παρασκευή όλων των προκατασκευασμένων υλικών χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες μέθοδοι όπως:



-Εξέλαση ή Εκβολή (Pultrusion) κατά την οποία οι ίνες αρχικά εμποτίζονται με ρητίνη και στην συνέχεια ωθούνται μέσα σε καλούπι, σχήματος ίδιο με της επιθυμητής τελικής διατομής. Το καλούπι εμποτίζεται με πρόσθετη ρητίνη και θερμαίνεται, ώστε να επιτευχθεί η σκλήρυνση της ρητίνης και να πάρει το στοιχείο την τελική του μορφή. Στη μέθοδο αυτή οι ίνες είναι κατά κανόνα συνεχείς και παράλληλες στη διεύθυνση των ελασμάτων.

-Εφαρμογή αλληπάλληλων στρώσεων υφασμάτων (Filament winding) σε συνδυασμό με ρητίνη, σε καλούπια που μπορεί να είναι ανοιχτού ή κλειστού τύπου. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την χρήση ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις.

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία προτιμούνται έναντι των υφασμάτων όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες(καμπτική ενίσχυση δοκών ή πλακών) ενώ σε άλλες περιπτώσεις (μανδύες υποστρωμάτων, διατμητική ενίσχυση δοκών) η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου είναι προτιμότερη.

#### 2.3.4 Ιδιότητες Κόλλας

Οι προδιαγραφές που συνήθως συνοδεύουν τα υλικά από τον κατασκευαστή, μπορεί να αφορούν είτε τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού ως απομονωμένη μονάδα, είτε αυτές του συστήματος «σύνθετο υλικό - κόλλα» .

Η κόλλα, συνήθως εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών, εφαρμόζεται μεταξύ σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι την συνεργασία και την μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Βασικά χαρακτηριστικά της χρήσης της, τα οποία πρέπει να τυχαίνουν ιδιαίτερης προσοχής κατά την εφαρμογή επικολλούμενων σύνθετων υλικών είναι (Τριανταφύλλου Α,2003):

➤ Ο χρόνος εργασιμότητας(pot life) ,

δηλαδή ο χρόνος έως ότου να αρχίσει να μειώνεται το ιξώδες της κόλλας. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τον τύπο της κόλλας, από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και από την ποσότητα της κόλλας που προκύπτει με την ανάμειξη των δύο συστατικών .



➤ Ο χρόνος εφαρμογής (open time)

Δηλαδή το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κόλλα είναι ενεργή - έχει συγκολλητικές ιδιότητες - και θα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια σκυροδέματος.

➤ Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature)

Δηλαδή η θερμοκρασία για την οποία η κόλλα υφίσταται ραγδαία μείωση του μέτρου ελαστικότητας οπότε έχει περιορισμένη πλέον ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

## 2.4 Ανθεκτικότητα Ινοπλισμένων Πολυμερών

### 2.4.1 Θερμοκρασία

Σχετικά υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 50-80 (°C) μειώνουν σημαντικά την ικανότητα των ρητινών, να αναλαμβάνουν και να μεταφέρουν δυνάμεις. Για ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες όπως αυτές κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών πολλές από τις οποίες κατά την καύση τους εκλύουν τοξικά αέρια. Οι θερμοκρασίες αποσύνθεσης των ινών είναι 1000 °C για το γυαλί, 650 °C για τον άνθρακα και 200 °C για το αραμίδιο (Τριανταφύλλου Α, 2003).

### 2.4.2 Υγρασία

Γενικά τα σύνθετα υλικά έχουν καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας. Μετά από μακροχρόνια όμως δράση του νερού, ενδέχεται να παρουσιαστούν προβλήματα, καθώς τόσο οι ρητίνες όσο και οι ίνες γυαλιού και αραμιδίου απορροφούν μικρές ποσότητες νερού με αποτέλεσμα την μικρή μείωση της αντοχής.

Οι ίνες άνθρακα είναι πρακτικά απρόσβλητες.



### 2.4.3 Υπεριώδης Ακτινοβολία

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου επιφέρει μείωση αντοχής στη μήτρα των σύνθετων υλικών και την κόλλα ενώ η επίδραση γίνεται εμφανής με χρωματική αλλοίωση. Δεν επιδρά όμως στις ίνες με εξαίρεση τις ίνες αραμιδίου.

### 2.4.4 Γαλβανική διάβρωση

Η επαφή των ινών άνθρακα με χάλυβα πρέπει να αποφεύγεται, διότι ο τελευταίος θα υποστεί γαλβανική διάβρωση.

### 2.4.5 Κόπωση. Ερπυσμός

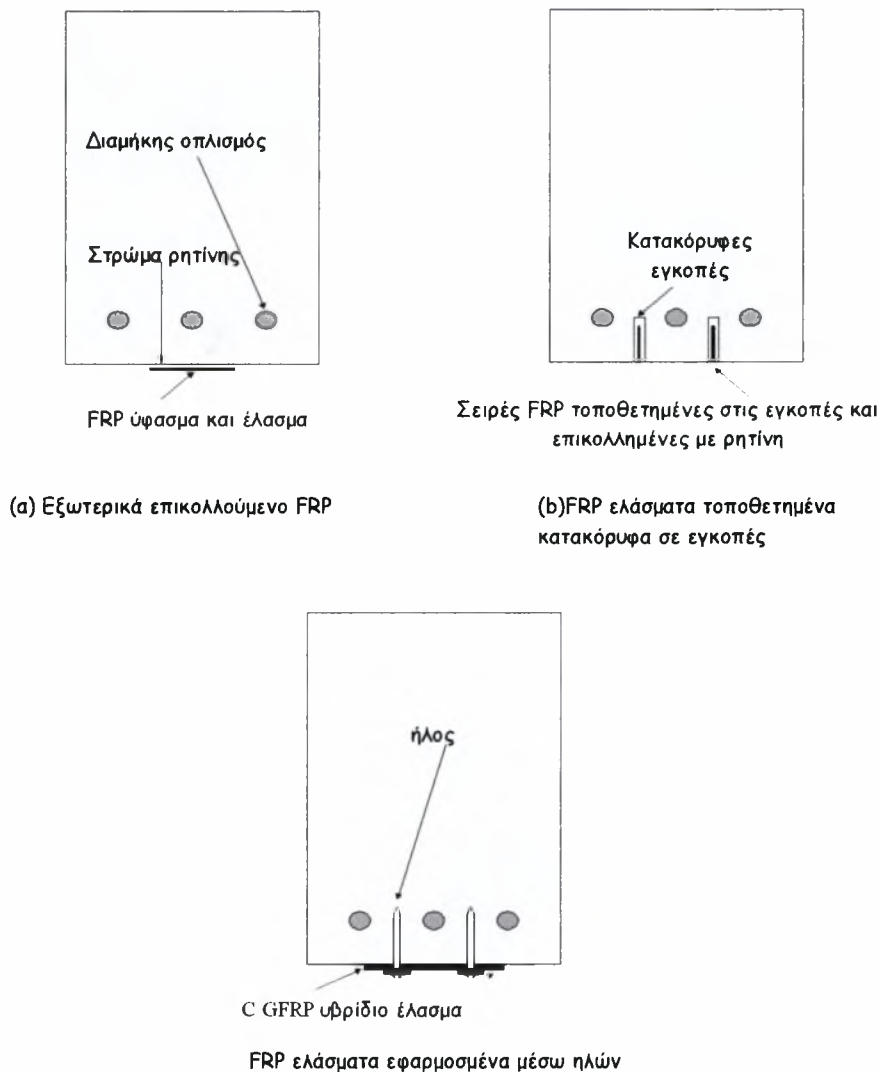
Γενικά η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών στις παραπάνω δύο «φορτίσεις» είναι πολύ καλή. Ειδικά για υλικά με ίνες άνθρακα αποδεικνύεται πειραματικά, ότι η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα. Όμοια οι ερπυστικές παραμορφώσεις είναι σχεδόν μηδενικές κυρίως για τις ίνες άνθρακα.

## 2.5 Πειραματικά Δεδομένα από την Διεθνή Βιβλιογραφία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς για καθένα από τους τρόπους ενίσχυσης που διαπραγματεύεται αυτή η διπλωματική εργασία.

### 2.5.1 Επικολλούμενα σύνθετα υλικά με εποξειδική ρητίνη.(Conventional Adhesive Applied FRP's)

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην επικόλληση ελασμάτων ή υφασμάτων μίας ή δύο κύριων κατευθύνσεων, εξωτερικά στην επιφάνεια του σκυροδέματος, στο εφελκυσμένο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης δυνάμεις, μέσω εποξειδικής ρητίνης δύο συστατικών. Στην σχήμα (2.1.α) παρουσιάζεται μια τυπική διατομή της ενισχυμένης δοκού με την μέθοδο αυτή. Είναι παρόμοια στην σύλληψη με την μέθοδο ενίσχυσης με χαλύβδινα ελάσματα ,όμως ο χάλυβας αντικαθίσταται από FRP.



Σχήμα 2.1 τυπικές μέθοδοι καμπτικής ενίσχυσης δοκών

### 2.5.1.1 Ritchie, Thomas, Lu and Connelly (1991)

Σε αυτή την εργασία, μια σειρά από δεκαέξι υποοπλισμένες δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος εξετάστηκαν ώστε να μελετηθεί η επίδραση της εξωτερικής ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή (από ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμιδίου) επικολούμενα με εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών. Οι δοκοί είχαν μήκος 2743mm και οι διαστάσεις της διατομής ήταν 305mm ύψος και 152mm πλάτος. Ως εφελκόμενος διαμήκης οπλισμός, είχαν τοποθετηθεί δύο ράβδοι #4 (με διάμετρο 12,7mm) ενώ ως διατμητικός οπλισμός



τοποθετήθηκαν κατακόρυφοι συνδετήρες (με διάμετρο 4,5mm) ανά 102mm. Οι τελικές δοκοί ήταν υπεροπλισμένες σε διάτμηση ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε ψαθυρή διατμητική αστοχία και μετά την ενίσχυση και ταυτόχρονα υποοπλισμένες σε κάμψη ώστε να αποφευχθεί μετά την ενίσχυση τους με τον εξωτερικό οπλισμό, η υπερδιαστασιολόγηση που θα οδηγούσε σε ψαθυρή αστοχία του θλιβόμενου σκυροδέματος. Δύο από τις δοκούς, οι A και B ,δεν ενισχύθηκαν ,αλλά παρέμειναν δοκοί ελέγχου (control beams) , ενώ οι υπόλοιπες δεκατέσσερις ενισχύθηκαν ως εξής:

- Για τις δοκούς C, D, E και F χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα από ίνες γυαλιού κατασκευασμένα με την μέθοδο της εξέλασης.
- Για τη δοκό G χρησιμοποιήθηκε έλασμα από ίνες γυαλιού ,με δύο κύριες διευθύνσεις (0° και 90°) .
- Για την δοκό H χρησιμοποιήθηκε έλασμα διατομής «U» διαστάσεων  $8 \times 2^{3/16} \times 3/8$  σε ίντσες ή  $203 \times 55,6 \times 9,5$  σε mm, από ίνες γυαλιού.
- Για την δοκό I χρησιμοποιήθηκε έλασμα δύο κύριων διευθύνσεων (0° και 90°) σε ποσοστό 65% ίνες γυαλιού και 35% ίνες άνθρακα.
- Για τις δοκούς J και K ,χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα από υψηλής αντοχής ίνες γυαλιού ,δύο διευθύνσεων.
- Για τη δοκό L χρησιμοποιήθηκε έλασμα από ίνες άνθρακα σε τρεις διευθύνσεις (0° , +60° , -60°).
- Για την δοκό M χρησιμοποιήθηκε έλασμα από ίνες άνθρακα σε δύο κύριες διευθύνσεις (0° και 90°).
- Για την δοκό N χρησιμοποιήθηκε έλασμα από ίνες αραμιδίου
- Τέλος για τις δοκούς O και P χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινα ελάσματα.

Οι δοκοί φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά εφαρμοσμένες ως προς το μέσο του ανοίγματος. Στα αρχικά πειράματα οι αστοχίες παρατηρήθηκαν στο τέλος του ελάσματος για το λόγο αυτό έγιναν τέσσερις προσπάθειες ώστε να μετατοπιστεί το σημείο αστοχίας:





- Αγκύρωση στο πέρας των ελασμάτων χρησιμοποιώντας γωνίες (angles) από ίνες γυαλιού και άνισου μήκους (σχήμα 2.2.a). Το σύστημα αυτό απέδωσε μεγαλύτερη αντοχή, αλλά το μοντέλο της αστοχίας δεν μετρατάπηκε (δοκός K).
- Επικόλληση ελασμάτων FRP στις πλευρές της δοκού, καθόλο το ύψος της ,στο πέρας του εφελκόμενου ελάσματος και ένωση αυτών με γωνίες από ίνες γυαλιού(σχήμα 2.2.b). Το σύστημα αυτό είχε αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής αλλά και την μετατροπή του μοντέλου αστοχίας για τη δοκό E. Όμως για τις δοκούς J και N η ένωση των πλευρικών και εφελκόμενου ελάσματος απέτυχε, με αποτέλεσμα οι δοκοί να αστόχησαν με τον αρχικό τρόπο.
- Αντικατάσταση του ελάσματος ενίσχυσης με ένα ζεύγος γωνιών επικολλημένων, πλευρικά μέχρι το ύψος του εσωτερικού οπλισμού (σχήμα 2.2.c). Το μοντέλο αστοχίας παρέμεινε το ίδιο.(δοκός H)
- Επέκταση των ελασμάτων έως τις στηρίξεις για τις δοκούς G, L, M και P (σχήμα 2.2.d). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και μετατροπή του μοντέλου αστοχίας για την δοκό L.

Στο πίνακα (2.1) παρουσιάζεται το τελικό φορτίο αστοχίας (P) και το Βέλος Κάμψης ( $\Delta$ ) για κάθε δοκό. Σε όλες τις δοκούς παρατηρήθηκε αύξηση της δυσκαμψίας στην κατάσταση λειτουργικότητας, από 17 έως 99 %. Ενώ δεν αναπτύχθηκε η μέγιστη καμπτική αντοχή στις περισσότερες δοκούς παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής από 28 έως 97% σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μη ενισχυμένες δοκούς. Καμία ενισχυμένη δοκός δεν αστόχησε από σύνθλιψη σκυροδέματος. Αυτό δικαιολογείται μερικώς από την υψηλότερη τελική θλιπτική αντοχή που προέκυψε για τις δοκούς. Πολλές δοκοί αστόχησαν λόγω ρωγμής η οποία ξεκινά από το πέρας του ελάσματος και συνεχίζεται οριζόντια στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού. Στις περισσότερες δοκούς ο χάλυβας διέρρευσε πριν την αστοχία και στις δοκούς που ενισχύθηκαν με χαλυβοελάσματα το έλασμα διέρρευσε πριν τον εσωτερικό οπλισμό. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα από την μελέτη αυτή παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η χρήση επικολλούμενων ελασμάτων από σύνθετα υλικά, είναι μια ικανοποιητική μέθοδος αύξησης της αντοχής και της δυσκαμψίας υποοπλισμένων δοκών.

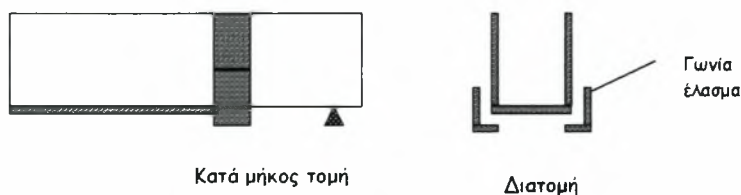




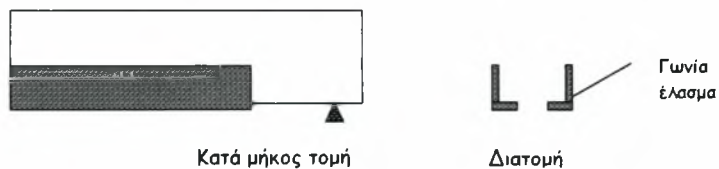
2. Οι ενισχυμένες δοκοί με εξωτερικά επικολλούμενα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μείωση του ανοίγματος και της απόστασης των ρωγμών, δηλαδή οι ρωγμές είναι πυκνότερες και μικρότερες.
3. Η αγκύρωση των σύνθετων υλικών στο πέρας τους, και οι τάσεις που αναπτύσσονται, χρειάζεται επιπλέον έρευνα και μελέτη όμως προκύπτει προτιμότερος τρόπος αγκύρωσης η επέκταση του ελάσματος έως τις στηρίξεις με αποτέλεσμα την μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων.



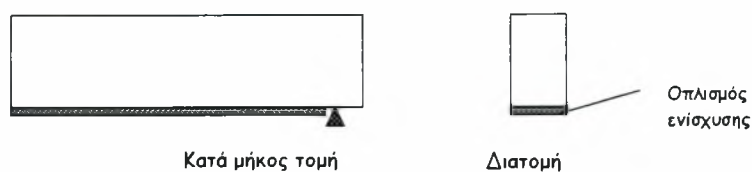
(a) Πλευρική ενίσχυση με γωνία-έλασμα από ίνες γυαλιού



(b) Πλευρική ενίσχυση με έλασμα καθ' όλο το ύψος και γωνία έλασμα



(c) Αντικατάσταση του ελάσματος του πέλματος με γωνίες ελάσματα



(d) επέκταση του ελάσματος έως τις στηρίξεις

Σχήμα 2.2 Αγκύρωση δοκών, Ritchie, Thomas, Lu and Connolly (1991)



Πίνακας 2.1 Αποτελέσματα πειραματικής εργασίας των Ritchie, Thomas, Lu and Connolly (1991)															
Δοκός	Χαρακτηριστικά ισοπλισμένων πολυμερών														
	Υλικό ενίσχυσης <sup>1</sup>	Μέτρο Ελαστικότητας	Αντοχή		Πλάτος		Πάχος		Μήκος		Τρόπος αγκύρωσης <sup>1</sup>				
			MPa	MPa	mm	mm	mm	mm	mm						
A				Μη ενισχυμένη δοκός									33.4	na	66.6
B				Μη ενισχυμένη δοκός									33.2	na	72.0
C	0° GFRP	11722	161	152	4.8	2032	-					50.6	1.53	27.8	
D	0° GFRP	11722	161	151	4.8	2032	-					54.5	1.64	30.7	
E	0° GFRP	11722	161	154	4.8	1981	-2					57.0	1.70	34.3	
F	0° GFRP	11722	161	154	9.5	3353 <sup>2</sup>	-					60.8	1.83	26.2	
G	0/90° GFRP	10343	184	152	4.2	2438	-4					57.5	1.72	41.5	
H	GFRP διασπής «U»	20685	241	152 <sup>3</sup>	9.3 <sup>3</sup>	2032	-3					51.0	1.53	15.0	
I	0/90° G/CFRP	27580	319	150	4.1	2032	-					46.3	1.40	12.2	
J	0/90° GFRP	30338	590	152	3.2	1778	-2					56.2	1.70	20.2	
K	0/90° GFRP	30338	590	152	3.2	1778	-1					54.9	1.65	23.0	
L	0/±60° CFRP	54471	614	152	1.3	2438	-4					56.1	1.69	28.5	
M	0/90° CFRP	117905	1489	152	1.3	2438	-4					65.9	1.97	20.9	
N	0° AFRP	72398	1172	154	6.4	1829	-2					49.8	1.50	11.0	
O	Χάλυβα έλασμα	199955	207 <sup>4</sup>	154	2.6	2032	-					42.7	1.28	10.5	
P	Χάλυβα έλασμα	199955	207 <sup>4</sup>	150	2.5	2438	-4					57.8	1.73	43.9	

<sup>1</sup> Οι λεπτομέρειες ενίσχυσης και αγκύρωσης όπως περιγράφονται στη ενότητα 2.5.1.1

<sup>2</sup> Δύο ελάσματα πάχους 9.5 mm και μήκους 1981 mm and 1372 mm

<sup>3</sup> Οι τιμές που δίνονται είναι το άθροισμα των δύο γωνιών

<sup>4</sup> διαρροή του χάλυβα, όχι αντοχή στην αστοχία



Πίνακας 2.2 Αποτελέσματα πειραματικής εργασίας των Ritchie, Thomas, Lu and Connolly (1991)

Δοκός	Τρόπος αστοχίας
A	Τυπική καμπτική αστοχία, διαρροή χάλυβα και σύνθλιψη σκυροδέματος
B	Τυπική καμπτική αστοχία, διαρροή χάλυβα και σύνθλιψη σκυροδέματος
C	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
D	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
E	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και αστοχία του FRP στο μέσο περίπου του ανοίγματος
F	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και αστοχία του FRP στο μέσο περίπου του ανοίγματος
G	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
H	Ο χάλυβας δεν διέρρευσε, διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού και αποκόλληση του σκυροδέματος μεταξύ των γωνιών
I	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
J	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
K	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
L	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και αστοχία του FRP στο μέσο περίπου του ανοίγματος
M	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
N	Ο εσωτερικός οπλισμός δεν διέρρευσε και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
O	Διαρροή εσωτερικού οπλισμού και διατμητική αστοχία σκυροδέματος κατά μήκος και στο ύψος του εσωτερικού οπλισμού
P	Διαρροή εξωτερικού και εσωτερικού χάλυβα, μεγάλο βέλος κάμψης και σύνθλιψη σκυροδέματος

Σχόλιο:



Η παραπάνω εργασία είναι πλούσια σε μεθόδους αγκύρωσης και διαθέσιμα υλικά. Μελετώντας τα πειραματικά αποτελέσματα και κυρίως τους τρόπους αστοχίας προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Από τις ενισχυμένες δοκούς με ινοπλισμένα πολυμερή, φαίνεται η δοκός L να παρουσιάζει την αποδοτικότερη συμπεριφορά, γιατί η αστοχία προήλθε από καταστροφή του ελάσματος στο μέσο περίπου του ελάσματος ενώ ως μέσο αγκύρωσης χρησιμοποιείται η επέκταση του ελάσματος έως τις στηρίξεις. Σημειώνεται ότι η δοκός ενισχύθηκε με ανθρακοέλασμα τριών διευθύνσεων. Αντίθετα η δοκός M και G, που αγκυρώθηκαν με τον ίδιο τρόπο, αλλά τα ελάσματα ήταν από ίνες άνθρακα δύο διευθύνσεων και από ίνες γυαλιού δύο διευθύνσεων, αντίστοιχα δεν επέδειξαν την ίδια συμπεριφορά κατά την αστοχία.
2. Όπως παρατηρείται, οι δοκοί που ενισχύθηκαν με σύνθετα υλικά μεγαλύτερης αντοχής και μέτρων ελαστικότητας, για παράδειγμα οι δοκοί J, K, και M επέδειξαν λιγότερο πλάστιμη συμπεριφορά συγκριτικά με τις δοκούς L και E .
3. Και ο δεύτερος τρόπος αγκύρωσης φαίνεται να αποδίδει στη δοκό E που ενισχύθηκε με GFRP μιας διευθύνσεως, όχι όμως στις δοκούς J και N οι οποίες ενισχύθηκαν με GFRP καλύτερης ποιότητας και KFRP αντίστοιχα.

#### ***2.5.1.2 Takeda, Mitsui, Murakami, Sakai, and Nakamura (1996)***

Αυτή η πειραματική μελέτη εξετάζει την καμπτική συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών με επικολλούμενα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα μέσω εποξειδικής ρητίνης. Έξι δοκοί σκυροδέματος εξετάστηκαν σε κάμψη. Κάθε δοκός είχε μήκος 2400mm , και διαστάσεις διατομής 250mm ύψος και 150mm πλάτος. Ως διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός τοποθετήθηκαν δύο ράβδοι  $\Phi 10$  ενώ ως θλιβόμενος  $3\Phi 10$ . Επίσης για την ανάληψη της διάτμησης τοποθετήθηκαν κατακόρυφοι συνδετήρες  $\Phi 5$  ανά 100mm. Πέντε από τις δοκούς ενισχύθηκαν με φύλλα CFRP. Συγκεκριμένα δύο από τις δοκούς ενισχύθηκαν με μία στρώση



ανθρακούφασματος, δύο από τις δοκούς ενισχύθηκαν με δύο αλληπάλληλες στρώσεις φύλλων ενώ μία δοκός με τρεις στρώσεις. Σε όλες τις δοκούς το πρώτο φύλλο επικολλήθηκε σε όλο το μήκος των δοκών. Για τις δοκούς που ενισχύθηκαν με αλληπάλληλες στρώσεις φύλλων άνθρακα, το δεύτερο είχε μήκος 1600mm ενώ το τρίτο 800mm και τοποθετήθηκαν συμμετρικά ως προς το μέσο της δοκού. Στις τέσσερις ενισχυμένες δοκούς εφαρμόστηκαν δύο δυνάμεις συμμετρικές ως προς το μέσο του ανοίγματος, όμοια και στη μη ενισχυμένη δοκό, ενώ σε μία δοκό που είχε ενισχυθεί με ένα ανθρακούφασμα εφαρμόστηκε μία δύναμη στο μέσο του ανοίγματος. Σημειώνεται ότι μία δοκός ρηγματώθηκε και μετά επισκευάστηκε με χρήση ρητίνης πριν να ενισχυθεί. Τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας αυτής παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η επίδραση του CFRP ήταν μικρή για την αύξηση της αντοχής κατά την πρώτη ρηγμάτωση, αλλά βελτίωσε σημαντικά την καμπτική συμπεριφορά των δοκών μετά την ρηγμάτωση.
2. Οι ενισχυμένες δοκοί επέδειξαν αντοχή στη διαρροή αυξημένη από 40% έως 90% έναντι της μη ενισχυμένης δοκού, ανάλογη με τον αριθμό των στρώσεων των φύλλων.
3. Επίσης επέδειξαν τελική αντοχή, αυξημένη από 90 έως 140 % έναντι της μη ενισχυμένης δοκού. Η αύξηση αυτή όμως δεν ήταν ανάλογη των στρώσεων, αλλά παρουσίαζε ανώτερο όριο, λόγω της αποκόλλησης των φύλλων που παρατηρήθηκε.
4. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δοκών συμφωνούσε με τα πειραματικά αποτελέσματα όσο αφορά την ρηγμάτωση και την διαρροή, ενώ έδωσε μεγαλύτερη αντοχή στην αστοχία σε σύγκριση με τα πειραματικά και αυτό γιατί η αστοχία προήλθε από αποκόλληση του FRP.
5. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για την δοκό 4, η οποία ενισχύθηκε αφού είχε προηγηθεί το στάδιο της ρηγμάτωσης.

Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται συνοπτικά στο πίνακα 2.3.

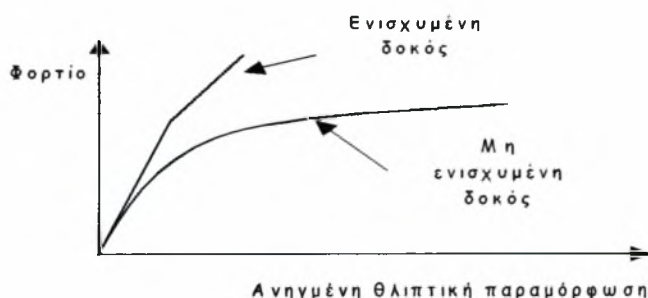


Σχόλια:

1. Οι δοκοί που ενισχύθηκαν με περισσότερες από μία σειρά φύλλων δεν αποδίδουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή κατά την αστοχία, γιατί προηγείται η αποκόλληση.
2. Η αποκόλληση ξεκίνησε σε μια τυχαία καμπτοδιατμητική ρωγμή σε όλες τις δοκούς. Δηλαδή δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση που να ξεκινά από το πέρασ του FRP και αυτό γιατί μία στρώση φύλλου FRP προεκτεινόταν έως τις στηρίξεις για κάθε δοκό.

### 2.5.1.3 Fanning and Kelly (2001)

Στην έρευνα αυτή εξετάστηκε η συμπεριφορά οχτώ ενισχυμένων δοκών με CFRP διαφορετικών μηκών. Οι δοκοί είχαν μήκος 3000mm και οι διαστάσεις τις διατομής ήταν 155mm πλάτος και 240mm ύψος. Ως διαμήκης εφελκούμενος οπλισμός τοποθετήθηκαν τρεις ράβδοι  $\Phi 12$  και ως θλιβόμενος οπλισμός δύο  $\Phi 12$ . Επίσης τοποθετήθηκαν συνδετήρες  $\Phi 6$  ανά 125mm. Σε όλες τις δοκούς εφαρμόστηκαν δύο δυνάμεις συμμετρικά ως προς το μέσο του ανοίγματος. Συνολικά κατασκευάστηκαν δέκα δοκοί και οι δύο από τις δοκούς δεν ενισχύθηκαν (control beams) ενώ για τις υπόλοιπες δοκούς χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα CFRP διαφορετικών μηκών. Το έλασμα είχε πάχος 1,2mm και πλάτος 120mm και κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της εξέλασης από ανθρακούφασμα διάφορων κύριων διευθύνσεων, και εποξειδική ρητίνη. Το έλασμα είχε τελικά, μέτρο ελαστικότητας 155GPa και εφελκυστική αντοχή 2400 MPa. Σε δύο από τις δοκούς το έλασμα επεκτάθηκε σε όλο το μήκος της δοκού (F3, F4). Τα σημαντικότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα P -  $\epsilon_c$  (Fanning, Kelly 2001)



Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα από την εργασία των Takeda, Mitsui, Murakami, Sakai, and Nakamura (1996)

Δοκός	Χαρακτηριστικά δοκού		Πειραματικά αποτελέσματα							Τρόπος αποχίας
			Ροπή ρηγμάτωσης kNm		Ροπή διαρροής kNm			Ροπή αποχίας kNm		
	# φύλλων	Είδος φόρτισης	Πειραματικά	Υπολογισμένο <sup>1</sup>	Πειραματικά	Υπολογισμένο <sup>1</sup>	Υπολογισμένο <sup>2</sup>	Πειραματικά	Υπολογισμένο <sup>2</sup>	
1	0	4PB <sup>4</sup>	4.16	4.82	10.00	9.59	10.74	11.96	11.50	Καμπτική αποχία, σύνθλιψη σκυ/τος
2	1	4PB <sup>4</sup>	5.00	4.95	13.75	12.08	13.58	26.40	30.62	Απόσχιση του FRP μετά την αποκόλληση του
3	2	4PB <sup>4</sup>	6.25	5.08	16.25	14.60	16.42	27.87	42.42	Απόσχιση του FRP μετά την αποκόλληση του
4	2	4PB <sup>4</sup>	-	-	17.91	14.60	16.42	26.86	42.42	Αποκόλληση FRP σε ενδιάμεση καμπτοδιαμητική ρωγμή
5	3	4PB <sup>4</sup>	5.42	5.20	19.16	17.15	19.19	28.76	49.71	Αποκόλληση FRP σε ενδιάμεση καμπτοδιαμητική ρωγμή
6	1	3PB <sup>5</sup>	6.37	4.95	13.72	12.08	13.58	22.28	30.62	Απόσχιση του FRP μετά την αποκόλληση του

<sup>1</sup> Υπολογισμένη τιμή με βάση την ισοδύναμη ρηγματωμένη διατομή (με  $E_s/E_c = 6.58$  )

<sup>2</sup> Υπολογισμένη τιμή με βάση την γραμμική κατανομή των ανηγμένων παραμορφώσεων στη διατομή (με  $\epsilon_{cu} = 0.003$ )

<sup>3</sup> Η δοκός είχε ρηγματωθεί πριν την ενίσχυση με FRP εφαρμόζοντας φορτίο ίσο με τα δύο τρίτα του αναμενόμενου φορτίου διαρροής

<sup>4</sup> Εφαρμόζονται δύο φορτία συμμετρικά ως προς το μέσο του ανοίγματος

<sup>5</sup> Εφαρμόζεται ένα φορτίο στο μέσο του ανοίγματος





1. Η χρήση εξωτερικών επικολλούμενων ελασμάτων αύξησε την καμπτική αντοχή στη αστοχία κατά 70% ,ενώ την δυσκαμψία (μετά την ρηγμάτωση) κατά 40%, στις δοκούς που το έλασμα επεκτείνεται στις στηρίξεις.
2. Το άνοιγμα και το μέγεθος των ρωγμών μειώνεται σημαντικά στις ενισχυμένες δοκούς, επιδεικνύοντας ανθεκτικότερη συμπεριφορά στην διάβρωση του εσωτερικού οπλισμού.
3. Η απόδοση του εξωτερικού οπλισμού μειώνεται ανάλογα με το μήκος του ελάσματος και συγκεκριμένα όσο μικρότερος προέκυπτε ο λόγος του μήκους του FRP προς την απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης P από το πέρασ του FRP, τόσο μικρότερη προέκυπτε η αύξηση της αντοχής της δοκού.
4. Όλες οι δοκοί στις οποίες το έλασμα δεν επεκτάθηκε έως τις στηρίξεις, αστόχησαν λόγω αποκόλλησης του ελάσματος στο πέρασ του, όταν οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν την διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας κόλλας- σκυροδέματος. Αντίθετα στις υπόλοιπες ενισχυμένες δοκούς η αστοχία προκαλείται από αποκόλληση του FRP λόγω δημιουργίας μιας διατμητικής ρωγμής κοντά στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Το πεδίο της αστοχίας απαιτεί επιπλέον έρευνα.
5. Παρατηρώντας τις καμπύλες που προκύπτουν μεταξύ της ανηγμένης παραμόρφωσης του σκυροδέματος (μετρημένη στο μέσο του θλιβόμενου πέλματος) και του φορτίου που εφαρμόζεται για κάθε δοκό, προκύπτει σημαντική διαφορά στη μορφή των καμπύλων μεταξύ των ενισχυμένων και μη ενισχυμένων δοκών. Συγκεκριμένα υπάρχει μια όμοια αύξηση της παραμόρφωσης για όλες τις δοκούς και για χαμηλά φορτία. Μετά την ρηγμάτωση οι παραμορφώσεις των μη ενισχυμένων δοκών αυξάνονται, σχεδόν γραμμικά, όμως μετά την διαρροή η αύξηση είναι ραγδαία, σε αντίθεση με τις ενισχυμένες δοκούς όπου η παραμόρφωση του σκυροδέματος συνεχίζει να αυξάνεται γραμμικά και μετά τη διαρροή του χάλυβα. (σχήμα 2.2). Αυτά τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ο οπλισμός ενίσχυσης συμβάλει στην μείωση της ανηγμένης παραμόρφωσης του σκυροδέματος, διατηρώντας μεγαλύτερο το ύψος της θλιβόμενης ζώνης.





Σχόλιο:

Στην παραπάνω εργασία εξετάζεται η επίδραση του μήκους του FRP στην καμπτική ενίσχυση δοκών. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που αποδεικνύεται και σε αυτή την εργασία, είναι ότι η επέκταση του οπλισμού ενίσχυσης έως τα άκρα της δοκού αποτελεί τον ευκολότερο και αποτελεσματικό τρόπο ενίσχυσης, όσο αφορά το μοντέλο αστοχίας και την πλαστιμότητα της ενισχυμένης δοκού.

Πίνακας 2.4 Αποτελέσματα της εργασίας των Fanning and Kelly (2001)

Δοκός	Μήκος CFRP(ρ) Μm	Απόσταση φορτίου P από τη στήριξη(α) mm	ρ/α λόγος	Φορτίο στη διαρροή kN	Φορτίο στην αστοχία kN	Πλαστιμότητα <sup>1</sup>	Μοντέλο αστοχίας
F1	μη ενισχυμένη		0.00	53.0	68.3	3.86	Διαρροή χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
F2	μη ενισχυμένη		0.00	53.5	67.9	3.71	Διαρροή χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
F3	3000	1100	1.00	82.9	110.9	1.84	Διατμητική αστοχία σκυροδέματος
F4	3000	1100	1.00	83.6	118.5	1.92	Διατμητική αστοχία σκυροδέματος
F5	2030	715	0.65	85.6	100	1.55	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F6	2030	715	0.65	85.6	103	1.57	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F7	1876	638	0.58	83.7	97.5	1.44	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F8	1876	638	0.58	-	64.0	1.15	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F9	1700	550	0.50	-	62.0	1.08	Αποκόλληση στο άκρο του FRP
F10	1700	550	0.50	78.3	82.0	1.22	Αποκόλληση στο άκρο του FRP

<sup>1</sup> η πλαστιμότητα ορίζεται ως ο λόγος του βέλους κάμψης κατά την αστοχία προς αυτό κατά τη διαρροή.



Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα ενισχύσεων γεφυρών με τη μέθοδο επικολλούμενων σύνθετων υλικών. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται μια συνοπτική περιγραφή της επέμβασης και συμπεράσματα της εργασίας αυτής.

#### *1.5.1.4 Stalling, Tedesco, El-Mihilmy, McCauley (2000)*

Η γέφυρα που εκλέχθηκε να ενισχυθεί, βρίσκεται στην εθνική οδό Alabama. Είναι επτά ανοιγμάτων και κατασκευάστηκε το έτος 1952. Το στατικό μήκος κάθε ανοίγματος θεωρήθηκε 9910mm. Το πλάτος της γέφυρας είναι 7320mm, είναι δύο διευθύνσεων και το κατάστρωμα κάθε ανοίγματος στηρίζεται σε τέσσερις δοκούς. Λόγω αύξησης του ανώτατου ορίου βαρέων οχημάτων συγκριτικά με τα φορτία σχεδιασμού, παρατηρήθηκαν βλάβες με την μορφή πολλαπλών καμπτικών ρωγμών κυρίως κοντά και γύρω από τις στηρίξεις.

Το ένα από τα επτά ανοίγματα ενισχύθηκε με FRP. Από τις τέσσερις δοκούς του ανοίγματος, τοποθετήθηκε έλασμα από άνθρακα στο εφελκούμενο πέλμα κάθε δοκού και στις τρεις από αυτές τοποθετήθηκε έλασμα από ίνες γυαλιού σε κάθε πλευρά των δοκών. Το FRP δεν αγκυρώθηκε στις κάτω γωνίες των δοκών για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. Ο στόχος της ενίσχυσης ήταν 20% αύξηση της καμπτικής αντοχής και επομένως το ποσοστό του καμπτικού οπλισμού ενίσχυσης που τοποθετήθηκε ήταν ανάλογο. Η επίδραση των πλευρικών GFRP θεωρήθηκε αμελητέα όσο αφορά την καμπτική ενίσχυση, αλλά τοποθετήθηκαν με σκοπό την αύξηση της δυσκαμψίας της διατομής και την αντίσταση στο άνοιγμα καμπτικών ρωγμών. Ως κόλλα χρησιμοποιήθηκε εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα πριν και μετά την ενίσχυση των δοκών. Ως φορτίο θεωρήθηκε τριαξονικό βαρύ όχημα (346kN ανά άξονα) και επακολούθησαν στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Σημειώνονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα:

1. Χρησιμοποιώντας μια απλή διαδικασία επιτεύχθηκε η εφαρμογή των ταινιών FRP στις δοκούς. Εκτός από το συνηθισμένο τεχνικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε γενικές επεμβάσεις γεφυρών, απαραίτητο μηχανήμα αποτελούσε μια αντλία κενού (αεραντλία) η οποία ασκούσε σταθερή πίεση στο FRP κατά την επικόλληση του.



2. Η ενίσχυση των δοκών μείωσε τις τάσεις των εσωτερικών οπλισμών από 4 έως 12% κατά την στατική φόρτιση και από 4 έως 9% κατά την δυναμική φόρτιση. Επίσης μετρήθηκε μείωση του βέλους κάμψης στο μέσο του ανοίγματος από 2 έως 12% κατά την στατική φόρτιση και από 7 έως 12% κατά την δυναμική φόρτιση. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι ο εξωτερικός οπλισμός συμμετείχε ενεργά στην ανάληψη τάσεων.
3. Ένας περισσότερο αναλυτικός υπολογισμός της ροπής αδράνειας των διατομών των δοκών απαιτείται ώστε να προκύψει η ακριβής απόδοση του εξωτερικού οπλισμού, αφού ο κλασικός υπολογισμός της ροπής αδράνειας της ισοδύναμης ρηγματωμένης διατομής απέδειξε αύξηση 5% λόγω ενίσχυσης, ενώ η μείωση του βέλους κάμψης προέκυψε πολύ μεγαλύτερη.
4. Η μείωση του βέλους κάμψης και των τάσεων του οπλισμού, ήταν μεγαλύτερη στις τρεις δοκούς που ενισχύθηκαν ταυτόχρονα με GFRP στις πλευρές και με CFRP στο πέλμα του σκυροδέματος, συγκριτικά με την δοκό που ενισχύθηκε μόνο στο εφελκούμενο πέλμα της, συνιστώντας την χρήση πλευρικών ταινιών GFRP, χαμηλού κόστους, για αύξηση της δυσκαμψίας της διατομής σε συνδυασμό με το καμπτόμενο CFRP έλασμα που προκαλεί αύξηση του καμπτικού φορτίου αντοχής.

#### Σχόλιο:

Κατά την ενίσχυση της παραπάνω γέφυρας, όπως προκύπτει από τα δεδομένα, το ποσοστό του οπλισμού ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν μικρό, ανάλογο με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όμως με τον τρόπο αυτό η πιθανότητα το μοντέλο αστοχίας της γέφυρας να μετατραπεί σε ψαθυρό είναι μικρότερη. Επίσης το καμπτόμενο έλασμα επεκτάθηκε έως τις στηρίξεις και δεν χρησιμοποιήθηκε επιπλέον μηχανισμός αγκύρωσης, μέθοδος που θεωρείται ικανοποιητική για την απόδοση της αγκύρωσης.

#### ***2.5.1.5 Hag-Elsafi, AlaMPalli, and Kunin (2001)***

Αυτή η μελέτη εξετάζει την χρήση ινοπλισμένων πολυμερών με σκοπό την ενίσχυση της δοκού μιας γέφυρας στην Νέα Υόρκη. Η γέφυρα είχε υποστεί ζημιές λόγω υγρασίας,



στα άκρα της δοκού (σημεία ένωσης), με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών λόγω πήξης-τήξης και αποφλοίωση του σκυροδέματος σε διάφορα σημεία. Οι παραπάνω λόγοι, καθώς και η έλλειψη σημαντικών εγγράφων σχετικά με τον σχεδιασμό της γέφυρας, δηλαδή τις διαστάσεις και τον τύπο των οπλισμών, την αντοχή του σκυροδέματος, και τα φορτία σχεδιασμού, έκαναν απαραίτητη την επέμβαση.

Η γέφυρα είναι πέντε στενών λωρίδων, ενός ανοίγματος και η διατομή της πλακοδοκού είναι μορφής «Τ». Κατασκευασμένη το 1932 και με μέσο φόρτο 30.000 οχήματα καθημερινά, αποτελείται από 26 δοκούς κατά πλάτος σε απόσταση 1370mm, ενώ το συνολικό μήκος της είναι 12,19m και το συνολικό πλάτος 36,58m.

Η διαδικασία της επέμβασης περιλαμβάνει καμπτική ενίσχυση των πελμάτων των δοκών και των πελμάτων των πλακών, καθώς και επικόλληση μανδυών (jackets), μορφής «U», με σκοπό την μείωση των καμπτικών ρωγμών, την αποδοτικότερη αγκύρωση του εξωτερικού οπλισμού, αλλά και την ενίσχυση της δοκού σε διάτμηση. Τέλος, ως υλικά χρησιμοποιήθηκαν ανθρακούφασματα διάφορων κύριων διευθύνσεων, στόκος και ρητίνη. Η γέφυρα εξετάστηκε πριν και μετά την ενίσχυση, στην κατάσταση λειτουργικότητας.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική φόρτιση παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Οι τάσεις των διαμήκων οπλισμών μειώθηκαν σχετικά, ενώ οι καμπτικές και οι διατμητικές τάσεις του σκυροδέματος αυξήθηκαν .
2. Ο εξωτερικός οπλισμός συμμετείχε στην ανάληψη φορτίων παρότι δεν είχε επιτευχθεί συνάφεια σε κάθε περιοχή της δοκού.
3. Το ύψος του ουδέτερου άξονα αυξήθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο. Το συνολικό κόστος της επέμβασης υπολογίστηκε \$300.000, ενώ για την αντικατάσταση της γέφυρας είχε προϋπολογιστεί ως κόστος \$1.200.000.



### 2.5.2 Τοποθέτηση και επικόλληση σύνθετων υλικών, μέσω ρητίνης, σε εγκοπές (NSM FRP applications)

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην εισαγωγή ελασμάτων από σύνθετα υλικά κατακόρυφα μέσα σε εγκοπές που δημιουργούνται κατά μήκος των πελμάτων δοκών ή πλακών. Το ινοπλισμένο πολυμερές παραμένει σταθερό μέσα στην εγκοπή, μέσω ισχυρής εποξειδικής κόλλας παρόμοια ή ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται στην προαναφερόμενη μέθοδο, των εξωτερικά επικολλούμενων FRP. Το μέγεθος της εγκοπής και του FRP που χρησιμοποιείται, καθώς και ο αριθμός των εγκοπών εξαρτάται από την ποσότητα του οπλισμού που απαιτείται για την ενίσχυση. Στην σχήμα (2.1b) παρουσιάζεται μια τυπική διατομή δοκού αυτής της μεθόδου ενίσχυσης με σύνθετα υλικά. Η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών κατακόρυφα μέσα σε εγκοπές συνηθίζεται στην καμπτική ενίσχυση των στηρίξεων (αρνητική ροπή). Στην περίπτωση αυτή η δημιουργία των εγκοπών είναι ιδιαίτερα εύκολη και εφικτή. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα καινούργια κυρίως στην Ελλάδα.

Παρακάτω παρουσιάζονται πειραματικές μελέτες αυτής της μεθόδου κάτω από στατική μονοτονική φόρτιση.

#### *2.5.2.1 Taljsten (2002)*

Στην μελέτη αυτή, εξετάζονται τέσσερις δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής και συγκεκριμένα εξετάζεται το μήκος αγκύρωσης και ο μηχανισμός επικόλλησης του σύνθετου οπλισμού όταν αυτός τοποθετείται με την υπό μελέτη μέθοδο. Οι τρεις από τις δοκούς ενισχύονται με CFRP, ενώ η τέταρτη δοκός παραμένει μη ενισχυμένη ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και η εξαγωγή συμπερασμάτων (control beam). Οι δοκοί έχουν μήκος ανοίγματος 4000mm και διαστάσεις διατομής 200mm πλάτος και 300mm ύψος. Σε όλες τις δοκούς τοποθετείται ως διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός 2Φ16, ως διαμήκης θλιβόμενος οπλισμός 2Φ16, και ως διατμητικός οπλισμός κατακόρυφοι συνδετήρες Φ10 ανά 75mm.

Σε κάθε ενισχυμένη δοκό έγιναν δύο σειρές εγκοπών στο εφελκόμενο πέλμα μέσα στις οποίες τοποθετήθηκε το FRP. Συγκεκριμένα στη δοκό E4 οι εγκοπές εκτείνονται σε



όλο το μήκος της δοκού έως και τις στηρίξεις ενώ η σταθερότητα και η ανάπτυξη συνάφειας μεταξύ του CFRP και του σκυροδέματος επιτυγχάνεται με τη χρήση εποξειδικής ρητίνης. Στις δοκούς E3 και C3 οι σειρές εκτείνονται σε ένα μήκος 3000 χιλιοστών συμμετρικά τοποθετημένες ως προς το μέσο του ανοίγματος. Στη δοκό E3 το FRP επικολλάται με εποξειδική ρητίνη ,ενώ στη δοκό C3 με τσιμεντοκονία. Όλα τα δοκίμια φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά ασκούμενες ως προς το μέσο του ανοίγματος και η καθεμιά σε απόσταση 1800mm από το άκρο της δοκού.

Τα αποτελέσματα από τα παραπάνω πειράματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5, ενώ παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα:

1. Η δοκός E4 επέδειξε την καλύτερη συμπεριφορά ως προς τον μηχανισμό αστοχίας, αφού παρατηρήθηκε αστοχία του CFRP.
2. Οι δοκοί E3 και C3 αστόχησαν λόγω έλλειψης επαρκούς αγκύρωσης και συγκριτικά η δοκός E3 επέδειξε περισσότερο πλαστική συμπεριφορά από την δοκό C3.
3. Η μέθοδος αυτή ενίσχυσης είναι αποτελεσματική και επιδεικνύει μεγαλύτερη αντοχή στην αστοχία, καλύτερη προστασία έναντι της φωτιάς και του βανδαλισμού και της κρούσης σε σύγκριση με την μέθοδο των εξωτερικά επικολλούμενων σύνθετων υλικών.

Πίνακας 2.5 Αποτελέσματα εργασίας Taljsten (2002)

Δοκός	Διαστάσεις mm	Αρχικός σπλισμός		CFRP		Φορτίο αστοχίας kN	Βέλος κάμψης mm	Ανηγμένη παραμόρφωση του CFRP %
		Κάμψη	Διάτμηση	Μήκος mm	Κόλλα			
C3	b = 200 h = 300 L <sub>s</sub> = 3600	2 Φ 16	Συνδετήρες Φ10 ανά 75 mm	3000	Τσιμεντο- κονία	123.5	43.0	0.74
E3				3000	Εποξειδική ρητίνη	140.0	51.5	1.12
E4				4000	Εποξειδική ρητίνη	152.0	58.5	1.15
Ελέγχου				Μη ενισχυμένη		79.0	24.0	—



#### Σχόλια:

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της παραπάνω εργασίας εύκολα συμπεραίνεται ότι η υπό μελέτη μέθοδος ενίσχυσης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική. Συγκεκριμένα οι ενισχυμένες δοκοί παρουσιάζουν αυξημένη καμπτική αντοχή αλλά και πλαστιμότητα συγκριτικά με τη μη ενισχυμένη δοκό. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη επαρκούς οπλισμού διάτμησης και του μεγάλου μήκους των δοκών με αποτέλεσμα μειωμένες διατμητικές ρωγμές στις οποίες οφείλεται πολλές φορές η αποκόλληση του FRP. Σημειώνεται ότι ο τρόπος τοποθέτησης του ινοπλισμένου πολυμερούς αναμένεται να αυξάνει την αντοχή συνάφειας. Και σε αυτή τη μέθοδο ενίσχυσης, όπως και στην προαναφερόμενη, η επέκταση του ινοπλισμένου πολυμερούς έως τις στηρίξεις, προσδίδει καλύτερα αποτελέσματα στο μοντέλο αστοχίας αφού αποφεύγεται η πρόωρη αποκόλληση του FRP.

#### *2.5.2.2 De Lorenzis, Micelli, and La Tegola (2002)*

Σε αυτή την πειραματική μελέτη εξετάζονται έξι δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος για να ερευνηθεί η επίδραση του ποσοστού του οπλισμού ενίσχυσης και η αναλογία του με τον αρχικό οπλισμό της δοκού. Οι διαστάσεις των δοκών είναι 200mm πλάτος×400 mmύψος×4300mm μήκος. Στις τρεις από τις δοκούς (α- σειρά δοκών) τοποθετείται ως διαμήκης εφελκυσμένος οπλισμός 2Φ14 ενώ στις υπόλοιπες τρεις (β- σειρά) τοποθετήθηκαν 2Φ18. Και τα δύο ποσοστά οπλισμών, 35% και 59% αντίστοιχα, ξεπερνούν τον ελάχιστο οπλισμό σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό (ACI). Και στις δύο σειρές δοκών τοποθετήθηκε ως διαμήκης θλιβόμενος οπλισμός 2Φ12, ενώ ως διατμητικός οπλισμός, κατακόρυφοι συνδετήρες Φ8 ανά 200mm.

Από κάθε μία σειρά, μία δοκός παρέμεινε δοκός ελέγχου (οι BC-a ,BC-b) , ενώ οι δοκοί BR1-a, BR1-b, ενισχύθηκαν με μία σειρά CFRP Φ8. Οι περισσευούμενες δοκοί BR2-a, BR2-b, ενισχύθηκαν με δύο σειρές CFRP Φ8. Σε όλες τις ενισχυμένες δοκούς οι εγκοπές, μέσα στις οποίες τοποθετήθηκε το CFRP, είναι τετραγωνικής μορφής με διαστάσεις 16mm





βάθος×16mm πλάτος και σε όλες χρησιμοποιήθηκε εποξειδική ρητίνη για την επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης. Επίσης, σε όλες τις δοκούς το CFRP εκτείνεται σε όλο το μήκος τους και σε όλες εφαρμόστηκαν δύο δυνάμεις συμμετρικά ως προς το μέσο του ανοίγματος και η καθεμιά σε απόσταση 1750mm από το άκρο της δοκού.

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6, ενώ παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα:

1. Η ενίσχυση με αυτή την μέθοδο αυξάνει την καμπτική αντοχή σημαντικά, με μέσο όρο αύξησης της καμπτικής αντοχής στην αστοχία από 21,3% έως 60,6% ,σε αυτή την μελέτη, και όμοια αύξηση στην διαρροή.
2. Μέτρια αύξηση της δυσκαμψίας παρατηρήθηκε.
3. Στην απώλεια συνάφειας αναμένεται να οφείλεται ο μηχανισμός αστοχίας, αν έχει αποφευχθεί η διατμητική αστοχία
4. Οι δοκοί με το μεγαλύτερο ποσοστό οπλισμού CFRP αστόχησαν από σύνθλιψη σκυροδέματος, ενώ σε αυτές με το μικρότερο ποσοστό, η αστοχία προήλθε από απώλεια συνάφειας και αποκόλληση.
5. Τέλος, μικρότερη απόσταση μεταξύ των εγκοπών στο πέλμα της δοκού, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το φορτίο και την ρηγμάτωση κατά την αποκόλληση.

#### *2.5.2.3 Korff and Scherer (2002)*

Στην μελέτη αυτή παρουσιάζονται δύο διαφορετικά πειράματα που αναφέρονται στην ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, με την υπό εξέταση μέθοδο κάτω από στατική μονοτονική φόρτιση. Και τα δύο πειράματα συγκρίνουν τις δύο μεθόδους, αυτή της τοποθέτησης και επικόλλησης των CFRP κατακόρυφα σε εγκοπές στο πέλμα της δοκού, και αυτής της εξωτερικής επικόλλησης των CFRP μέσω ρητίνης. Επειδή στην μελέτη αυτή δεν γίνεται αναλυτική περιγραφή των δοκιμών παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα:





- Οι δοκοί που ενισχύθηκαν με μέθοδο NSM επέδειξαν σημαντική αύξηση της καμπτικής αντοχής και μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε σχέση με τις δοκούς που ενισχύθηκαν με μέθοδο CAA.
- Στις δοκούς της μεθόδου NSM αναπτύχθηκε ισχυρότερη συνάφεια με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη μεταφορά των τάσεων από το FRP στο σκυρόδεμα και άρα αύξηση των φορτίων αντοχής.
- Η προετοιμασία της διεπιφάνειας είναι λιγότερη σημαντική κατά την μέθοδο ενίσχυσης NSM, ενώ στην περίπτωση των εξωτερικά επικολλούμενων σύνθετων υλικών, η καλή προετοιμασία της διεπιφάνειας είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη της συνάφειας.
- Τέλος η τοποθέτηση του CFRP σε εγκοπές με στόχο την ενίσχυση δοκών παρέχει μεγαλύτερη προστασία έναντι της φωτιάς και άλλων μηχανικών φθορών με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους προστασίας των οπλισμών.

Πίνακας 2.6 Αποτελέσματα πειράματος De Lorenzis et al (2002)

Δοκός	Διαστάσεις mm	Αρχικός οπλισμός		CFRP	Πειραματικά αποτελέσματα	
		Κάμψη	Διάτμηση		Φορτίο αστοχίας kN	Μοντέλο αστοχίας
BC-a	b = 200      h = 400      L <sub>s</sub> = 4000	2 Φ14	Συνδεδετές Φ8 ανά 200 mm	-	60.6	Διαρροή χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
BC-b		2 Φ18		-	103.1	Διαρροή χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
BR1-a		2 Φ14		1 - 8 mm	84.7	Διαρροή χάλυβα και αποκόλληση του FRP
BR1-b		2 Φ18		1 - 8 mm	125.1	Διαρροή χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
BR2-a		2 Φ14		2 - 8 mm	97.3	Διαρροή χάλυβα και αποκόλληση του FRP
BR2-b		2 Φ18		2 - 8 mm	135.4	Διαρροή του χάλυβα, αποκόλληση του FRP και στη συνέχεια σύνθλιψη του σκυροδέματος



Παρακάτω παρουσιάζεται η μοναδική αναφερόμενη στη βιβλιογραφία, πραγματική επέμβαση με την μέθοδο της τοποθέτησης και επικόλλησης FRP σε εγκοπές στο πέλμα της δοκού.

#### **2.5.2.4 Taljsten (2002)**

Η επέμβαση έγινε το φθινόπωρο του 1999 σε μια γέφυρα οπλισμένου σκυροδέματος στην Σουηδία, λόγω ενός κατασκευαστικού λάθους. Κατά την επέμβαση δεν ενισχύθηκε το εφελκυσμένο πέλμα της δοκού της γέφυρας, αλλά το θλιβόμενο κατάστρωμα της γέφυρας. Αρχικά, υποψήφιες μέθοδοι για την ενίσχυση ήταν, η υπό εξέταση και η μέθοδος των εξωτερικά επικολλούμενων FRP. Τελικά επιλέχθηκε η μέθοδος των FRP τοποθετημένων μέσα σε εγκοπές για οικονομικούς λόγους και επιπλέον τα πλεονεκτήματα της μεθόδου στον χρόνο εφαρμογής της, στην αποτελεσματικότερη προστασία από τις συνθήκες διάβρωσης καθώς και η συγκρινόμενη με τον χάλυβα δυσκαμψία που προσφέρει η μέθοδος, λήφθηκαν υπόψη στην επιλογή της μεθόδου.

Ο οπλισμός που τοποθετήθηκε είχε διαστάσεις 5mm πλάτος×35mm ύψος και τοποθετήθηκε σε εγκοπές που δημιουργήθηκαν, διαστάσεων 8mm ×40mm. Μέχρι σήμερα η επέμβαση θεωρείται επιτυχής.

#### **2.5.3 Εφαρμογή σύνθετων υλικών μέσω ήλων (Powder-Actuated Fastened FRP applications)**

Η ενίσχυση δοκών εφαρμόζοντας σύνθετα υλικά μέσω ήλων είναι μια καινούργια στη σύλληψη μέθοδος εφαρμογής των FRP's στο πεδίο των Πολιτικών Μηχανικών. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση ενός ειδικού εκτοξευτήρα το οποίο τρυπάει το FRP έλασμα και την επικάλυψη του σκυροδέματος ,εισάγοντας μικρό ήλο. Καθώς ο ήλος διαπερνά το σκυροδέμα, αυτό μετακινείται και θλίβεται, ενώ ο ήλος παραμορφώνεται, δημιουργώντας τριβή. Η τριβή που δημιουργείται από αυτή την διαδικασία δημιουργεί συνθήκες συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του ήλου. Ο αριθμός των σειρών των ήλων και η απόσταση που απέχουν μεταξύ τους εξαρτάται από τις διαστάσεις της δοκού και



από την επιτρεπόμενη ολίσθηση που γίνεται αποδεκτή κατά την μελέτη. Το είδος του ελάσματος από σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται σε αυτή την μέθοδο θα πρέπει να μην ρηγματωθεί ή να καταστραφεί μετά την εισαγωγή του ήλου. Ως πιο κατάλληλο για χρήση θεωρείται ένα υβρίδιο έλασμα το οποίο αποτελείται από ανθρακούφασματα διάφορων κύριων διευθύνσεων κατασκευασμένο με την μέθοδο της εκβολής μέσω εποξειδικής ρητίνης. (Borowicz, 2002)

Στο σχήμα 2.1c παρουσιάζεται μια τυπική ενισχυμένη διατομή όπου το FRP εφαρμόζεται μέσω ήλων.

Παρακάτω παρουσιάζονται πειραματικές μελέτες από την διεθνή βιβλιογραφία, που εξετάζουν την εφαρμογή σύνθετων υλικών μέσω μικρών ήλων σε δοκούς κάτω από στατική μονοτονική φόρτιση.

#### *2.5.3.1 Ray, Scott, Lamanna, and Bank (2000)*

Η μελέτη αυτή εξετάζει 15 μεγάλης κλίμακας και 35 μικρής κλίμακας, δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένες με την υπό εξέταση μέθοδο.

Τα δοκίμια μικρής κλίμακας έχουν τετραγωνικές διατομές διαστάσεων 153mm×153mm και μήκος 1220mm. Στις δοκούς αυτές τοποθετείται ως διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός 2 ράβδοι διαμέτρου 12,7mm, ως θλιβόμενος οπλισμός 2 ράβδοι διαμέτρου 9,5mm, ενώ ως διατμητικός οπλισμός τοποθετούνται συνδετήρες διαμέτρου 6,4mm ανά 58mm. Για τις δοκούς χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών σκυροδέματα με αντοχές 21 MPa και 42 MPa, καθώς και ποικιλία ελασμάτων από σύνθετα υλικά και τύπων ήλων.

Οι δοκοί μεγάλης κλίμακας, με διαστάσεις διατομής 305mm×350mm και μήκος 3658mm, εξετάστηκαν για να ερευνηθεί η επίδραση του μεγέθους των ήλων, αφού χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο σειρές δοκών τα διαθέσιμα καρφιά εμπορίου (ίδιων διαστάσεων).

Από τις δύο σειρές δοκών, μικρής και μεγάλης κλίμακας, μία δοκός παρέμεινε ελεγχόμενη χωρίς να ενισχυθεί (δοκός ελέγχου), ενώ πρόσθετα, από τις υπόλοιπες δοκούς



μερικές ενισχύθηκαν και με τη μέθοδο των εξωτερικά επικολλούμενων σύνθετων υλικών ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των δύο μεθόδων. Και οι 50 δοκοί φορτίστηκαν στατικά με δύο δυνάμεις εφαρμοσμένες συμμετρικά ως προς το μέσο του ανοίγματος.

1. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων απέδειξαν επιρροή της κλίμακας της δοκού στην υπό εξέταση μέθοδο μέσω της σημαντικά μεγαλύτερης αύξησης της αντοχής στην περίπτωση των δοκών μικρής κλίμακας. Προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα πειράματα μικρής κλίμακας μπορούν μόνο να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση παραμέτρων, ενώ τα πειράματα μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στη ανάπτυξη κριτηρίων σχεδιασμού.
2. Πρόσθετα αποτελέσματα απέδειξαν ότι στην σειρά μικρής κλίμακας, οι δοκοί με την μικρότερη αντοχή σκυροδέματος επέδειξαν μικρότερη αύξηση καμπτικής αντοχής μετά την ενίσχυση, συγκριτικά με τις δοκούς μεγαλύτερης αντοχής σκυροδέματος. Αυτό μάλλον οφείλεται στην αρχική μεγαλύτερη ρηγμάτωση κατά την εισαγωγή του ήλου στο περισσότερο ψαθυρό και υψηλότερης αντοχής σκυρόδεμα.
3. Οι ενισχυμένες δοκοί με την μέθοδο των εξωτερικά επικολλούμενων FRP, επέδειξαν την μεγαλύτερη αύξηση της καμπτικής αντοχής από όλα τα δοκίμια. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε αύξηση 20% στην διαρροή και στην αστοχία, για τις δοκούς μεγάλης κλίμακας όπου το FRP επικολλήθηκε με ρητίνη, ενώ για τις αντίστοιχες δοκούς όπου το FRP εφαρμόστηκε με μικρούς ήλους η αύξηση της καμπτικής αντοχής κυμαινόταν από 14% έως 19% στη διαρροή και στην αστοχία, ανάλογα με τον τύπο του FRP και του ήλου. Η μικρότερη αύξηση της καμπτικής αντοχής οφείλεται στην λιγότερο αποτελεσματική μεταφορά των δυνάμεων από το FRP στο σκυρόδεμα μέσω των ήλων.
4. Οι δοκοί που ενισχύθηκαν με την υπό εξέταση μέθοδο επέδειξαν μεγαλύτερη πλαστιμότητα κατά την αστοχία, σε σύγκριση με την καταστροφική ψαθυρή αστοχία των δοκών με τα εξωτερικά επικολλούμενα FRP's.
5. Το σημαντικότερο συμπέρασμα σύμφωνα με τους Ray et al (2000) παρουσιάζεται παρακάτω: Στις περιπτώσεις επεμβάσεων όπου η ταχύτητα και η ευκολία κατά την τοποθέτηση αποτελούν σημαντικούς παράγοντες, η εφαρμογή σύνθετων υλικών μέσω



ήλων αποτελεί την αποτελεσματικότερη λύση. Παραμένει όμως κάτω από μελέτη η διάρκεια αντοχής αυτής της μεθόδου, λόγω της μεγάλης ανάπτυξης τάσεων γύρω από τον εισαγόμενο ήλου που μπορεί να έχει ως επίπτωση την κόπωση της σύνδεσης.

### 2.5.3.2 Borowicz (2002)

Στην μελέτη αυτή εξετάστηκαν συνολικά 19 δοκοί μεγάλης κλίμακας με σκοπό την διερεύνηση της καταλληλότητας της μεθόδου ενίσχυσης με FRP εφαρμοσμένα μέσω ήλων στην περίπτωση δοκών γεφυρών. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν 9 δοκοί μορφής «Τ» και πρόσθετα 10 δοκοί με ορθογωνική διατομή για την μελέτη της επίδρασης του μήκους του FRP και τη συμπεριφορά κάτω από κυκλική φόρτιση. Η εργασία αυτή αποτελεί συνέχεια των πειραμάτων των Lammana et al (2001).

#### Α) Δοκοί μεγάλης κλίμακας διατομής «Τ»

Οι δοκοί αυτής της μορφής διαιρέθηκαν σε τρεις σειρές ανάλογα με το ποσοστό του εφελκόμενου διαμήκη σπλισμού. Η πρώτη σειρά δοκών, Α3,οπλίζεται με τρεις ράβδους διαμέτρου 28,6mm, η δεύτερη σειρά, Α5, οπλίζεται με πέντε ράβδους ίδιας διαμέτρου, ενώ η τρίτη σειρά με οχτώ ράβδους. Και στις τρεις σειρές δοκών τοποθετείται ως θλιβόμενος διαμήκης σπλισμός δέκα ράβδοι διαμέτρου 12,7mm. Ο κορμός της πλακοδοκού έχει διαστάσεις 305mm πλάτος( $b_w$ ), και 559mm ύψος( $h_w$ ), ενώ η πλάκα έχει πλάτος( $b_f$ ) 1524mm και ύψος( $h_f$ ) 203mm. Όλες οι δοκοί έχουν άνοιγμα 8534mm και φορτίζονται με δύο δυνάμεις που απέχουν 1524mm συμμετρικές ως προς το μέσο του ανοίγματος. Δύο τύποι ήλων χρησιμοποιήθηκαν, οι Χ-ALH 47 και Χ-ALH 52 με μοναδική διαφορά το μήκος τους, 46,5mm και 51,3mm αντίστοιχα. Οι ήλοι μεγαλύτερου ύψους χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με διπλά ελάσματα FRP, τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο. Δύο σειρές ήλων εφαρμόστηκαν και η απόσταση μεταξύ τους ήταν 51mm και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Σε κάθε δοκό επιβλήθηκαν πέντε κύκλοι φορτίσεων έως τα 464,4KNm και πίσω στο μηδέν, ώστε να ρηγματωθούν πριν να ενισχυθούν. Μετά την εφαρμογή των FRP's κάθε



δοκίμιο φορτίστηκε μονοτονικά έως την αστοχία. Στον πίνακα 2.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

#### Β) Δοκοί μεσαίας κλίμακας και τετραγωνικής διατομής

Οι δέκα δοκοί με διαστάσεις διατομής 305mm×305mm, φορτίστηκαν με δύο δυνάμεις συμμετρικά εφαρμοσμένες ως προς το μέσο του ανοίγματος και διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους. Όλες οι δοκοί οπλίστηκαν με 2 ράβδους διαμέτρων 9,5mm ως θλιβόμενο οπλισμό, με 2 ράβδους διαμέτρων 25,4mm ως εφελκυστικό οπλισμό και με κλειστούς συνδετήρες διαμέτρων 12,6mm ανά 102mm ως διατμητικό οπλισμό. Δύο διαφορετικά είδη ελασμάτων χρησιμοποιήθηκαν. Ως «μαύρο έλασμα» ορίστηκε αυτό με την μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή ίση με 655MPa και μέτρο ελαστικότητας 56,539 GPa. Ως «γκρι έλασμα» ορίστηκε αυτό με εφελκυστική αντοχή 359MPa και μέτρο ελαστικότητας 56,539 GPa. Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται σε ελάσματα λαμβάνοντας υπόψη τις σπές που δημιουργούνται λόγω των ήλων. Όλοι οι ήλοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου Χ-ALH 47, αφού δεν χρησιμοποιήθηκαν διπλά ελάσματα. Τα δοκίμια αυτά διαιρέθηκαν σε ομάδες ανάλογα με τα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων, ενώ κανένα από αυτά δεν ρηγματώθηκε πριν να ενισχυθεί. Στον πίνακα 2.8 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων.





Πίνακας 2.7 Αποτελέσματα της εργασίας Borowicz, 2002 (Δοκοί διατομής "T")

Δοκός	Πλάτος ελάσματος (mm)	Μήκος ελάσματος (mm)	Πάχος ελάσματος (mm)	Τύπος ήλου	Διαμητικό άνοιγμα mm	# ήλων στο διαμητικό άνοιγμα	Ροπή αφαρής kNm	Ροπή αποχίας kNm	Βέλος Κάμψης στην αποχία (mm)	Μοντέλο αποχίας
A3-ελέγχου	-	-	-	-	3505	-	477	-	-	-
A3-Test1	102	7620	3,2	AL-47	3505	300	515	830	112	Αποχία ελάσματος
A3-Test2	102	8382	6,4	AL-52	3505	328	533	777	91	Διαμητική αποχία ηλών
A5-ελέγχου	-	-	-	-	3505	-	845	-	-	-
A5-Test1	102	7620	3,2	AL-47	3505	300	864	1185	152	Αποχία ελάσματος
A5-Test2	102	8433	6,4	AL-52	3505	332	895	1219	105	Διαμητική αποχία ηλών
A8-ελέγχου	-	-	-	-	3505	-	1288	-	-	-
A8-Test1	102	7620	3,2	AL-47	3505	300	1302	1749	147	Αποχία ελάσματος
A8-Test2	102	8433	6,4	AL-52	3505	332	1347	1722	117	Διαμητική αποχία ηλών



Πίνακας 2.8 Αποτελέσματα της εργασίας Borowicz, 2002 (Δοκοί Μεσαίας Κλίμακας)

Δοκός	Φόρτιση	Έκταση	# ελασμάτων	Termination Length <sup>1</sup> mm	Διαστητικό άνοιγμα mm	# ήλων στο διαστητικό άνοιγμα	Ροπή διαφροδής kNm	Ροπή αποχίας kNm	Βέλος Κάμψης στην αποχία mm	Κύκλοι φορτίσεων	Μοντέλο αποχίας
UW1	Μονοτονική	-	-	-	1372	-	114	129	52	n/a	Σύνθετη σκυροδέματος
UW2	Μονοτονική	Γκρι	1	102	1372	52	127	144	36	n/a	Αστοχία ελάσματος
UW3	2 Hz	Μαύρο	1	102	1372	52	Ελάχιστο εφαρμοσμένο φορτίο = 30.2 kN Μέγιστο εφαρμοσμένο φορτίο = 121 kN			1,780,00	Αστοχία χάλυβα κατά την προετοιμασία του πειράματος
UW4	Μονοτονική	Γκρι	1	51	686	26	Δεν αναφέρεται	146	Δεν αναφέρεται	n/a	Αστοχία ελάσματος
UW5	Μονοτονική	Γκρι	1	51	940	36	Δεν αναφέρεται	162	Δεν αναφέρεται	n/a	Αστοχία ελάσματος
UW6	Μονοτονική	Μαύρο	1	102	1295	48	125	157	48	n/a	Σύνθετη σκυροδέματος
UW7	Μονοτονική	Μαύρο	1	254	1346	44	125	157	49	n/a	Σύνθετη σκυροδέματος
UW8	Μονοτονική	Μαύρο	1	305	1372	44	125	160	55	n/a	Σύνθετη σκυροδέματος
UW9	Μονοτονική	Μαύρο	2	102	1372	52	138	176	54	n/a	Αποκόλληση
UW10	2 Hz	Μαύρο	1	102	1372	52	Ελάχιστο εφαρμοσμένο φορτίο = 30.2 kN Μέγιστο εφαρμοσμένο φορτίο = 121 kN			759,000	Αστοχία εσωτερικού σπλισμού

<sup>1</sup> Μήκος από το πέρασ του FRP έως την κοντινότερη στήριξη





Επίσης τα σημαντικότερα συμπεράσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η υπό εξέταση μέθοδος είναι αποτελεσματική κατά την ενίσχυση δοκών μεγάλης κλίμακας με βασικά πλεονεκτήματα την γρήγορη και εύκολη εφαρμογή της. Παρότι κατά την εισαγωγή του ήλου διασπάται το σκυρόδεμα τοπικά, δεν επηρεάζεται η ενίσχυση. Συγκεκριμένα το μοντέλο επέδειξε αύξηση της καμπτικής αντοχής από 1,1% έως 11,7% κατά την διαρροή και από 3,9% έως 27,2% κατά την αστοχία.
2. Η απόσταση των πρώτων ήλων από την στήριξη επηρεάζει το μοντέλο αστοχίας των ενισχυμένων δοκών. Από τα πειράματα των πλακοδοκών παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη απόσταση από την στήριξη, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αστοχίας του FRP γύρω από τους ήλους και στη συνέχεια ολίσθηση των ήλων από το έλασμα. Ακολουθεί απόσχιση η οποία ξεκινά από το πέρας του ελάσματος προς το μέσο του ανοίγματος. Αντίθετα, μικρή απόσταση των πρώτων ήλων από την στήριξη έχει ως αποτέλεσμα το «πέταγμα» τους από την επικάλυψη του σκυροδέματος και στην συνέχεια ακολουθεί απόσχιση ξεκινώντας από το μέσο του ανοίγματος προς το πέρας του ελάσματος. Στην περίπτωση των τετραγωνικών δοκών η αύξηση της απόστασης δεν απέδωσε όσο στην περίπτωση των πλακοδοκών.
3. Τα πειραματικά αποτελέσματα των τετραγωνικών δοκών απέδειξαν ότι η μέθοδος ενίσχυσης εφαρμόζοντας ινοπλισμένα πολυμερή μέσω ήλων είναι αποτελεσματική για δοκούς όταν το φορτίο εφαρμόζεται πιο κοντά στην στήριξη, παρόλο στο συγκεκριμένο πείραμα δεν μπορεί να γίνει ακριβής σύγκριση με τις ελεγχόμενες δοκούς λόγω των διαφοροποιήσεων κατά την προετοιμασία των πειραμάτων. Το φορτίο ανά ήλο για αυτά τα δοκίμια παρέμεινε κάτω από το προτεινόμενο φορτίο σχεδιασμού και ανάλυσης των 4,448 KN σύμφωνα με τους Bank et al (2000).



## 2.6 Μοντέλα Αστοχίας Ενισχυμένων Δοκών με Ινοπλισμένα Πολυμερή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα μοντέλα αστοχίας ενισχυμένων δοκών με FRP όπως κατηγοριοποιούνται από πολλούς ερευνητές λαμβάνοντας υπόψη πειράματα από την διεθνή βιβλιογραφία.

Μια σειρά από έρευνες, αποδεικνύουν ότι το μοντέλο αστοχίας μιας δοκού οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να μετατραπεί από το επιθυμητό πλάστιμο σε ιδιαίτερα ψαθυρό, όταν ενισχυθεί με σύνθετα υλικά. Οι τρόποι αστοχίας μπορούν να καταταχθούν σε δύο τύπους: Στον 1<sup>ο</sup> τύπο, συμπεριλαμβάνονται τα μοντέλα αστοχίας που επιδεικνύουν σύνθετη δράση έως την αστοχία της ενισχυμένης δοκού, ενώ στον 2<sup>ο</sup> τύπο, συμπεριλαμβάνονται εκείνα που η αστοχία οφείλεται στην απώλεια σύνθετης δράσης. (Thomson H. et al ,2002)

### 2.6.1 1<sup>ο</sup> Τύπος Αστοχιών

Οι τρόποι αστοχίας που ανήκουν στον 1<sup>ο</sup> τύπο είναι οι ίδιοι με αυτούς των μη ενισχυμένων δοκών ,και συγκεκριμένα:

#### 2.6.1.1 Διαρροή του χάλυβα ακολουθούμενη από αστοχία του FRP.

Για σχετικά χαμηλά ποσοστά χάλυβα και FRP, η καμπτική αστοχία μπορεί να προκληθεί από την αστοχία του FRP αφού έχει προηγηθεί η διαρροή του χάλυβα, ενώ το σκυροδέμα δεν έχει συνθλιβεί. Το μοντέλο αυτό προϋποθέτει αποτελεσματική αγκύρωση του εξωτερικού οπλισμού.(σχήμα 2.4 α)

#### 2.6.1.2 Διαρροή του χάλυβα ακολουθούμενη από συντριβή του σκυροδέματος:

Η καμπτική αντοχή της δοκού οφείλεται στη διαρροή του χάλυβα η οποία προηγείται της σύνθλιψης του σκυροδέματος, ενώ το σύνθετο υλικό παραμένει ανεπηρέαστο. Ο τρόπος αυτός αστοχίας παρατηρείται στις περιπτώσεις υποοπλισμένων δοκών, πριν και μετά την ενίσχυση.(σχήμα 2.4 b)



### **2.6.1.3 Σύνθλιψη σκυροδέματος πριν τη διαρροή του χάλυβα.**

Σε περιπτώσεις υψηλού ποσοστού οπλισμού, η αστοχία της δοκού είναι δυνατό να προέρχεται από σύνθλιψη του σκυροδέματος, ενώ ο χάλυβας δεν έχει ακόμα διαρρεύσει και το FRP δεν έχει ακόμα αστοχήσει. Ο τρόπος αυτός αστοχίας δεν είναι καθόλου επιθυμητός, αφού χαρακτηρίζεται από ψαθυρότητα και αποδεικνύει ότι: α) η καμπτική ενίσχυση μιας ήδη υπεροπλισμένης δοκού δεν αποτελεί λύση β) κατά την ενίσχυση μιας υποοπλισμένης δοκού θα πρέπει το ποσοστό του επιπλέον οπλισμού που θα τοποθετηθεί να μην την μετατρέψει σε υπεροπλισμένη δοκό.

### **2.6.1.4 Διατμητική αστοχία**

Σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατό η δοκός να ξεπεράσει την διατμητική της αντοχή προτού αστοχήσει καμπτικά. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν λόγω της ενίσχυσης του στοιχείου αυξηθεί η καμπτική αντοχή του σε ένα σημείο όπου η διατμητική αντοχή έχει ξεπεραστεί. Η αστοχία αυτή είναι ιδιαίτερα ψαθυρή και η αποφυγή της απαιτεί οπλισμό διάτμησης. (σχήμα 2.4 c)

### **2.6.1.5 Αστοχία από υπερβολικό βέλος κάμψης**

Η αστοχία αυτή είναι αποδεκτή και ιδιαίτερα επιθυμητή εφόσον όμως έχουν εξασφαλιστεί οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας. Όμως η πραγματοποίηση της είναι δυνατή, μόνο αν το σύστημα της διεπιφάνειας επιτρέπει μεγάλες ολισθήσεις χωρίς σημαντική απώλεια αντοχής, το οποίο είναι σχετικά σπάνια περίπτωση αφού η ολίσθηση προέρχεται από τοπική αστοχία είτε του σκυροδέματος (επικάλυψη) είτε του μέσου ένωσης (κόλλας ή ήλου). (Καραμπίνης Α, Πανταζοπούλου)

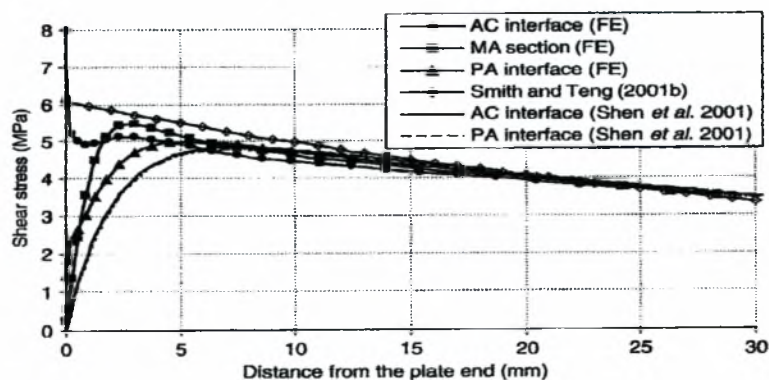


### 2.6.2 2<sup>ο</sup> Τύπος Αστοχιών

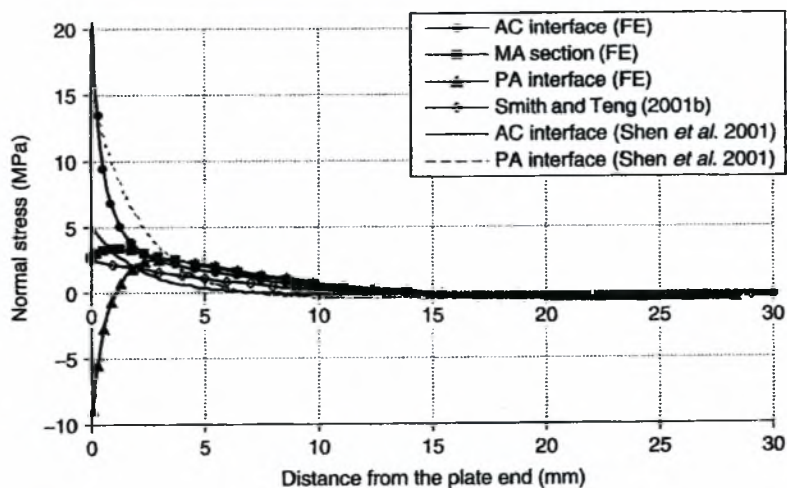
Παρακάτω παρουσιάζονται τα μοντέλα που ανήκουν στον 2<sup>ο</sup> τύπο αστοχιών συγκεκριμένα για καθεμιά από τις μεθόδους ενίσχυσης.

#### 2.6.2.1 Εξωτερικά επικολλούμενα FRP's μέσω ρητίνης:

Για την περιγραφή των τάσεων συνάφειας που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια του σκυροδέματος και του FRP χρησιμοποιείται το εξής μοντέλο. Με τη δημιουργία μιας ρωγμής αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις που δρουν παράλληλα στη διεπιφάνεια του συστήματος και τείνουν να μετακινήσουν το σκυρόδεμα οριζόντια σε σχέση με την ρητίνη και ορθές τάσεις που δρουν κατακόρυφα στη διεπιφάνεια και τείνουν να την «ανοίξουν» (Aprile A. et al 2001). Εισάγεται μια κατανομή των διατμητικών και ορθών τάσεων κατά μήκος του σύνθετου οπλισμού με τα εξής χαρακτηριστικά: α) Οι διατμητικές τάσεις είναι μηδέν στο πέρας του FRP και για ένα μικρό τμήμα του, όσο το πάχος της κόλλας, παίρνουν την μέγιστη τιμή τους πριν αρχίσουν πάλι να μειώνονται. β) Οι ορθές τάσεις είναι σημαντικές στο ίδιο μικρό τμήμα του FRP και σχεδόν μηδενίζονται σε μια απόσταση περίπου ίση με 3-4 φορές το πάχος της κόλλας. (Teng et al 2001a). Στη σχήμα 2.3 παρουσιάζονται αποτελέσματα από ανάλυση των διατμητικών και ορθών τάσεων με πεπερασμένα στοιχεία από τους Teng et al (2001a). Τέλος, η μέγιστη τιμή των διατμητικών και των ορθών τάσεων αυξάνεται με την αξονική δυσκαμψία (δυστενία) του FRP και με την απόσταση του τέλους του από την στήριξη της δοκού. (Aprile A. et al 2001).



Σχήμα 2.3α Προβλεπόμενες διατμητικές τάσεις της διεπιφάνειας σκυροδέματος -FRP



Σχήμα 2.3 b Προβλεπόμενες ορθές τάσεις της διεπιφάνειας σκυροδέματος -FRP

#### 2.6.2.1.1 Απώλεια συνάφειας στο πέρας του FRP:

Στη περιοχή της αγκύρωσης, το μοντέλο αυτό αστοχίας οφείλεται στην μεταφορά διατμητικών τάσεων από το FRP μέσω της ρητίνης στο σκυρόδεμα. Η μέγιστη τιμή των διατμητικών τάσεων οφείλεται στη γεωμετρική ασυνέχεια της τομής στο άκρο του σύνθετου υλικού. Η τυπική αυτή διατμητική αστοχία εκδηλώνεται με την απόσχιση ενός στρώματος σκυροδέματος μαζί με το FRP η οποία συνεχίζεται οριζόντια προς το μέσο του ανοίγματος. Το πάχος του στρώματος που αποκολλάται αναφέρεται ότι ποικίλει από μερικά χιλιοστά (σχήμα 2.4e) έως ολόκληρη την επικάλυψη σκυροδέματος (σχήμα 2.4d). Το παραπάνω μοντέλο αστοχίας παρατηρείτε στις εξής περιπτώσεις:

Τρόποι αντιμετώπισης αστοχίας στα άκρα του FRP:

- Επέκταση του οπλισμού ενίσχυσης κοντά στις στηρίξεις .
- Αύξηση του πλάτους του FRP μειώνοντας τις διατμητικές και ορθές τάσεις.
- Ιδιαίτερη πρόβλεψη στα σημεία αγκύρωσης με στόχο την επιβολή εγκάρσιας πίεσης στα άκρα του ελάσματος/ταινίας. Συγκεκριμένα η εξασφάλιση μπορεί να γίνει μέσω ενσωματωμένων διατμητικών συνδέσμων ή με χρήση εξωτερικών συνδέσμων σχήματος «U», οι οποίοι μπορεί να είναι είτε μεταλλικοί είτε από FRP. Προκειμένου να είναι αποτελεσματικοί, πρέπει να επεκτείνονται μέχρι τη θλιβόμενη ζώνη του στοιχείου, όπου και να αγκυρώνονται.



### Σχόλιο

Πολλές πειραματικές μελέτες σημειώνουν τη σημασία της αποκόλλησης του FRP από το άκρο του ως μοντέλο αστοχίας. Υποστηρίζεται ότι η συχνότητα αυτού του τρόπου αστοχίας οφείλεται στην επίδραση της κλίμακας των δοκιμών. Ο οπλισμός ενίσχυσης είναι διαθέσιμος σε διακεκριμένα μεγέθη και γεωμετρίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στα μικρότερα δοκίμια το σύστημα του οπλισμού ενίσχυσης να προσφέρει μεγαλύτερη δυσκαμψία σε σύγκριση με την περίπτωση μεγάλης κλίμακας δοκιμών. Από πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι συνήθως η αστοχία οφείλεται στην απώλεια συνάφειας στη μέση του ανοίγματος σε μεγάλης κλίμακας δοκούς. Οι Harmon and Harries(2003) παρουσιάζουν αναλυτική και παραμετρική έρευνα σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά της συνάφειας μεταξύ κόλλας και FRP. Μερικοί από τους παράγοντες που παρουσιάζονται:

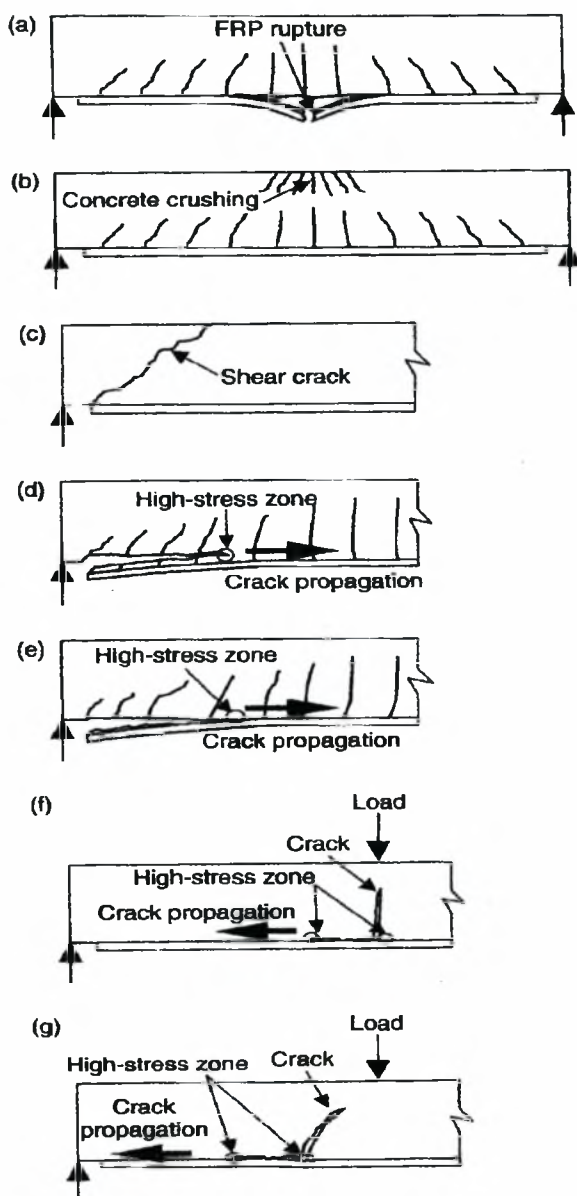
- Η αντοχή του σκυροδέματος και κυρίως η διατμητική αντοχή του.
- Η δυσκαμψία της επικάλυψης του σκυροδέματος, σε σύγκριση με την
- Δυσκαμψία του FRP, και την
- Δυσκαμψία της κόλλας

#### 2.6.2.1.2 Απώλεια συνάφειας στο μέσο του ανοίγματος:

Από τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα, προκύπτει ότι η απώλεια συνάφειας συνήθως παρατηρείται στο μέσο περίπου του ανοίγματος, όπου το σκυρόδεμα είναι ρηγματωμένο. Η συγκέντρωση των διατμητικών τάσεων γύρω από τις καμπτικές ρωγμές και τον οπλισμό που έχει διαρρεύσει, οδηγούν στη διάδοση οριζόντιων ρωγμών στη διεπιφάνεια και σε τοπική αποκόλληση του FRP.(σχήμα 2.4f) Επίσης η αποκόλληση του ινοπλισμένου πολυμερούς μπορεί να οφείλεται στο κατακόρυφο και οριζόντιο άνοιγμα ενδεχόμενων καμπτοδιατμητικών ρωγμών (σχήμα 2.4 g). Στην περίπτωση αυτή η ροπή αντοχής είναι ανάλογη του αθροίσματος των δυσμησιών του υπάρχοντος οπλισμού και του οπλισμού ενίσχυσης που είναι υπεύθυνοι για τη δράση βλήτρου. Το παραπάνω μοντέλο αστοχίας παρατηρείτε στις εξής περιπτώσεις:



- Μεγάλο διατμητικό άνοιγμα
- Πέρασ του FRP πολύ κοντά στην στήριξη



Σχήμα 2.4 Μοντέλα αποτυχίας για την μέθοδο ενίσχυσης CAA (Smith and Teng, 2002)





### ***2.6.2.2 Τοποθέτηση και επικόλληση του FRP μέσα σε εγκοπές μέσω ρητίνης***

Οι δοκοί ενισχυμένοι με αυτή την μέθοδο επιδεικνύουν παρόμοιους τρόπους αστοχίας με αυτούς της προαναφερόμενης μεθόδου ενίσχυσης. Επίσης το FRP τοποθετημένο μέσα σε εγκοπές στο πέλαμα της δοκού, προσφέρει μεγαλύτερη αντίσταση κατά την απόσχιση του FRP από το άκρο του. Και σε αυτή την μέθοδο ενίσχυσης τα μοντέλα αστοχίας που ανήκουν στον 2<sup>ο</sup> τύπο οφείλονται στην απώλεια συνάφειας, και συγκεκριμένα:

#### **2.6.2.2.1 Αποκόλληση του FRP(μια σειρά)**

Η απόσχιση του FRP κατά μήκος χαρακτηρίζεται από ένα τυπικό θόρυβο αποδεικνύοντας τις εσωτερικές μικρό- ρηγματώσεις στην κόλλα και στη συνέχεια την μόρφωση κεκλιμένων και μεγάλων ρηγματώσεων του σκυροδέματος γύρω και κατά μήκος της εγκοπής. Τελικά, ξεκινώντας από το σημείο της μέγιστης ροπής και συνεχίζοντας κατά μήκος, αποκολλάται ένα μέρος της επικάλυψης του σκυροδέματος μαζί με το FRP. Ο τρόπος αυτός αστοχίας είναι ιδιαίτερα καταστροφικός και ψαθυρός.

#### **2.6.2.2.2 Αποκόλληση του FRP (περισσότερες από μία σειρές)**

Το μοντέλο αυτό αστοχίας εκδηλώνεται όμοια με την περίπτωση μιας σειράς οπλισμού ενίσχυσης. Η αποκόλληση του FRP συνοδεύεται με ταυτόχρονη απόσχιση και ενός μέρους ή ολόκληρης της επικάλυψης του σκυροδέματος κατά μήκος της δοκού έως τα άκρα της. Το μοντέλο αυτό αστοχίας οδηγεί και σε επιπλέον συμπεράσματα που αφορούν την ενίσχυση δοκών με περισσότερες από μία σειρές FRP. Ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης αναμένεται να μειώνει την πιθανότητα αποκόλλησης, η σχετικά μικρή απόσταση των εγκοπών συνιστά υψηλότερες τάσεις στο σκυρόδεμα, γύρω από αυτές, οδηγώντας σε μια μη αναμενόμενη και προβλεπόμενη αστοχία. Επομένως θεωρείται απαραίτητο ένα ελάχιστο όριο απόστασης των εγκοπών το οποίο θα επηρεάζεται από την απόσταση των εσωτερικών οπλισμών.





Συμπερασματικά διαφαίνεται ότι η αναμενόμενη αστοχία αυτής της μεθόδου ενίσχυσης είναι η αποκόλληση του FRP, όταν η δοκός συμπεριφέρεται καμπτικά. (Lorenzis et al, 2002).

### ***2.6.2.3 Εφαρμογή του FRP εξωτερικά στο πέλμα, μέσω ήλων***

Η μέθοδος ενίσχυσης δοκών που βασίζεται στην εφαρμογή FRP εξωτερικά στο εφελκούμενο πέλμα της μέσω μικρών ήλων, παρουσιάζει την μεγαλύτερη πλαστιμότητα κατά την αστοχία συγκριτικά με τις προαναφερόμενες μεθόδους. Συγκεκριμένα αναφέρεται ως «αυξανόμενος ψευδο-πλάστιμος μηχανισμός αστοχίας» αφού η πλαστιμότητα εκδηλώνεται μέσω μικρορηγματώσεων στο σκυρόδεμα και ταυτόχρονη αστοχία στο FRP έλασμα γύρω από τους ήλους. Τελικά η αστοχία προέρχεται από την σύνθλιψη του σκυροδέματος, ενώ το FRP έλασμα παραμένει σταθερό και πολλές φορές δύσκολα μετακινείται και μετά το πέρας του πειράματος.

Οι αστοχίες που ανήκουν στον 2<sup>ο</sup> τύπο, οφείλονται στην αστοχία των ήλων και συγκεκριμένα:

#### **2.6.2.3.1 Διατμητική αστοχία ήλων(ψαλιδισμός)**

Οι ήλοι λειτουργούν ως μέσο μεταφοράς των εφελκυστικών δυνάμεων από το σκυρόδεμα στο FRP, μέσω διατμητικών τάσεων συνάφειας. Όταν οι διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται στον κοχλία ξεπεράσουν την διατμητική του αντοχή ο κοχλίας αστοχεί διατμητικά. Το μοντέλο αυτό αστοχίας είναι ιδιαίτερα ψαθυρό και είναι δυνατό να οφείλεται είτε στο μικρό ποσοστό ήλων που χρησιμοποιούνται, είτε στην ποιότητα τους και συγκεκριμένα τη διατμητική αντοχή τους.



#### 2.6.2.3.2 Εφελκυστική αστοχία ήλων (εξόλκευση)

Λόγω των ορθών τάσεων που μεταβιβάζονται ταυτόχρονα με τις διατμητικές μέσω των ήλων από το FRP στο σκυρόδεμα είναι δυνατό να επέλθει εφελκυστική αστοχία των καρφιών, όταν οι ορθές τάσεις που καλούνται να αναλάβουν ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή τους. Η αστοχία αυτή εκδηλώνεται με την εξόλκευση των καρφιών και αποκόλληση του FRP. Το παραπάνω μοντέλο δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερα κρίσιμο, σύμφωνα με τα λιγοστά πειράματα που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, αφού συνήθως προηγείται η θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος.

#### 2.6.2.3.3 Κόπωση

Η υπό εξέταση μέθοδος ενίσχυσης παρουσιάζει ευαισθησία σε πειράματα κόπωσης και συγκεκριμένα επιδεικνύει ένα καινούργιο μοντέλο αστοχίας όταν φορτίζεται μονοτονικά μετά την αστοχία κόπωσης του εσωτερικού σπλισμού. Το FRP έλασμα αποκολλάται κατά μήκος στο ύψος των ήλων ενώ αυτοί παραμένουν ανέπαφοι. (Bogowicz, 2002)



## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

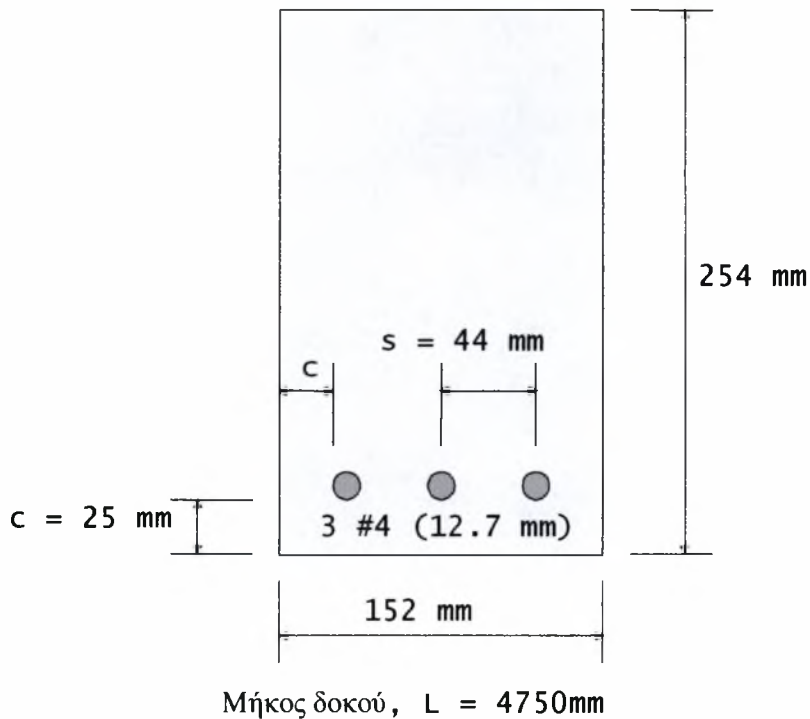
### « ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ »

Η εργασία αυτή βασίζεται στην σύγκριση της συμπεριφοράς δοκών οπλισμένου σκυροδέματος, ενισχυμένων με ινοπλισμένα πολυμερή από άνθρακα (CFRP), υπό στατική μονοτονική φόρτιση, με τρεις διαφορετικές διαθέσιμες μεθόδους καμπτικής ενίσχυσης. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι μέθοδοι ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διεξαγωγή πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

#### 3.1 Περιγραφή δοκιμών

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο κατασκευών του Πανεπιστημίου της Νότιας Καρολίνας των ΗΠΑ στις 4 Ιουνίου 2002.

Κατασκευάστηκαν 12 δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος από μία παρτίδα σκυροδέματος από τσιμέντο Portland τύπου I (Σχήμα 3.2). Όλες οι δοκοί είχαν μήκος 4750mm και διαστάσεις διατομής 254mm ύψος(h) και 152mm πλάτος(b)(Σχήμα 3.1). Οι εννέα από τις δώδεκα δοκούς ενισχύθηκαν με σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα, ενώ οι υπόλοιπες τρεις δοκοί παρέμειναν μη ενισχυμένες και χρησιμοποιήθηκαν ως δοκοί ελέγχου(control beams). Ως εφελκόμενος διαμήκης οπλισμός τοποθετήθηκαν 3 ράβδοι διαμέτρου 12,7 mm, ενώ δεν τοποθετήθηκε θλιβόμενος οπλισμός. Οι δοκοί σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να μην απαιτείται οπλισμός διάτμησης.



Σχήμα 3.1 Τυπική διατομή μη ενισχυμένης δοκού

Σημειώνεται ότι μόνο τέσσερις από τις παραπάνω δοκούς εξετάστηκαν κάτω από μονοτονική στατική φόρτιση, ενώ οι υπόλοιπες εξετάστηκαν κάτω από κυκλική φόρτιση έως να προκληθεί αστοχία από κόπωση.

Πρόσθετα με τις δοκούς κατασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων  $152\text{mm} \times 305\text{mm}$  από την ίδια παρτίδα σκυροδέματος (Σχήμα 3.3). Οι δοκοί και οι κύλινδροι παρέμειναν κάτω από βρεγμένες λινάτσες και πλαστικά για 7 μέρες. Η θλιπτική αντοχή ( $f_c$ ) σκυροδέματος 28 ημερών και ο ενεργός χρόνος στον οποίο κάθε δοκίμιο εξετάστηκε εμπεριέχονται στον πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.2 Κατασκευή δοκιμίων



Σχήμα 3.3 Κατασκευή Κυλινδρικών δοκιμίων



Πίνακας 3.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος και χάλυβα

Δοκός	28 ημερών Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa)	Χρονικό διάστημα έως την εξέταση της δοκού (ημέρες)	Αντοχή χάλυβα (MPa)
U - S	$f_c = 29,5$  $E_c = 25790$	49	$f_y = 445,7$  $f_u = 735,2$  $E = 206850$
N - S		51	
C - S		58	
P - S		115	

Δύο εμπορικά διαθέσιμα συστήματα FRP χρησιμοποιήθηκαν στα συγκεκριμένα πειράματα. Παρακάτω περιγράφονται τα υλικά αυτά:

1. Το υλικό που αναφέρεται ως «έλασμα» είναι ένα έλασμα πλάτους 102mm, κατασκευασμένο από ανθρακοϋφάσματα διάφορων διευθύνσεων με εφελκυστική αντοχή 2791 MPa και μέτρο ελαστικότητας 155 GPa περίπου.
2. Το υλικό που αναφέρεται ως «υβρίδιο» είναι ένα έλασμα πλάτους 102mm, κατασκευασμένο από ίνες γυαλιού και άνθρακα με την μέθοδο της εκβολής χρησιμοποιώντας βηνυλιεστερική ρητίνη. Έχει εφελκυστική αντοχή 844MPa και μέτρο ελαστικότητας 61,3 GPa.

Η συμπεριφορά αυτών των υλικών θεωρείται ελαστική έως την αστοχία τους.

Στον πίνακα 3.2 και 3.3 αναφέρονται οι ιδιότητες των υλικών που δίνονται από τον κατασκευαστή. Πρόσθετα στον πίνακα 3.3 δίνεται η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας για το «υβρίδιο» όταν σε αυτό έχουν δημιουργηθεί οπές διαμέτρου 4,76mm.



Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά ελάσματος κατά ASTM Standard D-3039 όπως αναφέρονται από τον κατασκευαστή

Χαρακτηριστικά ελάσματος	Τιμές
Εφελκυστική αντοχή κύριας διεύθυνσης	2791MPa
Ανοιγμένη παραμόρφωση στην αστοχία	1.80%
Μέτρο Ελαστικότητας	154,62GPa
Εφελκυστική αντοχή κατά την δευτερεύουσα διεύθυνση	αμελητέα
Πάχος ελάσματος	1.4 mm
Αρχικό πλάτος ελάσματος	102 mm
Τελικό πλάτος ελάσματος	51 mm

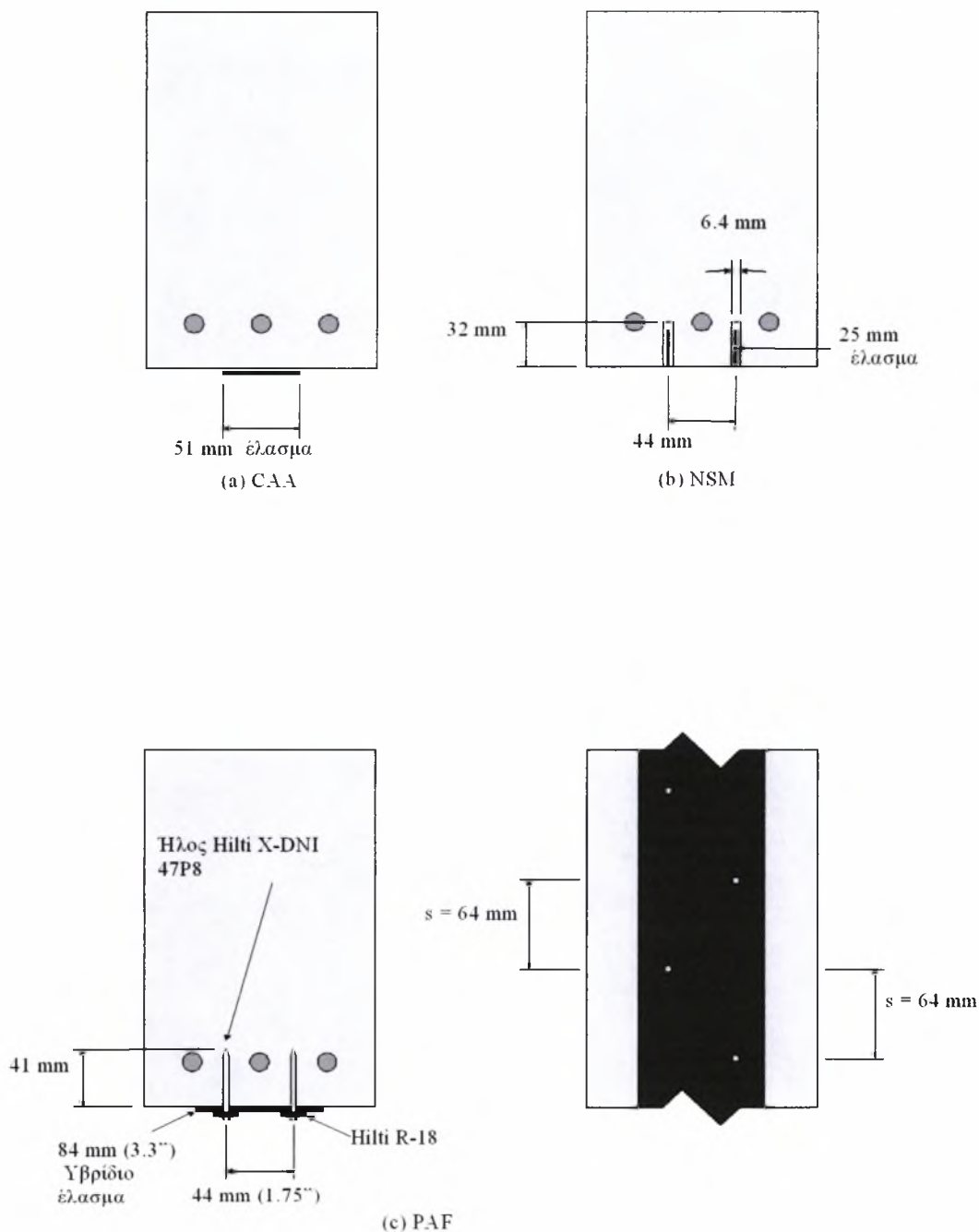
Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά «υβριδίου» ελάσματος κατά Gulbrandsen (2002).

Χαρακτηριστικά «υβριδίου» ελάσματος	Τιμές	
	Αρχικές	Με τρύπες
Εφελκυστική αντοχή κύριας διεύθυνσης	843,64Μρα	693,53Μρα
Ανοιγμένη παραμόρφωση στην αστοχία	1,38%	1,18%
Μέτρο Ελαστικότητας	61,3Gρα	54,12Gρα
Εφελκυστική αντοχή κατά την δευτερεύουσα διεύθυνση	Δεν αναφέρεται	
Πάχος υβριδίου ελάσματος	3.2 mm	
Αρχικό πλάτος υβριδίου ελάσματος	102 mm	
Τελικό πλάτος υβριδίου ελάσματος	84 mm	

### 3.2 Διαδικασία Ενίσχυσης των Δοκών

Οι δοκοί ενισχύθηκαν με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται συνοπτικά οι μέθοδοι ενίσχυσης, ενώ παρακάτω (σχήμα 3.4) παρουσιάζονται οι τυπικές διατομές των ενισχυμένων δοκών.





Σχήμα 3.4 Τυπικές διατομές ενισχυμένων δοκών

### 3.2.1 Εξωτερικά επικολλούμενα ελάσματα από FRP μέσω εποξειδικής ρητίνης

Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται το υλικό «έλασμα» από CFRP το οποίο κόπηκε στο επιθυμητό μήκος 4276mm και πλάτος 51mm .





Οι επιφάνειες των τριών δοκών που ενισχύθηκαν με αυτή την μέθοδο προετοιμάστηκαν πριν την επικόλληση των FRP ώστε η εφαρμογή των σύνθετων υλικών να γίνει με άρτιο τρόπο και να επιτευχθεί καλή συνάφεια μεταξύ της ρητίνης και του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα οι επιφάνειες σκυροδέματος όπου θα γίνει η επικόλληση θα πρέπει να είναι απαλλαγμένες σαθρού υλικού, επίπεδες, απόλυτα καθαρές, και στεγνές για το λόγο αυτό μια μέρα πριν την εφαρμογή του υλικού η επιφάνεια καθαρίστηκε με τη βοήθεια μηχανικού τροχιστή και τα υπολείμματα απομακρύνθηκαν μέσω συμπιεζόμενου αέρα. Στη συνέχεια στο εφελκυτόμο πέλμα των τριών δοκών τοποθετήθηκε μικρή στρώση εποξειδικής ρητίνης Tyfo S, σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών. Η κόλλα που χρησιμοποιήθηκε ήταν δύο συστατικών, ενός σκληρυντικού και ρητίνης σε ποσοστό 34,5 προς 100. Τα δύο αυτά συστατικά αναμείχθηκαν για 5 λεπτά σε ένα μικρής ταχύτητας μίξερ ώστε να προκύψει ένα ομοιόμορφο μείγμα. Η ρητίνη εφαρμόστηκε στα πέλματα μέσω μικρού ρολού.

Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του FRP στη δοκό διέφερε από αυτή που χρησιμοποιήθηκε κατά την προετοιμασία της επιφάνειας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε Tyfo TC δύο συστατικών, που αποτελείται από σκληρυντικό και ρητίνη σε ποσοστό 25 προς 100. Τα δύο συστατικά αναμείχθηκαν για 5 λεπτά σε μικρής ταχύτητας μίξερ 400-600rpm. Η ρητίνη πάχους 2mm εφαρμόστηκε στα πέλματα των δοκών και στη συνέχεια τοποθετήθηκε το έλασμα πιέζοντάς το πάνω στη διεπιφάνεια κατά μήκος της δοκού ώστε τυχόν φυσαλίδες να απομακρυνθούν.(σχήμα. 3.5 έως 3.9)



Σχήμα 3.5 Παρασκευή κόλλας. Τελικό προϊόν



Σχήμα 3.6 Τοποθέτηση ρητίνης μετά την προετοιμασία της επιφάνειας



Σχήμα 3.7 Επικόλληση του ελάσματος



Σχήμα 3.8 Απομάκρυνση Φυσαλίδων.



Σχήμα 3.9 Απομάκρυνση περισσευούμενης ρητίνης





### 3.2.2 Τοποθέτηση και επικόλληση FRP σε εγκοπές μέσω ρητίνης.

Και σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται «έλασμα» από CFRP το οποίο κόβεται στο επιθυμητό μήκος 4276mm και πλάτος 25mm. Το έλασμα έχει πάχος 1,4mm.

Κατά την προετοιμασία των τριών δοκών που ενισχύθηκαν με αυτή τη μέθοδο, δύο κάθετες στην επιφάνεια, εγκοπές δημιουργήθηκαν στο εφελκυσμένο πέλμα των δοκών μεταξύ των εσωτερικών οπλισμών (Σχήμα 3.10). Οι εγκοπές ήταν παράλληλες και σε όλο το μήκος των δοκών, ενώ κατά την κοπή δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην καταστραφούν οι ράβδοι χάλυβα. Συγκεκριμένα οι εγκοπές δημιουργήθηκαν στα διαστήματα μεταξύ των τριών ράβδων και είχαν ύψος 32mm και πάχος 6,4mm. Στη συνέχεια με συμπιεζόμενο αέρα καθαρίστηκε το εσωτερικό των εγκοπών από την σκόνη και τα υπολείμματα σκυροδέματος.

Μια μέρα πριν την επικόλληση του FRP, το εσωτερικό των εγκοπών προετοιμάστηκε ώστε η επιφάνεια του σκυροδέματος να είναι επίπεδη και να επιτευχθεί καλή συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και FRP. Για την προετοιμασία χρησιμοποιήθηκε ρητίνη Tyfo S δύο συστατικών σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Συγκεκριμένα η κόλλα αποτελείται από σκληρυντικό και ρητίνη βάρους με αναλογία 34,5 προς 100. Τα δύο αυτά συστατικά αναμείχθηκαν για 5 λεπτά σε μικρής ταχύτητας μίξερ ώστε να προκύψει ομοιόμορφο μείγμα. Στη συνέχεια το μείγμα εφαρμόστηκε στο εσωτερικό των εγκοπών με μια μικρή βούρτσα βαψίματος και αφέθηκε να στεγνώσει.

Και σε αυτή τη μέθοδο η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε για την επικόλληση του CFRP ήταν διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε κατά την προετοιμασία της επιφάνειας. Συγκεκριμένα έγινε χρήση της Tyfo TC δύο συστατικών και πάντα σύμφωνα με τις ενδείξεις του κατασκευαστή. Τα συστατικά της κόλλας ήταν σκληρυντικό και ρητίνη με αναλογία 25 προς 100 και αναμείχθηκαν για 5 λεπτά ώστε να προκύψει ομοιόμορφο μείγμα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν τα ελάσματα ένα-ένα, με μικρή σχετικά πίεση. Επειδή οι εγκοπές εκτεινόταν σε όλο το μήκος της δοκού, χρησιμοποιήθηκε ταινία σε κάθε άκρο της για να εμποδίσει την κόλλα να ξεχυθεί λόγω της εισαγωγής του FRP. Επιπλέον κόλλα χρησιμοποιήθηκε ώστε να απομακρυνθούν τυχόν φυσαλίδες. Τέλος το πέλμα καθαρίστηκε από τυχόν υπολείμματα κόλλας και το σύστημα αφέθηκε να στεγνώσει. (Σχήμα 3.10 έως 3.13)



Σχήμα 3.10 Κατασκευή εγκοπών στο εφελκυσμένο πέγμα των δοκών



Σχήμα 3.11 Μορφοποίηση των εσωτερικών επιφανειών με χρήση ρητίνης



Σχήμα 3.12 Τοποθέτηση ελάσματος στις εγκοπές



Σχήμα 3.13 Απομάκρυνση περισσευούμενης ρητίνης

### 3.2.3 Εφαρμογή FRP μέσω ήλων

Για την μέθοδο επιλέχθηκε «υβρίδιο» έλασμα πλάτους 84mm με αποτέλεσμα το σύστημα ενίσχυσης αυτής της μεθόδου να προσφέρει δυσκαμψία 30% περισσότερη συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Το υλικό κόπηκε στο επιθυμητό μήκος 4267mm και πλάτος 84mm.

Η επιφάνεια της δοκού όπου εφαρμόστηκε ο οπλισμός ενίσχυσης δεν προετοιμάστηκε πριν την τοποθέτηση, σε αντίθεση με τις άλλες δύο μεθόδους.

Αρχικά το «υβρίδιο» έλασμα τοποθετήθηκε συμμετρικά και με χρήση αυτοκόλλητων ταινιών επιτεύχθηκε η σταθεροποίηση του. Ξεκινώντας από το μέσο του ανοίγματος και προς τα άκρα των δοκών, ώστε να αποφευχθεί η χαλαρότητα του ελάσματος, πραγματοποιήθηκε η διάνοιξη των οπών στο «υβρίδιο» έλασμα και στη επικάλυψη





σκυροδέματος σε βάθος 13mm. Η διάνοιξη όλων των οπών δεν έγινε ταυτόχρονα, δηλαδή μετά την δημιουργία κάθε οπής ακολουθούσε η τοποθέτηση του κοχλία μέσω ειδικού εκτοξευτήρα και όμοια συνεχίστηκε η διαδικασία με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των ράβδων χάλυβα. Οι οπές είχαν σταθερή απόσταση 64mm και προς τις δύο κατευθύνσεις (σχήμα 3.4c).

Οι ήλοι που χρησιμοποιήθηκαν, εμπορικά διαθέσιμοι, είχαν διάμετρο 3,7mm και ύψος 47mm.



Σχήμα 3.14 κατασκευή οπών



Σχήμα 3.15 Τοποθέτηση ήλων

### 3.3 Ονομασία δοκιμών

Οι δοκοί του πειράματος εξετάστηκαν κάτω από στατική μονοτονική φόρτιση. Ανάλογα με τον τρόπο ενίσχυσης τους ονομάστηκαν ως εξής:

**X-Y**

Όπου ως «X» η μέθοδος ενίσχυσης:

- U = η μη ενισχυμένες δοκοί
- C = 1<sup>η</sup> μέθοδος ενίσχυσης (εξωτερικά επικολλούμενα FRP μέσω εποξειδικής ρητίνης) ή(CAA)
- N = 2<sup>η</sup> μέθοδος ενίσχυσης (επικολλούμενα FRP μέσα σε εγκοπές μέσω εποξειδικής ρητίνης) ή (NSM)





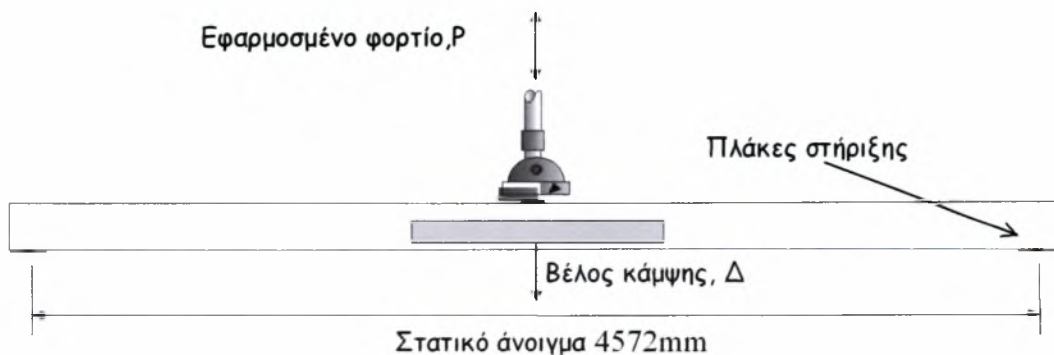
➤  $P = 3^{\text{η}}$  μέθοδος ενίσχυσης (εφαρμογή FRP μέσω ήλων) ή (PAF)

Και ως «Υ» δηλώνεται το είδος της φόρτισης:

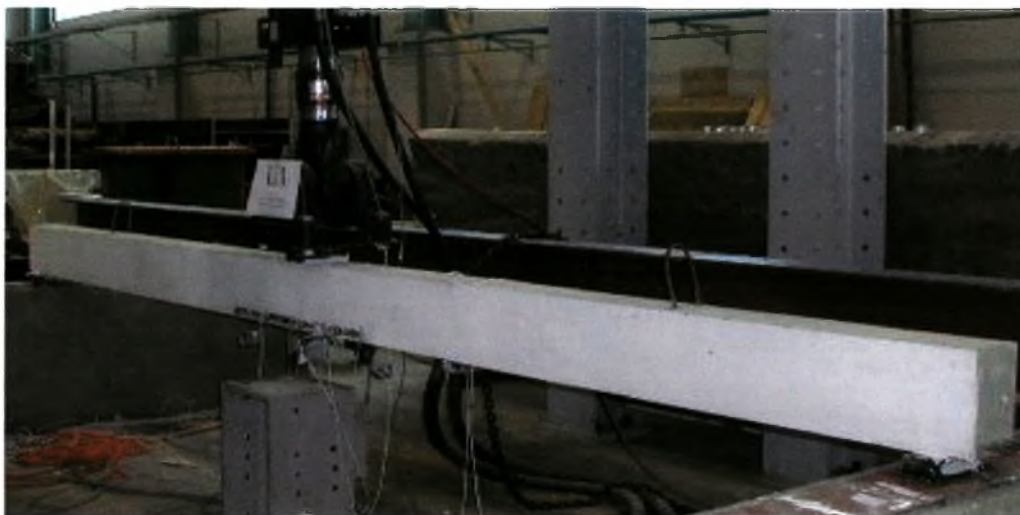
➤  $S$  = στατική μονοτονική φόρτιση.

### 3.4 Προετοιμασία πειράματος

Όλες οι δοκοί φορτίστηκαν με μία δύναμη εφαρμοσμένη στο μέσω του ανοίγματος. Για την φόρτιση χρησιμοποιήθηκε μία πρέσα MTS με μέγιστη φόρτιση (load) 489KN και μέγιστη μετακίνηση (stroke) 152mm. Το καθαρό άνοιγμα των δοκών, μεταξύ των στηρίξεων μετρήθηκε 4572mm. Σε όλες τις δοκούς χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες πλάκες στο σημείο εφαρμογής της δύναμης και στις στηρίξεις ώστε να αποφευχθεί η θραύση του σκυροδέματος λόγω συγκέντρωσης τάσεων. Η χαλύβδινη πλάκα που τοποθετήθηκε στο σημείο εφαρμογής της δύναμης είχε διαστάσεις 102mm×178mm×64mm ενώ η πλάκα των στηρίξεων είχε διαστάσεις 76mm×178mm×13mm. Επιπλέον στις στηρίξεις διασφαλίστηκαν συνθήκες «αμφιέριστης δοκού» με επιπλέον χρήση χαλύβδινων «κινητών» πλακών.(Σχήματα 3.16 και 3.17)



Σχήμα 3.16 Προετοιμασία πειράματος



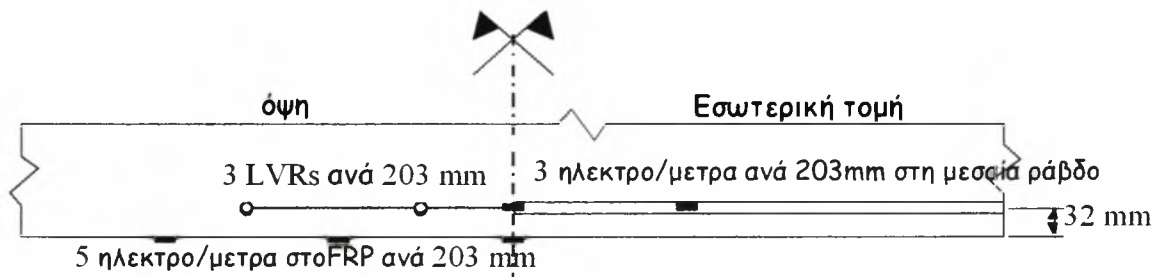
Σχήμα 3.17 Προετοιμασία πειράματος

Για την μέτρηση της παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες και συγκεκριμένα έξι μετασχηματιστές LVR (Linear Variable Resistance) στο επίπεδο των εξωτερικών ράβδων χάλυβα. Συγκεκριμένα τρεις μετασχηματιστές τοποθετήθηκαν σε κάθε πλευρά της δοκού σε απόσταση 203mm μεταξύ τους και 32mm εσωτερικά από τη πλευρά της δοκού. Επίσης σε κάθε δοκό επικολλήθηκαν τρία ηλεκτρομηκυσιόμετρα πάνω στη μεσαία ράβδο χάλυβα ανά 203mm. Η βύθιση στο μέσο του ανοίγματος μετρήθηκε με ένα επιπλέον μετασχηματιστή. Για τις δοκούς που ενισχύθηκαν με FRP, τοποθετήθηκαν επιπλέον πέντε ηλεκτρομηκυσιόμετρα στο μέσο του πλάτους των ελασμάτων και σε απόσταση 203mm μεταξύ τους. Για την 2<sup>η</sup> μέθοδο ενίσχυσης τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα τοποθετήθηκαν στη μία μόνο σειρά σπλισμού ενίσχυσης. Όλες οι μετρήσεις των αισθητήρων αποθηκεύονταν αυτόματα σε Η/Υ μέσω ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων(Σχήμα 3.18(a,b)).

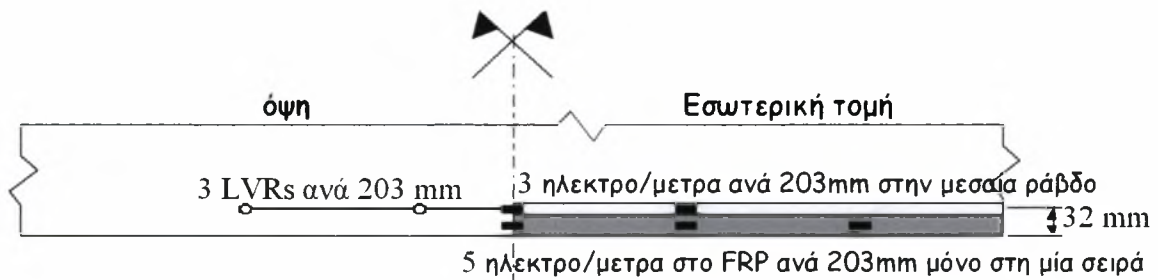
### 3.5 Πειραματικά αποτελέσματα

Οι δοκοί U-S, C-S, N-S και P-S φορτίστηκαν στατικά έως την αστοχία με ελεγχόμενη βύθιση 4,6mm ανά λεπτό. Τα συνολικά αποτελέσματα των πειραμάτων εμπεριέχονται στον πίνακα 3.4 και στο Σχήμα 3.19.

Παρακάτω δίνονται οι ακριβείς ορισμοί που εμπεριέχονται στον πίνακα:



(a) Τοποθέτηση οργάνων μέτρησης στις δοκούς U-S, C-S, P-S



(b) τοποθέτηση οργάνων μέτρησης στη δοκό N-S

Σχήμα 3.18 Τοποθέτηση αισθητήρων

**Ροπή και φορτίο ρηγμάτωσης:** Αναφέρεται ως το φορτίο και η αναπτυσσόμενη ροπή στην κρίσιμη διατομή κατά την ρηγμάτωση όπως αυτή προκύπτει από τα αντίστοιχα διαγράμματα ροπής- στροφής και διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης.

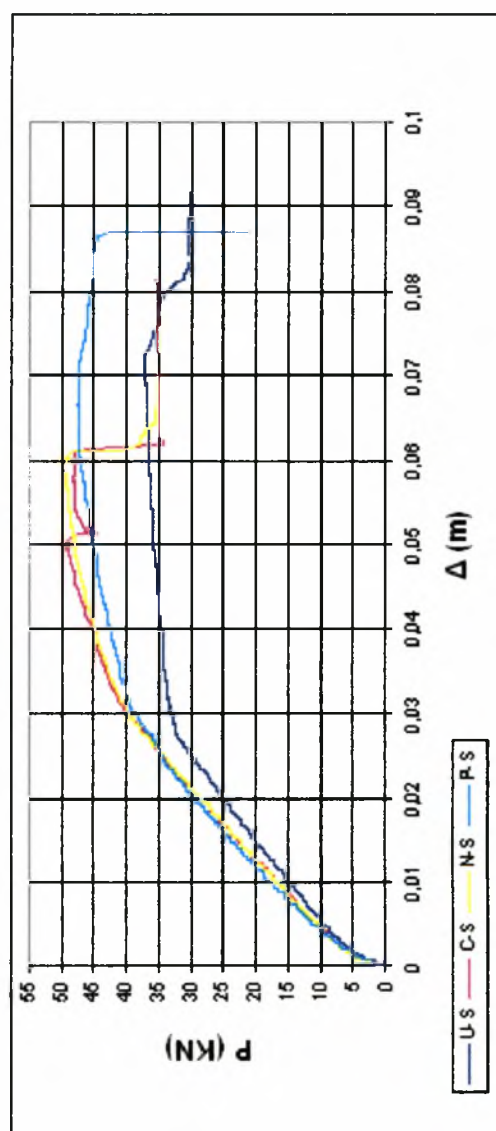
**Φορτίο και ροπή στη διαρροή:** Αναφέρεται ως το φορτίο και η αναπτυσσόμενη ροπή στην κρίσιμη διατομή στη διαρροή, όπως αυτή προκύπτει από τα αντίστοιχα διαγράμματα φορτίου - βύθισης και ροπής - στροφής με βάση την αλλαγή κλίσης δηλαδή την μείωση της δυσκαμψίας.

**Φορτίο και ροπή στην αστοχία:** Αναφέρεται ως το φορτίο αντοχής και η αναπτυσσόμενη ροπή αντοχής στην κρίσιμη διατομή κατά την αστοχία.

**Βέλος κάμψης:** Το βέλος κάμψης που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη τιμή του φορτίου (ρηγμάτωσης, διαρροής, ή αστοχίας) και προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου - βύθισης.



Πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων: Ορίζεται ως ο λόγος της βύθισης στην αστοχία προς τη βύθιση κατά τη γενική διαρροή, για κάθε δοκίμιο.



Σχήμα 3.19 Πειραματικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης δοκών



Πίνακας 3.4 Πειραματικά αποτελέσματα

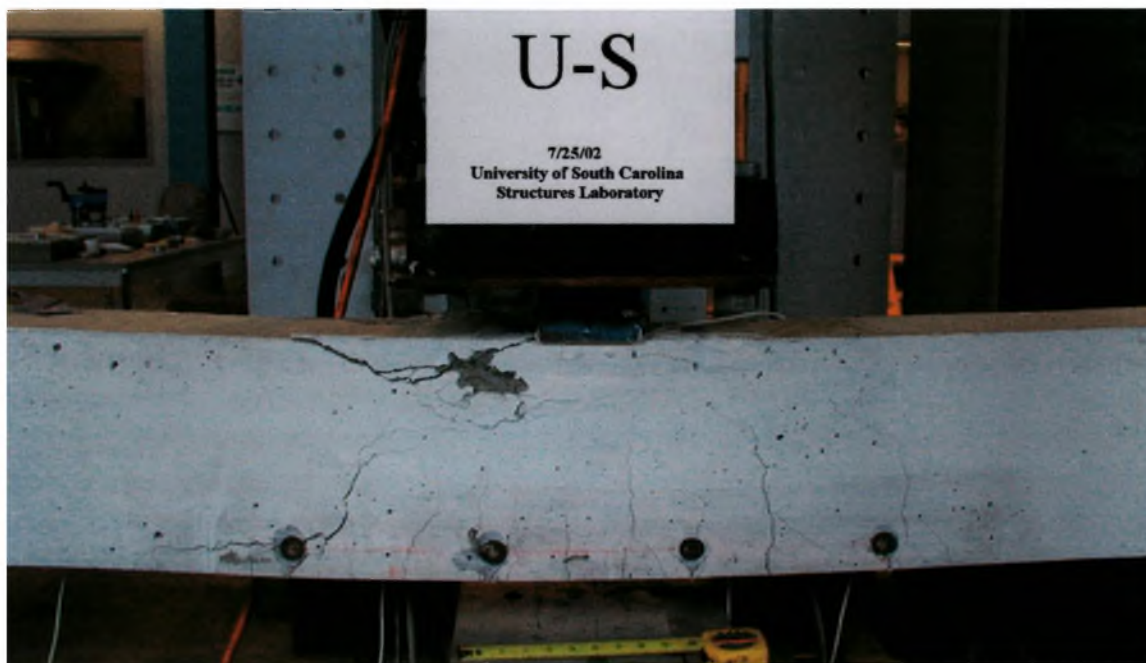
Δοκός	Φορτίο ρηγμάτωσης kN	Ροπή στην ρηγμάτωσης kNm	Φορτίο στην αρχική διαρροή kN	Ροπή στην αρχική διαρροή kNm	Βέλος κάμψης στην αρχική διαρροή mm	Φορτίο στη διαρροή kN	Ροπή στη διαρροή kNm	Βέλος κάμψης στη διαρροή mm	Φορτίο στην αποχία kN	Ροπή στην αποχία kNm	Βέλος κάμψης στην αποχία mm	Πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων
U-S	5.78	6.61	26.7	30.5	21.9	32.6	37.3	28.4	37.1	42.4	71.4	2.51
C-S	6.32	7.22	34.4	39.4	25.1	41.2	47.1	32.3	48.9	55.9	50.3	1.56
N-S	6.41	7.32	35.5	40.6	26.2	40.8	46.7	31.8	49.4	56.4	59.2	1.86
P-S	7.12	8.14	1	1	1	39.5	45.1	31.2	47.6	54.4	66.5	2.13

<sup>1</sup> μη καθορισμένη ή αναξιόπιστη τιμή αρχικής διαρροής



### 3.5.1 Δοκίμιο U-S:

Ως U-S ονομάζεται η μοναδική μη ενισχυμένη δοκός (ελεγχόμενη δοκός). Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα. Για την ρηγμάτωση προκύπτει ροπή 6,61kN ενώ σύμφωνα με το ηλεκτρομηκνσιόμετρο της μεσαίας ράβδου χάλυβα, η αρχική διαρροή προκύπτει για ροπή 30,5 kNm .Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η διαρροή παρατηρείται για τιμή ροπής 37,3 kNm και βέλος κάμψης 28,4mm. Μετά τη διαρροή η βύθιση φαίνεται να αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς χωρίς ιδιαίτερα μεγάλη αντίστοιχη αύξηση του φορτίου. Τέλος η αστοχία συμβαίνει για ροπή 42,4 kNm και αντίστοιχη βύθιση 71,4mm.Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η εικόνα της δοκού μετά το τέλος του πειράματος. Η συμπεριφορά της δοκού ήταν η αναμενόμενη: επέδειξε διαρροή του εφελευόμενου χάλυβα και την μεγαλύτερη πλαστιμότητα από όλα τα δοκίμια, σε ποσοστό 2.51.



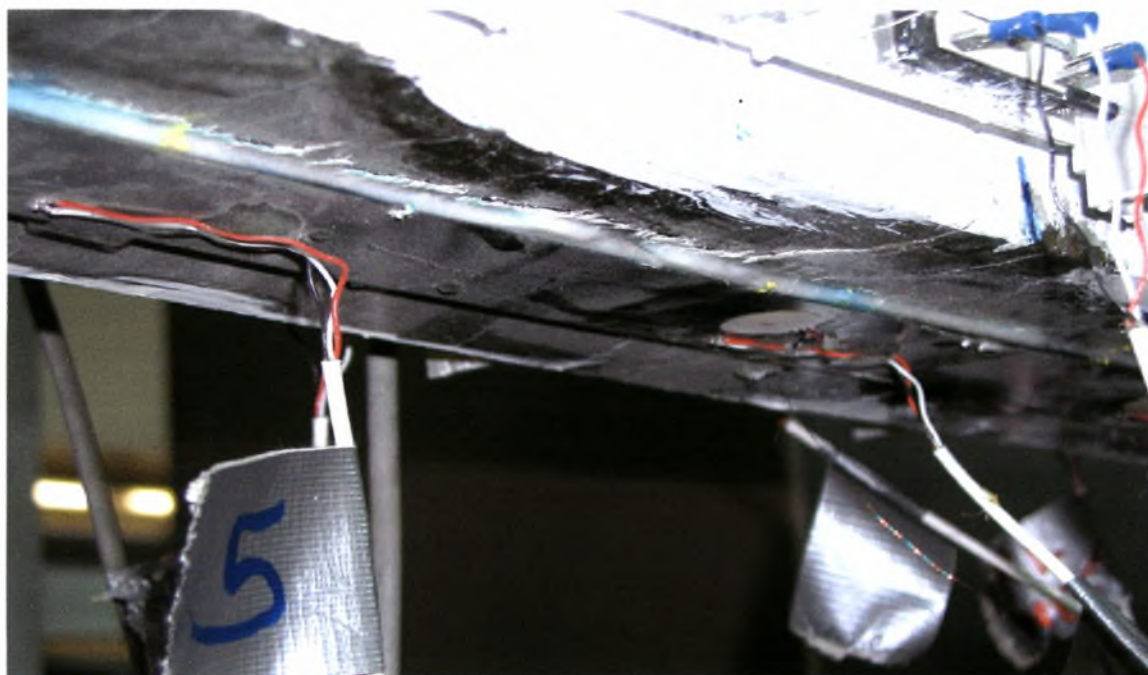
Σχήμα 3.20 Τελική μορφή μη ενισχυμένης δοκού U-S. Οι κύκλοι στη δοκό είναι τα σημεία στα οποία εφαρμόζαν οι μετασχηματιστές.





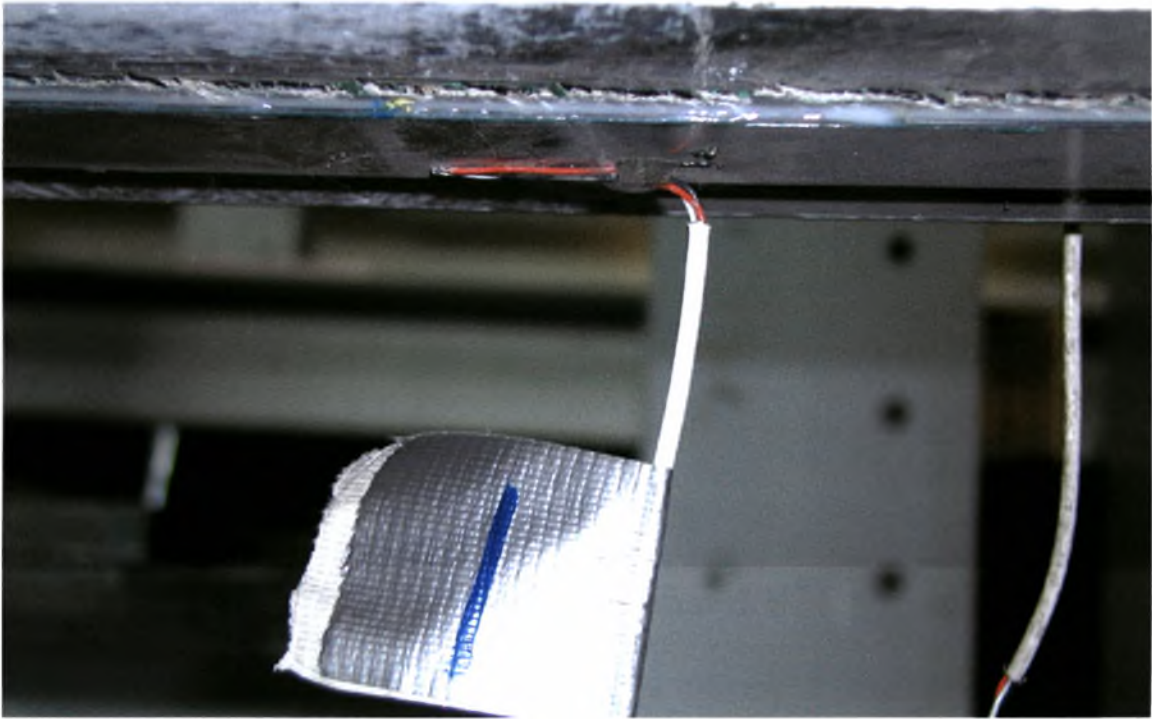
### 3.5.2 Δοκίμιο C-S:

Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - βύθισης για την δοκό που ενισχύθηκε με την 1<sup>η</sup> μέθοδο, όπως έχει προαναφερθεί. Η ροπή ρηγμάτωσης προέκυψε 7,22kNm. Από τις μετρήσεις των επιμηκυνσιομέτρων προέκυψε αρχική διαρροή της μεσαίας ράβδου για ροπή 39,4kNm με αποτέλεσμα την κορύφωση της διαρροής για ροπή 47,1kNm και βύθιση 32,3mm στο μέσο του ανοίγματος. Η αστοχία της δοκού επέρχεται για ροπή 55,9kNm και βύθιση 50,3mm και οφείλεται σε μερική αποκόλληση του CFRP σε απόσταση 200-400mm βόρεια του μέσου του ανοίγματος. (Σχήματα 3.21 και 3.22). Η αποκόλληση του ελάσματος αναπτύχθηκε στο επίπεδο της επικάλυψης του σκυροδέματος και σε κανένα άλλο τμήμα της δοκού, εκτός από το προαναφερόμενο. Στη συνέχεια και για περαιτέρω αύξηση του φορτίου, το δοκίμιο δεν ανακτά την αντοχή του, αλλά συνεχίζεται η αποκόλληση του FRP προς το άκρο της δοκού και ολοκληρώνεται σχεδόν αμέσως. Στα σχήματα 3.23 και 3.24 παρουσιάζεται η μορφή της δοκού C-S και του αποκολλημένου CFRP αντίστοιχα, μετά το τέλος του πειράματος. Η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων για τη δοκό αυτή μετρήθηκε 1,56 και είναι η μικρότερη που καταγράφηκε σε όλα τα δοκίμια.

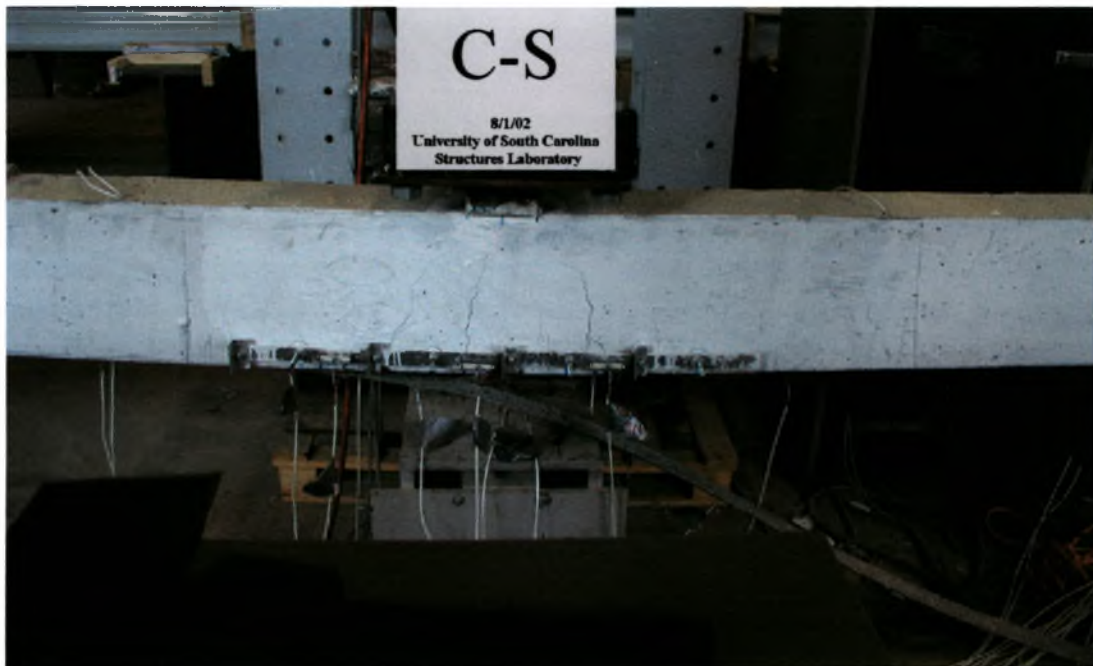


Σχήμα 3.21 Τοπική αποκόλληση του ελάσματος περίπου 300mm αριστερά από το μέσο του ανοίγματος.





Σχήμα 3.22 Τοπική αποκόλληση του ελάσματος 400mm δεξιά από το μέσο του ανοίγματος



Σχήμα 3.23 Τελική μορφή της δοκού C-S μετά την αστοχία

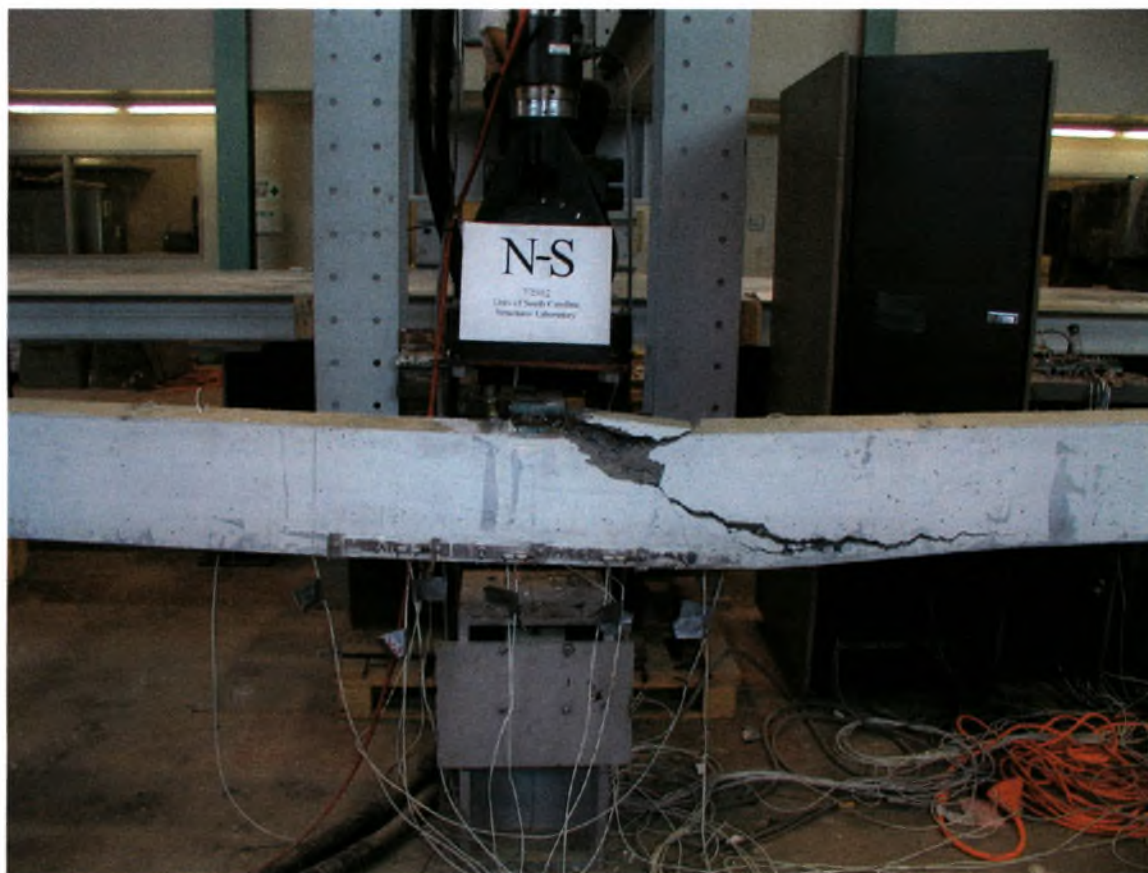


Σχήμα 3.24 Αποκόλληση του FRP κοντά στο μέσο του ανοίγματος.

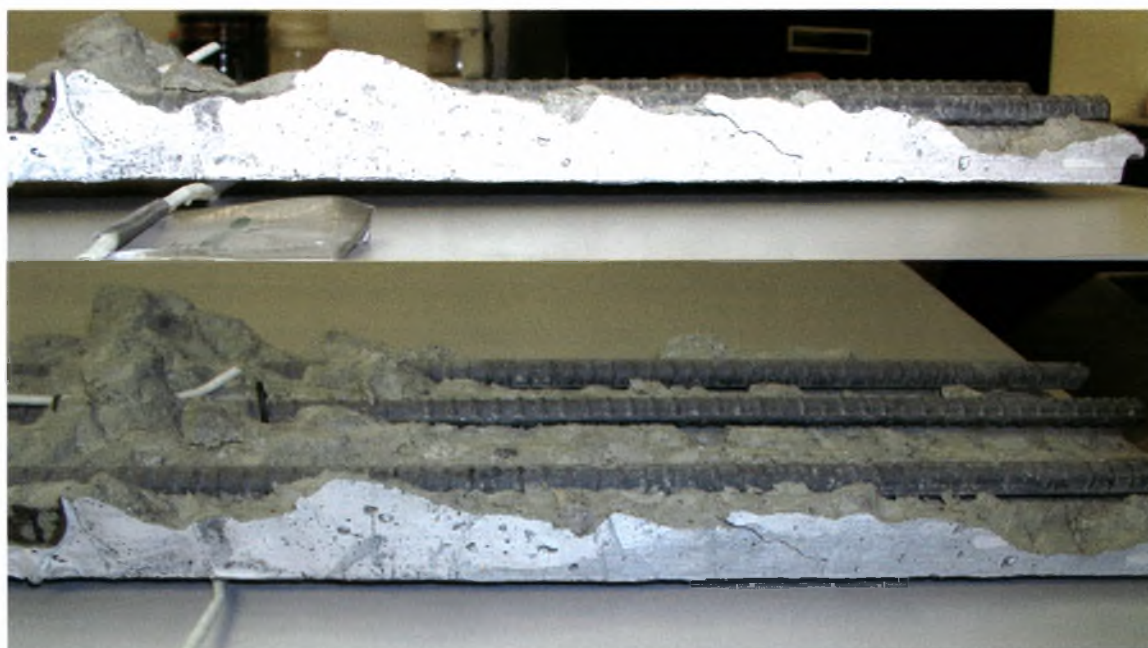
### 3.5.3 Δοκίμιο N-S:

Η δοκός που ενισχύθηκε με βάση την 2<sup>η</sup> μέθοδο (NSM) πρωτορηγματώθηκε για ροπή 7,32 kNm. Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης της δοκού. Σύμφωνα με τις μετρήσεις των ηλεκτρομηκυνσιομέτρων η αρχική διαρροή του μεσαίου χάλυβα παρατηρήθηκε για τιμή ροπής 40,6 kNm και η γενική ροπή για 46,7 kNm και βύθιση 31,8 mm. Η αστοχία επέρχεται για ροπή αντοχής 56,4 kNm και βύθιση 59,2 mm και εκδηλώνεται με σύνθλιψη του σκυροδέματος και ταυτόχρονα τη δημιουργία μιας οριζόντιας ρωγμής στο επίπεδο του εσωτερικού οπλισμού. Στα Σχήματα 3.25 έως 3.27 παρουσιάζεται η μορφή της δοκού μετά την αστοχία. Η δοκός N-S επέδειξε πλαστιμότητα της τάξης 1,86, δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από της C-S δοκού.





Σχήμα 3.25 Τελική μορφή της δοκού N-S μετά την αστοχία



Σχήμα 3.26 Αποκολλούμενο τμήμα της δοκού



Σχήμα 3.27 Αποκολλούμενο τμήμα της δοκού

#### 3.5.4 Δοκίμιο P - S

Η δοκός που ενισχύθηκε με την τρίτη μέθοδο (PAF), εφαρμόζοντας FRP εξωτερικά στο εφελκούμενο πέλαμα μέσω ήλων επέδειξε ροπή ρηγμάτωσης λίγο μεγαλύτερη από τις άλλες ενισχυμένες δοκούς και συγκεκριμένα 8,14 kNm. Η ροπή διαρροής παρατηρήθηκε λίγο μικρότερη από αυτές των υπόλοιπων ενισχυμένων δοκών, με τιμή 45,1 kNm ενώ το βέλος κάμψης προέκυψε 31,2 mm. Η ροπή αστοχίας και το βέλος κάμψης στην αστοχία σημειώθηκαν 54,4 kNm και 66,5 mm αντίστοιχα. Η δοκός P-S επέδειξε την μεγαλύτερη πλαστιμότητα συγκριτικά με τις υπόλοιπες ενισχυμένες δοκούς. Συγκεκριμένα η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων μετρήθηκε 2.13 .

Η αστοχία της δοκού P-S εκδηλώθηκε με σύνθλιψη του σκυροδέματος γύρω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου με αποτέλεσμα την μείωση του φορτίου αντοχής, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης (Σχήμα 3.19). Ακολούθησε η δημιουργία μιας μεγάλης οριζόντιας ρωγμής στο επίπεδο του χάλυβα και η αποκόλληση του FRP και της επικάλυψης του σκυροδέματος, ενώ οι ήλοι δεν αστόχησαν (Σχήματα 3.28 και 3.29) .





Σχήμα 3.28 Τελική μορφή δοκού P -S μετά την αστοχία



Σχήμα 3.29 Λεπτομέρεια αστοχίας . Η πράσινη γραμμή δείχνει το μέσο του ανοίγματος



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### « ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΚΩΝ»

Για την σύγκριση και την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων που περιγράφεται στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δοκών. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα μοντέλα πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκαν για καθένα από τα συστήματα ενίσχυσης καθώς και για τη μη ενισχυμένη δοκό, και οι παραδοχές στις οποίες στηρίζεται ο σχεδιασμός τους.

#### 4.1 Διαγράμματα Τάσεων - Παραμορφώσεων

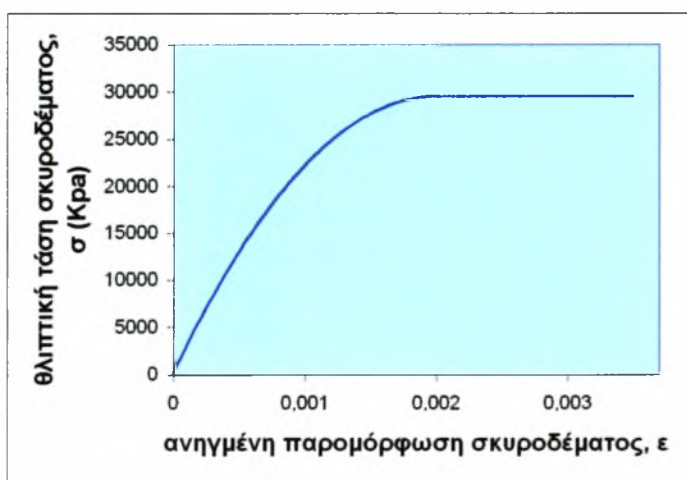
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα, τον χάλυβα, και το FRP στα οποία βασίζεται η πρόβλεψη καθώς και οι εξισώσεις που προκύπτουν από τα διαγράμματα αυτά για την δύναμη του σκυροδέματος, του χάλυβα και του FRP αντίστοιχα.



### 4.1.1 Σκυροδέμα

#### 4.1.1.1 Θλιπτική Δύναμη Σκυροδέματος

Για τον υπολογισμό της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων, για σκυροδέμα αντοχής 29,5 Μρα και μέτρου ελαστικότητας  $E_c = 25,72 \text{ GPa}$ .



Σχήμα 4.1 Συμβατικό διάγραμμα θλιπτικών τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος

Η εξίσωση που περιγράφει τις θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σκυροδέμα για ανηγμένη παραμόρφωση από 0 έως 2‰, σύμφωνα με το συμβατικό διάγραμμα του ΕΚΟΣ ,2000 δίνεται παρακάτω:

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

Ενώ για παραμορφώσεις από 2‰ έως 3,5‰ η τάση παραμένει σταθερή και ίση με την χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_{ck}$ .

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





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

$$\sigma_c(y) = -f_{ck} \times 1000 \times \varepsilon_c(y) \times (-250 \times \varepsilon_c(y) + 1) \quad \text{όταν } \varepsilon_c \leq 2\text{‰} \quad (4.1)$$

$$\sigma_c(y) = f_{ck} \quad \text{όταν } \varepsilon_c > 2\text{‰} \quad (4.2)$$

όπου η παραμόρφωση  $\varepsilon_c(y)$  υπολογίζεται με βάση την παραδοχή επιπεδότητας διατομών (Bernoulli):

$$\varepsilon_c(y) = \varepsilon_{c,\text{πάνω ίνας}} \times y / x$$

Και τελικά:

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

$$F_c = -b \times 1000 \times \varepsilon_{c,\text{πάνω ίνας}} \times [(-250 / 3) \times \varepsilon_{c,\text{πάνω ίνας}} + 0,5] \times x \quad (\text{KN}) \quad , \varepsilon_c \leq 2\text{‰} \quad (4.3)$$

Η  $F_c$  προκύπτει αρνητική γι' αυτό στις εξισώσεις ισορροπίας χρησιμοποιείται η απόλυτη τιμή της.

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

$$F_c = b \times f_{ck} \times [(3 \times \varepsilon_{c,\text{πάνω ίνας}} - 0,002) / (3 \times \varepsilon_{c,\text{πάνω ίνας}})] \times x \quad (\text{KN}) \quad , \varepsilon_c > 2\text{‰} \quad (4.4)$$

Όπου  $x_1$ ,  $x_2$  όπως ορίζονται από το σχήμα 4.7



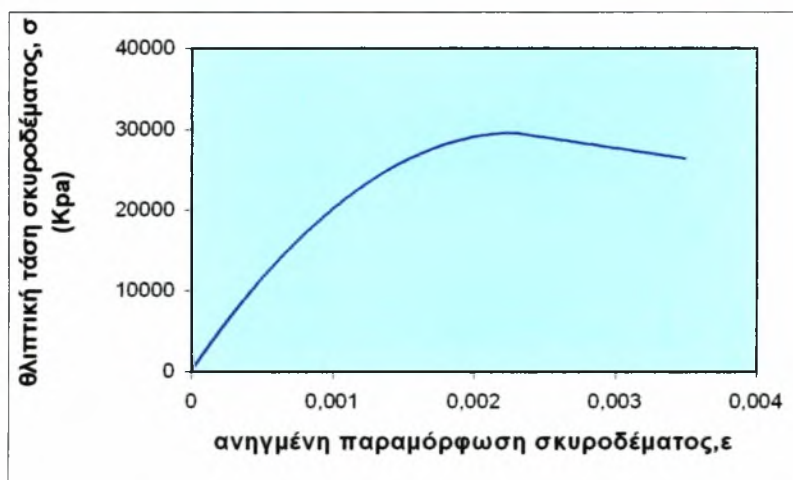
Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκε και το σχηματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος (Hognestad,1951). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την ανάλυση είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα του συμβατικού διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων .

Οι εξισώσεις που δίνουν το παρακάτω διάγραμμα είναι οι εξής:

$$\sigma_c = f_{ck} \times [ 2 \times (\epsilon_c / \epsilon_0) - (\epsilon_c / \epsilon_0)^2 ] \text{ όταν } 0 < \epsilon_c < \epsilon_0$$

$$\sigma_c = f_{ck} \times [ 1 - (0,15 \times (\epsilon_c - \epsilon_0)) / (0,004 - \epsilon_0) ] \text{ όταν } \epsilon_0 < \epsilon_c < 0,0035$$

$$\text{όπου } \epsilon_0 = 2 \times f_{ck} / E_c$$



Σχήμα 4.2 Σχηματικό διάγραμμα θλιπτικών τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος(ΕΚΟΣ)

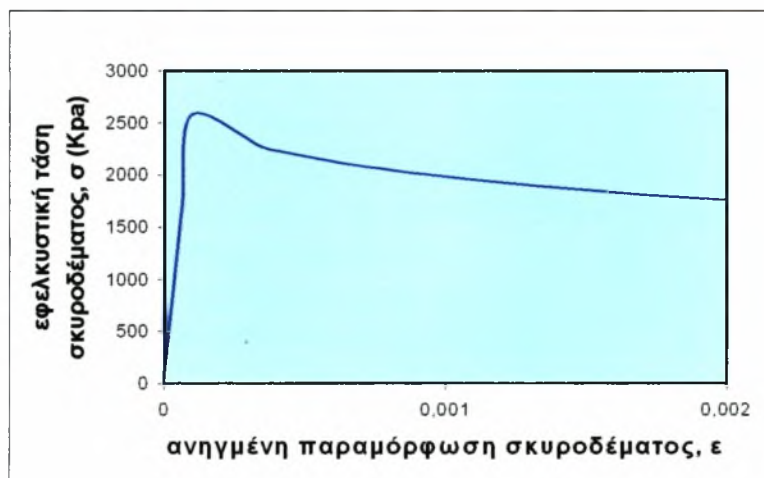
#### 4.1.1.2 Εφελκυστική Δύναμη Σκυροδέματος

Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής δύναμης του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε το πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος (σχήμα 4.3)

Η εξίσωση που περιγράφει τις εφελκυστικές τάσεις σκυροδέματος δίνεται παρακάτω (Veccio F. and Collins M. ,1986) :

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

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



Σχήμα 4.3 Πειραματικό διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος

Και η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος προκύπτει:

$$F_{ct} = 0,5 \times b \times (h - x) \times E_c \times \varepsilon_{ct, \text{κάτω ίνας}} \quad (\text{KN}) \quad \text{όταν } \varepsilon_{ct} \leq \varepsilon_{crack} \quad (4.5)$$

$$F_{ct} = 0,5 \times b \times (h - x) \times f_{crack} / (1 + \sqrt{200 \times \varepsilon_{ct}}) \quad \text{όταν } \varepsilon_{ct} > \varepsilon_{crack} \quad (\text{KN}) \quad (4.6)$$

Ο υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος γίνεται με βάση τον τύπο του ΕΚΟΣ :

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

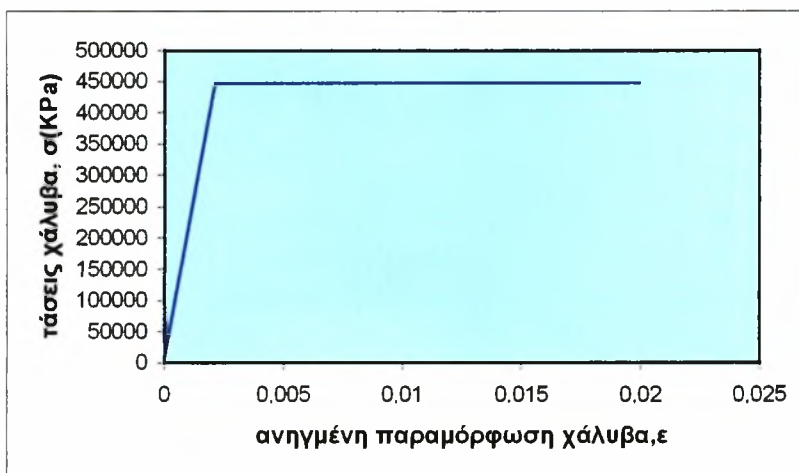
#### 4.1.2 Χάλυβας

Αρχικά, για τον υπολογισμό της δύναμης του εσωτερικού οπλισμού χρησιμοποιήθηκε το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του Ελληνικού Κανονισμού (σχήμα 4.4).

Με βάση το διάγραμμα, η δύναμη του χάλυβα αυξάνεται ελαστικά έως την διαρροή του οπλισμού και μετά παραμένει σταθερή. Άρα:

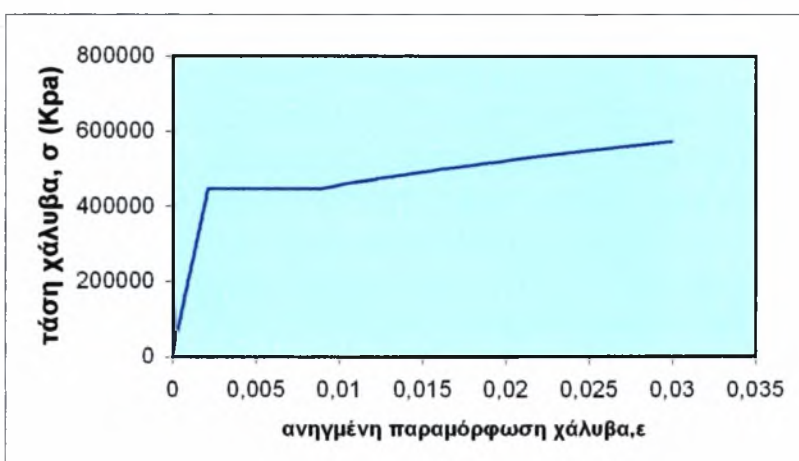
$$F_s = A_s \times E_s \times \varepsilon_s \quad (\text{KN}) \quad \text{όταν } \varepsilon_s < \varepsilon_{yield} \quad (4.7a)$$

$$F_s = A_s \times f_{yield} \quad (\text{KN}) \quad \text{όταν } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{yield} \quad (4.7b)$$



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων χάλυβα

Κατά την σύγκριση της πρόβλεψης με τα πειραματικά δεδομένα, τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν ήταν ικανοποιητικά. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα με  $f_y = 441,2 \text{ MPa}$  (65 ksi) και  $f_u = 737,7 \text{ MPa}$  (107 ksi):



Σχήμα 4.5 Πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων χάλυβα

Οι τάσεις με βάση το παραπάνω διάγραμμα περιγράφονται από τις εξής εξισώσεις:

$$\sigma_s = E_s \times \varepsilon_s$$

$$\text{,όταν } \varepsilon_s < \varepsilon_{\text{yield},1}$$



$$\sigma_s = 437769 + 0,020682 \times \varepsilon_s \quad , \text{όταν} \quad \varepsilon_{\text{yield},1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{\text{yield},2}$$

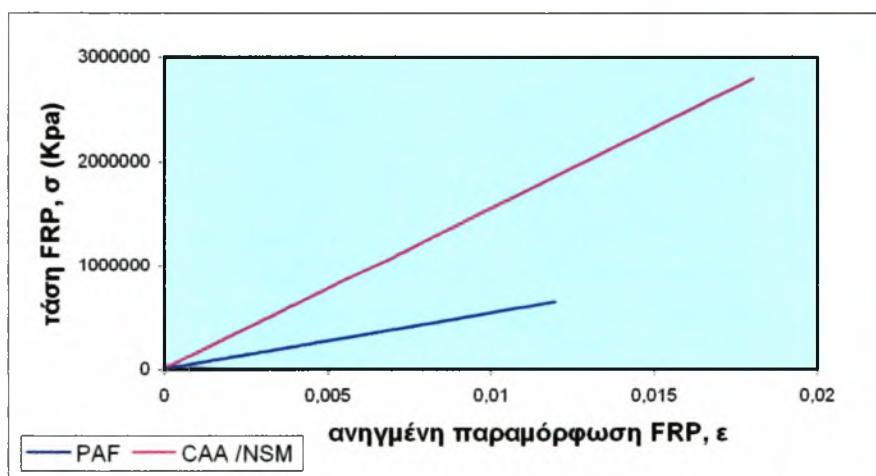
$$\sigma_s = -62046000 \times \varepsilon_s^2 + 8272800 \times \varepsilon_s + 379170 \quad , \text{όταν} \quad \varepsilon_s > \varepsilon_{\text{yield},2}$$

και η δύναμη του χάλυβα:

$$F_s = A_s \times \sigma_s \quad (\text{KN.}) \quad (4.8)$$

#### 4.1.3 Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP)

Για τον υπολογισμό της δύναμης του FRP χρησιμοποιείται το γραμμικό ελαστικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων που προτείνεται από τον κατασκευαστή του. Συγκεκριμένα και για τα τρία συστήματα ενίσχυσης της δοκού, με εξωτερικά επικολλούμενα FRP (CAA), το σύστημα ενίσχυσης μέσω τοποθέτησης του FRP σε εγκοπές (NSM) και το σύστημα ενίσχυσης με εφαρμογή FRP μέσω ήλων, τα διαγράμματα  $\sigma - \varepsilon$  παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων ινοπλισμένου πολυμερούς

Οι τάσεις προκύπτουν από την εξίσωση:

$$\sigma_{pl} = E_{pl} \times \varepsilon_{pl}$$



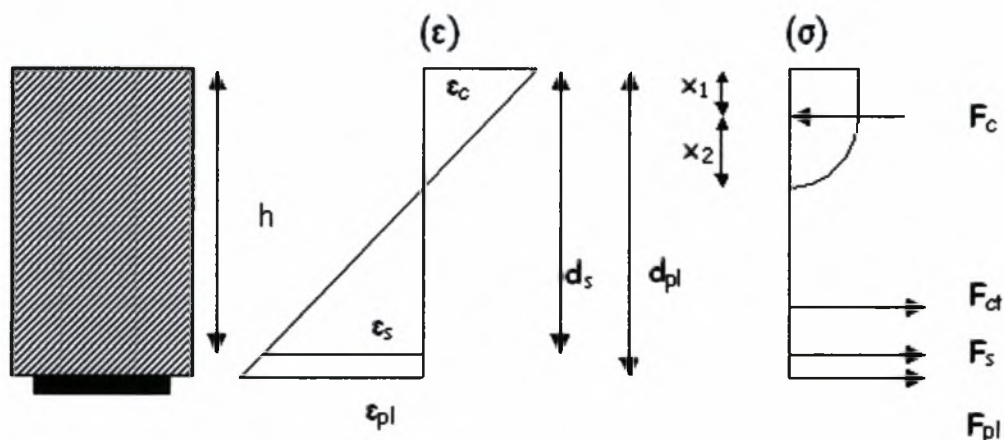
Και η δύναμη του FRP:

$$F_{pl} = A_{pl} \times \sigma_{pl} \quad (\text{KN}) \quad (4.9)$$

## 4.2 Εξισώσεις Σχεδιασμού

### 4.2.1 Υπολογισμός Θλιβόμενης Ζώνης

Η ανάλυση βασίζεται στην επιλογή ανηγμένης παραμόρφωσης σκυροδέματος από 0 έως 3,5‰ με βήμα 0,000035. Από την παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας υπολογίζονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις της ακραίας εφελκυσμένης ίνας, του χάλυβα και του FRP με βάση την παραδοχή επιπεδότητας των διατομών όπως παρακάτω:



Σχήμα 4.7 Κατανομή ανηγμένων παραμορφώσεων και τάσεων , κρίσιμης διατομής

Ισχύει:

$$\triangleright \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \times (d_1 - x) / x \quad (4.10)$$

$$\triangleright \quad \varepsilon_{ct} = \varepsilon_c \times (h - x) / x \quad (4.11)$$



Και όμοια για το FRP:

$$\triangleright \quad \varepsilon_{pl} = \varepsilon_c \times (d_{pl} - x) / x \quad (4.12)$$

όπου για τα συστήματα ενίσχυσης CAA και PAF:

$$d_{pl} = h + t_{pl} / 2$$

ενώ για το σύστημα ενίσχυσης NSM :

$$d_{pl} = h - b_{pl} / 2$$

Το ύψος  $x$  της θλιβόμενης ζώνης υπολογίζεται από την εξίσωση ισορροπίας των δυνάμεων:

$$\Sigma F_x = 0$$

*Για την μη ενισχυμένη δοκό (U-S) :*

Πριν την ρηγμάτωση :

$$F_c = F_{ct} + F_s \quad (4.13)$$

Μετά την ρηγμάτωση :

$$F_c = F_s \quad (4.14)$$

*Για τις ενισχυμένες δοκούς (CAA, NSM, PAF):*

Πριν την ρηγμάτωση:

$$F_c = F_{ct} + F_s + F_{pl} \quad (4.15)$$

Μετά τη ρηγμάτωση:

$$F_c = F_s + F_{pl} \quad (4.16)$$





Για κάθε περίπτωση οι παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν δευτεροβάθμιες ως προς τον άγνωστο  $x$ .

#### 4.2.2 Σημείο Εφαρμογής Δυνάμεων

Στην ενότητα αυτή υπολογίζεται το σημείο εφαρμογής της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος. Επίσης αναφέρονται τα σημεία εφαρμογής της εφελκυστικής δύναμης του σκυροδέματος, της δύναμης του χάλυβα και της δύναμης του FRP για κάθε ένα από τα συστήματα ενίσχυσης και την μη ενισχυμένη δοκό. Συγκεκριμένα για κάθε δεδομένη παραμόρφωση σκυροδέματος  $\epsilon_c$  και με υπολογισμένο το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x$ , το σημείο που εφαρμόζεται κάθε δύναμη υπολογίζεται όπως αναλύεται παρακάτω, μετρώντας την απόσταση από τον ουδέτερο άξονα της διατομής:

##### **4.2.2.1 Θλιπτική δύναμη Σκυροδέματος :**

Για κάθε παραμόρφωση του σκυροδέματος  $\epsilon_c$ , πάνω ίνας η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος  $F_c$  εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος. Η συντεταγμένη  $y$  του κέντρου βάρους ως γνωστό δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Y = M_y / A \quad (4.17)$$

➤ όπου  $M_y$  η πρώτη ροπή αδράνειας της επιφάνειας ως προς τον άξονα  $y$ ,

$$M_y = \int_y y \times dA \quad (4.18)$$

➤  $A$  η επιφάνεια,

$$A = \int_y dA \quad (4.19)$$

Η εξίσωση που περιγράφει την θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος για  $\epsilon_c < 0,002$ , βασίζεται στο διάγραμμα θλιπτικών τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος :



$$\sigma_c(y) = - f_{ck} \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} \times (y / x) \times (1 - 250 \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} \times y / x) \quad (4.20)$$

Και άρα:

$$dm = \sigma_c(y) \times dy \quad (4.21)$$

Από τις εξισώσεις (4.17) (4.18), (4.19), (4.20), (4.21) προκύπτει η εξίσωση της συντεταγμένης  $y$  του κέντρου βάρους όταν αυτό παίρνει τιμές από 0 έως  $x$  :

$$Y_{Fc} = [ \int_y y \times \sigma_c (y) \times dy ] / [ \int_y \sigma_c (y) \times dy ] \quad \Rightarrow$$

$$Y_{Fc} = [ ( 1 / 3 - 250 \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} / 4 ) \times x ] / [ 1 / 2 - 250 \times \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} / 3 ] \quad (4.22)$$

Όταν η παραμόρφωση του σκυροδέματος  $\varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} \geq 0,002$  , ως θλιπτική δύναμη σκυροδέματος  $F_c$  θεωρείται η συνισταμένη δύο επιμέρους συνιστωσών  $F_{c1}$  ,  $F_{c2}$  . Και πάλι η εξίσωση που περιγράφει την θλιπτική ζώνη του σκυροδέματος προκύπτει από το διάγραμμα θλιπτικών τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος. Ως  $F_{c1}$  ορίζεται η συνισταμένη της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος που οφείλεται στο τμήμα της κατανομής των τάσεων καθ' ύψος της διατομής όπου οι τάσεις είναι σταθερές και ίσες με  $f_{ck}$  (τμήμα  $x_1$ ). Αντίθετα ως  $F_{c2}$  ορίζεται η συνισταμένη της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος που οφείλεται στο παραβολικό τμήμα των κατανεμημένων τάσεων καθ' ύψος της διατομής (τμήμα  $x_2$ ).

Για κάθε  $\varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}}$  , αφού έχει υπολογιστεί το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x$  μπορούν να υπολογιστούν τα  $x_1$ ,  $x_2$  ως εξής:

$$x_1 = [ ( \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} - 0,002 ) / \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} ] \times x \quad (4.23)$$

$$x_2 = ( 0.002 / \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} ) \times x \quad (4.24)$$



Άρα το σημείο εφαρμογής της  $F_{c1}$  για κάθε δεδομένη παραμόρφωση σκυροδέματος  $\epsilon_{c, \text{πάνω ίνας}}$ :

$$Y_{Fc1} = x_2 + x_1 / 2 \quad (4.25)$$

Ενώ από τις εξισώσεις (4.17), (4.18), (4.19), (4.21), (4.23), (3.24) προκύπτει το σημείο εφαρμογής της συνιστώσας  $F_{c2}$  όταν το  $y$  παίρνει τιμές από 0 έως  $x_2$ :

$$Y_{Fc2} = 0,00125 \times (x / \epsilon_{c, \text{πάνω ίνας}}) \quad (4.26)$$

#### 4.2.2.2 Εφελκυστική Δύναμη Σκυροδέματος:

Σύμφωνα με το μοντέλο που επιλέχθηκε για την προσομοίωση της εφελκυστικής δύναμης του σκυροδέματος το σημείο εφαρμογής της είναι σταθερό και υπολογίζεται εύκολα όπως παρακάτω:

$$Y_{Fct} = (2 / 3) \times (h - x) \quad (4.27)$$

#### 4.2.2.3 Δύναμη Εφελκυσμένου Χάλυβα / Ινοπλισμένου Πολυμερούς

Η απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης του χάλυβα από τον ουδέτερο άξονα είναι σταθερό και ίσο με:

$$Y_{Fs} = d_s - x$$

Το σημείο εφαρμογής της δύναμης του οπλισμού ενίσχυσης είναι σταθερό και ίσο:

$$Y_{Fpl} = d_{pl} - x$$

Όπου το στατικό ύψος του FRP διαφέρει, ανάλογα με τον τρόπο ενίσχυσης. Συγκεκριμένα για τις μεθόδους ενίσχυσης CAA και PAF:  $d_{pl} = h + t_{pl} / 2$  (4.28)



$$\text{Ενώ για το σύστημα ενίσχυσης NSM : } d_{pl} = h - b_{pl}/2 \quad (4.29)$$

### 4.2.3 Υπολογισμός Ροπής Κάμψης

Η καμπτική ροπή της διατομής υπολογίζεται ως προς τον ουδέτερο άξονα της και για κάθε δεδομένη παραμόρφωση σκυροδέματος  $\epsilon_c$ . Συγκεκριμένα,

Όταν  $\epsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} < 0,002$  :

$$M = |F_c| \times Y_{Fc} + F_{ct} \times Y_{Fct} + F_{s1} \times Y_{Fs1} + F_{pl} \times Y_{Fpl} \quad (4.30)$$

Και όταν  $\epsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} \geq 0,002$ :

$$M = F_{c1} \times Y_{Fc1} + F_{c2} \times Y_{Fc2} + F_{ct} \times Y_{Fct} + F_{s1} \times Y_{Fs1} + F_{pl} \times Y_{Fpl} \quad (4.31)$$

#### **4.2.3.1 Υπολογισμός Ροπής Ρηγμάτωσης:**

Η ροπή ρηγμάτωσης υπολογίζεται αναλυτικά θεωρώντας ισοδύναμη μη ρηγματωμένη διατομή σκυροδέματος. Συγκεκριμένα για την ακραία εφελκυσμένη ίνα την στιγμή της ρηγμάτωσης ισχύει:

$$M_{crack} = f_{ctm} \times I_{\text{ισοδ. διατομής}} / (h - x) \quad (4.32)$$

Όπου

$$I_{\text{ισοδ. διατομής}} = b \times h^3 / 12 + b \times h \times (x - h / 2)^2 + (n_s - 1) \times A_s \times (d_1 - x)^2 + n_{pl} \times A_{pl} \times (d_{pl} - x)^2 \quad (4.33)$$



#### 4.2.3.2 Υπολογισμός Ροπής Διαρροής :

Η ροπή διαρροής υπολογίζεται αναλυτικά θεωρώντας ανηγμένη παραμόρφωση του χάλυβα  $\varepsilon_s$  ίση με την παραμόρφωση διαρροής του :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{\text{yield}} = f_{\text{yield}} / E_s$$

Υποθέτοντας μια τιμή για την παραμόρφωση του σκυροδέματος  $\varepsilon_c$ , μέσω της εξίσωσης (4.10) υπολογίζεται το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x$  και γίνεται ο έλεγχος της υποτιθέμενης  $\varepsilon_c$  μέσω της εξίσωσης ισορροπίας των δυνάμεων (4.15) ή (4.16). Με δοκιμές για την  $\varepsilon_c$  προκύπτει το ακριβές ύψος της θλιβόμενης ζώνης στην διαρροή και στη συνέχεια η ακριβής τιμή της ροπής διαρροής  $M_{\text{yield}}$  μέσω των εξισώσεων (4.30) ή (4.31).

### 4.3 Πρόβλεψη Καμπτικής Συμπεριφοράς Δοκών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της καμπυλότητας της διατομής  $\theta$ , του φορτίου  $P$  και του βέλος κάμψης της δοκού  $\Delta$ , καθώς και η κατασκευή των ζητούμενων διαγραμμάτων  $M - \theta$  και  $P - \Delta$ .

#### 4.3.1 Υπολογισμός Καμπυλότητας Διατομής $\kappa$

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

$$\kappa = \varepsilon_{c, \text{πάνω ίνας}} / x \quad (4.34)$$



### 4.3.2 Υπολογισμός Βέλους Κάμψης Δ

Το βέλος κάμψης Δ υπολογίζεται στο μέσο του ανοίγματος της δοκού με δύο διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά χρησιμοποιείται ένας απλοποιητικός τύπος του βέλους κάμψης. Επειδή τα αποτελέσματα κατά την σύγκριση του προβλεπόμενου διαγράμματος Ρ - Δ και των πειραματικών δεδομένων δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά κυρίως για τις ενισχυμένες δοκούς, επιλέχθηκε ένας δεύτερος αναλυτικός τρόπος υπολογισμού του βέλους κάμψης Δ. Και οι δύο τρόποι περιγράφονται παρακάτω αναλυτικά.

#### **4.3.2.1 Απλοποιητικός Τύπος :**

Για αμφιέριστη δοκό στην οποία εφαρμόζεται συγκεντρωμένο φορτίο Ρ στο μέσο του ανοίγματος χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης Δ στην κρίσιμη διατομή ο οποίος λαμβάνει υπόψη του γραμμική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος.

$$\Delta = (M \times L^2) / (12 \times E_c \times I) \quad (4.35)$$

Επίσης για την ακραία θλιβόμενη ίνα ισχύει :

$$\sigma_c = M \times x / I \quad (4.36)$$

$$\sigma_c = E_c \times \varepsilon_c \quad (4.37)$$

Από (4.36) (4.37):

$$E_c \times \varepsilon_c = M \times x / I \Rightarrow \varepsilon_c / x = M / (E_c \times I) \quad (4.38)$$

Από (4.38) και (4.34) :





$$\kappa = M / (E_c \times I) \quad (4.39)$$

Από (4.39) και (4.35)

$$\Delta = \kappa \times L^2 / 12 \quad (4.40)$$

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 του οπλισμένου σκυροδέματος, το βέλος κάμψης υπολογίζεται από τον τύπο :

$$f = \kappa \times L^2 \times (1 / r_{total}) \quad (4.41)$$

- Όπου ο συντελεστής  $\kappa$  εξαρτάται από τον τύπο φόρτισης της δοκού και για την περίπτωση συγκεντρωμένου φορτίου στο μέσο του ανοίγματος λαμβάνεται ίσος με  $1/12$ .
- Και ως  $(1 / r_{total})$  λαμβάνεται η καμπυλότητα στη θέση της μέγιστης ροπής λόγω φορτίων, ερπυσμού ( $1 / r_m$ ) και συστολής ξήρανσης ( $1 / r_{cs,m}$ ).

Επίσης η καμπυλότητα ( $1 / r_m$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$(1 / r_m) = \zeta \times (1 / r_I) + (1 - \zeta) \times (1 / r_{II})$$

$$\text{με } \zeta = 1 - \beta_1 \times \beta_2 \times (M / M_{crack})^2$$

και  $\beta_1 = 1$  και  $\beta_2 = 1$  για οπλισμό με νευρώσεις και για μεμονωμένη βραχυχρόνια φόρτιση αντίστοιχα.

Όπως προέκυψε από την ανάλυση, οι τύποι (4.40) και (4.41) δίνουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα. Επίσης ο Ευρωκώδικας τονίζει ότι το υπολογιστικό βέλος κάμψης αποτελεί απλά και μόνο μια ένδειξη της αναμενόμενης τάξης μεγέθους του και σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να αναμένεται μεγάλη ακρίβεια στην τιμή που υπολογίζεται.



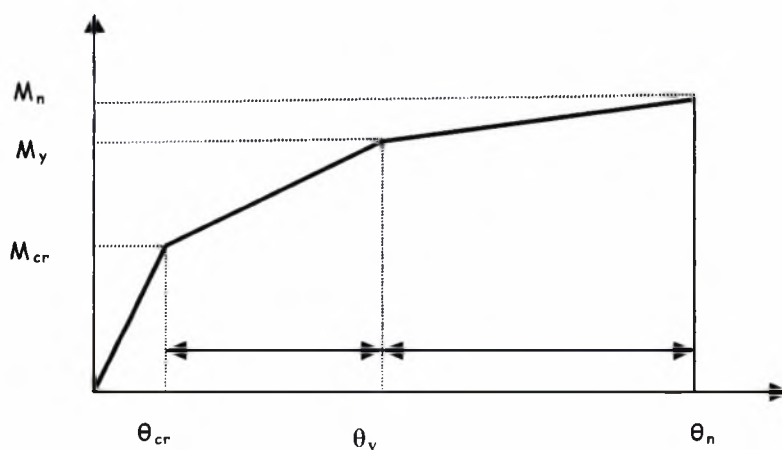
#### 4.3.2.2 Αναλυτικός Τύπος :

Χρησιμοποιώντας το Θεώρημα Ροπή - Επιφάνεια (Moment - Area Theorem) για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης στη κρίσιμη διατομή της δοκού, λαμβάνεται υπόψη η κατανομή της πραγματικής δυσκαμψίας κατά μήκος της δοκού (Charkas et al, 2003). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, διαιρώντας την δοκό σε τρεις περιοχές και συγκεκριμένα : στη μη ρηγματωμένη περιοχή, στη μερικώς ρηγματωμένη περιοχή και στη περιοχή στην οποία ο χάλυβας έχει διαρρέυσει. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι τύποι που δίνουν το βέλος κάμψης σε καθένα από τα στάδια, 1<sup>ο</sup>) της μη ρηγμάτωσης , 2<sup>ο</sup>) της μερικής ρηγμάτωσης και 3<sup>ο</sup>) της μετά διαρροής του χάλυβα.

Για καθένα από τα στάδια το βέλος κάμψης δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta_{\text{midspan}} = \int^{L/2} x \times \theta(x) \times dx \quad (4.42)$$

Όπου  $\theta(x)$  η καμπυλότητα της διατομής σε κάθε μήκος  $x$  κατά μήκος της δοκού , όταν το  $x$  λαμβάνει τιμές από 0 έως  $L / 2$ .



Σχήμα 4.8 Τριγραμμικό διάγραμμα ροπής - καμπυλότητας της διατομής

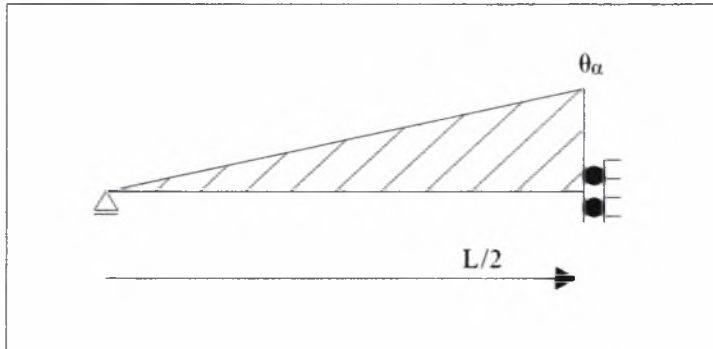
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν οι εξισώσεις της καμπυλότητας της διατομής  $\theta$ . Συγκεκριμένα :

$$\theta = (M - M_{cr}) * (\theta_y - \theta_{cr}) / (M_y - M_{cr}) + \theta_{cr} \quad \text{όταν} \quad \theta_{cr} < \theta < \theta_y$$



$$\theta = (M - M_y) * (\theta_n - \theta_y) / (M_n - M_y) + \theta_y \quad \text{όταν} \quad \theta_y < \theta < \theta_n$$

Στάδιο 1<sup>ο</sup>, πριν την ρηγμάτωση:



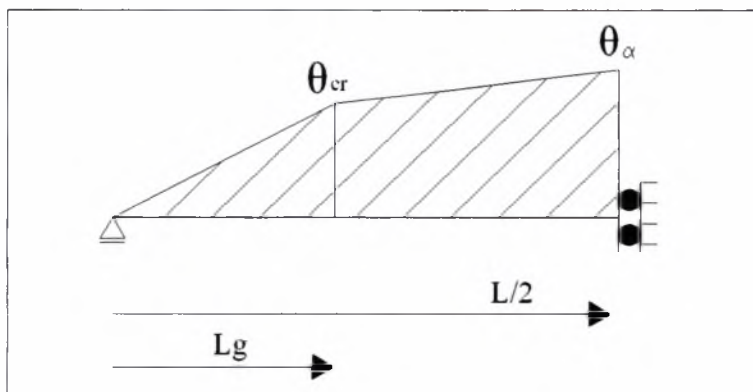
Σχήμα 4.9 Υπολογισμός βέλους κάμψης - 1<sup>ο</sup> στάδιο, πριν την ρηγμάτωση

Λύνοντας την εξίσωση (4.42) και με βάση το σχήμα (4.9) προκύπτει ο παρακάτω τύπος για την βέλος κάμψης στο στάδιο 1 :

$$\Delta_{\text{midspan}} = \theta_{\alpha} \times L^2 / 12 \quad , \text{όταν} \quad M \leq M_{\text{crack}} \quad (4.43)$$

Όπου  $\theta_{\alpha} = M / (E_c \times I_g)$  και  $I_g$  η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος.

Στάδιο 2<sup>ο</sup>, μετά την ρηγμάτωση :



Σχήμα 4.10 Υπολογισμός βέλους κάμψης - 2<sup>ο</sup> στάδιο, μετά την ρηγμάτωση



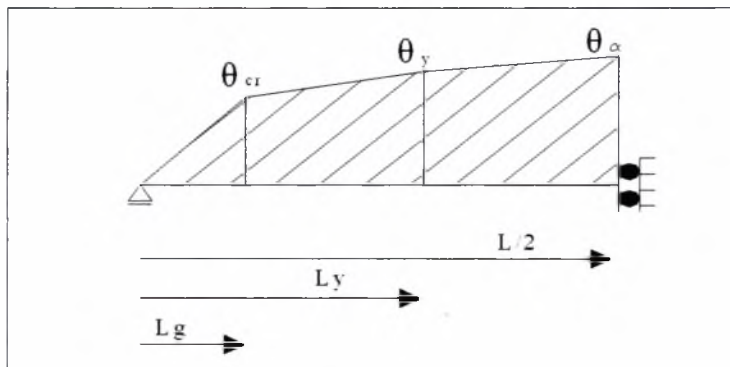
Λύνοντας την εξίσωση (4.42) και με βάση το σχήμα (4.10) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για τη βέλος κάμψης  $\Delta$  στο στάδιο 2 :

$$\Delta_{\text{midspan}} = (\theta_{\alpha} \times L^2 / 12) + [(L_g + L / 2) / 6] \times (\theta_{\text{crack}} \times L / 2 - \theta_{\alpha} \times L_g) \quad ,$$

$$\text{όταν } M_{\text{crack}} < M < M_{\text{yield}} \quad (4.44)$$

$$\text{όπου } \theta_{\alpha} = (\theta_{\gamma} - \theta_{\text{crack}}) \times (M - M_{\text{crack}}) / (M_{\text{yield}} - M_{\text{crack}}) + \theta_{\text{crack}}$$

Στάδιο 3<sup>ο</sup> , μετά την διαρροή του χάλυβα :



Σχήμα 4.11 Υπολογισμός βέλους κάμψης - 3<sup>ο</sup> στάδιο, μετά την διαρροή

Λύνοντας την εξίσωση (4.42) και με βάση το σχήμα (4.11) προκύπτει ο παρακάτω τύπος για το βέλος κάμψης μετά τη διαρροή του χάλυβα :

$$\Delta_{\text{midspan}} = (\theta_{\alpha} \times L^2 / 12) + (L_y / 6) \times [\theta_{\text{cr}} \times (L_y + L_g) - \theta_{\alpha} \times (L_y + L/2)] + \theta_{\gamma} \times (L/2 - L_g) \times (L/2 + L_y + L_g) / 6$$

$$\text{Όταν } M > M_{\text{yield}} \quad (4.45)$$

$$\text{Όπου } \theta_{\alpha} = (\theta_u - \theta_{\text{yield}}) \times (M - M_{\text{yield}}) / (M_u - M_{\text{yield}}) + \theta_{\text{yield}} \quad , \quad \theta_u = 0,0035 / x_u$$



### 4.3.3 Υπολογισμός Φορτίου P

Το φορτίο P υπολογίζεται μέσω της καμπτικής ροπής M για κάθε δεδομένη παραμόρφωση της ακραίας θλιβόμενης ίνας  $\epsilon_{c, \text{πάνω ίνας}}$  ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης του πειράματος για το οποίο γίνεται η πρόβλεψη.

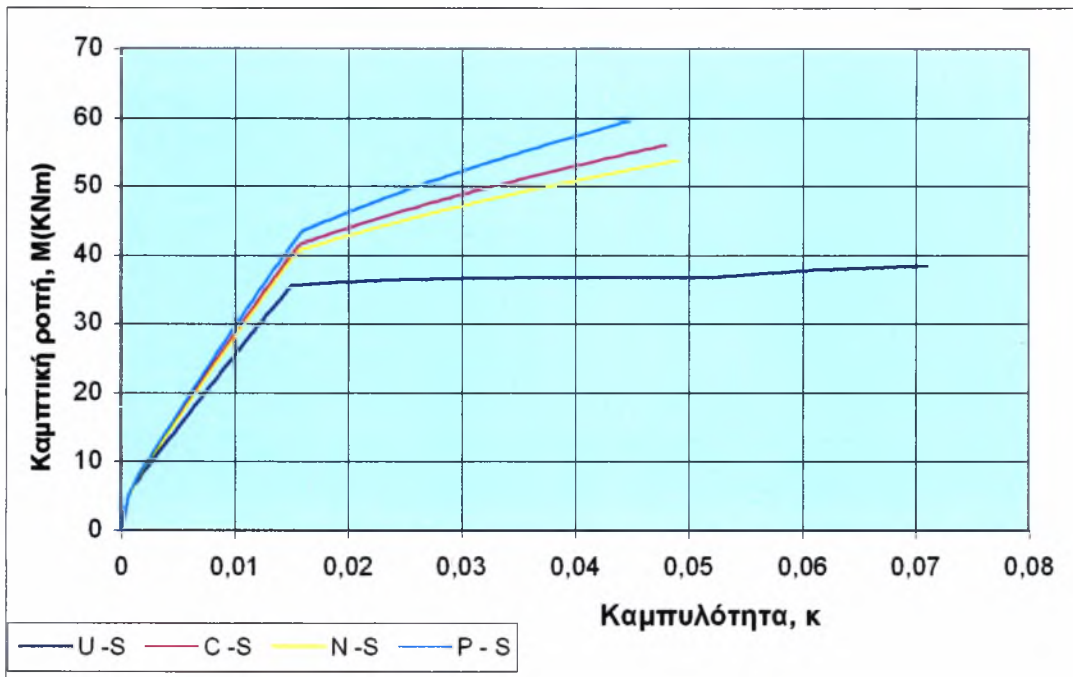
Στα συγκεκριμένα πειράματα που μελετούνται σε αυτή την εργασία, στις δοκούς εφαρμόζεται φορτίο στο μέσο του ανοίγματος τους και άρα το φορτίο P υπολογίζεται ως εξής :

$$P = 4 \times M / L \quad (4.46)$$

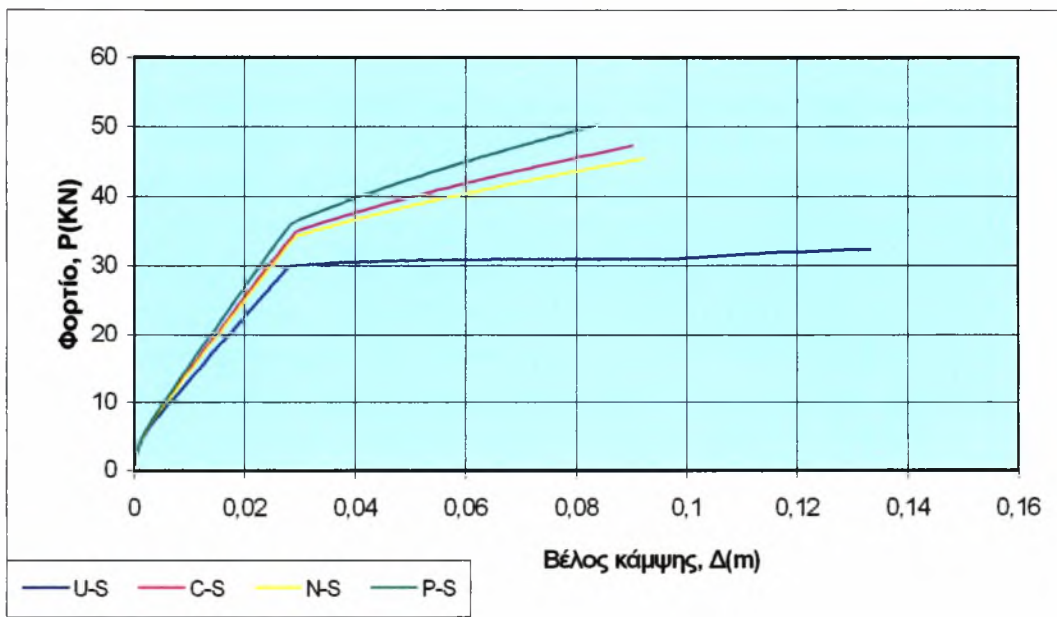
Όπου L το μήκος της δοκού.

### 4.3.4 Κατασκευή Διαγραμμάτων M - θ και P - Δ

Τα διαγράμματα M - κ και P - Δ κατασκευάζονται από τα εκατό γνωστά ζεύγη τιμών (M , κ) και (P , Δ) όπως προκύπτουν από τις σχέσεις (4.30) ή(4.31) , (4.34) , (4.46) και της παραγράφου (4.3.2). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα M - κ και P - Δ του προγράμματος πρόβλεψης για τις δοκούς U - S , C - S , N - S και P - S, όταν λαμβάνεται υπόψη ως διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα το διάγραμμα (4.4) και το βέλος κάμψης υπολογίζεται σύμφωνα με τον απλοποιητικό τύπο (4.40).



Σχήμα 4.12 Καμπτική ροπή - καμπυλότητα διατομής

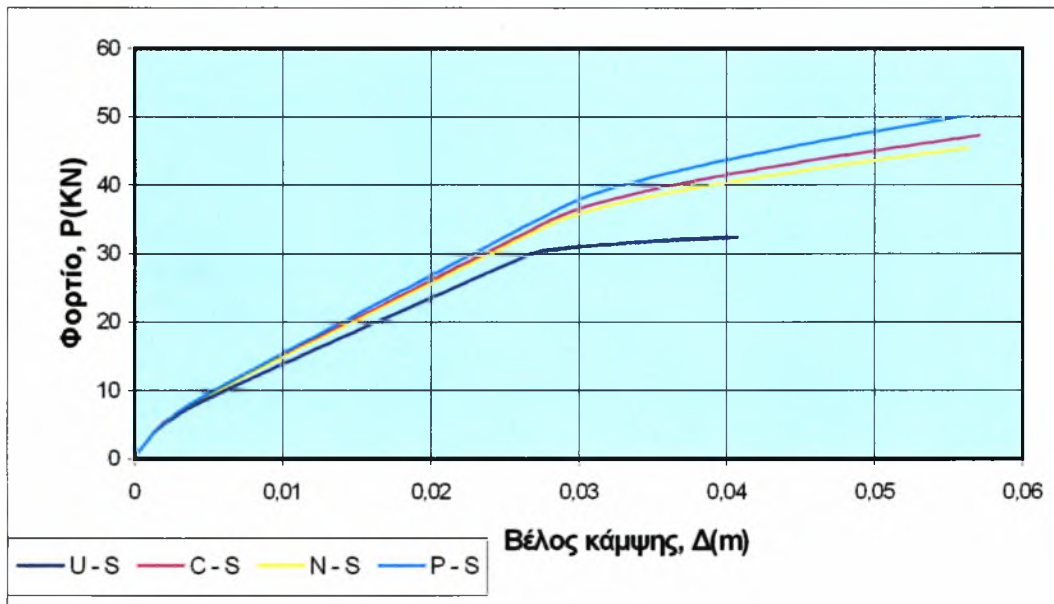


Σχήμα 4.13 Φορτίο - βέλος κάμψης, απλοποιητικός τύπος





Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου  $P$  - Βέλος κάμψης  $\Delta$  όπου το βέλος κάμψης υπολογίζεται με τον αναλυτικό τύπο (4.43), (4.44), (4.45)



Σχήμα 4.14 Φορτίο - βέλος κάμψης , Αναλυτικός τύπος

#### 4.4 Υπολογισμός Ροπής Αδράνειας

Κατά τον υπολογισμό του βέλους κάμψης κρίθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας κυρίως για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο που η ροπή αδράνειας επηρεάζει τη τιμή του βέλους κάμψης. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τέσσερις τρόποι υπολογισμού της ροπής αδράνειας ( $I$ ), τα διαγράμματα ροπής αδράνειας - καμπτικής ροπής που προκύπτουν και η σύγκριση των διαγραμμάτων.

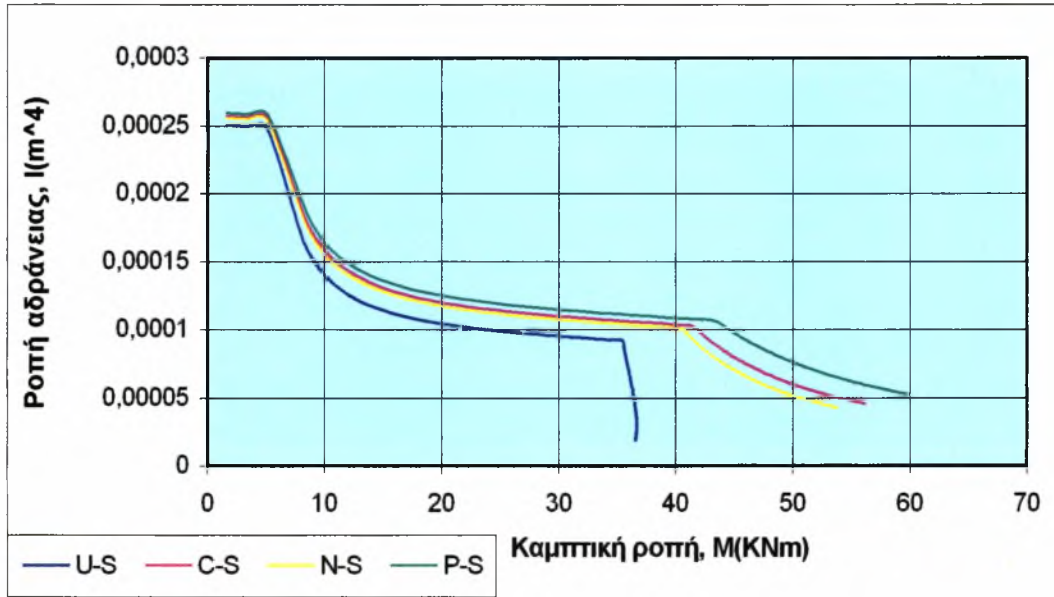
##### 4.4.1 1<sup>ος</sup> Τρόπος Υπολογισμού, με Βάση τη Καμπυλότητα $\kappa$ της Διατομής

Ο 1<sup>ος</sup> τρόπος υπολογισμού της ροπής αδράνειας βασίζεται στον τύπο (4.39), ο οποίος επιλύεται ως προς  $I$  :

$$I = M / (\kappa \times E_c) \quad (4.47)$$



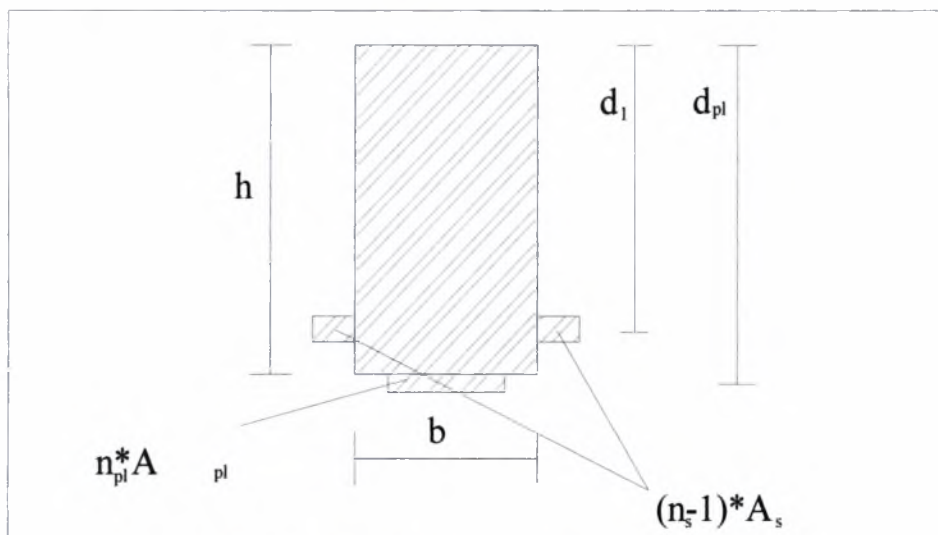
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $I - M$  με βάση τον τύπο (4.47) για τις δοκούς U-S, C-S, N-S και P-S.



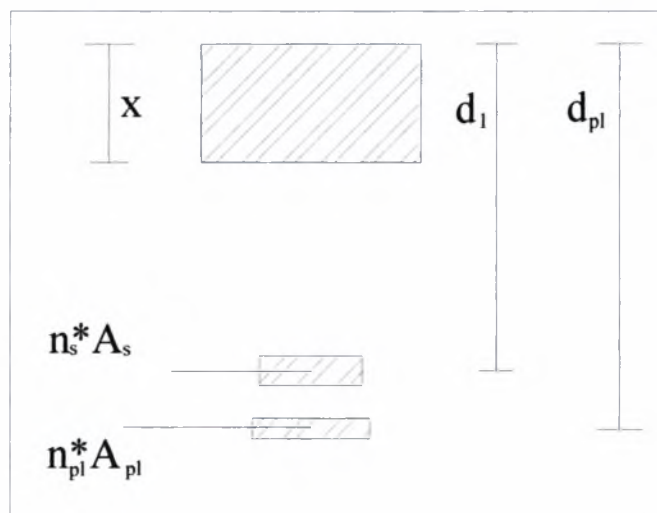
Σχήμα 4.15 Ροπή αδράνειας - καμπτική ροπή ( $I = M / (E_c \times \kappa)$ )

#### 4.4.2 2<sup>ος</sup> Τρόπος Υπολογισμού, Μέσω Ισοδύναμης Διατομής Σκυροδέματος

Ο 2<sup>ος</sup> τρόπος, βασίζεται στον υπολογισμό της ροπής αδράνειας της ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος. Πριν την ρηγμάτωση, η ροπή αδράνειας δίνεται από τον τύπο 4.33 (σχήμα 4.16), ενώ μετά την ρηγμάτωση η ροπή αδράνειας υπολογίζεται ως εξής σύμφωνα με το σχήμα 4.17



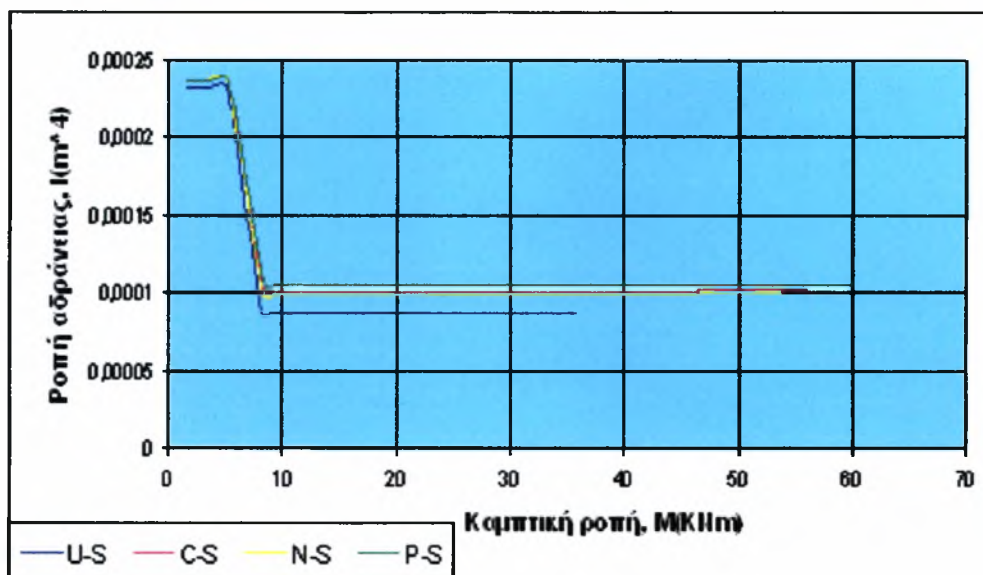
Σχήμα 4.16 Ισοδύναμη μη ρηγματωμένη Διατομή



Σχήμα 4.17 Ισοδύναμη Ρηγματωμένη Διατομή

$$I = b \times x^3 / 3 + n_s \times A_s \times (d_1 - x)^2 + n_{pl} \times A_{pl} \times (d_{pl} - x)^2 \quad (4.48)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα I - M με βάση τον τύπο (4.47) ,(4.48) για τις δοκούς U-S, C-S, N-S και P-S.



Σχήμα 4.18 Ισοδύναμη ροπή σκυροδέματος - καμπτική ροπή

#### 4.4.3 3<sup>ος</sup> τρόπος υπολογισμού, με βάση τον ACI

Ο Αμερικάνικος Κανονισμός συνιστά τον παρακάτω ημιεμπειρικό τύπο της ροπής αδράνειας για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης, και μετά την ρηγμάτωση, μιας μη ενισχυμένης δοκού:

$$I_e = (M_{cr} / M)^3 \times I_g + (1 - (M_{cr} / M)^3) \times I_{cr} \quad (4.49)$$

Όπου

- $I_g$  : η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης μη ρηγματωμένης διατομής
- $I_{cr}$  : η ροπή αδράνειας της ισοδύναμης ρηγματωμένης διατομής
- $M_{cr}$  : η ροπή ρηγμάτωσης της διατομής

Όπως σημειώνουν οι El-Mihilmy και Tedesco (2003), αλλά και όπως προέκυψε από την ανάλυση ο τύπος (4.49) όταν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης ενισχυμένης δοκού σύμφωνα με τον τύπο (4.35) δεν παρουσιάζει, διαρροή του χάλυβα.

Σύμφωνα με τους El-Mihilmy και Tedesco προτείνονται οι εξής τροποποιήσεις στην εξίσωση (4.49) για την χρήση σε ενισχυμένες δοκούς:



- Αλλαγή της εξίσωσης για την  $I_e$  πριν την διαρροή του χάλυβα βάση της υπόθεσης ότι η  $I_e$  μειώνεται στην τιμή της ροπής αδράνειας της ρηγματωμένη διατομής όταν ο χάλυβας διαρρέει. Συγκεκριμένα :

$$I_e = I_{cr} \times (1 + (1 - M / M_{yield})^3) \quad , \text{ όταν } M_{cr} \leq M \leq M_{yield} \quad (4.50)$$

- Μετά την διαρροή η εξίσωση που δίνει την ροπή αδράνειας περιγράφεται παρακάτω:

$$I_e = M / (E_c \times \kappa) \quad , \text{ όταν } M > M_{yield} \quad (4.51)$$

Η εξίσωση αυτή αναμένεται να υπερεκτιμά το βέλος κάμψης γιατί όλες οι διατομές κατά μήκος του ανοίγματος της δοκού ανταποκρίνονται σε υψηλότερες τιμές ροπής αδράνειας σε σύγκριση με αυτή της κρίσιμης διατομής.

Όταν χρησιμοποιείται απευθείας ο τύπος (4.35) για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης στη κρίσιμη διατομή της δοκού, λαμβάνοντας ως ροπή αδράνειας  $I$  αυτή που προτείνει ο Αμερικάνικος Κανονισμός (σχέσεις (4.49) ,(4.50) ,(4.51)) τα αποτελέσματα ταυτίζονται απόλυτα με αυτά του τύπου (4.41) του Ευρωκώδικα και αυτά του απλοποιητικού τύπου (4.39).

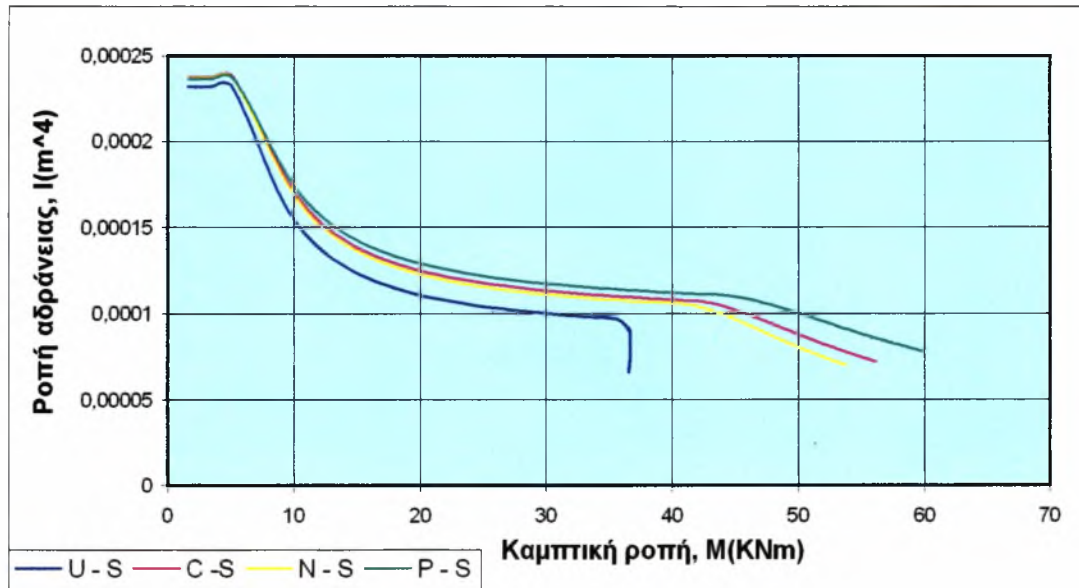
#### 4.4.4 4<sup>ος</sup> Τρόπος Υπολογισμού, με Βάση τον Αναλυτικό Τύπο του Βέλους Κάμψης

Ο 4<sup>ος</sup> τρόπος υπολογισμού της ροπής αδράνειας της κρίσιμης διατομής μιας δοκού, βασίζεται στο θεώρημα Ροπή - Επιφάνεια . Συγκεκριμένα μετά τον αναλυτικό υπολογισμό του βέλους κάμψης (σχέσεις (4.43) , (4.44), (4.45)) υπολογίζεται μια μέση τιμή της ροπής αδράνειας με βάση τον τύπο (4.35) ο οποίος μορφώνεται όπως παρακάτω:

$$I = (L^2 \times M) / (12 \times E_c \times \Delta) \quad (4.52)$$



Στο σχήμα 4.19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα  $I - M$  που προέκυψαν για τις δοκούς U - S, C - S, N - S, P - S , με τη παραπάνω μέθοδο.



Σχήμα 4.19 Μέση ροπή αδράνειας - καμπτική ροπή

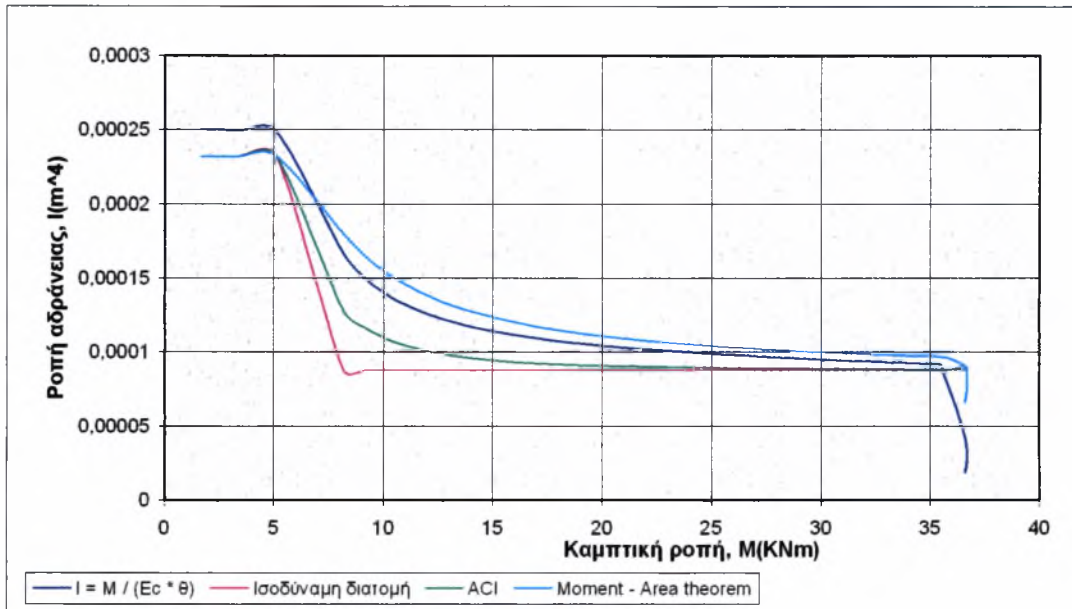
#### 4.4.5 Συγκριτικά Διαγράμματα $I - M$

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα ροπής αδράνειας - καμπτικής ροπής που προκύπτουν από κάθε μέθοδο υπολογισμού  $I$ , για κάθε δοκό του πειράματος που εξετάζεται ξεχωριστά:



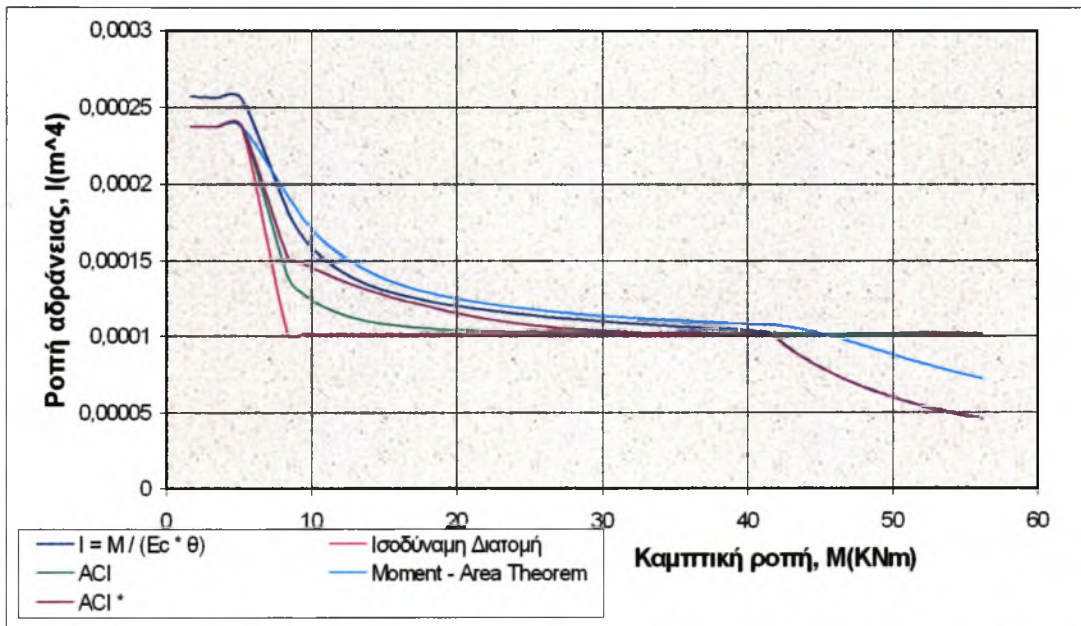


Μη ενισχυμένη δοκός U - S:



Σχήμα 4.20 Συγκριτικά διαγράμματα ροπής αδράνειας - καμπτική ροπή για την U-S

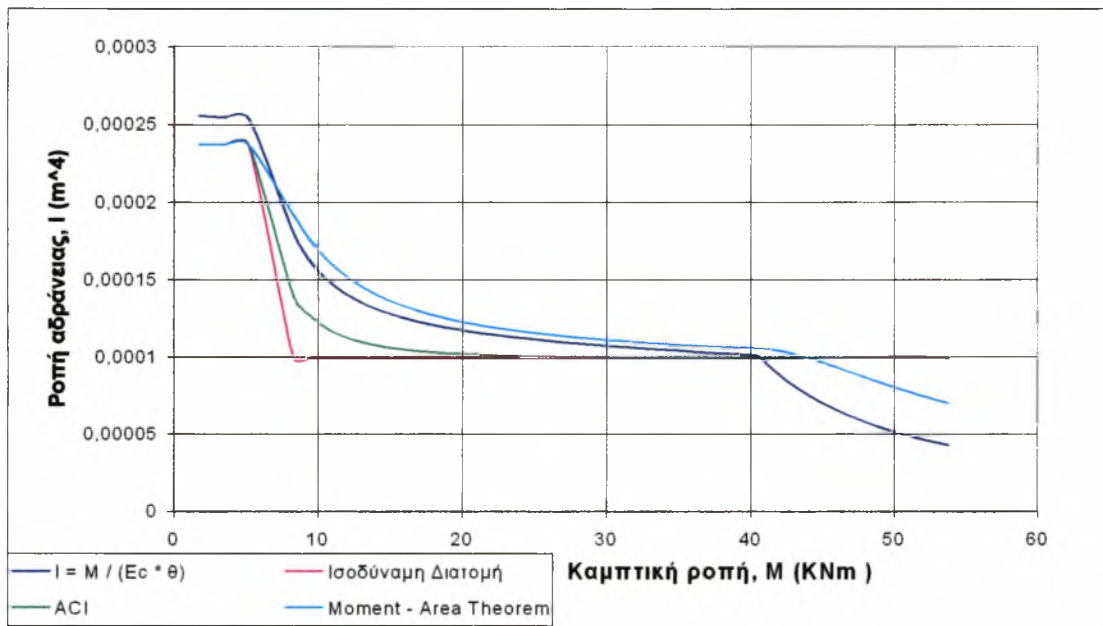
Ενισχυμένη δοκός C - S:



Σχήμα 4.21 Συγκριτικά διαγράμματα ροπής αδράνειας - καμπτικής ροπής, για C-S

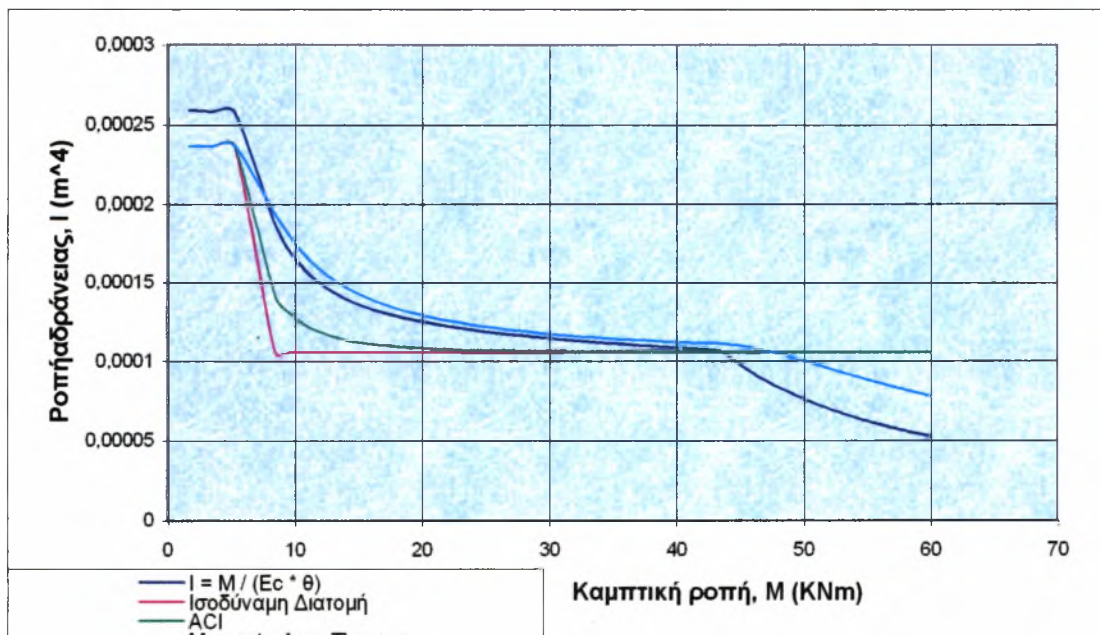


Ενισχυμένη δοκός N - S :



Σχήμα 4.22 Συγκριτικά διαγράμματα ροπής αδράνειας-καμπτικής ροπής, για την N-S

Ενισχυμένη δοκός P - S :



Σχήμα 4.23 Συγκριτικά διαγράμματα ροπής αδράνειας-καμπτικής ροπής, για την P-S



#### 4.5 Πρόβλεψη Διατμητικής Συμπεριφοράς Δοκού

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι έλεγχοι έναντι τέμνουσας σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος, η επαλήθευση των οποίων αποτελεί βασική προϋπόθεση ώστε το πρόγραμμα πρόβλεψης να δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα .

*1<sup>ος</sup> Έλεγχος (Αντοχή θλιπτήρα) :*

$$V_{Rd2} = 0,5 \times v \times f_{cd} \times b \times 0,9 \times d \quad (4.53)$$

$$\text{Όπου } v = 0,7 - f_{ck} / 200$$

Ο παραπάνω έλεγχος πραγματοποιείται στην παρειά της δοκού και αν δεν ικανοποιείται, είναι απαραίτητη η αλλαγή διατομής.

*2<sup>ος</sup> Έλεγχος αντοχής του οπλισμού διάτμησης:*

Αν ο πρώτος έλεγχος έναντι λοξής θλίψης της διατομής ικανοποιείται, οι έλεγχοι σε τέμνουσα ολοκληρώνονται με τον έλεγχο του οπλισμού διάτμησης ο οποίος πραγματοποιείται σε απόσταση  $d$  από την παρειά:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} + V_{wd} \quad (4.54)$$

Όπου

- $V_s$  : η επιβαλλόμενη τέμνουσα,
- $V_{R1}$  : η αντοχή της διατομής σε τέμνουσα λόγω δράσης βλήτρου, εμπλοκής αδρανών και συμμετοχή της θλιβόμενης ζώνης
- $V_w$  : η αντοχή του οπλισμού διάτμησης

Οι δοκοί του πειράματος που εξετάζονται σε αυτή την εργασία δεν διαθέτουν οπλισμό διάτμησης. Επομένως  $V_w = 0$  ενώ λόγω του τρόπου φόρτισης  $V_s = P / 2$ .



Επίσης :

$$V_{RD1} = [T_{rd} \times k \times (1,2 + 40 \times \rho_l) ] \times b \times d$$

Όπως προέκυψε κατά τον έλεγχο οι δοκοί του πειράματος δεν αναμένεται να αστοχήσουν από διάτμηση.

#### 4.6 Πρόβλεψη Άλλων Μορφών Αστοχίας

Η ενότητα αυτή αναφέρεται στις ενισχυμένες δοκούς στις οποίες , όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, συνήθως προηγείται η αποκόλληση του οπλισμού ενίσχυσης, έναντι της αστοχίας λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος. Η πρόβλεψη αυτού του τρόπου αστοχίας παρουσιάζει πολυπλοκότητα λόγω της δυσκολίας υπολογισμού των τάσεων συνάφειας μεταξύ του FRP και του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό κατά τον σχεδιασμό ενισχυμένων δοκών με FRP ο έλεγχος των διατμητικών και ορθών τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια FRP - σκυροδέματος ανάγεται στον υπολογισμό επαρκούς μήκους αγκύρωσης ώστε η αστοχία λόγω αποκόλλησης του FRP να μην είναι κρίσιμη. Παρόλο αυτά στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται επιλεγμένοι τρόποι υπολογισμού των τάσεων στη διεπιφάνεια ή της επιτρεπόμενης ανηγμένης παραμόρφωσης του FRP από την διεθνή βιβλιογραφία. Σημειώνεται ότι το πεδίο αυτό βρίσκεται υπό εξέλιξη και οι υπάρχουσες μέθοδοι παρουσιάζονται ιδιαίτερα συντηρητικοί.

##### 4.6.1 Μέθοδος ενίσχυσης CAA:

Καθώς η μέθοδος ενίσχυσης με εξωτερικά επικολλούμενα φύλλα ή ελάσματα FRP είναι η πιο συνηθισμένη λαμβάνει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον διεθνώς. Για το λόγο αυτό περισσότεροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την πρόβλεψη της αποκόλλησης του FRP σε αυτό τον τρόπο ενίσχυσης. Όπως έχει προαναφερθεί η αποκόλληση οφείλεται είτε σε μια ακραία διατμητική ρωγμή στο πέρας του επικολλούμενου FRP, είτε σε μια καμπτική ρωγμή στην κρίσιμη διατομή είτε τέλος σε μια καμπτικοδιατμητική ρωγμή σε κάποια τυχαία διατομή.



#### 4.6.1.1 Αποκόλληση του FRP στο πέρας του

Κατά *HolzenKampfer(1994)*:

Υπολογίζεται η μέγιστη δύναμη «αγκύρωσης», δηλαδή η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση του FRP, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο. Σημειώνεται ότι η δύναμη αυτή αποκόλλησης ( $N_{fa}$ ) αυξάνεται με το μήκος επικόλλησης  $l_b$ , μέχρις ότου λάβει μια οριακή τιμή  $l_{b,max}$  πέρα από την οποία η δύναμη αποκόλλησης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, ίση με  $N_{fa,max}$ .

$$N_{fa} = N_{fa,max} = c_1 \times k_c \times k_b \times b_{pl} \times \sqrt{f_{ctm}} \times E_{pl} \times t_{pl} \quad \text{όταν } l_b \geq l_{b,max} \quad (N)$$

Και (4.55)

$$N_{fa} = N_{fa,max} \times (l_b / l_{b,max}) \times (2 - l_b / l_{b,max}) \quad \text{όταν } l_b < l_{b,max} \quad (N)$$

Όπου

$$l_{b,max} = \sqrt{((E_{pl} \times t_{pl}) / c_2 \times f_{ctm})} \quad (mm)$$

και

$$k_b = \sqrt{[(1.125 \times (2 - b_{pl} / b))] / (1 + b_{pl} / 400)} \geq 1$$

Ο συντελεστής  $k_c$  λαμβάνεται ίσος με την μονάδα για κανονική συμπίκνωση του σκυροδέματος και ο συντελεστής  $c_1$  ίσος με 0,5 αν το ζητούμενο είναι η χαρακτηριστική τιμή της  $N_{fa}$ .

Σε όρους ανηγμένων παραμορφώσεων του FRP η εξίσωση (4.55) διαιρείται με τον όρο  $b_{pl} \times t_{pl} \times E_{pl}$  ή σε όρους τάσεων για τις οποίες θα επέλθει η αποκόλληση η εξίσωση (4.55) διαιρείται με τον όρο  $b_{pl} \times t_{pl}$ .

Κατά *Smith και Teng (αναλυτικός υπολογισμός τάσεων)(2001b)*

Οι παρακάτω τύποι υπολογίζουν τις διατμητικές και ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια του συστήματος FRP - ρητίνης και σκυροδέματος.



Βασίζονται στην παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής διατμητικών και ορθών τάσεων σε όλο το πάχος της κόλλας, σε γραμμική ελαστική συμπεριφορά του FRP καθώς και στη δυνατότητα παραμόρφωσης της δοκού και του FRP, λόγω αξονικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Οι διατμητικές παραμορφώσεις και των δύο στοιχείων (δοκός και FRP) αμελούνται για απλοποιητικούς λόγους καθώς και γιατί η επίδραση τους είναι μικρή στον υπολογισμό των διατμητικών και ορθών τάσεων.

Οι διατμητικές τάσεις δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$\tau(x) = m_1 \times V(x) + (m_2 / \lambda) \times M(0) \times e^{-\lambda x} + \tau^*(x) \quad (4.56)$$

όπου:

- $\lambda^2 = (G_a \times b_{pl} / t_{pl}) \times [(y_c + \gamma_{pl}) \times (y_c + \gamma_{pl} + \gamma_a) / (E_c \times I_c + E_{pl} \times I_{pl}) + (1 / (E_c \times A_c)) + (1 / (E_{pl} \times I_{pl}))]$
- $m_1 = (G_a / (t_a \times \lambda^2)) \times [(y_c + \gamma_{pl}) / (E_c \times I_c + E_{pl} \times I_{pl})]$
- $m_2 = (G_a \times \gamma_c) / (t_a \times E_c \times I_c)$
- $\tau^*(x)$  : ανάλογα τον τύπο φόρτισης
- $x$  : η απόσταση μεταξύ του πέρασ του FRP και του σημείου υπολογισμού των τάσεων

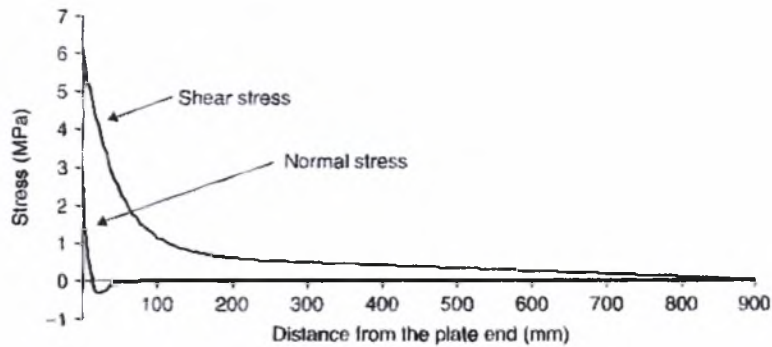
Ενώ οι ορθές τάσεις δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_y(x) = e^{-bx} \times [C_1 \times \cos(\beta x) + C_2 \times \sin(\beta x)] - n_1 \times (d\tau(x) / dx) - n_2 \times q$$





Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σύμφωνα με το μοντέλο , κοντά στο πέρας του FRP(Σχήμα 4.24):



Σχήμα 4.24 Κατανομή διατμητικών και ορθών τάσεων κοντά στο πέρας του FRP (Smith και Teng, 2001)

Όπως σημειώνεται από τους Smith και Teng, οι εξισώσεις που παραθέτονται για την εύρεση των τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια στη περίπτωση όπου εφαρμόζεται ένα συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο του ανοίγματος, είναι πιθανό να δίνουν μηδενικά αποτελέσματα γιατί οι όροι των εξισώσεων προκύπτουν πολλοί μικροί. Τα ίδια μηδενικά αποτελέσματα προκύπτουν και από διαφορετικά μοντέλα εύρεσης αναπτυσσόμενων τάσεων (Taljsten, (1997) και Vilnay,(1988)) για τον ίδιο τύπο φόρτισης, τα οποία δεν λαμβάνουν υπόψη προσθετικές τάσεις  $\tau^*(x)$  εξαρτώμενες από τον τύπο φόρτισης.

#### 4.6.1.2 Αποκόλληση του FRP στην κρίσιμη περιοχή

Η αποκόλληση του FRP λόγω καμπτικής ρωγμής στην κρίσιμη διατομή αναφέρεται ως ο περισσότερο κρίσιμος έλεγχος αποκόλλησης γιατί εδώ οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται και στις οποίες οφείλεται η αποκόλληση είναι μεγαλύτερες.



Κατά HolzenKampfer(1994):

Απλοποιητικά οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κρίσιμη διατομή υπολογίζονται από την σχέση (4.55) αν αυτή πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή  $\alpha_{fl}$  ίσο με 1,3. Και σε όρους ανηγμένης παραμόρφωσης :

$$\varepsilon_{f,fl} = \alpha_{fl} \times \varepsilon_{f,end} \quad (4.57)$$

Κατά Smith και Teng (αναλυτικός υπολογισμός τάσεων)(2001b)

Χρησιμοποιώντας τους τύπους που προτείνονται από τους Smith και Teng (2001) υπολογίζονται οι διατμητικές και ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια, σε κάθε σημείο κατά μήκος της δοκού (μεταβλητή  $x$ ).

#### 4.6.1.3 Αποκόλληση FRP σε τυχαία διατομή

Η αποκόλληση του FRP σε μια τυχαία διατομή κατά μήκος της δοκού, οφείλεται στην ανάπτυξη καμπτοδιατμητικής ρωγμής. Στην περίπτωση αυτή η αποκόλληση δεν οφείλεται μόνο στην ανάπτυξη τάσεων λόγω του ανοίγματος της ροπής, αλλά και στην ανάπτυξη επιπλέον διατμητικών τάσεων λόγω της κατακόρυφης μετακίνησης των δύο μετώπων της ρωγμής. Σημειώνεται όμως, ότι σύμφωνα με τους Smith και Teng το άνοιγμα της ρωγμής είναι πιο κρίσιμο από την σχετική μετακίνηση λόγω ρωγμής.

Κατά HolzenKampfer(1994):

Απλοποιητικά οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω λοξής ρωγμής υπολογίζονται από την σχέση (4.55) αν αυτή πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή  $\alpha_{fl}$  ίσο με 1,25. Και σε όρους ανηγμένης παραμόρφωσης :

$$\varepsilon_{f,fl} = \alpha_{fl} \times \varepsilon_{f,end} \quad (4.58)$$



#### 4.6.1.4 Υπολογισμός διατμητικών τάσεων αντοχής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένας τρόπος υπολογισμού της αντοχής σε συνάφεια σε όρους δύναμης του FRP για την οποία αστοχεί, και όχι σε όρους διατμητικών τάσεων της διεπιφάνειας του συστήματος FRP - κόλλας και σκυροδέματος.

#### Μοντέλο Chen και Teng (2001)

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε, βασίζεται σε αναλύσεις τρόπων αστοχίας και συμπεράσματα πειραματικών δεδομένων και περιγράφεται παρακάτω.

Παραδοχές μοντέλου:

- Οι Chen και Teng παρατήρησαν ότι η μορφή διαγράμματος διατμητικών τάσεων (τάσεων συνάφειας) - ολίσθησης που περιγράφει αποδοτικότερα την συμπεριφορά της διεπιφάνειας FRP και σκυροδέματος είναι το τριγωνικό διάγραμμα (σχήμα 4.25.d). Για τη διεπιφάνεια FRP - σκυροδέματος η τυπική τιμή της ολίσθησης είναι  $\delta_1 = 0,02$  mm για την μέγιστη τιμή της τάσης και  $\delta_2 = 0,2$  mm στην αστοχία. Για το λόγο αυτό ένα γραμμικό φθίνον διάγραμμα (σχήμα 4.25.b) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απλοποιητικούς σκοπούς.
- Η παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής τάσεων συνάφειας σε όλο το πλάτος της δοκού είναι μη αποδεκτή όσο αφορά την μοντελοποίηση της τοπικής συμπεριφοράς των τάσεων συνάφειας. Στην πραγματικότητα η επίδραση του λόγου του πλάτους του FRP ( $b_{pl}$ ) προς το πλάτος της δοκού ( $b$ ) είναι σημαντική. Συγκεκριμένα όταν  $b_{pl} < b$  οι δυνάμεις που μεταφέρονται από το FRP στο σκυρόδεμα οδηγούν σε μη ομοιόμορφη κατανομή τάσεων κατά το πλάτος της δοκού και την ανάπτυξη μεγαλύτερων διατμητικών τάσεων λόγω της συγκέντρωσης τάσεων στο σκυρόδεμα εκτός FRP. Για το λόγο αυτό εισάγεται ο συντελεστής  $\beta_p$  :

$$\beta_p = \sqrt{[(2 - b_{pl} / b) / (1 + b_{pl} / b)]} \quad (4.59)$$



- Επειδή η τάση συνάφειας δεν είναι εύκολα υπολογίσιμη γίνεται επιθυμητή η συσχέτιση της σχέσης  $\tau_f - \delta$  με ένα παράγοντα πιο εύκολα μετρήσιμο, όπως για παράδειγμα την αντοχή του σκυροδέματος. Με μια σειρά πειραμάτων προέκυψε αποδεκτή η συσχέτιση των τάσεων συνάφειας  $\tau_f$ , με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος όταν  $\delta_f = 0,2$  mm.
- Τέλος ο λόγος  $b_{pl} / b$  επηρεάζει σημαντικά την αντοχή συνάφειας με ένα τρόπο όμως διαφορετικό από την περίπτωση του εσωτερικού οπλισμού όπου όσο αυξάνεται το μήκος αγκύρωσής του τόσο μεγαλύτερη η απόδοση σε συνάφεια. Στην περίπτωση του εξωτερικά επικολλούμενου FRP, η αντοχή σε συνάφεια αυξάνεται με το μήκος αγκύρωσης έως ενός σημείου, πέρα από το οποίο παραμένει σταθερή.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές προέκυψε ο παρακάτω αναλυτικός τρόπος υπολογισμού της τελικής αντοχής συνάφειας:

$$P_u = 0,427 \times \beta_{pl} \times \beta_L \times f_{ct} \times b_{pl} \times L_e \quad (4.60)$$

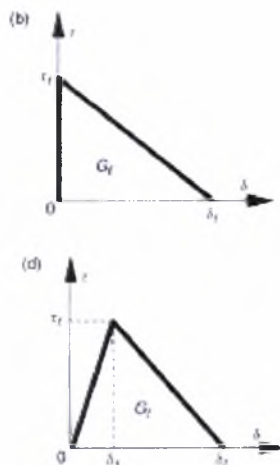
Όπου:

$$L_e = \sqrt{[(E_{pl} \times t_{pl}) / (f_{ct})]}$$

Και

$$\beta_L = 1 \quad , \text{όταν } L_{pl} \geq L_e$$

$$\beta_L = \sin(2 \times \pi / L_e) \quad , \text{όταν } L_{pl} < L_e$$



Σχήμα 4.25 μοντέλα τάσεων συνάφειας - ολίσθηση (Chen και Teng (2001))



#### 4.6.2 Μέθοδος ενίσχυσης NSM

Για την μέθοδο ενίσχυσης μέσω τοποθέτησης και επικόλλησης FRP μέσα σε εγκοπές στο εφελκούμενο πέλμα της δοκού, δεν αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία προσεγγιστικοί τύποι υπολογισμού των τάσεων συνάφειας αφού η μέθοδος αυτή βρίσκεται σε αρχικό στάδιο έρευνας. Για το λόγο αυτό το μοντέλο ανάλυσης της συμπεριφοράς της ενισχυμένης δοκού N - S δεν συμπεριλαμβάνει πρόβλεψη αποκόλλησης του FRP.

#### 4.6.3 Μέθοδος Ενίσχυσης PAF

Για την μέθοδο ενίσχυσης εφαρμόζοντας FRP μέσω ήλων το μοντέλο πρόβλεψης συμπεριλαμβάνει έλεγχο διατμητικής αστοχίας του κρίσιμου κοχλία δηλαδή αυτού που βρίσκεται κοντά στην κρίσιμη διατομή. Ο έλεγχος γίνεται υπολογίζοντας τις τάσεις συνάφειας σύμφωνα με τον τύπο:

$$\tau_a = \Delta\sigma_{pl} / \Delta x$$

όπου:

- $\Delta x$  : το μήκος του FRP του οποίου οι αναπτυσσόμενες τάσεις συνάφειας μεταβιβάζονται στον υπό εξέταση κοχλία. Για την δοκό P-S το  $\Delta x$  λαμβάνεται ίσο με 64mm (απόσταση ήλων).

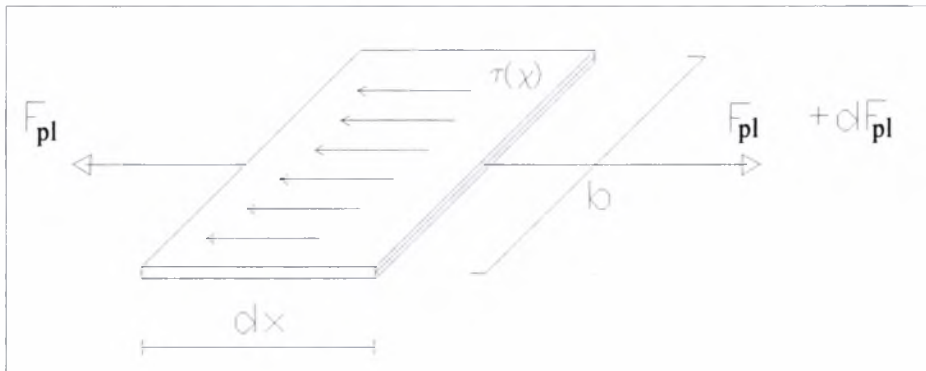
- $\Delta\sigma_{pl} = \sigma_{pl, x+dx} - \sigma_{pl, x}$

όπου :

$\sigma_{pl}$  η τάση του FRP

$$x = (L/2) - 64 \quad (\text{mm})$$

$$x + dx = L / 2 \quad (\text{mm})$$



Σχήμα 4.26 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε στοιχειώδες μήκος FRP

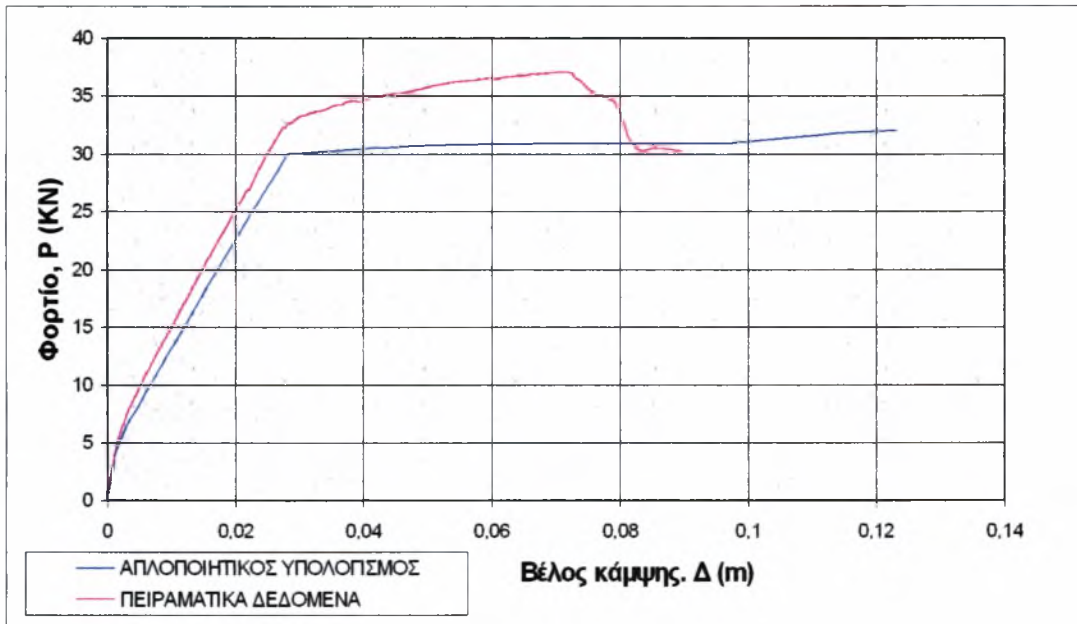
#### 4.7 Αποτελέσματα Προγράμματος Πρόβλεψης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος πρόβλεψης συγκρινόμενα με τα πειραματικά δεδομένα, καθώς και σχόλια των αποτελεσμάτων, ξεχωριστά για κάθε δοκό του πειράματος.

##### 4.7.1 Μη Ενισχυμένη Δοκός U - S

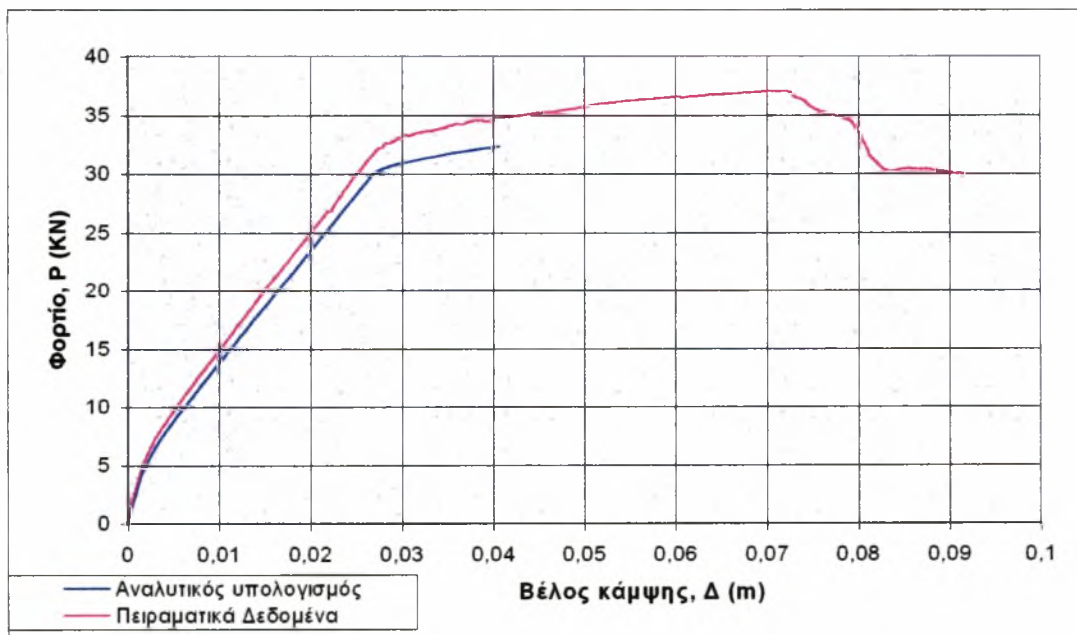
Όπως είναι αναμενόμενο, η δοκός U-S, επέδειξε την μικρότερη αντοχή, συγκριτικά με τις ενισχυμένες δοκούς, καθώς και την μεγαλύτερη πλαστιμότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το μοντέλο πρόβλεψης. Συγκεκριμένα για το μοντέλο πρόβλεψης λαμβάνονται υπόψη το συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος (διάγραμμα 4.1), ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος 0,35% και το πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα (διάγραμμα 4.5).





Σχήμα 4.27 Συγκριτικό διάγραμμα P-Δ για την δοκό U-S, απλοποιητικός τύπος

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης όπου το βέλος κάμψης υπολογίζεται με τον αναλυτικό τύπο (σχέση 4.52):



Σχήμα 4.28 Συγκριτικό διάγραμμα P - Δ για την δοκό U-S, αναλυτικός τύπος



Στον επόμενο πίνακα αναφέρονται οι ακριβείς τιμές των φορτίων, και βελών κάμψης στην ρηγμάτωση, τη διαρροή, και την αστοχία, όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και από το πρόγραμμα πρόβλεψης για την δοκό U-S:

Πίνακας 4.1 Σύγκριση Πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη U-S

	Αποτελέσματα πειράματος	Αποτελέσματα πρόβλεψης	
		Απλοποιητικό $\Delta$	Αναλυτικό $\Delta$
Φορτίο ρηγμάτωσης	5,44 kN	5,08 kN	5,08 kN
Φορτίο διαρροής	32,6 kN	30,2 kN	30,28 kN
Φορτίο αστοχίας	36,5 kN	32,3 kN	32,3 kN
Βέλος κάμψης ρηγμάτωσης	1,5mm	1,5mm	1,5mm
Βέλος κάμψης διαρροής	28,2mm	28,3mm	27mm
Βέλος κάμψης αστοχίας	73mm	121mm	40,5mm

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα:

- Το διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης όπως προκύπτει από το πρόγραμμα πρόβλεψης ταυτίζεται με αυτό που προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα έως την ρηγμάτωση, ενώ μέχρι τη διαρροή οι τιμές και η μορφή του διαγράμματος πρόβλεψης είναι αρκετά κοντά στις πραγματικές (απόκλιση στην τιμή του φορτίου στην διαρροή της τάξης του 8% ενώ για το βέλος κάμψης της τάξης του 0,5%)
- Το διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης όπως προκύπτει από το πρόγραμμα πρόβλεψης μετά την διαρροή και έως την αστοχία παρουσιάζει αρκετή απόκλιση, κυρίως κατά τον υπολογισμό του βέλους κάμψης. Το φορτίο στην αστοχία έχει απόκλιση με το πραγματικό, της τάξης του 11,5%.



- Αν και το βέλος κάμψης υπολογίζεται με δύο τρόπος κανένας δεν αποδίδει αποδεκτή απόκλιση. Σημειώνεται ότι η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού του βέλους κάμψης συνιστάται, σύμφωνα με τους Charkas et al (2003) για ενισχυμένες δοκούς με ινοπλισμένα πολυμερή. Οι δύο παραπάνω τιμές που προκύπτουν για το βέλος κάμψης φαίνεται να αποτελούν τα όρια διακύμανσης του βέλους κάμψης.
- Όπως προκύπτει από την ανάλυση της πρόβλεψης, θεωρώντας αστοχία για ανηγμένη παραμόρφωση 3,5‰ του σκυροδέματος, η παραμόρφωση του χάλυβα φτάνει το 12,6‰ μπαίνοντας στο παραβολικό τμήμα του πειραματικού διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα μεγάλη πλαστιμότητα όπως προκύπτει και από το διάγραμμα 3.16(απλοποιητικός τύπος υπολογισμού του βέλους κάμψης).
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του προγράμματος πρόβλεψης, προκύπτει ότι το συμβατικό διάγραμμα θλιπτικών τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος προσφέρει αποτελέσματα πιο κοντά στα πειραματικά δεδομένα, συγκρινόμενο με το σχηματικό διάγραμμα του σκυροδέματος (σχήμα 4.2). Σημειώνεται ότι τα δύο διαγράμματα δίνουν κοντινές τιμές κυρίως μέχρι την τιμή  $\epsilon_0 = 2 \times f_{ck} / E_c$ . Επίσης το πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα αποδίδει τιμές κοντινότερες στα πειραματικά δεδομένα, συγκρινόμενο με το συμβατικό διάγραμμα που προτείνει ο ΕΚΟΣ.
- Κατά τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας της κρίσιμης διατομής της δοκού U-S (διάγραμμα 4.20) προκύπτει σχετική διαφωνία μεταξύ των τεσσάρων τρόπων υπολογισμού της, όπως αυτοί αναπτύχθηκαν στην ενότητα 4.4 με άλλες μεθόδους να αποκλίνουν λιγότερο και άλλες περισσότερο. Συγκεκριμένα οι ροπές αδράνειας πριν την ρηγμάτωση συμφωνούν, όταν υπολογίζονται με τον τύπο του Αμερικάνικου Κανονισμού, μέσω της ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος και με βάση τον αναλυτικό τύπο υπολογισμού του βέλους κάμψης, ενώ όταν υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο  $I = (1 / M \times E_c) \times \theta$  η τιμή αποκλίνει (0,0025 έναντι 0,0023 m<sup>4</sup>). Στη συνέχεια και έως την διαρροή του χάλυβα, όλα τα



διαγράμματα έχουν την ίδια μορφή, με εξαίρεση αυτό της ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος στο οποίο η μείωση της ροπής αδράνειας γίνεται απότομα. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τον υπολογισμό του ύψους της θλιβόμενης ζώνης δεν λαμβάνεται υπόψη η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος με αποτέλεσμα το  $x$  να μειώνεται απότομα πριν και μετά την πρώτη ρηγμάτωση. Μετά την διαρροή ο τύπος που προτείνει ο αμερικάνικος κανονισμός δίνει σταθερή περίπου τιμή για την ροπή αδράνειας, ενώ όταν αυτή υπολογίζεται από τις σχέσεις 4.43 και 4.48 μειώνεται απότομα όπως συμβαίνει και με το ύψος της θλιβόμενης ζώνης.

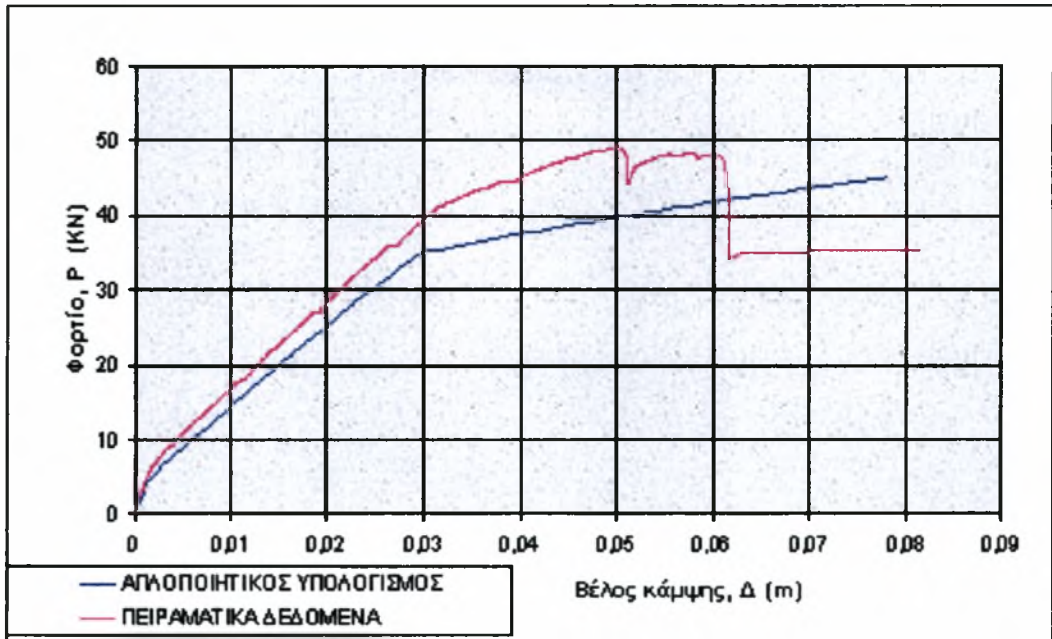
- Συμπερασματικά το πρόγραμμα πρόβλεψης της μη ενισχυμένης δοκού ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα με μοναδική εξαίρεση το βέλος κάμψης κατά την αστοχία. Σημειώνεται ότι αν ληφθεί ως αστοχία, ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος μικρότερη του 3,5‰ και συγκεκριμένα 3‰, όπως προτείνει ο Αμερικάνικος Κανονισμός, το βέλος κάμψης που υπολογίζεται με τον αναλυτικό τύπο, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την πλαστιμότητα της διατομής μέσω της καμπυλότητας  $\theta$ , είναι περισσότερο κοντά στα πειραματικά δεδομένα.

#### 4.7.2 Ενισχυμένη δοκός C-S

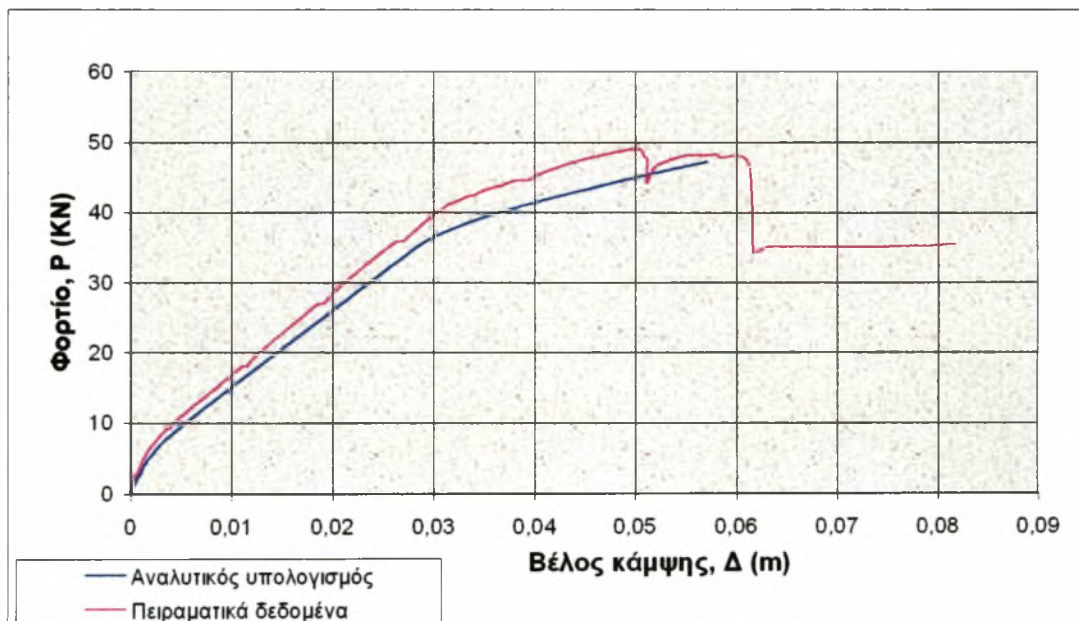
Η δοκός που ενισχύθηκε με εξωτερικά επικολλούμενο έλασμα FRP, επέδειξε αντοχή αυξημένη κατά 30% στην αστοχία, σε σύγκριση με την μη ενισχυμένη δοκό και ταυτόχρονα μικρότερη πλαστιμότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για τη δοκό C-S όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το πρόγραμμα πρόβλεψης. Και σε αυτή την περίπτωση ενίσχυσης για το μοντέλο πρόβλεψης λαμβάνονται υπόψη το συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος (διάγραμμα 4.1), ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος 0,35% και το πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα (διάγραμμα 4.5). Επίσης παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις ακριβείς τιμές του φορτίου και του βέλους κάμψης.



Αρχικά, όταν για το βέλος κάμψης χρησιμοποιείται ο απλοποιητικός τύπος το διάγραμμα  $P - \Delta$  προκύπτει όπως παρακάτω:



Σχήμα 4.29 Φορτίο - Βέλος κάμψης για την δοκό C-S , απλοποιητικός τύπος



Σχήμα 4.20 φορτίο - βέλος κάμψης για τη δοκό C-S ,αναλυτικός τύπος





Πίνακας 4.2 Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, για τη C-S

	Αποτελέσματα πειράματος	Αποτελέσματα πρόβλεψης	
		Απλοποιητικό Δ	Αναλυτικό Δ
Φορτίο ρηγμάτωσης	5,98 KN	5,7 KN	5,8 KN
Φορτίο διαρροής	40,8 KN	34,96 KN	35,44 KN
Φορτίο αστοχίας	48,2 KN	47,16 KN	47,16 KN
Βέλος κάμψης ρηγμάτωσης	1,84mm	1,52mm	1,4mm
Βέλος κάμψης διαρροής	30mm	29,4mm	28,8mm
Βέλος κάμψης αστοχίας	58,5mm	78,2mm	57,1mm

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω:

- Οι τιμές που προκύπτουν από το πρόγραμμα πρόβλεψης για την ρηγμάτωση είναι πολύ κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης παρουσιάζεται συμφωνία κατά την σύγκριση με την πρόβλεψη της μη ενισχυμένης δοκού, αφού το φορτίο ρηγμάτωσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερο για την δοκό C-S (σε ποσοστό 11%), αποτέλεσμα αναμενόμενο αφού σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου, ο χρόνος ζωής της δοκού C-S είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της δοκού U-S (58 ημέρες έναντι 49 ημερών) και επομένως η πραγματική αντοχή του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη καθώς και γιατί ο εξωτερικός οπλισμός αυξάνει την δυσκαμψία της διατομής σε ποσοστό 2.2%. Όπως προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα το φορτίο ρηγμάτωσης της δοκού C-S είναι αυξημένο σε ποσοστό 9,9% συγκριτικά με την μη ενισχυμένη δοκό.





- Και στη διαρροή οι τιμές του φορτίου και του βέλους κάμψης που προκύπτουν από το πρόγραμμα πρόβλεψης είναι πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα η προβλεπόμενη τιμή του φορτίου παρουσιάζει απόκλιση της τάξης του 13% από τα πειραματικά δεδομένα, ενώ το βέλος κάμψης απόκλιση 3,3%.
- Στην αστοχία το φορτίο παρουσιάζει απόκλιση της τάξης του 2,15% .
- Για την ενισχυμένη δοκό C-S σύμφωνα με τους Charakas et all (2003) προτείνεται ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού του βέλους κάμψης όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.5.3. Πράγματι, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ικανοποιητικά και πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα, σε αντίθεση με αυτά του απλοποιητικού τύπου υπολογισμού του βέλους κάμψης, τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση. Σημειώνεται ότι ο αναλυτικός τύπος λαμβάνει υπόψη την δυσκαμψία της διατομής όπως αυτή κατανέμεται σε όλο το μήκος της δοκού. Αντίθετα ο απλοποιητικός τύπος υπολογισμού του βέλους κάμψης υπερεκτιμά την βύθιση και κατά συνέπεια την πλαστιμότητα της κρίσιμης διατομής.
- Σύμφωνα με την ανάλυση της πρόβλεψης αλλά και όπως είναι αναμενόμενο, η παραμόρφωση του χάλυβα περιορίστηκε στην ενισχυμένη δοκό και συγκεκριμένα για αστοχία σκυροδέματος 3,5‰, ήταν 7.16‰ ενώ η παραμόρφωση του FRP ήταν 8.72‰ , δηλαδή μόλις 48% της αντοχής του.
- Και στη δοκό C-S, τα διαγράμματα ροπής αδράνειας υπολογιζόμενη σύμφωνα με την ενότητα 4.5 και καμπτικής ροπής παρουσίαζαν ασυμφωνία. Τα χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων και η μορφή τους είναι όμοια με αυτά της μη ενισχυμένης δοκού. Εξαιρέση αποτελεί η λιγότερο απότομη μείωση της ροπής αδράνειας, μετά την διαρροή του χάλυβα, όταν η ροπή αδράνειας υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις(4.47), (4.52) (διάγραμμα 4.21) συγκριτικά με το αντίστοιχο διάγραμμα της μη ενισχυμένης δοκού(διάγραμμα 4.20)
- Για την δοκό C-S έγιναν έλεγχοι πρόωρης αστοχίας λόγω αποκόλλησης του FRP, όπως περιγράφονται στην ενότητα 4.6.1. Σύμφωνα με τον έλεγχο αποκόλλησης στο πέρας του ελάσματος κατά Holzenkampfer (1994) η τιμή των τάσεων που



αναπτύσσονται στην ακραία ρωγμή, προκύπτει οριακά μικρότερη από την αντοχή της διεπιφάνειας όταν αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο των Cheng και Teng (2001) ενώ προκύπτει οριακά μεγαλύτερη όταν η αντοχή υπολογίζεται σύμφωνα με τον εμπειρικό τύπο κατά Higouyuki and Wu (1997). Από τον αναλυτικό υπολογισμό των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά Smith και Teng(2002) προκύπτουν μηδενικές διατμητικές τάσεις για τον συγκεκριμένο τύπο φόρτισης. Ο έλεγχος αποκόλλησης σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή ,που αποτελεί και πιο κρίσιμο έλεγχο δεν επαληθεύεται, όπως προκύπτει από τα μοντέλα ελέγχου, όμοια και ο έλεγχος σε τυχαία καμπτοδιατμητική ρωγμή. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα η δοκός πράγματι αστοχεί λόγω αποκόλλησης του FRP κοντά στο μέσο της διατομής (περίπου 300mm νότια του μέσου του ανοίγματος). Θεωρώντας ανηγμένη παραμόρφωση της διατομής που αστοχεί η δοκός, την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση, όπως υπολογίζεται κατά Holzenkampfer, την στιγμή της αστοχίας της δοκού το φορτίο της κρίσιμης διατομής είναι 30% μικρότερο από το πραγματικό φορτίο αστοχίας της. Προκύπτει λοιπόν ότι τα μοντέλα ελέγχου αποκόλλησης του FRP, είναι ιδιαίτερα συντηρητικά λόγω της πολυπλοκότητας και δυσκολίας που παρουσιάζει η μοντελοποίηση των τάσεων συνάφειας. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα των ελέγχων αποκόλλησης.

- Κατά τον έλεγχο της δοκού σε τέμνουσα, η δοκός ελέγχεται και μετά την ενίσχυση, αφού η αύξηση της καμπτικής αντοχής μπορεί να μετατρέψει σε κρίσιμη την αστοχία από τέμνουσα. Όπως προέκυψε από την ανάλυση, ο 1<sup>ος</sup> έλεγχος - αντοχή του θλιπτήρα δεν είναι κρίσιμος και μετά την ενίσχυση, ενώ ο 2<sup>ος</sup> έλεγχος - επάρκεια σπλισμού διάτμησης επαληθεύεται σχεδόν οριακά, σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό σχετικά με τον σχεδιασμό δοκών έναντι τέμνουσας.



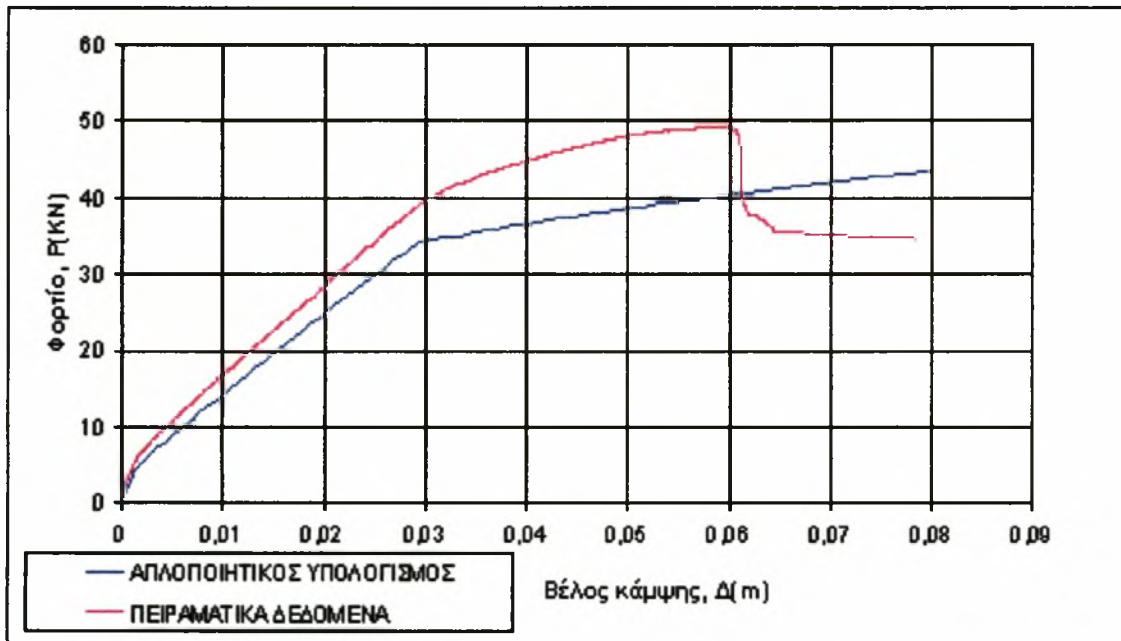
Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα έλεγχων αποκόλλησης για τη C-S

	Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις		Αντοχή τάσεων συνάφειας	
	Στο έλασμα κατά Holzenkampfer (1994) (MPa)	Στη διεπιφάνεια κατά Smith and Teng (Αναλυτικός υπολογισμός τάσεων) (KN)	κατά Chen and Teng (2001) (MPa)	κατά Higouyuki and Wu(1997) (MPa)
Ακραία ρωγμή	362,5	787	369,4	320,2
Ενδιάμεση καμπτική ρωγμή	471,25	-	369,4	320,2
Τυχαία καμπτο- διατμητική ρωγμή	453,13	-	369,4	320,2

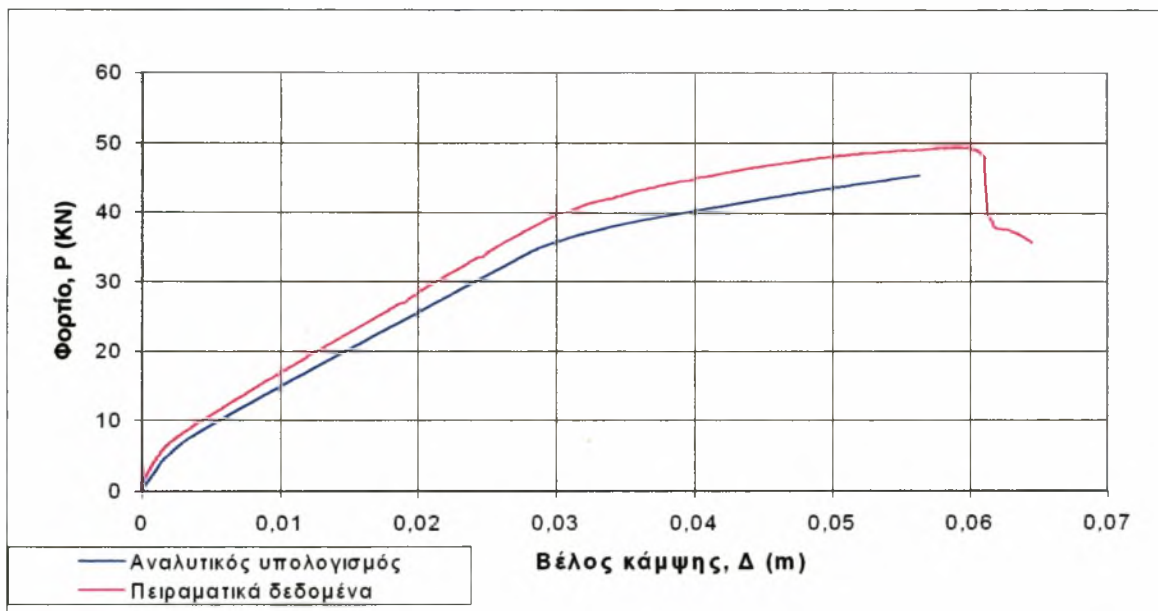
#### 4.7.3 Ενισχυμένη δοκός N-S

Η δοκός που ενισχύθηκε με FRP τοποθετημένα κάθετα σε εγκοπές, επέδειξε αντοχή στην αστοχία αυξημένη κατά 34% συγκριτικά με την μη ενισχυμένη δοκό καθώς και μικρότερη πλαστιμότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα και το πρόγραμμα πρόβλεψης. Και σε αυτή την περίπτωση ενίσχυσης για το μοντέλο πρόβλεψης λαμβάνονται υπόψη το συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος (διάγραμμα 4.1), ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος 0,35% και το πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα (διάγραμμα 4.5). Επίσης παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις ακριβείς τιμές του φορτίου και του βέλους κάμψης.

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης όταν το βέλος κάμψης υπολογίζεται σύμφωνα με τον απλοποιητικό τύπο:



Σχήμα 4.21 Φορτίο - Βέλος Κάμψης για την δοκό N-S, απλοποιητικός τύπος



Σχήμα 4.22 Φορτίο - Βέλος κάμψης για την δοκό N-S , αναλυτικός τύπος



Πίνακας 4.4 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη N-S

	Αποτελέσματα πειράματος	Αποτελέσματα πρόβλεψης	
		Απλοποιητικό Δ	Αναλυτικό Δ
Φορτίο ρηγμάτωσης	6,43 KN	6 KN	6 KN
Φορτίο διαρροής	40 KN	34,22 KN	34,22 KN
Φορτίο αστοχίας	49,2 KN	45,325 KN	45,325 KN
Βέλος κάμψης ρηγμάτωσης	1,96mm	2,1mm	2,1mm
Βέλος κάμψης διαρροής	30,56mm	29,66mm	29,67mm
Βέλος κάμψης αστοχίας	60mm	92,2mm	56mm

Από τα παραπάνω προκύπτει:

- Οι τιμές που δίνει το πρόγραμμα πρόβλεψης για το φορτίο και το βέλος κάμψης στη ρηγμάτωση είναι κοντά σε αυτές των πειραματικών δεδομένων με απόκλιση περίπου 7% για το φορτίο και 5% για το βέλος κάμψης. Επίσης συγκρίνοντας τη ρηγμάτωση της δοκού N-S και της C-S προκύπτει ότι η πρώτη είναι λίγο μεγαλύτερη, συμφωνώντας με τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό δικαιολογείται μερικώς από την μεγαλύτερη δυσκαμψία που προσφέρει ο οπλισμός ενίσχυσης λόγω της κάθετης τοποθέτησης του, συγκριτικά με την μέθοδο CAA, Όπως προέκυψε από την ανάλυση, η δυσκαμψία του οπλισμού ενίσχυσης στην περίπτωση της δοκού N-S είναι 313 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της δοκού C -S. Παρόλο αυτά η δυσκαμψία του οπλισμού ενίσχυσης είναι ασήμαντη συγκριτικά με αυτή της διατομής σκυροδέματος.
- Και στη διαρροή, οι τιμές του φορτίου και του βέλους κάμψης που προκύπτουν από το πρόγραμμα πρόβλεψης είναι κοντά σε αυτές που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα το προβλεπόμενο φορτίο παρουσιάζει



απόκλιση 12,5% από το πραγματικό ενώ το βέλος κάμψης 2,7% από το πραγματικό. Επίσης συγκρίνοντας την διαρροή της δοκού N-S και C-S προκύπτει ότι η πρώτη είναι ελάχιστα μικρότερη, το οποίο συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα.

- Στην αστοχία το προβλεπόμενο φορτίο αποκλίνει από το πραγματικό σε ποσοστό 8%, ενώ το βέλος κάμψης όταν υπολογίζεται από τον αναλυτικό τύπο, όπως προτείνουν οι Charkas et al (2003) για ενισχυμένες δοκούς με FRP, αποκλίνει σε ποσοστό 6,7%. Η απόκλιση αυτή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, σε αντίθεση με το προβλεπόμενο βέλος κάμψης όταν αυτό υπολογίζεται με τον απλοποιητικό τύπο. Συγκρίνοντας την προβλεπόμενη αστοχία των δοκών N-S και C-S προκύπτει ότι η πρώτη δοκός αποδίδει μικρότερη αντοχή (σχήμα 4.14) το οποίο συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι από το πειραματικό διάγραμμα της δοκού C-S φαίνεται ότι η αντοχή στην αστοχία είναι μικρότερη από αυτή της δοκού N-S. Αυτό οφείλεται σε μια τοπική πιθανώς αποκόλληση του FRP η οποία δεν ήταν η κρίσιμη, αλλά προκάλεσε μικρή μείωση της αντοχής. Από το ίδιο διάγραμμα φαίνεται καθαρά η κλίση της καμπύλης πριν την τοπική αστοχία και η αλλαγή μετά από αυτή. Η αναμενόμενη μικρότερη αντοχή της δοκού N-S δικαιολογείται από το λόγο ότι το στατικό ύψος του οπλισμού ενίσχυσης, σε αυτή την περίπτωση, λόγω του τρόπου τοποθέτησής του προκύπτει μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο της δοκού C-S (σχέσεις 4.28 και 4.29)
- Και σε αυτή την περίπτωση τα διαγράμματα ροπής αδράνειας - καμπτικής ροπής που προέκυψαν από τους υπολογισμούς σύμφωνα με την ενότητα 4.5 παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά και μορφή, με αυτά της δοκού C-S.

#### 4.7.4 Ενισχυμένη δοκός P-S:

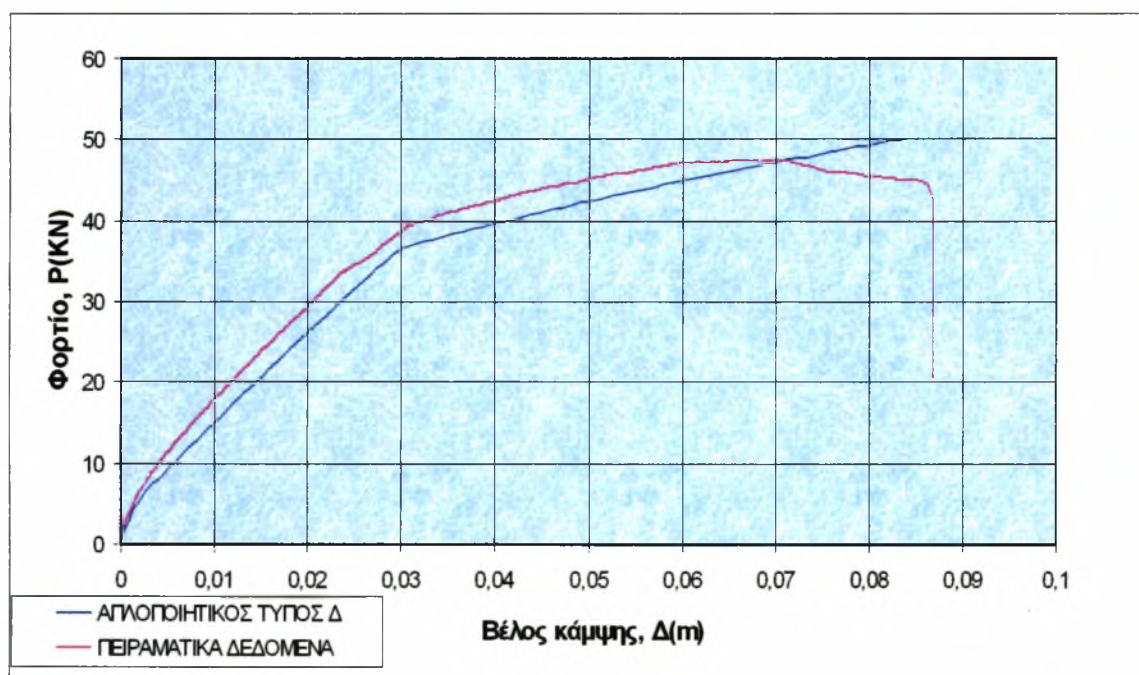
Η δοκός P-S που ενισχύθηκε με υβρίδιο έλασμα FRP το οποίο εφαρμόστηκε μέσω ήλων, επέδειξε αύξηση της καμπτικής αντοχής σε ποσοστό 27,5% σε σύγκριση με την μη ενισχυμένη δοκό καθώς και την μεγαλύτερη πλαστιμότητα από όλες τις ενισχυμένες δοκούς, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για τη δοκό P-S όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το





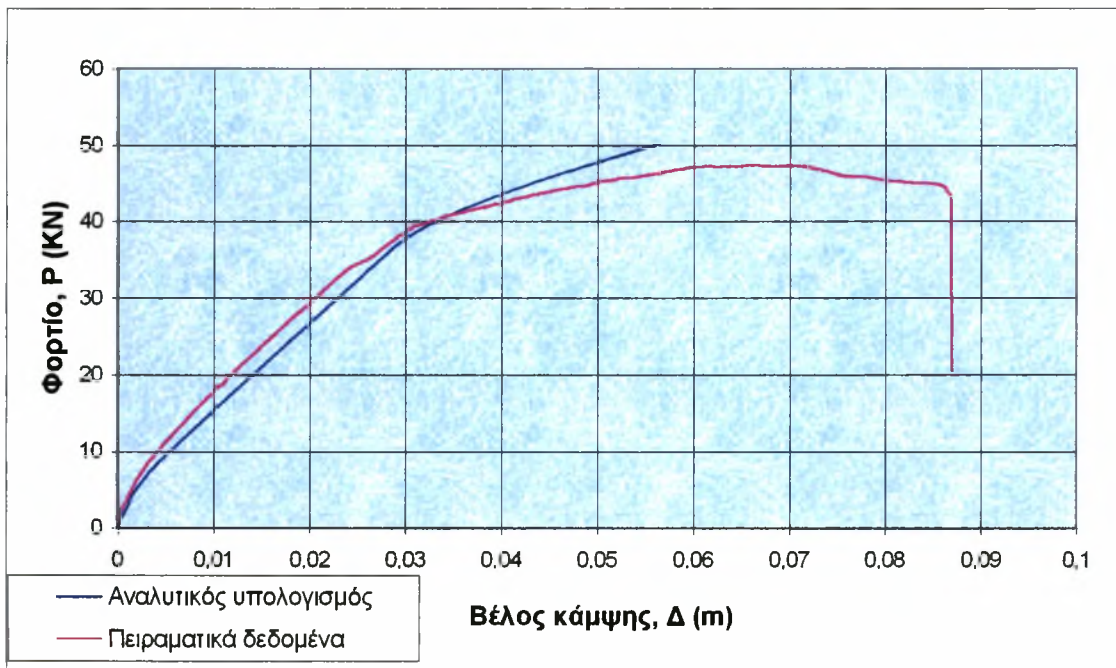
πρόγραμμα πρόβλεψης. Και σε αυτή την περίπτωση ενίσχυσης για το μοντέλο πρόβλεψης λαμβάνονται υπόψη το συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος (διάγραμμα 4.1), ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος 0,35% και το πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα (διάγραμμα 4.5). Επίσης παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις ακριβείς τιμές του φορτίου και του βέλους κάμψης.

Αρχικά παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίο - βέλος κάμψης, όταν το βέλος κάμψης υπολογίζεται με τον απλοποιητικό τύπο



Σχήμα 4.23 Φορτίο - Βέλος κάμψης για τη δοκό P-S, απλοποιητικός τύπος

Παρακάτω παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα όταν το βέλος κάμψης υπολογίζεται από τον αναλυτικό τύπο.



Σχήμα 4.24 Φορτίο -Βέλος κάμψης για τη δοκό P-S , αναλυτικός τύπος

Πίνακας 4.5 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη P-S

	Αποτελέσματα πειράματος	Αποτελέσματα πρόβλεψης	
		Απλοποιητικό Δ	Αναλυτικό Δ
Φορτίο ρηγμάτωσης	6,8 kN	6,5 kN	6,5 kN
Φορτίο διαρροής	39,4 kN	36 kN	38,1 kN
Φορτίο αστοχίας	47,3 kN	50 kN	50 kN
Βέλος κάμψης ρηγμάτωσης	2,3mm	2,15mm	2,15mm
Βέλος κάμψης διαρροής	31,3mm	28,8mm	29,9mm
Βέλος κάμψης αστοχίας	71mm	84mm	56,4mm

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:



- Το φορτίο και το βέλος κάμψης ρηγμάτωσης, όπως προκύπτει από το πρόγραμμα πρόβλεψης, είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές με απόκλιση 4,4% για το φορτίο και 6,5% για το βέλος κάμψης. Όπως προκύπτει συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα των ενισχυμένων δοκών, η δοκός P-S παρουσιάζει το μεγαλύτερο φορτίο ρηγμάτωσης. Αυτό δικαιολογείται κυρίως από τον αρκετά μεγαλύτερο χρόνο ζωής της δοκού P-S (115 ημέρες) και μερικώς από το μεγαλύτερο ποσοστό του οπλισμού ενίσχυσης το οποίο συγκρινόμενο με τις υπόλοιπες ενισχυμένες δοκούς είναι 3,84 φορές μεγαλύτερο. Όπως προκύπτει από την ανάλυση αν και το μέτρο ελαστικότητας του υβριδίου ελάσματος είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του ελάσματος, η δυσκαμψία της δοκού P-S είναι μεγαλύτερη από ότι των υπόλοιπων ενισχυμένων δοκών.
- Επίσης το φορτίο και το βέλος κάμψης διαρροής, όπως προκύπτει από το πρόγραμμα πρόβλεψης, αποκλίνουν κατά 7,7% και 7.3% αντίστοιχα από τις πραγματικές τιμές.
- Στην αστοχία, φαίνεται το πρόγραμμα πρόβλεψης να υπερεκτιμά την αντοχή της δοκού, αφού προκύπτει 6% μεγαλύτερη από την πραγματική καμπτική αντοχή. Επίσης, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ενισχυμένες δοκούς, το βέλος κάμψης υπολογιζόμενο με τον αναλυτικό τύπο, δεν δίνει ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντίθετα το βέλος κάμψης που προκύπτει από τον απλοποιητικό τύπο αποκλίνει κατά 14% από το πραγματικό.
- Από την σύγκριση των πειραματικών διαγραμμάτων P -Δ για όλες τις ενισχυμένες δοκούς εύκολα συμπεραίνεται ότι η καμπτική συμπεριφορά της δοκού P-S διαφέρει αρκετά από τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα παρουσιάζει την μικρότερη αύξηση της αντοχής καθώς και αυξημένη πλαστιμότητα σε σύγκριση με τις δοκούς N-S και C-S. Τα παραπάνω δικαιολογούνται κυρίως από το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου πολυμερούς που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο ενίσχυσης (σχήμα 4.6) στο οποίο οφείλεται η μεγαλύτερη πλαστιμότητα της δοκού καθώς και από τον τρόπο σύνδεσης του FRP με τη δοκό . Συγκεκριμένα η χρήση των ήλων για την μεταφορά της δύναμης του FRP φαίνεται να παρουσιάζει απώλειες αφού η δύναμη μεταφέρεται μόνο από τα σημεία που εφαρμόζονται οι ήλοι, ενώ ταυτόχρονα η σχετική ολίσθηση του FRP



με την επιφάνεια σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από ότι αυτή των δοκών N-S και C-S. Το πρόγραμμα πρόβλεψης δεν λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε ολίσθηση του FRP.

- Κατά την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της δοκού P-S, γίνεται έλεγχος διατμητικής αστοχίας των ήλων. Συγκεκριμένα ο έλεγχος γίνεται στον ήλο που αναλαμβάνει την κρίσιμη διατομή της δοκού. Όπως προέκυψε από την ανάλυση η δύναμη που καλείται να αναλάβει ο κρίσιμος ήλος δεν ξεπερνάει το 25% της διατμητικής αντοχής του.

#### 4.8 Σχόλια - συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ή συνοψίζονται κάποια γενικά σχόλια που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση και σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

- Για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης χρησιμοποιήθηκε ο απλοποιητικός τύπος (σχέση 4.50) και ο αναλυτικός (σχέση 4.52). Όπως προέκυψε από την σύγκριση των πειραματικών και προβλεπόμενων διαγραμμάτων φαίνεται ότι ο αναλυτικός τύπος προσφέρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις δοκούς N-S και C-S, λιγότερο ικανοποιητικά για τη δοκό P-S και μη αποδεκτά για τη δοκό U-S. Επίσης συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων 4.13 και 4.14 προκύπτει ότι οι δύο τρόποι υπολογισμού του βέλους κάμψης δίνουν αντίθετα αποτελέσματα, ενώ φαίνεται τα συγκριτικά διαγράμματα που βασίζονται στον αναλυτικό τύπο(διάγραμμα 4.14), να είναι περισσότερο κοντά στα πραγματικά, με εξαίρεση την μη ενισχυμένη δοκό. Επίσης είναι φανερό ότι ο απλοποιητικός τύπος που χρησιμοποιείται από τον Ευρωκώδικα κατά τον σχεδιασμό μη ενισχυμένων στοιχείων, υπερεκτιμά το βέλος κάμψης προσδίδοντας μεγαλύτερη πλαστιμότητα από την πραγματική. Αποτελεί δηλαδή το πάνω όριο του υπολογιστικού βέλους κάμψης, χωρίς να ανταποκρίνεται στην πραγματική βύθιση του στοιχείου, κατά την αστοχία, παρόλο που λαμβάνει υπόψη μερική ρηγμάτωση της διατομής και όχι την πλήρη.
- Συγκρίνοντας τα διαγράμματα ροπής αδράνειας - καμπτική ροπή όπως υπολογίστηκαν για κάθε δοκό ξεχωριστά, προκύπτουν σημαντικές διαφορές για



κάθε μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Διαπιστώνεται ότι όταν η ροπή αδράνειας υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο  $I = (1/E_c \times \Theta) \times M$  προκύπτει διάγραμμα πιο συντηρητικό (μεγαλύτερες τιμές πριν την ρηγμάτωση και μικρότερες μετά τη διαρροή) συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες μεθόδους, συμφωνώντας με το παραπάνω συμπέρασμα που προκύπτει για τον απλοποιητικό υπολογισμό του βέλους κάμψης. Επίσης ο τύπος που προτείνει ο Αμερικάνικος Κανονισμός δεν φαίνεται να συμφωνεί με την προβλεπόμενη συμπεριφορά των δοκών, αφού δεν προσφέρει μειούμενο κλάδο του διαγράμματος μετά τη διαρροή και ο οποίος μπορεί να δικαιολογηθεί από την μείωση του ύψους της θλιβόμενης ζώνης μετά τη διαρροή. Επομένως η τροποποίηση του τύπου , σύμφωνα με τους El-Mihilmy και Tedesco, 2003 όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.4.3, για τα διάφορα στάδια πριν και μετά της ρηγμάτωσης, και της διαρροής είναι επιτακτική.

- Συγκρίνοντας τα πειραματικά δεδομένα και συγκεκριμένα των ενισχυμένων δοκών C-S και N-S παρατηρείται όμοια συμπεριφορά των δύο δοκών (ρηγμάτωση, δυσκαμψία, διαρροή, αντοχή στην αστοχία) με μοναδική διαφορά την αντοχή σε συνάφεια του συστήματος ενίσχυσης. Παρατηρείται ότι στη δοκό C-S η αποκόλληση του FRP επέρχεται νωρίτερα και μπορεί εύκολα να δικαιολογηθεί από το γεγονός των μεγαλύτερων τάσεων συνάφειας που αναπτύσσονται στη δοκό N-S λόγω του τρόπου τοποθέτησης του FRP. Επομένως η μέθοδος ενίσχυσης NSM προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με την μέθοδο CAA.
- Παρατηρώντας τα πειραματικά αποτελέσματα των ενισχυμένων δοκών C-S και N-S μετά την αστοχία προκύπτει ότι οι δοκοί μετά την αποκόλληση του FRP συμπεριφέρονται όπως η μη ενισχυμένη δοκός U-S έως να αστοχήσουν από σύνθλιψη σκυροδέματος, ή αστοχία του χάλυβα, αφού οι δοκοί είναι πλέον υποοπλισμένες.
- Συγκρίνοντας τα πειραματικά δεδομένα των δοκών U-S και P-S προκύπτει ότι η ενισχυμένη δοκός παρουσιάζει μεγαλύτερη πλαστιμότητα έναντι της μη ενισχυμένης δοκού. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα, ότι ο τρόπος





ενίσχυσης όπου το FRP εφαρμόζεται μέσω ήλων επιτρέπει την πλάσιμη συμπεριφορά της δοκού, παρόλο που αυξάνεται το ποσοστό οπλισμού. Σημειώνεται ότι ο χρόνος ζωής της δοκού P-S είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της μη ενισχυμένης δοκού, επομένως η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναμένεται μεγαλύτερη και άρα η αντοχή ρηγμάτωσης της δοκού μεγαλύτερη.

#### 4.9 Παραμετρική Ανάλυση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για κάθε μέθοδο ενίσχυσης των δοκών με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών. Η παραμετρική ανάλυση βασίζεται στο πρόγραμμα πρόβλεψης που περιγράφηκε στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο και θεωρείται ότι τα αποτελέσματα που προσφέρει είναι ρεαλιστικά, αν η δοκός δεν αστοχήσει πρόωρα λόγω αποκόλλησης του ινοπλισμένου πολυμερούς, αλλά λόγω σύνθλιψης σκυροδέματος ( $\epsilon_u = 3,5\%$ ). Συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση του ποσοστού, του είδους και του μέτρου ελαστικότητας του οπλισμού ενίσχυσης, η επίδραση της ποιότητας του σκυροδέματος, της ύπαρξης θλιβόμενου οπλισμού και του ποσοστού του εσωτερικού οπλισμού. Σε κάθε σύγκριση ως δοκός ελέγχου αναφέρεται η αντίστοιχη δοκός με χαρακτηριστικά αυτά που περιγράφονται στο πείραμα (3<sup>ο</sup> κεφάλαιο) και η προβλεπόμενη συμπεριφορά της.

##### 4.9.1 Ινοπλισμένο Πολυμερές

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση όταν ως μεταβλητές παράμετροι θεωρήθηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά και το ποσοστό του οπλισμού ενίσχυσης.



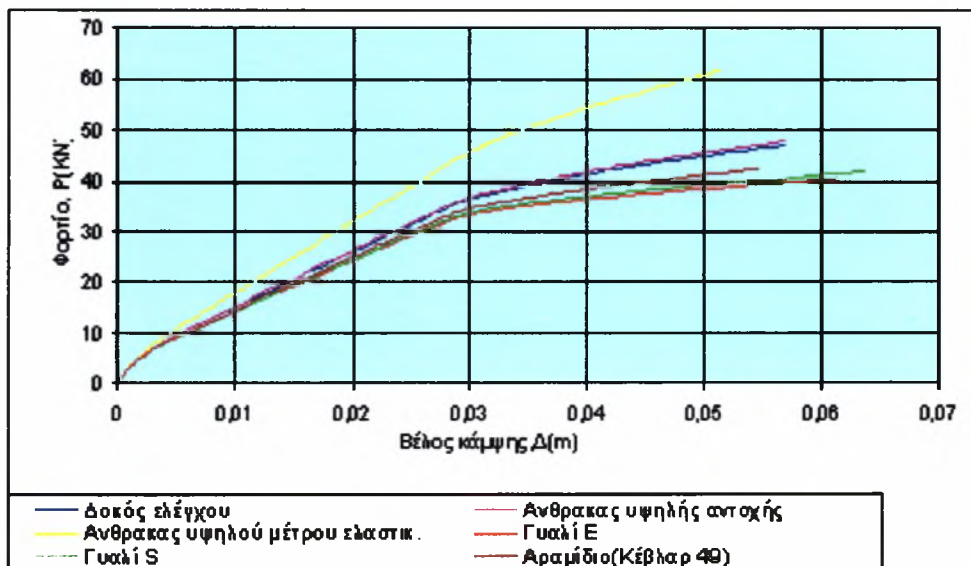


#### 4.9.1.1 Είδος Οπλισμού Ενίσχυσης

Συγκεκριμένα για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκε οπλισμός από ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής, υψηλού μέτρου ελαστικότητας, από ίνες γυαλιού κοινού τύπου(E), από ίνες γυαλιού υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας (S) και από ίνες αραμιδίου (Κέβλαρ 49). Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζεται η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας για το κάθε είδος οπλισμού.

Πίνακας 4.6 Ενδεικτικές ιδιότητες ελασμάτων (Τριανταφύλλου,2003 )

Υλικό ινών	Μέτρο Ελαστικότητας (Gra)	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)
Άνθρακας -δοκός ελέγχου	154,62	2791,7
Άνθρακας υψηλής αντοχής	165	3360
Άνθρακας υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας	490	2791,7
Γυαλί (E)	52,5	2100
Γυαλί (S)	63	3360
Αραμίδιο (Κέβλαρ 49)	91	3360



Σχήμα 4.25 Συγκριτικά διαγράμματα φορτίου- βέλους κάμψης για τη μέθοδο ενίσχυσης CAA



Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε ενισχυμένη δοκό με τα παραπάνω υλικά (πίνακας 4.7)

Πίνακας 4.7 Συγκρινόμενα αποτελέσματα ενισχυμένων δοκών (CAA) με διάφορα υλικά

Υλικό	Ανηγμένη παραμόρφωση FRP	Ανηγμένη παραμόρφωση χάλυβα	Ροπή στην αστοχία (KNm)	Φορτίο στην αστοχία (KN)	Βέλος κάμψης (αναλυτικός υπολογισμός) (m)
Δοκός ελέγχου	0,0087	0,0072	56,01	47,16	0,057
Άνθρακας υψηλής αντοχής	0,0085	0,007	56,8	47,8	0,058
Άνθρακας υπέρ- υψηλού μέτρου ελαστικότητας	0,0055	0,0043	73	61	0,051
Γυαλί (E)	0,01308	0,0115	48	40,5	0,06
Γυαλί (S)	0,013	0,011	49	42	0,064
Αραμίδιο (Κέβλαρ 49)	0,010	0,0085	50	42	0,054

#### 4.9.1.2 Ποσοστό οπλισμού ενίσχυσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, όταν ως μεταβλητή παράμετρος θεωρήθηκε το ποσοστό του οπλισμού ενίσχυσης, και συγκεκριμένα το πλάτος του ελάσματος. Ως βάση σύγκρισης θεωρήθηκε η δοκός ελέγχου που ενισχύεται με την μέθοδο των εξωτερικά επικολλούμενων FRP και της οποίας το έλασμα έχει πλάτος 51mm. Συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση της αύξησης του πλάτους του ελάσματος, όταν αυτό διπλασιάζεται (102mm) και όταν γίνεται ίσο με το πλάτος της δοκού (πίνακας 4.8). Παρακάτω παρουσιάζονται και τα συγκρινόμενα διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης

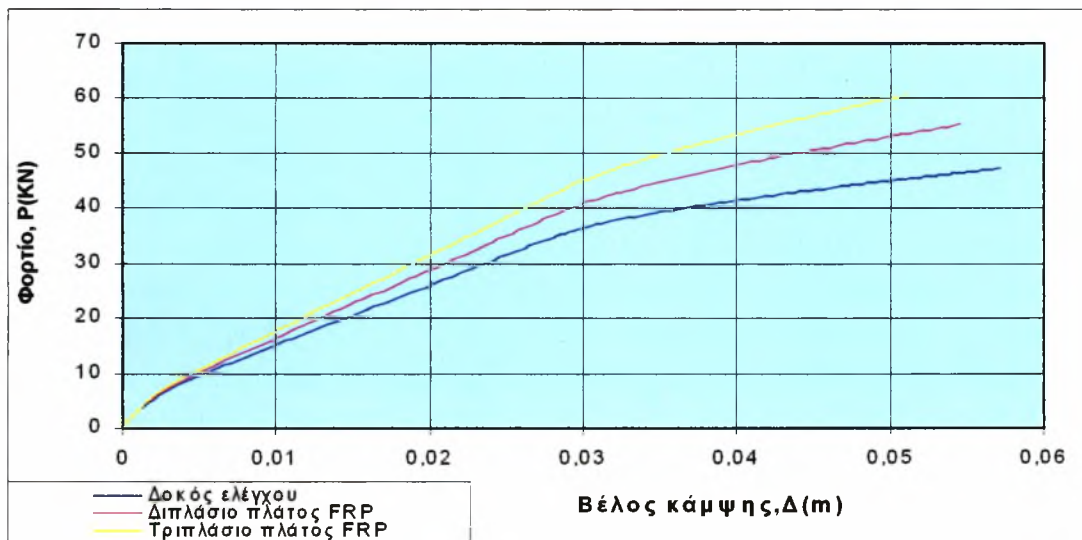


δοκών ενισχυμένων με σύνθετα υλικά τοποθετημένα κατακόρυφα σε εγκοπές, όταν διπλασιάζεται το πλάτος του FRP(για την δοκό ελέγχου 25mm).

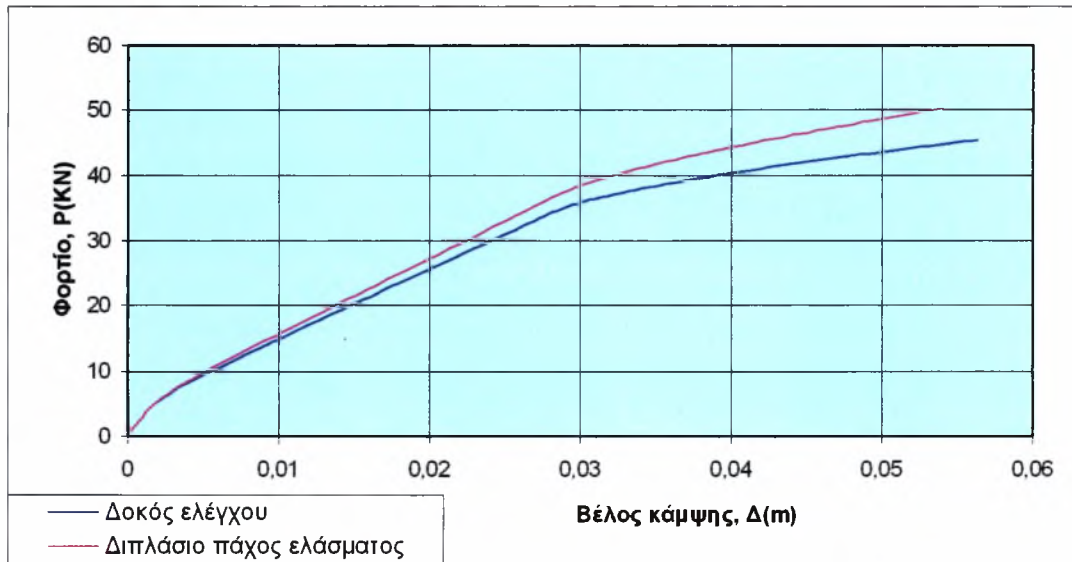
Πίνακας 4.8 Πλάτη ελασμάτων FRP, για την ενίσχυση με τη μέθοδο CAA

Δοκός	Πλάτος ελάσματος (mm)
Ελέγχου	51
Δοκός 1	102
Δοκός 2	152

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης όπως προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση.



Σχήμα 4.26 Διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης δοκών ενισχυμένων με CAA



Σχήμα 4.27 Διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης δοκών ενισχυμένων NSM

#### 4.9.1.3 Συμπεράσματα

Το σχήμα 4.25 αναφέρεται σε ενισχυμένες δοκούς με τη μέθοδο των εξωτερικά επικολλούμενων ινοπλισμένων πολυμερών. Τα ποιοτικά συμπεράσματα που προκύπτουν, όταν αλλάζει η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού ενίσχυσης είναι χαρακτηριστικά και όμοια και για τις τρεις μεθόδους ενίσχυσης που εξετάζονται σε αυτή την εργασία.

- Παρατηρώντας τα διαγράμματα του σχήματος 4.25 συμπεραίνεται ότι η αυξημένη εφελκυστική αντοχή του οπλισμού ενίσχυσης δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού. Συγκεκριμένα δεν προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή στην αστοχία, αποτέλεσμα αναμενόμενο γιατί η αστοχία της δοκού δεν οφείλεται στην αστοχία του οπλισμού ενίσχυσης. Πρόσθετα η ανηγμένη παραμόρφωση του ελάσματος δεν ξεπερνά την οριακή παραμόρφωση αλλά περιορίζεται σε μικρό ποσοστό του ορίου της (πίνακας 4.7).
- Αντίθετα το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος φαίνεται να επηρεάζει αρκετά τη συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού. Συγκεκριμένα για τη δοκό ελέγχου και τη δοκό που ενισχύεται με έλασμα από άνθρακα υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας, ο οπλισμός ενίσχυσης έχει την ίδια εφελκυστική αντοχή και διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας (πίνακας 4.7). Όπως προκύπτει όταν



τριπλασιάζεται το μέτρο ελαστικότητας η ροπή αστοχίας αυξάνεται κατά 30%, ενώ το βέλος κάμψης στην αστοχία μειώνεται κατά 10%. Συμπερασματικά αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος, αυξάνεται η δυσκαμψία της δοκού κυρίως μετά τη ρηγμάτωση, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πλαστιμότητα της.

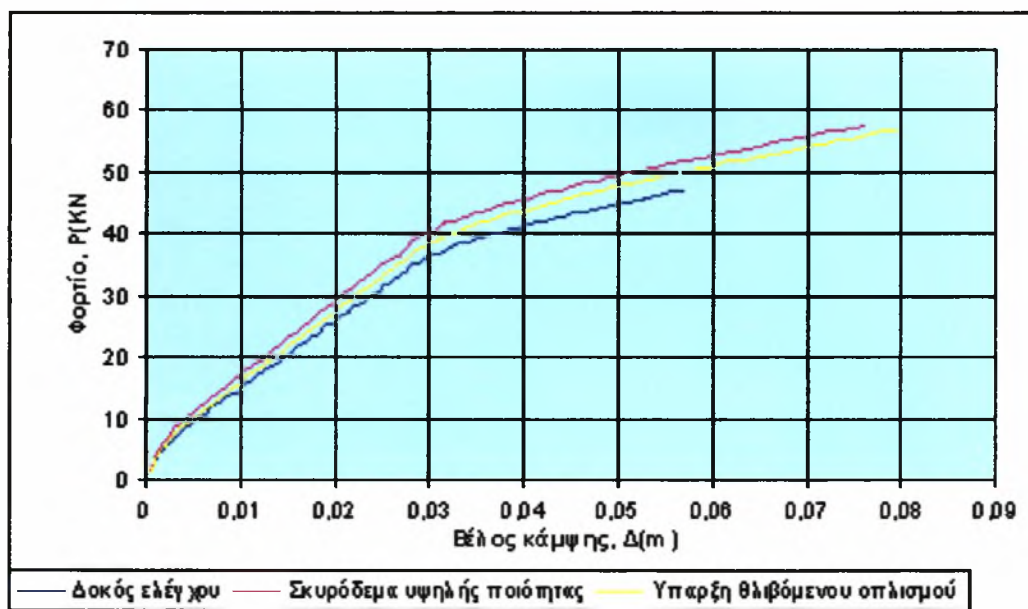
- Από τα σχήματα 4.26, 4.27 προκύπτει ότι αύξηση του οπλισμού ενίσχυσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και ταυτόχρονα την μείωση της πλαστιμότητας αποτέλεσμα αναμενόμενο αφού η ανηγμένη παραμόρφωση του είναι μικρότερη. Συγκεκριμένα για τις δοκούς που έχουν ενισχυθεί με τη μέθοδο CAA, 100% αύξηση του οπλισμού έχει ως αποτέλεσμα 15% περίπου αύξηση της αντοχής, ενώ η αύξηση είναι ανάλογη και για περαιτέρω αύξηση του πλάτους του ελάσματος.

#### **4.9.2 Αύξηση Θλιπτικής Αντοχής**

Στη ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν όταν κατά την ανάλυση αυξηθεί η θλιπτική αντοχή της δοκού είτε βελτιώνοντας την ποιότητα του σκυροδέματος, είτε τοποθετώντας θλιβόμενο οπλισμό.

##### ***4.9.2.1 Συγκριτικά Αποτελέσματα***

Η δοκός ελέγχου κατασκευάζεται από σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή 29,5Μρα και μέτρο ελαστικότητας 25,726ρα ενώ δεν έχει τοποθετηθεί θλιβόμενος οπλισμός. Κατά τη σύγκριση, αρχικά θεωρείται δοκός σκυροδέματος C40 με θλιπτική αντοχή 40Μρα και μέτρο ελαστικότητας 356ρα και στη συνέχεια δοκός σκυροδέματος όμοιο με της δοκού ελέγχου, στην οποία τοποθετείται θλιβόμενος οπλισμός 2 ράβδοι διαμέτρου 12,7mm και αντοχής 445,7Μρα.



Σχήμα 4.28 Συγκριτικά διαγράμματα φορτίου - βέλος κάμψης για ενισχυμένες δοκούς με CAA

Στον πίνακα 4.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης:

Πίνακας 4.9 Συγκριτικά αποτελέσματα ενισχυμένων δοκών με CAA

Δοκός	Ανηγμένη παραμόρφωση FRP	Φορτίο στην αστοχία (KN)	Βέλος κάμψης στην αστοχία (m)
Ελέγχου	0,0087	47,16	0,057
Από σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας	0,0126	57,72	0,076
Με ύπαρξη θλιβόμενου οπλισμού	0,0127	57,16	0,08

#### 4.9.2.2 Συμπεράσματα

- Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα του σχήματος 5.4, αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της αντοχής της διατομής. Επίσης προκύπτει αύξηση της πλαστιμότητας, αποτέλεσμα όχι ρεαλιστικό, αφού η συμπεριφορά του



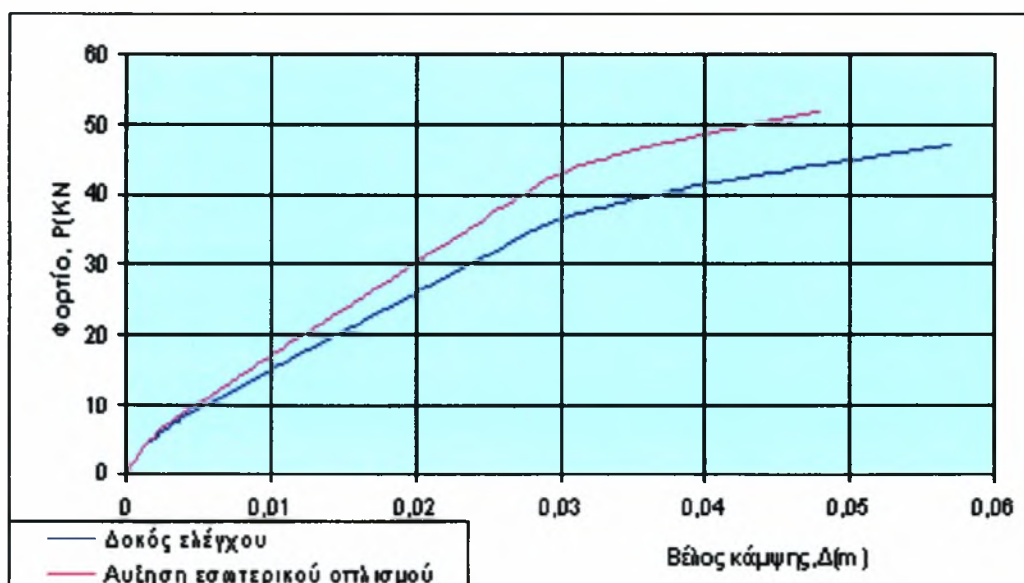


βελτιωμένου σκυροδέματος αναμένεται περισσότερο ψαθυρή. Το αποτέλεσμα που προκύπτει οφείλεται στο ότι στο μοντέλο πρόβλεψης χρησιμοποιείται το συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος με οριακή ανηγμένη παραμόρφωση ίση με 3,5‰ για κάθε τύπο σκυροδέματος.

- Στην περίπτωση που ενισχύεται η θλιβόμενη ζώνη τοποθετώντας θλιβόμενο οπλισμό παρατηρείται και πάλι αύξηση της ροπής κατά την αστοχία και ταυτόχρονη αύξηση της πλαστιμότητας, αποτέλεσμα αναμενόμενο.

#### 4.9.3 Εσωτερικός Οπλισμός

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της ανάλυσης όταν αλλάζει το ποσοστό του εσωτερικού οπλισμού.



Σχήμα 4.29 Συγκριτικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για ενισχυμένες δοκούς CAA



#### **4.9.3.1 Συγκριτικά αποτελέσματα**

Στη δοκό ελέγχου ως διαμήκης εφελκυσόμενος οπλισμός έχουν τοποθετηθεί 3 ράβδοι διαμέτρου 12,7mm και συγκρίνεται η συμπεριφορά της με δοκό στην οποία τοποθετείται ως εσωτερικός οπλισμός 4 ράβδοι διαμέτρου 12,7mm (ποσοστό  $\rho = 0,0131 \approx \rho_{max}$ )

#### **4.9.3.2 Συμπεράσματα**

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα 4.29, αύξηση του εσωτερικού οπλισμού κατά 33% προσφέρει αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά 13% και ταυτόχρονη μείωση της πλαστιμότητας κατά 17%, αποτελέσματα αναμενόμενα. Σημειώνεται ότι η δοκός ελέγχου έχει εσωτερικό οπλισμό σε ποσοστό  $\rho = 0,001845$ , ενώ το ελάχιστο ποσοστό οπλισμού σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος (§ 18.3.2) προσδιορίζεται ίσο με 0,0013 για την συγκεκριμένη δοκό.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### «ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ»

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την σύγκριση των τριών συστημάτων ενίσχυσης δοκών με ινοπλισμένα πολυμερή.

- Και τα τρία συστήματα ενίσχυσης που περιγράφονται, προσφέρουν αύξηση της καμπτικής αντοχής και είναι ιδιαίτερα αποδοτικά όταν η εφαρμογή τους γίνεται μετά από μελέτη. Συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα το ποσοστό του σπλισμού ενίσχυσης πρέπει να είναι επαρκές (ανάλογο με το ποσοστό αύξησης της καμπτικής αντοχής που πρέπει να επιτευχθεί) αλλά περαιτέρω αύξηση του, δεν προσφέρει επιπλέον ενίσχυση. Βασική προϋπόθεση αποτελεσματικής ενίσχυσης αποτελεί η σωστή και επαρκής αγκύρωση του σπλισμού ενίσχυσης, καθώς η αστοχία της ενισχυμένης δοκού συνήθως οφείλεται στην αποκόλληση του FRP. Όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας, ο πιο αποτελεσματικός και ταυτόχρονα εύκολος τρόπος αγκύρωσης είναι η επέκταση του σπλισμού ενίσχυσης όσο πιο κοντά στη στήριξη γίνεται. Σημειώνεται ότι περαιτέρω αύξηση του μήκους αγκύρωσης, πέρα από ένα μέγιστο μήκος, δεν θα φέρει καλύτερα αποτελέσματα. Στην περίπτωση του τρίτου συστήματος ενίσχυσης, όπου το FRP εφαρμόζεται εξωτερικά στο καμπτόμενο πέλμα της δοκού μέσω ήλων, η απόδοση της αγκύρωσης είναι μεγαλύτερη όταν ο πρώτος ήλος τοποθετείται κοντά στην στήριξη. Τέλος βασική προϋπόθεση αποδοτικότερης συμπεριφοράς μιας ενισχυμένης δοκού είναι η εξασφάλιση της διατμητικής αντοχής της δοκού και μετά την καμπτική ενίσχυση.



- Συγκρίνοντας τις τρεις μεθόδους ενίσχυσης συμπεραίνεται ότι οι δύο πρώτες, δηλαδή η εξωτερική επικόλληση του FRP μέσω ρητίνης και η εσωτερική τοποθέτηση του FRP σε κατακόρυφες εγκοπές προσφέρουν σχεδόν ίδια αύξηση της καμπτικής αντοχής. Η δεύτερη όμως, προσφέρει αποδοτικότερη αγκύρωση του οπλισμού ενίσχυσης αφού οι αναπτυσσόμενες τάσεις συνάφειας είναι μεγαλύτερες με αποτέλεσμα η συμπεριφορά της δοκού να προκύπτει περισσότερο πλαστική. Σημειώνεται ότι η δεύτερη μέθοδος απαιτεί περισσότερο χρόνο και προσοχή κατά την δημιουργία των εγκοπών και την τοποθέτηση του FRP μέσα σε αυτές. Η τρίτη μέθοδος ενίσχυσης κατά την οποία το FRP εφαρμόζεται μέσω ήλων, είναι λιγότερο αποδοτική στην αύξηση της καμπτικής αντοχής, συγκρινόμενη με τις άλλες δύο μεθόδους. Όμως προκύπτει περισσότερο ανθεκτική στην αστοχία από αποκόλληση του FRP αφού οι ήλοι αν είναι επαρκείς δεν αστοχούν και ταυτόχρονα παρέχουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα στη δοκό. Συγκεκριμένα η τρίτη μέθοδος παρέχει την μεγαλύτερη πλαστιμότητα από τις ενισχυμένες δοκούς και ταυτόχρονα αποτελεί την πιο απλή μέθοδο ενίσχυσης όσο αφορά την ευκολία εφαρμογής του FRP και δεν απαιτεί προετοιμασία της επιφάνειας της δοκού. Τα παραπάνω δικαιολογούνται κυρίως από το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου πολυμερούς που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο ενίσχυσης στο οποίο οφείλεται η μεγαλύτερη πλαστιμότητα της δοκού καθώς και από τον τρόπο σύνδεσης του FRP με τη δοκό. Συγκεκριμένα η χρήση των ήλων για την μεταφορά της δύναμης του FRP φαίνεται να παρουσιάζει απώλειες αφού η δύναμη μεταφέρεται μόνο από τα σημεία που εφαρμόζονται οι ήλοι, ενώ ταυτόχρονα η σχετική ολίσθηση του FRP με την επιφάνεια σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από ότι αυτή των δοκών N-S και C-S.
- Τα αποτελέσματα των προγραμμάτων πρόβλεψης, όπως παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο, είναι αποδεκτά όπως προκύπτει κατά την σύγκριση τους με τα πειραματικά δεδομένα του τρίτου κεφαλαίου. Σημειώνεται ότι για το μοντέλο πρόβλεψης λαμβάνονται υπόψη το συμβατικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος (ΕΚΟΣ), ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος 0,35% και το πειραματικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χάλυβα. Επίσης για τον



υπολογισμό της καμπτικής ροπής λαμβάνεται υπόψη η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των προγραμμάτων πρόβλεψης θεωρούνται ρεαλιστικά όταν έχει εξασφαλιστεί η αντοχή της δοκού έναντι τέμνουσας και μετά την ενίσχυση της. Το πρόγραμμα πρόβλεψης δεν λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε ολίσθηση του FRP.

- Για τον υπολογισμό του προβλεπόμενου βέλους κάμψης χρησιμοποιήθηκε ένας απλοποιητικός τύπος για την περίπτωση ενός συγκεντρωμένου φορτίου στο μέσο του ανοίγματος της δοκού, καθώς και ένας αναλυτικός τύπος υπολογισμού του βέλους κάμψης ο οποίος προκύπτει από την χρήση του Θεωρήματος Ροπή - Επιφάνεια (Moment - Area Theorem) και λαμβάνει υπόψη την κατανομή της πραγματικής δυσκαμψίας κατά μήκος της δοκού (Charkas et al,2003). Όπως προέκυψε από την σύγκριση των πειραματικών και προβλεπόμενων διαγραμμάτων φαίνεται ότι ο αναλυτικός τύπος προσφέρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις δοκούς N-S και C-S, λιγότερο ικανοποιητικά για τη δοκό P-S και μη αποδεκτά για τη δοκό U-S. Σημειώνεται ότι ο αναλυτικός υπολογισμός του βέλους κάμψης (σύμφωνα με τους Charkas et al,2003) συνίσταται στην περίπτωση ενισχυμένων δοκών. Επίσης είναι φανερό ότι ο απλοποιητικός τύπος που χρησιμοποιείται από τον Ευρωκώδικα κατά τον σχεδιασμό μη ενισχυμένων στοιχείων, υπερεκτιμά το βέλος κάμψης προσδίδοντας μεγαλύτερη πλαστιμότητα από την πραγματική. Αποτελεί δηλαδή το πάνω όριο του υπολογιστικού βέλους κάμψης, χωρίς να ανταποκρίνεται στην πραγματική βύθιση του στοιχείου, κατά την αστοχία, παρόλο που λαμβάνει υπόψη μερική ρηγμάτωση της διατομής και όχι την πλήρη.
- Συγκρίνοντας τα διαγράμματα ροπής αδράνειας - καμπτική ροπή όπως υπολογίστηκαν για κάθε δοκό ξεχωριστά, προκύπτουν σημαντικές διαφορές για κάθε μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Διαπιστώνεται ότι όταν η ροπή αδράνειας υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο  $I = (1/E_c \times \theta) \times M$  προκύπτει διάγραμμα πιο συντηρητικό (μεγαλύτερες τιμές πριν την ρηγμάτωση και μικρότερες μετά τη διαρροή) συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες μεθόδους, συμφωνώντας με το παραπάνω συμπέρασμα που προκύπτει για τον απλοποιητικό υπολογισμό του βέλους κάμψης.



Επίσης ο τύπος που προτείνει ο Αμερικάνικος Κανονισμός δεν φαίνεται να συμφωνεί με την προβλεπόμενη συμπεριφορά των δοκών, αφού δεν προσφέρει μειούμενο κλάδο του διαγράμματος μετά τη διαρροή και ο οποίος μπορεί να δικαιολογηθεί από την μείωση του ύψους της θλιβόμενης ζώνης μετά τη διαρροή. Επομένως η τροποποίηση του τύπου, σύμφωνα με τους El-Mihilmy και Tedesco, 2003 όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.4.3, για τα διάφορα στάδια πριν και μετά της ρηγμάτωσης, και της διαρροής είναι επιτακτική.

- Για την πρόβλεψη της αποκόλλησης του FRP χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μοντέλα τα οποία βασίζονται είτε στον υπολογισμό επαρκούς μήκους αγκύρωσης είτε στον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων και την σύγκρισή τους με τις τάσεις αντοχής. Σημειώνεται ότι τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται ιδιαίτερα συντηρητικά λόγω της πολυπλοκότητας κατά τον υπολογισμό των τάσεων της διεπιφάνειας και δεν δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα όταν συγκρίνονται με τα πειραματικά.
- Όπως προκύπτει από την παραμετρική ανάλυση το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος φαίνεται να επηρεάζει αρκετά τη συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού. Συγκεκριμένα για τη δοκό ελέγχου και τη δοκό που ενισχύεται με έλασμα από άνθρακα υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας, ο οπλισμός ενίσχυσης έχει την ίδια εφελκυστική αντοχή και διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας (πίνακας 5.2). Όπως προκύπτει όταν τριπλασιάζεται το μέτρο ελαστικότητας η ροπή αστοχίας αυξάνεται κατά 30%, ενώ το βέλος κάμψης στην αστοχία μειώνεται κατά 10%. Συμπερασματικά αυξάνοντας το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος, αυξάνεται η δυσκαμψία της δοκού κυρίως μετά τη ρηγμάτωση, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πλαστιμότητα της.





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACI Committee 440 (1996). "State-of-the-Art Report on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (ACI 440R-96)." American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 65 pp.
- "Tyfo Systems." Fyfe Company LLC (2000).
- Aprile A., Spacone E., Limkatanyu S., (2001) "Role of Bond in RC Beams Strengthened with Steel and FRP Plates" , Journal of Structural Engineering , Vol 127, No 12
- Bank, L. C., Lamanna, A. J., Ray, J. C., and Velazquez, G. I. (2000). "Rapid Strengthening of Full-Sized Concrete Beams with Powder-Actuated Fastening Systems and Composite Materials." Final Report, Army Corps of Engineers, 117 pp.
- Borowicz, D. T. (2002). "Rapid Strengthening of Concrete Beams with Powder-Actuated Fastening Systems and Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite



- Materials." M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Wisconsin - Madison, 114 pp.
- Charkas H. , Rasheed H.A. ,Melthem H.(2003) "Rigorous Procedure for Calculating Deflections of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams", *ACI Structures Journal*, Vol.100, No4
  - Chen, J. F., and Teng, J. G. (2001). "Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp 784-791.
  - De Lorenzis, L., Micelli, F., and La Tegola, A. (2002). "Passive and Active Near-Surface Mounted FRP Rods for Flexural Strengthening of RC Concrete Beams." *Proceedings of the Third International Conference on Composites in Infrastructure*, San Francisco, California, June 10-12, 12 pb
  - De Lorenzis, L., Miller, B., and Nanni, A. (2001). "Bond of Fiber-Reinforced Laminates to Concrete." *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 3, pp 256-264.
  - De Lorenzis, L., Nanni, A., and La Tegola, A. (2000). "Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods." *Proceedings from the International Meetings on Composite Materials*, Milan, Italy, May 9-11, 8 pp.
  - De Lorenzis, L., Rizzo, A., and La Tegola, A. (2002). "Bond and Anchorage Length of Near-Surface Mounted FRP Rods in Concrete." *Proceedings of the Third International Conference on Composites in Infrastructure*, San Francisco, California, June 10-12, 11 pp.



- El-Mihilmy, M. T., and Tedesco, J. W. (2000). "Deflection of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Plates." *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 5, pp 679-688.
- Fanning, P. J., and Kelly, O. (2001). "Ultimate Response of RC Beams Strengthened with CFRP Plates." *Journal of Composites for Construction*, Vol. 5, No. 2, pp 122-127.
- Hag-Elsafi, O., Alampalli, S., and Kunin, J. (2001). "Application of FRP Laminates for Strengthening of a Reinforced-Concrete T-Beam Bridge Structure." *Composite Structures*, 52, pp 453-466.
- Harmon, T. and Harries, K.A. (Principal Investigators) (2003). *Collaborative Research - Multi-Method Instrumentation for the Investigation of the Behavior and Performance Assessment of Adhesively Bonded FRP Materials*, Proposal to the National Science Foundation, October 2003.
- Hiroyuki, Y. and Wu,Z.(1997) :*Analysis of Debonding Fracture Properties of CFRP Strengthened Member Subject to Tension*", Non metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures , Proceedings of the Third International Symposium , Sapporo ,Japan, pp.2887-294
- Holzenkampfer, P. (1994), "Ingenieurmodelle des Verbundes Geklebter Bewehrung fur Betonbauteil", Dissertation, TU Delft, The Netherlands
- Korff, J., and Scherer, J. (2002). "Innovative Procedures for Strengthening Structures via Slot Application of Pultruded CFRP Laminates." *Proceedings of the*



Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, California, June 10-12, 7 pp.

- Lamanna, A. J., Bank, L. C., and Scott, D. W. (2001a). "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fasteners and Fiber-Reinforced Polymer Strips." *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 3, pp 368-376.
- Lamanna, A. J., Bank, L. C., and Scott, D. W. (2001β). "Rapid Flexural Strengthening of RC Beams using Powder Actuated Fasteners and FRP Strips." *Proceedings of the Fifth International Conference on Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures*, Cambridge, U.K., July 16-18, pp 389-397.
- Nordin, H., Täljsten, B., and Carolin, A. (2002). "CFRP Near Surface Mounted Reinforcement (NSMR) for Prestressing Concrete Beams." *Proceedings of the Third International Conference on Composites in Infrastructure*, San Francisco, California, June 10-12, 11 pp.
- Quattlebaum, J.B. (2003) "Comparison of three CFRP Flexural Retrofit Systems under Monotonic and Fatigue Loads", M.S. Thesis, University of South Carolina
- Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L., and Connelly, G. M. (1991). "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics." *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 4, pp 490-500.
- Sebastian, W. M. (2001). "Significance of Midspan Debonding Failure in FRP-Plated Concrete Beams." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp 792-798.



- Smith, S. T., and Teng, J. G. (2001a) "Plate end Debonding Failures in FRP - strengthened RC beams, to be published
- Smith, S. T., and Teng, J. G. (2001b) "Interfacial Stresses in Plated RC Beams", *Engineering Structures*, Vol.23, pp. 857-871
- Smith, S. T., and Teng, J. G. (2001c) "FRP Strengthened RC beams-I: Review of Debonding Strength Models", *Engineering Structures*, in press
- Smith, S. T., and Teng, J. G. (2001d) "FRP Strengthened RC Beam-II: Assessment of Debonding Strength Models", *Engineering Structures*, in press
- Smith, S. T., and Teng, J. G. (2002). "FRP-Strengthened RC Beams I: Review of Debonding Strength Models." *Engineering Structures*, Vol. 24, pp 385-395.
- Stallings, J. M., Tedesco, J. W., El-Mihilmy, M.,and McCauley, M. (2000). "Field Performance of FRP Bridge Repairs." *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp 107-113.
- Taceda K., Yoshiyuki M., Murakami K. (1996) "Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets", *Composites part A* 27A pp. 981- 987
- Täljsten, B. (1999). "Concrete Beams Strengthened for Bending using CFRP-Sheets." *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Advanced Composites for Concrete Repair*, London, UK.



- Täljsten, B. (2002). "CFRP-Strengthened-Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Laminates." Proceedings of the Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, California, June 10-12, 12 pp.
- Teng, J. G., Chen J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2000). "RC Structures Strengthened with FRP Composites." Research Centre for Advanced Technology in Structural Engineering, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China.
- Teng, S., and Wang, F. (2001). "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Beams under Fatigue Loading." *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 3, pp 315-323.
- Thomson H., Spacone E , Limkatanyu S., Camata G.(2002) "Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded FRP" ,CC/2002/022329
- Vecchio F., Collins M., (1986) "The Modified Compression- Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Journal*, no.83-22, pp 219-231.
- Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος (Ε.Κ.Ο.Σ)
- Ευροκώδικας ΙΙ Οπλισμένου Σκυροδέματος





- Καραμπίνης Α. και Πανταζοπούλου Σ. (2000). «Η Χρήση των Σύνθετων Υλικών στο Σχεδιασμό και την Ενίσχυση Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος»
- Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (Ν.Ε.Α.Κ)
- Ο.Α.Σ.Π (2002). «Συστάσεις για Προσεισμικές και Μετασεισμικές Επεμβάσεις σε Κτίρια »
- Τριανταφύλλου Α. (2003) «Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά »

