

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (ΟΑΣΠ)

Σύσταση και Διάχυση Τεχνικών Οδηγιών για την  
Ενίσχυση Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά  
(Ε Ν Ι Κ Α Σ)



*Τελική Έκθεση*

**Αθ. Τριανταφύλλου**

Αναπλ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπ. Πατρών (Ανάδοχος Φορέας)

**Ε. Βιντζηλαίου**

Αναπλ. Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π. (Συνεργαζόμενος Φορέας)

**Σ. Πανταζοπούλου**

Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ. (Συνεργαζόμενος Φορέας)

**Θ. Γραμμένου**

Πολιτικός Μηχανικός, Μ.Δ.Ε. στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπ. Πατρών

**Σ. Ταστάνη**

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ.

Ιούλιος 2003

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	<u>σελ.</u>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b>	<b>2</b>
<b>1. ΓΕΝΙΚΑ</b>	<b>6</b>
<b>2. ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ</b>	<b>7</b>
<b>2.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>7</b>
<b>2.2 ΕΡΓΑΣΙΑ Α1 – ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ</b>	<b>11</b>
<b>2.3 ΕΡΓΑΣΙΑ Α2 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ</b>	<b>17</b>
2.3.1 Τα δοκίμια πειραμάτων περίσφιγξης	17
2.3.2 Τοποθέτηση του υλικού περίσφιγξης	18
2.3.3 Διαδικασία δοκιμής	19
2.3.4 Τρόπος αστοχίας	20
2.3.5 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων	22
2.3.6 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	27
2.3.7 Πρόβλεψη θλιπτικής αντοχής περισφιγμένου σκυροδέματος - Δοκίμια ορθογωνικής διατομής	29
2.3.8 Παραμόρφωση αστοχίας	30
2.3.9 Συμπεράσματα δοκιμών περίσφιγξης	32
2.3.10 Δοκίμια και διάταξη πειραμάτων επί δοκών	33
2.3.11 Κατασκευή δοκιμίων – υλικά	33
2.3.12 Μετρήσεις και ιστορία φόρτισης	35
2.3.13 Πειραματικά αποτελέσματα – δοκοί	36
2.3.14 Συμπεράσματα δοκιμών επί δοκών	40
2.3.15 Αναφορές πειραματικής μελέτης	41
<b>2.4 ΕΡΓΑΣΙΑ Β – ΤΕΥΧΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ</b>	<b>42</b>
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	<i>i</i>
ΣΥΜΒΟΛΑ	<i>iii</i>
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	<i>xi</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Οργάνωση του τεύχους	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ	5
2.1 Υλικά	5
2.1.1 Γενικά	5
2.1.2 Ίνες	5
2.1.3 Μήτρα	7
2.1.4 Σύνθετα υλικά	8
Παράδειγμα 2.1	9
2.1.5 Κόλλα	10
2.2 Συστήματα ενίσχυσης	12
2.2.1 Συστήματα υγρής εφαρμογής	12
2.2.2 Προκατασκευασμένα υλικά	13
2.3 Τεχνικές εφαρμογής	13
2.3.1 Βασική τεχνική	13
2.3.2 Ειδικές τεχνικές	15
2.3.2.1 Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη	15
2.3.2.2 Εφαρμογή με προένταση	16
2.3.2.3 Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση	17
2.3.2.4 Προκατασκευασμένα στοιχεία	18
2.3.2.5 Εφαρμογή σε εγκοπές	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	21
3.1 Γενικά	21
3.2 Καταστατικοί νόμοι των υλικών	21
3.2.1 Οριακή κατάσταση αντοχής – πλήρης συνεργασία υλικών	21
3.2.2 Οριακή κατάσταση αντοχής – αποκόλληση	23
3.2.3 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	23
3.3 Συνάφεια συνθέτων υλικών – σκυροδέματος	23
3.3.1 Γενικά, συμπεριφορά	24
3.3.2 Αναλυτικό προσομοίωμα	26
Παράδειγμα 3.1	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	29
4.1 Γενικά	29
4.2 Αρχική κατάσταση	30

4.3	Οριακή κατάσταση αντοχής – μηχανισμοί αστοχίας	31
4.4	Υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση αντοχής	33
4.4.1	Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας	33
4.4.2	Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας	35
4.5	Απαιτήσεις πλαστιμότητας	39
4.6	Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμών – οριακή κατάσταση αντοχής	40
4.7	Παράδειγμα	41
4.8	Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	43
4.9	Υποστυλώματα	44
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ</b>	47
5.1	Γενικά	47
5.2	Ανάληψη τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά	49
5.3	Σύνοψη υπολογισμών	53
	Παράδειγμα 5.1	53
	Παράδειγμα 5.2	55
	Παράδειγμα 5.3	56
5.4	Κόμβοι	56
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ</b>	59
6.1	Γενικά	59
6.2	Συμπεριφορά και καταστατικός νόμος σκυροδέματος περισφιγμένου μέσω συνθέτων υλικών	60
6.2.1	Συμπεριφορά	60
6.2.2	Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού	62
	Παράδειγμα 6.1	65
6.3	Πλαστιμότητα	66
	Παράδειγμα 6.2	69
6.4	Ματίσεις	70
	Παράδειγμα 6.3	73
6.5	Λυγισμός ράβδων	75
	Παράδειγμα 6.4	76
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ</b>	77
7.1	Γενικά	77
7.2	Εκτίμηση επιβαλλόμενης σεισμικής μετακίνησης και διαθέσιμης ικανότητας για οριζόντια μετάθεση	77
7.3	Παράδειγμα	81

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ</b>	<b>87</b>
8.1 Γενικά	87
8.2 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες	87
8.2.1 Ενίσχυση σε κάμψη	87
8.2.2 Ενίσχυση σε διάτμηση	89
8.2.3 Περίσφιγξη	90
8.3 Μέθοδος εφαρμογής	91
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 – ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ</b>	<b>93</b>
9.1 Γενικά	93
9.2 Θερμοκρασιακές επιδράσεις	93
9.3 Υγρασία	94
9.4 Υπεριώδης ακτινοβολία	94
9.5 Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον	95
9.6 Γαλβανική διάβρωση	95
9.7 Ερπυσμός, θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση	95
9.8 Κόπωση	96
9.9 Κρούση	96
9.10 Αξιολόγηση τύπου ινών	96
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΕΥΧΟΥΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ</b>	<b>99</b>
 <b>2.5 ΕΡΓΑΣΙΑ Γ1 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΟΗΘΗΜΑ (CD)</b>	 <b>161</b>
2.5.1 Χρήση του ηλεκτρονικού βοηθήματος	161
2.5.2 Πρόγραμμα διαστασιολόγησης ενισχύσεων	165
 <b>2.6 ΕΡΓΑΣΙΑ Γ2 – ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ - ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ</b>	 <b>173</b>
 <b>3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	 <b>175</b>
 <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ</b>	 <b>176</b>
 <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΙΣ “POWERPOINT”</b>	 <b>188</b>

## 1. ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρούσα τεχνική έκθεση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργασιών που διεξήχθησαν στα πλαίσια του έργου “Σύσταση και Διάχυση Τεχνικών Οδηγιών για την Ενίσχυση Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά (ΕΝΙΚΑΣ)”. Το έργο υλοποιήθηκε από τους κάτωθι φορείς:

- (α) Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών (Ανάδοχος Φορέας),
- (β) Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ (συνεργαζόμενος φορέας) και
- (γ) Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΔΠΘ (συνεργαζόμενος φορέας).

Παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα των τριών φάσεων του έργου, οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

**A. Έρευνα σε «γκρίζες» περιοχές σχετικά με την εφαρμογή συνθέτων υλικών στην ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος**

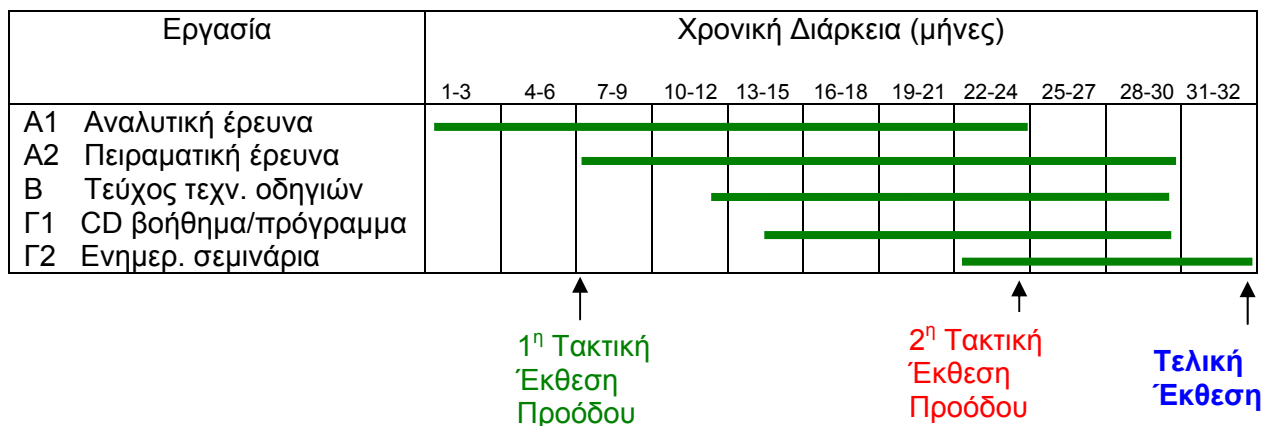
- A1 Αναλυτική έρευνα
- A2 Πειραματική έρευνα

**B. Ανάπτυξη τεύχους τεχνικών οδηγιών**

**Γ. Ανάπτυξη ψηφιακού υλικού (CD) για τη διάδοση/διάχυση των αποτελεσμάτων**

- Γ1 CD με Ηλεκτρονικό Βοήθημα και Πρόγραμμα Διαστασιολόγησης
- Γ2 Συμμετοχή σε σεμινάρια - διαλέξεις

### ΤΟ ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΟ ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ



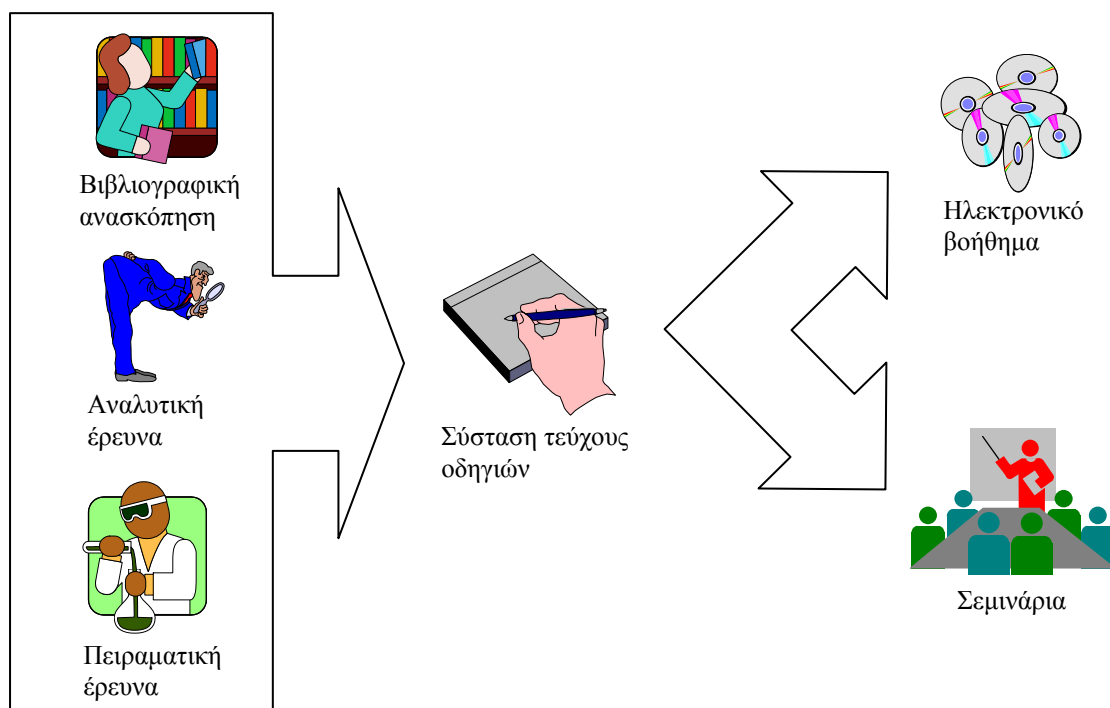
## 2. ΕΠΙΤΕΥΓΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

### 2.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

**Σκοπός** του προγράμματος ήταν:

- Η καταγραφή των συνηθέστερων τύπων εφαρμογής των συνθέτων υλικών στο πεδίο των ενισχύσεων, η συγκέντρωση βιβλιογραφικού υλικού, η αναγνώριση περιοχών όπου η παρούσα γνώση είναι ελλιπής (“γκρίζες” περιοχές) και η διεξαγωγή αναλυτικής και πειραματικής έρευνας στις παραπάνω περιοχές.
- Η σύνταξη τεχνικών οδηγιών για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά.
- Η ανάπτυξη ηλεκτρονικών εργαλείων για τη διάδοση και διάχυση των παραπάνω αποτελεσμάτων στον τεχνικό κόσμο της χώρας.

Η **μεθοδολογία** που ακολουθήθηκε περιελάμβανε την υλοποίηση τριών φάσεων, κάθε μία από τις οποίες χωριζόταν σε επιμέρους εργασίες.



Στη Φάση Α του έργου καταρχήν διεξήχθη λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση και αναγνωρίστηκαν περιοχές σχετικές με την εφαρμογή των συνθέτων υλικών στο πεδίο των ενισχύσεων, όπου η παρούσα γνώση είναι ελλιπής. Ως τέτοιες περιοχές θεωρήθηκαν: (α) Η συμπεριφορά ορθογωνικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με σχετικά μεγάλο λόγο πλευρών ή υποστυλωμάτων διατομής Γ, όπου η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης

με σύνθετα υλικά είναι αμφίβολη και/ή ανεπαρκώς τεκμηριωμένη. (β) Η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς πλακοδοκών ενισχυμένων με σύνθετα υλικά. (γ) Η ανάπτυξη νέων αναλυτικών προσομοιωμάτων τα οποία αντιμετωπίζουν τη συμπεριφορά δομικών στοιχείων ενισχυμένων σε κάμψη – διάτμηση κατά τρόπο ορθολογικό και σε ενιαία βάση. (δ) Ο χαρακτηρισμός της παραμορφωσιμότητας στοιχείων περιορισμένης εγγενούς πλαστιμότητας, που έχουν ενισχυθεί με μανδύες συνθέτων υλικών.

Η έρευνα εστιάστηκε στις προαναφερθείσες περιοχές. Βελτιώθηκαν αναλυτικά προσομοιώματα για τη μελέτη της περίσφιγξης υποστυλωμάτων ορθογωνικών (με μεγάλο λόγο πλευρών) ή μορφής Γ διατομών και αναπτύχθηκαν νέα αναλυτικά προσομοιώματα για τη συμπεριφορά στοιχείων (δοκοί-πλακοδοκοί, υποστυλώματα) ενισχυμένων με σύνθετα υλικά σε κάμψη-διάτμηση. Τα παραπάνω βασίστηκαν τόσο σε υπάρχουσες βάσεις πειραματικών δεδομένων, όσο και σε νέες πειραματικές δοκιμές, οι οποίες διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ. Ο χαρακτηρισμός της παραμορφωσιμότητας βασίστηκε στα παρακάτω βήματα: (α) Δημιουργία και επεξεργασία πειραματικής βάσης δεδομένων από τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία και ποσοτικός προσδιορισμός της σχέσης των δεικτών συμπεριφοράς με τις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού. (β) Μαθηματική διατύπωση με βάση τις αρχές της μηχανικής της ανελαστικής παραμορφωσιμότητας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένων με σύνθετα υλικά και βαθμονόμηση με την πειραματική βάση. (γ) Διατύπωση απλουστευμένων σχέσεων για την εκτίμηση της κατανομής των αναμενόμενων ανελαστικών παραμορφώσεων σχεδιασμού στις πλαστικές αρθρώσεις των φερόντων στοιχείων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, διατυπώθηκε μία στρατηγική διαστασιολόγησης των ενισχύσεων με σύνθετα υλικά με βάση την αναμενόμενη απαίτηση για παραμόρφωση στις κρίσιμες περιοχές της κατασκευής σε περίπτωση πραγματοποίησης του κρίσιμου σεισμού σχεδιασμού.

Στη Φάση Β υλοποιήθηκε η σύνταξη τεύχους με λεπτομερή στοιχεία για: τα σύνθετα υλικά και τις τεχνικές εφαρμογής, τη διαδικασία διαστασιολόγησης δομικών στοιχείων, τη στρατηγική επεμβάσεων, τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες εφαρμογής και την ανθεκτικότητα των συνθέτων υλικών στο χρόνο. Το τεύχος συμπληρώνεται με παραδείγματα υπολογισμών.

Τέλος, στη Φάση Γ αναπτύχθηκε υλικό σε ψηφιακή μορφή (CD), το οποίο περιλαμβάνει: (α) Ηλεκτρονικό βοήθημα με παρουσίαση όλων των στοιχείων της Φάσης Β σε φιλική προς το χρήστη μορφή (αρχεία *.html*). (β) Πρόγραμμα (σε Visual Basic) αυτοματοποιημένης διαστασιολόγησης ενισχύσεων δομικών στοιχείων για τις βασικές περιπτώσεις (περίσφιγξη, διάτμηση, κάμψη+αξονικό φορτίο, κάμψη). Επιπλέον, στα πλαίσια της Φάσης Γ δημιουργήθηκαν 2 παρουσιάσεις Powerpoint, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τώρα σε τέσσερα σεμινάρια – διαλέξεις όπου συμμετείχαν μηχανικοί, αλλά θα είναι διαθέσιμες και στο μέλλον για παρόμοιες περιπτώσεις.



**Βασικά συμπεράσματα** του προγράμματος είναι:

- Η αποτελεσματικότητα περίσφιγξης μέσω μανδύα συνθέτων υλικών μειώνεται με την αύξηση του λόγου των πλευρών σε ορθογωνικές διατομές.
- Η περίσφιγξη σκυροδέματος σε υποστυλώματα διατομής Γ προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς συστήματος αγκύρωσης στην εισέχουσα γωνία ή τη χρήση ανεξάρτητου συστήματος οπλισμών περίσφιγξης για κάθε ορθογωνικό τμήμα (π.χ. λωρίδες ανά αποστάσεις, με τοποθέτηση τμήματος αυτών εντός ειδικά διαμορφωμένων οπών. Η μη λήψη ειδικής μέριμνας για την αγκύρωση καθιστά την περίσφιγξη υποστυλωμάτων διατομής Γ πρακτικά ανενεργή.
- Τα σύνθετα υλικά, σε κατάλληλη ποσότητα και διάταξη, μεταβάλλουν τον τρόπο αστοχίας πλακοδοκών από διατμητικό σε καμπτικό. Επί πλέον, αυξάνουν την φέρουσα ικανότητα σημαντικά.
- Βάσει των αναλυτικών προσομοιωμάτων που βελτιώθηκαν ή αναπτύχθηκαν στην παρούσα έρευνα καθίσταται δυνατός ο σχεδιασμός μανδύα περίσφιγξης σε υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής για τις παρακάτω περιπτώσεις: αύξηση δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων, αύξηση θλιπτικής αντοχής, αύξηση αντοχής έναντι τέμνουσας, αποτροπή αστοχίας ματίσεων, αποτροπή λυγισμού ράβδων διαμήκους οπλισμού.
- Βάσει των αναλυτικών προσομοιωμάτων που αναπτύχθηκαν, οι μηχανισμοί αποκόλλησης των συνθέτων υλικών μπορούν να περιγραφούν κατά τρόπο ενιαίο, βάσει προσομοιώματος που εφαρμόζεται σε ενισχύσεις κάθε τύπου (π.χ. αύξηση διατμητικής αντοχής, καμπτικής αντοχής κλπ).
- Η αναπτυχθείσα στρατηγική επέμβασης με σύνθετα υλικά επιτρέπει την εφαρμογή της τεχνικής αυτής λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του συνόλου του δομήματος (παραμορφωσιμότητα, δυσκαμψία, αντοχή).
- Το Τεύχος Τεχνικών Οδηγιών που αναπτύχθηκε μπορεί να υιοθετηθεί ως χρήσιμο βοήθημα, τόσο για την κατανόηση της συμπεριφοράς στοιχείων και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με σύνθετα υλικά, όσο και για τη διαστασιολόγηση των αντιστοίχων ενισχύσεων. Ομοίως, η ηλεκτρονική έκδοση του βοηθήματος αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο ενημέρωσης, κατανόησης της συμπεριφοράς και διαστασιολόγησης ενισχύσεων.
- Το λογισμικό που αναπτύχθηκε επιτρέπει την αυτοματοποιημένη διαστασιολόγηση ενισχύσεων για τις εξής περιπτώσεις: (α) Περίσφιγξη υποστυλωμάτων με στόχο αύξηση πλαστιμότητας ή αντοχής. (β) Ενίσχυση υποστυλωμάτων ή δοκών σε τέμνουσα. (γ) Ενίσχυση υποστυλωμάτων σε κάμψη με αξονικό φορτίο, ή δοκών σε κάμψη.

Η **χρησιμότητα** του προγράμματος θεωρείται αυτονόητη, δεδομένου ότι: (α) Εντάθηκε η έρευνα σε περιοχές που άπτονται της εφαρμογής των συνθέτων υλικών στο πεδίο των ενισχύσεων και στις οποίες εκκρεμούσαν απαντήσεις σε κρίσιμους τομείς. (β) Υλοποιήθηκε η συγγραφή Τεύχους Τεχνικών Οδηγιών, βάσει του οποίου ο μηχανικός είναι σε θέση να κατανοήσει τη συμπεριφορά ενισχυμένων (με σύνθετα υλικά) στοιχείων και κατασκευών, να προβεί στη διαστασιολόγηση ενισχύσεων αλλά και να γνωρίζει πρακτικούς κανόνες εφαρμογής. (γ) Αναπτύχθηκε λογισμικό αυτοματοποιημένης διαστασιολόγησης ενισχύσεων με σύνθετα υλικά, το οποίο επιτρέπει, με τρόπο φιλικό προς το χρήστη, τον υπολογισμό των απαιτούμενων διαστάσεων μανδύα ή μεμονωμένων οπλισμών συνθέτων υλικών, με στόχο την αύξηση αντοχής και/ή πλαστιμότητας για τις βασικές περιπτώσεις δράσεων. (δ) Παρουσιάσθηκαν τα αποτελέσματα του προγράμματος (κυρίως αυτά που αφορούν στη διαστασιολόγηση ενισχύσεων δομικών στοιχείων και στη στρατηγική επεμβάσεων) σε σεμινάρια – διαλέξεις, και μέσω του ηλεκτρονικού υλικού που αναπτύχθηκε (παρουσιάσεις “powerpoint”) αναμένεται ότι θα αξιοποιηθούν σε αντίστοιχες δραστηριότητες και στο άμεσο μέλλον.

## 2.2 ΕΡΓΑΣΙΑ Α1 – ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

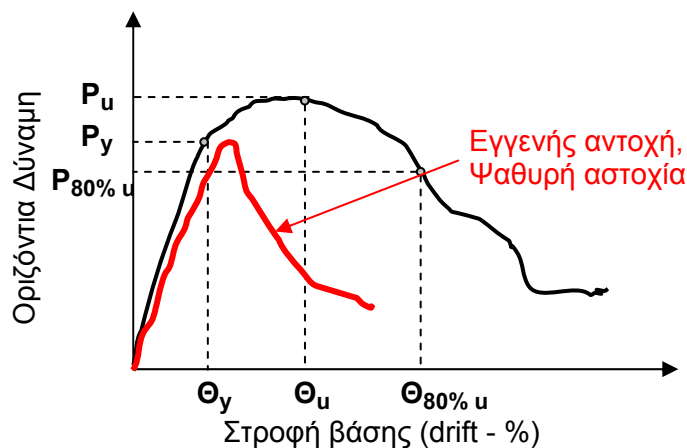
Αρχικά έγινε η καταγραφή των συνηθέστερων τύπων εφαρμογής των συνθέτων υλικών (βλ. Τεύχος Τεχνικών Οδηγιών), η συγκέντρωση βιβλιογραφικού υλικού (βλ. Παράρτημα Α) και η αναγνώριση περιοχών όπου η παρούσα γνώση είναι ελλιπής (“γκρίζες” περιοχές). Βάσει της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, τα πεδία έρευνας που διερευνήθηκαν λεπτομερώς ήταν: (α) Η διαστασιολόγηση ενισχύσεων με σύνθετα υλικά για αύξηση αντοχής και παραμορφωσιμότητας σε πλαστικές αρθρώσεις δομικών στοιχείων Ο.Σ., (β) η περίσφιγξη ορθογωνικών διατομών ή διατομών με ορθογωνικά τμήματα (π.χ. Γ) και (γ) η στρατηγική ενισχύσεων με σύνθετα υλικά για υφιστάμενες κατασκευές σκυροδέματος. **Τα κυριότερα αποτελέσματα της έρευνας στα παραπάνω (α) – (γ) έχουν ενσωματωθεί στο Τεύχος Τεχνικών Οδηγιών**, το οποίο δίνεται παρακάτω (Φάση Β του έργου), γι’ αυτό και δεν περιγράφονται στην παρούσα ενότητα, για λόγους αποφυγής επαναλήψεων. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν κυρίως: (α) Στην περίσφιγξη υποστυλωμάτων με διατομή που αποτελείται από ένα ή περισσότερα ορθογωνικά τμήματα (βλ. Κεφ. 6 του Τεύχους). (β) Στην ανάπτυξη προσομοιωμάτων που επιτρέπουν τη μελέτη αποκολλήσεων συνθέτων υλικών – σκυροδέματος κατά τρόπο ολοκληρωμένο και σε ενιαία βάση, ανεξαρτήτως της δράσης (π.χ. κάμψη, διάτμηση) (βλ. Κεφ. 3, 4 και 5 του Τεύχους). (γ) Στην ανάπτυξη ολοκληρωμένης στρατηγικής επεμβάσεων με σύνθετα υλικά λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του δομήματος.

Η ανάγκη για την κατανόηση της συμπεριφοράς δομικών στοιχείων με ανεπάρκεια οπλισμού (κυρίως εγκάρσιου) και κατασκευαστικών λεπτομερειών υπό “ελεγχόμενη” σεισμική φόρτιση οδήγησε στην ανάπτυξη **πειραματικής βάσης δεδομένων** αποτελούμενη κυρίως από υποστυλώματα απλής και διπλής κάμψης με “παλαιού τύπου” λεπτομέρειες οπλισμών [αραιοί συνδετήρες με ανεπαρκείς αγκυρώσεις ( $\Phi 6/300\text{mm}$ ), ματίσεις κύριου οπλισμού υποστυλωμάτων σε περιοχές αναμενόμενων πλαστικών αρθρώσεων, λείες ράβδοι με άγκιστρα], τα οποία επιδέχθηκαν είτε επισκευή (μετά από πρόκληση αρχικού βαθμού βλάβης) είτε ενίσχυση με μανδύες συνθέτων υλικών εγκάρσια τοποθετημένους στον άξονα του στοιχείου πριν υποβληθούν εκ νέου σε οριζόντια ανακυκλιζόμενη δύναμη (στοιχεία υποκείμενα σε καμπτοδιάτμηση). Η χρησιμότητα της βάσης επικεντρώνεται στην εξακρίβωση και αναβάθμιση υπάρχοντων σχέσεων μεταξύ αντοχής, πλαστιμότητας και χαρακτηριστικών του μανδύα.

Η πειραματική βάση προέκυψε από ανάλυση αποτελεσμάτων περισσότερων από 70 δοκιμών δημοσιευμένων στην διεθνή πειραματική βιβλιογραφία. Τα στοιχεία των δοκιμών επισυνάπτονται στον Πίνακα 1 και συμπεριλαμβάνουν τις γεωμετρικές διαστάσεις του μέλους ( $b_w$ ,  $h$ ), το ανηγμένο διατμητικό άνοιγμα ( $M/V \cdot d$  – για απλή ή διπλή κάμψη), τις πραγματικές

αντοχές οπλισμού και σκυροδέματος ( $f_{sy}$  και  $f_c$ ) (πειραματικές τιμές, όπου αυτές δίνονταν), το ποσοστό και χαρακτηριστικά του διαμήκους οπλισμού καθώς και το ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων ( $\rho_s$  και  $\rho_w$ ). Επίσης δίνεται η τέμνουσα διαρροής (θεωρώντας καμπτική λειτουργία),  $P_y$ . Αυτή προκύπτει είτε προσεγγιστικά από το ιστορικό φόρτισης - μετάθεσης κορυφής (για κυκλικές κυρίως, διατομές), είτε από ανάλυση διατομής χωρίς τα σύνθετα υλικά, θεωρώντας ότι στην διαρροή του οπλισμού το σκυρόδεμα έχει υποστεί ελάχιστη διόγκωση. Δίνεται επίσης η μέγιστη αναλαμβανόμενη δύναμη του ενισχυμένου στοιχείου  $P_u$ , καθώς και η τιμή  $P_{80\%u}$  που αντιστοιχεί σε απομένουσα αντοχή ίση με το 80% του μεγίστου αναλαμβανόμενου φορτίου (εδώ θεωρείται ότι απώλεια αντοχής μεγαλύτερη του 20%, σηματοδοτεί μη αναστρέψιμη αστοχία για το στοιχείο). Στις παραπάνω τιμές δύναμης αντιστοιχίζονται οι πραγματοποιούμενες στροφές βάσης ώστε να είναι πλήρως ορισμένη η περιβάλλουσα φόρτισης (Σχήμα 1). Επιπλέον παράμετροι της βάσης δεδομένων ήταν τα μηχανικά (π.χ. μέτρο ελαστικότητας υλικού  $E_f$ ) και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου σύνθετου υλικού επισκευής/ενίσχυσης απ' όπου προκύπτει η δυσκαμψία του μανδύα ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων ( $n$ ) και το πάχος της στρώσης ( $t_{fib}$ ) ως,

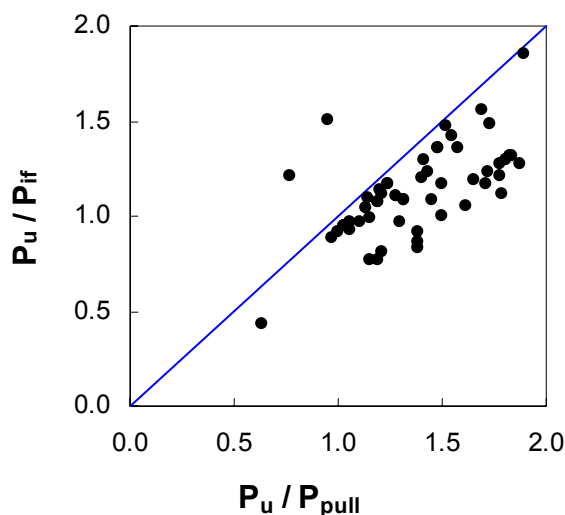
$$K_j = \frac{2n \cdot t_{fib} \cdot E_f}{b_w} \quad (1)$$



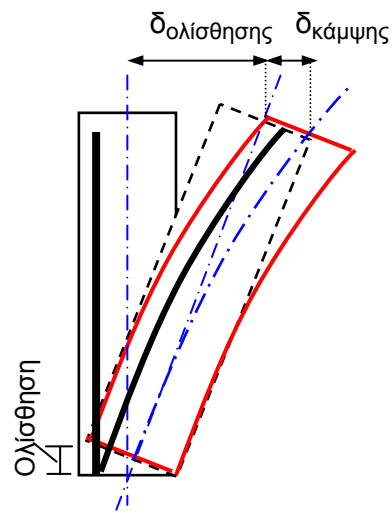
Σχ. 1 Βελτίωση ιδιοτήτων συμπεριφοράς στην φόρτιση λόγω συνθέτων υλικών και ορισμός των δεικτών φόρτισης και παραμόρφωσης.

Η ποσότητα αυτή, πολλαπλασιασμένη με την οριακή παραμόρφωση λειτουργίας του υλικού – η οποία αποτελεί ποσοστό της οριακής τιμής  $\epsilon_{fu}$  που δίνει ο κατασκευαστής - εξάγει την τάση περίσφιγξης (ή και διάτμησης) που μπορεί θεωρητικά να αναπτύξει ο μανδύας.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα εξάγεται ότι η μέθοδος ενίσχυσης μέσω συνθέτων μανδυνών βελτιώνει την συμπεριφορά των δοκιμών υπό ανακυκλιζόμενη καμπτοδιατμητική φόρτιση, μετατρέποντας την αστοχία από ψαθυρή (αστοχία μάτισης στην βάση του υποστυλώματος απουσία οπλισμού περίσφιγξης ή διατμητική αστοχία λόγω ανεπαρκούς εγκάρσιου οπλισμού) σε πλάστιμη με ικανοποιητικό “πλατώ” ανελαστικής παραμόρφωσης. Η αστοχία μετά την ενίσχυση επήλθε στην πλειονότητα των περιπτώσεων από υπερβολική ολίσθηση των διαμήκων οπλισμών (διάνοιξη καμπτικής ρωγμής μεγάλου εύρους στην στήριξη). Σε ορισμένες περιπτώσεις, παρατηρήθηκε αστοχία από θραύση της θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος στην κρίσιμη διατομή και ταυτόχρονο λυγισμό των διαμήκων οπλισμών. Το αποτέλεσμα αυτό είναι εμφανές στο διάγραμμα του Σχ. 2, όπου ο κατακόρυφος άξονας δίνει την αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου ανηγμένη ως προς την θεωρητική καμπτική αντοχή,  $P_u/P_{if}$ , ενώ τον οριζόντιο άξονα η αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου έχει αναχθεί ως προς την αντοχή εξόλκευσης,  $P_u/P_{pull}$ .



Σχ. 2 Σύγκριση καμπτικής απόκρισης με την αντίστοιχη λόγω ολίσθησης.



Σχ. 3 Μετατόπιση κορυφής ως άθροισμα δύο συνιστωσών.

Τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα βρίσκονται κάτω της διαγωνίου, γεγονός που δηλώνει την ανεπάρκεια της μάτισης ή της αγκύρωσης με αποτέλεσμα την σημαντική ολίσθηση των ράβδων από την περιοχή της στήριξης που αποδίδεται ως μετάθεση της κορυφής. Από το Σχ. 3 φαίνεται ότι μόνο ένα μικρό κλάσμα της συνολικής μετάθεσης κορυφής οφείλεται σε κάμψη του στοιχείου (καμπύλωση στο διατμητικό άνοιγμα), έχοντας περιορισθεί με την βοήθεια του μανδύα από την αναμενόμενη τιμή που θα αναπτυσσόταν λόγω ρηγμάτωσης. Το υπόλοιπο τμήμα της συνολικής μετακίνησης, το οποίο εξαρτάται από τις συνθήκες αγκύρωσης μέσα στο θεμέλιο του υποστυλώματος, εξωθείται στο μέγιστο με

την λύση ενίσχυσης μέσω συνθέτων υλικών, και μάλιστα, δεν μπορεί να περιορισθεί παρά μόνον με την προσθήκη δυσκαμψίας στο κτίριο. Η βάση δεδομένων χρήζει περαιτέρω διερεύνησης για τις περιπτώσεις εκείνες όπου η καμπτική αστοχία συνοδεύθηκε από σημαντική ολίσθηση (δείκτης πλαστιμότητας  $\mu \geq 5$ ) διότι με την ταυτόχρονη παρουσία αξονικού φορτίου ( $\nu_d \in [0.15-0.4]$ ) η πρόκληση φαινομένων P-Δ απαιτεί απόθεμα σε καμπτική αντοχή – η παράμετρος αυτή δεν εξασφαλίζεται με τον εγκάρσιο μανδύα.

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανάλυσης πειραματικής βάσης δεδομένων.

Χαρακτηρισμός δοκίμιων: S = ενίσχυση R=επισκευή	M / Vd	$v_d = N / f_c A_g$	$f_c$ (MPa)	D <sub>b</sub> (mm)	$f_{cy}$ (MPa)	$\rho_s$ (%)	$f_{cy}$ (MPa)	$\rho_{sw}$ (%)	$\rho_{st}$ (%)	$K_s = 2ntE_f/b_w$ (MPa)	$k_{FRP}$ layers <sup>A</sup>	$\theta_y$ (%)	$\theta_x$ (%)	$\theta_{torsion}$ (%)	$\mu$	Μετασχηματισμός P <sub>1</sub> (kN)	$\sigma_{st}/f_c$	$V_{R,FRP}$	$\mu_{comp}$
Unjoh et al. 2000 (cap beam, S <sub>1</sub> , b <sub>w</sub> =h <sub>w</sub> =600mm)	2.50	0	30	22	345	2.8	345	0.05	0.019	0	0.44 as built	1	1	1.07	1	1.07	500.00	—	1.3
	2.50	0	30	22	345	2.8	345	0.05	0.019	215	0.44 4CFRP	0.8	0.8	1.86	1	2.33	730.03	487.05	1.3
	2.50	0	30	22	345	2.8	345	0.05	0.019	430	0.44 8CFRP	0.8	2.93	3.2	3.66	4.0	600.05	771.03	1.3
Zhang et al. 1999 (double bending, S <sub>1</sub> , b <sub>w</sub> =250mm & h <sub>w</sub> =250mm)	2	0.35	31.4	13	361	2.44	388.2	0.93	0.38	0	0.57 as built	0.5	1	1.7	2	3.40	180.06	—	1.3
	2	0.35	33.5	13	361	2.44	388.2	0.93	0.38	205	0.57 1_CFRP	0.5	1.5	2.25	3	4.50	180.07	178.78	1.3
	2	0.35	33.5	13	361	2.44	388.2	0.93	0.38	818	0.57 4_CFRP	0.5	2	3.2	4	6.40	220.13	301.48	1.67
	2	0.35	33.5	13	361	2.44	388.2	0.93	0.38	727	0.57 4_AFRP	0.5	1.5	2.88	3	5.76	220.16	263.26	2.08
	2	0.35	38.5	13	369	2.44	388.2	0.93	0.38	182	0.57 1_AFRP	0.5	2	2.25	4	4.50	210.07	186.61	1.3
	2	0.35	38.5	13	369	2.44	388.2	0.93	0.38	363	0.57 2_AFRP	0.5	1.5	2.3	3	4.60	220.09	219.75	1.3
Karabinis & Xatziapostolou 2000 (lap splice, R <sub>1</sub> , b <sub>w</sub> =100mm & h <sub>w</sub> =200mm)	6.25	0	25	10	500	3.14	220	2.30	1.00	0	0.35 as built	0.75	2.32	2.8	3.08	3.73	50.70.10	—	1.32
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	2.30	1.00	562	0.35 1_CFRP	0.75	3.2	4.46	4.26	5.94	53.70.16	110.40	2.08
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	4.61	2.01	0	0.35 as built	0.84	4.88	4.56	5.81	5.43	52.02	—	2.57
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	4.61	2.01	1123	0.35 2_CFRP	0.84	3.18	4.8	3.79	5.71	50.20.33	194.43	4.10
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	2.30	1.00	0	0.35 as built	0.8	1.57	2.24	1.97	2.80	54.01	—	1.32
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	2.30	1.00	562	0.35 1_CFRP	0.8	1.61	2.16	2.01	2.70	48.70.16	110.40	2.08
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	4.61	2.01	0	0.35 as built	0.81	3.21	4.8	3.96	5.92	55.02	—	2.57
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	4.61	2.01	1685	0.35 3_CFRP	0.81	2.44	3.04	3.01	3.75	18.50.39	234.86	4.86
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	5.86	1.92	0	0.35 as built	0.75	4.96	5.04	6.80	6.70	52.02	—	3.26
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	5.86	1.92	1685	0.35 3_CFRP	0.75	3.2	3.6	4.26	4.79	53.04	231.11	5.55
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	11.72	3.85	0	0.35 as built	0.81	4.8	3.36	5.92	4.15	52.02	—	6.46
	6.25	0	25	10	500	3.14	220	11.72	3.85	1685	0.35 3_CFRP	0.81	3.11	3.12	3.84	3.85	40.30.70	314.56	8.74
Itoh et al. 1999 (double bending, S with Polyacetal Fibre (PAF), b <sub>w</sub> =h <sub>w</sub> =300mm)	1.5	0.15	23.6	13	792	1.770	360	0.34	0.13	96	0.54 1_PAF	1	1	1.8	1	1.80	236.06	163.15	1.3
	1.5	0.15	23.6	13	343	1.770	360	0.34	0.13	100	0.54 1_PAF	1	1	2.5	1	2.50	230.06	163.15	1.3
	1.5	0.15	23.6	13	343	1.770	360	0.34	0.13	192	0.54 2_PAF	1.5	1.5	4.46	1	2.97	240.10	249.55	1.3
	2	0.15	31.4	13	816	1.770	343	0.34	0.13	0	0.54 as built	1	1	1.48	1	1.48	200.02	—	1.3
	2	0.15	31.4	13	816	1.770	343	0.34	0.13	96	0.54 1_PAF*	1	2	2.9	2	2.90	260.04	184.17	1.3
	2	0.15	31.4	13	816	1.770	343	0.34	0.13	96	0.54 1_PAF	1	1	1.7	1	1.70	210.04	184.17	1.3
	2	0.15	31.4	13	358	1.770	343	0.34	0.13	96	0.54 1_PAF	1	5	5	5	5.00	215.04	184.17	1.3
	2	0.15	31.4	13	816	1.770	343	0.34	0.13	192	0.54 2_PAF	1.5	1.5	2.45	1	1.63	240.07	270.57	1.3
	2	0.15	31.4	13	358	1.770	343	0.34	0.13	192	0.54 2_PAF	1	5	7	5	7.00	215.07	270.57	1.3
	2	0.15	31.4	13	816	1.770	347	1.86	0.59	0	0.54 as built	1.2	1.2	2.45	1	2.04	240.10	—	1.34
	2	0.3	31.4	13	816	1.770	343	0.34	0.13	192	0.54 2_PAF	1	1.5	1.95	1.5	1.95	280.07	310.63	1.3
	2	0.3	31.4	13	358	1.770	343	0.34	0.13	192	0.54 2_PAF	1	2	2	2	2.00	260.07	310.63	1.3
Ma et al. 2000(double bending - lap splice, S <sub>1</sub> , b <sub>w</sub> =h <sub>w</sub> =410mm)	2.88	0.16	27.6	32	462	2.92	455	0.34	0.19	2219	0.49 6_CFRP	1.07	8.55	8.55	8	10.0	380.018	1678.43	1.3
Xiao et al. 1999 (double bending, S, D=610mm)	1.5	0.06	35.9	19	303	1.96	303	0.16	0.07	0	1.00 as built	0.55	2.19	2.19	4	4.00	580.01	—	1.30
	1.5	0.06	35.9	19	303	1.96	303	0.16	0.07	1266	1.00 4_GFRP	0.55	6.28	8.47	11.5	15.5	640.27	—	3.40
	1.5	0.06	35.9	19	303	1.96	303	0.16	0.07	949	1.00 3_GFRP	0.55	7.38	8.47	13.5	15.5	640.21	—	2.80
Xiao & Ma 1997 (cantilevers - lap splice, R & S <sub>1</sub> , D=610mm)	4.0	0.05	44.8	19	480	1.96	480	0.20	0.08	0	1.00 as built	0.66	0.66	1.43	1.01	2.19	220.02	—	1.3
	4.0	0.05	44.8	19	480	1.96	480	0.20	0.08	2027	1.00 4_GFRP	0.61	3.69	5.53	6	9.0	270.28	—	3.51
	4.0	0.05	44.8	19	480	1.96	480	0.20	0.08	2534	1.00 5_GFRP	0.61	4.10	5.16	6.67	8.4	280.34	—	4.31
	4.0	0.05	44.8	19	480	1.96	480	0.20	0.08	2027	1.00 4GFRP <sup>1</sup>	0.66	2.25	2.99	3.44	4.56	230.28	—	3.51
	6.2	0.17	36.5	12.7	358	2.48	301	0.17	0.07	0	1.00 as built	1.01	2.11	4.23	2.1	4.20	65.01	—	1.3
Saadatmanesh et al. 1997 (cantilevers - lap splice, R <sub>1</sub> , D=305mm & b <sub>w</sub> =241mm - h <sub>w</sub> =368mm)	6.2	0.17	36.5	12.7	358	2.48	301	0.17	0.07	559	1.00 6_GFRP <sup>1</sup>	1.11	4.02	6.08	3.62	5.48	72.50.24	—	3.09
	6.2	0.17	36.6	12.7	358	2.48	301	0.17	0.07	0	1.00 as built	1.22	3.38	4.76	2.78	3.91	70.01	—	1.3
	6.2	0.17	36.6	12.7	358	2.48	301	0.17	0.07	559	1.00 6_GFRP	1.32	7.14	—	5.4	—	72.50.24	—	3.08
	5.14	0.14	34.9	16	359	2.70	301	0.133	0.05	0	0.44 as built	1.16	1.59	2.01	1.36	1.73	103.01	—	1.3
	5.14	0.14	34.9	16	359	2.70	301	0.133	0.05	618	0.44 8_GFRP <sup>1</sup>	1.22	1.59	—	1.30	—	129.012	407.61	1.59
	5.14	0.15	33.4	16	359	5.45	301	0.133	0.05	0	0.44 as built	1.27	2.64	—	2.08	—	170.01	—	1.3
	5.14	0.15	33.4	16	359	5.45	301	0.133	0.05	618	0.44 8_GFRP	1.00	1.59	—	1.58	—	211.013	429.22	1.66
Triantafyllou et al. 2001 (cantilevers, S <sub>1</sub> , b <sub>w,3,2</sub> =250mm & h <sub>w,3,2</sub> =500mm, b <sub>w,4,4</sub> =500mm & h <sub>w,4,4</sub> =250mm)	3.2	0.37	18.15	18	550	0.81	220	0.41	0.20	0	0.35 as built	0.63	1.56	2.5	2.50	4.0	200.02	—	1.3
	3.2	0.39	16.6	18	550	0.81	220	0.41	0.20	478	0.35 2_CFRP	0.88	4.69	—	5.36	—	220.010	363.46	1.34
	3.2	0.33	18	18	550	0.81	220	0.41	0.20	478	0.35 5_GFRP	0.94	5	—	5.32	—	210.010	357.40	1.3
	3.2	0.33	18	18	550	0.81	220	0.41	0.20	1196	0.35 5_CFRP	0.81	4.69	—	5.79	—	240.020	695.80	2.55
	3.2	0.39	16.56	18	550	0.81	220	0.41	0.20	478	0.352_CFRP <sup>h</sup>	1.25	4.38	4.69	3.50	3.75	210.010	363.46	1.35
	6.4	0.34	19	18	550	0.81	220	0.41	0.10	0	0.35 as built	1.25	2.5	3.75	2	3.0	75.02	—	1.3
	6.4	0.35	18.1	18	550	0.81	220	0.41	0.10	239	0.35 2_CFRP	1.56	3.13	6.25	2.01	4.00	70.06	228.15	1.3

	6.4	0.33	18.7	18	550	0.81	220	0.41	0.10	238	0.35	5_GFRP	1.56	2.31	8	1.46	5.13	68	0.06	225.78	1.3
	6.4	0.34	19	18	550	0.81	220	0.41	0.10	598	0.35	5_CFRP	1.56	3	7.81	1.92	5.01	80	0.11	366.02	1.39
	6.4	0.33	18.1	18	550	0.81	220	0.41	0.10	239	0.352	CFRP <sup>h</sup>	1.56	4.7	7.81	3.01	5.01	68	0.06	223.53	1.3
Zdounpa 2001 (cantilevers, R, bw=160mm & hw=200mm)	2.25	0	27.14	12	500	1.26	220	0.53	0.18	0	0.58	as build	1.42	1.78	2.26	1.26	1.60	43	0.02	---	1.3
	2.25	0	27.14	12	500	1.26	220	0.53	0.18	264	0.58	2_GFRP	1.61	6.56	6.67	4.07	4.14	53	0.11	54.82	1.41
	2.25	0	27.14	12	500	1.26	220	0.53	0.18	264	0.58	2_GFRP	1.00	5.11	5.45	5.11	5.45	48	0.11	54.82	1.41
	2.25	0	27.14	12	500	1.26	220	0.53	0.18	332	0.58	1_CFRP	5.33	4.67	8.67	0.86	1.63	58	0.13	63.12	1.69
	2.25	0	27.14	12	500	1.26	220	0.53	0.18	332	0.58	1_CFRP	1.33	4.89	5.11	3.67	3.83	47	0.13	63.12	1.69
Seible et al. 1997 (double bending- cantilevers, R, b <sub>u,2</sub> =406 - h <sub>u,2</sub> =610 (mm), b <sub>u,4</sub> =489 - h <sub>u,4</sub> =730 (mm), D <sub>u,4</sub> =610mm)	2	0.06	34.45	19	303	2.52	303	0.24	0.12	0	0.41	as build	0.41	1.54	1.54	3.76	3.75	560	0.01	---	1.3
	2	0.06	34.45	19	303	2.52	303	0.24	0.12	1222	0.41	CFRP	0.41	3.73	4.55	9.10	11.1	560	0.08	1386.69	1.3
	4.7	0.14	34.45	25.5	303	4.9	303	0.20	0.10	0	0.39	as build	0.82	2.77	3.64	3.39	4.46	580	0.01	---	1.3
	4.7	0.14	34.45	25.5	303	4.9	303	0.20	0.10	5162	0.39	CFRP	0.87	6.41	7.29	7.33	8.33	650	0.30	7619.86	3.77
	5.6	0.18	34.45	19	303	2.52	303	0.19	0.08	0	1	as build <sup>i</sup>	0.87	5.83	8.16	6.67	9.33	275	0.02	---	1.3
	5.6	0.18	34.45	19	303	2.52	303	0.19	0.08	2073	1	CFRP <sup>i</sup>	0.87	7.47	---	8.54	---	325	0.31	---	3.88

A: Unjoh et al. (2000): CFRP -  $t_f=0.0972\text{mm}$ ,  $f_f=2490\text{MPa}$ ,  $E_f=166\text{GPa}$  - Unit weight=175gr

Zhang et al. (1999): CFRP -  $t_f=0.111\text{mm}$ ,  $f_f=3481.4\text{MPa}$ ,  $E_f=230.3\text{GPa}$ , & AFRP -  $t_f=0.193\text{mm}$ ,  $f_f=2059.4\text{MPa}$ ,  $E_f=117.7\text{GPa}$

Karabinis et al. (2000): CFRP -  $t_f=0.117\text{mm}$ ,  $f_f=3720\text{MPa}$ ,  $E_f=240\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.0155$

Iihoshi C. et al. (1999): PAF  $f_f=1275\text{MPa}$ ,  $E_f=40\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.0318$

Ma et al. (2000): CFRP -  $t_f=1\text{mm}$ ,  $f_f=606\text{MPa}$ ,  $E_f=75.8\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.008$

Xiao et al. (1999): GFRP -  $t_f=2.54\text{mm}$ ,  $f_f=552\text{MPa}$ ,  $E_f=38\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.0145$

Xiao & Ma (1997): GFRP -  $t_f=3.2\text{mm}$ ,  $f_f=552\text{MPa}$ ,  $E_f=48.3\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.0114$

Saadatmanesh et al. (1997): GFRP -  $t_f=0.8\text{mm}$ ,  $f_f=532\text{MPa}$ ,  $E_f=17.76\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.03$

Triantafyllou et al. (2001): CFRP -  $t_f=0.13\text{mm}$ ,  $f_f=3450\text{MPa}$ ,  $E_f=230\text{GPa}$  & GFRP -  $t_f=0.17\text{mm}$ ,  $f_f=2170\text{MPa}$ ,  $E_f=70\text{GPa}$ ,

Zdounpa (2001): CFRP -  $t_f=0.13\text{mm}$ ,  $f_f=3450\text{MPa}$ ,  $E_f=230\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.015$  & GFRP -  $t_f=0.17\text{mm}$ ,  $f_f=2170\text{MPa}$ ,  $E_f=70\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.031$

Seible et al. (1997): CFRP -  $f_f=1300\text{MPa}$ ,  $E_f=124\text{GPa}$ ,  $\epsilon_{fu}=0.01$

s: high strength steel (designed failing by shear)

r: repair with FRP

Flow strength steel (designed failing by flexure)  
+: mortar L: lap splice

## Βιβλιογραφία

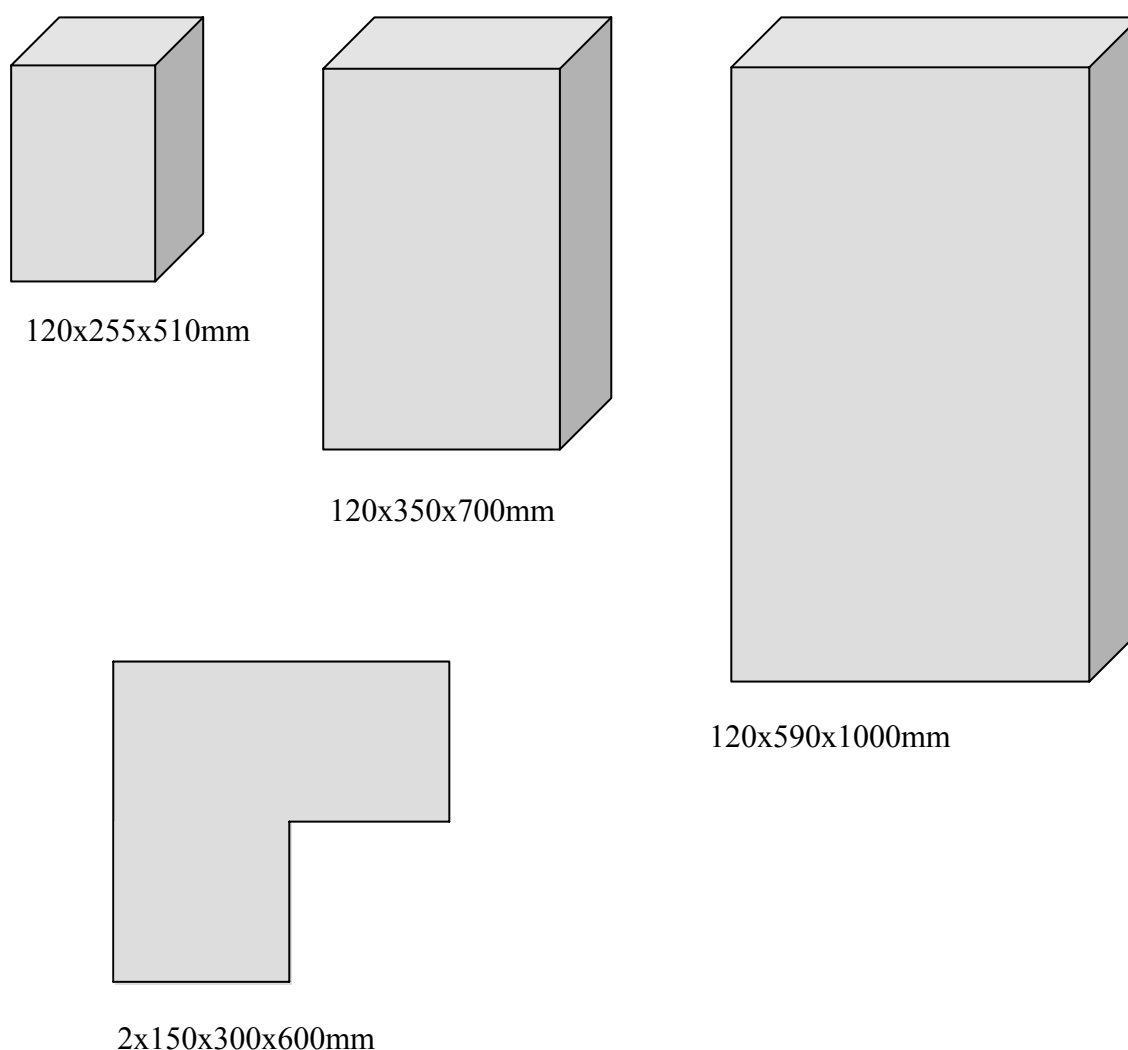
1. Iihoshi C., Fukuyama H., Matsumoto Y., Abe S. Strengthening Effect of Reinforced Concrete Elements with Polyacetal Fiber Sheets. *ACI Proceedings*, 4<sup>th</sup> Intl. Symp. on FRP for R.C. Structures, SP 188:659-669, 1999.
2. Karabinis A. and Xatziapostolou K. Mechanical Behavior of Concrete Members repaired with CFRP in cyclic loading. *Proceedings of 1<sup>st</sup> Hellenic Conference of Composite Materials in Concrete*, pp: 327-338, Xanthi, DUTH, November 2000, Greece (in Greek).
3. Ma R., Xiao Y., Li K.N. Full-scale Testing of a Parking Structure Column Retrofitted with Carbon Fiber Reinforced Composites. *Elsevier, Constr. and Build. Materials*, 14:63-71, 2000.
4. Saadatmanesh H., Ehsani M. R., Jin L. Repair of Earthquake - damaged RC Columns with FRP Wraps. *ACI, Structural J.*, 94(2):206-215, March - April 1997.
5. Seible F., Priestley N., Hegemier G., Innamorato D. Seismic Retrofit of RC Columns with Continuous CFRP Jackets. *ASCE J. of Composites for Construction*, 1(2):52-62, May, 1997.
6. Triantafyllou A., Fardis M., Antonopoulos K., Kevakias T., Papanikolaou A., Kosmopoulos A., Spathis A. *Project Report, (PENED '99): FRPs in Strengthening/Repair of R.C. Members*, General Secretariat of Research and Technology, Athens, Greece (in Greek).
7. Usami T., Zheng Y., and Ge H. Seismic Design Method for Thin-Walled Steel Frame Structures. *J. of Structural Engineering, ASCE*, 127(2):137-144.
8. Unjoh S., Terayama T., Adachi Y., Hoshikuma J. Seismic Retrofit of Existing Highway Bridges in Japan. *Eisenier, Cement & Concrete Composites*, 22:1-16, 2000.
9. Xiao Y., Wu H., Martin G.R. Prefabricated Composite Jacketing of FRP Columns for Enhanced Shear Strength. *ASCE, J. of Structural Engineering*, 125(3):255-264, March 1999.
10. Xiao Y., Ma R. (1997). Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricated Composite Jacketing. *ASCE, J. of Structural Engineering*, 123(10):1357-1364, October 1997.
11. Zhang A., Yamakawa T., Zhong P., Oka T. Experimental Study on Seismic Performance of R.C. Columns Retrofitted with Composite-Material Jackets. *ACI Proceedings of 4<sup>th</sup> Intl. Symp. on FRP Reinforcement for R.C. Structures*, SP 188:269-277, 1999.
12. Zdounpa T. Behavior of Old-Type R.C. Members under Cyclic Loading - Repair with FRP Jacketing. *MASc Thesis*, Dept. Civil Engrg., Demokritos Univ. of Thrace, Greece, 2001



## 2.3 ΕΡΓΑΣΙΑ Α2 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 2.3.1 Τα δοκίμια πειραμάτων περίσφιγξης

Με σκοπό την μελέτη της αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης στην περίπτωση διατομών σκυροδέματος με λόγο πλευρών διάφορο της μονάδας, κατασκευάσθηκαν δοκίμια με την γεωμετρία που φαίνεται στο Σχ. 4. Πρόκειται για πρισματικά δοκίμια με λόγο πλευρών 1:2, 1:3 και 1:5, καθώς και για δοκίμια με διατομή σχήματος Γ. Σε όλες τις περιπτώσεις, το ύψος των δοκιμίων ήταν ίσο με το διπλάσιο της μεγάλης πλευράς της διατομής.



Σχ. 4 Η γεωμετρία των δοκιμίων.

Τα δοκίμια κατασκευάσθηκαν από σκυρόδεμα με μικρή θλιπτική αντοχή, η οποία μετρήθηκε σε κυλίνδρους 150/300 σε ηλικία 28 ημερών και ήταν ίση με 13 MPa. Τα δοκίμια είχαν εκ

κατασκευής όλες τις γωνίες τους στρογγυλεμένες, ώστε να αποφεύγεται η πρόωρη αστοχία του σύνθετου υλικού. Γι' αυτόν τον σκοπό, τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό των μεταλλοτύπων και στις θέσεις των γωνιών, τέταρτα σωλήνων από λαμαρίνα, με διάμετρο μιάς ίντσας (25.4 mm). Τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν σε όρθια θέση. Συντηρήθηκαν με βρεγμένες λινάτσες για μία εβδομάδα (μέχρι την αφαίρεση των μεταλλοτύπων). Εν συνεχεία, παρέμειναν στο εσωτερικό του Εργαστηρίου, χωρίς περαιτέρω συντήρηση.

### 2.3.2 Τοποθέτηση του υλικού περίσφιγξης

Περίπου ένα μήνα μετά από την κατασκευή των δοκιμών, έγινε η τοποθέτηση του υφάσματος των σύνθετων υλικών, σύμφωνα με το πρόγραμμα που φαίνεται στον Πίνακα 2. Χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα με ίνες γυαλιού ή με ίνες άνθρακα. Η τοποθέτηση έγινε από συνεργείο του προμηθευτή των υλικών, κατά την διαδικασία που προβλέπεται από τις σχετικές προδιαγραφές. Σε όλες τις περιπτώσεις, προηγήθηκε επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας των δοκιμών (λείανση στις ήδη στρογγυλεμένες γωνίες και απομάκρυνση της επιφανειακής στρώσης τσιμεντοπολτού).

Πίνακας 2 Δοκίμια και συνδυασμός παραμέτρων.

Ονοματολογία	Διαστάσεις διατομής	Είδος ινών	Πλήθος στρώσεων
P2	120x255	-	-
P2-C2	120x255	Άνθρακας	2
P2-G5	120x255	Γυαλί	5
P3	120x350	-	-
P3-C2	120x350	Άνθρακας	2
P3-C4	120x350	Άνθρακας	4
P3-G5	120x350	Γυαλί	5
P5	120x590	-	-
P5-C2	120x590	Άνθρακας	2
P5-G5	120x590	Γυαλί	5
A	2x150x300	-	-
A-C2-I	2x150x300	Άνθρακας	2
A-C2-II	2x150x300	Άνθρακας	2
A-C4-I	2x150x300	Άνθρακας	4
A-G5-I	2x150x300	Γυαλί	5
A-G5-II	2x150x300	Γυαλί	5

Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων κατασκευάστηκαν τρία δοκίμια. Το συνολικό πλήθος των δοκιμών είναι 48. Για κάθε γεωμετρία δοκιμίου, προβλέφθηκαν και τρία δοκίμια, τα οποία δοκιμάστηκαν χωρίς περίσφιγξη, ώστε να αποτελέσουν τα δοκίμια αναφοράς.

Τα σύμβολα I και II, στην περίπτωση των δοκιμών με διατομή Γ, δηλώνουν τον τρόπο με τον οποίον έγινε η περιτύλιξή τους με το ύφασμα (βλ. Σχ. 5).

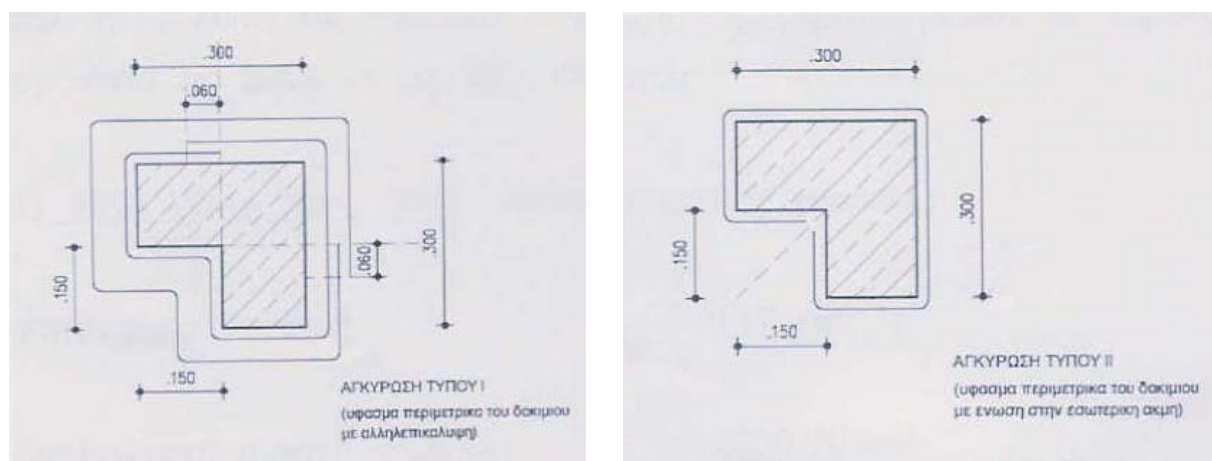
Τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την περίσφιγξη των δοκιμίων, όπως προκύπτουν από τα σχετικά στοιχεία του προμηθευτή, φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά σύνθετων υλικών

Είδος ινών	Πάχος (mm)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)
Άνθρακας	0.13	3500	230
Γυαλί	0.17	2250	70

### 2.3.3 Διαδικασία δοκιμής

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή κεντρικής θλίψης, μέσω υδραυλικού γρύλλου. Στην κεφαλή κάθε δοκιμίου τοποθετείται πριν απ' την δοκιμή μία μεταλλική πλάκα, η οποία εξασφαλίζει (α) την ομοιόμορφη κατανομή της θλίψης απ' το έμβολο του γρύλλου και (β) την κεντρική φόρτιση του δοκιμίου (μέσω εσοχής, στην οποία εφαρμόζει το έμβολο του γρύλλου). Οι δοκιμές ήταν αργές.



Σχ. 5. Τρόποι αγκύρωσης του σύνθετου υλικού στην περίπτωση των διατομών Γ.

Κατά την διάρκεια κάθε δοκιμής γινόταν συστηματική μέτρηση του θλιπτικού φορτίου, της κατακόρυφης βράχυνσης του δοκιμίου (μέσω ηλεκτρικών βελομέτρων και ηλεκτρομηκυσιομέτρων), καθώς και της οριζόντιας παραμόρφωσης του σκυροδέματος (μέσω ηλεκτρομηκυσιομέτρων). Στην περίπτωση των δοκιμίων στα οποία είχε εφαρμοσθεί σύνθετο υλικό, τα οριζόντια και τα κατακόρυφα ηλεκτρομηκυσιομέτρα (τα οποία είχαν τοποθετηθεί περί το μέσον του ύψους των δοκιμίων, στις μακρές πλευρές) κατέγραφαν τις παραμορφώσεις του σύνθετου υλικού.

#### 2.3.4 Τρόπος αστοχίας

Τα δοκίμια αναφοράς, δηλαδή τα δοκίμια χωρίς περίσφιγξη, αστόχησαν κατά τον αναμενόμενο τρόπο, με την εμφάνιση περίπου κατακόρυφων ρωγμών. Στην περίπτωση των δοκιμίων με διατομή σχήματος Γ, παρατηρήθηκε κατακόρυφη ρωγμή στην ένωση των δύο ορθογωνικών τμημάτων των δοκιμίων (Φωτογραφία 1).



Φωτογραφία 1. Αστοχία μη ενισχυμένου γωνιακού δοκιμίου.

Τα περισφιγμένα δοκίμια ορθογωνικής διατομής αστόχησαν όλα λόγω θραύσης του υφάσματος στις περιοχές των γωνιών. Παρατηρήθηκε εκτεταμένη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος, η οποία είχε προηγηθεί της αστοχίας του υφάσματος (Φωτογραφίες 2 και 3). Στα δοκίμια με διατομή σχήματος Γ παρατηρήθηκε αποκόλληση του υφάσματος από το σκυρόδεμα στην εισέχουσα γωνία, τόσο για τον τρόπο αγκύρωσης I (Φωτογραφία 4), όσο και για τον τρόπο αγκύρωσης II (Φωτογραφία 5). Ακολούθησε αστοχία του σκυροδέματος.



Φωτογραφία 2. Τυπική αστοχία περισφιγμένου ορθογωνικού δοκιμίου.



Φωτογραφία 3. Τυπική αστοχία περισφιγμένου ορθογωνικού δοκιμίου. Διακρίνεται η αποδιοργάνωση του σκυροδέματος.



Φωτογραφία 4. Αστοχία δοκιμίου με διατομή σχήματος Γ. Αγκύρωση τύπου Ι.



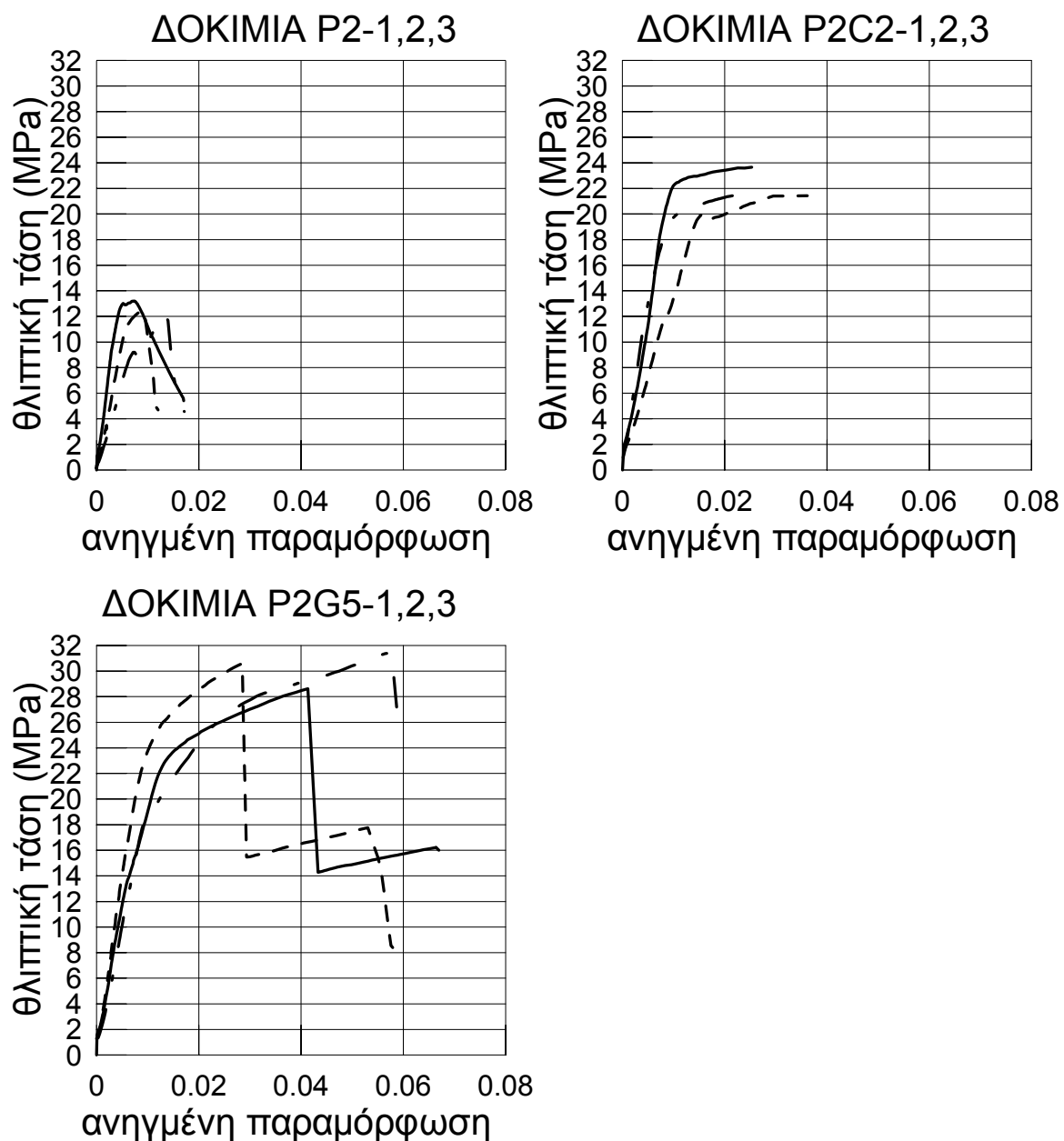
Φωτογραφία 5. Αστοχία δοκιμίου με διατομή σχήματος Γ. Αγκύρωση τύπου ΙΙ.

### 2.3.5 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων

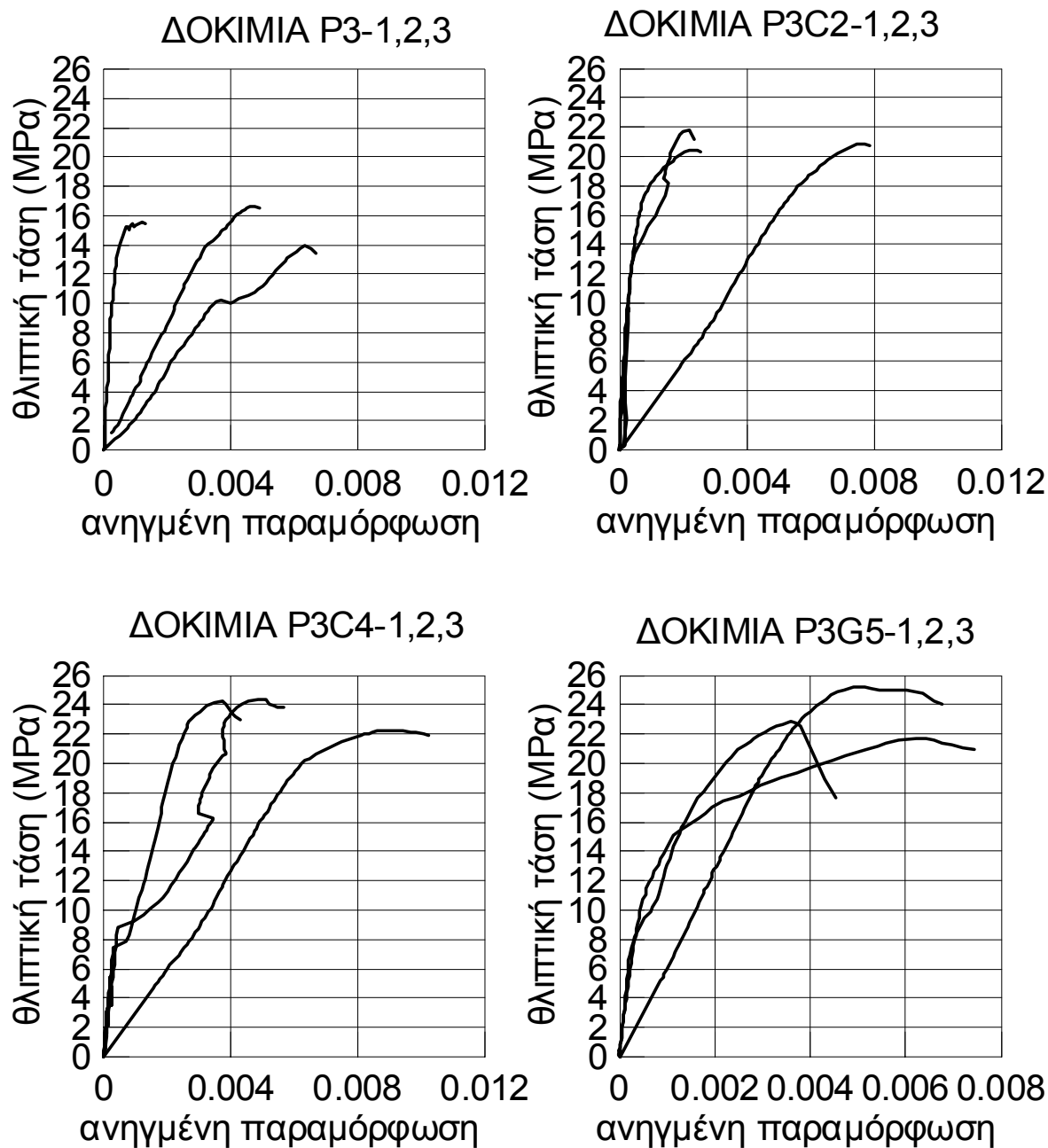
Στα Σχ. 6-9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των απερίσφιγκτων και των περισφιγμένων δοκιμίων. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση των δοκιμίων ορθογωνικής διατομής, η αύξηση του πλήθους των στρώσεων σύνθετου υλικού οδηγεί σε αύξηση τόσο της αντοχής όσο και της παραμόρφωσης αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος. Είναι, πάντως, φανερό ότι η θραύση του σύνθετου υλικού (η

οποία αντιστοιχεί στην μέγιστη επιστρατευόμενη αντίσταση) ακολουθείται συχνά από έναν απότομο φθίνοντα κλάδο, ο οποίος αντιστοιχεί στην αστοχία του απομένοντος χωρίς περισφιγξη σκυροδέματος.

Στην περίπτωση των δοκιμών με διατομή σχήματος Γ (Σχ. 9), παρατηρείται ότι η πρόωρη αποκόλληση του σύνθετου υλικού από το σκυρόδεμα - η οποία πραγματοποιείται και στις δύο περιπτώσεις αγκύρωσης του σύνθετου υλικού - δεν επιτρέπει ουσιώδη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, ούτε της αντίστοιχης ανηγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης.

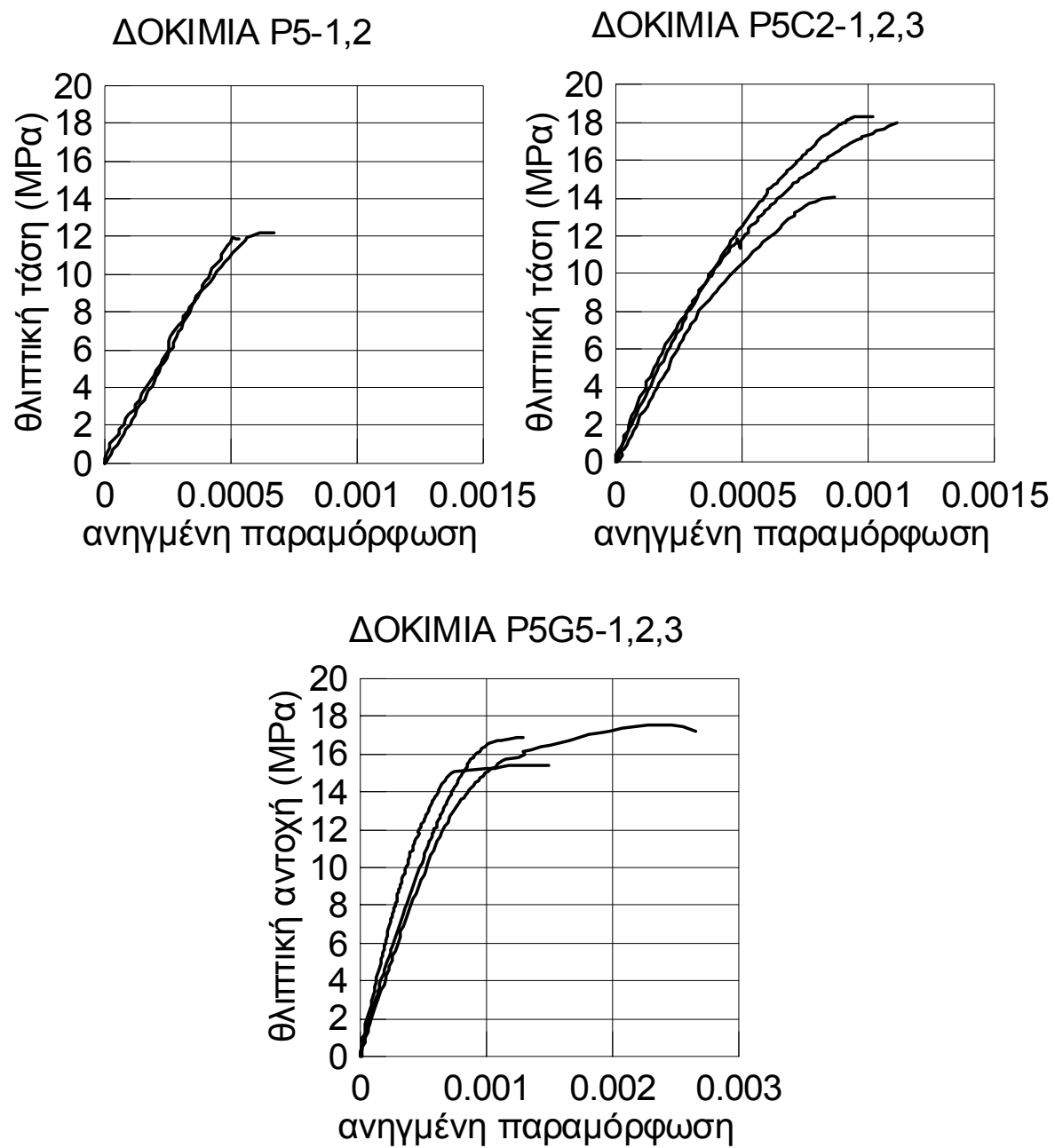


Σχ. 6 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων πρισματικών δοκιμών με λόγο πλευρών 1:2.

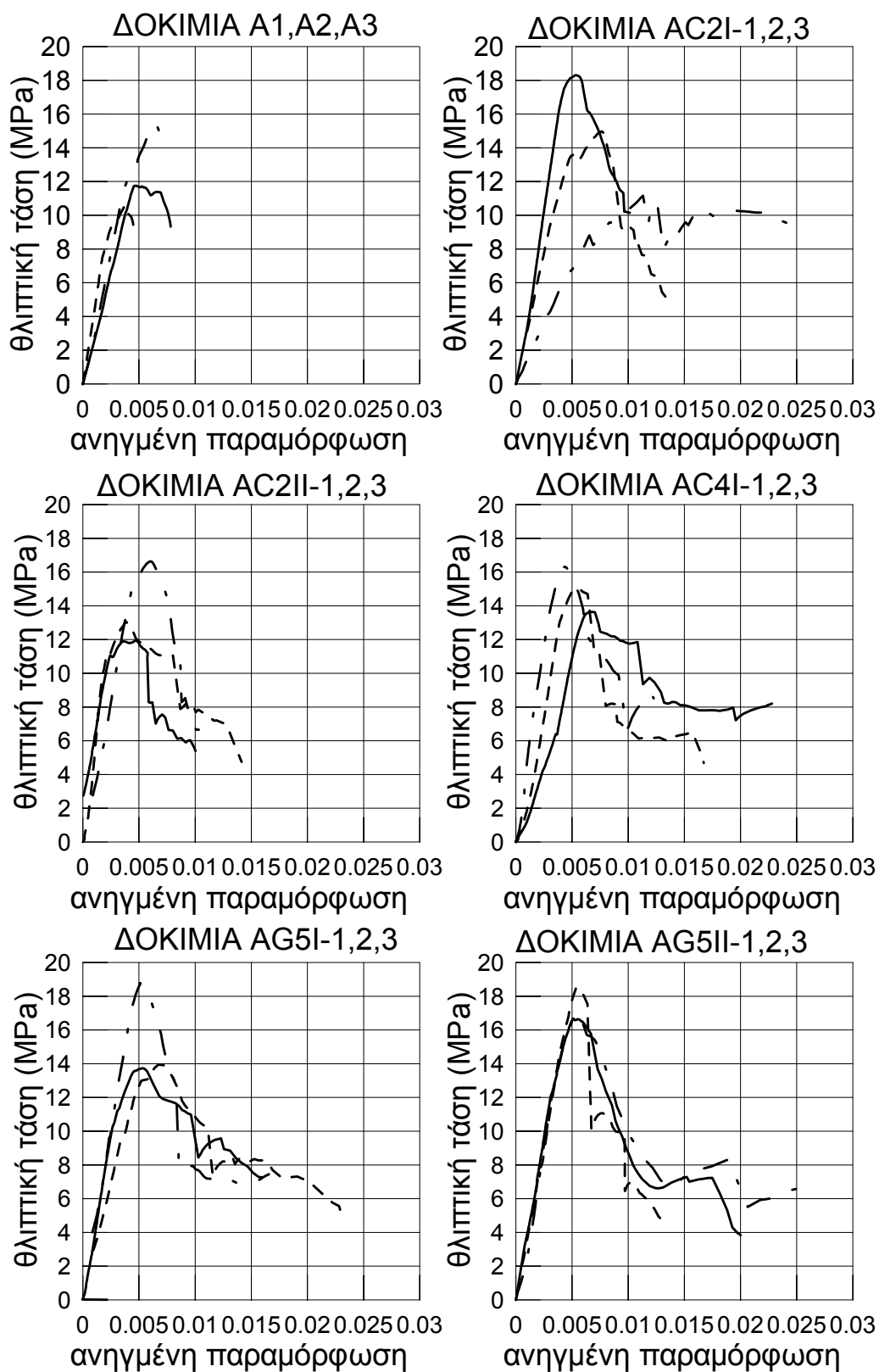


Σχ. 7 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων πρισματικών δοκιμίων με λόγο πλευρών 1:3.





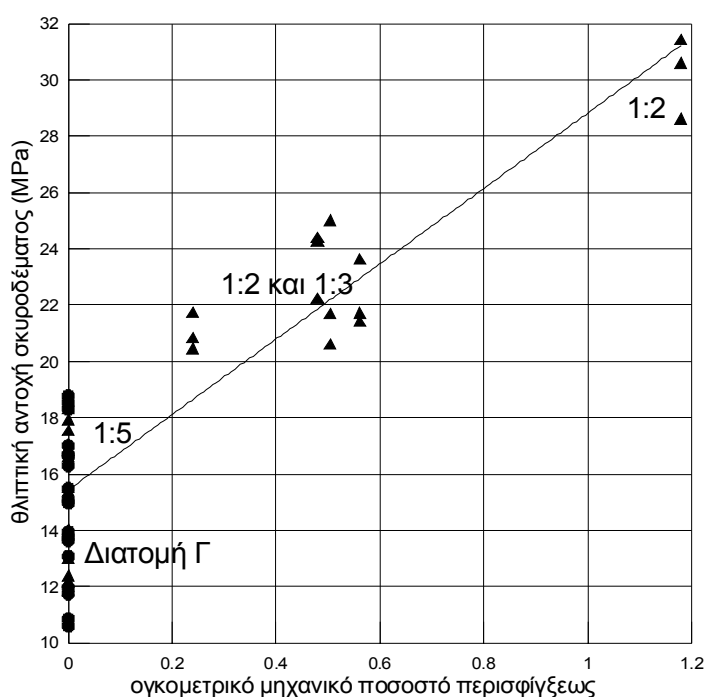
Σχ. 8 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων πρισματικών δοκιμίων με λόγο πλευρών 1:5.



Σχ. 9 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμίων με διατομή σχήματος Γ.

### 2.3.6 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Με σκοπό να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης στις περιπτώσεις των διατομών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, έγινε το διάγραμμα του Σχ. 10, στο οποίο εμφανίζονται οι μετρηθείσες τιμές θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, συναρτήσει του “ενεργού ποσοστού περίσφιγξης”,  $\alpha_w$ . Κατά τον υπολογισμό του ενεργού ποσοστού περίσφιγξης ελήφθη για όλα τα δοκίμια  $\alpha_s=1.0$  (συνεχής μανδύας), ενώ ο συντελεστής  $\alpha_n$  υπολογίστηκε με αφαίρεση των απερίσφιγκτων παραβολικών τμημάτων κάθε διατομής. Έτσι προέκυψε για τις διατομές με λόγο πλευρών 1:2,  $\alpha_n=0.33$ , για τις διατομές με λόγο πλευρών 1:3,  $\alpha_n=0.19$ , ενώ για τις διατομές σχήματος Γ και για τις ορθογωνικές με λόγο πλευρών 1:5,  $\alpha_n=0.00$ .

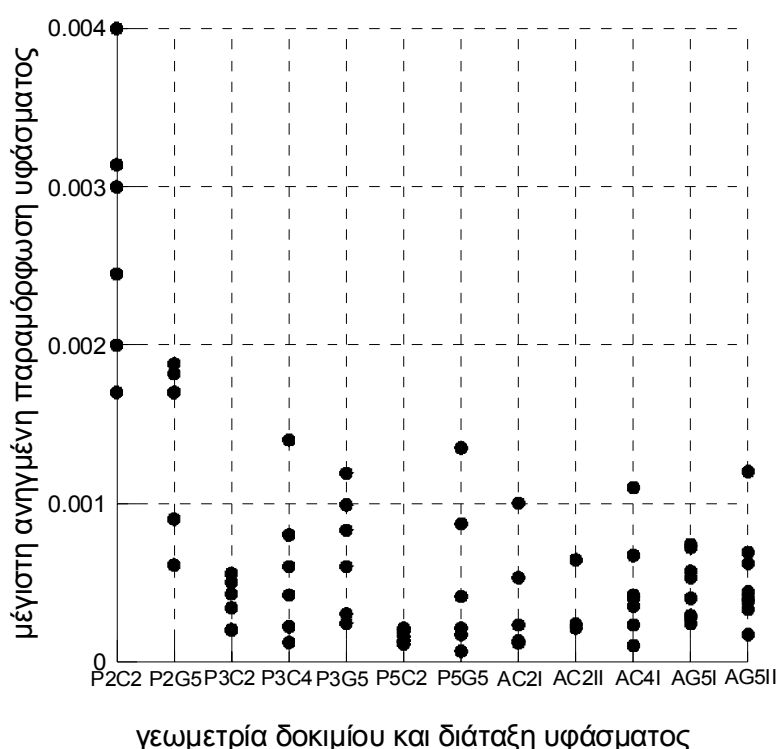


Σχ. 10 Σχέση μεταξύ θλιπτικής αντοχής περισιφισμένου σκυροδέματος και ενεργού ποσοστού περίσφιγξης.

Παρατηρείται ότι, όπως είναι γνωστό και από τις δοκιμές στοιχείων κυκλικής ή τετραγωνικής διατομής, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται αυξανόμενου του ποσοστού περίσφιγξης. Παρ' όλα αυτά, διαπιστώνονται τα εξής: (α) Η περιτύλιξη διατομών σχήματος Γ με σύνθετα υλικά είναι πρακτικώς αναποτελεσματική και για τους δύο τρόπους τοποθέτησης που δοκιμάσθηκαν στην παρούσα έρευνα. Πράγματι, παρατηρείται ότι μετρήθηκαν θλιπτικές αντοχές με μέση τιμή  $\sim 15$  MPa και με μεγάλη διασπορά. Έτσι, συμπεραίνεται ότι μόνον στην περίπτωση κατά την οποία θα εξασφαλιζόταν πρόσθετη αγκύρωση των συνθέτων υλικών στην εισέχουσα γωνία αυτών των διατομών, θα μπορούσε

να είναι αποδοτική η περίσφιγξη. Πρέπει, πάντως, να λαμβάνεται υπ' όψη ότι εξωτερική μηχανική αγκύρωση με διάτρηση του σύνθετου υλικού ενδέχεται να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία του, άρα και σε μειωμένη αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης. (β) Στην περίπτωση των πρισματικών δοκιμών, παρατηρείται ουσιώδης αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, καθώς για τις ποσότητες συνθέτων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, μετρήθηκαν αυξήσεις της θλιπτικής αντοχής και μεγαλύτερες από 100%. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η αποτελεσματικότητα των συνθέτων υλικών μειώνεται αυξανόμενου του λόγου των πλευρών. Πράγματι, σε ένα δοκίμιο με λόγο πλευρών 1:2, η προσθήκη πέντε στρώσεων υφάσματος με ίνες γυαλιού αντιστοιχεί σε τιμή  $\alpha_{w\omega}$  περίπου ίση με 1.2 και οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής κατά 130%, ενώ η ίδια ποσότητα και ποιότητα υλικού τοποθετούμενη σε διατομή με λόγο πλευρών 1:3, αντιστοιχεί σε  $\alpha_{w\omega}=0.5$  και οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής κατά 80%.

Η μειωμένη απόδοση του υλικού περίσφιγξης φαίνεται και στο Σχ. 11, στο οποίο παρουσιάζεται για κάθε δοκίμιο η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση (οριζόντια) που μετρήθηκε στο σύνθετο υλικό. Αυτές οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν μέσω ηλεκτρομηκυνσιομέτρων, τα οποία ήταν τοποθετημένα στο μέσον του ύψους των δοκιμών και στο μέσον του μήκους των μεγάλων πλευρών των δοκιμών.



Σχ. 11 Βαθμός ενεργοποίησης του σύνθετου υλικού συναρτήσει της γεωμετρίας του δοκιμίου και του τρόπου τοποθέτησης.

Φαίνεται ότι την στιγμή της αστοχίας του σύνθετου υλικού στις γωνίες των πρισματικών δοκιμίων, η παραμόρφωσή του στο μέσον των μεγάλων πλευρών φθάνει κατά μέγιστο μόλις το 4‰ για λόγο πλευρών 1:2, ενώ για μεγαλύτερους λόγους πλευρών, καθώς και για δοκίμια με διατομή σχήματος Γ, η παραμόρφωση του σύνθετου υλικού σπανίως υπερβαίνει το 1‰.

### **2.3.7 Πρόβλεψη θλιπτικής αντοχής περισφιγμένου σκυροδέματος – Δοκίμια ορθογωνικής διατομής**

Λαμβάνοντας υπ’ όψη ότι, όπως έχει αποδειχθεί από προηγούμενες εργασίες (π.χ. Vintzileou 2001), η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος εξαρτάται (α) από το ενεργό ποσοστό περίσφιγξης και (β) από την θλιπτική αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος, αναζητήθηκε μία σχέση μέσω της οποίας να είναι δυνατή η πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής περισφιγμένων πρισματικών δοκιμίων. Η σχέση που ακολουθεί έχει την ίδια μορφή με εκείνες που έχουν προταθεί τόσο για δοκίμια περισφιγγόμενα μέσω συνδετήρων (Vintzileou and Malliri, 2000), όσο και για μέσω συνθέτων υλικών περισφιγγόμενα κυλινδρικά δοκίμια άοπλου σκυροδέματος:

$$f_c^* = (0.95 + 0.75\alpha_{\omega_w})(1.15 - 0.0025f_c)f_c \quad (2)$$

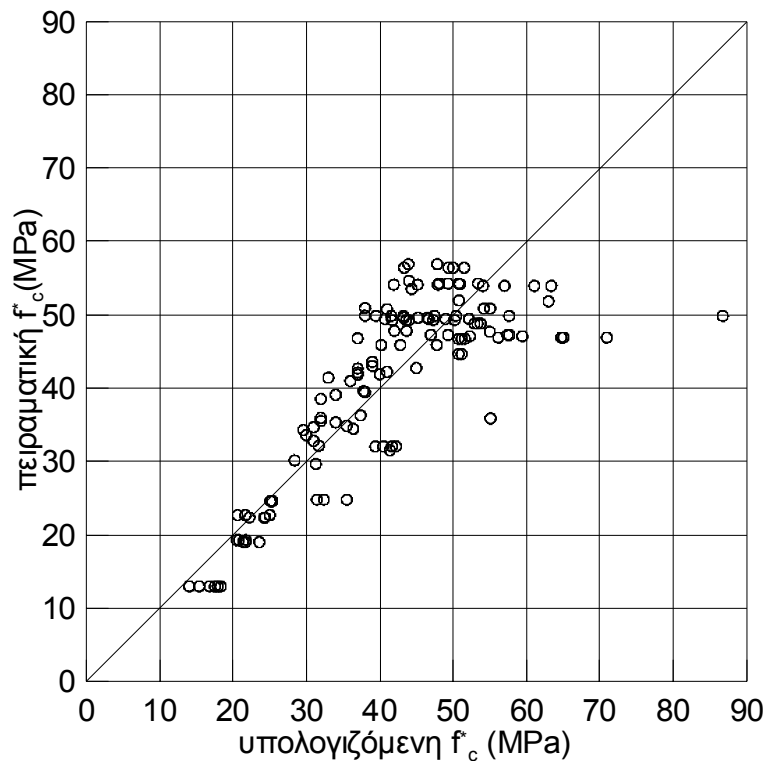
όπου

$f_c$  : η αντοχή του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη

$f_c^*$  : η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος και

$\alpha_{\omega_w}$ : το ενεργό ποσοστό περίσφιγξης

Η εφαρμογή της εξ. (2) στα διατιθέμενα πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, καθώς και στα αποτελέσματα αυτής της εργασίας (Σχ. 12) αποδεικνύεται ικανοποιητική, καθώς ο λόγος πειραματικής προς προβλεπόμενη θλιπτική αντοχή έχει (για 120 περίπου δοκίμια από διάφορες πηγές) μέση τιμή ίση με 1.03 και τυπική απόκλιση 0.18.



Σχ. 12 Σύγκριση μεταξύ πειραματικής και προβλεπόμενης θλιπτικής αντοχής περισφιγμένου σκυροδέματος (πρισματικά δοκίμια).

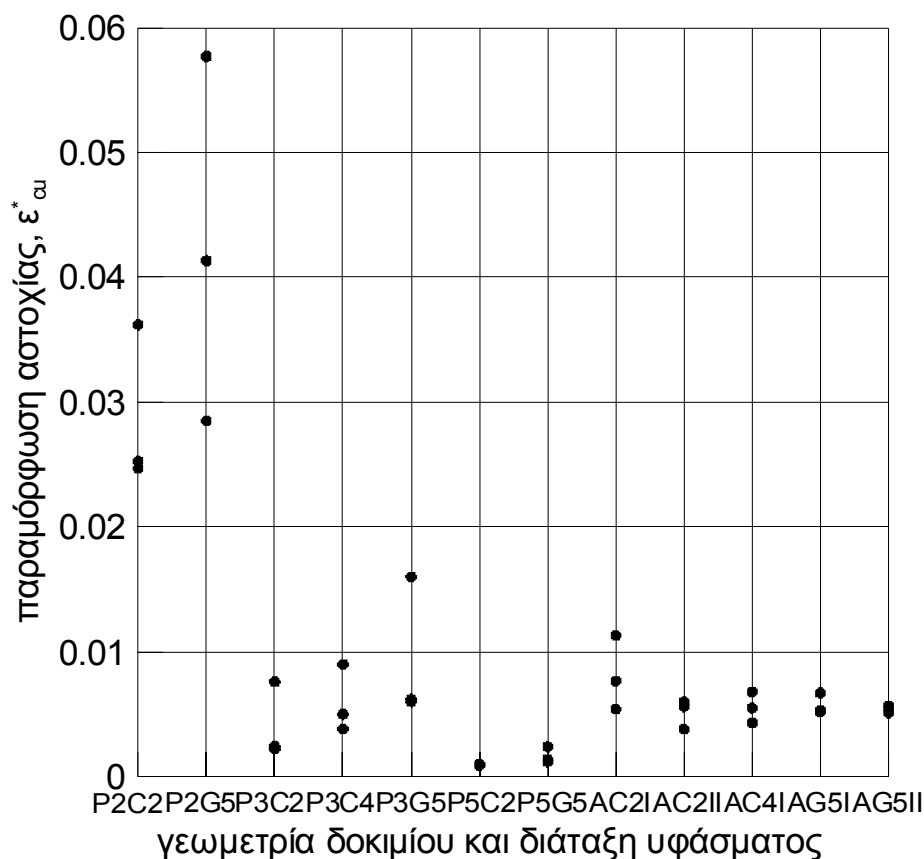
### 2.3.8 Παραμόρφωση αστοχίας

Όπως είναι γνωστό, η περίσφιξη αυξάνει την παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος. Αυτό το χαρακτηριστικό, μάλιστα, είναι ιδιαίτερος σημαντικό, καθώς συνεπάγεται αύξηση της πλαστιμότητας των στοιχείων του δομήματος. Πρέπει, πάντως, να αναφερθεί ότι η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά απ' την αντίστοιχη θλιπτική αντοχή, τόσο στην περίπτωση περισφιγξης μέσω συνδετήρων (Vintzileou and Malliri 2000), όσο και στην περίπτωση κυλινδρικών στοιχείων περισφιγγόμενων μέσω συνθέτων υλικών (Vintzileou 2001). Αυτή η αυξημένη διασπορά είναι εν μέρει εγγενής και εν μέρει οφειλόμενη στον τρόπο μέτρησης των παραμορφώσεων κατά την διάρκεια των δοκιμών, καθώς και στον τρόπο διεξαγωγής των δοκιμών (υπό συνθήκες επιβαλλόμενου φορτίου ή επιβαλλόμενων παραμορφώσεων). Στην περίπτωση των στοιχείων με ορθογωνική διατομή αναμένεται ακόμη μεγαλύτερη διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων, καθώς η αστοχία των στοιχείων οφείλεται σε τοπική συγκέντρωση τάσεων περί τις γωνίες των διατομών. Αυτό το φαινόμενο επιβεβαιώνεται απ' την μελέτη των σχετικών αποτελεσμάτων της διεθνούς βιβλιογραφίας (Δρακόπουλος 2001), με τα οποία συμφωνούν και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχ. 13, οι παραμορφώσεις αστοχίας για όμοια δοκίμια με λόγο πλευρών 1:2

κυμαίνονται πρακτικώς από του απλού στο διπλάσιο. Για τους λόγους αυτούς, η σχέση που προτείνεται για την πρόβλεψη της παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος στην περίπτωση πρισματικών δοκιμών (βλ. και Σχ. 14)

$$\varepsilon_{cu}^* = 0.002 + 0.03\alpha\omega_w \quad (3)$$

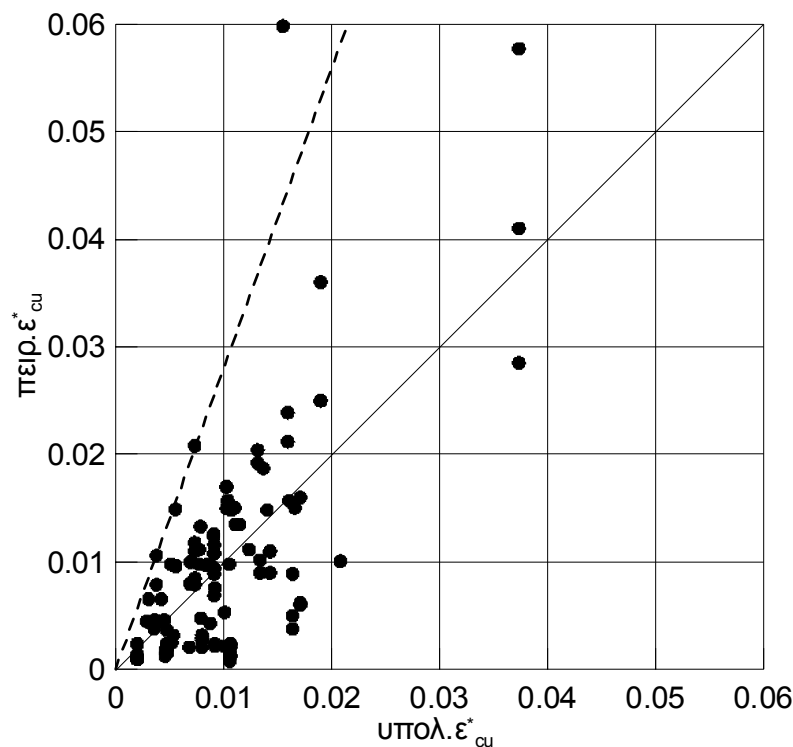
οδηγεί σε λόγο πειραματικής προς υπολογιζόμενη παραμόρφωση αστοχίας ο οποίος εμφανίζει μέση τιμή ίση με 1.09 και τυπική απόκλιση ίση με 0.79. Συνεπεία της μεγάλης διασποράς την οποία εμφανίζουν οι διατιθέμενες τιμές της παραμόρφωσης αστοχίας, η τιμή σχεδιασμού αυτού του μεγέθους (με πιθανότητα 5% να ευρεθεί χαμηλότερη τιμή, βλ. διακεκομμένη γραμμή Σχ. 14) προκύπτει πολύ μικρή, καθιστώντας αβέβαιη την αξιοποίηση της περίσφιγξης στην περίπτωση των στοιχείων με ορθογωνική διατομή.



Σχ. 13 Παραμόρφωση αστοχίας των δοκιμών.

Τέλος, σε ότι αφορά τα δοκίμια με διατομή σχήματος Γ, όπως φαίνεται στο Σχ. 13, η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας είναι χαμηλή και ανεξάρτητη του τρόπου τοποθέτησης του σύνθετου υλικού, καθώς και της ποσότητας του υλικού περίσφιγξης. Επομένως, λαμβανομένης υπ' όψη και της μικρής αύξησης της θλιπτικής αντοχής αυτών των δοκιμών,

συνάγεται ότι οι μέθοδοι που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία για την περίσφιγξη στοιχείων με διατομή Γ είναι αναποτελεσματικές.



Σχ. 14 Σύγκριση μεταξύ υπολογιζόμενων και πειραματικών τιμών παραμόρφωσης αστοχίας για δοκίμια με ορθογωνική και τετραγωνική διατομή.

### 2.3.9 Συμπεράσματα δοκιμών περίσφιγξης

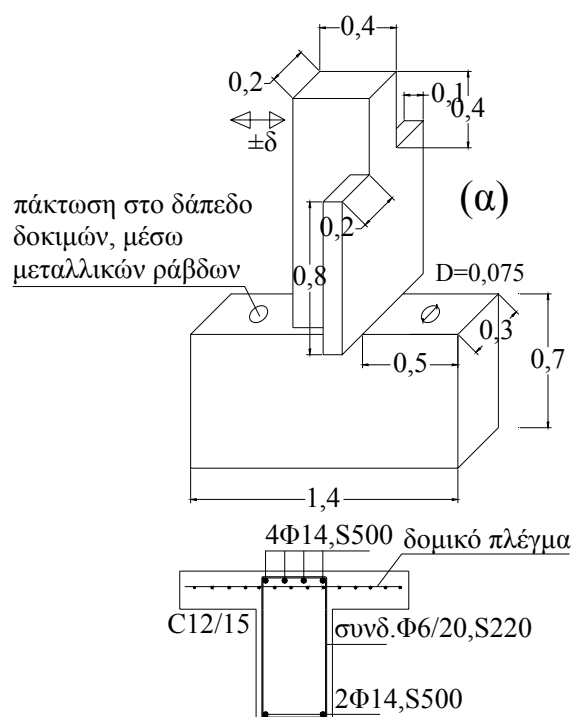
Τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η τοποθέτηση υφασμάτων συνθέτων υλικών σε στοιχεία με διατομή σχήματος Γ, χωρίς μέριμνα για βελτιωμένη αγκύρωση, είναι αναποτελεσματική: Η πρόωρη αποκόλληση των συνθέτων υλικών απ' το σκυρόδεμα συνεπάγεται πολύ μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος.
2. Ως αναμενόμενα, στην περίπτωση ορθογωνικών διατομών, υπό τον όρο ότι οι γωνίες των διατομών είναι στρογγυλεμένες, επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση τόσο της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, όσο και της παραμόρφωσης αστοχίας.
3. Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος εξαρτάται από τον λόγο των πλευρών της διατομής και μειώνεται καθώς αυτός ο λόγος αυξάνεται. Πράγματι, καθώς αυξάνεται ο λόγος των πλευρών σε μία διατομή, μειώνεται η αποδοτικότητα της περίσφιγξης εντός της διατομής με αποτέλεσμα την μείωση της ενεργής περίσφιγξης για σταθερή τιμή του ογκομετρικού μηχανικού ποσοστού περίσφιγξης.



### 2.3.10 Δοκίμια και διάταξη πειραμάτων επί δοκών

Στο Σχ. 15 παρουσιάζεται η γεωμετρία και η όπλιση των δοκιμίων, καθώς και η διάταξη φόρτισης (με σχηματικό τρόπο). Τα δοκίμια των δοκών προσομοιώνουν την περιοχή απ' την θέση μηδενισμού των ροπών μέχρι την στήριξη. Τα δοκίμια πακτώνονται στο δάπεδο δοκιμών του Εργαστηρίου, ενώ σε απόσταση 0.15 m από το άκρο τους επιβάλλονται ανακυκλιζόμενες μετατοπίσεις (μέσω ενός σερβομηχανισμού). Όλα τα δοκίμια οπλίσθηκαν βάσει των παλαιών Κανονισμών. Έτσι, διαθέτουν αραιό εγκάρσιο οπλισμό και αναμένεται να αστοχήσουν σε διάτμηση.



Σχ. 15 Γεωμετρία, όπλιση και (σχηματικός) τρόπος δοκιμής δοκών.

### 2.3.11 Κατασκευή δοκιμίων - υλικά

Συναρμολογήθηκαν οι κλωβοί του οπλισμού για όλα τα δοκίμια και τοποθετήθηκαν στους ξυλοτύπους. Εγκαταστάθηκαν ηλεκτρομηκυσσιόμετρα στον διαμήκη οπλισμό και στους συνδετήρες, όπου προβλεπόταν. Ακολούθως, έγινε η σκυροδέτηση όλων των δοκιμίων (με έτοιμο σκυρόδεμα) σε οριζόντια θέση. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν υγρά για επτά ημέρες (καλυμμένα με λινάτσες). Εν συνεχεία και μέχρι την δοκιμή τους, παρέμειναν στο εσωτερικό του Εργαστηρίου.

Η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κατά την δοκιμή των δοκών μετρήθηκε σε κυλινδρικά συμβατικά δοκίμια (150/300) και ήταν ίση με 20.6 MPa. Για τον διαμήκη οπλισμό

χρησιμοποιήθηκε νευροχάλυβας S500, ενώ οι συνδετήρες κατασκευάστηκαν από λείο χάλυβα S220.

Για την ενίσχυση των δοκιμών, σύμφωνα με το πρόγραμμα του Πίνακα 4, χρησιμοποιήθηκε ύφασμα με ίνες άνθρακα κατά μία διεύθυνση. Το πάχος του υφάσματος είναι 0.13 mm. Η εφελκυστική αντοχή του είναι ίση με 3500 MPa, το μέτρο ελαστικότητάς του είναι ίσο με 230 GPa, ενώ η παραμόρφωση αστοχίας του υφάσματος είναι ίση με 1.5%.

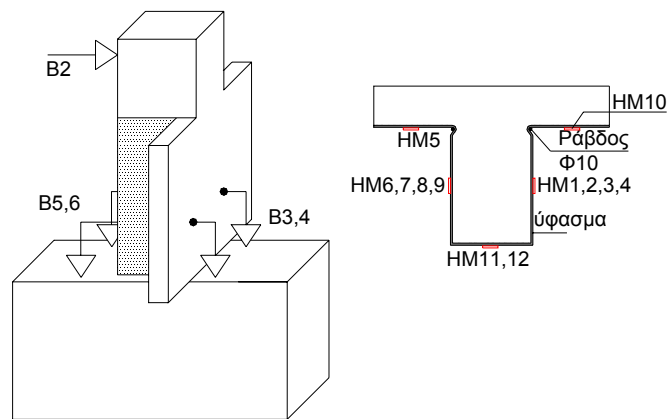
Πίνακας 4 Πρόγραμμα δοκιμών

Δοκίμιο	Δοκιμή	Ενίσχυση	Φόρτιση
1	1	-	M
2	2	-	M
2	7	2 στρώσεις	A
3	3	-	M
3	8	4 στρώσεις	A
4	4	4 στρώσεις	A
5	5	-	A
6	6	2 στρώσεις	A

Στα δοκίμια για τα οποία προβλεπόταν ενίσχυση, το σύνθετο υλικό τοποθετήθηκε από ειδικευμένου συνεργείου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του παραγωγού. Η εφαρμογή του σύνθετου υλικού έγινε περίπου ένα μήνα μετά απ' την σκυροδέτηση των δοκιμών, ενώ η δοκιμή των ενισχυμένων δοκιμών έγινε περίπου ένα μήνα μετά απ' την εφαρμογή του σύνθετου υλικού.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση των δοκών που ενισχύθηκαν αφού είχαν φορτισθεί και είχαν υποστεί βλάβες, η εφαρμογή του υφάσματος έγινε χωρίς να έχει προηγηθεί άλλη μέθοδος επισκευής των δοκιμών.

Το ύφασμα τοποθετήθηκε στις δοκούς σε μήκος ίσο με 0.8 m απ' την στήριξη, με τις ίνες κάθετες στον διαμήκη άξονα των δοκών. Με σκοπό την εξασφάλιση καλής αγκύρωσης στην περιοχή της πλάκας, εφαρμόσθηκε η διάταξη του Σχ. 16.



Σχ. 16 Θέσεις μέτρησης μετατοπίσεων και παραμορφώσεων (βελόμετρα B και ηλεκτρο-μηκυνσιόμετρα HM).

### 2.3.12 Μετρήσεις και ιστορία φόρτισης

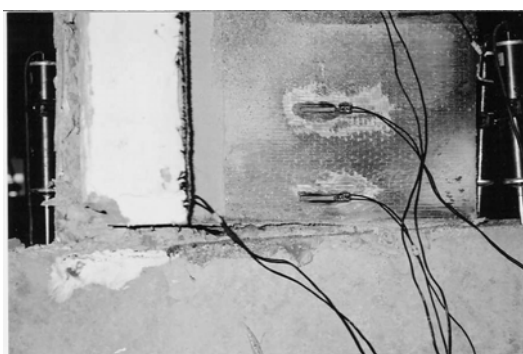
Κατά την διάρκεια των δοκιμών, μετρούνταν τα ακόλουθα μεγέθη (Σχ. 16): (α) Το οριζόντιο φορτίο στις θέσεις εφαρμογής του, η οριζόντια μετατόπιση στην θέση επιβολής της, η στροφή των κρίσιμων περιοχών, οι παραμορφώσεις του διαμήκους οπλισμού και των συνδετήρων σε διάφορες θέσεις, καθώς και οι παραμορφώσεις του υφάσματος, στην περίπτωση των ενισχυμένων δοκιμίων.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, η δοκός 1, η οποία αποτελεί το δοκίμιο αναφοράς, υποβλήθηκε σε μονοτονικά αυξανόμενες μετακινήσεις, μέχρι την αστοχία της. Η δοκός 5 υποβλήθηκε, χωρίς να ενισχυθεί, σε ανακυκλιζόμενες μετατοπίσεις και αποτελεί το δεύτερο δοκίμιο αναφοράς. Οι δοκοί 2 και 3 υποβλήθηκαν σε μονοτονικά αυξανόμενες μετακινήσεις, μέχρι την μέγιστη αντίστασή τους. Ακολούθως, αποφορτίστηκαν, ενισχύθηκαν με 2 και 4 στρώσεις υφάσματος αντιστοίχως και υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενες μετακινήσεις. Τέλος, οι δοκοί 4 και 6 ενισχύθηκαν χωρίς να έχουν υποστεί βλάβες και υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενες μετατοπίσεις, ώστε να ελεγχθεί εάν η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης εξαρτάται απ' την ιστορία φόρτισης των δοκιμίων.

### 2.3.13 Πειραματικά αποτελέσματα - δοκοί

### Τρόπος αστοχίας

Το δοκίμιο 1 αστόχησε σε διάτμηση. Εμφανίσθηκε μία λοξή ρωγμή (υπό γωνία  $45^\circ$ ), το άνοιγμα της οποίας αυξανόταν καθώς μεγάλωνε η επιβαλλόμενη μετακίνηση στο άκρο της δοκού. Η θραύση του συνδετήρα που έτεμνε την ρωγμή οδήγησε σε σημαντική μείωση της απόκρισης του δοκιμίου και στον τερματισμό της δοκιμής. Τα δοκίμια 2 και 3 εμφάνισαν και αυτά διαγώνια ρωγμή. Η επιβολή των μετακινήσεων σταμάτησε όταν τα δοκίμια έφθασαν σε απόκριση ίση με την μέγιστη και αποφορτίστηκαν, ώστε να ενισχυθούν. Η παραμένουσα μετακίνηση των δοκιμίων αυτών ήταν περίπου ίση με 5 mm. Το δοκίμιο 5 αστόχησε σε διάτμηση με την εμφάνιση λοξών χιαστί ρωγμών. Σημαντική μείωση της απόκρισής του παρατηρήθηκε με την θραύση των συνδετήρων που έτεμναν τις ρωγμές. Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν εμφάνισαν τον ίδιο τρόπο αστοχίας, ανεξαρτήτως του πλήθους των στρώσεων του σύνθετου υλικού και ανεξαρτήτως της ιστορίας φόρτισής τους. Και τα τέσσερα δοκίμια αστόχησαν σε κάμψη, στην διατομή της πάκτωσης (Φωτ. 6). Δεν παρατηρήθηκε αστοχία του υφάσματος σε καμία από τις δοκούς.



Φωτογραφία 6. Καμπτική αστοχία ενισχυμένων δοκών

### Διαγράμματα ροπών - μετακινήσεων

Στο Σχ. 17 δίνονται τα διαγράμματα ροπών κάμψης-μετατοπίσεων για όλες τις δοκιμές δοκών. Παρατηρούνται τα εξής: (α) Τα μη ενισχυμένα δοκίμια εμφανίζουν ένα περίπου γραμμικό διάγραμμα μέχρι την αστοχία τους, η οποία συμβαίνει για ροπή περίπου ίση με 77.3 kNm, ενώ η υπολογιζόμενη ροπή αστοχίας (όταν εφελκύεται ο άνω οπλισμός) είναι ίση με 113.2 kNm. (β) Όλα τα ενισχυμένα δοκίμια εμφανίζουν καμπτική συμπεριφορά (χαρακτηριζόμενη από ευρείς βρόχους υστέρησης. Εξαίρεση αποτελεί ο τελευταίος κύκλος φόρτισης, κατά τον οποίο παρατηρείται ολίσθηση κατά μήκος της (ανοιχτής) ρωγμής στην θέση πάκτωσης. Αυτή η ολίσθηση εκδηλώνεται με την συρρίκνωση των βρόχων υστέρησης περί την αρχή των αξόνων. (γ) Δεν παρατηρήθηκε αύξηση της δυσκαμψίας των ενισχυμένων δοκών, έναντι των μη ενισχυμένων. (δ) Ανεξαρτήτως του πλήθους των

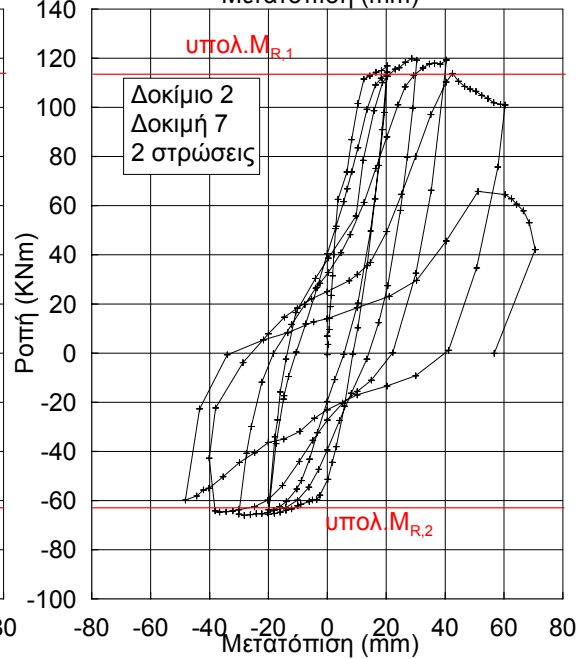
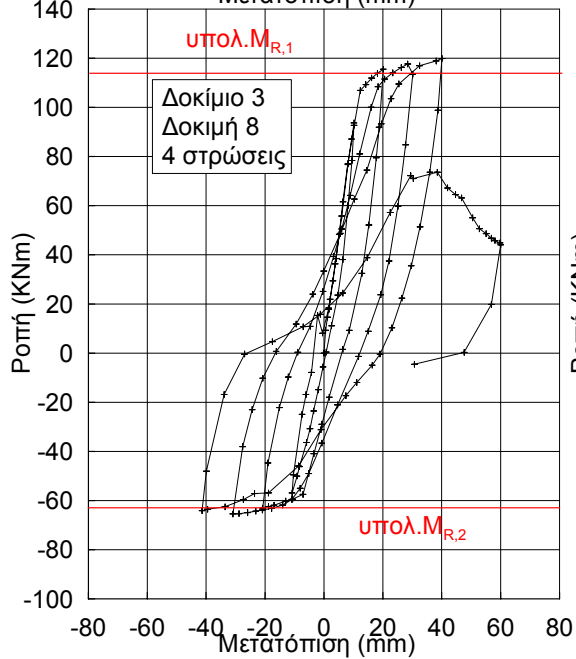
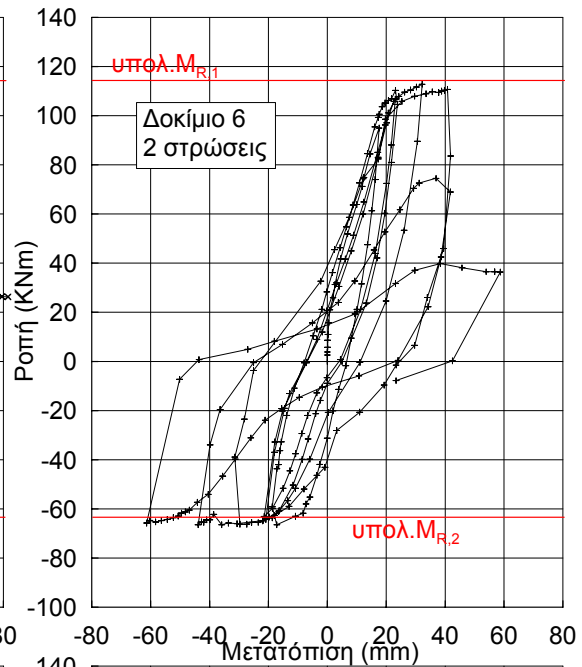
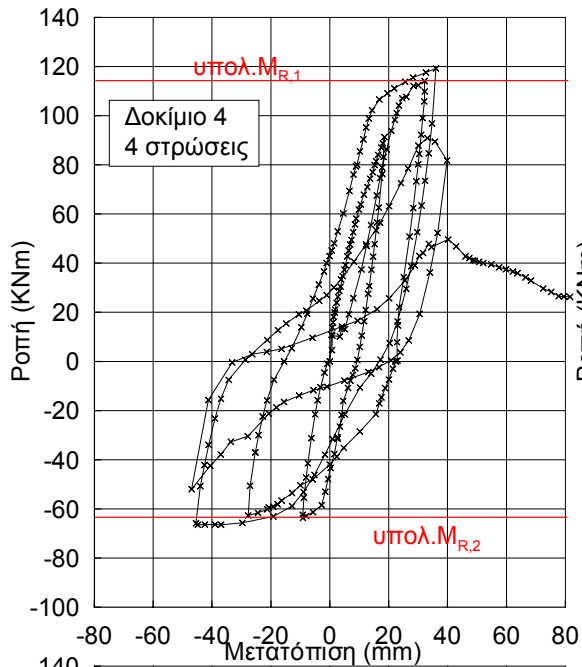
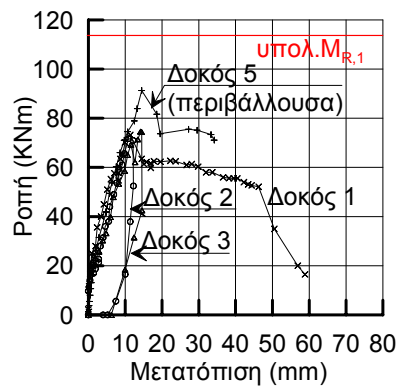
στρώσεων του υλικού ενίσχυσης, καθώς και ανεξαρτήτως της ιστορίας φόρτισης των δοκιμίων, η μέγιστη ροπή κάμψης που επιστρατεύθηκε και κατά τις δύο διευθύνσεις φόρτισης (Πίνακας 5) ήταν περίπου ίση με την υπολογισθείσα καμπτική αντοχή της δοκού (+113.2 kNm και -63 kNm όταν εφελκύεται ο άνω ή ο κάτω οπλισμός αντιστοίχως). (ε) Βάσει αυτών των στοιχείων προκύπτει ότι η προσθήκη του σύνθετου υλικού οδήγησε σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δοκών κατά 50% περίπου. (στ) Αξίζει να παρατηρηθεί (Πίνακας 6) ότι στην περίπτωση των ενισχυμένων δοκιμίων, η μετατόπιση που αντιστοιχεί στην μέγιστη αντίσταση παρουσιάζεται πολλαπλάσια (2.5 έως 4 φορές) εκείνης για τα μη ενισχυμένα δοκίμια.

Πίνακας 5 Μέγιστες πειραματικές τιμές ροπών

Δοκίμιο	Δοκιμή	$\max M^+$ (kNm)	$\max M^-$ (kNm)
1	1	73.2	-
2	2	71.7	-
3	3	74.6	-
4	4	119.2	-66.5
5	5	89.5	-59.1
6	6	112.8	-66.5
2	7	119.9	-66.0
3	8	119.9	-65.4

Πίνακας 6 Μετακινήσεις κατά την μέγιστη αντίσταση

Δοκίμιο	Δοκιμή	$\delta_{\max M^+}$ (mm)	$\delta_{\max M^-}$ (mm)
1	1	11.38	-
2	2	10.94	-
3	3	14.16	-
4	4	36.06	-36.92
5	5	17.60	-7.96
6	6	32.20	-35.88
2	7	30.36	-36.58
3	8	40.08	-30.94

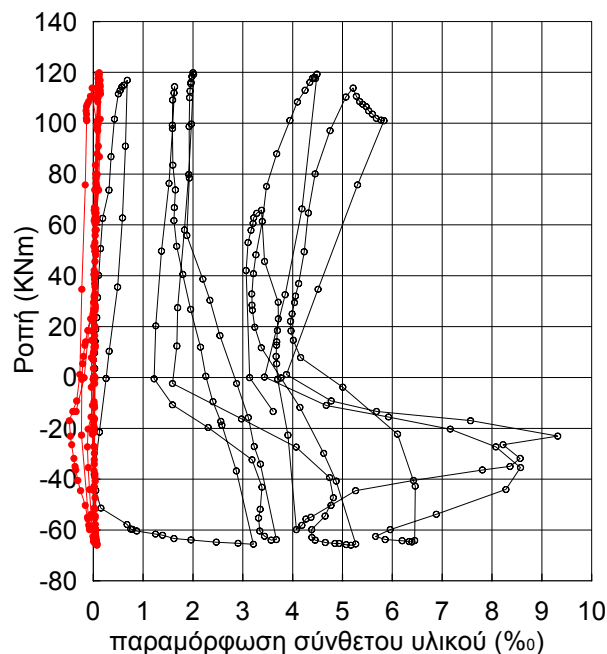


Σχ. 17 Βρόχοι υστέρησης ενισχυμένων και μη ενισχυμένων δοκών.

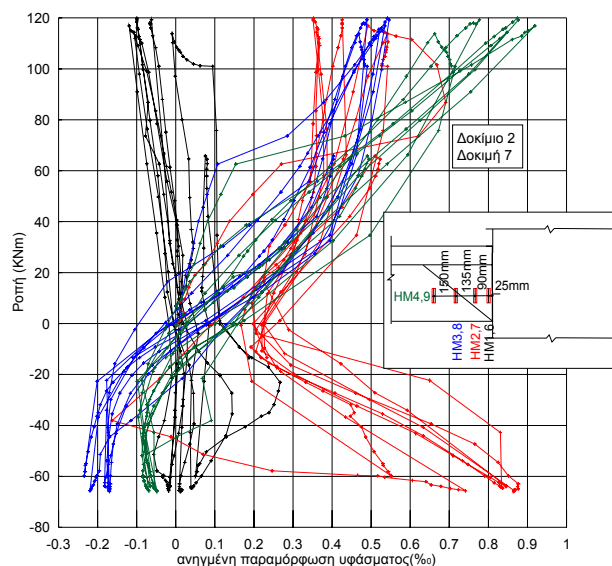
### Ενεργοποίηση σύνθετου υλικού

Στο Σχ. 18 δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα των παραμορφώσεων του υφάσματος συναρτήσει της ροπής κάμψης. Οι μετρήσεις λαμβάνονταν μέσω των HM11 και 12 (Σχ. 16). Το HM11 απέχει 20 mm απ' την διατομή πάκτωσης, ενώ το HM12 απέχει 100 mm απ' το HM11. Παρατηρείται σημαντική ενεργοποίηση του υφάσματος στην διατομή κοντά στην πάκτωση. Αντιθέτως, σε απόσταση μόλις ολίγων εκατοστών απ' την πάκτωση, το ύφασμα παραμένει σχεδόν ανενεργό, ακόμη και για τα δοκίμια με δύο στρώσεις σύνθετου υλικού.

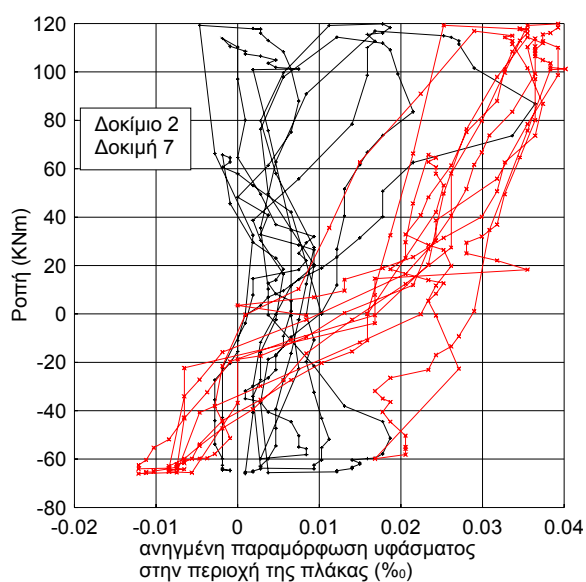
Ομοίως, παρατηρείται (Σχ. 19) ότι οι παραμορφώσεις του σύνθετου υλικού είναι μικρές και στην περιοχή του κορμού των δοκών και μάλιστα εντός του κρίσιμου από άποψη τέμνουσας μήκους. Τέλος, παρατηρείται (Σχ. 20) ότι η μέθοδος αγκύρωσης του υφάσματος στην περιοχή της πλάκας ήταν απολύτως επιτυχής, καθώς οι ανηγμένες παραμορφώσεις του υλικού ενίσχυσης είναι πρακτικώς μηδενικές.



Σχ. 18 Παραμορφώσεις του υφάσματος στο πέλμα της δοκού.



Σχ. 19 Παραμορφώσεις υφάσματος στον κορμό μιας δοκού.



Σχ. 20 Ανηγμένες παραμορφώσεις του υφάσματος στην περιοχή της πλάκας.

#### 2.3.14 Συμπεράσματα δοκιμών επί δοκών

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

(α) Η εφαρμογή του σύνθετου υλικού σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία ανήκουν σε δομήματα μελετημένα βάσει παλαιότερων Κανονισμών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς τους. Πράγματι,



(β) Το σύνθετο υλικό σε κατάλληλη ποσότητα μεταβάλλει τον τρόπο αστοχίας των στοιχείων από διατμητικό σε καμπτικό.

(γ) Εξ αιτίας αυτού, παρατηρείται αύξηση της φέρουσας ικανότητας των στοιχείων, καθώς και

(δ) Σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων τις οποίες μπορούν να υποστούν χωρίς σημαντική μείωση της απόκρισής τους.

(ε) Χάρη στα (β), (γ) και (δ), αυξάνεται σημαντικά το ποσόν της καταστρεφόμενης ενέργειας. Πρέπει, βεβαίως, να λαμβάνεται υπ' όψη ότι

(στ) Η θραύση του σύνθετου υλικού οδηγεί, όπως είναι φυσικό, σε πολύ μεγάλη μείωση της απόκρισης του στοιχείου. Έτσι,

(ζ) Η εφαρμογή της μεθόδου ενίσχυσης μέσω σύνθετων υλικών, όπως και η επιλογή οποιασδήποτε άλλης μεθόδου επεμβάσεως, δεν μπορεί παρά να αποτελεί αποτέλεσμα ευρύτερου σχεδιασμού για το σύνολο του δομήματος και όχι για μεμονωμένα φέροντα στοιχεία.

### **2.3.15 Αναφορές πειραματικής μελέτης**

Δρακόπουλος Χ. (2001). Συγκριτική αξιολόγηση αναλυτικών προσομοιωμάτων για την περίσφιγξη σκυροδέματος με σύνθετα υλικά. Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ «Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών», ΕΜΠ (Επιβλ. Ε.Βιντζηλαίου).

Σιγάλας Ε. (2002). Πειραματική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης σκυροδέματος μέσω σύνθετων υλικών: Δοκίμια ορθογωνικής διατομής και διατομής Γ. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ (Επιβλ. Ε.Βιντζηλαίου).

Vintzileou, E. (2001). An empirical model for predicting the properties of concrete confined by means of composite materials. Proceedings of Conference "Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures", Cambridge, 16-18/7 2001, Thomas Telford (London) edited by C. Burgoyne. Volume 2: 845-853.

Vintzileou, E. and Malliri, P. (1999). An empirical model for predicting the mechanical properties of confined concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 51, Number 5, pp. 353-364.

## **2.4 ΕΡΓΑΣΙΑ Β – ΤΕΥΧΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΔΗΓΙΩΝ**