

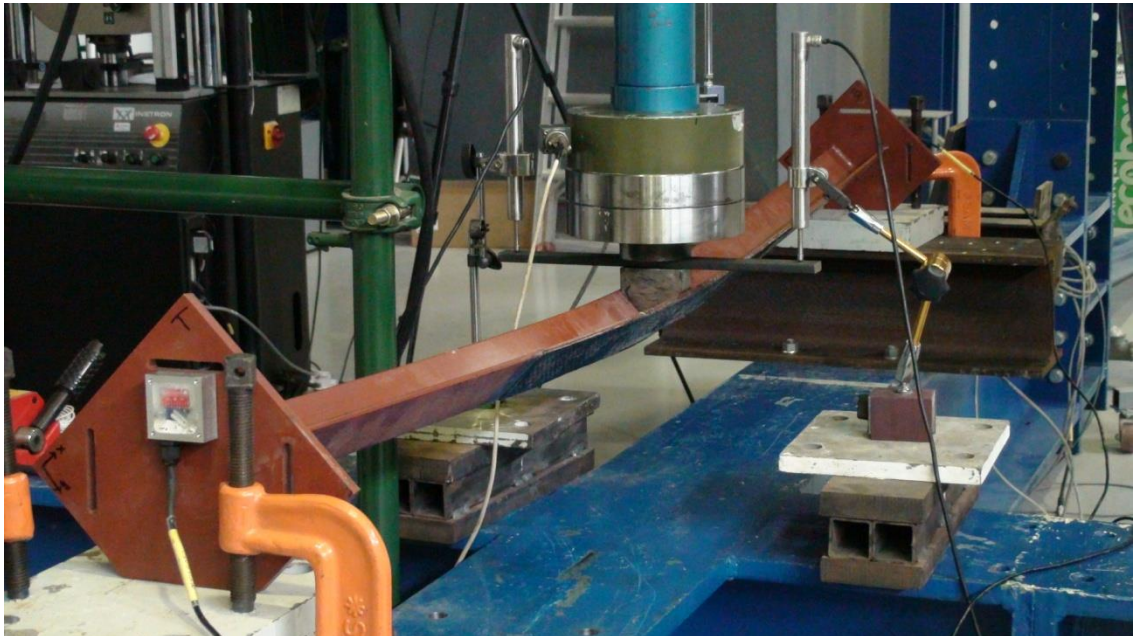


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική διερεύνηση ενισχυμένων  
χαλύβδινων ισοσκελών γωνιακών με  
ανθρακονήματα σε θλίψη και κάμψη



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Ι. Μωραγιάννης

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Συνεπιβλέπων: Ξενοφών Λιγνός

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΕΜΚ ΔΕ 2015/15

Μωραγιάννης Π. Ι. (2015).  
Πειραματική διερεύνηση ενισχυμένων χαλύβδινων ισοσκελών γωνιακών με  
ανθρακονήματα σε θλίψη και κάμψη  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015/15  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Moragiannis P. I. (2015).  
Experimental study of steel equal-leg angles strengthened with CFRP subjected to  
compression and to bending  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015/15  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	3
Abstract .....	5
Ευχαριστίες .....	7
1 Εισαγωγή .....	9
2 Συμπεριφορά γωνιακών διατομών από χάλυβα.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Συμπεριφορά έναντι κάμψης.....	15
2.2.1 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 .....	15
2.2.2 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του αμερικάνικου κανονισμού AISC.....	16
2.3 Συμπεριφορά έναντι θλίψης-Λυγισμός .....	20
2.3.1 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 .....	21
2.3.2 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του αμερικάνικου κανονισμού AISC.....	25
3 Ο μέχρι τώρα ρόλος των σύνθετων υλικών στην ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών.....	27
3.1 Εισαγωγή.....	27
3.2 Σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών .....	28
3.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά-Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	28
3.2.2 Είδη ινοπλισμένων πολυμερών, χαρακτηριστικά των επιμέρους συστατικών τους και τρόποι κατασκευής.....	32
3.2.3 Νόμοι και ισχύουσες διατάξεις υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.....	43
3.2.4 Πιθανές μορφές αστοχίας ενός, εξωτερικά ενισχυμένου με κάποιο ΙΟΠ σύνθετο υλικό, χαλύβδινου στοιχείου .....	46
3.3 Ανασκόπηση της μέχρι σήμερα ερευνητικής ενασχόλησης πάνω στην ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών με ΙΟΠ σύνθετα υλικά .....	51
3.3.1 Καμπτική ενίσχυση χαλύβδινων μελών με ΙΟΠ .....	51
3.3.2 Ενίσχυση αξονικά θλιβόμενων χαλύβδινων μελών με ΙΟΠ .....	55
4 Πειράματα εφελκυσμού ανθρακονημάτων (δοκιμές υλικού).....	59
4.1 Εισαγωγή.....	59
4.2 Περιγραφή συσκευών πειράματος .....	60
4.3 Κατασκευή πειραματικών δοκιμίων.....	61
4.4 Πειραματικά αποτελέσματα .....	67
4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού και παρατηρήσεις.....	72
5 Πειράματα θλίψης χαλύβδινων δοκών διατομής γωνιακού ενισχυμένων εξωτερικά με ανθρακονήματα .....	75
5.1 Εισαγωγή.....	75
5.2 Περιγραφή συσκευών πειράματος .....	76
5.3 Κατασκευή πειραματικών δοκιμίων.....	78
5.4 Διάταξη και τοποθέτηση πειραματικών μοντέλων.....	81
5.5 1 <sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S1 $e_u30$ ).....	84
5.5.1 Περιγραφή πειράματος.....	84
5.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα .....	86
5.5.3 Σύγκριση με αντίστοιχο μη ενισχυμένο .....	89
5.5.4 Συμπεράσματα .....	92
5.6 2 <sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S2 $e_u30$ ).....	93
5.6.1 Περιγραφή πειράματος.....	93
5.6.2 Πειραματικά αποτελέσματα .....	94

5.6.3 Σύγκριση με αντίστοιχο μη ενισχυμένο .....	97
5.6.4 Συμπεράσματα.....	100
5.7 Συμπεράσματα.....	101
6 Πειράματα κάμψης χαλύβδινων δοκών διατομής γωνιακού ενισχυμένων εξωτερικά με ανθρακονήματα.....	103
6.1 Εισαγωγή.....	103
6.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	103
6.3 1 <sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S1).....	106
6.4 2 <sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S2).....	109
6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα του μη ενισχυμένου δοκιμίου.....	112
6.6 Συμπεράσματα.....	114
7 Συμπεράσματα.....	117
8 Βιβλιογραφία.....	119

## **Πειραματική διερεύνηση ενισχυμένων χαλύβδινων ισοσκελών γωνιακών με ανθρακονήματα σε θλίψη και κάμψη**

Μωραγιάννης Π. Ι. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι., Συνεπιβλέπων: Λιγνός Ξ.)

### **Περίληψη**

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του τρόπου ενίσχυσης χαλύβδινων μελών με ινοπλισμένα πολυμερή. Ειδικότερα, εξετάστηκε η συμπεριφορά χαλύβδινων μελών διατομής ισοσκελούς γωνιακού, ενισχυμένων εξωτερικά με δύο στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού από ίνες άνθρακα μονής διευθύνσεως. Τα ενισχυμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε έκκεντρη θλίψη αλλά και σε κάμψη τριών σημείων.

Η μέθοδος ενίσχυσης με σύνθετα υλικά αποτελεί την πλέον σύγχρονη μέθοδο ενίσχυσης των κατασκευών. Αν και η χρήση της είναι ευρέως διαδεδομένη στην ενίσχυση κατασκευών από ωπλισμένο σκυρόδεμα, εντούτοις η αξιοποίησή τους στον κλάδο των μεταλλικών κατασκευών είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω ανεπαρκούς γνώσης της συμπεριφοράς τους. Αυτό αποδεικνύεται τόσο από την απουσία κάποιου κανονιστικού πλαισίου σχεδιασμού, όσο και από την περιορισμένη ερευνητική δραστηριότητα για το συγκεκριμένο αντικείμενο και η οποία παρατηρείται κυρίως την τελευταία δεκαετία. Παρ' όλα αυτά, η ολοένα αυξημένη κινητικότητα της διεθνούς ερευνητικής κοινότητας σχετικά με αυτό τον τρόπο ενίσχυσης μεταλλικών στοιχείων, προμηνύει πως σύντομα θα εδραιωθεί και σε αυτό τον κλάδο, στο οποίο ευελπιστεί να συνδράμει η παρούσα εργασία.

Προκειμένου να σχηματιστεί μια εποπτική εικόνα της συμπεριφοράς τόσο των γωνιακών διατομών όσο και των σύνθετων υλικών, αρχικά γίνεται αναφορά σε καθένα από αυτά τα στοιχεία ξεχωριστά. Επίσης, στο κομμάτι των σύνθετων υλικών, γίνεται αναφορά σε σχετικές ερευνητικές αναζητήσεις που παρατηρούνται διεθνώς. Αναφορικά με το πειραματικό μέρος της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη πειραμάτων, ένα σε αξονική έκκεντρη θλίψη και ένα σε κάμψη περί τον ασθενή άξονα της διατομής του μέλους. Προτού πραγματοποιηθεί η ενίσχυση των χαλύβδινων μελών, πραγματοποιήθηκαν 5 δοκιμές υλικού για να διαπιστωθούν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού, σύμφωνα με το πρότυπο ISO. Ενισχύθηκαν δύο χαλύβδινα δοκίμια, ακολουθώντας τη χειρωνακτική μέθοδο παραγωγής. Η εφαρμογή της ενίσχυσης έγινε στην εξωτερική μεριά των σκελών του γωνιακού, στο μεγαλύτερο μέρος του συνολικού τους μήκους.

Τα αποτελέσματα κάθε πειράματος συγκρίθηκαν κάθε φορά με αυτά των αντίστοιχων πειραμάτων μη ενισχυμένων μελών, ίδιας διατομής και μορφής έντασης. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης δεν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά του μέλους έναντι λυγισμού. Αντιθέτως, όσον αφορά τα πειράματα κάμψης, ο εν λόγω τρόπος ενίσχυσης απέδωσε ικανοποιητικά αυξάνοντας ικανοποιητικά την αντοχή του μέλους. Τέλος, μελλοντικά θα ήταν χρήσιμη αντίστοιχη μελέτη χρησιμοποιώντας καλύτερης ποιότητας σύνθετο υλικό, με μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής των ινών, καθώς και μία προσπάθεια επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων με αριθμητικές αναλύσεις.



**Experimental study of steel equal-leg angles strengthened with CFRP  
subjected to compression and to bending**

Moragiannis P. I. (supervised by Vayas I. and Lignos X.)

**Abstract**

The object of the present diploma thesis is the experimental investigation of the mode of strengthening of steel members through fiber reinforced polymers. More specifically, the behavior of steel equal-leg angle members, externally strengthened with two plies of reinforced polymer composite material with unidirectional carbon fibers, was examined. The strengthened members were tested in eccentric axial compression and in three-point bending.

Strengthening with composite materials is an innovative method of enhancement in the field of structures. Although it is widely used for strengthening concrete structures, its usage is very limited in the field of steel structures, mainly because of the insufficient knowledge of such a behavior. This is verified, not only by the absence of any widely accepted design guide for such a usage, but also by the restricted research upon that. Nevertheless, the continuously growing concern of researchers upon this mode of strengthening of steel members, envisages that it will be consolidated in the certain field too. This is also one of the targets the certain study has.

At first, a reference at both the two distinct members of this study (angle sections, composite materials) is attempted, in order for a better supervision to be achieved. Moreover, in the field where an analysis of composite materials in general is attempted, some relevant research attempts are mentioned. As far as the experimental part of this research is concerned, two different types of experiments were examined, one over axial eccentric compression and the other through bending over the minor principal axis of the member's section. Before the strengthening of the steel member was applied, 5 tensile tests were carried out following the standard ISO, in order to find out the mechanical properties of the composite material. Two steel members were strengthened, both through the hand lay-up procedure. The strengthening was placed at the outer side of the angle member's legs, extended in the biggest part of its total length.

The results of each experiment were compared each time with the ones of the unstrengthened same member. From the experimental results analysis, it is found that this mode of strengthening is unable to result in considerable differences over the member's buckling behavior. Oppositely, as far as the experiments over bending are concerned, this mode of strengthening was pretty effective, increasing satisfactorily the member's resistance. In conclusion, a similar research conducted using a composite material of a better quality, by means of a higher fibers' participation rate, would be very useful. Other than that, an effort to compare the experimental results with those from an arithmetic analysis approach would be valuable.





## Ευχαριστίες

Στην περαίωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας συνεισέφεραν πολλά άτομα, ο καθένας με τον δικό του πολύτιμο τρόπο. Ως εκ τούτου, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον καθένα τους.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Βάγια, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και διευθυντή του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών. Όχι μόνο για την ανάθεση του θέματος της παρούσας εργασίας, αλλά επίσης για την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται επίσης στον Δρ. Ξενοφώντα Λιγνό, χωρίς την πολύτιμη συμβολή και καθοδήγηση του οποίου θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας. Η καθοδήγηση και η βοήθεια που μου προσέφερε, όποτε και αν του ζητήθηκε, αποτελεί παράδειγμα για όλους.

Εξίσου σημαντική ήταν η συνεισφορά του κ. Κατσατσίδα Στυλιανού, η συνεισφορά του οποίου στη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν καθοριστική και απαραίτητη. Πέραν τούτου, τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την μεγάλη προθυμία που επέδειξε για επίλυση των όποιων προσωπικών αποριών μου δημιουργήθηκαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω εξίσου την οικογένειά μου, την κοπέλα μου, καθώς και όλους τους φίλους που μου στάθηκαν όλο αυτό το διάστημα. Η ψυχολογική συμβολή τους είναι ανεκτίμητη.



# 1 Εισαγωγή

Η εξερεύνηση του αγνώστου και η αναζήτηση του καινούργιου, του διαφορετικού, υπήρχε από πάντα, όπως μας διδάσκει η ιστορία, στο λεξιλόγιο του ανθρώπου και δη του ερευνητή. Έτσι και ο κόσμος των κατασκευών δεν έμεινε αμετάβλητος με την πάροδο των χρόνων, τουναντίον μάλιστα αναπροσαρμοζόταν και εναρμονιζόταν με τις εκάστοτε νέες τεχνολογίες και τις όποιες νέες ερευνητικές ανακαλύψεις. Και αυτό συνεχίζει να συμβαίνει ακόμη και σήμερα, ίσως και με πιο έντονους ρυθμούς, όπως επιβάλλει η συνεχώς εξελισσόμενη εποχή που βιώνουμε. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα όποια δομικά υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού έχουν αποδράσει από τα στενά όρια του σκυροδέματος και του χάλυβα, εισάγοντας πλέον νέες τεχνολογίες στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού όπως αυτή των σύνθετων υλικών.

Αυτού του είδους τα υλικά, αν και πολλά υποσχόμενα κυρίως από άποψη μηχανικών ιδιοτήτων και ευχρηστίας, αποτελούσαν μέχρι πρότινος κάτι το τελείως άγνωστο στον κατασκευαστικό κλάδο. Παρ' όλα αυτά, η ολοένα αυξανόμενη χρήση τους τα τελευταία χρόνια, κυρίως ως υλικά ενίσχυσης υπαρχόντων κατασκευών αλλά ακόμη και ως υλικά μόρφωσης ολόκληρων μελών σε κάποιες περιπτώσεις, έχει εισάγει για τα καλά αυτή τη νέα τεχνολογία στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού.

Όλη αυτή η νέα κατάσταση λοιπόν, απαιτεί την ύπαρξη ενός συνολικά αποδεκτού κανονιστικού πλαισίου όσον αφορά το σχεδιασμό ενισχύσεων από σύνθετα υλικά. Όμως, τουλάχιστον σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ένα τέτοιο πρότυπο απουσιάζει καθώς στους μέχρι τώρα υπάρχοντες Ευρωκώδικες δεν υπάρχει τέτοιο εδάφιο. Τα μόνα σχετικά κανονιστικά πλαίσια που έχουν δημιουργηθεί παγκοσμίως συναντώνται στον αμερικάνικο (ACI 440.2R-08) και τον ιαπωνικό κανονισμό, οι οποίοι όμως αφορούν μόνο σε ενισχύσεις κατασκευών από σκυρόδεμα. Σχετικά με την ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών με σύνθετα υλικά, η έως τώρα χρήση και έρευνα είναι σε πιο πρώιμο στάδιο και ένα σχετικό πλαίσιο σχεδιασμού και ανάλυσης απουσιάζει, όχι μόνο σε ευρωπαϊκό αλλά σε παγκόσμιο επίπεδο.

Αυτή η έλλειψη κάποιου πρότυπου κανονισμού σε παγκόσμιο επίπεδο αποτέλεσε το βασικό -αλλά όχι το μοναδικό- κίνητρο της παρούσας εργασίας. Επί προσωπικού, η ενεργή συμμετοχή σε μια σειρά πειραμάτων και η επί τω έργω οργάνωση και παρακολούθηση αυτών αποδείχθηκε ιδιαίτερος επιμορφωτική και ουσιώδης, και κατάφερε να καταστήσει τις όποιες χρονικές δυσκολίες συνάντησα σημασιολογικά αμελητέες. Εξίσου θετικά επέδρασε και το γεγονός ότι το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας σχετίζεται με τις ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών, έναν τομέα ο οποίος συγκεκριμένα στην Ελλάδα μοιάζει να επιβιώνει παρά την μεγάλη ύφεση στην οικοδομική δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια, ενώ και σε παγκόσμιο επίπεδο φαίνεται να αποκτά όλο και περισσότερο ευρεία εφαρμογή.

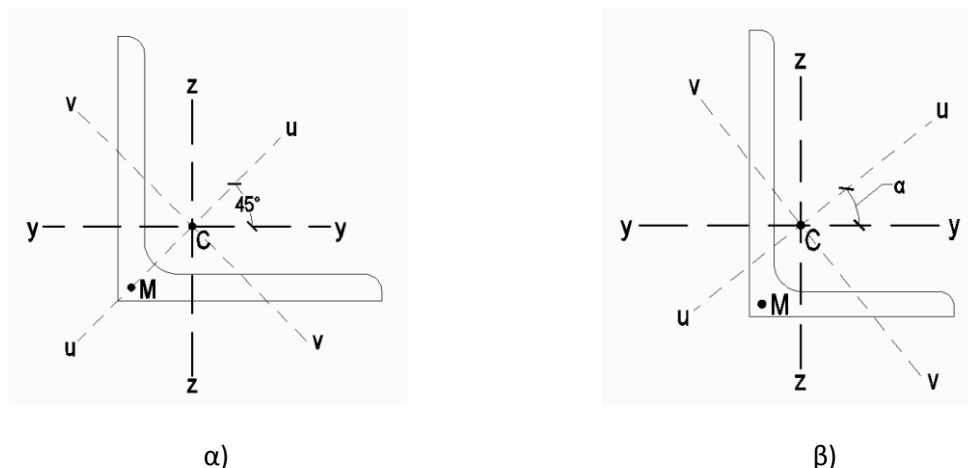
Συγκεκριμένα, σε αυτή την εργασία μελετάται η συμπεριφορά δύο χαλύβδινων δοκών διατομής ισοσκελούς γωνιακού, έπειτα από την επικόλληση, με την υγρή μέθοδο, δύο στρώσεων υφάσματος από ίνες άνθρακα (CFRP) μονής διεύθυνσης στην εξωτερική μεριά κάθε σκέλους του. Έτσι, αφού πρώτα πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες δοκιμές υλικού για να διαπιστωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού της ενίσχυσης, οι ενισχυμένες δοκοί υποβλήθηκαν σε δοκιμές έναντι μονοαξονικής έκκεντρης θλίψης και έναντι κάμψης περί τον ασθενή κύριο άξονα της διατομής. Τέλος, τα πειραματικά αποτελέσματα των ενισχυμένων δοκών συγκρίθηκαν τόσο με τα αποτελέσματα των

αντίστοιχων μη ενισχυμένων μεταλλικών για να διαπιστωθεί η επίδραση της ενίσχυσης, όσο και με αποτελέσματα που προκύπτουν από αναλυτικές σχέσεις σχεδιασμού, σε μια προσπάθεια ελέγχου τις ακρίβειας αυτών των σχέσεων υπολογισμού.

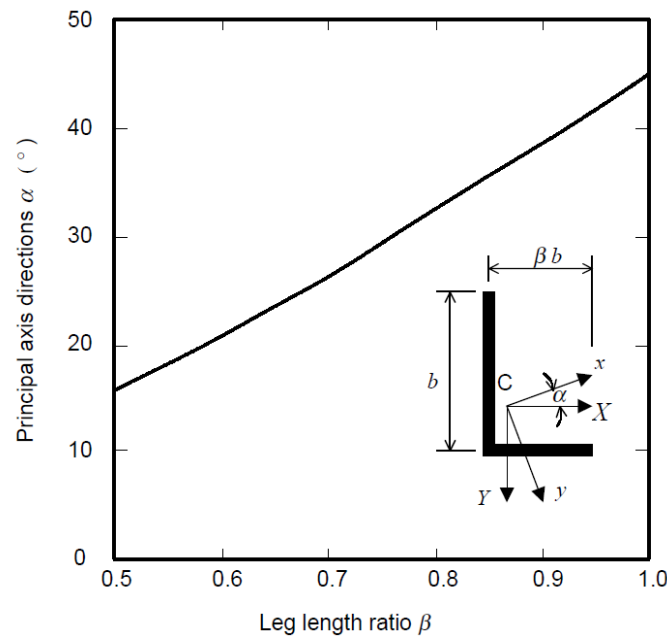
## 2 Συμπεριφορά γωνιακών διατομών από χάλυβα

### 2.1 Εισαγωγή

Οι γωνιακές διατομές αποτελούν μια ομάδα εξαιρετικά ιδιόμορφων και «περίεργων» διατομών, καθώς παρουσιάζουν ορισμένα πολύ ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι το κέντρο βάρους τους, λόγω της μορφής ενός γωνιακού, δεν βρίσκεται σε κάποιο σημείο εντός της διατομής αυτού αλλά εκτός των ορίων αυτής, σε κάποιο σημείο ανάμεσα στα δύο σκέλη του το οποίο προσδιορίζεται κάθε φορά ανάλογα με τις διαστάσεις των σκελών. Άλλο χαρακτηριστικό αυτών των διατομών είναι ότι έχουν είτε έναν (αν πρόκειται για ισοσκελή γωνιακό) είτε κανέναν (αν πρόκειται για ανισοσκελή γωνιακό) άξονα συμμετρίας. Εξαιρετικής σημασίας είναι επίσης το γεγονός ότι οι κύριοι άξονες των γωνιακών διατομών όχι μόνο δεν ταυτίζονται με τους γεωμετρικούς άξονες των σκελών της διατομής, αλλά ούτε είναι παράλληλοι με κάποιον από αυτούς, καθότι βρίσκονται υπό γωνία ως προς τους άξονες των σκελών. Η γωνία αυτή είναι ίση με  $45^\circ$  για γωνιακά με ίσα σκέλη, ενώ για αυτά που έχουν άνισα τα δυο τους σκέλη δεν είναι σταθερή, αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με το λόγο μηκών των σκελών του. Όλα αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των γωνιακών διατομών απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1. Η διεύθυνση των κυρίων αξόνων ως προς τους γεωμετρικούς άξονες των σκελών ενός ανισοσκελούς γωνιακού μπορεί εύκολα κάθε φορά να προσδιοριστεί σύμφωνα με το γράφημα που συνέταξε ο Trahair [42] και το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.1: Τυπικές μορφές (α) ισοσκελούς και (β) ανισοσκελούς γωνιακής διατομής με εμφάνιση κέντρου βάρους  $C$ , κέντρου διατμήσεως  $M$  και κυρίων αξόνων  $u-u$  και  $v-v$

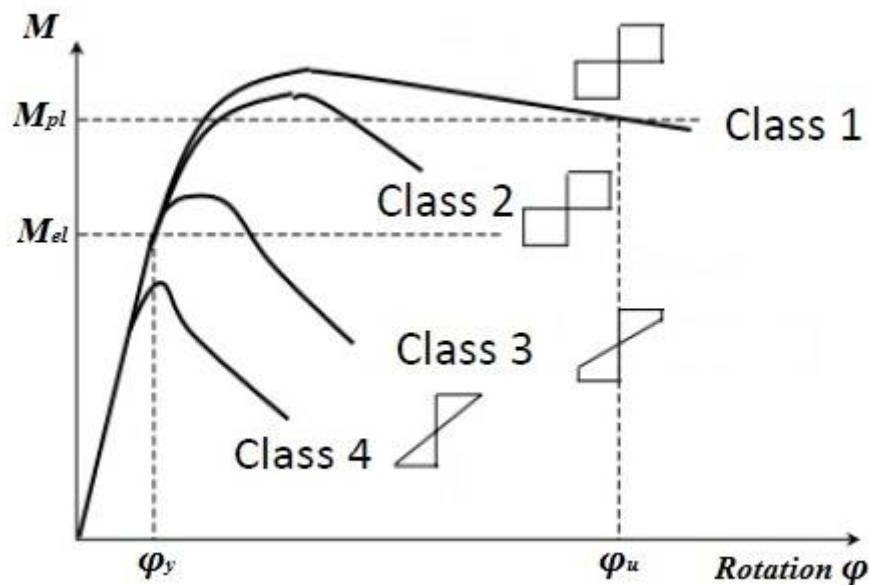


Σχήμα 2.2: Προσδιορισμός της διεύθυνσης των κυρίων αξόνων ενός ανισοσκελούς γωνιακού ανάλογα με το λόγο μηκών των δύο σκελών του [42]

Όλα αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά καθιστούν αυτού του τύπου τις διατομές ξεχωριστές, καθώς η μελέτη της συμπεριφοράς τους είναι μια πολυσύνθετη διαδικασία. Κι αυτό όχι μόνο λόγω του ότι η κατάταξή τους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (EC3) τις καθιστά -πολύ συντηρητικά σύμφωνα με ορισμένες έρευνες [43]- ως κατηγορίας 3 ή 4 (Σχήμα 2.3), δηλαδή ως διατομές που δεν μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους (ή ακόμη και την ελαστική για κατηγορίας 4) και στις οποίες ο τοπικός λυγισμός παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της όποιας οριακής αντοχής τους όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 παρακάτω. Η διάταξη τοποθέτησής τους, κατά την οποία η σύνδεση αυτών πραγματοποιείται μέσω κοχλίωσης στο ένα σκέλος τους, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το κέντρο βάρους τους είναι εκτός των ορίων της διατομής, δημιουργεί εξαρχής μια εκκεντρότητα κατά μία τυπική φόρτισή του, οδηγώντας σε δευτερογενή φαινόμενα τα οποία επιβάλλεται να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά το σχεδιασμό. Έτσι, μία τυπική φόρτιση κατά τη διεύθυνση του ενός σκέλους του, δημιουργεί διαξονική κάμψη περί τους κύριους άξονές του αλλά και στρέψη στη διατομή. Τέλος, δεν πρέπει να παραβλέπουμε το γεγονός ότι πρόκειται για μία ανοικτού τύπου διατομή με αρκετά μικρή δυστρεψία, πράγμα που σημαίνει ότι είναι ευαίσθητη σε στρεπτικά φαινόμενα τα οποία δεν πρέπει να αμελούνται, συνυπολογίζοντας μάλιστα ότι το κέντρο διάτμησης αυτής δεν συμπίπτει με το κέντρο βάρους της καθώς ευρίσκεται στο σημείο τομής των δύο σκελών του γωνιακού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 της προηγούμενης σελίδας.

<p>Refer also to "Outstand flanges" (see sheet 2 of 3)</p> <div style="text-align: center;"> </div>		<p>Does not apply to angles in continuous contact with other components</p>
Class	Section in compression	
Stress distribution across section (compression positive)		
3	$h/t \leq 15\epsilon: \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$	

Σχήμα 2.3: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος κατά την κατάταξη των θλιβόμενων γωνιακών διατομών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 [9]



Σχήμα 2.4: Συμπεριφορά των διαφόρων κατηγοριών διατομών

Όμως, παρά τις τόσες ιδιαιτερότητες αυτών και την αβεβαιότητα στη γνώση της ακριβούς συμπεριφοράς τους (μόνο ο αμερικάνικος κανονισμός παρέχει σχεδιαστικό κανονισμό αποκλειστικά για τις γωνιακές διατομές [4] σε αντίθεση με τον Ευρωκώδικα 3 [9] που δεν κάνει ιδιαίτερη αναφορά σε αυτές και τις τοποθετεί σε ένα αρκετά συντηρητικό πλαίσιο σχεδιασμού), η χρήση γωνιακών χαλύβδινων διατομών κάθε άλλο παρά περιορισμένη είναι. Τέτοιου τύπου διατομές απαντώνται σε διάφορα μέλη μεταλλικών κτιρίων όπως σε ράβδους δικτυωτών ζυγωμάτων σε στέγαστρα, αναρτήρες σε πλαίσια με ελκυστήρα, επιτεγίδες σε στέγες, μηκίδες, οριζόντιους ή κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας κ.α. Η χρήση τους όμως δεν περιορίζεται μόνο στις κτιριακές κατασκευές, αντιθέτως αποτελούν το κύριο μέλος στις κατασκευές στήριξης μεγάλων διαφημιστικών πινακίδων, ενώ προτιμώνται ιδιαίτερος και στην κατασκευή έργων στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της ηλεκτροδότησης. Πιο συγκεκριμένα, ευρεία είναι η

χρήση τους ως ράβδοι δικτυωτών πύργων τηλεπικοινωνιών και μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και ως ράβδοι δικτυωτής στήριξης παθητικών κατόπτρων-ανακλαστήρων (passive repeaters) μέσω των οποίων πραγματοποιείται πλήρης αντανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής δέσμης προς την επιθυμητή κατεύθυνση κατά την ασύρματη διάδοση ενός σήματος. Ενδεικτικά, τέτοιου είδους περιπτώσεις χρήσης των γωνιακών διατομών παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 2.5.

Τέτοια είναι η χρήση και των χαλύβδινων δοκών διατομής ισοσκελούς γωνιακού που ενισχύθηκαν με ανθρακούφασματα κατά την πειραματική διερεύνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αξίζει μάλιστα να τονιστεί ότι η χρήση τους για τη στήριξη μέσων που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες, όπως τα παθητικά κάτοπτρα, είναι ιδιαίτερως κρίσιμη, καθώς η ακρίβεια στη διεύθυνση του παθητικού κατόπτρου είναι εξαιρετικής σημασίας για την επιτυχή ανάκλαση του κύματος και η ευστάθεια αυτού πρέπει να παραμένει όσο το δυνατόν ανεπηρέαστη ακόμη και κατά τη διάρκεια δυσμενών καταστάσεων φόρτισης αυτού (σεισμός, ισχυρός άνεμος).



Σχήμα 2.5: Ενδεικτικές περιπτώσεις παθητικών κατόπτρων με εμφανή τη χρήση γωνιακών διατομών για τη στήριξή τους



## 2.2 Συμπεριφορά έναντι κάμψης

### 2.2.1 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3

Σε μία απλή δοκό, αστοχία έναντι κάμψης επέρχεται όταν η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης  $M_{Ed}$  υπερβαίνει την καμπτική αντοχή της διατομής, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη γεωμετρία της διατομής, την κατηγορία της (ευαισθησία έναντι τοπικού λυγισμού) και την αντοχή του υλικού [1]. Η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης  $M_{Ed}$  σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.1)$$

όπου  $M_{c,Rd}$  η αντοχή σχεδιασμού της διατομής σε κάμψη, της οποίας η τιμή καθορίζεται απ' την κατηγορία κατάταξης της υπό μελέτη διατομής, δηλαδή απ' την ικανότητα αυτής να αναπτύξει μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να προκληθεί αστάθεια λόγω εμφάνισης τοπικού λυγισμού.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (EC3), οι γωνιακές διατομές κατατάσσονται στις χαμηλότερες κατηγορίες 3 και 4 της εν λόγω ταξινόμησης, το οποίο σημαίνει ότι η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα της μπορεί να φθάσει το πολύ το όριο διαρροής του υλικού, χωρίς περεταίρω δυνατότητα εμφάνισης της πλαστικής ροπής αντοχής της διατομής, λόγω εμφάνισης τοπικού λυγισμού. Έτσι, η καμπτική αντοχή σχεδιασμού για κάμψη περί έναν κύριο άξονα τέτοιων διατομών καθορίζεται ως εξής:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 3} \quad (2.2)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 4} \quad (2.3)$$

Επιπροσθέτως, πέραν του ελέγχου αντοχής έναντι κάμψης της διατομής, οφείλει να πραγματοποιείται και έλεγχος ευστάθειας του καμπτόμενου μέλους. Αυτός ο έλεγχος, για μέλη που υπόκεινται μόνο σε κάμψη περί τον ισχυρό τους άξονα και δεν έχουν κάποια ικανοποιητική πλευρική στήριξη στα θλιβόμενα μέλη τους, αφορά την ευστάθεια του μέλους έναντι στρεπτοκαμπτικού-πλευρικού λυγισμού (lateral torsional buckling). Παρ' ότι οι γωνιακές διατομές, ως ανοικτού τύπου διατομές, είναι εξαιρετικά ευαίσθητες σε αυτό το φαινόμενο, ο Ευρωκώδικας 3 δεν τις εξετάζει σαν ξεχωριστή περίπτωση. Ο έλεγχος που πρέπει να ικανοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ο ακόλουθος:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.4)$$

όπου  $M_{b,Rd}$  η ροπή αντοχής έναντι πλευρικού λυγισμού, η οποία κατά τον EC3, δίνεται από τη σχέση:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.5)$$

όπου

$\chi_{LT}$	μειωτικός συντελεστής για πλευρικό λυγισμό
$f_y$	η τάση διαρροής του χάλυβα της διατομής
$\gamma_{MI}=1,00$	συντελεστής ασφαλείας έναντι απώλειας ευστάθειας
$W_y$	η ροπή αντίστασης της διατομής περί τον ισχυρό της άξονα, η οποία ισούται με $W_{el,y}$ για γωνιακές διατομές κατηγορίας 3 και με $W_{eff,y}$ για γωνιακά κατηγορίας 4

Ο Ευρωκώδικας 3, λοιπόν, δεν κάνει ιδιαίτερη μνεία στη συμπεριφορά των γωνιακών διατομών, τόσο γενικότερα, όσο και ειδικότερα σχετικά με την καμπτική τους καταπόνηση. Ως εκ τούτου, οι απαιτήσεις σχεδιασμού γωνιακών διατομών αναφορικά με την απλή κάμψη είναι οι προαναφερθέντες όπως συνοψίζονται στις σχέσεις (2.1),(2.2) και (2.3).

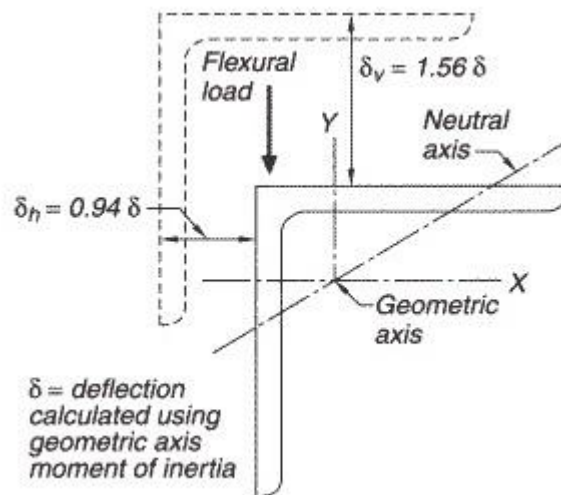
Όμως, η ευρεία χρήση τέτοιου τύπου διατομών στις κατασκευές, απαιτεί μια πιο ενδεδειγμένη προσέγγιση στην ακριβή γνώση της συμπεριφοράς τους, τόσο για την επιτυχή σχεδιάσή τους όσο και για την οικονομικότητα που δύναται να επιτευχθεί από τον ορθότερο τρόπο επιλογής και εκμετάλλευσής τους. Τέτοιες προσπάθειες διερεύνησης στο συγκεκριμένο πεδίο έχουν γίνει τις τελευταίες δύο δεκαετίες τόσο σε ερευνητικό επίπεδο με δημοσιεύσεις σε περιοδικά και συνέδρια [19, 42, 43], όσο και σε κανονιστικό επίπεδο από τον αμερικάνικο κανονισμό [4, 5]. Κοινή διαπίστωση των ευρωπαϊκών ερευνών αποτελεί η ανάγκη για αναθεώρηση του υπάρχοντος κανονιστικού πλαισίου που διέπει τη μεταχείριση των γωνιακών καθότι κυριαρχεί μια πολύ συντηρητική αντιμετώπιση αυτών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Αυτό έγκειται στον τρόπο κατάταξης των διατομών αυτών στις δυσμενέστερες κατηγορίες (3 και 4), πράγμα το οποίο δεν τις καθιστά ικανές να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους λόγω εμφάνισης τοπικού λυγισμού. Αυτός ο ενδεχομένως αυστηρός περιορισμός αμφισβητήθηκε από αρκετές έρευνες που δείχνουν περιθώρια ανάπτυξης της πλαστικής ροπής αντοχής τέτοιων διατομών [42, 43].

Ωστόσο, εκτός από την ανάγκη για βελτίωση του ισχύοντος ευρωπαϊκού κανονιστικού πλαισίου σχετικά με τις γωνιακές διατομές, θα ήταν δόκιμο από πλευράς κανονισμών να υπάρξει και ξεχωριστή αναφορά στη συμπεριφορά τους στις διάφορες μορφές καταπόνησης. Κάτι τέτοιο έχει υλοποιήσει ο αμερικάνικος οργανισμός μεταλλικών κατασκευών AISC, μέσω του [4] και του [5], κατορθώνοντας να διαλευκάνει αρκετά την κατανόηση της συμπεριφοράς των γωνιακών διατομών στις διάφορες μορφές έντασης.

## 2.2.2 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του αμερικάνικου κανονισμού AISC

Συγκεκριμένα στην περίπτωση της απλής κάμψης αυτών, σύμφωνα με τον AISC, γίνεται διαχωρισμός μεταξύ πλευρικά εξασφαλισμένων σε όλο το μήκος τους και μη γωνιακών. Αυτός ο διαχωρισμός αφορά τον τρόπο σχεδιασμού τους έναντι κάμψης, σύμφωνα με τον οποίο οι δοκοί διατομής μονού γωνιακού οι οποίες είναι πλευρικά εξασφαλισμένες επιτρέπεται να σχεδιάζονται έναντι κάμψης περί τους γεωμετρικούς άξονες των σκελών τους, από την άλλη οι μη πλευρικά εξασφαλισμένες οφείλουν να σχεδιάζονται για κάμψη περί των κυρίων αξόνων τους (εκτός αν υπάρχει σχετική ειδική πρόβλεψη). Ως εκ τούτου, για σχεδιασμό περί τους γεωμετρικούς άξονες των σκελών, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής (ροπές αδρανείας, ροπές αντίστασης, κ.α.) υπολογίζονται ως προς τους άξονες παράλληλα και κάθετα των σκελών του γωνιακού, ενώ στην άλλη περίπτωση περί των κυρίων αξόνων του που βρίσκονται υπό γωνία ως προς τους γεωμετρικούς. Το ίδιο συμβαίνει και με τα φορτία που δρουν στη διατομή και των οποίων η ένταση λογίζεται ως προς τους εκάστοτε άξονες. Η αξία αυτής της διαφοροποίησης έγκειται ακριβώς στη γεωμετρική ιδιαιτερότητα των γωνιακών διατομών να έχουν τους κύριους άξονές τους κατά διαφορετικές διευθύνσεις σχετικά με τους

γεωμετρικούς άξονες των δύο σκελών τους. Έτσι, σε μία μη εξασφαλισμένη πλευρικά δοκό τέτοιας μορφής, μία φόρτιση κατά τη διεύθυνση ενός απ' τους γεωμετρικούς άξονές της δεν τείνει να το κάμψει μόνο κατά τη διεύθυνση της φόρτισης, αλλά και περί τον ασθενή κύριο άξονά του, κατά τον οποίο προβάλλει τη μικρότερη αντίσταση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6 πιο κάτω. Συνεπώς, αυτό οδηγεί σε παραμόρφωση και κατά τους δύο γεωμετρικούς άξονες του γωνιακού. Γι αυτό το λόγο είναι αναγκαία μία ανάλυση των φορτίων κατά τη φορά των κυρίων αξόνων της διατομής, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατανόηση της συμπεριφοράς της δοκού.



Σχήμα 2.6: Παραμορφωμένη κατάσταση πλευρικά μη εξασφαλισμένου ισοσκελούς γωνιακού στην περίπτωση κάμψης του περί έναν εκ των γεωμετρικών του αξόνων [4]

Έχοντας λοιπόν ως οδηγό αυτό το διαχωρισμό, η ονομαστική καμπτική αντοχή ( $M_n$ ) ενός γωνιακού, σύμφωνα με τις διατάξεις του AISC, λογίζεται ως η μικρότερη απ' τις αντοχές του κατά τις εξής οριακές καταστάσεις: 1) διαρροής (πλαστική ροπή), 2) στρεπτοκαμπτικού (πλευρικού) λυγισμού και 3) τοπικού λυγισμού του θλιβόμενου σκέλους του.

- Διαρροή (πλαστική ροπή)

Η ονομαστική καμπτική αντοχή μιας γωνιακής διατομής κατά την πλήρη διαρροή της, ανεξαρτήτως του άξονα κάμψης και της πλευρικής -ή μη- εξασφάλισής της, ορίζεται ως:

$$M_n = 1,5 \cdot M_y \quad (2.6)$$

όπου  $M_y$  είναι η ροπή περί τον άξονα κάμψης κατά την πρώτη διαρροή της ακραίας θλιβόμενης ίνας της διατομής.

Δηλαδή ο AISC επιτρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό μία αυξημένη τιμή για τη ροπή αντοχής, πέραν της ελαστικής που υποδεικνύει ο Ευρωκώδικας 3. Μάλιστα παλαιότερα, ο συντελεστής αύξησης της ροπής διαρροής  $M_y$  ήταν μικρότερος-ίσος με 1,25- αλλά κρίθηκε συντηρητικός και αντικαταστάθηκε απ' τη σημερινή του τιμή. Βέβαια αυτή η ροπή είναι πάντα μικρότερη της ροπής πλήρους πλαστικοποίησης της διατομής καθώς ο συντελεστής σχήματος ( $W_{pl}/W_{el} = M_{pl}/M_{el}$ ) των γωνιακών διατομών είναι πάντοτε

μεγαλύτερος του 1,5, ενώ βασική προϋπόθεση για να αναπτυχθεί είναι να μην υπάρχουν προβλήματα αστάθειας του μέλους (είτε τοπικός είτε καθολικός λυγισμός).

- Στρεπτοκαμπτικός (πλευρικός) λυγισμός

Αυτό το φαινόμενο αφορά τις μη προστατευμένες έναντι πλευρικής εκτροπής δοκούς, οι οποίες υποβαλλόμενες σε κάμψη έχουν ένα μέρος της διατομής τους υπό θλίψη το οποίο καθίσταται επιρρεπές σε λυγισμό. Αναφορικά με την αντοχή των γωνιακών διατομών έναντι του φαινομένου του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, σύμφωνα με τον AISC αυτή εξαρτάται από τη σχέση της ελαστικής ροπής πλευρικού λυγισμού  $M_e$  ( $M_{cr}$  κατά Ευρωκώδικα 3) με τη ροπή διαρροής  $M_y$  της διατομής. Έτσι, διακρίνονται οι εξής δύο περιπτώσεις κατά τον υπολογισμό της ονομαστικής αντοχής μίας δοκού γωνιακής διατομής έναντι του φαινομένου του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού:

a) Όταν  $M_e \leq M_y$  :

$$M_n = \left( 0,92 - \frac{0,17 \cdot M_e}{M_y} \right) \cdot M_e \quad (2.7)$$

b) Όταν  $M_e > M_y$  :

$$M_n = \left( 1,92 - 1,17 \sqrt{\frac{M_y}{M_e}} \right) \cdot M_y \leq 1,5 \cdot M_y \quad (2.8)$$

όπου

ως ροπή  $M_y$  λαμβάνεται το 80% της ροπής διαρροής που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη ροπή αντίστασης ως προς τους γεωμετρικούς άξονες της διατομής η ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού  $M_e$ , για τα ισοσκελή γωνιακά<sup>1</sup>, προσδιορίζεται ανά περίπτωση ως εξής:

i) Κατά την κάμψη περί έναν από τους γεωμετρικούς άξονες της διατομής χωρίς καμία πλευρική υποστήριξη

a) για μέγιστη θλίψη στην ελεύθερη ακμή του σκέλους του γωνιακού (toe)

$$M_e = \frac{0,66 \cdot E \cdot b^4 \cdot t \cdot C_b}{L^2} \left( \sqrt{1 + 0,78 \cdot \left( \frac{L \cdot t}{b^2} \right)} - 1 \right) \quad (2.9)$$

<sup>1</sup> Ο AISC κάνει αναφορά και στον υπολογισμό της ελαστικής ροπής πλευρικού λυγισμού στην περίπτωση του *ανισοσκελούς γωνιακού*. Αυτή η περίπτωση σκόπιμα δεν αναφέρεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς αντικείμενό της αποτελεί η ενίσχυση ισοσκελούς γωνιακής διατομής, επομένως κρίθηκε πως μια περεταίρω αναφορά στην περίπτωση των ανισοσκελών γωνιακών περισσότερο θα δυσκόλευε παρά θα ευνοούσε την ανάγνωσή της.

b) για μέγιστο εφελκυσμό στην ελεύθερη ακμή του σκέλους του γωνιακού

$$M_e = \frac{0,66 \cdot E \cdot b^4 \cdot t \cdot C_b}{L^2} \left( \sqrt{1 + 0,78 \cdot \left( \frac{L \cdot t}{b^2} \right)} + 1 \right) \quad (2.10)$$

ii) Κατά την κάμψη περί έναν από τους γεωμετρικούς άξονες της διατομής με πλευρική στήριξη μόνο στο σημείο της μέγιστης ροπής κάμψης:

ως ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού  $M_e$  λαμβάνεται ως 1,25 φορές η υπολογισθείσα από τις κατά περίπτωση παραπάνω σχέσεις (2.9) και (2.10)

ως ροπή  $M_y$  λαμβάνεται η ροπή διαρροής της διατομής, υπολογισμένη σύμφωνα με τη ροπή αντίστασης περί τους γεωμετρικούς άξονες της

iii) Κατά την κάμψη περί τον ισχυρό κύριο άξονα του ισοσκελούς γωνιακού

$$M_e = \frac{0,46 \cdot E \cdot b^2 \cdot t^2 \cdot C_b}{L} \quad (2.11)$$

όπου

$E$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

$b$  το εξωτερικό πλάτος του θλιβόμενου σκέλους της γωνιακής διατομής

$t$  το πάχος του θλιβόμενου σκέλους της γωνιακής διατομής

$L$  το πλευρικά μη εξασφαλισμένο μήκος του στοιχείου

$C_b$  συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού εξαρτώμενος από τις συνθήκες φόρτισης και στήριξης και τη μορφή της διατομής. Η μέγιστη τιμή του για γωνιακές διατομές είναι 1,5 ενώ συντηρητικά επιτρέπεται να λαμβάνεται για όλες τις περιπτώσεις ως 1,0.

iv) Στην περίπτωση της κάμψης περί τον ασθενή κύριο άξονα του ισοσκελούς γωνιακού, η ονομαστική καμπτική αντοχή του καθορίζεται (α) από την οριακή κατάσταση της διαρροής -εξίσωση (2.6)- όταν τα ελεύθερα άκρα των σκελών του βρίσκονται υπό εφελκυσμό και (β) από την οριακή κατάσταση του τοπικού λυγισμού -βλέπε παρακάτω- όταν τα ελεύθερα άκρα των σκελών του βρίσκονται υπό θλίψη.

- Τοπικός λυγισμός σκέλους

Βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη αυτής της οριακής κατάστασης είναι η ελεύθερη ακμή ενός σκέλους της γωνιακής διατομής να βρίσκεται υπό θλίψη. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι ο AISC, σε αντίθεση με τον Ευρωκώδικα 3, δεν περιορίζει την κατάταξη ενός γωνιακού στο να είναι αποκλειστικά κατηγορίας 3 (semi-compact) ή 4 (slender), αλλά επιτρέπει να καταταγεί και στις υψηλότερες κατηγορίες κατάταξης, ανάλογα με το λόγο πλάτους προς πάχος των σκελών του.

Υπό αυτή την επισήμανση λοιπόν, διακρίνονται οι εξής τρεις περιπτώσεις ανάλογα με την κατάταξη της διατομής ενός γωνιακού:

- a) Για διατομές γωνιακών οι οποίες παρουσιάζουν μικρό λόγο πλάτους προς πάχος των σκελών τους ( $b/t \leq 0,54\sqrt{E/Fy}$ ) και ανήκουν στην υψηλότερη κατηγορία κατάταξης (compact sections) το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού δεν έχει επίπτωση.
- b) Για γωνιακά των οποίων τα σκέλη κατατάσσονται στην ενδιάμεση κατηγορία (non-compact legs), με ενδιάμεσο λόγο πλάτους προς πάχος των σκελών τους ( $0,54\sqrt{E/Fy} < b/t \leq 0,91\sqrt{E/Fy}$ ), η ονομαστική καμπτική αντοχή τους έναντι τοπικού λυγισμού δίνεται από τη σχέση:

$$M_n = F_y \cdot S_c \cdot \left( 2,43 - 1,72 \cdot \left( \frac{b}{t} \right) \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} \right) \quad (2.12)$$

- c) Για γωνιακές διατομές με λυγηρά σκέλη (slender), τα οποία παρουσιάζουν υψηλό λόγο πλάτους προς πάχος ( $b/t \geq 0,91\sqrt{E/Fy}$ ), η ονομαστική καμπτική αντοχή τους έναντι τοπικού λυγισμού λαμβάνεται ως:

$$M_n = F_{cr} \cdot S_c \quad (2.13)$$

όπου

$$F_{cr} = \frac{0,71 \cdot E}{\left( \frac{b}{t} \right)^2} \quad (2.14)$$

$F_y$  η τάση διαρροής του χάλυβα της διατομής

$b$  το εξωτερικό πλάτος του θλιβόμενου σκέλους της γωνιακής διατομής

$t$  το πάχος του θλιβόμενου σκέλους της γωνιακής διατομής

$S_c$  η ελαστική ροπή αντίστασης του θλιβόμενου μέρους της διατομής ως προς τον άξονα κάμψης. Για κάμψη ενός ισοσκελούς γωνιακού, χωρίς πλευρική εξασφάλιση, περί έναν εκ των γεωμετρικών του αξόνων, η τιμή του  $S_c$  πρέπει να λαμβάνεται ως το 80% της υπολογισμένης ως προς τους γεωμετρικούς της άξονες ροπής αντίστασης της διατομής

## 2.3 Συμπεριφορά έναντι θλίψης-Λυγισμός

Η θλίψη χαλύβδινων μελών είναι μία ιδιαίτερα κρίσιμη κατάσταση φόρτισης, λόγω του ότι στο ζήτημα της ισορροπίας εισέρχεται και το πρόβλημα της ευστάθειας του μέλους. Στα θλιβόμενα μέλη υπάρχει γενικά μια στάθμη του θλιπτικού φορτίου, υπό την οποία το μέλος χάνει την ευστάθειά του και λυγίζει πριν η διατομή του εξαντλήσει την αντοχή της σε θλίψη. Στη στάθμη αυτή θεωρείται πρακτικά ότι εξαντλείται και η αντοχή του μέλους, για τον προσδιορισμό της οποίας απαιτείται να ληφθούν υπόψη τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (μήκος, μορφή διατομή) όσο και οι συνθήκες στήριξής του.

### 2.3.1 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3

Όσον αφορά θλιβόμενα μέλη διατομής ισοσκελούς γωνιακού, η αντοχή τους σε αυτή την εντατική κατάσταση καθορίζεται από τις εξής τέσσερις οριακές καταστάσεις: 1) της θλιπτικής αντοχής της διατομής, 2) του καμπτικού λυγισμού του μέλους (flexural buckling), 3) του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού του μέλους (torsional-flexural buckling) και 4) του τοπικού λυγισμού ενός απ των σκελών του γωνιακού (local plate buckling). Το φαινόμενο του στρεπτικού λυγισμού του μέλους δεν αποτελεί συνθήκη αστοχίας για τις γωνιακές διατομές, καθώς όχι μόνο δεν αποτελεί φαινόμενο που απαντάται σε διατομές θερμής έλασης όπου η κρίσιμη τάση εξ αιτίας του καμπτικού λυγισμού υπό κανονικές συνθήκες είναι μικρότερη, αλλά επίσης πρόκειται για μια κατάσταση που αφορά διατομές στις οποίες το κέντρο βάρους και το κέντρο διάτμησης συμπίπτουν, πράγμα που δε συμβαίνει στα γωνιακά [10, 15, 28].

- Θλιπτική αντοχή διατομής

Η αντοχή σχεδιασμού  $N_{c,Rd}$  της διατομής ενός γωνιακού σε ομοιόμορφα επιβεβλημένη θλίψη, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, καθορίζεται ως εξής:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για γωνιακές διατομές κατηγορίας 3} \quad (2.15)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{για γωνιακές διατομές κατηγορίας 4} \quad (2.16)$$

όπου

$A$  η πλήρης διατομή

$A_{eff}$  η ενεργός διατομή

$\gamma_{M0} = 1,00$  συντελεστής ασφαλείας έναντι διαρροής

- Καμπτικός λυγισμός μέλους

Αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή αστάθειας θλιβόμενων μελών μεταλλικών κατασκευών. Η απώλεια της ευστάθειας του αρχικώς ευθύγραμμου μέλους εκδηλώνεται με μετάπτωσή του σε μία καμπυλωμένη μορφή, με κάμψη περί τον ισχυρό ή τον ασθενή άξονα της διατομής του μέλους, χωρίς την ταυτόχρονη εμφάνιση σχετικής στροφής των διατομών [1]. Η αντοχή σχεδιασμού  $N_{b,Rd}$  ενός θλιβόμενου μέλους διατομής γωνιακού, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, λαμβάνεται από τις σχέσεις:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{για γωνιακές διατομές κατηγορίας 3} \quad (2.17)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{για γωνιακές διατομές κατηγορίας 4} \quad (2.18)$$

όπου

$\chi$  μειωτικός συντελεστής που προσδιορίζεται με βάση την ανηγμένη λυγηρότητα  $\bar{\lambda}$  και την καμπύλη λυγισμού της υπό εξέταση διατομής (καμπύλη  $b$  για γωνιακά)

$\gamma_{M1} = 1,00$  συντελεστής ασφαλείας έναντι απώλειας ευστάθειας

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{η ανηγμένη λυγηρότητα για γωνιακές διατομές κατηγορίας 3} \quad (2.19)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{η ανηγμένη λυγηρότητα για γωνιακές διατομές κατηγορίας 4} \quad (2.20)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L_{cr}^2} \quad \text{το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού Euler}$$

- Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός θλιβόμενου μέλους

Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός είναι η μορφή αστάθειας ενός θλιβόμενου και/ή καμπτόμενου μέλους, κατά την οποία οι διατομές υπόκεινται, μετά το λυγισμό, σε στροφή περί το κέντρο διάτμησης και σε ταυτόχρονη μετατόπιση σε σχέση με τον αρχικός ευθύγραμμο διαμήκη άξονα του μέλους, ο οποίος παύει πλέον να είναι ευθύγραμμος μετά την παραμόρφωση [1]. Ο κίνδυνος αστοχίας λόγω του συγκεκριμένου φαινομένου είναι μεγάλος για ανοικτές διατομές λόγω της μικρής τους δυστρεψίας, ενώ είναι περιορισμένος για κλειστού τύπου διατομές.

Επομένως, μέλη γωνιακής διατομής, ως ανοικτού τύπου διατομές με κατεξοχήν πολύ μικρή δυστρεψία, είναι επιρρεπείς σε αυτή την μορφή αστάθειας. Κεντρικά θλιβόμενα τέτοια μέλη, των οποίων το κέντρο βάρους δε συμπίπτει με το κέντρο διάτμησης αυτού και είναι μονοσυμμετρικής διατομής, όπως τα γωνιακά, παρουσιάζουν αυτό το φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο εμφανίζεται στρεπτική παραμόρφωση της διατομής συνοδευόμενη από καμπτική μετατόπιση.

Όμως, παρά τη σημασία του φαινομένου, η οριακή αντοχή που συνδέεται με το στρεπτοκαμπτικό λυγισμό θλιβόμενου μέλους δεν μπορεί να εκτιμηθεί με μεγάλη ακρίβεια λόγω έλλειψης επαρκών πειραμάτων και αντίστοιχων αποτελεσμάτων ελέγχων. Για το λόγο αυτό, γίνεται γενικά αποδεκτό, ότι η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον καμπτικό λυγισμό μπορεί να επεκταθεί και στο στρεπτοκαμπτικό λυγισμό θλιβόμενων μελών, με την υπόθεση ότι η μείωση της αντοχής λόγω ατελειών, παραμενουσών τάσεων και πλαστικοποίησης, είναι παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις

Συνεπώς, η αντοχή σχεδιασμού έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού  $N_{b,Rd}$  ενός θλιβόμενου μέλους διατομής γωνιακού μπορεί να προσδιοριστεί σύμφωνα με τις σχέσεις (2.17) και (2.18) που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της αντίστοιχης αντοχής του θλιβόμενου μέλους έναντι καμπτικού λυγισμού, με τη διαφορά όμως ότι ο μειωτικός συντελεστής  $\chi$  αντικαθίσταται απ' τον  $\chi_{TF}$  ο οποίος προσδιορίζεται με βάση την ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μέλους έναντι θλίψης  $\bar{\lambda}_{TF}$  και την καμπύλη λυγισμού της υπό εξέταση διατομής (καμπύλη  $b$  για γωνιακά). Η ανηγμένη λυγηρότητα  $\bar{\lambda}_{TF}$  προσδιορίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις:



$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,TF}}} \quad \text{για γωνιακές διατομές κατηγορίας 3} \quad (2.21)$$

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr,TF}}} \quad \text{για γωνιακές διατομές κατηγορίας 4} \quad (2.22)$$

στις οποίες

$N_{cr,TF}$  είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, το οποίο για ισοσκελή γωνιακές διατομές, οι οποίες είναι συμμετρικές ως προς τον ισχυρό τους άξονα  $u$ , δίνεται από τη σχέση:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,u}}{2\beta} \left[ 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{u_0}{i_0}\right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,u}}} \right] \quad (2.23)$$

όπου

$$\beta = 1 - \left(\frac{u_0}{i_0}\right)^2 \quad \text{συντελεστής}$$

$$N_{cr,u} = \frac{\pi^2 \cdot EI_u}{L_{cr}^2} \quad \text{το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού Euler για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα } u \text{ της γωνιακής διατομής}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left( GI_t + \frac{\pi^2 \cdot EI_w}{L_T^2} \right) \quad \text{το ελαστικό κρίσιμο φορτίο στρεπτικού λυγισμού για μία θλιβόμενη ράβδο με απλές στρεπτικές στηρίξεις στα άκρα της}$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \quad \text{η πολική ακτίνα αδρανείας της διατομής ως προς το κέντρο διάτμησής της}$$

$$y_0, z_0, u_0 \quad \text{οι συντεταγμένες του κέντρου διάτμησης ως προς το κέντρο βάρους της πλήρους γωνιακής διατομής περί τον αντίστοιχο άξονα}$$

$$G \quad \text{το μέτρο διάτμησης του χάλυβα}$$

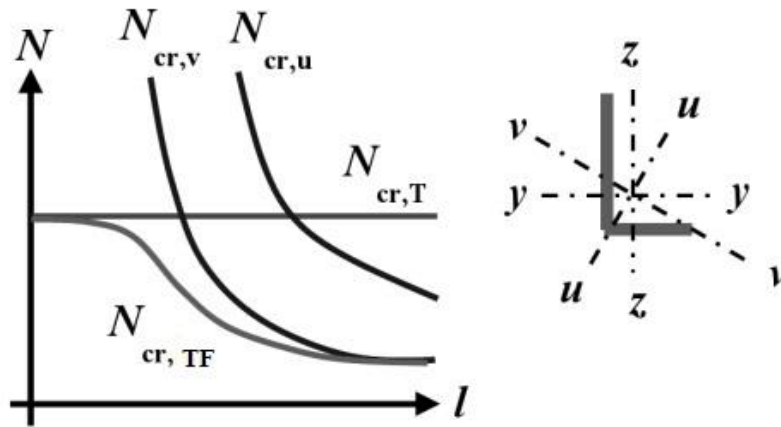
$$I_t, I_w \quad \text{οι σταθερές στρέψης και στρέβλωσης της διατομής}$$

$$i_y, i_z \quad \text{οι ακτίνες αδρανείας της διατομής περί τους κάθετους άξονες } y \text{ και } z \text{ αντίστοιχα}$$

$$L_T \quad \text{το μήκος λυγισμού έναντι στρέψης}$$

Στο γράφημα που ακολουθεί (Σχήμα 2.7) φαίνεται η κατανομή των αντοχών των γωνιακών διατομών στους διάφορους τύπους λυγισμού στους οποίους είναι επιρρεπείς ευρισκόμενα υπό θλίψη (καμπτικό, στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό) σε σχέση με το μήκος τους. Αυτό το γράφημα επιβεβαιώνει ότι σε θλιβόμενα μέλη γωνιακής διατομής, ανεξαρτήτως του μήκους αυτών, δεν είναι απαραίτητο να γίνεται έλεγχος έναντι στρεπτικού λυγισμού του μέλους, καθώς η αντοχή έναντι αυτού είναι πάντα μεγαλύτερη

τόσο απ' την αντίστοιχη αντοχή του έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού όσο και έναντι καμπτικού περί τον ασθενή άξονα της διατομής (v-v).



Σχήμα 2.7: Αντοχές γωνιακών διατομών έναντι των διαφόρων μορφών λυγισμού σε σχέση με το μήκος τους [28]

- Τοπικός λυγισμός σκέλους του γωνιακού

Ο τοπικός λυγισμός μέρους κάποιου σκέλους μιας γωνιακής διατομής είναι ένα σύνηθες φαινόμενο αστοχίας που απαντάται σε λεπτότοιχες διατομές κατηγορίας 3 ή 4, όπως είναι οι συγκεκριμένες. Η κρίσιμη ελαστική τάση  $\sigma_{cr}$  τοπικού λυγισμού σκέλους για τα ισοσκελή γωνιακά, προσδιορίζεται θεωρώντας το σκέλος ως μία πλάκα απλά εδραζόμενη στο σημείο σύνδεσης με το άλλο σκέλος και ελεύθερη κατά τις άλλες πλευρές της. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, το φορτίο που αντιστοιχεί σε αυτή την τάση αστοχίας, και αποτελεί την αντοχή του γωνιακού έναντι τοπικού λυγισμού, είναι το εξής:

$$N_{l,Rd} = \frac{k_{\sigma} \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} \cdot A \quad (2.24)$$

όπου

$k_{\sigma}$  συντελεστής κύρτωσης έναντι ορθών τάσεων που εξαρτάται απ' την κατανομή των ορθών τάσεων στο υπό εξέταση σκέλος και από τον τρόπο στήριξης αυτού

$E$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

$A$  το εμβαδό της ενεργού διατομής του γωνιακού

$\nu$  ο λόγος του Poisson

$b$  το μήκος του σκέλους του γωνιακού, μετρούμενο απ' το κέντρο διάτμησης μέχρι το ελεύθερο άκρο αυτού

$t$  το πάχος του σκέλους

### 2.3.2 Προσέγγιση σύμφωνα με τις διατάξεις του αμερικάνικου κανονισμού AISC

Αναφορικά με τον AISC, η θλιπτική αντοχή ενός μέλους διατομής γωνιακού καθορίζεται από τρεις πιθανές οριακές καταστάσεις αστοχίας αυτού. Πιο συγκεκριμένα, αυτή προσδιορίζεται από την αντοχή του μέλους σε καμπτικό λυγισμό, σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, και από την αντοχή έναντι τοπικού λυγισμού ενός θλιβόμενου σκέλους του γωνιακού. Ο αμερικάνικος κανονισμός δηλαδή, συγκριτικά με τον Ευρωκώδικα 3, κατά την μελέτη θλιβόμενων γωνιακών μελών δεν λαμβάνει καθόλου υπόψη του την αντοχή της διατομής έναντι θλίψης, θεωρώντας ότι πάντοτε θα είναι κρισιμότερος κάποιος από τους υπόλοιπους μηχανισμούς αστοχίας έναντι αστάθειας, και συνεπώς αυτός θα καθορίσει τη θλιβόμενη αντοχή του μέλους.

Στον καθορισμό της θλιβόμενης αντοχής τέτοιων μελών, σύμφωνα με τον AISC, σημαντική επίδραση έχει ο μειωτικός συντελεστής  $Q$  που αφορά την επίδραση του φαινομένου τοπικού λυγισμού για γωνιακά με λυγηρά σκέλη (slender-angle legs). Για μη λυγηρές διατομές (non-slender sections), όπου ο συντελεστής  $Q$  ισούται με 1,00 το φαινόμενο του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού έχει επίδραση για σχετικά κοντά τέτοια μέλη, αν και όπως έχει αποδειχθεί, το σφάλμα από την τελείως παράληψη του φαινομένου αυτού, δεν είναι σημαντικό [18]. Για το λόγο αυτό, δεν απαιτείται ιδιαίτερη αναφορά αυτού του φαινομένου σε τέτοιου είδους διατομές μονού γωνιακού.

Λόγω του ότι η αντοχή τέτοιων μελών σύμφωνα με τον αμερικάνικο κανονισμό καθορίζεται από την τιμή του μειωτικού συντελεστή  $Q$ , είναι δόκιμο να παρουσιαστεί ο τρόπος καθορισμού αυτού πριν από τον προσδιορισμό της αντοχής. Ο μειωτικός συντελεστής τοπικού λυγισμού  $Q$ , εξαρτάται από την κατηγορία κατάταξης<sup>2</sup> της διατομής, και λαμβάνει τις εξής ανά περίπτωση τιμές:

$$\text{i) όταν } \frac{b}{t} \leq 0,446 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ (compact section) :}$$

$$Q = 1,00 \quad (2.25)$$

$$\text{ii) όταν } 0,446 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{b}{t} < 0,91 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ (non-compact section) :}$$

$$Q = 1,34 - 0,761 \cdot \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (2.26)$$

---

<sup>2</sup> Οι διατομές σύμφωνα με τον AISC ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη λυγηρότητά τους. Στην πιο ισχυρή κατηγορία, αυτή των «compact sections», ανήκουν διατομές ικανές να αναπτύξουν πλήρη πλαστική συμπεριφορά, με επαρκή στρωφική ικανότητα (αντίστοιχη με την κατηγορία 1 της κατάταξης κατά Ευρωκώδικα). Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή των «non-compact sections», η οποία χαρακτηρίζει διατομές που μπορούν να αναπτύξουν μερική διαρροή υπό θλίψη πριν την εκδήλωση τοπικού λυγισμού, χωρίς όμως να είναι ικανές να φτάσουν το επίπεδο της πλήρους πλαστικοποίησης (κατηγορία 3 κατά Ευρωκώδικα). Τελευταία κατηγορία είναι αυτή των «slender-element sections», όπου ανήκουν διατομές που αστοχούν λόγω ελαστικού λυγισμού πριν αναπτύξουν την τάση διαρροής τους (κατηγορία 4 κατά Ευρωκώδικα).

iii) όταν  $\frac{b}{t} \geq 0,91 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  (slender-element section) :

$$Q = \frac{0,534 \cdot E}{F_y \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (2.27)$$

όπου

$b$  το πλήρες πλάτος του σκέλους του ισοσκελούς γωνιακού

$t$  το πάχος της γωνιακής διατομής

$E$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

$F_y$  η τάση διαρροής του χάλυβα της διατομής

Η αντοχή σχεδιασμού ενός θλιβόμενου μέλους γωνιακής διατομής είναι ίση με την ονομαστική του,  $P_n$ , πολλαπλασιασμένη με έναν μειωτικό συντελεστή ασφαλείας για θλίψη,  $\phi_c$ <sup>3</sup>, ο οποίος για γωνιακά ισούται με 0,90. Η ονομαστική αντοχή του,  $P_n$ , λαμβάνεται σύμφωνα με τη σχέση  $P_n = A_g \cdot F_{cr}$ , όπου  $A_g$  η καθαρή διατομή του μέλους και  $F_{cr}$  η κρίσιμη τάση τοπικού λυγισμού του μέλους, η οποία καθορίζεται ανά περίπτωση ως κάτωθι:

a) Για τιμές του όρου  $\lambda_c \sqrt{Q} \leq 1,5$ :

$$F_{cr} = Q \cdot (0,658)^{2-\lambda_c^2} \quad (2.28)$$

b) Για τιμές του όρου  $\lambda_c \sqrt{Q} > 1,5$ :

$$F_{cr} = \left[ \frac{0,877}{\lambda_c^2} \right] \cdot F_y \quad (2.29)$$

όπου

$$\lambda_c = \frac{K \cdot L}{r \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}}$$

$K$  συντελεστής μήκους επιρροής λυγισμού με τιμές ανάλογα με τη στήριξη του μέλους

$L$  το μήκος του πλευρικά απροστάτευτου θλιβόμενου μέλους

$r$  η ακτίνα αδρανείας περί τον άξονα λυγισμού του μέλους γωνιακής διατομής

$\pi$  η γνωστή σταθερά, ίση με 3,14 κατά προσέγγιση

$Q$  ο μειωτικός συντελεστής τοπικού λυγισμού που προσδιορίστηκε προηγουμένως

$F_y$  η τάση διαρροής του χάλυβα της διατομής

<sup>3</sup> Ο συντελεστής ασφαλείας για φαινόμενα θλίψης  $\phi_c$  αυξήθηκε, από 0,85 στον AISC LRFD για όλου του τύπου τις διατομές, σε 0,90 για διατομές μορφής μονού γωνιακού, καθώς απεδείχθη ότι η συγκεκριμένη τιμή παρέχει ισοδύναμο βαθμό αξιοπιστίας (Galambos, 1992).

## **3 Ο μέχρι τώρα ρόλος των σύνθετων υλικών στην ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών**

### **3.1 Εισαγωγή**

Μία πολύ συνηθισμένη απαίτηση με την οποία έρχονται αντιμέτωπες –ιδίως τις τελευταίες δεκαετίες- οι κτιριακές κατασκευές, ανεξαρτήτως του υλικού απ' το οποίο είναι κατασκευασμένες, είναι η ανάγκη για ενίσχυσή τους. Αυτή η απαίτηση προκύπτει από διάφορους και ποικίλους λόγους. Απ' τη μία λόγω της χειροτέρευσης της κατάστασής τους ως αποτέλεσμα της γήρανσης της κατασκευής και των επιδράσεων δυσμενών καταστάσεων φόρτισης, όπως ο σεισμός ή η πυρκαγιά, που εξασθενούν τις αντοχές της, και από την άλλη λόγω των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων στις αντοχές αυτών, είτε εξ αιτίας ανάγκης ανάληψης δυσμενέστερων φορτίων είτε εξ αιτίας της αναπόφευκτης εξέλιξης των κανονισμών σχεδιασμού.

Αυτή η ανάγκη, λοιπόν, για αύξηση της αντοχής μιας υπάρχουσας κατασκευής, δύναται να αντιμετωπιστεί με δύο τρόπους: με πλήρη αντικατάσταση όποιων εκ των μελών της απαιτούνται ή με την κατάλληλη ενίσχυση αυτών χωρίς την αντικατάστασή τους. Γενικά, τόσο οικονομικά όσο και από θέμα χρόνου, η λύση της ενίσχυσης υφιστάμενων μελών υπερτερεί της αντικατάστασής τους με νέα. Στις μεταλλικές κατασκευές, οι συνήθεις τεχνικές ενίσχυσης βασίζονται στην εφαρμογή χαλύβδινων ελασμάτων-πλακών στις πλευρές του μέλους όπου απαιτείται ενίσχυση. Η εφαρμογή αυτών πραγματοποιείται μέσω κοχλίωσης, μέσω συγκόλλησης ή μέσω επικόλλησής τους με ειδική κόλλα (συνήθως εποξειδική) στην εκάστοτε επιφάνεια.

Αυτού του τύπου ο τρόπος ενίσχυσης, όμως, μοιάζει να έχει αρκετά μειονεκτήματα και δυσκολίες στην εφαρμογή του. Τα χαλύβδινα ελάσματα προσθέτουν περεταίρω φορτία στην κατασκευή, στοιχείο που οφείλει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό, ενώ επίσης είναι ευαίσθητα στα φαινόμενα της διάβρωσης και της κόπωσης. Πέρα από αυτό, σε πολλές περιπτώσεις είναι πιθανό να υπάρχει δυσκολία στη συγκόλληση της μεταλλικής ενίσχυσης στο προς ενίσχυση υπόστρωμα (για συγκόλληση σε επιφάνεια χυτοσιδήρου για παράδειγμα), ενώ στην περίπτωση κοχλιωτής σύνδεσης αυτής δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός της απομείωσης της διατομής κατά τη διάνοιξη των απαραίτητων οπών.

Όλα αυτά καθιστούν σαφή την ανάγκη για αναζήτηση καλύτερων λύσεων στον τρόπο ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών, σε μια προσπάθεια εξεύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού απόδοσης-ευκολίας τοποθέτησης-κόστους. Έτσι, τα τελευταία 30 χρόνια, έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στις κατασκευές σύνθετα υλικά από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες σε θερμοσκληραινόμενη ρητίνη (μήτρα). Αυτή η ομάδα σύνθετων υλικών είναι γνωστά ως Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)-Fiber Reinforced Polymer composites (FRP) και η εφαρμογή τους ως μέσο ενίσχυσης γίνεται επικολλώντας τα μέσω ειδικής κόλλας-ρητίνης, συνήθως εποξειδικής. Η χρήση αυτού του τύπου σύνθετων υλικών σαν μορφή ενίσχυσης υφιστάμενων μελών παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τόσο από άποψη μηχανικών χαρακτηριστικών και αντοχών όσο και από άποψη ευκολίας στην εφαρμογή τους. Ενδεικτικά, τα ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ υψηλό λόγο αντοχής-προς-βάρος, αρκετά υψηλότερο από αυτόν του χάλυβα, ενώ παράλληλα είναι εξαιρετικά ανθεκτικά (αν όχι τελείως ανεπηρέαστα) στο φαινόμενο της

διάβρωσης καθώς και πολύ εύκολα διαχειρίσιμα, χωρίς την απαίτηση ειδικών εξοπλισμών για την τοποθέτησή τους.

Παρ' όλα αυτά, η εφαρμογή τους παρατηρείται κυρίως σε στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος, με ολοένα μάλιστα αυξανόμενη χρήση. Αντιθέτως, η χρήση τους ως μέσο ενίσχυσης στον τομέα των μεταλλικών κατασκευών είναι πιο πρόσφατη και συνεπώς πιο περιορισμένη. Αν και η μέχρι τώρα έρευνα και εφαρμογή τους σε χαλύβδινα στοιχεία παρουσιάζει πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα, δεν έχει συνταχθεί ακόμα κάποιο ευρύτερα αποδεκτό κανονιστικό πλαίσιο -τύπου Ευρωκώδικα- παγκοσμίως, σε αντίθεση με τον κλάδο του ωπλισμένου σκυροδέματος στον οποίο έχουν συνταχθεί σχεδιαστικοί κανονισμοί, όπως είναι ο αμερικάνικος ACI440.2R-08, ο ιαπωνικός JSCE 2001 και ο καναδικός ISIS Design Manual No.4, ενώ από ευρωπαϊκής πλευράς έχουν εκδοθεί μόνο ορισμένα βοηθητικά σχεδιαστικά εγχειρίδια όπως τα fib Bulletin No.14 και No.35, και το ιταλικό CNR-DT 200 R1/2013. Η μέχρι σήμερα όμως πρόοδος των εφαρμογών τους μας προϊδεάζει πως πολύ σύντομα θα δημιουργηθούν οι απαραίτητες διατάξεις για τη σύνταξη ενός κανονιστικού πλαισίου όσον αφορά την ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών από ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά (FRP). Εξάλλου, αντίστοιχα σχεδιαστικά βοηθητικά εγχειρίδια έχουν ήδη δημιουργηθεί, όπως είναι το ιταλικό CNR-DT 202/2005, τα βρετανικά CIRIA 2004 και ICE 2001, και το αμερικάνικο των Schnerch et al. (2007).

## **3.2 Σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών**

### **3.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά-Σύντομη ιστορική αναδρομή**

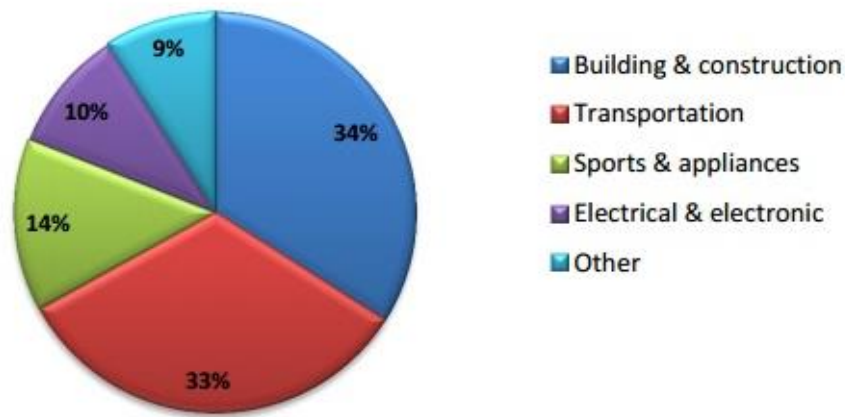
Με τον όρο σύνθετα υλικά αποδίδεται ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων μακροσκοπικά διακριτών υλικών, τα οποία υπό συνεργασία δημιουργούν ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου σύνθετου υλικού διαφέρουν από τις ιδιότητες του καθενός εκ των συστατικών του, ως αποτέλεσμα του συνδυασμού τους. Το κίνητρο που οδήγησε τον άνθρωπο στη δημιουργία σύνθετων υλικών ήταν η ανάγκη για βέλτιστη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων δύο ή περισσότερων διακριτών υλικών προς επίτευξη ενός νέου πιο ισχυρού με λιγότερες αδυναμίες. Ιστορικά άλλωστε, η χρήση τέτοιου είδους υλικών στις κατασκευές χρονολογείται πολλές δεκαετίες πριν, αν σκεφτεί κανείς ότι το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό, το ωπλισμένο σκυρόδεμα, ανήκει σε αυτή την κατηγορία, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος και του χάλυβα.

Βέβαια, με την πάροδο των χρόνων η τεχνολογία αναπτύσσεται συνεχώς, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στον τρόπο αντιμετώπισης των διαφόρων προβλημάτων του ανθρώπου. Έτσι, στην επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού έχουν απορροφηθεί από τα τέλη του περασμένου αιώνα νέα υλικά, σε μια προσπάθεια επίτευξης καλύτερων αποτελεσμάτων εκεί όπου τα συμβατικά υλικά αποτυγχάνουν. Μεταξύ των νέων αυτών προϊόντων κυρίαρχη θέση κατέχουν τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (fiber reinforced polymers) –εν συντομία ΙΟΠ (FRP)- τα οποία αποτελούνται από ισχυρές ίνες κάποιου υλικού εμποτισμένες με ειδική ρητίνη (συνήθως εποξειδική), η οποία αποτελεί τη μήτρα του νέου παραγόμενου υλικού. Αυτού του είδους τα υλικά, αν και πολύ πρόσφατα στον κλάδο των κατασκευών έργων πολιτικού μηχανικού, χρησιμοποιούνται κατά κόρων σε άλλους κλάδους εδώ και πολλές δεκαετίες. Ο συνδυασμός του χαμηλού τους βάρους με την εξαιρετικά υψηλή αντοχή και δυσκαμψία τους, καθώς επίσης και η ανθεκτικότητά τους έναντι διάβρωσης και κόπωσης συνετέλεσαν ώστε να πρωταγωνιστήσουν στους κλάδους της αεροναυπηγικής, της ναυσιπλοΐας και της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπως ακόμη και σε διαστημικές εφαρμογές. Ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης τους σε αυτούς τους κλάδους φαίνονται ακολούθως στο Σχήμα 3.1.

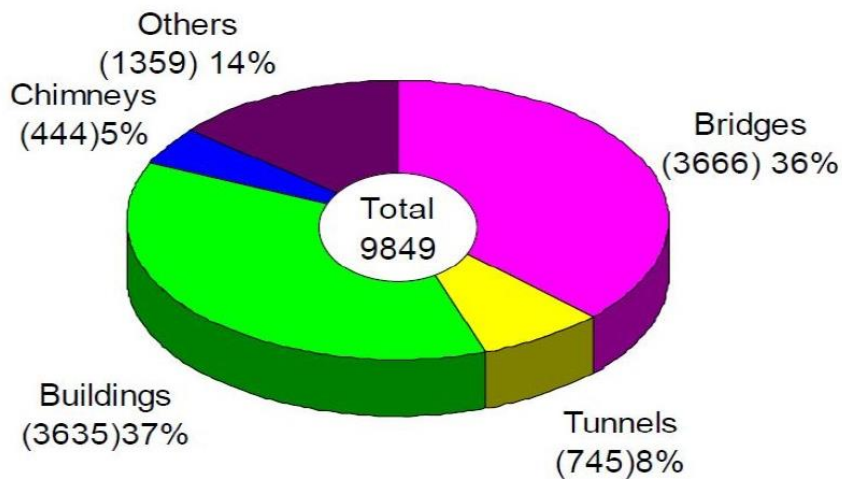


Σχήμα 3.1: Παραδείγματα χρήσης σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή σε διάφορους τεχνολογικούς κλάδους

Η αρχή για την ένταξη αυτής της νέας τεχνολογίας στον τομέα των έργων πολιτικού μηχανικού έγινε από πλειάδα ερευνητών από όλο τον κόσμο, οι οποίοι στα πλαίσια διάφορων ερευνητικών προγραμμάτων, δοκίμασαν να αξιοποιήσουν τα ΙΟΠ σύνθετα υλικά στον τομέα των κατασκευών είτε για την όπλιση και προέντασή τους είτε για την ενίσχυση αυτών (αρχικά για κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα ή από άοπλη τοιχοποιία). Τα αποτελέσματα αυτών των προσπαθειών αποδείχθηκαν εξαιρετικά αισιόδοξα και είχαν ως αποτέλεσμα μία πραγματικά εντυπωσιακή ανάπτυξη της μεθόδου ενίσχυσης κατασκευών με ΙΟΠ, ενώ η πρώτη ευρείας κλίμακας εφαρμογή της αφορά την ενίσχυση δύο χιλιάδων βάρων γεφυρών στην περιοχή Yolo, δυτικά του Sacramento, πρωτεύουσας της California, το 1998. Η συγκεκριμένη προσπάθεια μάλιστα, στέφθηκε με απόλυτη επιτυχία σε αξιοσημείωτα μικρό χρονικό διάστημα και με ελάχιστο κόστος εργατικού δυναμικού. Γρήγορα λοιπόν η χρήση τους επεκτάθηκε στην ενίσχυση πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο στις ΗΠΑ, όπως δείχνει το γράφημα στο Σχήμα 3.2, όσο και σε ολόκληρο τον κόσμο. Τα τεχνικά έργα στα οποία παρατηρείται εφαρμογή τους ποικίλουν, όπως φαίνεται στο γράφημα του Σχήματος 3.3. Χαρακτηριστικό διαπιστευτήριο της επιτυχίας της μεθόδου αποτελεί άλλωστε το γεγονός ότι στην Ιαπωνία, χώρα με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή στον τομέα των κατασκευών, αυξήθηκε σημαντικά την περίοδο 1992-1995, και ειδικά μετά το σεισμό του Hyogoken-Nangu το 1995 κατά 500%. Στη χώρα μας, εφαρμογές σύνθετων υλικών σε δραστηριότητες του κλάδου του πολιτικού μηχανικού αναφέρονται από τις αρχές του 1990 (Χαλκίδα) και εξαπλώθηκαν ιδιαίτερα μετά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999 [3].



Σχήμα 3.2: Γράφημα απεικόνισης των ποσοστών χρήσης των ΙΟΠ στους διάφορους κλάδους στις ΗΠΑ, το 2005 [32]



Σχήμα 3.3: Ποσοστά εφαρμογής ΙΟΠ από ίνες άνθρακα στα διάφορα τεχνικά έργα στην Ιαπωνία, κατά το χρονικό διάστημα 1987-2003

Παρά την σχετικά πρόσφατη ένταξη των ΙΟΠ στον κλάδο του πολιτικού μηχανικού και την απουσία κανονιστικού πλαισίου για αυτά, τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών, σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους ενίσχυσης, είναι πολλά και ιδιαίτερα σημαντικά [3]:

- Η προετοιμασία που απαιτείται στο εργοτάξιο για την εφαρμογή τους είναι ελάχιστη, ενώ η εκκένωση του χώρου δεν είναι αναγκαία.
- Η προετοιμασία των επιφανειών των προς ενίσχυση στοιχείων, όπως και η εφαρμογή των σύνθετων υλικών, είναι απλή και σύντομη.
- Οι διαστάσεις όπως και τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του ενισχυόμενου δομικού στοιχείου παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητα, λόγω του πολύ μικρού πάχους του σύνθετου υλικού.
- Το βάρος των σύνθετων υλικών είναι πολύ μικρό (χαμηλή πυκνότητα υλικού), πράγμα που σημαίνει ότι όχι μόνο δεν προσθέτει επιμέρους φορτία στην

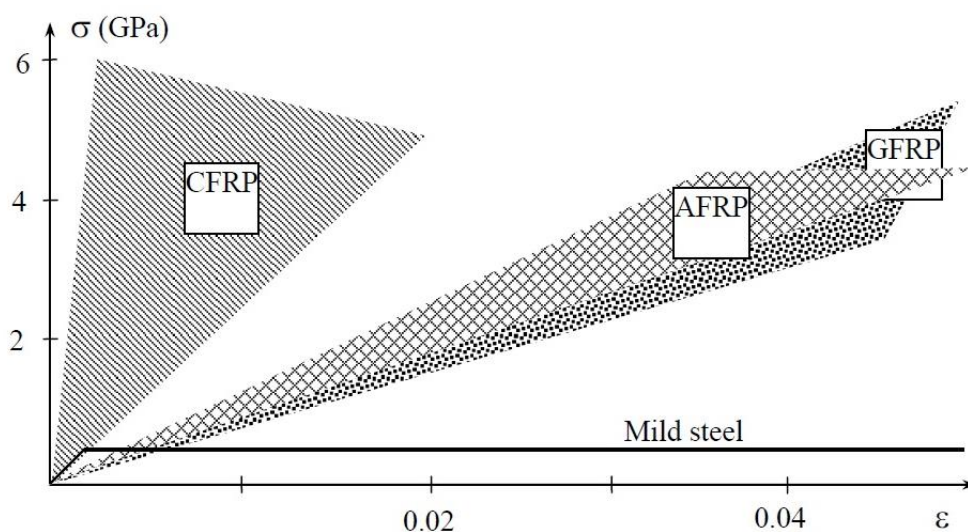


κατασκευή-στοιχείο, αλλά ούτε απαιτείται βαρύς ή ειδικός εξοπλισμός για την τοποθέτησή του.

- Η ενίσχυση με σύνθετα υλικά είναι δυνατή ακόμα και σε περιπτώσεις που υπάρχει περιορισμός του χώρου εργασίας (π.χ. υποστυλώματα σε μεσοτοιχία).
- Τα σύνθετα υλικά μπορούν να επιχριστούν και να χρωματιστούν σύμφωνα με τις αισθητικές απαιτήσεις του έργου.
- Τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ΙΟΠ παρουσιάζουν υψηλή χημική αδράνεια και είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση.
- Τα ΙΟΠ παρουσιάζουν εξαιρετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως μεγάλη εφελκυστική αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας, οι τιμές των οποίων καθορίζονται από το υλικό των ινών αυτού (Σχήμα 3.4).
- Τα ΙΟΠ είναι διαθέσιμα σε κάθε μήκος, ενώ είναι και πολύ εύκολα διαχειρίσιμα στη διαδικασία της ενίσχυσης.

Βέβαια, δεν υπάρχουν μόνο θετικά στοιχεία στη χρήση αυτού του τύπου των υλικών, αλλά παρατηρούνται και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή του συγκεκριμένου τρόπου ενίσχυσης. Αυτά είναι:

- Η ψαθυρή κατά το πλείστον συμπεριφορά τους λόγω της μη πλαστικότητας των ινών (γραμμικά ελαστικός κλάδος τάσης-παραμόρφωσης μέχρι τη θραύση του υλικού).
- Η ευαισθησία τους στις υψηλές θερμοκρασίες, αφού η ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 200°C.
- Το υψηλό κόστος κατασκευής τους.
- Η ελλιπής ακόμη γνώση στο σχεδιασμό με τέτοιου είδους υλικά.
- Η ιδιαίτερη προσοχή που πρέπει να δίνεται κατά την εφαρμογή τους, καθώς συνιστάται να γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό.
- Η δυσκολία στην ανακύκλωση σύνθετων υλικών θερμοσκληραινόμενης μήτρας, όπως είναι τα περισσότερα ΙΟΠ.

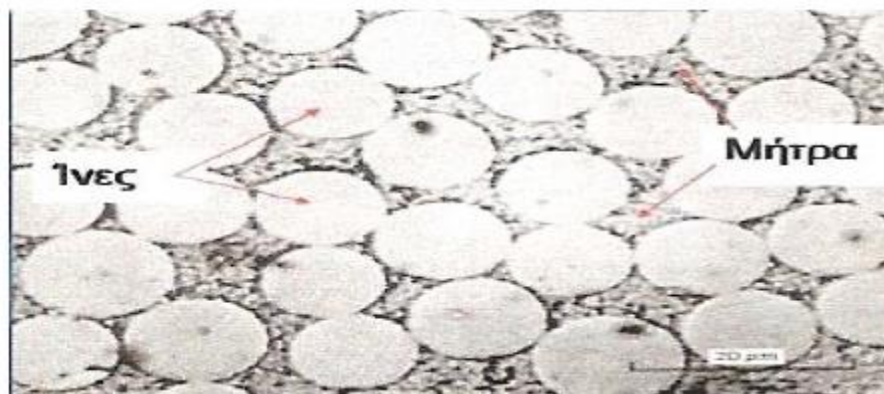


Σχήμα 3.4: Εφελκυστικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης διαφόρων τύπου ΙΟΠ με ίνες τοποθετημένες σε μία διεύθυνση και σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά του χάλυβα [17]

### 3.2.2 Είδη ινοπλισμένων πολυμερών, χαρακτηριστικά των επιμέρους συστατικών τους και τρόποι κατασκευής

Όπως ήδη προαναφέρθηκε προηγουμένως, τα ινοπλισμένα πολυμερή (fiber reinforced polymers), ή εν συντομία ΙΟΠ (FRP), ανήκουν στην κατηγορία των σύνθετων υλικών, είναι δηλαδή το αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο ή περισσότερων ξεχωριστών υλικών. Σε ένα τυπικό σύστημα ενίσχυσης με ΙΟΠ, στο οποίο εστιάζεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, τα συστατικά στοιχεία που το αποτελούν είναι τρία: (α) ίνες υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας, (β) παχύρρευστη θερμοσκληραινόμενη πολυμερική *μήτρα* και (γ) *κόλλα σύνδεσης* του σύνθετου υλικού με το προς ενίσχυση δομικό στοιχείο. Στη μορφή του παραγόμενου σύνθετου υλικού, τόσο η μήτρα όσο και οι ίνες διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, ενώ παράλληλα δημιουργούν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί από κανένα από τα υλικά αυτά όταν δρα μόνο του. Βέβαια, λόγω του ότι οι ίνες παρουσιάζουν ανισοτροπική συμπεριφορά, σε αντίθεση με την ισοτροπική της μήτρας, ο τρόπος προσανατολισμού τους στη μορφή του παραγόμενου σύνθετου υλικού έχει μεγάλη σημασία και καθορίζει τη συμπεριφορά του, με σαφώς καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Αυτή η ανισοτροπική συμπεριφορά δίνει στο μελετητή τη δυνατότητα να διευθετήσει κατά τέτοιο τρόπο τις στρώσεις του σύνθετου υλικού έτσι ώστε να ενισχύσει το μέλος στη διεύθυνση ανάπτυξης των υψηλότερων τάσεων.

Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή διατίθενται στο εμπόριο με διάφορους τρόπους. Οι πιο συνηθισμένοι είναι είτε υπό μορφή εύκαμπτων πλεκτών υφασμάτων πάχους της τάξεως των 0,1-0,5 mm, με ίνες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις, είτε υπό μορφή προεμποτισμένων δύσκαμπτων ελασμάτων (λωρίδων) ινών τα οποία έχουν πάχη της τάξης μερικών χιλιοστών (1-5 mm) και τα οποία απλά επικολλούνται στο προς ενίσχυση δομικό στοιχείο. Υπό τη μορφή υφάσματος, δηλαδή, απαντάται το συστατικό των ινών του τελικού σύνθετου υλικού, με έτοιμη όμως την πλέξη και ευθυγράμμισή τους σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Τα υφάσματα τοποθετούνται στο στοιχείο που πρόκειται να ενισχυθεί, κατά την επιθυμητή διεύθυνση και στο μήκος που απαιτείται. Επικολλούνται στην προς ενίσχυση επιφάνεια μέσω ειδικής κόλλας, συνήθως ρητίνης, και ο εμποτισμός τους με τη μήτρα του σύνθετου υλικού γίνεται επί τόπου, ενώ ο αριθμός των στρώσεων που θα εφαρμοστούν δεν περιορίζεται παρά μόνο από τον σχεδιασμό, επικολλώντας τη μία πάνω στην άλλη μέσω της μήτρας (ρητίνη). Αντιθέτως, η μορφή των ελασμάτων-λωρίδων αποτελεί ένα έτοιμο προεμποτισμένο ΙΟΠ το οποίο είναι έτοιμο προς επικόλληση στην επιφάνεια που πρόκειται να ενισχυθεί.



Σχήμα 3.5: Υπό μεγέθυνση απεικόνιση των διακριτών συστατικών υλικών που απαρτίζουν ένα ινοπλισμένο πολυμερές σύνθετο υλικό (ίνες και μήτρα)

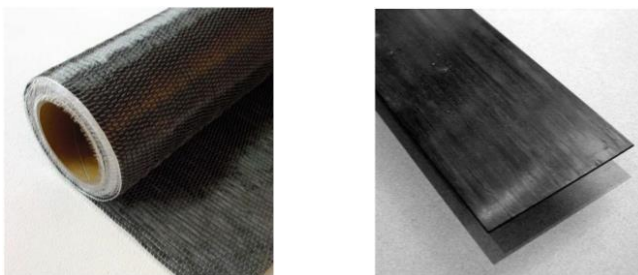
➤ Ίνες ινοπλισμένων πολυμερών

Οι ίνες είναι το στοιχείο που παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού, καθώς είναι αυτές που παραλαμβάνουν και μεταφέρουν τα ασκούμενα φορτία, και συνεπώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους είναι αυτά που καθορίζουν κατά κύριο λόγο τις ιδιότητες του παραγόμενου τελικού υλικού. Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι το πολύ χαμηλό τους βάρος, η μεγάλη δυσκαμψία και η μεγάλη εφελκυστική αντοχή που παρουσιάζουν. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα υλικά παρουσιάζουν πολύ καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά υπό τη μορφή ινών απ' ό,τι στη συμπαγή ακατέργαστη μορφή τους. Αυτό οφείλεται στην προνομιακή κατεύθυνση των μορίων κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών όπως και λόγω του μειωμένου πλήθους ατελειών που παρουσιάζονται σε μία ίνα, σε αντίθεση με το ακατέργαστο υλικό [2].

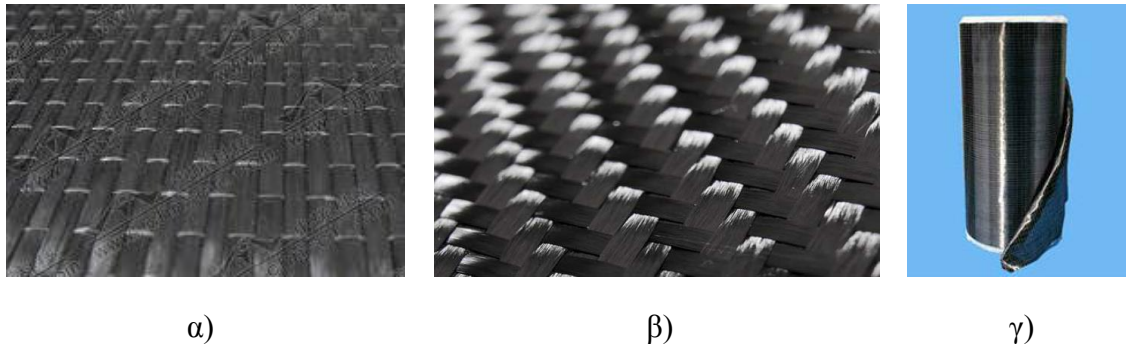
Οι ίνες χρησιμοποιούνται ως οπλισμός σε ένα σύνθετο υλικό και μπορούν να παρατάσσονται είτε σε συνεχή (continuous) είτε σε ασυνεχή (chopped) μορφή. Στην περίπτωση των ΙΟΠ όμως, τοποθετούνται πάντα υπό συνεχή μορφή με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Η διάμετρος μιας ίνας είναι της τάξης των 5-25 μm, και ανάλογα με την τοποθέτησή τους μπορούν να χαρακτηρίζονται ως μονής, διπλής ή ακόμη και πολλαπλής κατεύθυνσης. Παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι το σημείο της αστοχίας του υλικού, χωρίς την εμφάνιση σημείου διαρροής και μετελαστικού κλάδου.

Οι ίνες των σύνθετων υλικών διατίθενται στο εμπόριο σε διάφορες μορφές και κατά ποικίλους τρόπους τοποθέτησης και προσανατολισμού. Απαντώνται συνήθως ως δέσμες ινών, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με τον τρόπο προσανατολισμού τους και πλέξης. Έτσι, υπάρχουν ασυνεχείς ίνες τυχαίας διάταξης, προσανατολισμένες κοντές ίνες, συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης, διασταυρούμενες υπό γωνία 90° ίνες, ακόμη και πλέξεις ινών μονής, διπλής ή και πολλαπλών διαστάσεων. Επιπροσθέτως, υπάρχει η δυνατότητα διάθεσής τους στο εμπόριο είτε υπό μορφή εύκαμπτων πλεκτών υφασμάτων σε πάχη δέκατων του χιλιοστού, με ίνες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις, είτε ακόμη και υπό μορφή προεμποτισμένων δύσκαμπτων ελασμάτων πάχους μερικών χιλιοστών όπου απλά επικollούνται μετέπειτα στο προς ενίσχυση δομικό στοιχείο (Σχήμα 3.6).

Στον κλάδο των ενισχύσεων των κατασκευών, συνήθως απαντώνται υπό μορφή υφασμάτων, ποικίλων διαστάσεων, τα οποία διατίθενται τυλιγμένα σε ρολά και με πλέξεις ινών ανάλογα τη χρησιμότητά του. Υπάρχουν υφάσματα με πλέξεις από δέσμες ινών μονής διεύθυνσης, δύο ή και τριών διευθύνσεων, ενώ τελευταία παρατηρούνται και υβριδικά υφάσματα τριών διαστάσεων. Τυπικές μορφές υφασμάτων ινών, μονής και διπλής κατεύθυνσης, απεικονίζονται στο Σχήμα 3.7. Τα υφάσματα τοποθετούνται στο στοιχείο που πρόκειται να ενισχυθεί, κατά την επιθυμητή διεύθυνση και στο μήκος που απαιτείται. Επικollούνται στην προς ενίσχυση επιφάνεια μέσω ειδικής κόλλας, συνήθως ρητίνης, ενώ ο αριθμός των στρώσεων που θα εφαρμοστούν δεν περιορίζεται παρά μόνο από τον σχεδιασμό, επικollώντας τη μία πάνω στην άλλη.



Σχήμα 3.6: Εμπορική μορφή ινών στην περίπτωση εύκαμπτου υφάσματος (αριστερά) και δύσκαμπτου προεμποτισμένου ελάσματος (δεξιά)



Σχήμα 3.7: Τυπικές μορφές υφασμάτων από ίνες (α) μονής και (β) διπλής κατεύθυνσης, καθώς και (γ) η μορφή ενός ρολού υφάσματος ινών σύμφωνα με το οποίο εμφανίζονται στο εμπόριο

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι ίνες από γυαλί (glass fibers), άνθρακα (carbon fibers) ή αραμιδίο (aramid/Kevlar fibers) και πρέπει να τονιστεί ότι τα φυσικά και μηχανικά τους χαρακτηριστικά ποικίλουν κατά πολύ ακόμα και για ίνες από το ίδιο υλικό, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον Πίνακα 3.1 παρακάτω.

Πίνακας 3.1: Τιμές φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων ινών

Ίνες	Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
<b>Άνθρακα</b>				
Υψηλής αντοχής	1,80	215-235	3500-4800	1,40-2,00
Πολύ υψηλής αντοχής	1,80	215-235	3500-6000	1,50-2,30
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1,90	350-500	2500-3100	0,50-0,90
Πολύ υψηλού μέτρου ελαστ.	1,90	500-700	2100-2400	0,20-0,40
<b>Γυαλιού</b>				
Τύπου E	2,55	70-75	1900-3000	3,00-4,50
Τύπου S	2,45	85-90	3500-4800	4,50-5,50
<b>Αραμιδίου</b>				
Kevlar 29	1,45	70-80	3500-4100	4,30-5,00
Kevlar 49	1,45	115-130	3500-4000	2,50-3,50

- Ίνες υάλου

Οι ίνες γυαλιού παράγονται με μηχανικό τρόπο από την τήξη του υάλου και εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι το χαμηλό τους κόστος (αποτελούν το φθηνότερο είδος ινών) και αξιοποιούνται κυρίως στον τομέα της ναυπηγικής (θαλάσσια σκάφη από fiberglass) και της βιομηχανίας. Το κύριο χαρακτηριστικό της δομής του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε τελείως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι ινών υάλου, από τους οποίους στον κλάδο των επισκευών και ενισχύσεων χρησιμοποιούνται οι δύο, ίνες τύπου S-glass και E-glass, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των οποίων εμφανίζονται στον Πίνακα 3.1 παραπάνω. Παρ' ότι οι ίνες τύπου S-glass εμφανίζουν σαφώς καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, στις εφαρμογές χρησιμοποιούνται περισσότερο οι τύπου E-glass, λόγω του αρκετά χαμηλότερου κόστους τους έναντι των πρώτων (κοστίζουν 3-4 φορές λιγότερο).

Πρόκειται, παρόλα αυτά, για ίνες που δεν έχουν μεγάλη αντίσταση έναντι τριβής, είναι ευπαθείς σε διαβρωτικά φαινόμενα και παρουσιάζουν χαμηλότερη αντίσταση έναντι κόπωσης από τα υπόλοιπα είδη ινών. Επομένως χρειάζονται ειδική μεταχείριση και πολλές φορές η εφαρμογή τους συνδυάζεται από ενισχυτικές προσμίξεις για να προστατευτούν έναντι υγρασίας και να αυξηθεί η αντίσταση του σύνθετου υλικού έναντι κόπωσης. Τα ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού, εν συντομία αναφέρονται ως GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers).

- Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα, γνωστές και ως ανθρακονήματα ή ίνες γραφίτη<sup>4</sup>, διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο σύγχρονος τρόπος παρασκευής τους βασίζεται στη διαδικασία της πυρόλυσης<sup>5</sup> πρώτων υλών, μεταξύ των οποίων οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), η πίσσα (pitch) και το ρεγιόν (rayon), σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (συνήθως έως 3000°C). Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εντείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας και με αυτό τον τρόπο οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη.

Πρόκειται για το είδος ινών με τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές εφελκυστικής αντοχής (με συνήθη τιμή για τις εφαρμογές της τάξης των 3500 MPa) και μέτρου ελαστικότητας (με τιμές που κυμαίνονται από αυτές του κοινού χάλυβα και μπορούν να φτάσουν έως και 3 φορές παραπάνω ανάλογα το είδος του ανθρακονήματος). Επίσης έχουν πολύ μικρό βάρος, εξαιρετική χημική αντοχή και είναι λιγότερο ευαίσθητες, σε σύγκριση με τις ίνες από γυαλί ή αραμιδίου, στα φαινόμενα του ερπυσμού και της κόπωσης. Τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων ινών έχουν να κάνουν με την ψαθυρή συμπεριφορά τους κατά την αστοχία, την πολύ μικρή παραμορφωσιμότητά τους και τη σχετικά μικρή δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, καθώς επίσης και το υψηλό τους κόστος, κατά πολύ υψηλότερο απ' των ινών υάλου και αραμιδίου, που όμως τα τελευταία χρόνια έχει μειωθεί αρκετά.

---

<sup>4</sup> Η δομή των ινών από άνθρακα δεν είναι τόσο κρυσταλλική όσο του γραφίτη. Ο όρος «ίνες γραφίτη» ωστόσο, χρησιμοποιείται συχνά για ίνες των οποίων η περιεκτικότητα σε άνθρακα ξεπερνάει το 99%, ενώ ο όρος «ίνες άνθρακα» χαρακτηρίζει ίνες με περιεκτικότητα άνθρακα μεταξύ 80 και 95%.

<sup>5</sup> Πρόκειται για διαδικασία θερμικής αποσύνθεσης οργανικών ουσιών υπό την απουσία οξυγόνου.

Βέβαια, οι ίνες από άνθρακα παρουσιάζουν και μία ιδιαιτερότητα, που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά την επικόλλησή τους σε χαλύβδινες επιφάνειες. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει *γαλβανική διάβρωση* των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει πάντα να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τα ανθρακονήματα, παρεμβάλλοντας μεταξύ του σύνθετου υλικού από ίνες άνθρακα και της μεταλλικής επιφάνειας ένα μονωτικό υλικό (insulating barrier). Συνηθέστερα στην πράξη, αυτό κατορθώνεται με επιτυχία προσθέτοντας ενδιάμεσα αυτών μία στρώση σύνθετου υλικού από ίνες γυαλιού.

Λόγω του μεγάλου εύρους στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής που παρουσιάζουν, οι ίνες από άνθρακα ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, αν και κατασκευαστικά είναι δυνατή η δημιουργία οποιουδήποτε συνδυασμού δυσκαμψίας και αντοχής. Σύμφωνα λοιπόν με αυτή την κατάταξη, δημιουργούνται οι εξής κατηγορίες ανθρακονημάτων: (α) υψηλής αντοχής (High Strength), (β) πολύ υψηλής αντοχής (Ultra High Strength), (γ) υψηλού μέτρου ελαστικότητας (High Modulus) και (δ) πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Ultra High Modulus). Οι σχετικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν στην κάθε κατηγορία, όπως και για τις κατηγοριοποιήσεις των υπολοίπων τύπων ινών, φαίνεται στον Πίνακα 3.1 που παρήλθε. Τέλος, να σημειωθεί πως τα ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα, εν συντομία αναφέρονται ως CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers).

- Ίνες αραμιδίου

Οι ίνες αραμιδίου, ή αλλιώς πολυαραμιδίδης, είναι οι πιο γνωστές από τις οργανικές ίνες. Πρωτοεμφανίστηκαν στο εμπόριο το 1971, ενώ είναι ευρέως γνωστές και με την εμπορική επωνυμία Kevlar με την οποία πρωτοκυκλοφόρησαν στην αγορά ως προϊόν της εταιρίας Du Pont. Παρουσιάζουν αρκετά υψηλές τιμές μέτρου ελαστικότητας και εφελκυστικής αντοχής (μεγαλύτερη από των υαλονημάτων) και αρκετά μεγάλη επιμήκυνση κατά τη θραύση που μπορεί να φτάσει και το 5%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή, ενώ χαρακτηρίζονται κι από μεγάλη σκληρότητα. Το πιο ελκυστικό όμως χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή απορροφητικότητα ενέργειας που παρουσιάζουν κατά την αστοχία και το οποίο τις καθιστά ιδανικές για την προστασία έναντι πρόσκρουσης και βαλλιστικών ενεργειών. Έτσι, η εφαρμογή τους κυρίως εντοπίζεται στη θωράκιση κατασκευών έναντι κρουστικών φορτίων, ενώ η χρήση τους σε δομικά έργα είναι περιορισμένη συγκριτικά με τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα.

Εντούτοις, οι ίνες αραμιδίου παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα που αξίζει να αναφερθούν. Η θλιπτική αντοχή τους είναι κατά πολύ μικρότερη της εφελκυστικής τους (είναι περίπου το 1/8 αυτής), υφίστανται ερπυστικές παραμορφώσεις, απορροφούν υγρασία και είναι ευαίσθητες στην ηλιακή ακτινοβολία· εκτενής έκθεσή τους στο φως του ηλίου μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση έως και 50% της εφελκυστικής τους αντοχής. Μάλιστα, λόγω του ότι είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Δύο είναι οι κύριοι τύποι ινών αραμιδίου που χρησιμοποιούνται, το Kevlar 29 (low modulus) και το Kevlar 49 (high modulus). Και οι δύο αυτοί τύποι πολυαραμιδίδης παρουσιάζουν ίδια τιμή εφελκυστικής αντοχής με κύρια διαφορά τους την τιμή του μέτρου ελαστικότητας αυτών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1. Η συντομογραφία των ινοπλισμένων πολυμερών από ίνες αραμιδίου, κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα δύο, είναι AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymers).

## ➤ Μήτρες ινοπλισμένων πολυμερών

Η μήτρα αποτελεί τη συνεχή φάση του σύνθετου υλικού και παρότι οι μηχανικές της ιδιότητες δεν καθορίζουν τη συμπεριφορά του παραγόμενου υλικού, η ύπαρξή της είναι απαραίτητη για μια σειρά από λόγους. Κατ' αρχάς αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών, ενώ επίσης είναι αυτή που μεταφέρει τα φορτία και κατανέμει τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσεις του πολυμερούς, επιτρέποντας στο σύνθετο υλικό να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομογενές υλικό. Πέραν αυτών, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και την ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού, προστατεύοντας τις ευπαθείς ίνες από την άμεση επαφή με το περιβάλλον και τις μηχανικές τριβές, ενώ παράλληλα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των εγκάρσιων μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού (εγκάρσια ακαμψία και αντοχή) λόγω της αδυναμίας των ινών σε αυτή τη διεύθυνση, όπως επίσης συνεισφέρουν και στη διατμητική και θλιπτική αντίσταση του παραγόμενου στοιχείου [2].

Η επιλογή του κατάλληλου συνδετικού υλικού (μήτρα) πρέπει να γίνεται προσεκτικά και αναφορικά με το είδος των ινών. Αυτό αφενός γιατί η ύπαρξη καλής συνάφειας μεταξύ ινών και μήτρας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεσή τους και αφετέρου διότι η χημική συμβατότητα των δύο αυτών φάσεων του σύνθετου υλικού είναι καθοριστική ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις κατά τη σύνδεσή τους.

Τα συνδετικά υλικά μπορεί να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά. Τα πολυμερή είναι τα πιο συνήθη σε τέτοιου είδους εφαρμογές, κυρίως επειδή προσδίδουν ευκολία στην κατασκευή πολύπλοκων τμημάτων με μικρό κόστος. Τα πολυμερή συνδετικά υλικά διακρίνονται από τη μεριά τους σε θερμοσκληραινόμενα<sup>6</sup> (thermoset), τα οποία θερμαινόμενα σκληραίνονται κατά τρόπο μη αντιστρεπτό απ' τη στιγμή που πήξει το μίγμα τους, και σε θερμοπλαστικά (thermoplastic), τα οποία αποκτούν μεγαλύτερη πλαστικότητα και δύνανται να μορφοποιηθούν σχηματικά κάθε φορά που θερμαίνονται. Για την παραγωγή ΙΟΠ που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν στην επισκευή και ενίσχυση κατασκευών, η πιο συνήθης πρακτική είναι να χρησιμοποιούνται ως μήτρες θερμοσκληραινόμενες ρητίνες. Αυτές στο εμπόριο είναι συνήθως διαθέσιμες σε μερικώς πολυμερισμένη κατάσταση, έχοντας ρευστή μορφή, και πωλούνται μαζί με ένα άλλο συστατικό, τον σκληρυντή της εκάστοτε ρητίνης, ο οποίος αναμιγνύεται μαζί της σε προκαθορισμένη αναλογία, ώστε να της προσδώσει μια πιο συμπαγή μορφή καθιστώντας την έτοιμη για άμεση χρήση στον προδιαγραφόμενο χρόνο εργασιμότητάς της.

Οι θερμοσκληραινόμενες ρητίνες (thermoset resins) παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα που τις καθιστούν ιδανικές σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Το χαμηλό ιξώδες που εμφανίζουν βοηθάει στο να γίνει εύκολα ο εμποτισμός των ινών του ΙΟΠ, ενώ εξίσου σημαντικά χαρακτηριστικά τους είναι η πολύ ισχυρή συγκολλητική ικανότητά τους, η μεγάλη χημική τους αντίστασή και το χαμηλό κόστος. Μειονεκτήματά τους αποτελούν το περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, η μικρή σκληρότητα που παρουσιάζουν και η ευαισθησία τους στην υγρασία κατά τη διάρκεια εφαρμογής τους. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες θερμοσκληραινόμενες ρητίνες είναι οι *εποξειδικές* (epoxy resins), οι *πολυεστερικές* (polyester resins) και οι *βινυλεστερικές* (vinylester resins), ενώ στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές των σημαντικότερων μηχανικών τους ιδιοτήτων. Σε έργα πολιτικού μηχανικού, τόσο ως μήτρα ινοπλισμένων πολυμερών όσο και ως κόλλα μεταξύ του σύνθετου υλικού και του δομικού στοιχείου, προτιμούνται κατά κόρον εποξειδικές ρητίνες, λόγω των αρκετά καλύτερων μηχανικών

<sup>6</sup> Πολλές φορές αναφέρονται και με τον όρο «θερμικής διαμόρφωσης».

χαρακτηριστικών και της εξαιρετικής ανθεκτικότητας που παρουσιάζουν σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη ρητινών, όπως δείχνει και ο Πίνακας 3.2, παρ' ότι έχουν μεγαλύτερο κόστος.

Πίνακας 3.2: Τιμές φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων ρητινών

Είδος ρητίνης	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
Εποξειδική	1,20-1,30	2,0-4,5	55-130	4,0-14,0
Πολυεστερική	1,10-1,46	2,1-4,1	35-104	< 5,0
Βινυλεστερική	1,12-1,32	3,0-3,6	73-81	3,5-5,5

- Εποξειδικές ρητίνες

Οι εποξειδικές, συχνά αποκαλούμενες και εποξικές, ρητίνες (epoxy resins) θεωρούνται οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά λόγω της μεγάλης τους αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν, ενώ επηρεάζονται λιγότερο, συγκριτικά με τα άλλα πολυμερή συνδετικά, από την υγρασία και τη θερμοκρασία. Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημά τους είναι ότι συρρικνώνονται λιγότερο απ' ότι οι υπόλοιπες ρητίνες (μόλις 1-4% του όγκου τους), το οποίο δικαιολογεί τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά δεσμού που αναπτύσσουν όταν χρησιμοποιούνται ως συγκολλητικό στοιχείο (adhesive) μεταξύ του ΙΟΠ και του προς ενίσχυση δομικού στοιχείου. Στα αρνητικά τους το ότι χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και το ότι έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες ρητινών.

Οι εποξικές ρητίνες είναι συνήθως δύο συστατικών, υπό την έννοια ότι αποτελούν το αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης από την ανάμιξη δύο διαφορετικών ουσιών. Πιο συγκεκριμένα, ένα τυπικό σύστημα εποξειδικής ρητίνης κατασκευάζεται από τη μίξη της παχύρρευστης ρητίνης με κατάλληλο σκληρυντή, σε ακριβή ποσότητα κατά βάρος ως προς την ποσότητα της ρητίνης με την οποία πρόκειται να αναμιχθεί, ώστε να προσδοθούν στο τελικό προϊόν η σωστή δομή και τα κατάλληλα χαρακτηριστικά. Η αντίδραση κατά την ανάμιξη είναι εξωθερμική και δεν προξενεί δευτερογενή παράγωγα. Η διαδικασία της ανάμιξης μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο σε θερμοκρασίες δωματίου όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες ανάλογα με τις τεχνικές απαιτήσεις και τις επιδιωκόμενες τελικές ιδιότητες.

Σημαντικά στοιχεία σε τέτοιες διαδικασίες αποτελούν ο χρόνος εργασιμότητας (pot life) και ο χρόνος σκλήρυνσης (ή ωρίμανσης) του συστήματος της εποξειδικής ρητίνης. Ως εργασιμότητα ορίζεται το χρονικό διάστημα, μετά την ανάμιξη της ρητίνης με τον σκληρυντή της, μέσα στο οποίο το παραγόμενο πολυμερές διατηρεί ακόμα ρευστή μορφή και μπορεί να επεξεργαστεί κατά την εφαρμογή του, είτε ως μήτρα κάποιου ΙΟΠ είτε ως κόλλα για την τοποθέτηση του σύνθετου υλικού σε κάποιο δομικό στοιχείο. Εξαρτάται από τη θερμοκρασία του χώρου στον οποίο γίνεται η ανάμιξη (πετυχαίνεται μεγαλύτερος χρόνος εργασιμότητας όταν η ανάμιξη γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες) και από την αναμιγνύομενη ποσότητα (όσο περισσότερη είναι η αναμιγνύομενη ποσότητα τόσο μικρότερος θα είναι ο χρόνος εργασιμότητάς της). Ως επί το πλείστον αυτό το χρονικό διάστημα είναι της τάξεως της μίας ώρας για θερμοκρασίες δωματίου ( $\approx 23^{\circ}\text{C}$ ), αν και εξαρτάται, πέρα από τη θερμοκρασία του χώρου και την ποσότητα του μίγματος, από τα χαρακτηριστικά της ρητίνης.



Από την άλλη, ο χρόνος σκλήρυνσης -ή αλλιώς ωρίμανσης- του συστήματος, αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που πρέπει να παρέλθει, απ' τη στιγμή που θα έχει τοποθετηθεί το μίγμα ρητίνης-σκλήρυντή στην απαιτούμενη επιφάνεια μέχρι να αποκτήσει τα τελικά του χαρακτηριστικά. Σε αυτό το διάστημα, συστήνεται να μην καταπονείται ή να μην γίνεται χρήση της ρητίνης. Όπως και ο χρόνος εργασιμότητας, έτσι και αυτός εξαρτάται από τη θερμοκρασία του χώρου εργασίας, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση γίνεται λόγος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, το οποίο για συνήθεις θερμοκρασίες δωματίου ( $\approx 23^\circ$ ) είναι της τάξεως των 7 ημερών. Βέβαια τόσο ο χρόνος εργασιμότητας όσο και ο χρόνος σκλήρυνσης, αναγράφονται συνήθως πάνω στη συσκευασία του συστήματος της ρητίνης, διαφορετικά αναφέρονται πάντα στο τεχνικό φυλλάδιο του προϊόντος που παρέχεται από τον προμηθευτή.

- Πολυεστερικές ρητίνες

Οι πολυεστερικές είναι ρητίνες χαμηλότερου ιξώδους, με χειρότερα μηχανικά χαρακτηριστικά και μικρότερη συγκολλητική ικανότητα συγκριτικά με τις εποξειδικές ρητίνες που προαναφέρθηκαν. Είναι επίσης αρκετά ευαίσθητες σε φαινόμενα κόπωσης και έντονα (χημικά) αντιδραστικές κατά τη διαδικασία σύνθεσής τους, ενώ σημαντικό μειονέκτημά τους για τη χρήση τους σε υπό κατοίκηση κατασκευές, είναι η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης. Βέβαια, λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητές τους μπορούν να διαφέρουν σημαντικά [2].

Πρόκειται για διαυγή υγρά με βάση ακόρεστους πολυεστέρες, τα οποία διαλύονται σε ένα ενεργό μονομερές. Η χημική αντίδραση κατά τη διαδικασία παραγωγής τους είναι σημαντικά εξώθερμη και γι' αυτό το λόγο απαιτείται μεγάλη προσοχή στην ποσότητα μάζας των αντιδρώντων που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Παρά τα όχι και τόσο καλά χαρακτηριστικά που διαθέτουν, η χρήση τους είναι έντονη στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών, κυρίως λόγω του πολύ χαμηλού τους κόστους. Έτσι, πολυάριθμες εφαρμογές των πολυεστερικών ρητινών παρατηρούνται σε δεξαμενές, σωλήνες, αγωγούς και αεροσκάφη.

- Βινυλεστερικές ρητίνες

Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Παρουσιάζουν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από τις πολυεστερικές ρητίνες, ενώ επίσης είναι πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές, αν και λόγω της χημικής τους σύστασης εμφανίζουν και αυτές πρόβλημα δυσσομίας. Επίσης τις χαρακτηρίζει υψηλός βαθμός συγκολλησιμότητας, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο των εποξειδικών ρητινών, ενώ το κόστος τους κυμαίνεται μεταξύ αυτού των πολυεστερικών και των εποξειδικών [2].

- Κόλλες σύνδεσης ΙΟΠ και προετοιμασία επιφανειών

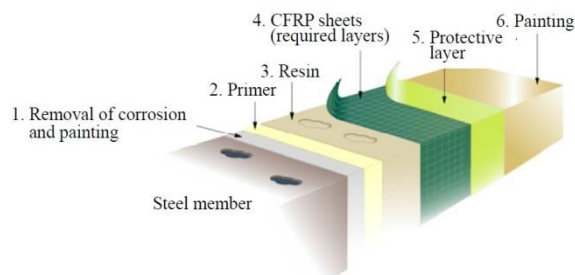
Η εφαρμογή συστήματος ενίσχυσης από ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά (FRP) απαιτεί τη χρήση ειδικής κόλλας για τη σύνδεση αυτού στο υπό ενίσχυση δομικό στοιχείο (adhesive bonding). Ακόμη και στην περίπτωση εφαρμογής ενίσχυσης με ΙΟΠ σε μορφή υφάσματος, όπου ο εμποτισμός αυτού πραγματοποιείται επί τόπου, η έννοια της συνδετικής κόλλας έχει ισχύ, μόνο που αυτή ταυτίζεται στην ουσία με τη μήτρα εμποτισμού του υφάσματος των ινών στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η επιλογή του

κατάλληλου είδους κόλλας, όπως και του τρόπου προετοιμασίας των επιφανειών που πρόκειται να επικολληθούν, είναι εξαιρετικά κρίσιμες ενέργειες και εξαρτώνται από το είδος του προς ενίσχυση υποστρώματος και από τις ιδιότητες του ΙΟΠ.

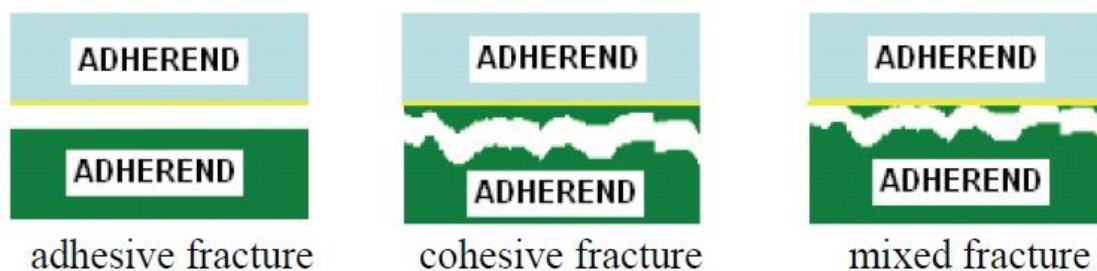
Η χρησιμότητα της κόλλας έγκειται στο να παρέχει την επαρκή διατμητική σύνδεση μεταξύ των δύο επικολλώμενων επιφανειών, έτσι ώστε να αναπτύσσεται πλήρως σύνθετη λειτουργία μεταξύ του δομικού στοιχείου και του ΙΟΠ. Βέβαια, η επιλογή της κατάλληλης ανά περίπτωση κόλλας, είναι μία πολυσύνθετη διαδικασία στην οποία επιδρούν μια σειρά από παράγοντες και επιστημονικοί κλάδοι, όπως η χημική σύσταση των επιφανειών και του πολυμερούς, η ανάλυση τάσεων και η θραυστομηχανική.

Καθώς η παρούσα εργασία δε στοχεύει στο να καλύψει λεπτομερώς την ανάλυση λειτουργίας της κόλλας, αν και εξαιρετικά κρίσιμη στην επιτυχή λειτουργία του όλου συστήματος, αυτή δεν θα αναλυθεί περαιτέρω. Πάντως, αξίζει να τονιστεί ότι οι κυριότερες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της απαιτούμενης -για το εκάστοτε σύστημα ενίσχυσης- κόλλας, καθώς και πληροφορίες για την εφαρμογή της, οφείλεται πάντα να παρέχονται από τον προμηθευτή του συστήματος ενίσχυσης (τεχνικό φυλλάδιο). Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες, καθότι και οι πιο κατάλληλες, κόλλες σε ενισχύσεις δομικών στοιχείων είναι οι εποξειδικές ρητίνες, λόγω των πολύ καλών τους χαρακτηριστικών, οι οποίες αναλύθηκαν λεπτομερώς προηγουμένως.

Η προετοιμασία των προς σύνδεση επιφανειών είναι μία εξαιρετικά κρίσιμη ενέργεια για τη επιτυχή λειτουργία της κόλλας. Πραγματοποιείται πριν τη διαδικασία της επικόλλησης του ΙΟΠ στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου και οφείλει να γίνεται με σχολαστικότητα. Μπορεί να φαίνεται τυπική διαδικασία, όμως είναι απαραίτητη καθώς διασφαλίζει τη σωστή πρόσφυση των επιφανειών και τη διατήρηση της χημικής τους ουδετερότητας (ύπαρξη μη οξειδωμένων επιφανειών). Η προετοιμασία μιας επιφάνειας περιλαμβάνει τον ενδεδειγμένο καθαρισμό της με ασετόν (acetone), αφού πρώτα έχει προηγηθεί η αποβολή οποιασδήποτε σκόνης υπάρχει σε αυτή με χρήση πεπιεσμένου αέρα. Με αυτό τον τρόπο απομακρύνονται όλα τα πιθανά κατάλοιπα όπως οξείδια, λάδια, υγρασία, σκόνη, και γενικά οποιαδήποτε ξένα προς την επιφάνεια σωματίδια. Η διαδικασία αυτή είναι προτιμότερο να γίνεται -στο βαθμό που είναι δυνατόν- ακριβώς πριν την εφαρμογή της κόλλας, ώστε να μην «ξαναμολυνθεί» η συγκεκριμένη επιφάνεια μέχρι να εφαρμοστεί η κόλλα. Προτού πραγματοποιηθεί ο καθαρισμός τους με τη διαδικασία που αναφέρθηκε, ενδείκνυται να εκτελείται ελαφρύ τρίψιμο των δύο επιφανειών με γυαλόχαρτο, έτσι ώστε να αυξηθεί η τραχύτητά τους και εν τέλει η αντοχή σύνδεσής τους (bond strength). Επιπλέον, στην περίπτωση που η προς κόλληση επιφάνεια του δομικού στοιχείου είναι χαλύβδινη, όπως στη συγκεκριμένη πειραματική διερεύνηση, και είτε έχει υποστεί βαφή είτε έχει οξειδωθεί (σκουριά), απαιτείται πριν από την όλη προετοιμασία της να πραγματοποιηθεί αμμοβολή αυτής (sandblasting) μέχρι να φύγει εξ ολοκλήρου η βαφή ή η σκουριά της αντίστοιχα, με στόχο και πάλι την επίτευξη μεγαλύτερου βαθμού πρόσφυσης. Τα βασικά στάδια κατά τη διαδικασία εφαρμογής ενός συστήματος ΙΟΠ σύνθετου υλικού πάνω σε μια χαλύβδινη επιφάνεια απεικονίζονται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Βασικά στάδια κατά την ενίσχυση ενός χαλύβδινου μέλους με ΙΟΠ σύνθετα υλικά



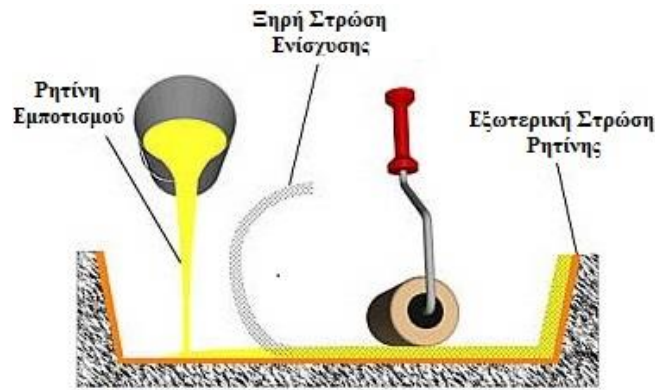
Σχήμα 3.9: Πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας του συστήματος σύνδεσης ενός ΙΟΠ με την επιφάνεια του δομικού στοιχείου στο οποίο επικολλάται [11]

Όλες αυτές οι ενέργειες βοηθούν στη δημιουργία ενός ισχυρού μηχανισμού επικόλλησης, που σχετίζεται με τη συναρμογή της κόλλας με τις επιφάνειες των επικολλώμενων στοιχείων, μέσω της δημιουργίας ισχυρών χημικών δεσμών μεταξύ του πολυμερούς και των επιφανειών. Οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας που αφορούν την ένωση επιφανειών μέσω ειδικής κόλλας είναι τρεις και χαρακτηρίζονται ανάλογα με το σημείο όπου πραγματοποιείται η αστοχία. Έτσι, σύμφωνα με το [11] διακρίνονται (α) η αστοχία της κόλλας (adhesive fracture), η οποία πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια της κόλλας με μία εκ των επιφανειών και οφείλεται σε πιθανή μικρότερη αντοχή της κόλλας σε σύγκριση με αυτή της ενισχυόμενης επιφάνειας, (β) η συνεκτική αστοχία (cohesive fracture), η οποία είναι η ιδανική μορφή αστοχίας για τέτοιου είδους συνδέσεις και πραγματοποιείται στο εσωτερικό μιας από τις ενισχυόμενες επιφάνειες και (γ) ο μικτός τρόπος αστοχίας (mixed fracture), ο οποίος είναι συνδυασμός των άλλων δύο τρόπων αστοχίας και οφείλεται είτε σε ύπαρξη υποβαθμισμένης επιφάνειας του δομικού στοιχείου είτε σε ανεπάρκεια της συνδετικής κόλλας. Στο Σχήμα 3.9 παραπάνω, απεικονίζονται αυτοί οι τρεις πιθανοί τρόποι αστοχίας με τονισμό της επιφάνειας όπου επέρχεται η αστοχία.

Αναφορικά με τον *τρόπο κατασκευής* αυτών των συστημάτων ενίσχυσης, πρέπει να τονιστεί ότι αυτός ποικίλει, ανάλογα τις εκάστοτε απαιτήσεις ως προς τα χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού αλλά και του κόστους. Τα κυριότερα είδη ΙΟΠ τα οποία προορίζονται για εξωτερική ενίσχυση δομικών στοιχείων, ταξινομούνται σχετικά με τη διαδικασία παραγωγής τους σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες περιγράφονται εν συντομία ακολούθως:

- Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης (hand/wet lay-up systems)

Αποτελεί την πιο απλή και διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή. Περιλαμβάνει την χειρωνακτική τοποθέτηση των ξηρών ενισχύσεων (ινών), υπό μορφή υφασμάτων (fabrics) ή φύλλων (sheets), και τον μετέπειτα εμποτισμό τους με ρητίνη επί τόπου στην προς ενίσχυση επιφάνεια. Στη συνέχεια, το υπό υγρή μορφή σύνθετο υλικό διαμορφώνεται με χειροκίνητα οδοντωτά ρολά ώστε να διευκολυνθεί η ομοιόμορφη διάστρωση και η απομάκρυνση των θυλάκων αέρα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συμπληρωθεί ο επιθυμητός αριθμός στρώσεων και έπειτα το σύστημα αφήνεται μέχρι να στερεοποιηθεί, πράγμα που συνήθως επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία δωματίου. Στην ουσία πρόκειται για μία διαδικασία που γίνεται επί τόπου στο χώρο εργασίας, το κόστος της οποίας ποικίλει ανάλογα με τις ίνες, το συνδετικό υλικό και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται, καθώς και το μέγεθος των τμημάτων που κατασκευάζονται. Η τεχνική αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10 ακολούθως.



Σχήμα 3.10: Σχηματική απεικόνιση του χειρονακτικού τρόπου παραγωγής στρώσεων ΙΟΠ

Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα παραγωγής μεγάλων τμημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία, το πολύ μικρό κόστος, το πολύ μικρό περιεχόμενο παραγόμενων κενών (κάτω του 1%) και μη αναγκαιότητα κλίβανου στερεοποίησης. Μειονεκτήματα αυτής αποτελούν η αβεβαιότητα της τελικής ποιότητας του σύνθετου υλικού (εξαρτάται από την ικανότητα των εργατών), η δυσκολία διατήρησης ομοιομορφίας στο τελικό προϊόν και οι μεγάλοι χρόνοι που απαιτούνται για τη στερεοποίηση σε συνήθεις θερμοκρασίες δωματίου (της τάξεως των 7 ημερών).

- Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις (prepreg lay-up systems)

Η προκατασκευασμένη στρώση (prepreg) είναι προ-εμποτισμένο υλικό ενισχυμένο με ίνες (pre-impregnated fiber reinforced material) όπου η ρητίνη μερικώς στερεοποιηθεί ή είναι πιο παχύρρευστη. Ο εμποτισμός των ινών πραγματοποιείται στο εργοστάσιο παραγωγής του υλικού και το προϊόν αυτό διανέμεται στο εμπόριο σε μορφή εύκαμπτων ελασμάτων τυλιγμένα σε ρολά, με πλάτη και πάχη που ποικίλουν ανάλογα τις απαιτήσεις. Στις επιφάνειες αυτών μάλιστα υπάρχουν αφαιρούμενες προστατευτικές ταινίες ώστε να τις προστατεύουν από οποιαδήποτε εξωτερική πρόσμιξη.

Η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος γίνεται με απλή επικόλληση των στρώσεων που απαιτούνται στην προς ενίσχυση επιφάνεια στο απαιτούμενο μήκος. Σημαντικό στοιχείο είναι ότι στη συγκεκριμένη μέθοδο, συνήθως απαιτείται κλίβανος (autoclave) για να γίνει η στερεοποίηση του συστήματος ενίσχυσης. Η αναφερόμενη μέθοδος ενδείκνυται για την παραγωγή ΙΟΠ με αρκετά υψηλό λόγο ινών, ενώ επίσης η κατανομή των ινών είναι ομοιόμορφη. Μοναδικό σημαντικό μειονέκτημά της είναι το υψηλότερο κόστος που απαιτείται.

- Χρήση προστερεοποιημένων συστημάτων (pre-cured systems)

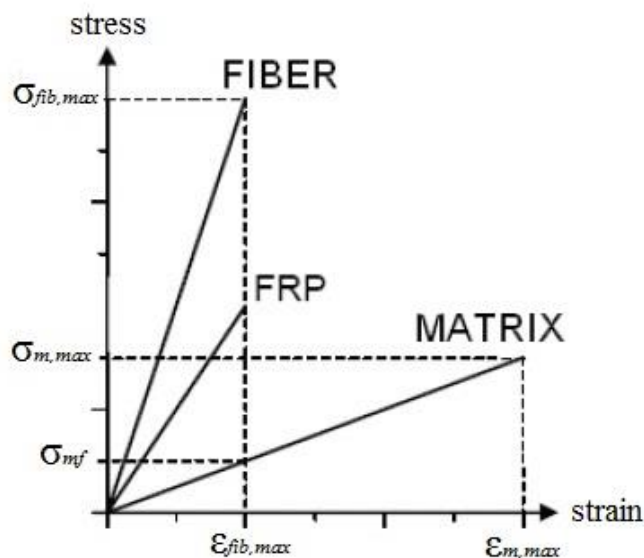
Αυτά τα συστήματα ενίσχυσης αποτελούν έτοιμα ΙΟΠ σύνθετα υλικά, τα οποία παρασκευάζονται στο εργοστάσιο σε διάφορα σχήματα, είτε με έλξη (pultrusion) είτε με σφυρηλάτηση προς φύλλωση (lamination). Πρόκειται για συστήματα στα οποία τόσο ο εμποτισμός όσο και η στερεοποίησή τους γίνονται στο εργοστάσιο από τον προμηθευτή. Επομένως, το σύνθετο υλικό που παρέχεται προς εφαρμογή έχει σκληρή και δύσκαμπτη μορφή. Τέτοια στοιχεία προορίζονται να επικολληθούν απευθείας στο προς ενίσχυση στοιχείο, όμως λόγω της δύσκαμπτης της μορφής τους, δεν είναι εύκολα διαχειρίσιμα και η διαδικασία εφαρμογής τους δεν είναι μία εύχρηστη διαδικασία. Επίσης χαρακτηρίζονται από παράταξη των ινών σε μία μόνο κατεύθυνση (unidirectional).

### 3.2.3 Νόμοι και ισχύουσες διατάξεις υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών τους

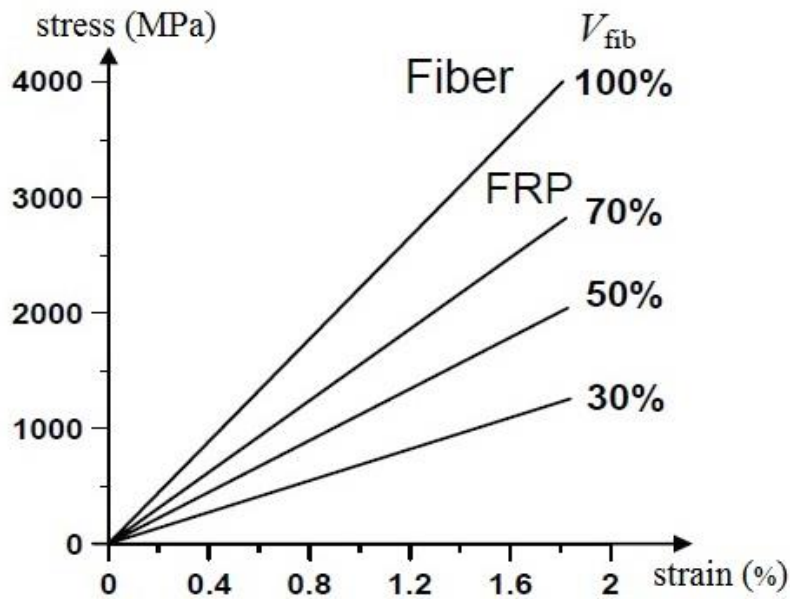
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα ινοπλισμένο πολυμερές σύνθετο υλικό (FRP), παράγεται από την ένωση δύο διακριτών φάσεων, των ινών και της μήτρας. Οι ίνες, υψηλής αντοχής και ακαμψίας, είναι υπεύθυνες για την παραλαβή των φορτίων και την ακαμψία του σύνθετου υλικού, ενώ η μήτρα είναι αυτή που διασφαλίζει τον καταμερισμό του φορτίου μεταξύ των ινών και προστασία τους από το περιβάλλον.

Συνεπώς, οι ιδιότητες του παραγόμενου σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Αν και οι ίνες είναι αυτές που λόγω των πολύ υψηλών μηχανικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν καθορίζουν κατά κύριο λόγο τις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού, παρ' όλα αυτά κάτι τέτοιο δεν είναι απόλυτα ακριβές. Αυτό γιατί, σημαντικό ρόλο στο βαθμό συνεισφοράς του κάθε συστατικού στις τελικές ιδιότητες του ΙΟΠ, παίζει ο όγκος που κατέχει το καθένα στην τελική σύσταση του σύνθετου. Έτσι, μπορεί οι ίνες να έχουν την κύρια επίδραση στα τελικά μηχανικά χαρακτηριστικά ενός ΙΟΠ, όμως ποτέ δεν ταυτίζονται. Πιο συγκεκριμένα, το παραγόμενο στοιχείο έχει πάντα μικρότερη ακαμψία και εφελκυστική αντοχή από τις ίνες, ενώ η παραμόρφωση αστοχίας του ταυτίζεται με αυτή των ινών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.11 παρακάτω.

Αναφορικά με το βαθμό συμμετοχής των ινών στο σύνθετο ινοπλισμένο πολυμερές υλικό, αξίζει να σημειωθεί ότι στα προεμποτισμένα συστήματα ΙΟΠ που διατίθενται υπό μορφή ελασμάτων, παρατηρείται πολύ υψηλότερος βαθμός συμμετοχής των ινών, συγκριτικά με τα συστήματα ΙΟΠ που δημιουργούνται με τη χειρωνακτική διαδικασία μέσω επί τόπου εμποτισμού υφασμάτων από ίνες. Πιο συγκεκριμένα, οι τυπικές τιμές του ογκομετρικού λόγου ινών σε προεμποτισμένα ελάσματα είναι της τάξης του 50-70%, τη στιγμή που σε επί τόπου εμποτισμένα υφάσματα ινών κυμαίνεται μεταξύ 25-35%. Γι αυτό το λόγο τα προεμποτισμένα συστήματα (prepreg strips/laminates) εμφανίζουν πολύ καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά και προτιμώνται για υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές. Το Σχήμα 3.12 απεικονίζει ακριβώς αυτή την απομείωση των χαρακτηριστικών της ίνας, συγκριτικά με τις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού, ανάλογα με το βαθμό συμμετοχή-ογκομετρικό λόγο της.



Σχήμα 3.11: Συσχέτιση διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης ινών, μήτρας και παραγόμενου ΙΟΠ [11]



Σχήμα 3.12: Μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών του ΙΟΠ κατ' αναλογία του ποσοστού συμμετοχής των ινών σε αυτό<sup>7</sup> [11]

Η απομείωση αυτή, ανάλογα με το βαθμό συμμετοχής της μήτρας στο σύνθετο υλικό, αφορά μόνο το μέτρο ελαστικότητας ( $E_c$ ) και την εφελκυστική αντοχή ( $\sigma_c$ ) του σύνθετου υλικού, ενώ οι αντίστοιχες απομειώσεις τόσο στο οριακό φορτίο αστοχίας ( $F_u$ ) όσο και στην αξονική ακαμψία ( $E_c \cdot A_c$ ) του τελικού υλικού είναι αμελητέες. Η μηδαμινή επίδραση του βαθμού περιεκτικότητας της μήτρας στην τιμή του φορτίου αστοχίας και της αξονικής ακαμψίας του σύνθετου υλικού ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η όποια υποβάθμιση του μέτρου ελαστικότητας και της εφελκυστικής αντοχής του σύνθετου, αντισταθμίζονται από την αύξηση της συνολικής του διατομής σε σχέση με το εμβαδόν του συστατικού των ινών.

Από τη σκοπιά της *μικρομηχανικής*, προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού, θα πρέπει να είναι γνωστό το ακριβές ποσοστό με το οποίο συμμετέχει το κάθε υλικό στο τελικό προϊόν. Έτσι, για ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) κατασκευασμένα από συνεχείς ίνες μονής κατεύθυνσης (unidirectional fibers), οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού μπορούν να εκτιμηθούν σύμφωνα με τον *Νόμο της Σύνθεσης* (Rule of Mixtures). Αυτός αποτελεί μία σειρά από σχέσεις, οι οποίες συνδέουν μεταξύ τους τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε διακριτού υλικού στο τελικό προϊόν και χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Οι σχέσεις αυτές είναι οι κάτωθι:

$$v_f + v_m + v_u = 1 \quad (3.1)$$

$$w_f + w_m = 1 \quad (3.2)$$

$$\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m \quad (3.3)$$

όπου

<sup>7</sup> Οι τιμές του γραφήματος είναι πραγματικές, σε μια προσπάθεια ορθότερης παρουσίασης του φαινομένου

$v_f, v_m, v_u$  οι λόγοι όγκου των ινών, της μήτρας και των κενών αντίστοιχα που ισούνται με  $v_i = V_i/V$ , όπου  $V$  ο συνολικός όγκος του σύνθετου υλικού και  $V_i$  με  $i = f, m, u$  ο όγκος των ινών, της μήτρας και των κενών αντίστοιχα

$w_f, w_m$  οι λόγοι βάρους των ινών και της μήτρας αντίστοιχα που ισούνται με  $w_i = W_i/W$ , όπου  $W$  το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού και  $W_i$  με  $i = f, m$  το βάρος ινών και μήτρας αντίστοιχα

$\rho_f, \rho_m, \rho_c$  οι πυκνότητες των ινών, της μήτρας και η συνολική πυκνότητα του σύνθετου υλικού, αντίστοιχα

Αξιοποιώντας, λοιπόν, τις σχέσεις αυτές του Νόμου της Σύνθεσης, μπορεί να επέλθει μία αρκετά καλή εκτίμηση, τόσο για το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση των ινών, όσο και για την εφελκυστική αντοχή κατά αυτή τη διεύθυνση, ενός ΙΟΠ με συνεχείς ίνες μονής κατεύθυνσης. Οι (εμπειρικές) σχέσεις για την εκτίμηση αυτών των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού σύνθετου υλικού είναι οι εξής:

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m \quad \text{για το διάμηκες μέτρο ελαστικότητας} \quad (3.4)$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_{mf} \cdot (1 - v_f) \quad \text{για τη διαμήκη εφελκυστική αντοχή} \quad (3.5)$$

όπου

$E_f, E_m, E_c$  το μέτρο ελαστικότητας των ινών, της μήτρας και του σύνθετου υλικού αντίστοιχα

$\sigma_f, \sigma_c, \sigma_{mf}$  η εφελκυστική αντοχή της ίνας, η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού και η εφελκυστική τάση της μήτρας κατά την αστοχία της ίνας<sup>8</sup> αντίστοιχα

Ο Νόμος της Σύνθεσης βασίζεται στην παραδοχή ύπαρξης τέλειας σύνδεσης (perfect bond) μεταξύ ινών και μήτρας. Για ΙΟΠ σύνθετα υλικά με ίνες διατεταγμένες μόνο σε μία κατεύθυνση (unidirectional composites), η εξίσωση (3.4) παρέχει μία πολύ ακριβή προσέγγιση για το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού, εφόσον έχουν καθοριστεί ορθά και με ακρίβεια τα ποσοστά συμμετοχής του κάθε συστατικού του (λόγοι όγκων). Αντιθέτως, δεν μπορεί να εκτιμηθεί με την ίδια μεγάλη ακρίβεια η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού. Αναμφίβολα πάντως είναι σαφώς προτιμότερο, καθώς και ορθότερο, να γίνεται χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων για τον καθορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, και η εκτίμησή τους μέσω των σχέσεων (3.4) και (3.5) να αποσκοπεί απλά σε μία αρχική εκτίμηση και επαλήθευση της τάξης μεγέθους αυτών. Σχετικές διατάξεις και κανονισμοί για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή υπάρχουν, και παρέχουν σαφέστατη

<sup>8</sup> Λόγω του ότι οι ίνες έχουν πολύ μικρότερη παραμορφωσιμότητα απ' ότι η μήτρα, το σύνθετο υλικό αστοχεί όταν φθάσει στην παραμόρφωση αστοχίας των ινών του. Σε αυτό το επίπεδο παραμόρφωσης, η τάση της μήτρας δεν εξαντλεί την εφελκυστική αντοχή της, λόγω της μικρότερης ακαμψίας που διαθέτει συγκριτικά με των ινών, αλλά έχει μια ενδιάμεση τιμή, όπως φαίνεται και απ' το Σχήμα 3.11 παραπάνω. Αυτή η τάση συνιστάται να χρησιμοποιείται στη σχέση (3.5) ως τάση της μήτρας, και όχι η αντοχή της.

καθοδήγηση. Επειδή όμως δεν είναι ζήτημα της συγκεκριμένης ενότητας, η σχετική πειραματική διαδικασία δεν αναλύεται σε αυτή την παράγραφο, μολαταύτα, ειδική αναφορά γίνεται στο τέταρτο κεφάλαιο που αφορά πειράματα εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο του ISO 527-5 (Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites).

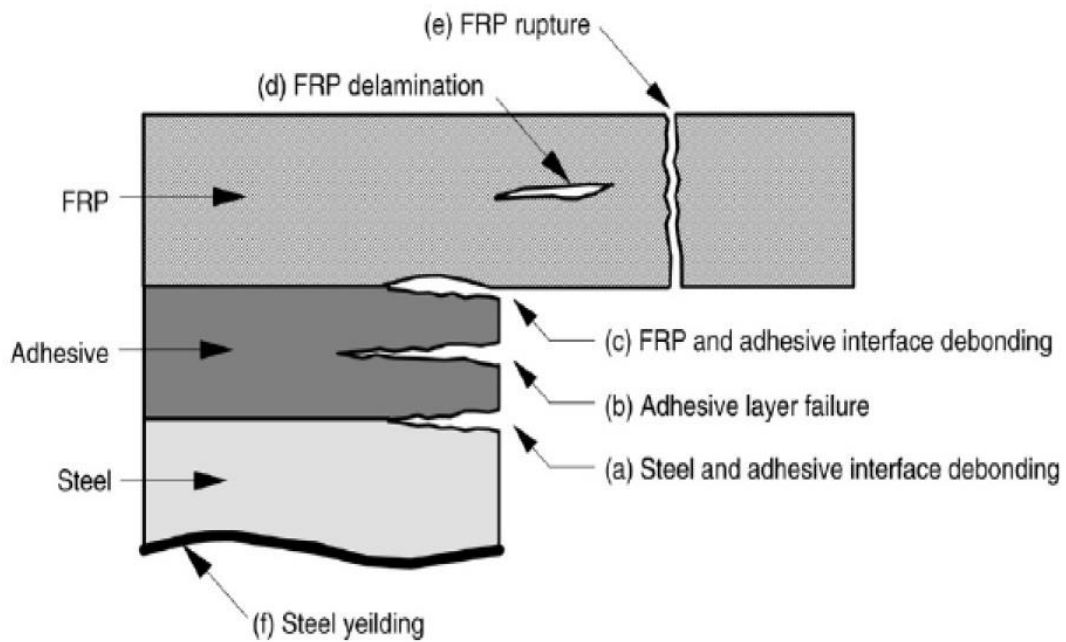
Στην περίπτωση των προκατασκευασμένων ελασμάτων από σύνθετα υλικά (prefabricated strips), στα οποία ο εμποτισμός των ινών τους γίνεται από πριν στο εργοστάσιο, τα τελικά μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους παρέχονται με απόλυτη ακρίβεια από τον προμηθευτή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν άφοβα κατά τη μελέτη σχεδιασμού. Απ' την άλλη μεριά, στην συνηθέστερη περίπτωση της επί τόπου χειρονακτικής δημιουργίας του σύνθετου υλικού κατά την οποία ο εμποτισμός γίνεται επί τω έργω (in-situ resin impregnated systems), υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την ακριβή επίγνωση του ποσοστού συμμετοχής των ινών στο τελικό σύνθετο υλικό αλλά και του πάχους που θα έχει. Γι' αυτό το λόγο, υπολογισμοί με βάση τις ιδιότητες του τελικού συστήματος (ίνες και μήτρα) και του συνολικού του πάχους, οδηγούν συχνά σε αποκλίσεις ως προς την πραγματικότητα. Εξαιτίας αυτής της διαφοράς στην προσέγγιση ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του ΙΟΠ, δεν είναι επαρκής η σύγκριση σύνθετων υλικών με γνώμονα τις τελικές μηχανικές τους ιδιότητες, ακριβώς γιατί στην τελική τους διαμόρφωση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο ο βαθμός συμμετοχής των ινών τους. Είναι επομένως πολύ σημαντικό να υπάρχει επίγνωση της σύστασης του καθενός σύνθετου υλικού στο οποίο ανήκουν οι εκάστοτε μηχανικές ιδιότητες.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι στην περίπτωση συστημάτων που εμποτίζονται επί τόπου κατά την εφαρμογή τους, λόγω της αβεβαιότητας ως προς την τελική τους σύσταση, η εκτίμηση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών επιτρέπεται να γίνεται με βάση τις ιδιότητες των ινών τους αποκλειστικά. Υπό μία τέτοια προσέγγιση, το δεύτερο μέρος στις εξισώσεις (3.4) και (3.5) αγνοείται τελείως, ο όρος  $v_f$  λαμβάνεται ως μονάδα, ενώ ως τελικές διαστάσεις του ΙΟΠ λαμβάνονται οι διαστάσεις του υφάσματος των ινών που χρησιμοποιείται και οι οποίες δίνονται από τον προμηθευτή του. Σε αυτή την περίπτωση, οι προκύπτουσες ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, εφελκυστική αντοχή) του σύνθετου υλικού πρέπει να πολλαπλασιάζονται με κάποιον απομειωτικό συντελεστή, έτσι ώστε να συμπεριληφθεί η αποδοτικότητα του τελικού συστήματος ινών-μήτρας. Αυτός ο συντελεστής οφείλει να παρέχεται από τον προμηθευτή του συστήματος και προκύπτει από ειδικές εργαστηριακές δοκιμές. Εναλλακτικά, δύναται ορισμένες φορές να παρέχονται απευθείας οι τελικές ιδιότητες (πάχος) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά (μέτρο ελαστικότητας, εφελκυστική αντοχή) του τελικού προϊόντος από τον ίδιο τον προμηθευτή, με βάση και πάλι εργαστηριακές δοκιμές.

### **3.2.4 Πιθανές μορφές αστοχίας ενός, εξωτερικά ενισχυμένου με κάποιο ΙΟΠ σύνθετο υλικό, χαλύβδινου στοιχείου**

Τα χαρακτηριστικά καθενός εκ των τριών συστατικών στοιχείων που απαρτίζουν ένα τέτοιο σύστημα ενίσχυσης, δηλαδή του χαλύβδινου μέλους, του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού και της κόλλα σύνδεσης αυτών, καθορίζουν την μορφή αστοχίας της τεχνικής αυτής. Έτσι, για παράδειγμα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ΙΟΠ, η μορφή της διατομής του προς ενίσχυση χαλύβδινου στοιχείου, το μήκος του χαλύβδινου μέλους, το είδος του χάλυβα, όπως και η ποιότητα και το πάχος της συνδετικής κόλλας, ανάλογα με την τιμή τους, μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετική μορφή αστοχίας του όλου συστήματος.





Σχήμα 3.13: Πιθανές μορφές αστοχίας τυπικού συστήματος ενισχυμένου χαλύβδινου στοιχείου μέσω επικολλημένης στρώσης ΙΟΠ εξωτερικά, λόγω εφελκυσμού [44]

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Zhao και Zhang [44] που μελέτησαν τις πιθανές μορφές αστοχίας ενός συστήματος χάλυβα-ΙΟΠ υποβαλλόμενο σε εφελκυστικές δυνάμεις, οι πιθανές μορφές αστοχίας είναι αυτές που παρουσιάζονται στο παραπάνω Σχήμα 3.13, και περιλαμβάνουν:

- (a) Διεπιφανειακή αποκόλληση (interfacial failure) στη σύνδεση της χαλύβδινης επιφάνειας με τη στρώση της κόλλας
- (b) Συνεκτική αστοχία (cohesive failure) της κόλλας σύνδεσης των δύο στοιχείων, η οποία είναι η συνηθέστερη μορφή αστοχίας και οφείλεται είτε στο μικρό πάχος της στρώσης είτε στη χαμηλή ποιότητα της κόλλας
- (c) Διεπιφανειακή αποκόλληση (interfacial failure) της σύνδεσης του ΙΟΠ σύνθετου υλικού με τη στρώση της κόλλας
- (d) Αποκόλληση τμήματος του ΙΟΠ, μέσω διαχωρισμού ινών αυτού από τη μήτρα του σύνθετου υλικού (δημιουργία ασυνέχειας μεταξύ των ινών του ΙΟΠ), το οποίο συνήθως οφείλεται σε χαμηλό μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου
- (e) Θραύση του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού
- (f) Αστοχία του χαλύβδινου στοιχείου λόγω διαρροής, το οποίο είναι αρκετά σπάνιο να συμβεί λόγω του σχεδόν πάντοτε επαρκούς του πάχους

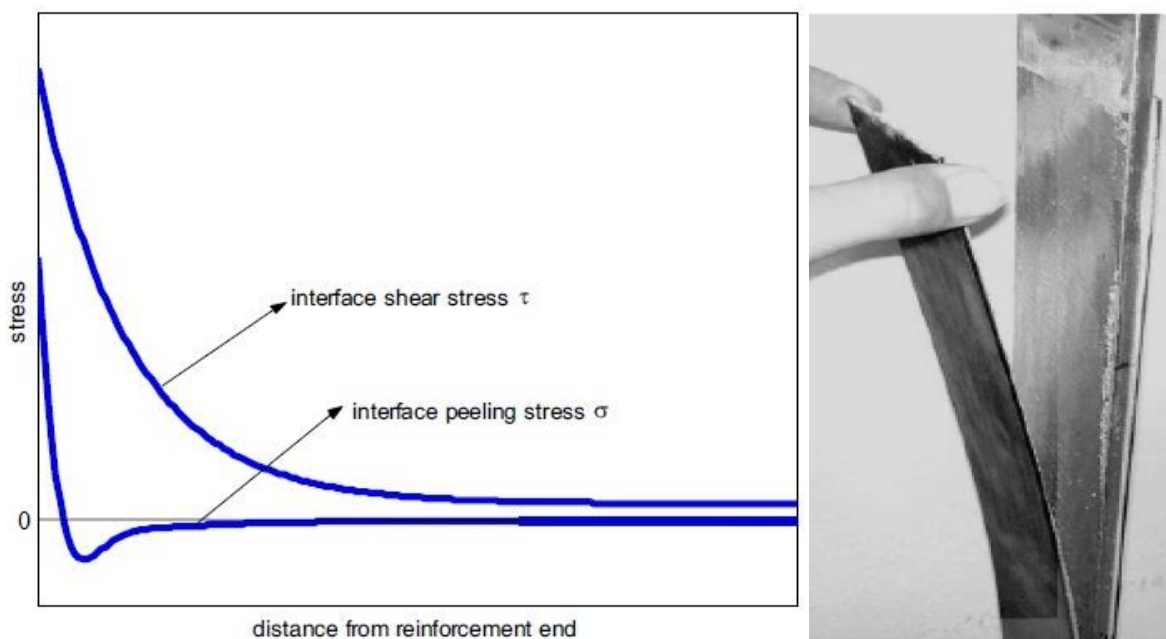
Βέβαια, πέρα των προαναφερθέντων έξι μορφών αστοχίας καθαρά λόγω εφελκυσμού, σε μια τυπική καταπόνηση λόγω κάμψης, ή καθαρά λόγω θλίψης, οφείλουν να εξετάζονται και οι εξής επιπλέον περιπτώσεις:

- (g) Ενδεχόμενος τοπικός λυγισμός θλιβόμενου τμήματος του χαλύβδινου μέλους
- (h) Καθολικός λυγισμός -είτε καμπτικός είτε στρεπτοκαμπτικός- του χαλύβδινου μέλους

Όλοι αυτοί οι πιθανοί τρόποι αστοχίας ενός τέτοιου συστήματος καθιστούν σαφές ότι πέραν των τυπικών εντατικών καταπονήσεων, η αστοχία αυτού είναι δυνατόν να προέλθει από διακοπή της σύνδεσης των επιφανειών του μεταλλικού στοιχείου και του σύνθετου υλικού. Πέραν τούτου, αξίζει να τονιστεί ότι αυτή η μορφή αστοχίας, δηλαδή η αποκόλληση μιας εκ των διεπιφανειών της σύνδεσης (delamination/debonding failure), είναι η πλέον κρίσιμη μορφή αστοχίας τέτοιων συστημάτων, καθώς οι διεπιφάνειες, στις οποίες κύριο ρόλο παίζει η κόλλα σύνδεσης, αποτελούν τα πιο ευαίσθητα σημεία του συστήματος.

Σε τύπους σύνδεσης χαλύβδινης επιφάνειας με ΙΟΠ, η ασθενέστερη διεπιφάνεια είναι αυτή του σύνθετου υλικού με την κόλλα και επομένως αυτή είναι η ευάλωτη διεπιφάνεια. Γι' αυτό το λόγο μάλιστα, η εκτίμηση της αντοχής του ΙΟΠ έναντι αποκόλλησης (debonding strength), είναι μία αρκετά κρίσιμη ενέργεια που είναι αναγκαίο να λογίζεται κατά το σχεδιασμό του συστήματος. Για την εκτίμηση αυτής υπάρχουν δύο διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού, ένα με βάση ελαστική ανάλυση των τάσεων και το άλλο με βάση τη θεωρία της θραυστομηχανικής.

Το φαινόμενο της διεπιφανειακής αποκόλλησης της σύνδεσης κόλλας-ΙΟΠ είναι αποτέλεσμα της επίδρασης τόσο των ορθών όσο και των διατμητικών τάσεων που δρουν στη διεπιφάνεια. Απαντάται σε ζώνες υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, δηλαδή σε περιοχές ασυνέχειας της μεταλλικής επιφάνειας, ατελειών της στρώσης της κόλλας<sup>9</sup>, ή σε σημεία διακοπής της συνέχειας της ενίσχυσης. Ως σημεία ασυνέχειας, λογίζονται τα σημεία όπου διακόπτεται η ενισχυτική στρώση, δηλαδή τα άκρα της επικολλημένης στρώσης του ΙΟΠ. Σ' αυτές τις περιοχές αναπτύσσονται εξαιρετικά μεγάλες διατμητικές και ορθές τάσεις στη διεπιφάνεια, όπως φαίνεται ποιοτικά στο γράφημα του Σχήματος 3.14(α) που ακολουθεί.



α)

β)

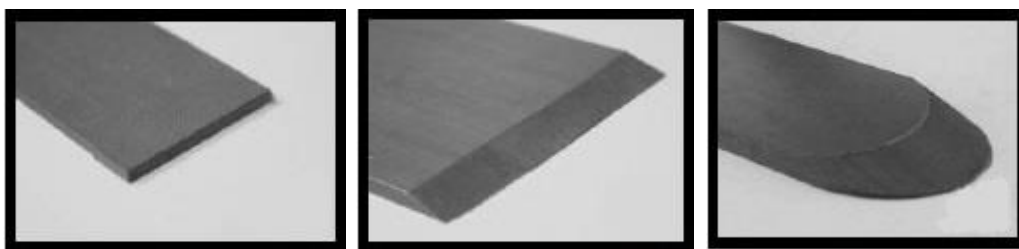
<sup>9</sup> Ένας ακόμα λόγος που αναδεικνύει την κρισιμότητα της ενδεδειγμένης προετοιμασίας των επιφανειών που επικολλούνται.

Σχήμα 3.14: (α) Ποιοτική κατανομή ορθών και διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια σύνδεσης συναρτήσει της απόστασης από το άκρο της ενίσχυσης [12] και (β) τυπική μορφή αποκόλλησης [31]

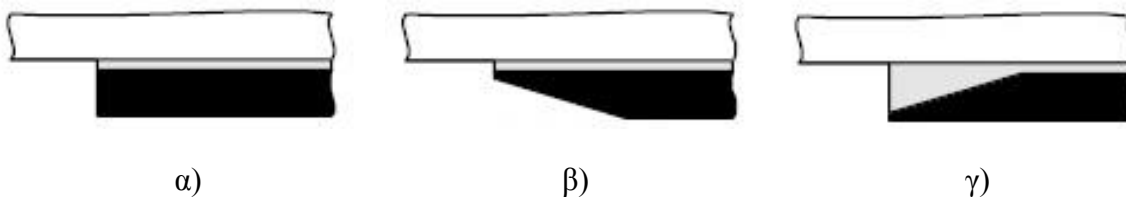
Λόγω της μεγάλης σημασίας του φαινομένου, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα αποκλειστικά πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα. Τα αποτελέσματα μάλιστα έδειξαν ότι το πρόβλημα της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων στις περιοχές των άκρων της ενίσχυσης, δύναται να αντιμετωπιστεί επιτυχώς *διαμορφώνοντας κατάλληλα τα άκρα της σύνδεσης* στις συγκεκριμένες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, στις διάφορες πειραματικές διερευνήσεις που διενεργήθηκαν, μελετήθηκε η επίδραση που έχει η λοξότομηση των άκρων της ενισχυτικής στρώσης στα σημεία απόληξης αυτής, δηλαδή στα σημεία όπου παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση τάσεων.

Βέβαια, αξίζει να τονιστεί ότι η πρακτική της διαμόρφωσης των άκρων του ΙΟΠ δύναται να εφαρμόζεται σε σύνθετα υλικά με επαρκές πάχος, ώστε να έχει νόημα η σταδιακή μείωσή του, δηλαδή είναι εφικτή σε προεμποτισμένης μορφής ΙΟΠ (FRP strips/plates/laminates). Οι ειδικές διαμορφώσεις που μελετήθηκαν από διάφορους ερευνητές, όπως οι T.J. Stratford and J.F. Chen[37], οι Mina Dawood, Murthy Guddati & Sami Rizkalla[14] και οι Sami Rizkalla and Mina Dawood [30], ήταν συνολικά τριών μορφών. Η μία περίπτωση που μελετήθηκε ήταν η διαμόρφωση άκρων υπό μορφή σφήνας (tapered ends), η άλλη ήταν υπό μορφή ανεστραμμένης σφήνας (reverse tapered ends), ενώ σε προσπάθεια βελτίωσης της προαναφερθείσας διαμόρφωσης, μελετήθηκε και η παράλληλη στρογγύλευση αυτών (rounded and tapered ends).

Όλες αυτές οι ειδικές διαμορφώσεις που μελετήθηκαν, συγκριτικά με την τυπική επίπεδη μορφή άκρου (square ends) χωρίς την οποιαδήποτε διαμόρφωση, έδειξαν σημαντική απομείωση του βαθμού συγκέντρωσης τάσεων στα σημεία απόληξης του ΙΟΠ. Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα των πειραμάτων καταδεικνύουν ότι η διαμόρφωση της ανεστραμμένης σφήνας (reverse tapered) είναι η πιο αποτελεσματική, καθώς σχεδόν διπλασιάζει την διεπιφανειακή αντοχή του συστήματος, λόγω της μείωσης που παρατηρείται στη συγκέντρωση τάσεων στα λοξοτομημένα άκρα. Οι τρεις αυτές διαμορφώσεις που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.15 και 3.16 που ακολουθούν.



Σχήμα 3.15: Ειδικά λοξοτομημένα άκρα ΙΟΠ με -από αριστερά προς δεξιά- επίπεδη μορφή (square end), μορφή σφήνας (tapered end) και μορφή σφήνας με στρογγύλευση (rounded and tapered end) [14]

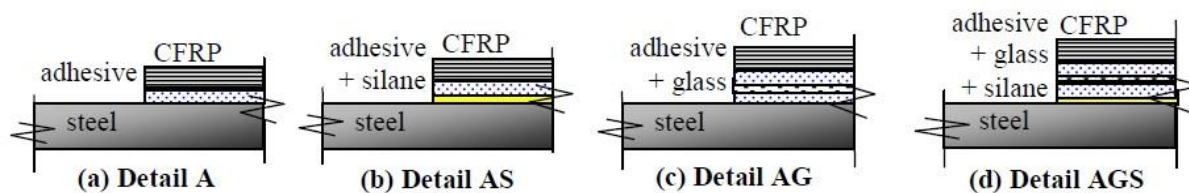


Σχήμα 3.16: Ειδικές διαμορφώσεις άκρων σύνδεσης ΙΟΠ κατά την (α) τυπική επίπεδη διάταξη, (β) μορφή σφήνας και (γ) μορφή ανεστραμμένης σφήνας [37]

Σημαντικός παράγοντας επίσης, πέρα από την αντοχή της σύνδεσης (bond strength), αποτελεί η περιβαλλοντική της ανθεκτικότητα (environmental durability). Η περιοχή της σύνδεσης, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, αποτελεί το πιο αδύναμο στοιχείο του συστήματος και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι τρεις βασικοί παράγοντες που προκαλούν επιδείνωση μιας τέτοιας σύνδεσης (bond deterioration) είναι: η εισροή υγρασίας στη διεπιφάνεια μεταξύ κόλλας και χάλυβα, η υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της κόλλας σύνδεσης και η πρόκληση γαλβανικής διάβρωσης (galvanic corrosion) της χαλύβδινης επιφάνειας στην περίπτωση επαφής της αποκλειστικά με ΙΟΠ από ίνες άνθρακα (CFRP).

Η περιβαλλοντική ανθεκτικότητα της σύνδεσης χάλυβα-ΙΟΠ μελετήθηκε από τους Mina Dawood, Murthy Guddati & Sami Rizkalla[14], σε μια προσπάθεια πειραματικής διερεύνησης της συμπεριφοράς τεσσάρων διαφορετικών διαμορφώσεων σύνδεσης. Οι ειδικές συνδέσεις που μελετήθηκαν και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.17 παρακάτω, ήταν α) η τυπική διάταξη σύνδεσης χάλυβα-ΙΟΠ μέσω μόνο της συνδετικής κόλλας, χωρίς κανένα πρόσθετο μέτρο ενίσχυσης της περιβαλλοντικής του ανθεκτικότητας (Detail A), β) η εφαρμογή στρώσης σιλανίου (silane) μεταξύ της επιφάνειας χάλυβα και κόλλας για ενίσχυση της ανθεκτικότητας της διεπιφάνειάς τους (Detail AS), γ) η προσθήκη μίας στρώσης ινών γυαλιού ενδιάμεσα στην κόλλα για να παρεμποδιστεί η επαφή χάλυβα-άνθρακα και η πρόκληση γαλβανικής διάβρωσης (Detail AG) και δ) ο συνδυασμός των δύο ειδικών διαμορφώσεων (Detail AGS).

Τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης ανέδειξαν την ευεργετική παρουσία τόσο των ινών υάλου όσο και της στρώσης σιλανίου στη μόρφωση της σύνδεσης. Αναφορικά με την καθαρή αντοχή της σύνδεσης, οι διαμορφώσεις AG και AGS που περιελάμβαναν στρώση ινών γυαλιού ενδιάμεσα, παρουσίασαν *βελτιωμένη αντοχή κατά 50%* σε σχέση με την τυπική μορφή (Detail A). Αυτό εξαιτίας του ρόλου ως ενίσχυση της κόλλας που φέρεται να αποκτά η στρώση γυαλιού ενδιάμεσα και η οποία καθυστερεί τη διάδοση της θραύσης της κόλλας. Σχετικά με την περιβαλλοντική ανθεκτικότητα της σύνδεσης, αποδείχθηκε ότι, αν και μετά από έκθεση ενός μήνα σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος η αντοχή της σύνδεσης (bond strength) σε όλες τις διατάξεις δεν μειώθηκε σημαντικά, μετά από έκθεση τεσσάρων μηνών οι μόνες διατάξεις σύνδεσης που παρέμειναν σχεδόν ανεπηρέαστες ήταν αυτές με τις στρώσεις σιλανίου, δηλαδή οι AS και AGS, αναδεικνύοντας την *κρισιμότητα της παρουσίας του σιλανίου* σχετικά με την ανθεκτικότητα της σύνδεσης. Συνεπώς, φαίνεται πως η ιδανική διαμόρφωση σύνδεσης, τόσο από πλευράς αντοχής όσο και ανθεκτικότητας, είναι η λεπτομέρεια διαμόρφωσης AGS, συνδυάζοντας την ύπαρξη των ινών υάλου και του σιλανίου στη λεπτομέρεια σύνδεσης.



Σχήμα 3.17: Ειδικές διαμορφώσεις σύνδεσης χάλυβα-CFRP αναφορικά με την αντοχή της σύνδεσης και την περιβαλλοντική της ανθεκτικότητα [14]

### **3.3 Ανασκόπηση της μέχρι σήμερα ερευνητικής ενασχόλησης πάνω στην ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών με ΙΟΠ σύνθετα υλικά**

Η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών σύνθετων υλικών (FRP) για την επισκευή και ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών -κυρίως κτιρίων και γεφυρών- είναι μια συνεχώς αυξανόμενη πρακτική που έχει εδραιωθεί στον κατασκευαστικό κλάδο έργων Πολιτικού Μηχανικού. Αν και η πλειονότητα εφαρμογών της μεθόδου έγκειται σε κατασκευές από ωπλισμένο σκυρόδεμα, η χρήση τους στον κλάδο των μεταλλικών κατασκευών φαίνεται να παρουσιάζει εξίσου ευεργετικά αποτελέσματα και η έρευνα αλλά και εφαρμογή τους σε αυτές γίνεται όλο και εντονότερη.

Τα εξαιρετικά μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά των ΙΟΠ τα καθιστούν μια εξαιρετική επιλογή για την ενίσχυση των μεταλλικών κατασκευών. Οι περισσότερες προσπάθειες εφαρμογής αυτών εστιάζουν στην καμπτική ενίσχυση μεταλλικών και σύμμικτων μελών από σκυρόδεμα και χάλυβα. Σε τέτοιες πρακτικές, το φύλλο ή το έλασμα του ΙΟΠ επικολλάται στην εφελκόμενη μεριά του μέλους προσδίδοντάς του περαιτέρω εφελκυστική αντοχή και εν τέλει αυξάνοντας την καμπτική του ικανότητα. Αντίστοιχη χρήση τους για ενίσχυση μελών υπό θλίψη δεν έχει ακόμη διερευνηθεί επαρκώς, αφενός λόγω της αρκετά μικρότερης θλιπτικής τους αντοχής και αφετέρου ίσως λόγω της αντίληψης ότι είναι ευάλωτα έναντι λυγισμού εξαιτίας του πολύ μικρού τους πάχους. Παρ' όλα αυτά, οι μελέτες που έχουν σημειωθεί δείχνουν ότι είναι δυνατόν να υπάρξει βελτίωση της συμπεριφοράς θλιβόμενων χαλύβδινων μελών έναντι τοπικού και καθολικού λυγισμού μέσω χρήσης ΙΟΠ σύνθετων υλικών.

Από το σύνολο των ινοπλισμένων πολυμερών σύνθετων υλικών, αυτά που χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών είναι τα ανθρακονήματα (CFRP). Ο λόγος είναι τα εξαιρετικά μηχανικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν. Εξάλλου είναι το μόνο είδος ΙΟΠ που παρουσιάζει ακαμψία συγκρίσιμη με αυτή του χάλυβα (μπορεί να φτάσει και σε διπλάσια τιμή μέτρου ελαστικότητας από αυτό του χάλυβα). Αναφορικά με τον προσανατολισμό των ινών, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται ΙΟΠ με ίνες μονής κατεύθυνσης, ενώ σχετικά με τη μορφή τους γίνεται χρήση είτε υφασμάτων είτε προεμποτισμένων ελασμάτων, ανάλογα και με τη διατομή του χαλύβδινου στοιχείου.

#### **3.3.1 Καμπτική ενίσχυση χαλύβδινων μελών με ΙΟΠ**

Η καμπτική ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών με ΙΟΠ σύνθετα υλικά είναι μία πρακτική που έχει αρχίσει να μελετάται έντονα την τελευταία δεκαετία, λόγω των εξαιρετικών εφελκυστικών ιδιοτήτων του ΙΟΠ και της μεγάλης ευκολίας κατά την εφαρμογή του. Η συνήθης πρακτική είναι να ενισχύεται η εφελκόμενη πλευρά του χαλύβδινου μέλους, επικολλώντας εξωτερικά αυτής τη στρώση του σύνθετου υλικού.

Η μορφή ΙΟΠ που χρησιμοποιείται περισσότερο σε τέτοιες εφαρμογές είναι υπό μορφή προεμποτισμένων ελασμάτων-πλακιδίων (CFRP pre-impregnated strips/plates/laminates), λόγω του μεγαλύτερου βαθμού συμμετοχής των ινών που παρουσιάζουν, με συνέπεια την εμφάνιση καλύτερων μηχανικών χαρακτηριστικών. Βέβαια, αυτό δεν αποκλείει την εφαρμογή ΙΟΠ υπό μορφή υφάσματος με επί τόπου εμποτισμό του· μάλιστα σε ορισμένες μορφές διατομών αποτελεί τη μόνη επιλογή λόγω της ευκολίας προσαρμογής τους σε

οποιαδήποτε επιφάνεια, πράγμα αδύνατο κατά την εφαρμογή προεμποτισμένων μορφών ΙΟΠ όπου η προς ενίσχυση επιφάνεια απαιτείται να είναι επίπεδη.

Οι ερευνητικές αναζητήσεις πάνω στη συγκεκριμένη μορφή ενίσχυσης είναι αρκετές και τα αποτελέσματά τους αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα αυτής. Πιο συγκεκριμένα, οι Pierluigi Colombi και Carlo Poggi [13] μελέτησαν πειραματικά, αναλυτικά και αριθμητικά τη συμπεριφορά αμφιέριστων χαλύβδινων δοκών, διατομής HEA, ενισχυμένων στο εφελκόμενο κάτω πέλμα τους με προεμποτισμένα ελάσματα ανθρακονημάτων μίας διεύθυνσης. Αυτές εξετάστηκαν έναντι κάμψης τριών σημείων (3 point bending) και εξετάστηκε η μεταβολή τόσο της καμπτικής αντοχής όσο και της καμπτικής ακαμψίας του συστήματος συγκριτικά με την αντίστοιχη μη ενισχυμένη δοκό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε όλες τις διατάξεις που εξετάστηκαν επετεύχθη αύξηση τόσο της καμπτικής αντοχής του συστήματος όσο και της δυσκαμψίας της δοκού. Αναλυτικότερα, μεγαλύτερη αύξηση της καμπτικής αντοχής παρατηρήθηκε κατά την εφαρμογή δύο στρώσεων ενίσχυσης και ήταν της τάξεως του 23%, ενώ αναφορικά με τη δυσκαμψία του συστήματος, αύξηση της ελαστικής δυσκαμψίας επετεύχθη μόνο κατά την εφαρμογή δύο στρώσεων ΙΟΠ (αύξηση 14%), αν και η πλαστική δυσκαμψία του συστήματος αυξήθηκε σημαντικά σε όλες τις περιπτώσεις ενίσχυσης (μία-δύο στρώσεις).

Οι Jun Deng και Marcus M.K. Lee [16] μελέτησαν τη συμπεριφορά σε κάμψη (κάμψη τριών σημείων) ενισχυμένης μεταλλικής αμφιέριστης δοκού διατομής διπλού ταν με επικόλληση μίας στρώσης ελάσματος CFRP στο εφελκόμενο πέλμα της. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι επιτεύχθηκε έως και 30% αύξηση (στην περίπτωση εφαρμογής του ελάσματος σε όλο το μήκος του πέλματος) του φορτίου που μπορεί να αναλάβει το σύστημα συγκριτικά με τη μη ενισχυμένη χαλύβδινη δοκό, αν και η ελαστική δυσκαμψία της ενισχυμένης δοκού δεν υπέστη κάποια ιδιαίτερη αύξηση.

Σε μια άλλη πειραματική διερεύνηση, οι Dag Linghoff, Reza Haghani και Mohammad Al-Emrani [27] εξέτασαν την καμπτική συμπεριφορά ενισχυμένων χαλύβδινων δοκών διατομής HEA. Οι τέσσερις διατομές που ενισχύθηκαν στο κάτω πέλμα τους με διαφορετικής ποιότητας ελασμάτων CFRP, υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά της καθαρά χαλύβδινης διατομής. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ικανοποιητική αύξηση της καμπτικής αντοχής της δοκού σε όλες τις περιπτώσεις, με τη μεγαλύτερη να είναι της τάξης του 20% συγκριτικά με τη μη ενισχυμένη, ενώ η αστοχία του συστήματος ήταν στο θλιβόμενο άνω πέλμα της διατομής. Σχετικά με την καμπτική ακαμψία τους, αυτή παρέμεινε σχεδόν αμετάβλητη, αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς η στρώση της ενίσχυσης αποτελούσε πολύ μικρό ποσοστό της χαλύβδινης διατομής (έως 7,5% αυτής).

Μία ακόμη προσπάθεια διερεύνησης του ζητήματος πραγματοποιήθηκε από τους Kambiz Narmashiri, N.H. Ramli Sulong και Mohd Zamin Jumaat [29], οι οποίοι εξέτασαν επτά διαφορετικές διατάξεις ενίσχυσης χαλύβδινης διατομής μορφής διπλού ταν. Αυτές εξετάστηκαν έναντι κάμψης τεσσάρων σημείων και τα αποτελέσματά τους συγκρίθηκαν με αυτά της μη ενισχυμένης. Ο τύπος ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε εδώ ήταν ΙΟΠ από ίνες άνθρακα σε μορφή ελασμάτων (CFRP strips) τα οποία επικολλήθηκαν στο εφελκόμενο κάτω πέλμα της αμφιέριστου δοκού. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διενεργήθηκαν γίνεται φανερό ότι σε όλες τις περιπτώσεις η καμπτική ικανότητα της δοκού αυξήθηκε, ενώ η αύξηση του πάχους της ενίσχυσης προσέδιδε περαιτέρω καμπτική αντοχή, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις οδήγησε σε αστοχία λόγω αποκόλλησης της ενίσχυσης. Η μεγαλύτερη αύξηση φορτίου παρατηρήθηκε λόγω της ενίσχυσης ήταν 38%.

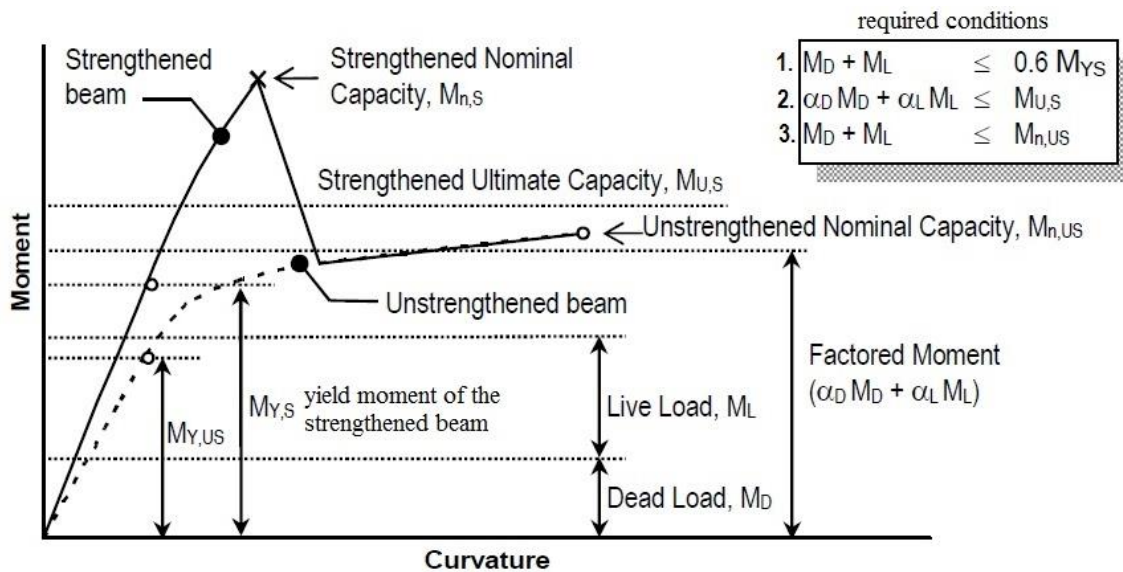
Άλλες αντίστοιχες έρευνες διεξήχθησαν και σε σύμμικτες δοκούς, ενισχύοντας το κάτω πέλμα της χαλύβδινης δοκού με ΙΟΠ από ίνες άνθρακα. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Sen R., Liby L. και Mullins G. [35], των Tavakkolizadeh M. και Saadatmanesh H. [39] και των D. Schnerch, M. Dawood, E. Sumner και S. Rizkalla [34],

οι οποίες έδειξαν σημαντική αύξηση στην καμπτική αντοχή των δοκών λόγω της ενίσχυσης, με τα ποσοστά να ποικίλουν ανάλογα με την ποιότητα και το πάχος του ΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκε.

Όλη αυτή η συνεχώς αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα που παρατηρείται στον κλάδο των ενισχύσεων μεταλλικών κατασκευών με ΙΟΠ σύνθετα υλικά, προμηνύει πως σύντομα θα υπάρχει η απαραίτητη γνώση ώστε να συνταχθεί το απαραίτητο κανονιστικό πλαίσιο που θα διέπει το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων. Αν και ένα τέτοιο πρότυπο μέχρι στιγμής απουσιάζει, παρ' όλα αυτά υπάρχουν ορισμένα *σχεδιαστικά βοηθήματα* (design guidelines) για την καμπτική ενίσχυση χαλύβδινων μελών με ΙΟΠ. Τέτοια αποτελούν τα κάτωθι:

- *Design Guidelines for the Use of HM Strips: Strengthening of steel concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips* των Schnerch, Dawood και Rizkalla [33]

Πρόκειται για ένα σχεδιαστικό βοήθημα που επικεντρώνεται στην ενίσχυση σύμμικτων μελών μέσω επικόλλησης ελασμάτων ΙΟΠ από ίνες άνθρακα στο κάτω πέλμα της χαλύβδινης δοκού. Η φιλοσοφία σχεδιασμού σύμφωνα με αυτό βασίζεται σε τρεις απαιτήσεις που πρέπει να διέπουν το ενισχυμένο σύστημα. Αυτές φαίνονται στο Σχήμα 3.18 παρακάτω και θέτονται έτσι ώστε ικανοποίησή τους 1) να διασφαλίζει ότι το ενισχυμένο μέλος παραμένει ελαστικό, 2) να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της ενίσχυσης και 3) να διασφαλίζει ότι το μέλος παραμένει ασφαλές ακόμα και στην περίπτωση ολοκληρωτικής απώλειας της ενίσχυσης. Η ανάλυση γίνεται μέσω του διαγράμματος τάσεων της διατομής, το οποίο προκύπτει αφού υπολογιστεί η καμπυλότητα αυτής. Τα μη χαλύβδινα μέρη της διατομής (πλάκα από σκυρόδεμα και ενισχυτική στρώση ΙΟΠ) μετασχηματίζονται σε ισοδύναμα χαλύβδινα και οι όποιοι υπολογισμοί του ουδέτερου άξονα και της καμπυλότητας της διατομής γίνονται με βάση την ισοδύναμη διατομή. Ο υπολογισμός της ονομαστικής ροπής αντοχής της διατομής,  $M_{n,s}$ , πραγματοποιείται αφού υπολογιστούν οι εσωτερικές δυνάμεις που δρουν στη διατομή, έπειτα από ολοκλήρωση των αντιστοίχων διαγραμμάτων τάσεων. Τέλος, λόγω του πιθανού ψαθυρού τρόπου αστοχίας κατά τη θραύση του ΙΟΠ, η καμπτική αντοχή της διατομής,  $M_{U,s}$ , προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την ονομαστική με ένα μειωτικό συντελεστή  $\phi = 0,75$ .



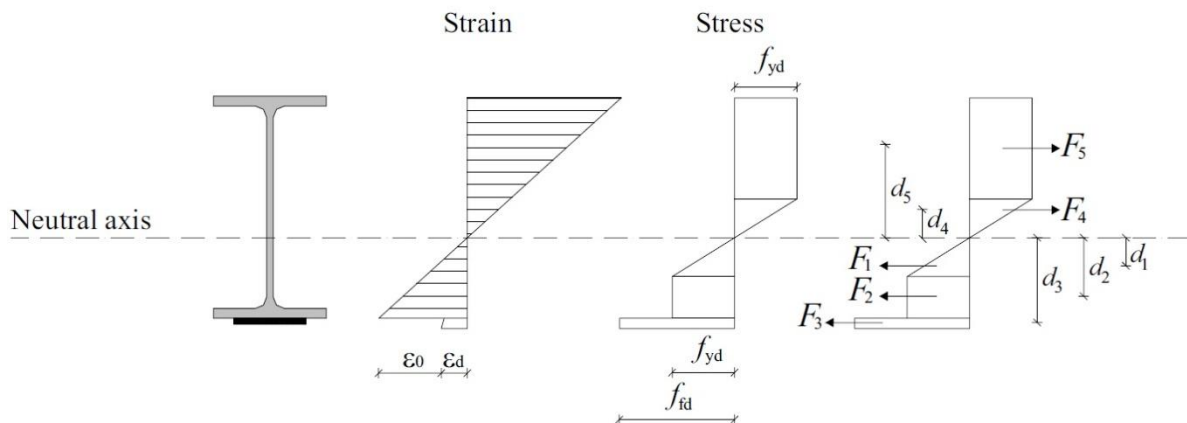
Σχήμα 3.18: Απαιτήσεις φόρτισης και τυπικό διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων ενός ενισχυμένου με ΙΟΠ μεταλλικού στοιχείου

- *CNR-DT 202/2005: Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Metallic Structures* [12]

Σύμφωνα με αυτό το σχεδιαστικό εγχειρίδιο, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος χάλυβα-ΙΟΠ έναντι κάμψης βασίζεται σε τέσσερις βασικές παραδοχές: 1) στην ύπαρξη τέλειας σύνδεσης μεταξύ του χαλύβδινου μέλους και του ΙΟΠ σύνθετου υλικού, 2) στη γνωστή αρχή επιπεδότητας των διατομών κατά Bernoulli, 3) στην παράβλεψη του πάχους του ΙΟΠ θεωρώντας ότι η στάθμη του ταυτίζεται με την επιφάνεια του χαλύβδινου στοιχείου στο οποίο επικολλάται και 4) στην αγνόηση της συνεισφοράς της συνδετικής κόλλας στη δυσκαμψία του συστήματος, λόγω της πολύ μικρής τιμής του μέτρου ελαστικότητας αυτής συγκριτικά με των άλλων στοιχείων και του πολύ μικρού πάχους της στρώσης της.

Η απαίτηση στην οριακή κατάσταση αστοχίας, σύμφωνα με το CNR, είναι η ικανοποίηση της γνωστής συνθήκης  $M_{sd} \leq M_{Rd}$  σε κάθε σημείο του μέλους, όπου  $M_{sd}$  είναι η εκάστοτε δρώσα ροπή και  $M_{Rd}$  η ροπή αντοχής της διατομής. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής βασίζεται και εδώ στην ανάλυση των διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων αυτής. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται η υπόθεση ότι κάποιο από τα υλικά του συστήματος αναπτύσσει την παραμόρφωση αστοχίας του στην ακραία του ίνα και σύμφωνα με αυτό διαμορφώνεται το διάγραμμα παραμορφώσεων όλης της διατομής. Έτσι, έπειτα γίνονται δοκιμές για τη θέση του ουδέτερου άξονα της διατομής, μέχρις ότου επιτευχθεί ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων από ολοκλήρωση του διαγράμματος τάσεων. Αφού ικανοποιηθεί η ισορροπία των δυνάμεων, η ροπή αντοχής υπολογίζεται εύκολα ως προς τον ουδέτερο άξονα της διατομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19 ακολούθως.





Σχήμα 3.19: Διαδικασία υπολογισμού ροπής αντοχής τυπικού συστήματος χαλύβδινης δοκού με εξωτερικά επικολλώμενη στρώση ΙΟΠ, σύμφωνα με το εγχειρίδιο CNR

- Elasto-plastic analysis of steel beams reinforced by carbon fibre reinforced polymer strips, εργασία των Massimiliano Bocciarelli και Pierluigi Colombi [8]

Στη συγκεκριμένη εργασία, η μέθοδος που αναπτύχθηκε ήταν μία ελαστοπλαστική βήμα-προς-βήμα ανάλυση (incremental elasto-plastic analysis) με βάση το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων της διατομής σε κάθε βήμα. Ο λόγος που εξετάστηκε μία τέτοιου είδους προσέγγιση ήταν ότι δεν θα ήταν ορθό να υιοθετηθεί ούτε μία γραμμικά ελαστική συμπεριφορά του συστήματος ούτε μία ανάλυση οριακών καταστάσεων αστοχίας, λόγω της ύπαρξης στο ίδιο σύστημα διαφορετικής συμπεριφοράς υλικών (απ' τη μία το ΙΟΠ που παρουσιάζει τελείως γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση του και από την άλλη ο χάλυβας που αποτελεί υλικό με ελαστοπλαστική συμπεριφορά και πολύ μεγάλη πλαστικότητα). Σε κάθε βήμα, με βάση την εκάστοτε προκύπτουσα καμπυλότητα από την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων της διατομής και τη συμβατότητα των παραμορφώσεων αυτής, διενεργείται έλεγχος των παραμορφώσεων των ακραίων ινών κάθε υλικού για να διαπιστωθεί αν επέρχεται αστοχία του συστήματος στο συγκεκριμένο βήμα.

### 3.3.2 Ενίσχυση αξονικά θλιβόμενων χαλύβδινων μελών με ΙΟΠ

Σε αντίθεση με την περίπτωση καμπτικής ενίσχυσης χαλύβδινων μελών, η ενίσχυση αξονικά θλιβόμενων μεταλλικών στοιχείων με ΙΟΠ είναι πολύ πιο περιορισμένη ερευνητικά, ενώ σε επίπεδο εφαρμογής ή/και δημιουργίας κάποιου σχεδιαστικού εγχειριδίου η δραστηριότητα είναι μηδενική. Παρ' όλα αυτά, αυτό το γεγονός δε σημαίνει ότι η μέχρι στιγμής ερευνητική δραστηριότητα δεν έχει φέρει επιθυμητά αποτελέσματα για χρήση ΙΟΠ σύνθετων υλικών κατά αυτό τον τρόπο.

Οι περισσότερες πειραματικές αναζητήσεις αφορούν την ενίσχυση είτε κοίλων είτε ελαφρών μεταλλικών διατομών ψυχρής έλασης, με κύρια επιδίωξη την αναστολή της εκάστοτε μορφής λυγισμού. Βέβαια, αυτό δε σημαίνει ότι δεν έχει διερευνηθεί και η ενίσχυση άλλου τύπου μελών που υπόκεινται σε θλίψη. Κυρίως, για τέτοιου τύπου ενίσχυση, χρησιμοποιούνται ανθρακονήματα σε μορφή υφασμάτων, τυλίγοντας ολόκληρη τη διατομή, σε μια προσπάθεια περισφιγής αυτής ώστε να αυξηθεί η θλιπτική ικανότητα του μέλους.

Αναφορικά με την ενίσχυση κοίλων χαλύβδινων διατομών, οι Bambach et al [6] μελέτησαν τη συμπεριφορά ενισχυμένων χαλύβδινων μελών ψυχρής έλασης, κοίλης

τετραγωνικής διατομής, υποκείμενα σε αξονική θλίψη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η οριακή αντοχή των μελών (διαφόρων λυγηροτήτων) αυξήθηκε έως και δύο φορές λόγω της ενίσχυσης με στρώσεις CFRP, διότι η παρουσία τους καθυστέρησε την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στη συγκεκριμένη εργασία, αναπτύχθηκε και μια μέθοδος εκτίμησης της αντοχής των ενισχυμένων μελών, βασισμένη στη θεωρία σύνθετων πλακών (composite plate theory). Σύμφωνα με αυτή, αρχικά υπολογίζεται η κρίσιμη ελαστική τάση λυγισμού του ενισχυμένου μέλους,  $f_{cr}$ , μέσω σχέσης που λαμβάνει υπόψη τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόσο του χαλύβδινου μέλους όσο και της στρώσης ΙΟΠ. Μέσω αυτής, ευρίσκεται η λυγηρότητα του σύνθετου συστήματος,  $\lambda_c$ , υποθέτοντας ότι τόσο η χαλύβδινη διατομή όσο και του ΙΟΠ είναι ομοιογενείς στρώσεις, τέλεια συνδεδεμένες μεταξύ τους (perfectly bonded), και τελικά υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή του ενισχυμένου μέλους,  $P_{UC}$ .

Οι Sreedhar Kalavagunta, Sivakumar Naganathan και Kamal Nasharuddin Bin Mustapha, στις εργασίες τους [24], [25] και [26], εξέτασαν πειραματικά τη συμπεριφορά αξονικά θλιβόμενων χαλύβδινων μελών ψυχρής έλασης, διατομής C, ενισχυμένων εξωτερικά με επικολλημένη στρώση υφάσματος CFRP. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι με μία στρώση ενίσχυσης τέτοιου τύπου επιτυγχάνεται αύξηση της θλιπτικής αντοχής των χαλύβδινων μελών κατά περίπου 11%. Επίσης, αναπτύχθηκαν και τρία μοντέλα εκτίμησης της θλιπτικής ικανότητας ενός τέτοιου συστήματος ενίσχυσης, ένα με βάση τον Ευρωκώδικα 3 (EC3) και ένα με βάση τον Ινδικό κανονισμό IS801-1975, τα οποία επαλήθευσαν με μικρή απόκλιση τα συγκεκριμένα πειράματα και ένα με βάση τις αμερικάνικες διατάξεις σχεδιασμού χαλύβδινων μελών ψυχρής έλασης (AISI, 2007).

Άλλες χρήσιμες εργασίες πάνω στην ενίσχυση θλιβόμενων χαλύβδινων μελών κοίλης διατομής με CFRP διενεργήθηκαν από τους Teng et al. [41], Hong et al. [21] και Shaat and Fam [36], εμφανίζοντας πολύ θετικά αποτελέσματα. Ευεργετική χρήση αυτού του τύπου ενίσχυσης παρατηρείται και κατά την ενίσχυση κοίλων κυκλικών χαλύβδινων μεταλλικών διατομών αξονικά θλιβόμενων μελών, όπως μελέτησαν πειραματικά οι Jimmy Haedir και Xiao-Ling Zhao [20]. Η διερεύνηση αφορούσε την ενίσχυση κοντών χαλύβδινων κυκλικών κολώνων με υφάσματα από ανθρακόνημα.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά έναντι αξονικής θλίψης χαλύβδινων μελών *διατομής ισοσκελούς γωνιακού*, ενισχυμένων με CFRP, υπάρχουν δύο πειραματικές εργασίες που έχουν διενεργηθεί. Αυτές είναι οι [7] και [38], με την πρώτη να αφορά την εφαρμογή μίας στρώσης ανθρακούφασματος σε *διαβρωμένο χαλύβδινο μέλος γωνιακής διατομής*, τυλίγοντας όλη τη διατομή του με αυτό. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το ενισχυμένο μέλος αστόχησε σε ένα θλιπτικό φορτίο 11,8% αυξημένο σε σχέση με το μη ενισχυμένο διαβρωμένο μέλος.

Η δεύτερη πειραματική εργασία [38], επικεντρώνεται καθαρά στην ενίσχυση του χαλύβδινου μέλους, χωρίς να υπεισέρχονται θέματα διάβρωσης αυτού. Ο τύπος ενίσχυσης που εφαρμόστηκε ήταν της μορφής προεμποτισμένων ελασμάτων από ίνες άνθρακα (CFRP plates), με το πάχος του καθενός να είναι το μισό του πάχους του σκέλους του γωνιακού. Στο κάθε σκέλος της γωνιακής διατομής επικολλήθηκαν εξωτερικά από δύο στρώσεις ελασμάτων από ανθρακόνημα, εκτεινόμενες σε όλο το μήκος του μέλους και πετυχαίνοντας το πάχος της ενίσχυσης να είναι ίσο με το πάχος των σκελών της γωνιακής χαλύβδινής διατομής. Από τα πειράματα κεντρικής θλίψης που εκπονήθηκαν, για διαφόρων μηκών δοκίμια με αυτή τη διάταξη ενίσχυσης, βρέθηκε ότι η θλιπτική αντοχή των μελών αυξήθηκε αισθητά σε όλες τις περιπτώσεις λόγω της εφαρμογής της ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, η αντοχή των ενισχυμένων μελών ήταν 1,9-3 φορές αυτή των μη ενισχυμένων χαλύβδινων στοιχείων. Ο τρόπος αστοχίας σε όλες τις περιπτώσεις ήταν λόγω απότομης θραύσης του ενισχυτικού ελάσματος στο μέγιστο φορτίο, ενώ τα μέλη

υπέστησαν ελαστικό λυγισμό περί τον ασθενή άξονα της διατομής. Επίσης, από τα αποτελέσματα των πειραμάτων έγινε φανερό ότι παρότι υπήρξε αύξηση της δυσκαμψίας των ενισχυμένων μελών, η δυστένεια αυτών παρέμεινε αμετάβλητη. Τέλος, απεδείχθη ότι, στην ελαστική περιοχή, η φέρουσα ικανότητα του ενισχυμένου μέλους μπορεί να εκτιμηθεί με καλή προσέγγιση από τις σχέσεις του ιαπωνικού κανονισμού (*AIJ*) σχετικά με τον καμπτικό λυγισμό θλιβόμενων μελών, προσμετρώντας τη συνεισφορά της ενίσχυσης.



## 4 Πειράματα εφελκυσμού ανθρακονημάτων (δοκιμές υλικού)

### 4.1 Εισαγωγή

Προτού ξεκινήσει η πειραματική διερεύνηση του συστήματος χάλυβα-ανθρακονήματος, κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η συμπεριφορά αποκλειστικά της ενισχυτικής στρώσης. Καθώς η ενισχυτική στρώση που εφαρμόστηκε, κατασκευάστηκε με χειρωνακτικό τρόπο (hand lay-up), υπήρχε αβεβαιότητα σχετικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου πολυμερούς που επρόκειτο να εφαρμοστεί. Παρ' ότι τα τεχνικά φυλλάδια, τόσο του υφάσματος των ινών όσο και της εποξειδικής ρητίνης εμποτισμού, παρείχαν τις απαραίτητες πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες αυτών, οι τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού ινών-ρητίνης δεν ήταν δυνατόν να εκτιμηθούν από πριν με ακρίβεια. Αν και μέσω του *Νόμου της Σύνθεσης*, ο οποίος παρουσιάστηκε εκτενώς στην υποενότητα 3.2.3 του προηγούμενου κεφαλαίου, αξιοποιώντας τις σχέσεις (3.1) έως (3.5) είναι εφικτή μία αρκετά ακριβής εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού υλικού, είναι πάντα ορθότερο, καθώς και ακριβέστερο, οι τιμές τους να καθορίζονται από πειραματικά αποτελέσματα.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, λοιπόν, περιγράφεται η όλη πειραματική διαδικασία που διενεργήθηκε με σκοπό να διαπιστωθούν τα σημαντικότερα μηχανικά χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού από ίνες άνθρακα με το οποίο ενισχύθηκαν μετέπειτα οι χαλύβδινες δοκοί. Αναλυτικότερα, γίνεται αναφορά των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, περιγράφεται αναλυτικά η κατασκευή των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος αναφέρονται -και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των αναλυτικών σχέσεων- τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Ο αριθμός των δοκιμίων που εξετάστηκαν, ο τρόπος κατασκευής τους, οι διαστάσεις τους, ο ρυθμός φόρτισής τους, καθώς και οποιαδήποτε άλλη λεπτομέρεια, τόσο κατά την προετοιμασία όσο και κατά την εκτέλεση των πειραμάτων εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν, καθορίστηκαν από τα αντίστοιχα πρότυπα ISO. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία ήταν σε απόλυτη συμφωνία με τα πρότυπα *ISO 527-1* [22], το οποίο παρέχει όλες τις γενικές αρχές κατά τον καθορισμό των εφελκυστικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών, και *ISO 527-5* [23], το οποίο ορίζει τις πειραματικές συνθήκες για ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά με ίνες μονής κατεύθυνσης.

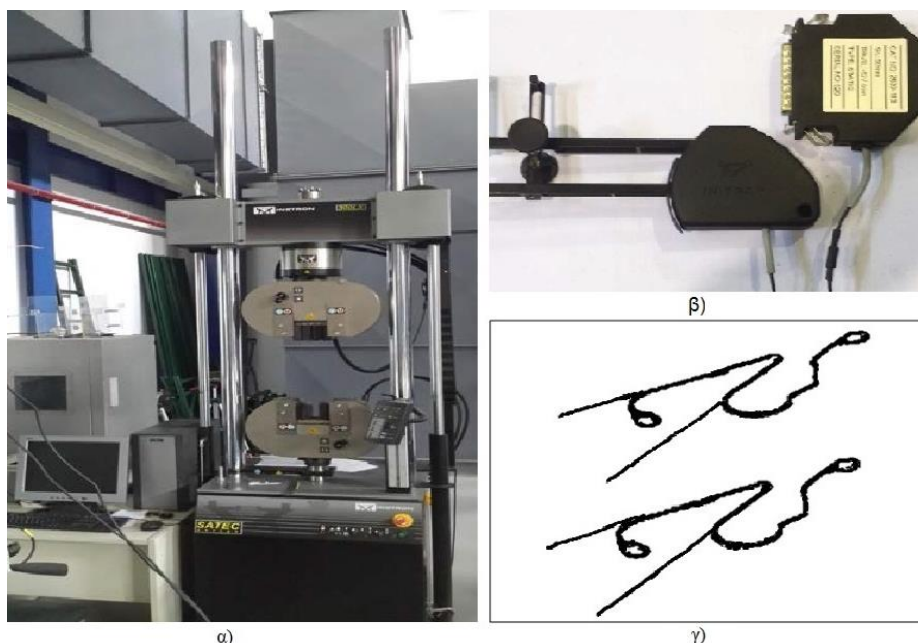
Ακολουθώντας τις απαιτήσεις του προτύπου *ISO 527-5*, κατασκευάστηκαν 5 δοκίμια υλικού (ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός), τα οποία υποβλήθηκαν σε εφελκυστική αξονική καταπόνηση ώστε να διαπιστωθούν τα εξής μηχανικά χαρακτηριστικά τους: 1) το μέτρο ελαστικότητας Young  $E_t$ , 2) η εφελκυστική αντοχή  $\sigma_M$  και 3) η μέγιστη ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση  $\varepsilon_M$ . Λόγω της ψαθυρότητας του υλικού, δεν παρατηρήθηκε διαρροή αυτού. Η καταπόνηση ήταν υπό μορφή επιβαλλόμενης εφελκυστικής παραμόρφωσης, με ρυθμό 2 mm/min, όπως ορίζει το πρότυπο *ISO 527-5*. Η κατασκευή των δοκιμίων καθώς και η εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά οι διατάξεις των πειραμάτων, τα χαρακτηριστικά των μελών και των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα της διαδικασίας.

## 4.2 Περιγραφή συσκευών πειράματος

Για την εκτέλεση των πειραμάτων εφελκυσμού, προκειμένου να καθοριστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του τύπου ενίσχυσης που εφαρμόστηκε στις χαλύβδινες δοκούς, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες συσκευές του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών:

1. *Μηχανή εφελκυσμού Instron 300LX* (Σχήμα 4.1α). Πρόκειται για μία υδραυλική μηχανή με δυνατότητα επιβολής φορτίου έως και 300 kN. Αποτελείται από δύο κεφαλές των 120 kg εκ των οποίων η μία είναι πακτωμένη και συνδεδεμένη με τη δυναμοκυψέλη ενώ η άλλη έχει τη δυνατότητα κίνησης καθ' ύψος. Κάθε κεφαλή διαθέτει ένα ζευγάρι από αρπάγες διαφόρων διαστάσεων ανά περίπτωση που σκοπό έχουν την ακινητοποίηση των άκρων του δοκιμίου. Η μηχανή διαθέτει επίσης ψηφιακό μετρητή (encoder), ενώ είναι συνδεδεμένη με Η/Υ μέσω του οποίου γίνεται ο χειρισμός της.
2. *Επιμηκυνσιόμετρο* της εταιρείας Instron (Σχήμα 4.1β). Μέσω αυτού επιτεύχθηκε η, όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών υλικού. Οι δυνατότητες μέτρησης του συγκεκριμένου επιμηκυνσιόμετρου φτάνουν μέχρι και τα 50 mm επιμήκυνσης με ακρίβεια στο χιλιοστό του χιλιοστού. Ανάλογα με το πάχος του προς μέτρηση δοκιμίου, επιλέγονται και τα αντίστοιχα «τσιμπίδια» (Σχήμα 4.1γ), που σκοπό έχουν την τοποθέτηση του επιμηκυνσιόμετρου πάνω στο εξεταζόμενο στοιχείο.
3. *Πριονοκορδέλα μετάλλου* της εταιρείας IMET, με κωδικό μοντέλου BS280/60 (Σχήμα 4.2). Με αυτό το μηχάνημα κόπηκαν, από ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου, 20 πανομοιότυπα ορθογώνια πλακίδια (tabs), συγκεκριμένων διαστάσεων<sup>10</sup>, τα οποία έπειτα επικολλήθηκαν στα άκρα των δοκιμίων πάνω-κάτω. Αυτό έγινε με σκοπό να αποτρέψουν την πιθανότητα θραύσης των «γυμνών» άκρων τους κατά το «κλείδωμα» των αρπαγών της μηχανής όταν τοποθετηθεί το δοκίμιο σε αυτή.



Σχήμα 4.1: Συσκευές πειραματικής διαδικασίας δοκιμής υλικού: α) μηχανή εφελκυσμού Instron 300LX, β) επιμηκυνσιόμετρο Instron και γ) «τσιμπίδια» επιμηκυνσιόμετρου

<sup>10</sup> Οι διαστάσεις των πλακιδίων ασφαλείας (tabs) καθορίστηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ISO 527-5.



Σχήμα 4.2: Πρινοκορδέλα IMET

### 4.3 Κατασκευή πειραματικών δοκιμίων

Για την κατασκευή των δοκιμίων υλικού, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά: α) πλεκτό ύφασμα με ίνες άνθρακα μονής διεύθυνσης σε μορφή ρολό, της εταιρείας Sika Hellas ABEE, υπό την εμπορική ονομασία *SikaWrap®Hex230C* και β) εποξειδική ρητίνη εμποτισμού δύο συστατικών (βασική ρητίνη και αντίστοιχος σκληρυντής), της εταιρείας Sintecno, με την εμπορική ονομασία *Sinmast S2WV*. Τα δύο αυτά υλικά φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Ύφασμα ινών άνθρακα μονής διεύθυνσης (αριστερά) και συστατικά εποξειδικής ρητίνης εμποτισμού (δεξιά) που χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία των δοκιμίων σύνθετου υλικού

Πίνακας 4.1: Μηχανικές ιδιότητες χρησιμοποιηθέντων ξηρών ινών και εποξειδικής ρητίνης

Υλικό	Εμπορική ονομασία	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Πάχος (mm)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
Ίνες άνθρακα	SikaWrap HEX-230C	1,82	0,129	4000 <sup>11</sup>	230000 <sup>11</sup>	1,70 <sup>11</sup>
Εποξειδική ρητίνη	Sinmast S2WV	1,15	N/A	N/A	≥2000	5,14

Τα κυριότερα μηχανικά χαρακτηριστικά των ξηρών ινών άνθρακα και της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον παραπάνω Πίνακα 4.1. Οι τιμές τους παρέχονται στα επίσημα τεχνικά φυλλάδια που εκδίδει ο προμηθευτής του εκάστοτε προϊόντος και προκύπτουν σύμφωνα με την ανά περίπτωση ευρωπαϊκή τεχνική προδιαγραφή.

Όλη η πειραματική διαδικασία των δοκιμών υλικού, για τη διαπίστωση των μηχανικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού, προετοιμάστηκε και εκτελέστηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του πρότυπου *ISO 527-5* [23], το οποίο αναφέρεται σε πειράματα εφελκυσμού πάνω σε ΙΟΠ σύνθετα υλικά με ίνες μονής διεύθυνσης.

Επιλέχθηκε να εξεταστεί ο ελάχιστος απαιτούμενος από το πρότυπο αριθμός δοκιμών, τουτέστιν πέντε δοκίμια υλικού, των οποίων οι απαιτούμενες διαστάσεις (μήκος, πλάτος, πάχος) καθορίστηκαν από τις διατάξεις του *ISO 527-5*. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις για το πάχος των δοκιμών, εκτιμήθηκε ότι το κάθε ένα θα πρέπει να αποτελείται από δύο ορθογώνιες λωρίδες ανθρακονήματος (CFRP), εμποτισμένες με εποξειδική ρητίνη, διαμορφώνοντας το τελικό προς εξέταση στοιχείο.

Συνεπώς, αρχικά κόπηκαν με αιχμηρό κοπίδι/λεπίδα, από το ρολό με το πλεκτό ύφασμα ινών άνθρακα, 10 ορθογώνιες λωρίδες, μήκους 250 mm, πλάτους περίπου 13 mm (για κάθε δοκίμιο κόπηκαν 3 στημόνια από το ρολό) και πάχους 0,12 mm η καθεμία. Αν και οι απαιτήσεις για τα τελικά μήκη και πλάτη των δοκιμών καθορίζονται εξαρχής από το κόστος των λωρίδων ινών, η απαίτηση του προτύπου για το πάχος αυτών δεν είναι εφικτό να καθορίζεται επακριβώς από το κόστος των λωρίδων, λόγω του γεγονότος ότι αυτές θα εμποτιστούν μετέπειτα με τη ρητίνη. Γι αυτό το λόγο, αποφασίστηκε το κάθε δοκίμιο να αποτελείται από δύο στρώσεις ινών, με την προοπτική μετά τον εμποτισμό τους με τη ρητίνη το τελικό πάχος των δοκιμών να καλύπτει την αντίστοιχη απαίτηση του *ISO*.

Στη συνέχεια, σειρά είχε η δημιουργία των τελικών προς εξέταση δοκιμών, δηλαδή ο εμποτισμός των ινών άνθρακα με την εποξειδική ρητίνη, έτσι ώστε να παραχθεί το τελικό σύνθετο υλικό. Αποφασίστηκε να δημιουργηθούν 100 γραμμάρια εποξειδικής ρητίνης, η παρασκευή της οποίας έγινε αναμιγνύοντας 63 γραμμάρια βασικής ρητίνης (συστατικό Α) με 37 γραμμάρια σκληρυντή (συστατικό Β), σύμφωνα με την απαίτηση για αναλογία ανάμιξης (%) των δύο συστατικών ρητίνης/σκληρυντή ίση με 63/37 κατά βάρος (απαιτούμενη αναλογία από τον προμηθευτή). Η ανάμιξη πραγματοποιήθηκε χειρονακτικά, ανακατεύοντας για 2-3 λεπτά με γρήγορο ρυθμό τα δύο συστατικά μέσα σε ειδικό τεμάχιο, μέχρις ότου το μίγμα ομογενοποιηθεί.

Αναφορικά με τη διαδικασία παραγωγής, πριν αυτή ξεκινήσει, η πλαστική επιφάνεια πάνω στην οποία θα γινόταν ο εμποτισμός των ινών με τη ρητίνη, διαστρώθηκε ολοκληρωτικά, μέσω απλού πινέλου, με μία στρώση PVA. Αυτό είναι ένα άχρωμο και άοσμο θερμοπλαστικό πολυμερές, το οποίο χρησιμοποιήθηκε πριν την εφαρμογή της

<sup>11</sup> Τιμές κατά τη διαμήκη διεύθυνση των ινών.



ρητίνης έτσι ώστε μετά τη σκλήρυνση των δοκιμίων να είναι εύκολη η αποκόλληση αυτών από την πλαστική επιφάνεια-βάση.

Η διαδικασία κατασκευής των ΙΟΠ σύνθετων υλικών δρομολογήθηκε με την ακόλουθη σειρά. Αρχικά, επαλείφθηκε μία στρώση από την εποξειδική ρητίνη που είχε ετοιμαστεί ακριβώς πριν, σε όλη την -περασμένη με PVA- επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετούνταν τα ανθρακονήματα. Αφού διαστρώθηκε όλη η πλαστική επιφάνεια με την εποξειδική ρητίνη, τοποθετήθηκαν οι 5 πρώτες ορθογώνιες λωρίδες ινών άνθρακα, η μία παράλληλα με την άλλη και με κάποια απόσταση μεταξύ τους. Ακολούθως, διαστρώθηκε μέσω μικρού ρολού ρητίνη πάνω απ' το κάθε φύλλο ινών και η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τη δεύτερη στρώση ινών, τοποθετώντας τις επόμενες 5 λωρίδες ακριβώς πάνω στις προηγούμενες, προσπαθώντας να είναι όσο το δυνατόν καλύτερα ευθυγραμμισμένες με τις από κάτω, δημιουργώντας μία διαστρωμάτωση. Τέλος, περάστηκε άλλη μία τελευταία στρώση ρητίνης πάνω απ' το τελευταία τοποθετημένο φύλλο του κάθε δοκιμίου. Τα δοκίμια έμειναν απείραχτα για 7 ημέρες, προκειμένου να ωριμάσουν πλήρως και να αποκτήσουν τις μέγιστες αντοχές τους (αυτό το χρονικό διάστημα ορίζεται από τις προδιαγραφές της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε). Στο Σχήμα 4.4α παρακάτω φαίνονται τα 5 δοκίμια υλικού ακριβώς μετά το πέρας του διαστήματος ωρίμανσης των 7 ημερών, πριν το διαχωρισμό τους. Στο συγκεκριμένο σχήμα είναι εμφανής η στρώση του σκληρυμένου PVA, η οποία έχει αποκτήσει τη μορφή ζελατίνας.

Αφού πέρασε το διάστημα ωρίμανσης των 7 ημερών που απαιτείτο ώστε η ρητίνη να αποκτήσει πλήρως τις αντοχές της, τα 5 δοκίμια αποκολλήθηκαν από την επιφάνεια που είχε τοποθετηθεί ως βάση. Η διαδικασία της αποκόλλησης αυτών έγινε πολύ εύκολα και με απόλυτη επιτυχία λόγω της αρχικής επάλειψης με το PVA πριν την εφαρμογή της ρητίνης. Τα δοκίμια ακολούθως τρίφτηκαν ελαφρώς και προσεκτικά περιμετρικά με γυαλόχαρτο, ώστε να αποκτήσουν όσο το δυνατόν πιο επίπεδη μορφή και να μην εξέχει μεγάλη ποσότητα κόλλας στις άκρες των αυτών. Στο Σχήμα 4.4β παρουσιάζονται τα 5 δοκίμια μετά τον μεταξύ τους διαχωρισμό και το περιμετρικό τους τρίψιμο.



α)

β)

Σχήμα 4.4: Τα πέντε δοκίμια υλικού (α) ακριβώς μετά το πέρας του διαστήματος ωρίμανσής τους και (β) μετά το διαχωρισμό και το τρίψιμό τους με γυαλόχαρτο

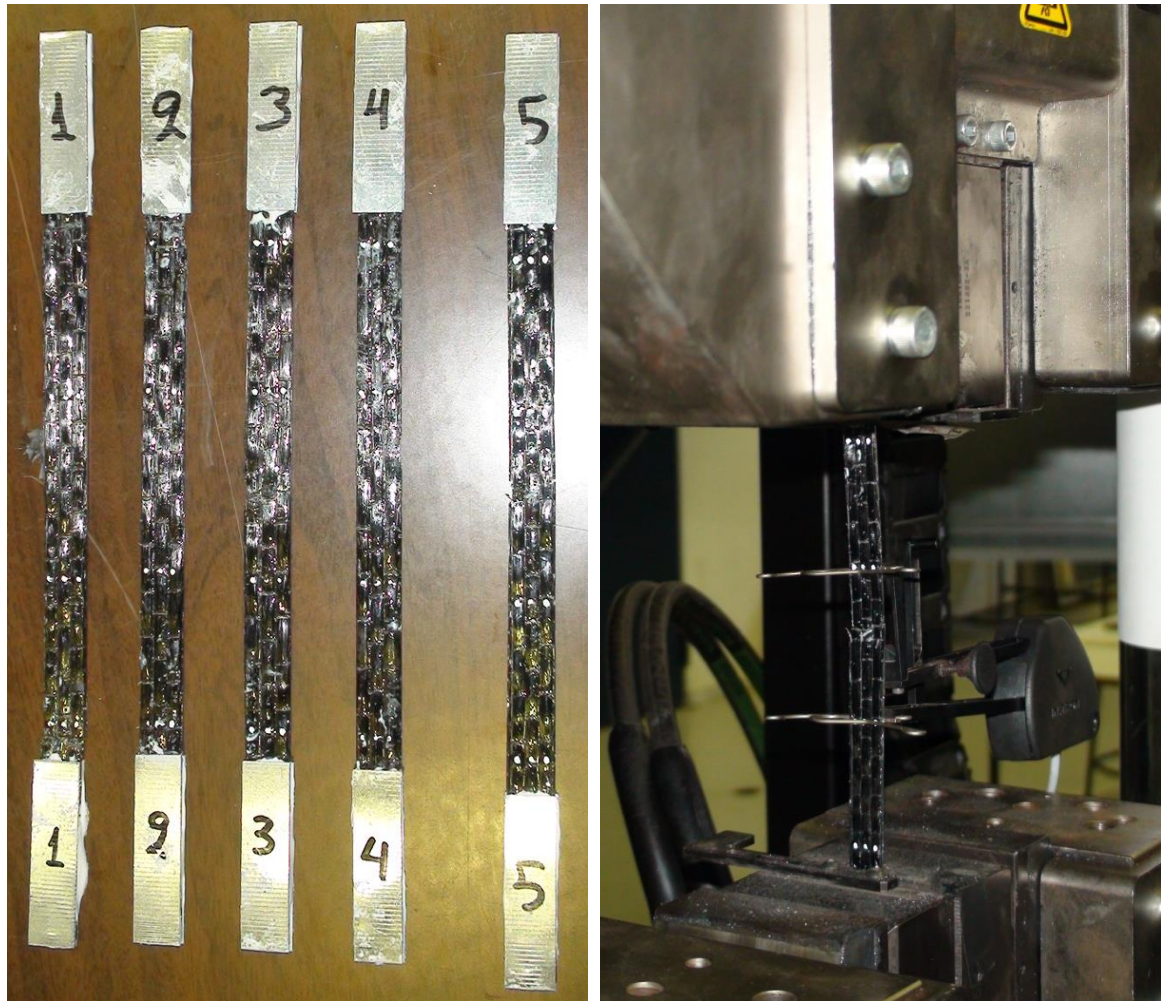
Μετά την ολοκλήρωση όλης αυτής της σχολαστικής περιποίησης των δοκιμίων, ακολούθησε η μέτρησή τους. Όσον αφορά το πάχος του κάθε δοκιμίου ινοπλισμένου πολυμερούς, πλήθος μετρήσεων λήφθηκε καθ' όλο το μήκος του μέσω ηλεκτρονικού παχύμετρου, για να ληφθεί ως τιμή στους υπολογισμούς ο μέσος όρος αυτών. Παρόμοια διαδικασία ακολούθηθηκε και κατά τη μέτρηση του πλάτους των δοκιμίων, με τη διαφορά ότι οι μετρήσεις που καταγράφηκαν περιορίζονταν στα όρια της περιοχής μετρήσεων (gauge length) των δοκιμίων, δηλαδή στο μήκος εκείνο που μετρούν τα επιμηκυνσιόμετρα κατά τη μετέπειτα δοκιμή εφελκυσμού. Η τιμή του gauge length ορίστηκε από το πρότυπο ISO 527-5. Ακολούθως, τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε ηλεκτρονική ζυγαριά υψηλής ακριβείας για να διαπιστωθεί το βάρος της ποσότητας ρητίνης του κάθε δοκιμίου, εφόσον το βάρος των λωρίδων ινών κάθε δοκιμίου είχε ζυγιστεί εξαρχής πριν τον εμποτισμό τους.

Η διαμόρφωση-προετοιμασία των δοκιμίων υλικού ολοκληρώθηκε με την κατασκευή και επικόλληση των 20 ορθογώνιων πλακιδίων (tabs) εκατέρωθεν κάθε άκρου δοκιμίου. Η χρησιμότητά τους, όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη υποπαράγραφο, έγκειται στο να εμποδίσουν πιθανή θραύση των άκρων των δοκιμίων όταν αυτά τοποθετηθούν στη μηχανή εφελκυσμού και οι αρπάγες της «κλειδώσουν» το δοκίμιο στα σημεία αυτά. Οι διαστάσεις του κάθε πλακιδίου καθορίστηκαν από τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 527-5 για αυτά και η παρασκευή τους έγινε μέσω της κοπής ενός μεγάλου λεπτού φύλλου αλουμινίου με πριονοκορδέλα μετάλλου IMET (Σχήμα 4.2).

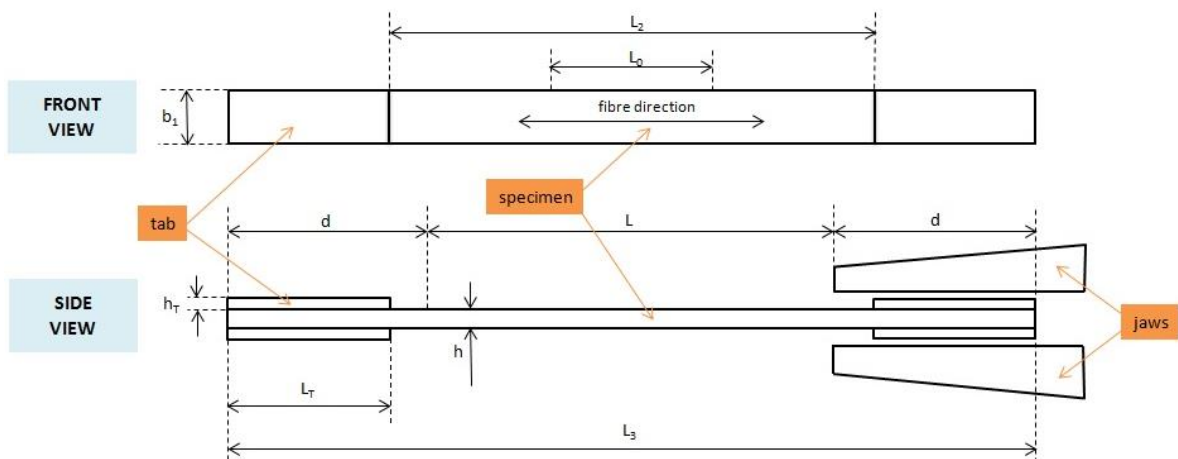
Κάθε αλουμινένιο πλακίδιο (tab) είχε τελικώς τις εξής διαστάσεις: μήκος 52 mm, πλάτος 13,5 mm και πάχος 1,1 mm, οι οποίες καλύπτουν τις κανονιστικές απαιτήσεις του ISO 527-5. Σε κάθε δοκίμιο σύνθετου υλικού αντιστοιχούν 4 τέτοια tabs, 2 εκατέρωθεν κάθε άκρου του. Η σύνδεσή τους με το εκάστοτε δοκίμιο έγινε μέσω κόλλησης αυτών στα άκρα του με ειδική εποξειδική πάστα. Ακριβώς πριν την κόλλησή τους, τόσο τα ίδια τα tabs όσο και τα άκρα των δοκιμίων υλικού, καθαρίστηκαν πολύ καλά με acetone ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματική πρόσφυση των δύο.

Η κόλλα που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη ενέργεια ήταν η εποξειδική πάστα δύο συστατικών Sinmast P103 της εταιρείας Sintecno. Επιλέχθηκε να εφαρμοστεί διαφορετική κόλλα απ' ότι κατά τον εμποτισμό των ινών, έτσι ώστε η διατμητική σύνδεση των άκρων με τα tabs να είναι όσο το δυνατόν ισχυρότερη. Γι' αυτή τη διαδικασία, αναμίχθηκαν 60 γραμμάρια ρητίνης με 20 γραμμάρια σκληρυντή, σύμφωνα με την απαίτηση για αναλογία ανάμιξης (%) των συστατικών του ρητίνης/σκληρυντή ίση με 75/25 κατά βάρος (απαιτούμενη αναλογία από τον προμηθευτή [ ]). Αφού αναμίχθηκε, η κόλλα απλώθηκε στις προς κόλληση επιφάνειες των αλουμινένιων tabs και το κάθε ένα από αυτά τοποθετούταν στο άκρο του εκάστοτε δοκιμίου από τη μεριά της κόλλας. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι αρκετά λεπτή και απαιτεί μεγάλη προσοχή, ώστε η κόλληση των tabs να γίνει όσο το δυνατόν πιο κεντραρισμένα ως προς τα δοκίμια, για να μην επέλθει μετέπειτα στρέψη των άκρων λόγω αυτής της απουσίας κεντραρίσματος, όταν κλείσουν οι αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού.

Αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία και κόλληση των αλουμινένιων προστατευτικών tabs στα άκρα των δοκιμίων, αυτά διατηρήθηκαν απείραχτα για άλλες 7 ημέρες, ώστε να ωριμάσει η κόλλα και να αποκτήσει τις πλήρεις αντοχές της. Το χρονικό διάστημα αυτό ορίζεται από τις προδιαγραφές της εποξειδικής πάστας που χρησιμοποιήθηκε. Μετά το πέρας και αυτού του διαστήματος ωρίμανσης, τα δοκίμια ήταν έτοιμα προς χρήση, έτσι ένα προς ένα τοποθετήθηκαν στη μηχανή εφελκυσμού, με τις αρπάγες της να «πιάνουν» το εκάστοτε δοκίμιο στις περιοχές των tabs όπως είχε προβλεφτεί κατά το σχεδιασμό. Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζονται τα 5 δοκίμια στην τελική τους μορφή, με επικολλημένα τα tabs, ακριβώς πριν τοποθετηθούν στη μηχανή εφελκυσμού, ενώ επίσης εμφανίζεται και ένα από τα δοκίμια τοποθετημένο στη μηχανή εφελκυσμού Instron 300LX, ακριβώς πριν την έναρξη του πειράματος εφελκυσμού.



Σχήμα 4.5: Τελική μορφή των 5 δοκιμίων (αριστερά) και τοποθετημένο δοκίμιο στη μηχανή εφελκυσμού (δεξιά)



Σχήμα 4.6: Σχεδιαστική κάτοψη και πλάγια όψη τυπικού δοκιμίου υλικού με αντιστοιχία των γεωμετρικών συμβολισμών κατά το πρότυπο ISO 527-5

Ακολούθως, παρουσιάζονται εκτενώς όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διενεργήθηκαν, αναφορικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πέντε δοκιμίων (Πίνακας 4.2). Η κάθε τιμή προκύπτει ως ο μέσος όρος των διαφόρων μετρήσεων που έγιναν για τον προσδιορισμό του εκάστοτε χαρακτηριστικού. Στον ίδιο πίνακα ακόμα, εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του κάθε συστατικού που συνθέτει το ΙΟΠ (ίνες και μήτρα). Προηγουμένως μάλιστα, στο Σχήμα 4.6 παραπάνω, απεικονίζεται σχεδιαστικά η διάταξη τυπικού δοκιμίου (κάτοψη και πλάγια όψη) στην τελική του μορφή, όπου φαίνονται και οι συμβολισμοί του κάθε γεωμετρικού μεγέθους, όπως τα ορίζει το πρότυπο ISO 527-5.

Πίνακας 4.2: Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των πέντε δοκιμίων εφελκυσμού και των εκάστοτε συστατικών υλικών τους

Ονομασία δοκιμίου	STT1	STT2	STT3	STT4	STT5
<b>Λωρίδες ινών άνθρακα</b>					
εμπορική ονομασία	SikaWrap HEX-230C	SikaWrap HEX-230C	SikaWrap HEX-230C	SikaWrap HEX-230C	SikaWrap HEX-230C
προσανατολισμός ινών	μονής διεύθυνσης	μονής διεύθυνσης	μονής διεύθυνσης	μονής διεύθυνσης	μονής διεύθυνσης
αριθμός λωρίδων	2	2	2	2	2
πυκνότητα ( $\rho_f$ )	1,82 g/cm <sup>3</sup>	1,82 g/cm <sup>3</sup>	1,82 g/cm <sup>3</sup>	1,82 g/cm <sup>3</sup>	1,82 g/cm <sup>3</sup>
μήκος κάθε λωρίδας	252 mm	252 mm	252 mm	252 mm	252 mm
πλάτος κάθε λωρίδας	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm	15 mm
πάχος κάθε λωρίδας	0,129 mm	0,129 mm	0,129 mm	0,129 mm	0,129 mm
συνολικό βάρος λωρίδων ( $W_f$ )	1,27 g	1,26 g	1,25 g	1,23 g	1,26 g
εφελκ. αντοχή ( $\sigma_f$ )	4000 MPa	4000 MPa	4000 MPa	4000 MPa	4000 MPa
μέτρο ελαστ. ( $E_f$ )	230 GPa	230 GPa	230 GPa	230 GPa	230 GPa
παραμόρφωση αστοχίας ( $\varepsilon_{fu}$ )	1,70 %	1,70 %	1,70 %	1,70 %	1,70 %
<b>Εποξειδική ρητίνη</b>					
εμπορική ονομασία	Sinmast S2WV	Sinmast S2WV	Sinmast S2WV	Sinmast S2WV	Sinmast S2WV
αριθμός συστατικών	2 συστατικών	2 συστατικών	2 συστατικών	2 συστατικών	2 συστατικών
πυκνότητα ( $\rho_m$ )	1,15 g/cm <sup>3</sup>	1,15 g/cm <sup>3</sup>	1,15 g/cm <sup>3</sup>	1,15 g/cm <sup>3</sup>	1,15 g/cm <sup>3</sup>
διατμητική αντοχή	≥12 MPa	≥12 MPa	≥12 MPa	≥12 MPa	≥12 MPa
μέτρο ελαστ. ( $E_m$ )	≥2000 MPa	≥2000 MPa	≥2000 MPa	≥2000 MPa	≥2000 MPa
<b>Αλουμινένια tabs</b>					
μήκος ( $L_T$ )	52 mm	52 mm	52 mm	52 mm	52 mm
πλάτος ( $b_T$ )	13 mm	13 mm	13 mm	13 mm	13 mm
πάχος ( $h_T$ )	1,05 mm	1,05 mm	1,05 mm	1,05 mm	1,05 mm

Τελικό δοκίμιο  
σύνθετου υλικού

τύπος δοκιμίου <sup>12</sup>	Type A	Type A	Type A	Type A	Type A
γεωμετρία	ορθογωνική	ορθογωνική	ορθογωνική	ορθογωνική	ορθογωνική
βάρος ( $W_{tot}$ )	4,62 g	4,25 g	4,63 g	4,02 g	3,83 g
πλάτος ( $b_1$ )	12,25 mm	12,44 mm	12,85 mm	12,29 mm	12,32 mm
πάχος ( $h$ )	1,47 mm	1,38 mm	1,44 mm	1,34 mm	1,19 mm
συνολικό μήκος ( $L_3$ )	252 mm	252 mm	252 mm	252 mm	252 mm
μήκος μέτρησης/ gauge length ( $L_0$ )	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm	50 mm
απόσταση tabs ( $L_2$ )	148 mm	148 mm	148 mm	148 mm	148 mm
καλυμμένο από τις αρπάγες μήκος ( $d$ )	60 mm	60 mm	60 mm	60 mm	60 mm
απόσταση μεταξύ των αρπαγών ( $L$ )	132 mm	132 mm	132 mm	132 mm	132 mm

#### 4.4 Πειραματικά αποτελέσματα

Τα πέντε αυτά δοκίμια υλικού υποβλήθηκαν σε μονοτονική αξονική εφελκυστική καταπόνηση, υπό μορφή επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, στη μηχανή εφελκυσμού Instron 300LX. Ο ρυθμός καταπόνησης των δοκιμών υλικού καθορίστηκε από το πρότυπο ISO 527-5, σύμφωνα με το οποίο για δοκίμια τύπου A, δηλαδή για δοκίμια τα οποία εντείνονται κατά τη διεύθυνση των ινών τους, αυτός ισούται με 2 mm/min.

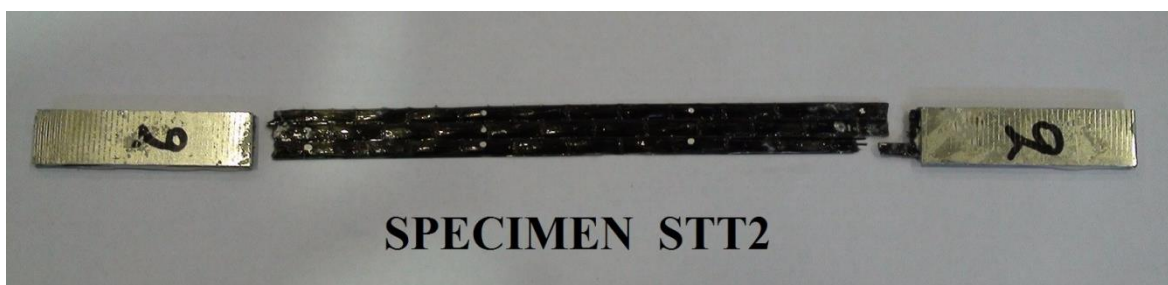
Στο Σχήμα 4.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα 5 δοκίμια μετά το πέρας των πειραμάτων εφελκυσμού (κατάσταση αστοχίας). Όπως είναι εμφανές, το σημείο αστοχίας τους ποικίλει, καθώς στα δύο πρώτα δοκίμια η θραύση επήλθε στα δύο άκρα αυτών, ενώ στα επόμενα τρία σε σημείο εντός του μήκους μέτρησης  $L_0$  (gauge length). Σε όλες τις περιπτώσεις, η μορφή αστοχίας των δοκιμίων ήταν *απολύτως ψαθυρή* χωρίς καθόλου πλαστιμότητα, όπως αναμενόταν λόγω της φύσης του υλικού. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι, κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού του πέμπτου δοκιμίου, η διαδικασία διεκόπη λίγο αφότου ξεκίνησε, επειδή «γλίστρησε» το επιμηκυνσιόμετρο, αποκόπηκε δηλαδή από τη διάταξη του δοκιμίου. Έτσι, το πέμπτο πείραμα εφελκυσμού επαναλήφθηκε από την αρχή, χωρίς βέβαια αυτό το γεγονός να επηρεάζει τη συμπεριφορά του, αφού το υλικό συμπεριφέρεται απολύτως γραμμικά ελαστικά μέχρι τη θραύση του.

Αξίζει να σημειωθεί πάντως ότι, αν και θα ήταν προτιμότερο η αστοχία να επέλθει στο μέσον των δοκιμίων υλικού, όπως συνέβη στα τρία τελευταία, για του συγκεκριμένου τύπου δοκίμια (ινοπλισμένα πολυμερή) αυτό δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα. Ο λόγος είναι η ψαθυρότητα του τρόπου αστοχίας τους εν αντιθέσει με αντίστοιχα δοκίμια υλικού από χάλυβα. Εξού και η ορθογωνική μορφή αυτών, σε αντίθεση με τα τύπου «παπιγιόν» αντίστοιχα δοκίμια υλικού από χάλυβα.

<sup>12</sup> Καθορίζεται από τη διεύθυνση των ινών ως προς τη φόρτιση. Για φόρτιση κατά τη διεύθυνση των ινών, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση, το δοκίμιο χαρακτηρίζεται ως τύπου A [23]



α) 1ο δοκίμιο υλικού



β) 2ο δοκίμιο υλικού



γ) 3ο δοκίμιο υλικού



δ) 4ο δοκίμιο υλικού



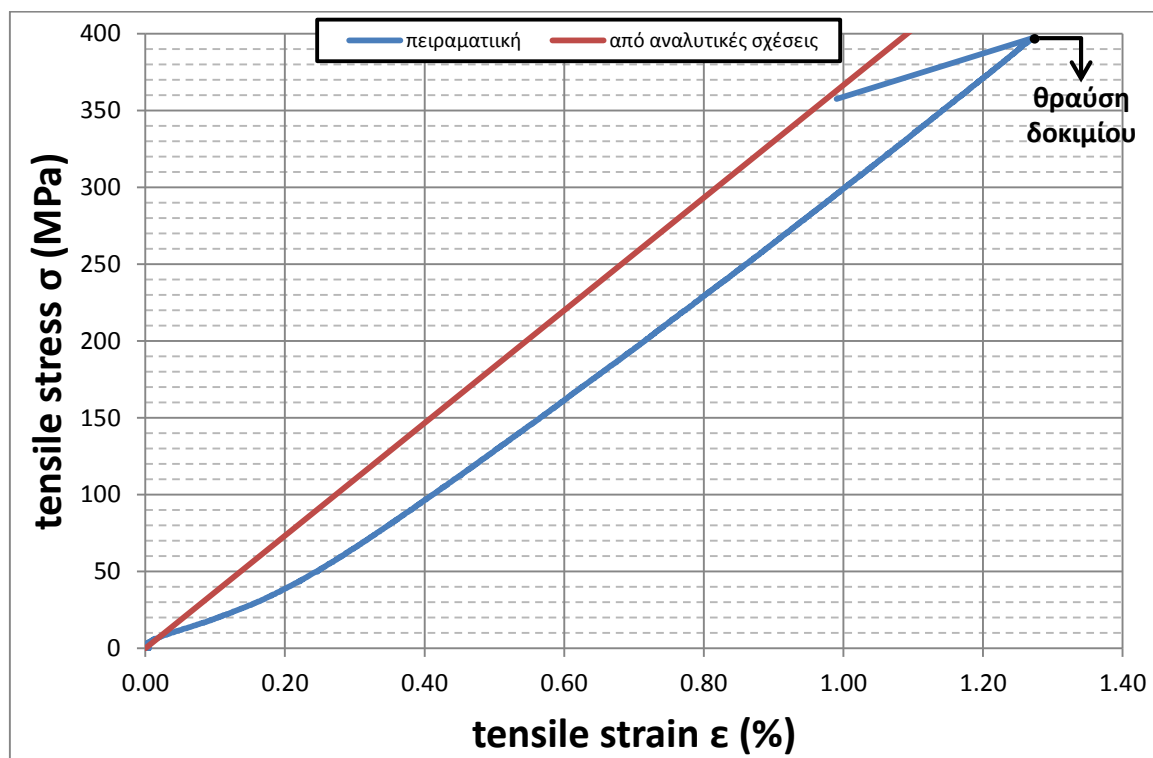
ε) 5ο δοκίμιο υλικού

Σχήμα 4.7: Κατά σειρά απεικόνιση των πέντε δοκιμίων υλικού μετά τη θραύση τους

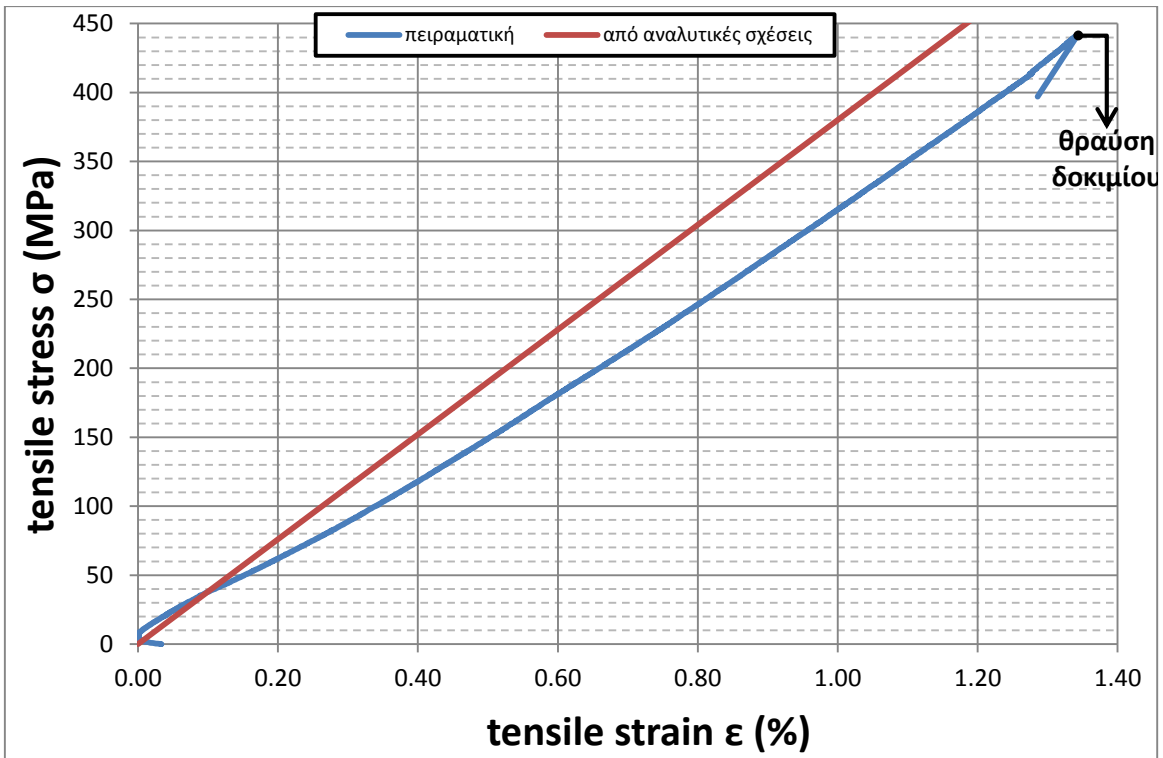
Μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών δοκιμών έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αποκλίσεις της μηχανής εφελκυσμού Instron 300LX βάσει κατασκευαστή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.3 που ακολουθεί, ενώ στο Σχήμα 4.8 αμέσως μετά, δίνονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των 5 δοκιμίων υλικού, όπως προέκυψαν από τα πειράματα εφελκυσμού. Τα διαγράμματα ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) των δοκιμίων STT1, STT2 και STT4 (Σχήμα 4.8 α, β, δ) έχουν μετατοπιστεί με βάση τις αρχικές αρνητικές τιμές μετατόπισης που εμφάνισαν. Αυτή η μορφοποίηση πραγματοποιήθηκε ώστε να παρέχεται μία ορθότερη εικόνα των διαγραμμάτων δοκιμής εφελκυσμού, μη παρουσιάζοντας τυχόν αρνητικές αρχικές τιμές παραμόρφωσης που οφείλονται σε αρχικά «γλιστρήματα» της μηχανής και δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματική συμπεριφορά του δοκιμίου. Γι' αυτό στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρούνται ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές της μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης συγκριτικά με τις ορθές του Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών υλικού για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά

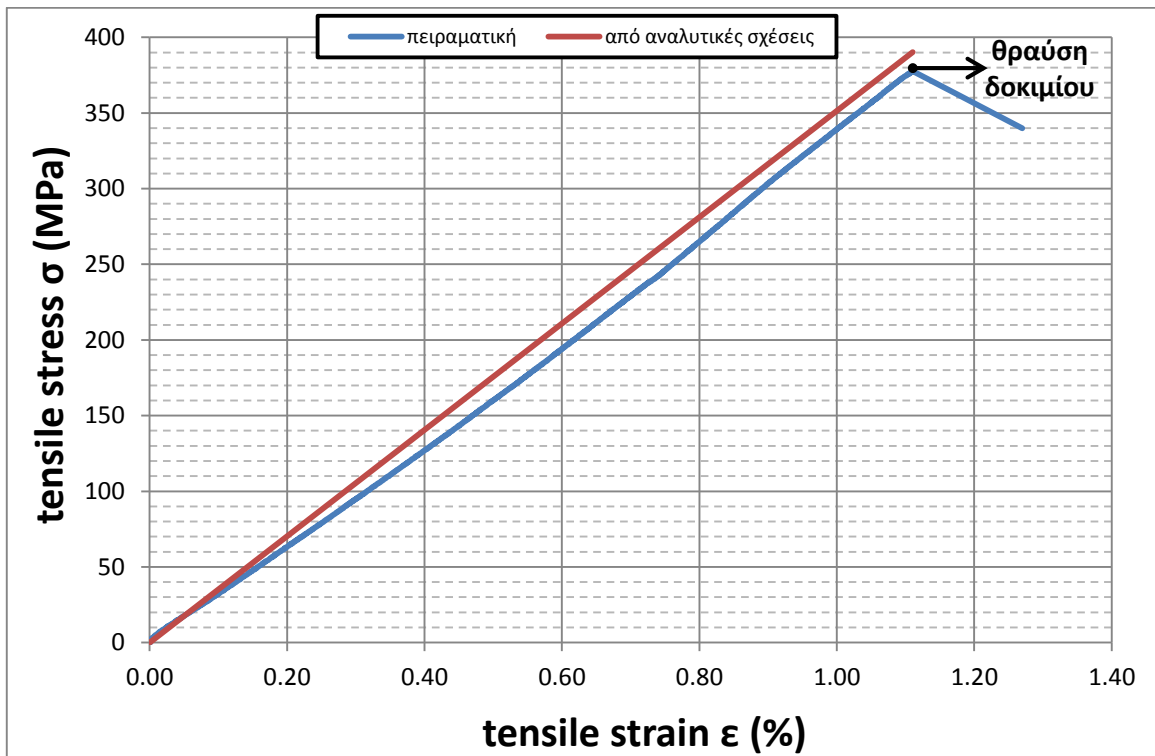
Όνομασία δοκιμίου	μέτρο ελαστικότητας Young $E_t$ (GPa)	εφελκυστική αντοχή $\sigma_M$ (MPa)	μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon_M$ (%)
STT1	20	397,44	1,27
STT2	25,24	441,17	1,31
STT3	30,68	377,65	1,11
STT4	38,4	414,52	1,02
STT5	26,24	474,32	1,29



α) δοκίμιο STT1

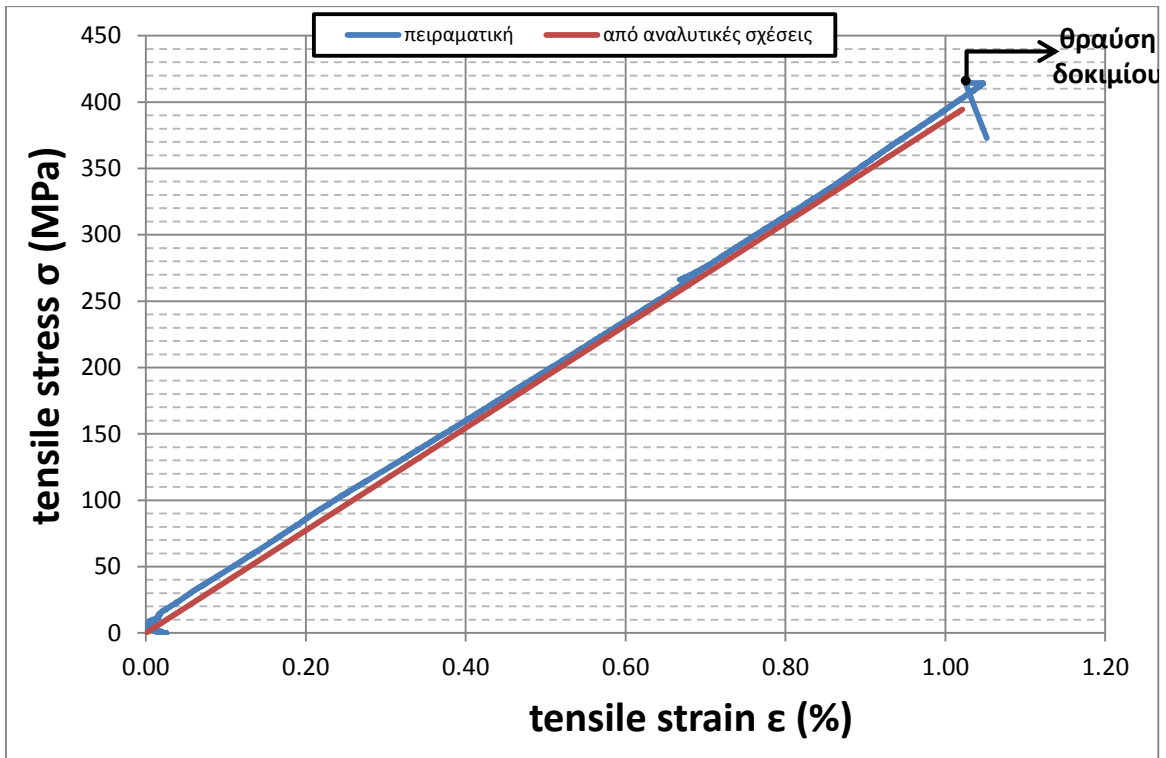


β) δοκίμιο STT2

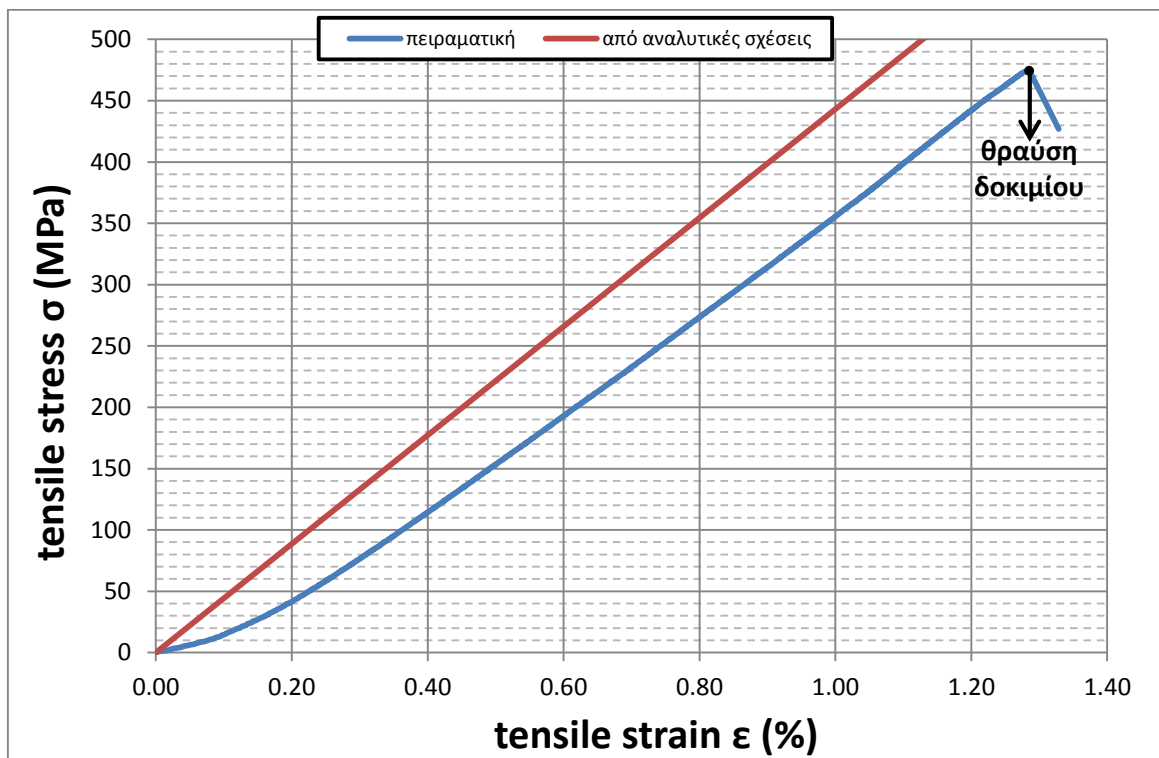


γ) δοκίμιο STT3





δ) δοκίμιο STT4



ε) δοκίμιο STT5

Σχήμα 4.8: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των πέντε δοκιμίων υλικού

Τέλος, στον Πίνακα 4.4 αμέσως μετά, εμφανίζονται τα τελικά μηχανικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού από ίνες άνθρακα (CFRP) ως ο μέσος όρος των πειραματικών αποτελεσμάτων των 5 δοκιμίων.

Πίνακας 4.4: Τελικά μηχανικά χαρακτηριστικά ΙΟΠ σύνθετου υλικού από ίνες άνθρακα

μέτρο ελαστικότητας Young ( $E_t$ )	εφελκυστική αντοχή ( $\sigma_M$ )	μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση ( $\varepsilon_M$ )
28,1 GPa	421 MPa	1,20 %

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας Young ( $E_t$ ) κάθε δοκιμίου, όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 4.3 πιο πριν, έγινε σύμφωνα με τις διατάξεις του πρότυπου ISO 527-5, δηλαδή για μεταβολή των τάσεων  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  που αντιστοιχούν στις ανηγμένες παραμορφώσεις 0,05% και 0,25% , υπό το γνωστό τύπο  $E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{0,0025 - 0,0005}$  .

#### 4.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού και παρατηρήσεις

Οι μηχανικές ιδιότητες κάθε δοκιμίου, όπως προέκυψαν αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού, κρίνεται χρήσιμο να συγκριθούν με τις αντίστοιχες προκύπτουσες από τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού τιμές. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν γι' αυτούς τους υπολογισμούς είναι οι προαναφερθείσες στο εδάφιο 3.2.3 εξισώσεις (3.1) έως (3.5), οι οποίες βασίζονται στο Νόμο της Σύνθεσης.

Όλα τα αναγκαία στοιχεία για την εφαρμογή των συγκεκριμένων σχέσεων είναι ήδη γνωστά, καθώς είτε μετρήθηκαν (διαστάσεις στοιχείων, βάρος) είτε παρέχονται μέσω των τεχνικών φυλλαδίων των ινών και της ρητίνης που εκδίδει ο προμηθευτής αυτών (φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά συστατικών σύνθετου υλικού). Αυτά παρουσιάστηκαν λεπτομερώς στον Πίνακα 4.2 πιο πριν, ενώ αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού, καθώς και τα αποτελέσματα για κάθε δοκίμιο, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Υπολογισμός μηχανικών χαρακτηριστικών δοκιμίων υλικού μέσω αναλυτικών σχέσεων

Ονομασία δοκιμίου	STT1	STT2	STT3	STT4	STT5
συνολικός όγκος δοκιμίου ( $V_{tot}=b_l*h*L_3$ )	4,54 cm <sup>3</sup>	4,33 cm <sup>3</sup>	4,66 cm <sup>3</sup>	4,15 cm <sup>3</sup>	3,69 cm <sup>3</sup>
όγκος ινών ( $V_f=W_f/\rho_f$ )	0,7 cm <sup>3</sup>	0,69 cm <sup>3</sup>	0,69 cm <sup>3</sup>	0,68 cm <sup>3</sup>	0,69 cm <sup>3</sup>
βάρος ρητίνης ( $W_m=W_{tot}-W_f$ )	3,35 g	2,99 g	3,38 g	2,79 g	2,57 g
όγκος ρητίνης ( $V_m=W_m/\rho_m$ )	2,91 cm <sup>3</sup>	2,6 cm <sup>3</sup>	2,94 cm <sup>3</sup>	2,43 cm <sup>3</sup>	2,23 cm <sup>3</sup>
$v_f=V_f/V_{tot}$	15,38 %	16,00 %	14,73 %	16,28 %	18,74 %

$v_m=V_m/V_{tot}$	64,20 %	60,10 %	63,03 %	58,46 %	60,49 %
$v_u=1-v_f-v_m$	20,42 %	23,90 %	22,24 %	25,26 %	20,77 %
$E=E_f*v_f+E_m*v_m$	36,65 GPa	38,01 GPa	35,14 GPa	38,62 GPa	44,31 GPa

Από τον Πίνακα 4.5, γίνεται αντιληπτό ότι το ποσοστό ινών κάθε δοκιμίου ήταν πολύ μικρό, της τάξης του 15%, τη στιγμή που η ρητίνη αποτέλεσε με διαφορά το κυρίαρχο συστατικό του παραγόμενου σύνθετου υλικού με ποσοστά της τάξης του 60%. Όπως τονίστηκε στην υποενότητα 3.2.3 του προηγούμενου κεφαλαίου και απεικονίστηκε στο Σχήμα 3.12 αυτής, ο βαθμός συμμετοχής των ινών στην τελική σύνθεση του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού είναι καθοριστικός για τη διαμόρφωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του (μέτρο ελαστικότητας και εφελκυστική αντοχή). Πιο συγκεκριμένα, οι τελικές μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού είναι τόσο ασθενέστερες συγκριτικά με αυτές των ινών, όσο μικρότερος είναι ο βαθμός συμμετοχής τους στο τελικό υλικό.

Στην περίπτωση της συγκεκριμένης χειρωνακτικής διαδικασίας παραγωγής του ΙΟΠ σύνθετου υλικού που διενεργήθηκε, με τα υλικά και τα εργαλεία που προαναφέρθηκαν, φαίνεται ότι επιτυγχάνεται αυτή η κατά πολύ ασθενέστερη διαμόρφωση. Τα πολύ χαμηλά ποσοστά συμμετοχής των ινών στα δοκίμια ΙΟΠ εξηγούν τα τόσο υποβαθμισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών, συγκριτικά με τα αντίστοιχα των ινών.

Επιπροσθέτως, σχεδόν σε όλα τα πειράματα εφελκυσμού που διενεργήθηκαν, παρατηρήθηκε σημαντική σταδιακή αύξηση της κλίσης των διαγραμμάτων τάσεων- παραμορφώσεων η οποία σταθεροποιήθηκε μετά από ένα μικρό διάστημα μετάβασης στην αρχή του πειράματος. Συγκεκριμένα, στα δοκίμια STT1, STT2 και STT5 αυτή η διαπίστωση είναι εμφανέστατη και γίνεται εύκολα αντιληπτή παρατηρώντας την αντίστοιχη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, όπως προέκυψε από τα πειράματα, η οποία απεικονίστηκε στο Σχήμα 4.8 προηγουμένως. Σε αυτά τα δοκίμια, μάλιστα, παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας κατά τον υπολογισμό του με βάση τις διατάξεις του ISO 527-5 και με βάση τις αναλυτικές σχέσεις, όπως φαίνεται και από τον παραλληλισμό των αντίστοιχων διαγραμμάτων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) στο Σχήμα 4.8 πιο πριν. Η εν λόγω αλλαγή κλίσης των διαγραμμάτων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) οφείλεται στο *πολύ μικρό πάχος* των δοκιμίων, το οποίο δημιούργησε μία αρχική ατέλεια στα πειράματα εφελκυσμού που διενεργήθηκαν. Συγκεκριμένα, το κλείσιμο των δύο αρπαγών της μηχανής εφελκυσμού επέφερε μία *αρχική καμπύλωση* των δοκιμίων, η οποία πιθανότατα οδήγησε σε αυτή την αρχική σταδιακή αύξηση της κλίσης των διαγραμμάτων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ).

Γι' αυτό το λόγο, στα δοκίμια που παρουσίασαν τέτοια συμπεριφορά, διερευνήθηκε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας παρακάμπτοντας τις διατάξεις του ISO 527-5 και λογαριάζοντάς το στο διάστημα ανηγμένων παραμορφώσεων μεταξύ 0,25% και 0,45% όπου η κλίση των διαγραμμάτων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) αυτών έχει σταθεροποιηθεί. Οι αυξημένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας που προέκυψαν, μείωσαν σημαντικά το σφάλμα ανάμεσα στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας όπως προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα βασιζόμενο στις διατάξεις του ISO 527-5 και σε αυτή με βάση τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού.

Στον Πίνακα 4.6 που ακολουθεί, παρουσιάζονται μαζί για σύγκριση οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας των πέντε δοκιμίων ΙΟΠ, όπως προέκυψαν: α) από τα πειραματικά αποτελέσματα αυτών ακολουθώντας τις διατάξεις του ISO (διάστημα ανηγμένων παραμορφώσεων 0,05% με 0,25%), β) από τα πειραματικά αποτελέσματα αυτών μετά τη σταδιακή μεταβολή της καμπύλης, δηλαδή στο διάστημα ανηγμένων παραμορφώσεων από 0,25% έως 0,45% και γ) από τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού μέσω του Νόμου της Σύνθεσης. Επίσης υπολογίζονται οι εκάστοτε αποκλίσεις από τις αναλυτικές σχέσεις.

Πίνακας 4.6: Συγκριτικός πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων μέσω αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού

Ονομασία δοκιμίου	STT1	STT2	STT3	STT4	STT5
Μέτρο ελαστικότητας					
από αναλυτικές σχέσεις	36,65 GPa	38,01 GPa	35,14 GPa	38,62 GPa	44,31 GPa
από το πείραμα με βάση το ISO	20 GPa	25,24 GPa	30,68 GPa	38,4 GPa	26,24 GPa
απόκλιση από αναλυτ. σχέσεις	45,45 %	33,58 %	12,70 %	0,58 %	40,79 %
από το πείραμα μετά τη σταθερ. της κλίσης του διαγρ. (σ-ε)	30,93 GPa	29,84 GPa	32,28 GPa	-	37,56 GPa
απόκλιση από αναλυτ. σχέσεις	15,62 %	21,51 %	8,15 %	-	15,23 %

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό ότι όντως ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας από τα πειραματικά αποτελέσματα λογαριάζοντας τις τιμές του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης μετά τη σταθεροποίηση της κλίσης αυτού, δηλαδή εν προκειμένω στο διάστημα ανηγμένων παραμορφώσεων από 0,25% έως 0,45%, δίνει μία πολύ καλύτερη προσέγγιση αυτού αναφορικά με τα αποτελέσματα από τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού. Στο δοκίμιο STT4 δεν χρειάστηκε να διερευνηθεί αυτό το ζήτημα, καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση η κλίση του διαγράμματος (σ-ε) που προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν σταθερή από την έναρξη του πειράματος και η προσέγγιση με τους αναλυτικούς τύπους ήταν πολύ κοντά στην τιμή που προέκυψε με βάση το πρότυπο ISO 527-5.

Οι αποκλίσεις που προέκυψαν στα αποτελέσματα μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του σύνθετου ινοπλισμένου πολυμερούς δεν είναι αμελητέες και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά μεγάλες, όπως στα δοκίμια STT1, STT2 και STT5. Παρ' όλα αυτά, η εκτίμηση με βάση τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού, βασιζόμενη στο Νόμο της Σύνθεσης, είναι μία λεπτή διαδικασία, ιδιαίτερα όταν εξετάζονται τόσο μικρών διαστάσεων δοκίμια. Αυτό διότι στις υπολογιστικές αυτές σχέσεις υπεισέρχονται παράγοντες όπως το βάρος και οι διαστάσεις, τόσο του κάθε συστατικού ξεχωριστά όσο και του τελικού σύνθετου υλικού, οι οποίοι είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθούν με ακρίβεια χειρονακτικά. Συνεπώς, τέτοιες αποκλίσεις είναι αναμενόμενες σε μία τόσο λεπτή διαδικασία. Τέλος, αυτή η αβεβαιότητα περί σωστών μετρήσεων στη συγκεκριμένη περίπτωση ενισχύεται κι από το γεγονός τόσο της μορφοποίησης των δοκιμίων πριν την έναρξη των πειραμάτων (τρίψιμο επιφανειών) όσο και της δυσκολίας ορθής μέτρησης της διάστασης του πάχους του τελικού υλικού λόγω των τοπικών αυλακώσεων της μήτρας.

Παρά τις μεγάλες αποκλίσεις που προέκυψαν στον τρόπο προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του ΙΟΠ, από τα πειραματικά αποτελέσματα και τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού, θεωρήθηκαν έγκυρες, και ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκαν και στα μετέπειτα πειράματα θλίψης και κάμψης των ακόλουθων κεφαλαίων, οι προκύπτουσες από τα πειραματικά αποτελέσματα τιμές. Ειδικότερα, παρά τη διαπίστωση για πιθανή καλύτερη εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές μετά την αρχική σταδιακή αύξηση της κλίσης του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων, υιοθετήθηκε η τιμή αυτού όπως προέκυψε από τις διατάξεις του πρότυπου ISO 527-5.

## 5 Πειράματα θλίψης χαλύβδινων δοκών διατομής γωνιακού ενισχυμένων εξωτερικά με ανθρακονήματα

### 5.1 Εισαγωγή

Αφού ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές υλικού και διαπιστώθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού από ίνες άνθρακα που επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί ως ενίσχυση των χαλύβδινων δοκών, σειρά είχε η πειραματική διερεύνηση του συστήματος χάλυβα-ανθρακονημάτων. Ως πρώτο είδος πειραμάτων διερεύνησης της συμπεριφοράς του συστήματος αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν πειράματα σε θλίψη.

Η πειραματική αυτή διαδικασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση του κατά πόσο η εξωτερική ενίσχυση των χαλύβδινων δοκών με τη συγκεκριμένη διάταξη ανθρακονημάτων (CFRP) μπορεί να βελτιώσει τη θλιπτική συμπεριφορά του αμιγώς χαλύβδινου μέλους. Ουσιαστικά, διερευνάται η δυνατότητα βελτίωσης της συμπεριφοράς του θλιβόμενου μέλους έναντι λυγισμού, δηλαδή η ενίσχυση της ευστάθειάς του.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, λοιπόν, περιγράφεται όλη αυτή η διαδικασία διερεύνησης, από την κατασκευή και προετοιμασία των πειραματικών δοκιμίων μέχρι την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή των σχετικών συμπερασμάτων. Η κατασκευή των δοκιμίων καθώς και η εκτέλεση των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του ΙΟΠ σύνθετου υλικού ήταν τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν και κατά την κατασκευή των δοκιμίων υλικού, όπως και η διαδικασία της επίστρωσης. Ο τρόπος κατασκευής της ενισχυτικής στρώσης που εφαρμόστηκε ήταν κατά τη χειρωνακτική μέθοδο (hand lay-up), όπως εξετάστηκε και στα πειράματα εφελκυσμού.

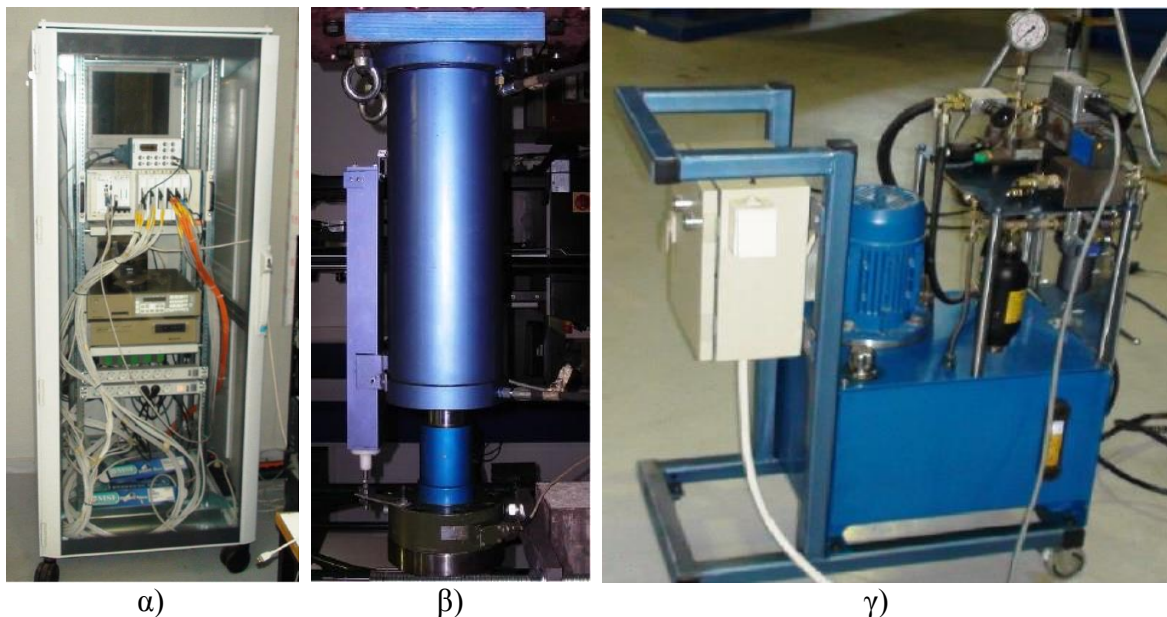
Συγκεκριμένα, έναντι αυτού του είδους καταπόνησης, εξετάστηκαν δύο χαλύβδινα δοκίμια διατομής ισοσκελούς γωνιακού, ενισχυμένα εξωτερικά στα δύο τους σκέλη με δύο στρώσεις από ανθρακονήματα, εκτεινόμενα σε όλο το πλάτος και στο μεγαλύτερο μέρος του μήκους τους. Ο τρόπος φόρτισης καθενός εξ αυτών διέφερε ως προς την εκκεντρότητα της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Τέλος, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται σε σύγκριση με αυτά των αντίστοιχων πειραμάτων που διενεργήθηκαν στα μη ενισχυμένα χαλύβδινα μέλη, υπό την ίδια κατάσταση εντατικής καταπόνησης (εκκεντρότητα, ρυθμός φόρτισης) και εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά όσα προαναφέρθηκαν, συνοδευόμενα από φωτογραφίες και τα κατάλληλα διαγράμματα, όπου αυτό κρίνεται σημαντικό.

## 5.2 Περιγραφή συσκευών πειράματος

Για την εκτέλεση των πειραμάτων θλίψης, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά του ενισχυμένου με ανθρακονήματα (CFRP) χαλύβδινου μέλους έναντι θλίψης, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες συσκευές του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών:

1. *Σύστημα συλλογής μετρήσεων και ελέγχου επενεργητών National Instrument (NI)-PXI-SCXI* (Σχήμα 5.1α). Τα δεδομένα κάθε πειράματος μεταφέρονται εδώ μέσω των καταλλήλων αγωγών σημάτων που συνδέουν τις συσκευές με τις αντίστοιχες κάρτες τους στην κεντρική μονάδα του συστήματος, δηλαδή το PXI. Όλες οι λειτουργίες του οργάνου βασίζονται σε εφαρμογές στο περιβάλλον του προγράμματος labVIEW 7.1.1 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), όπου και μεταφέρονται τα πειραματικά δεδομένα. Μέσω του προγράμματος γίνεται μηδενισμός του φορτίου και της θέσης του εμβόλου, καθώς και ηλεκτρονικός μηδενισμός των οργάνων μέτρησης.
2. *Επενεργητής εφαρμογής φόρτισης* (Σχήμα 5.1β). Για τη στατική μονοτονική φόρτιση χρησιμοποιήθηκε επενεργητής εφαρμογής μετατόπισης (υδραυλικό έμβολο), ελεγχόμενο μέσω σερβοβαλβίδας από controller τύπου Servo Controller-Amplifier SCA-201, της MALVASIA με εν συνεχεία διατήρηση του ελέγχου από το PXI. Αυτός έχει δυνατότητα άσκησης αρνητικής ή θετικής μετατόπισης που έχει ως αποτέλεσμα την εφελκυστική ή θλιπτική φόρτιση των δοκιμίων έως 300kN, με μέγιστη διαδρομή βάρικου 300mm και συνολικό ύψος, συμπεριλαμβανομένης της δυναμοκυψέλης, όταν το βάρικο βρίσκεται στην κατώτερη θέση, 92,5cm. Συνδέεται στην κάρτα 1520 NI-SCXI της κεντρικής μονάδας.
3. *Δυναμοκυψέλη*. Επί του επενεργητή είναι προσαρμοσμένη δυναμοκυψέλη (load cell) συμπίεσης - εφελκυσμού, του I.M.M.G. S.A., τύπου MS 180203, ονομαστικού φορτίου  $\pm 300\text{kN}$ . Η εξωτερική της διάμετρος είναι 225mm και διαθέτει οκτώ οπές για κοχλίες M16, για την προσαρμογή των διάφορων εξαρτημάτων.
4. *Υδραυλική αντλία ελαίου* (Σχήμα 5.1γ). Ο επενεργητής εφαρμογής φόρτισης τροφοδοτείται από υδραυλική αντλία ελαίου πίεσης 240bar. Με τη χρήση μοχλού η αντλία κινεί το βάρικο του εμβόλου προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

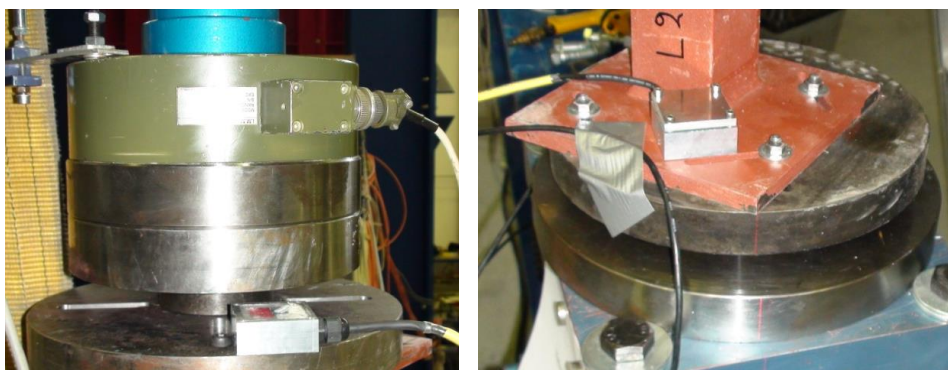


Σχήμα 5.1: Συσκευές πειραματικής διαδικασίας θλίψης: α) σύστημα συλλογής μετρήσεων και ελέγχου επενεργητών, β) έμβολο και γ) υδραυλική αντλία ελαίου

5. *Όργανα μέτρησης μετατόπισης/στροφής.* Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του θλιβόμενου ενισχυμένου μέλους απαιτείται ακριβής μέτρηση των παραμορφώσεων αυτού. Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιείται από τα εξής ειδικά όργανα:
- Wire transducers* (Σχήμα 5.2). Στα πειράματα θλίψης που διενεργήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τρεις τέτοιοι μετρητές μετατόπισης της εταιρείας Firstmark Controls, αριθμού μοντέλου 62-60-84E2, μέσω των οποίων καταγράφηκαν οι μετατοπίσεις στο σημείο εφαρμογής τους. Επίσης, μέσω των καταγραφών τους κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της στροφής του μέλους περί τον διαμήκη άξονά του. Πιο συγκεκριμένα, στη διάταξη των δύο πειραμάτων θλίψης που έγιναν, οι τρεις μετρητές μετατόπισης τοποθετήθηκαν στο κατάλληλο ύψος ώστε να καταγράφονται μετρήσεις ακριβώς στο μέσο του μέλους. Δύο εξ αυτών τοποθετήθηκαν κατά τη διεύθυνση του ισχυρού κύριου άξονα της διατομής, ανά απόσταση 400mm, ενώ ο τρίτος κατά τη διεύθυνση του ασθενή.
  - Κλινόμετρα (inclinometers)* (Σχήμα 5.3). Μέσω αυτών πραγματοποιήθηκε η καταγραφή της στροφής των άκρων του θλιβόμενου μέλους. Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δύο κλινόμετρα, τοποθετημένα στις δύο στηρίξεις. Η κατασκευή τους, η οποία πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου από το προσωπικό του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, επιτρέπει τη στήριξή τους στην εξεταζόμενη επιφάνεια μέσω μαγνητών. Καταγράφουν οποιαδήποτε στροφή του επιπέδου όπου είναι τοποθετημένα, περί τους δύο τοπικούς τους άξονες. Στα συγκεκριμένα πειράματα, τα κλινόμετρα τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να καταγράφουν τη στροφή περί τους δύο κύριους άξονες της διατομής. Ο χειρισμός τους γίνεται μέσω Η/Υ, ενώ και τα αποτελέσματα των καταγραφών αποθηκεύονται εκεί.



Σχήμα 5.2: Η διάταξη των τριών wires που χρησιμοποιήθηκαν για καταγραφή των μετατοπίσεων



Σχήμα 5.3: Η διάταξη των δύο κλινόμετρων που χρησιμοποιήθηκαν για καταγραφή των στροφών

### 5.3 Κατασκευή πειραματικών δοκιμίων

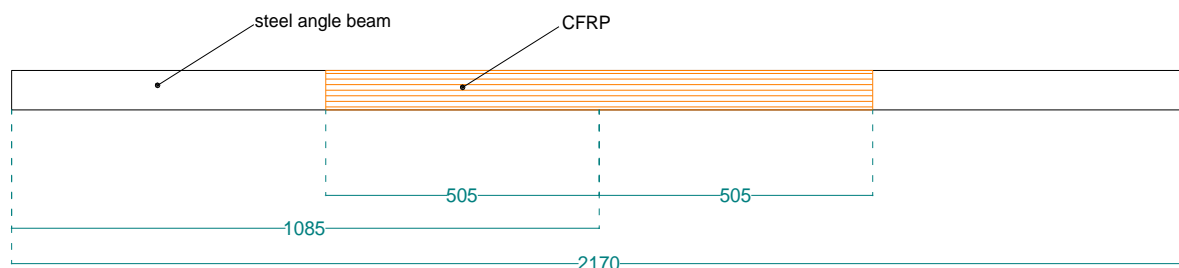
Η κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων συνίσταται στην επικόλληση του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού πάνω στην επιθυμητή επιφάνεια του χαλύβδινου μέλους. Η κατασκευή και η επικόλληση του σύνθετου υλικού από ίνες άνθρακα πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα μέσω της χειρωνακτικής μεθόδου παραγωγής (hand lay-up), καθώς κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία ο εμποτισμός των ινών και η επικόλληση του σύνθετου υλικού δεν διαχωρίζονται, αλλά πραγματοποιούνται ταυτόχρονα αποτελώντας ένα ενιαίο στάδιο.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή-εφαρμογή του ινοπλισμένου πολυμερούς σύνθετου υλικού είναι τα προαναφερθέντα στο τέταρτο κεφάλαιο, δηλαδή ίνες άνθρακα σε μορφή υφάσματος μίας διεύθυνσης, υπό την εμπορική ονομασία SikaWrap HEX-230C και η εποξειδική ρητίνη 2 συστατικών S2WV της Sinmast η οποία χρησιμοποιήθηκε τόσο ως μήτρα του σύνθετου υλικού όσο και ως κόλλα σύνδεσης της ενίσχυσης πάνω στο χαλύβδινο μέλος.

Τα χαλύβδινα στοιχεία που ενισχύθηκαν με αυτό τον τρόπο ήταν διατομής ισοσκελούς γωνιακού διαστάσεων  $70 \times 70 \times 7$  (πλάτη και πάχος σκελών σε mm), καθαρού μήκους 2170mm και ποιότητας χάλυβα S275 με μέση τάση διαρροής 318MPa. Η ενίσχυσή τους πραγματοποιήθηκε στην εξωτερική πλευρά των δύο σκελών τους, εκτεινόμενη σχεδόν στο μισό τους μήκος. Συγκεκριμένα, το μήκος της ενίσχυσης ήταν 1100mm, αποτελούμενη από δύο στρώσεις ανθρακοϋφάσματος πλάτους ίσο με αυτό των σκελών του ισοσκελούς γωνιακού. Στο Σχήμα 5.4 παρακάτω απεικονίζεται σχεδιαστικά η τελική όψη ενός σκέλους του γωνιακού, μετά την εφαρμογή της ενισχυτικής στρώσης CFRP, ενώ αναφέρονται και οι σχετικές διαστάσεις.

Αρχικά, η όλη διαδικασία ξεκίνησε με την κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας των χαλύβδινων μελών, στην περιοχή που επρόκειτο να εφαρμοστεί η ενίσχυση. Αναλυτικότερα, επειδή οι χαλύβδινες δοκοί ήταν ήδη βαμμένες, για να επιτευχθεί καλύτερη πρόσφυση της ρητίνης με την επιφάνεια του χάλυβα, ήταν απαραίτητη η αποβολή της βαφής τους σε αυτές της περιοχές, όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 3.2.2. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω αμμοβολής των χαλύβδινων επιφανειών στις εμπλεκόμενες περιοχές. Στο Σχήμα 5.5α της επόμενης σελίδας απεικονίζονται τα δύο χαλύβδινα δοκίμια μετά την αμμοβολή των προς επικόλληση επιφανειών τους.

Αφού ολοκληρώθηκε η αμμοβολή των χαλύβδινων επιφανειών, ακολούθησε η κατασκευή των ινοπλισμένων πολυμερών σύνθετων υλικών από ίνες άνθρακα (CFRP) και η ταυτόχρονη επικόλλησή τους πάνω στις αμμοβολημένες χαλύβδινες επιφάνειες. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η παρασκευή των σύνθετων υλικών πραγματοποιήθηκε μέσω της χειρωνακτικής διαδικασίας (hand lay-up).



Σχήμα 5.4: Σχεδιαστική όψη σκέλους του γωνιακού μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης από CFRP (σχέδιο AutoCAD) - οι διαστάσεις σε mm





Σχήμα 5.5: α) Οι δύο χαλύβδινες δοκοί μετά την αμμοβολή των επιθυμητών επιφανειών τους και β) 4 λωρίδες ινών άνθρακα μετά την κοπή τους στις επιθυμητές διαστάσεις

Αυτό προϋπόθετε αρχικά την κοπή, μέσω αιχμηρού κοπιδιού/λεπίδας, 8 όμοιων λωρίδων ινών άνθρακα, από το πλεκτό ύφασμα ινών μονής διεύθυνσης SikaWrap HEX-230C, στις επιθυμητές διαστάσεις. Οι διαστάσεις της κάθε λωρίδας ήταν 1100×70 (μήκος × πλάτος, σε mm) και σε κάθε χαλύβδινη αμμοβολημένη επιφάνεια επικολλήθηκαν 2 στρώσεις ινών άνθρακα, δηλαδή απαιτήθηκαν συνολικά 4 λωρίδες για κάθε δοκίμιο (2 εξωτερικά σε κάθε σκέλος του). Στο Σχήμα 5.5β παραπάνω φαίνονται οι 4 λωρίδες ινών, όπως κόπηκαν για εφαρμογή τους στο ένα δοκίμιο.

Ακολούθως, σειρά είχε η κατάλληλη προετοιμασία των χαλύβδινων επιφανειών που επρόκειτο να ενισχυθούν, η οποία επιδιώκεται να γίνεται ακριβώς πριν εφαρμοστεί η κόλλα σύνδεσης στη χαλύβδινη επιφάνεια. Αυτή περιελάμβανε αρχικά *ελαφρύ τρίψιμο* των επιφανειών με *γυαλόχαρτο*, έτσι ώστε να αυξηθεί η τραχύτητά τους και εν τέλει η αντοχή της σύνδεσης (bond strength). Τέλος, ακολούθησε ο ενδεδειγμένος καθαρισμός τους με χρήση πεπιεσμένου αέρα και έπειτα σκουπίζοντας με ασετόν, ώστε να αποβληθούν τυχόν ξένα προς την επιφάνεια κατάλοιπα όπως οξείδια, λάδια, υγρασία ή σκόνη.

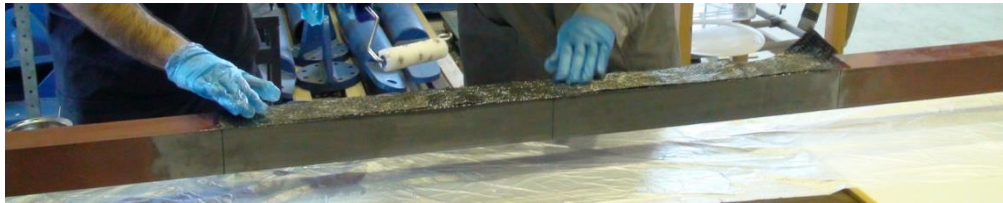
Έπειτα, σειρά είχε η δημιουργία του ΙΟΠ μέσω του εμποτισμού των ινών με τη ρητίνη και η επικόλλησή του στις εξωτερικές επιφάνειες των σκελών του κάθε γωνιακού. Αυτές οι δύο διαδικασίες (εμποτισμός ινών, επικόλληση ΙΟΠ στην επιφάνεια του δοκιμίου) στη χειρωνακτική μέθοδο παραγωγής ΙΟΠ δεν διαχωρίζονται, αλλά πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επομένως, τόσο ως μήτρα του ΙΟΠ όσο και ως κόλλα σύνδεσης αυτού με το προς ενίσχυση στοιχείο, χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη S2WV.

Για την όλη διαδικασία αρχικά δημιουργήθηκε η εποξειδική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε, μέσω ανάμιξης των δύο συστατικών της. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 400 γραμμάρια εποξειδικής ρητίνης. Αυτά παρασκευάστηκαν αναμειγνύοντας 252 γραμμάρια βασικής ρητίνης με 148 γραμμάρια σκληρυντή, σύμφωνα με την απαίτηση για αναλογία ανάμιξης ρητίνης/σκληρυντή, κατά τον προμηθευτή, ίση με 63/37 κατά βάρος. Η ανάμιξή τους πραγματοποιήθηκε χειρωνακτικά, ανακατεύοντας για 2-3 λεπτά με γρήγορο ρυθμό τα δύο συστατικά μέσα σε ειδικό τεμάχιο, μέχρις ότου το μίγμα ομογενοποιηθεί.

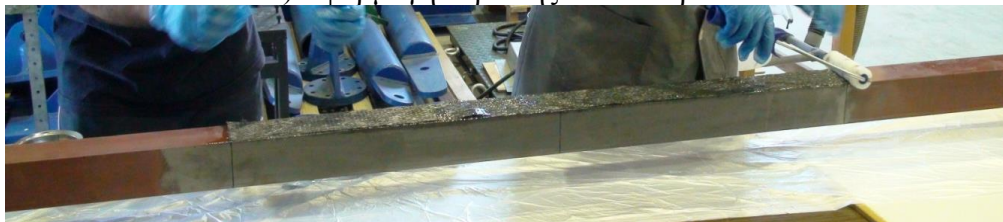
Η διαδικασία δημιουργίας-εφαρμογής των ΙΟΠ σύνθετων υλικών πάνω στις χαλύβδινες επιφάνειες πραγματοποιήθηκε ως εξής. Αρχικά, επαλείφθηκε μέσω μικρού ρολού η πρώτη στρώση εποξειδικής ρητίνης στην περιοχή της προς ενίσχυση χαλύβδινης επιφάνειας. Αμέσως μετά, τοποθετήθηκε η πρώτη λωρίδα ινών άνθρακα πάνω στην περιοχή της εφαρμοσμένης εποξειδικής ρητίνης και ακολούθως διαστρώθηκε η δεύτερη στρώση ρητίνης πάνω από τη στρώση των ινών. Τέλος, τοποθετήθηκε και η δεύτερη στρώση ινών, ακριβώς πάνω από την προηγούμενη, ενώ η διαδικασία ολοκληρώθηκε με την επάλειψη της τρίτης στρώσης ρητίνης πάνω απ' το τελευταίο φύλλο ινών.

Τα ενισχυμένα δοκίμια έμειναν ανέγγιχτα για 7 ημέρες προκειμένου να ωριμάσει πλήρως η εποξειδική ρητίνη και να αποκτήσει τις μέγιστες αντοχές της, όπως συνεπώς και

το ινοπλισμένο πολυμερές σύνθετο υλικό. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αναμονής ορίζεται από τις προδιαγραφές της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε, Στο Σχήμα 5.6, αμέσως μετά, απεικονίζεται η διαδικασία παραγωγής-εφαρμογής των στρώσεων ΙΟΠ πάνω στο χαλύβδινο μέλος, καθώς και η τελική μορφή των δύο ενισχυμένων δοκιμίων.



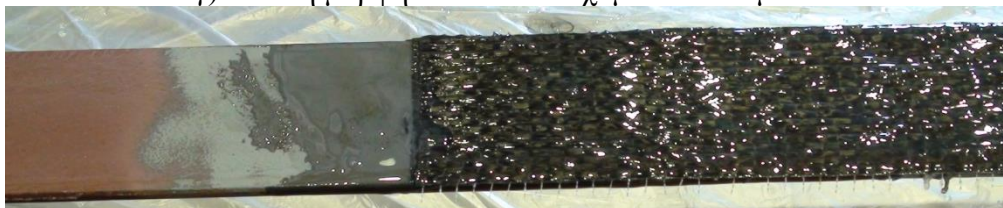
α) Εφαρμογή στρώσης ινών άνθρακα



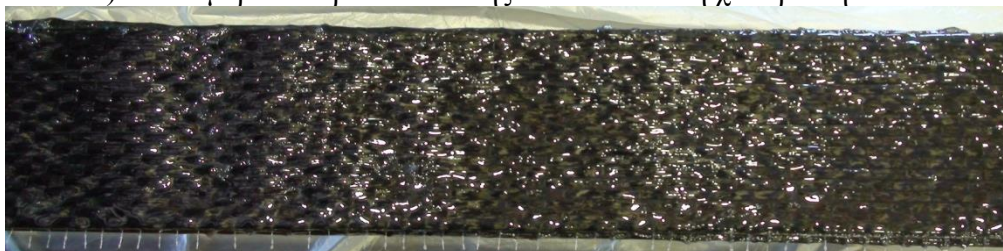
β) Εμποτισμός ινών-επάλειψη με εποξειδική ρητίνη



γ) Τελική μορφή των δύο ενισχυμένων δοκιμίων



δ) Λεπτομέρεια άκρου σύνδεσης ΙΟΠ πάνω στη χαλύβδινη δοκό



ε) Λεπτομέρεια ενισχυμένης περιοχής-πλήρης κάλυψη πλάτους του σκέλους

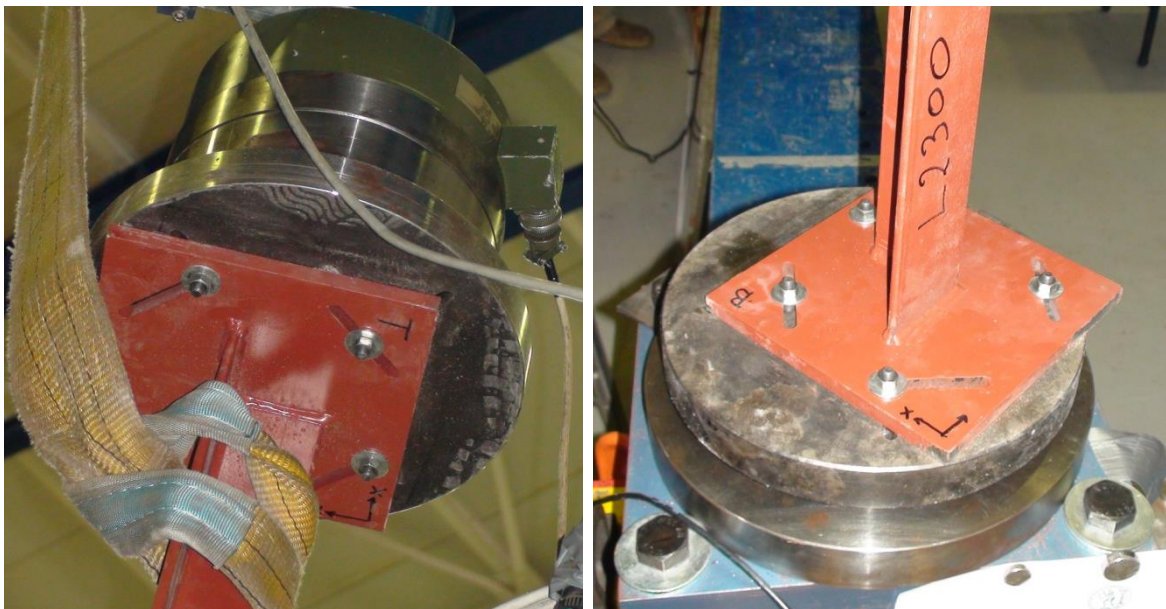
Σχήμα 5.6: Εικόνες κατά την παραγωγή και τοποθέτηση του ΙΟΠ πάνω στο χαλύβδινο μέλος (α, β), τελική εικόνα των δύο ενισχυμένων δοκιμίων (γ) και λεπτομέρειες αυτών (δ, ε)

## 5.4 Διάταξη και τοποθέτηση πειραματικών μοντέλων

Η διάταξη των δύο δοκιμίων που εξετάστηκαν έναντι θλίψης ήταν η ίδια. Η μόνη διαφορά τους αφορούσε την εκκεντρότητα φόρτισης. Τόσο λόγω του δεδομένου ύψους του πλαισίου δοκιμών, όσο και λόγω των διαμορφώσεων των άκρων των δοκιμίων (απόληξη δοκιμίων σε τετραγωνική πλάκα με επιμήκεις οπές) το «στήσιμο» αυτών των πειραμάτων ήταν μία σύνθετη διαδικασία, ίδια όμως για τα δύο δοκίμια.

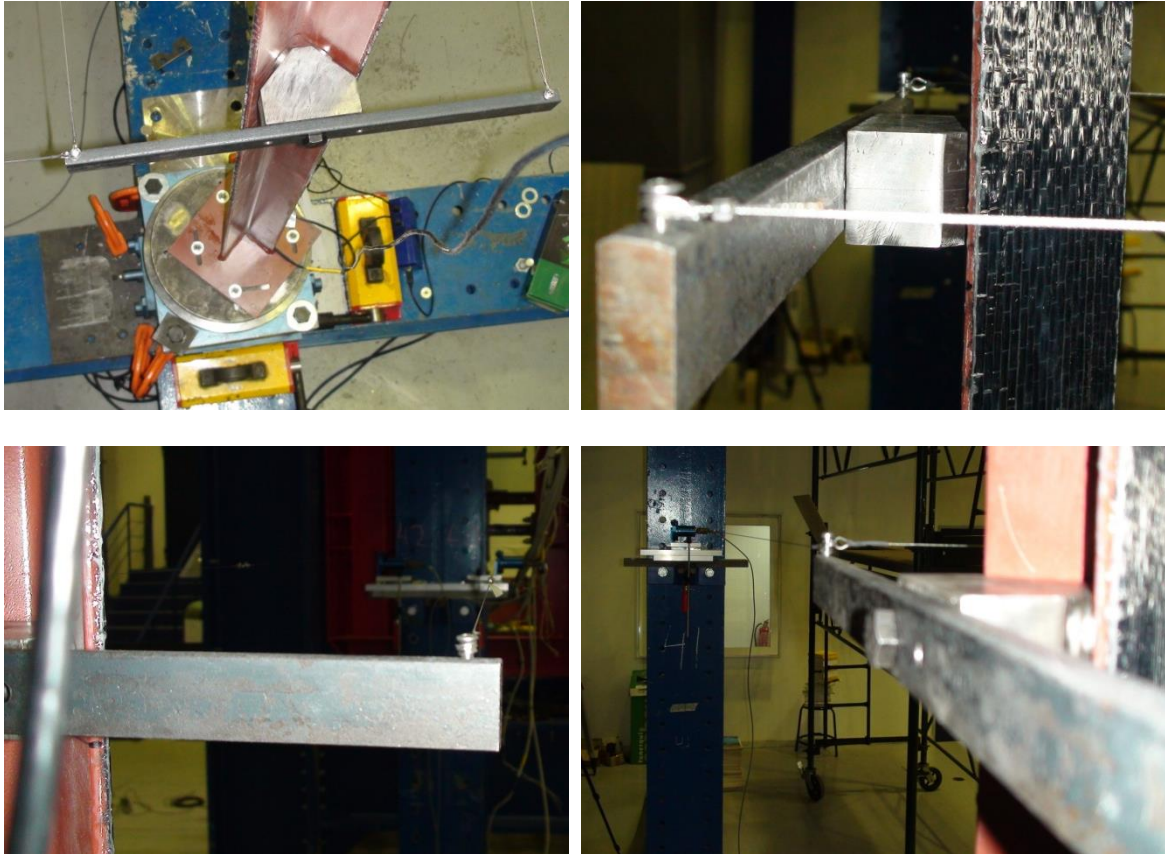
Η φόρτιση κάθε δοκιμίου διενεργήθηκε μέσω ενός συστήματος αρθρώσεων. Αρχικά, κάθε άκρο του συνδεόταν κοχλιωτά με κυκλική μεταλλική πλάκα. Η σύνδεσή τους γινόταν μέσω 4 κοχλιών, οι οποίοι εφαρμόζονταν σε κατάλληλες επιμήκεις οπές που είχαν διανοιχτεί στα δύο συνδεόμενα μέλη. Οι οπές της τετραγωνικής πλάκας απόληξης του γωνιακού ήταν κάθετες ως προς τις οπές της εφαρμοζόμενης κυκλικής πλάκας, έτσι ώστε να είναι εφικτή η πρόσδωση της εκάστοτε επιθυμητής εκκεντρότητας φόρτισης. Στο Σχήμα 5.7 παρακάτω απεικονίζονται οι κοχλιωτές συνδέσεις της πάνω και κάτω πλάκας απόληξης ενός δοκιμίου με την αντίστοιχη βοηθητική κυκλική μεταλλική πλάκα.

Οι δύο κυκλικές πλάκες που κοχλιώνονταν στα δύο άκρα του δοκιμίου ήταν κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να υποδέχονται τις δύο αρθρώσεις. Ειδικότερα, η άνω κυκλική πλάκα υποδεχόταν την άρθρωση υπό την επίπεδή της πλευρά, βιδωτά, μέσω υποδοχής σπειρώματος στο κέντρο της. Αντιθέτως, η κάτω αντίστοιχη πλάκα ήταν «θηλυκή<sup>13</sup>» και υποδεχόταν την άρθρωση υπό την ημισφαιρική της πλευρά μέσω ειδική υποδοχής. Η άνω άρθρωση «κούμπωνε» μέσω της ημισφαιρικής της πλευράς σε αντίστοιχη «θηλυκή» κυκλική πλάκα που ήταν εφαρμοσμένη στη δυναμοκυψέλη του επενεργητή εφαρμογής φόρτισης. Από την άλλη, η αντίστοιχη κάτω ήταν βιδωμένη μέσω σπειρώματος σε στερεωμένη κυκλική πλάκα, η οποία ήταν σε κατάλληλα διαμορφωμένη στέρα βάση, ειδικά συγκρατημένη μέσω σφιγκτήρων και ισχυρών μαγνητών.



Σχήμα 5.7: Κοχλιωτή σύνδεση άνω (αριστερά) και κάτω (δεξιά) πλάκας απόληξης εξεταζόμενου δοκιμίου με την αντίστοιχη βοηθητική κυκλική μεταλλική πλάκα

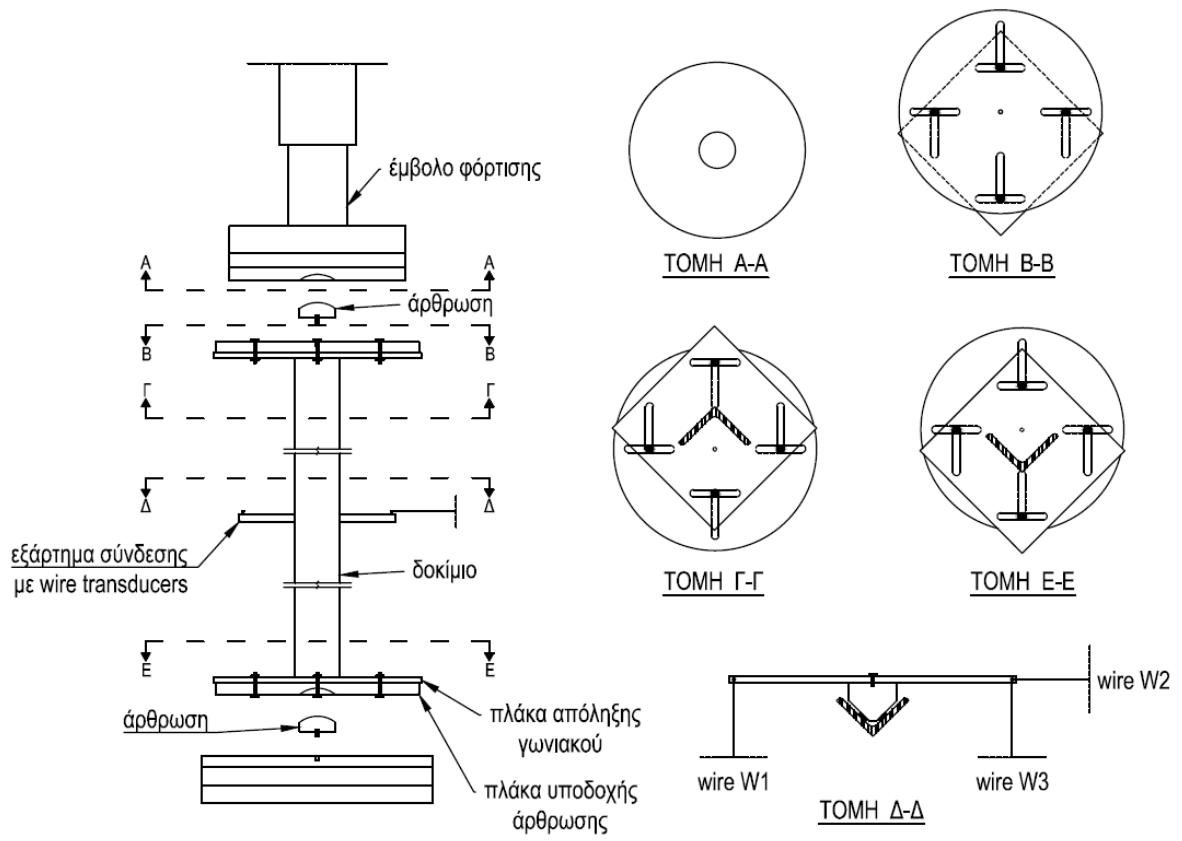
<sup>13</sup> Χαρακτηρισμός ενός εκ των δύο μελών μίας σύνδεσης, όταν αυτό αποτελεί υποδοχή του άλλου



Σχήμα 5.8: Τοποθέτηση ειδικού εξαρτήματος για καταγραφή μετατοπίσεων στο μέσον του δοκιμίου και τρόπος σύνδεσης αυτού με τα wire transducers

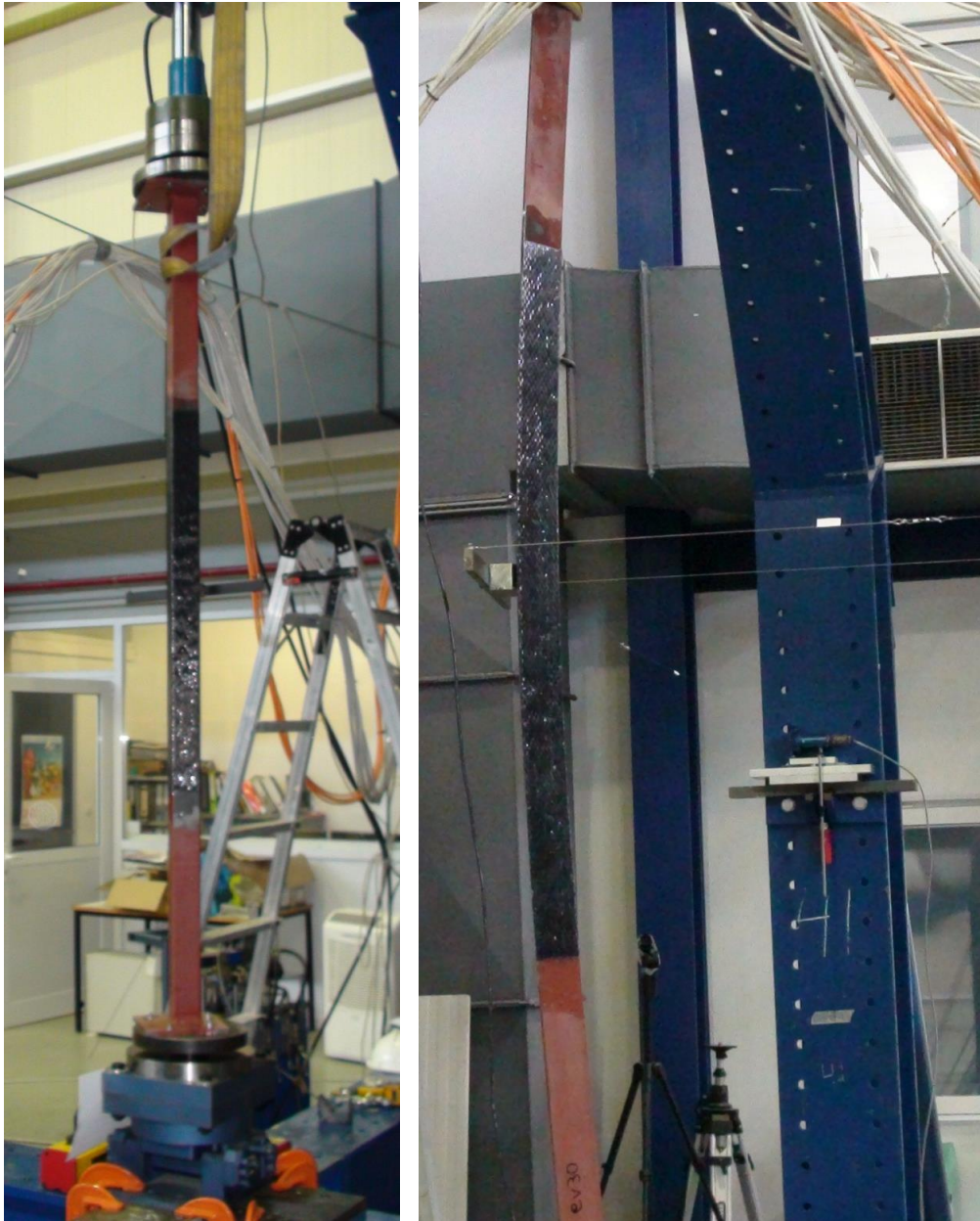
Συνεπώς, το συνολικό μήκος του μέλους στη συγκεκριμένη διάταξη φόρτισης, ήταν αυτό μεταξύ των δύο ακραίων αρθρώσεων. Στο μέσο αυτού του μήκους προσαρτήθηκε, μέσω δύο μικρών μαγνητών στην εσωτερική μεριά του γωνιακού, ειδικός μηχανισμός που επέτρεπε την εφαρμογή των νημάτων των τριών wire transducers πάνω στο μέλος. Οι τρεις μετρητές μετατόπισης ήταν με τη σειρά τους τοποθετημένοι στο κατάλληλο ύψος του πλαισίου δοκιμών. Ο τρόπος τοποθέτησης του εν λόγω εξαρτήματος, καθώς και η σύνδεση των wire transducers με αυτό, απεικονίζεται στο παραπάνω Σχήμα 5.8. Η κατασκευή αυτού του ειδικού μηχανισμού, καθώς επίσης και όλο το «στήσιμο» της πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ υπό το συντονισμό του εξειδικευμένου εργαστηριακού προσωπικού.

Η γενική καθολική διάταξη του πειραματικού συστήματος των θλιβόμενων μελών, καθώς και οι λεπτομέρειες της σύνδεσης των άκρων του δοκιμίου αλλά και του ειδικού μηχανισμού σύνδεσης των wire transducers σε αυτό, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.9 που ακολουθεί.



Σχήμα 5.9: Σχεδιαστική διάταξη πειραμάτων θλίψης

## 5.5 1<sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S1 ε<sub>v</sub>30)



Σχήμα 5.10: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης θλίψης για το πρώτο δοκίμιο, στην απαραμόρφωτη (αριστερά) και στην παραμορφωμένη (δεξιά) του κατάσταση

### 5.5.1 Περιγραφή πειράματος

Σκοπός του εν λόγω πειράματος ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς μιας, ενισχυμένης με ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά, χαλύβδινης δοκού διατομής ισοσκελούς γωνιακού όταν υπόκειται σε *έκκεντρη θλίψη*. Ειδικότερα, εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης της θλιπτικής συμπεριφοράς της χαλύβδινης δοκού, δηλαδή της συμπεριφοράς της σε λυγισμό, όταν ενισχυθεί τοπικά μέσω εξωτερικά επικολλώμενων ινοπλισμένων πολυμερών από ίνες άνθρακα (CFRP).

Η φόρτιση που επιβλήθηκε στο συγκεκριμένο δοκίμιο ήταν *έκκεντρη ως προς τον ισχυρό κύριο άξονα* της ενισχυμένης γωνιακής διατομής. Η εκκεντρότητα που εφαρμόστηκε ήταν η μέγιστη δυνατή, με βάση τη συγκεκριμένη διάταξη φόρτισης όπως

περιγράφηκε πιο πριν, ήτοι 30mm κατά τη διεύθυνση του ασθενή κύριου άξονα της διατομής. Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του εν λόγω πειράματος, ενώ έπειτα, στην ενότητα 5.5.3 γίνεται σύγκριση αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα δύο μη ενισχυμένων χαλύβδινων δοκιμίων ίδιας διατομής, όπως προέκυψαν κατά την ίδια υποβαλλόμενη εντατική κατάσταση. Η μονοτονική θλιπτική καταπόνηση που εφαρμόστηκε, υλοποιήθηκε υπό τη μορφή επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, μέσω του επενεργητή εφαρμογής φόρτισης (Σχήμα 5.1β) και της εφαρμοζόμενης σε αυτό δυναμοκυψέλης. Ο ρυθμός καταπόνησης που επιλέχθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα θλίψης ήταν 0,0025mm/sec.

Αναλυτικά οι διαστάσεις του συγκεκριμένου δοκιμίου, συμπεριλαμβανομένου του πάχους του στις ενισχυμένες περιοχές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 παρακάτω. Στον Πίνακα 5.2 αμέσως μετά περιέχονται συγκεντρωτικά τα σημαντικότερα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενισχυμένης γωνιακής διατομής. Τέλος, στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι μεταβολές των κυριότερων ιδιοτήτων του δοκιμίου λόγω της ενίσχυσής του. Για την καλύτερη κατανόηση, τόσο των διαστάσεων που αναφέρονται στους επόμενους πίνακες όσο και της συνολικής γεωμετρίας της ενισχυμένης διατομής, στο Σχήμα 5.11 της επόμενης σελίδας απεικονίζεται σχεδιαστικά η ενισχυμένη γωνιακή διατομή του δοκιμίου με σήμανση των κυριότερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών της.

Η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας της σύνθετης διατομής χάλυβα-CFRP έγινε σύμφωνα με το *Modular ratio concept*, το οποίο αξιοποιήθηκε σε αντίστοιχες εργασίες [ ]. Βασιζόμενοι σε αυτό, ο τύπος που αποδίδει το μέτρο ελαστικότητας είναι ο εξής:

$$E_{steel-CFRP} = \frac{E_{steel} \cdot t_{steel} + E_{CFRP} \cdot t_{CFRP}}{t_{tot}} \quad (5.1)$$

Πίνακας 5.1: Γεωμετρία δοκιμίου L2300 CFRP S1

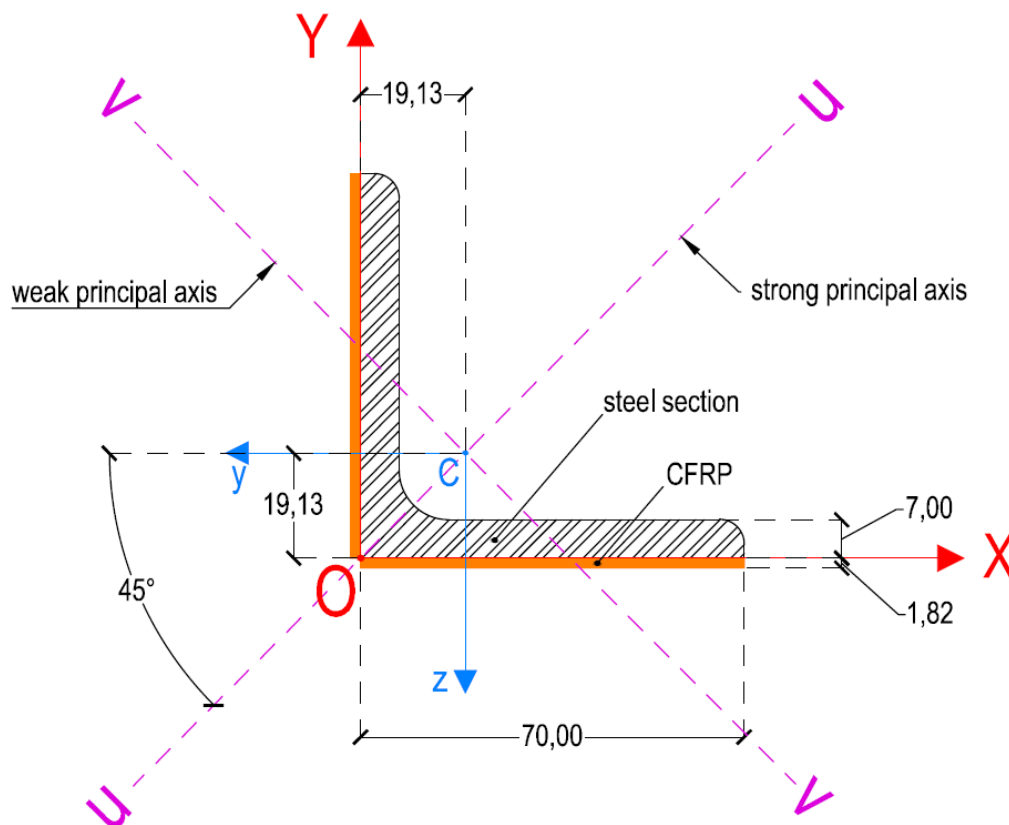
συνολικό μήκος δοκιμίου (L')	καθαρό μήκος δοκιμίου (L)	μήκος ενισχυτικής στρώσης (l <sub>CFRP</sub> )	πλάτος σκέλους γωνιακού (b <sub>steel</sub> )	πλάτος ενίσχυσης (b <sub>CFRP</sub> )	πάχος σκέλους γωνιακού (t <sub>steel</sub> )	συνολ. πάχος ενισχυμένου σκέλους (t <sub>tot</sub> )	πάχος ενισχυτικής στρώσης (t <sub>CFRP</sub> = t <sub>tot</sub> - t <sub>steel</sub> )
2300 mm	2170 mm	1010 mm	70 mm	70 mm	7 mm	8,82 mm	1,82 mm

Πίνακας 5.2: Κυριότερα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου L2300 CFRP S1

θέση κέντρου βάρους ως προς άξονα αναφοράς X (X <sub>oc</sub> )	θέση κέντρου βάρους ως προς άξονα αναφοράς Y (Y <sub>oc</sub> )	ροπή αδρανείας περί τον ισχυρό κύριο άξονα (I <sub>u</sub> )	ροπή αδρανείας περί τον ασθενή κύριο άξονα (I <sub>v</sub> )	μέτρο ελαστικότητας ενισχυμένης διατομής (E <sub>steel-CFRP</sub> )
19,13 mm	19,13 mm	888954 mm <sup>4</sup>	230272 mm <sup>4</sup>	172,5 GPa

Πίνακας 5.3: Μεταβολή κυριότερων ιδιοτήτων δοκιμίου S1 λόγω ενίσχυσής του με CFRP

Μέλος	εμβαδόν A (mm <sup>2</sup> )	μέτρο ελαστικ. E (GPa)	κύριες ροπές αδρανείας I <sub>u</sub> (mm <sup>4</sup> )	I <sub>v</sub> (mm <sup>4</sup> )	δυσκαμψία ως προς κύριους άξονες EI <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	EI <sub>v</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
χαλύβδινο	940	210	671000	176000	140910	36960
ενισχυμένο	1195	172,5	888954	230272	153315	39714
μεταβολή	+27,11%	-17,87%	+32,48%	+30,84%	+8,80%	+7,45%



Σχήμα 5.11: Σχεδιαστική απεικόνιση ενισχυμένης γωνιακής διατομής με σήμανση των κυριότερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών της και εμφάνιση των κυρίων αξόνων αυτής (διαστάσεις σε mm)

### 5.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Η αστοχία του συγκεκριμένου δοκιμίου, που υποβλήθηκε σε έκκεντρη ως προς τον ισχυρό του άξονα θλίψη, επήλθε λόγω ελαστικού καθολικού λυγισμού τύπου Euler ολόκληρου του μέλους. Παρότι η εκκεντρότητα φόρτισης ήταν ως προς τον ισχυρό του άξονα, παρατηρήθηκε *ισόποση παραμόρφωση ως προς δύο κύριους άξονες* της διατομής του μέλους (άξονες u-u και v-v Σχήματος 5.11), συνοδευόμενη από *περιστροφή του μέλους* ως προς το κέντρο στροφής της διατομής του (σημείο συμβολής σκελών).

Οι ενισχυτικές στρώσεις από CFRP δεν αστόχησαν (απουσία θραύσης αυτών), ενώ και οι ακραίες περιοχές σύνδεσης της ενίσχυσης με το χαλύβδινο μέλος, οι οποίες είναι περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, έμειναν ανέπαφες χωρίς την παραμικρή ύπαρξη αποκόλλησής τους (debonding).

Τα αποτελέσματα προέκυψαν τόσο με χρήση του συστήματος PXI όσο και από τις καταγραφές των wire transducers αλλά και των κλινομέτρων. Συγκεκριμένα, μέσω των καταγραφών της μηχανής εξήχθη αναλυτικά η εξέλιξη της εφαρμοζόμενης έντασης του δοκιμίου, ενώ από τις καταγραφές των wire transducers αποκτήθηκε πλήρης εποπτεία των μετατοπίσεων στο μέσον του δοκιμίου (μέγιστη παραμόρφωση) κατά τη διεύθυνση των δύο κυρίων αξόνων της διατομής του.

Επίσης, μέσω των καταγραφών των δύο παράλληλα τοποθετημένων wire transducers κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της όποιας στροφής του μέλους περί το διαμήκη του άξονα (περιστροφή θλιβόμενου μέλους). Αναλυτικότερα, η περιστροφή του μέλους υπολογίστηκε για κάθε καταγραφή των μετρητών μετατόπισης ως δίνεται από την ακόλουθη σχέση:



$$\varphi_z = \arctan\left(\left|du^{(W3)} - du^{(W1)}\right|/\ell_{W1-W3}\right) \quad (5.2)$$

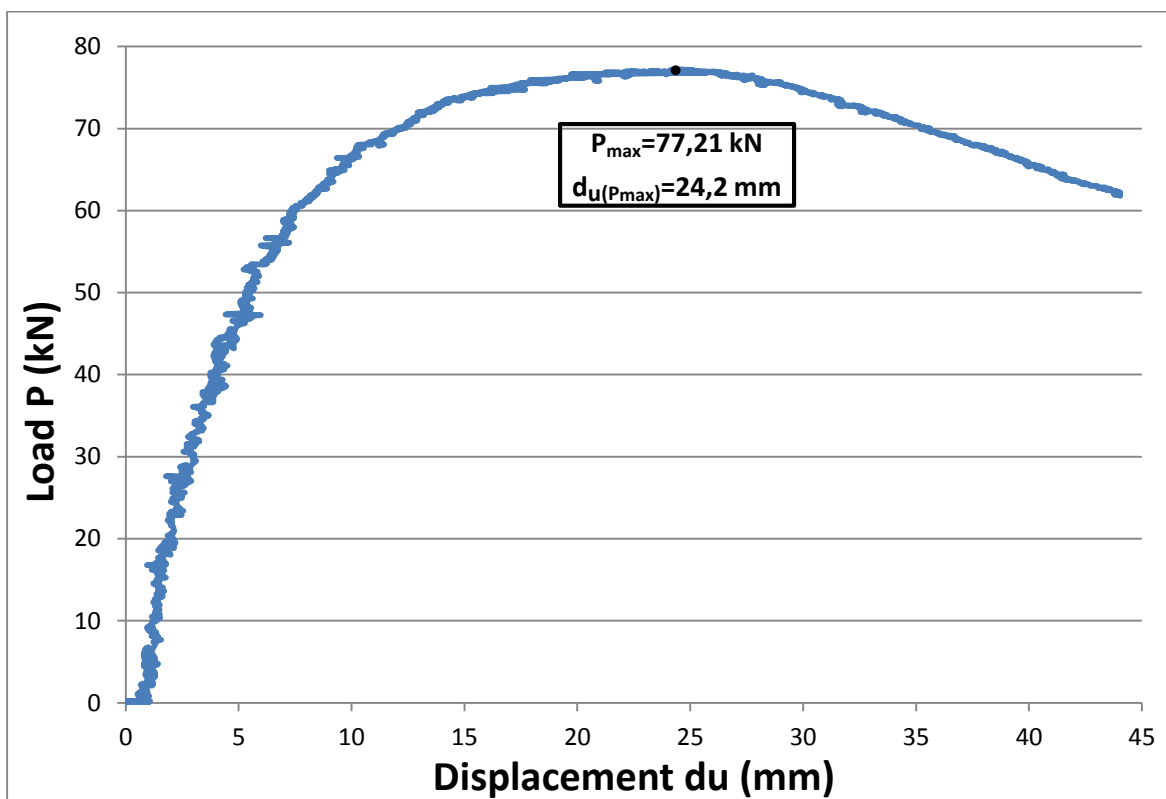
όπου

$du^{(W1)}, du^{(W3)}$  οι εκάστοτε καταγραφές μετατοπίσεων του μέσου του μέλους κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα από τα δύο παράλληλα τοποθετημένα wire transducers W1 και W3

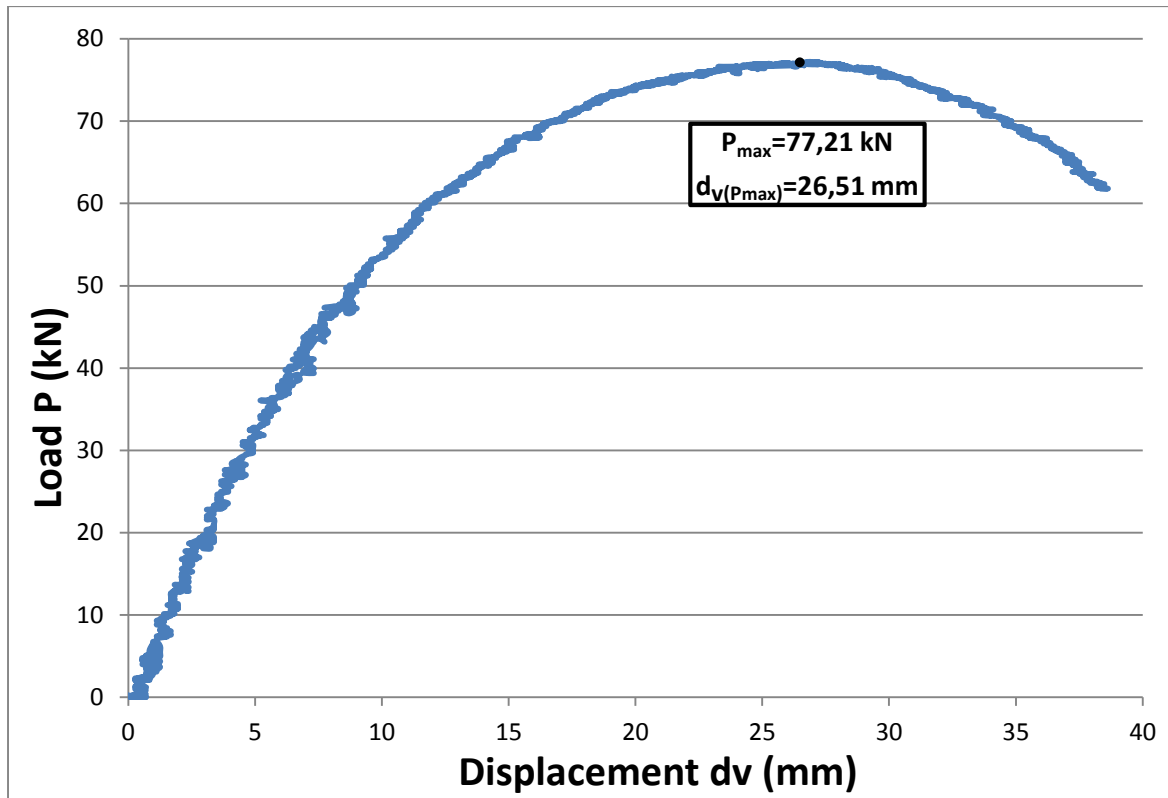
$\ell_{W1-W3}$  η απόσταση μεταξύ αυτών των δύο wire transducers, ίση με 400mm

Τέλος, μέσω των κλινομέτρων καταγράφηκαν οι στροφές των δύο άκρων του θλιβόμενου μέλους, περί τους κύριους άξονες της διατομής (εφόσον τα κλινομέτρα τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι τοπικοί τους άξονες καταγραφών να συμπίπτουν με τους κύριους άξονες της διατομής).

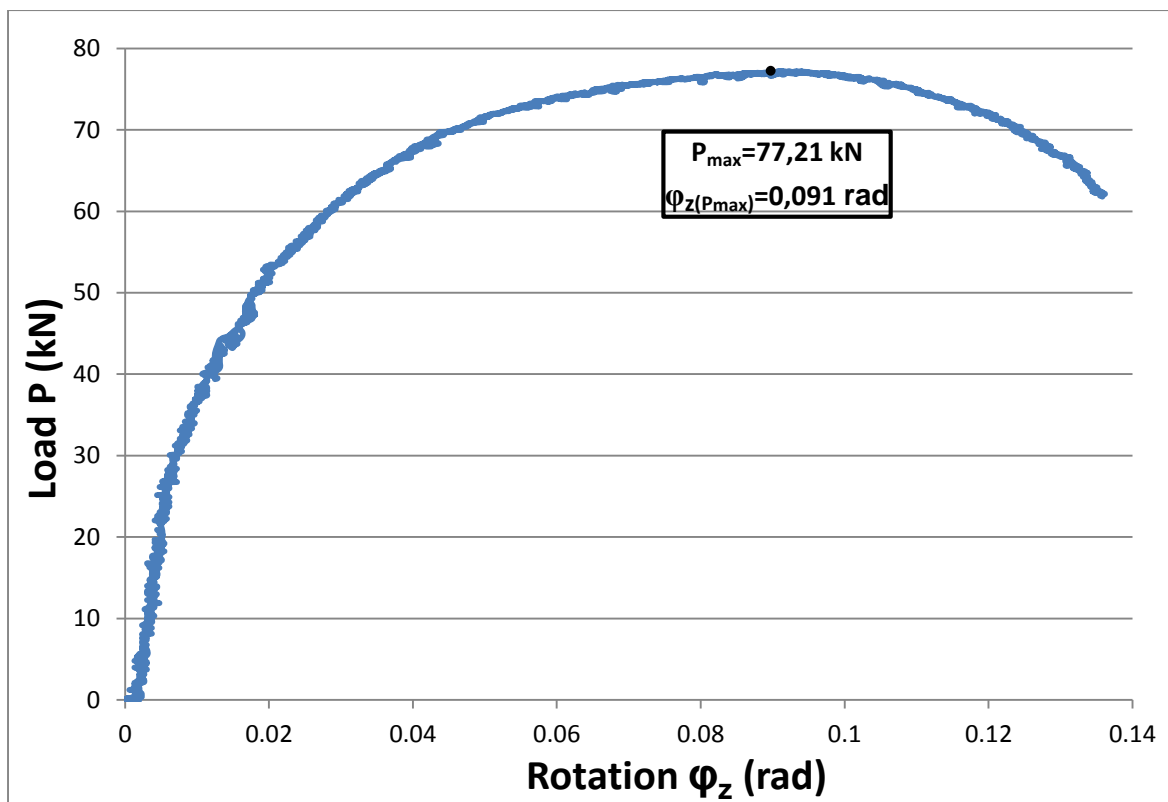
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ακολουθώς στο Σχήμα 5.12 υπό τη μορφή τριών διαγραμμάτων: α) κατακόρυφου φορτίου-μετατόπισης κατά τον ισχυρό κύριο άξονα, β) κατακόρυφου φορτίου-μετατόπισης κατά τον ασθενή κύριο άξονα και γ) κατακόρυφου φορτίου-στροφής μέλους περί το διαμήκη του άξονα. Συμφώνως προς τις διατάξεις του κανονισμού, το πείραμα διεκόπη μόλις η τιμή του φορτίου απομειώθηκε περίπου κατά το ένα πέμπτο της μέγιστης τιμής του.



α) διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης μέσου κατά τον ισχυρό κύριο άξονα



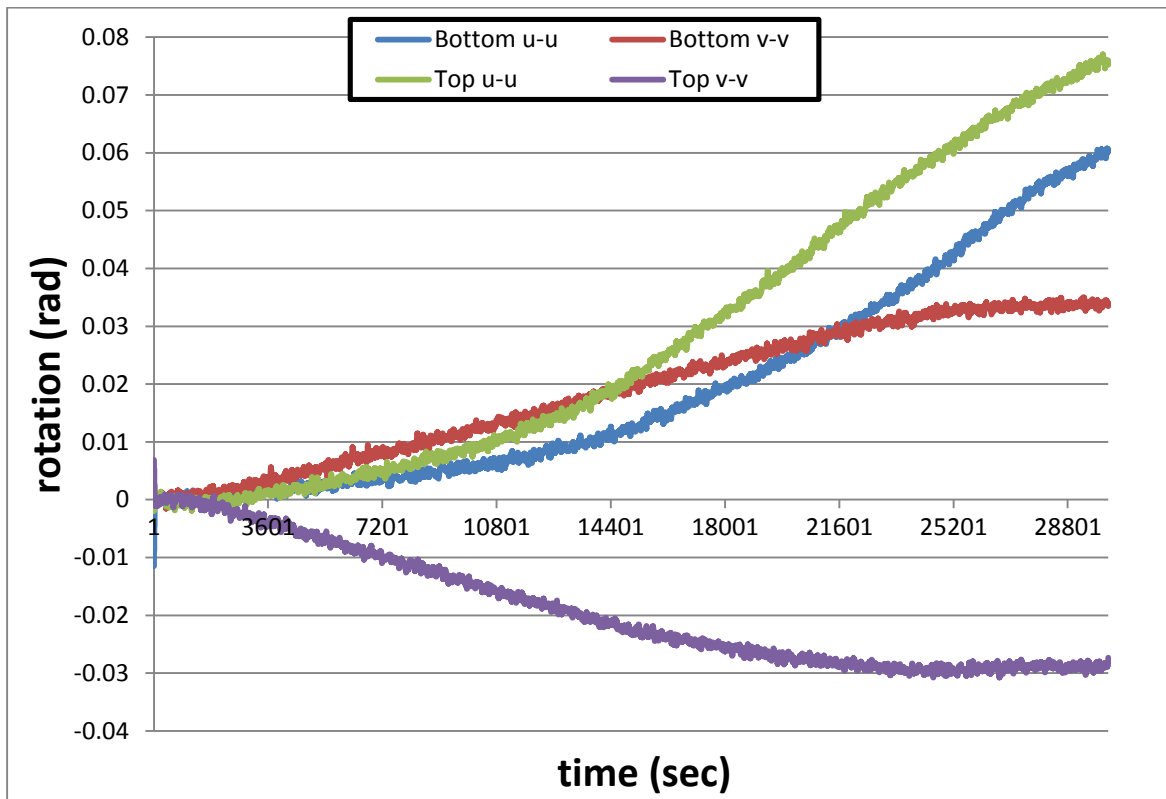
β) διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης μέσου κατά τον ασθενή κύριο άξονα



γ) διάγραμμα φορτίου-στροφής μέλους περί το διαμήκη του άξονα

Σχήμα 5.12: Αποτελέσματα πειράματος θλίψης δοκιμίου S1 υπό τη μορφή διαγραμμάτων

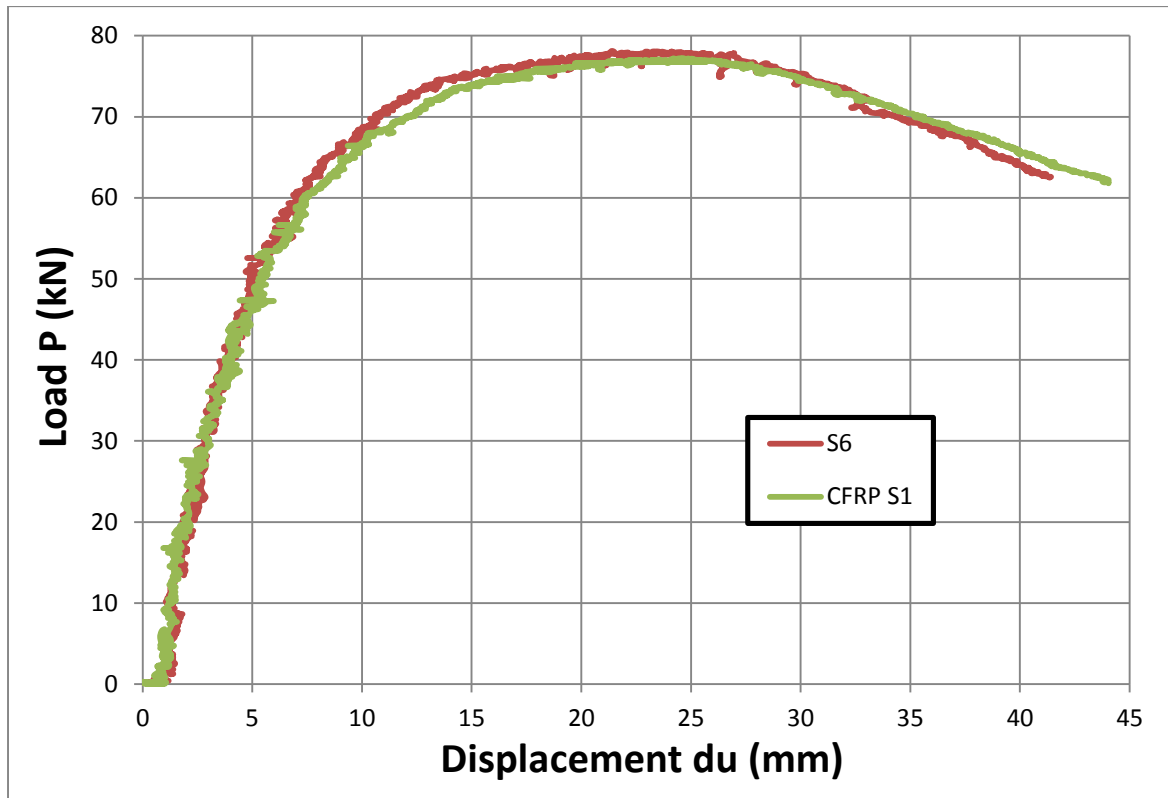
Ακολούθως, στο Σχήμα 5.13 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κλινομέτρων, δηλαδή η χρονική εξέλιξη της στροφής των δύο άκρων του δοκιμίου κατά τη διάρκεια όλου του πειράματος.



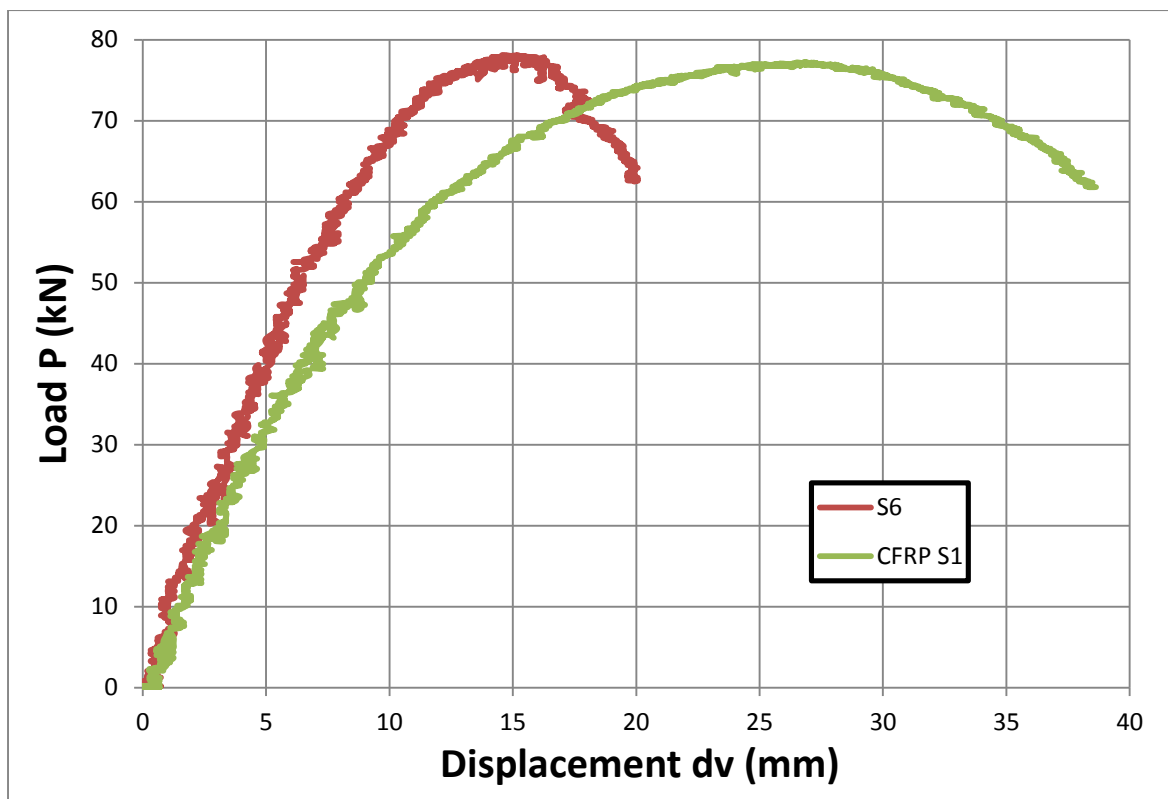
Σχήμα 5.13: Χρονική εξέλιξη στροφής άκρων δοκιμίου S1

### 5.5.3 Σύγκριση με αντίστοιχο μη ενισχυμένο

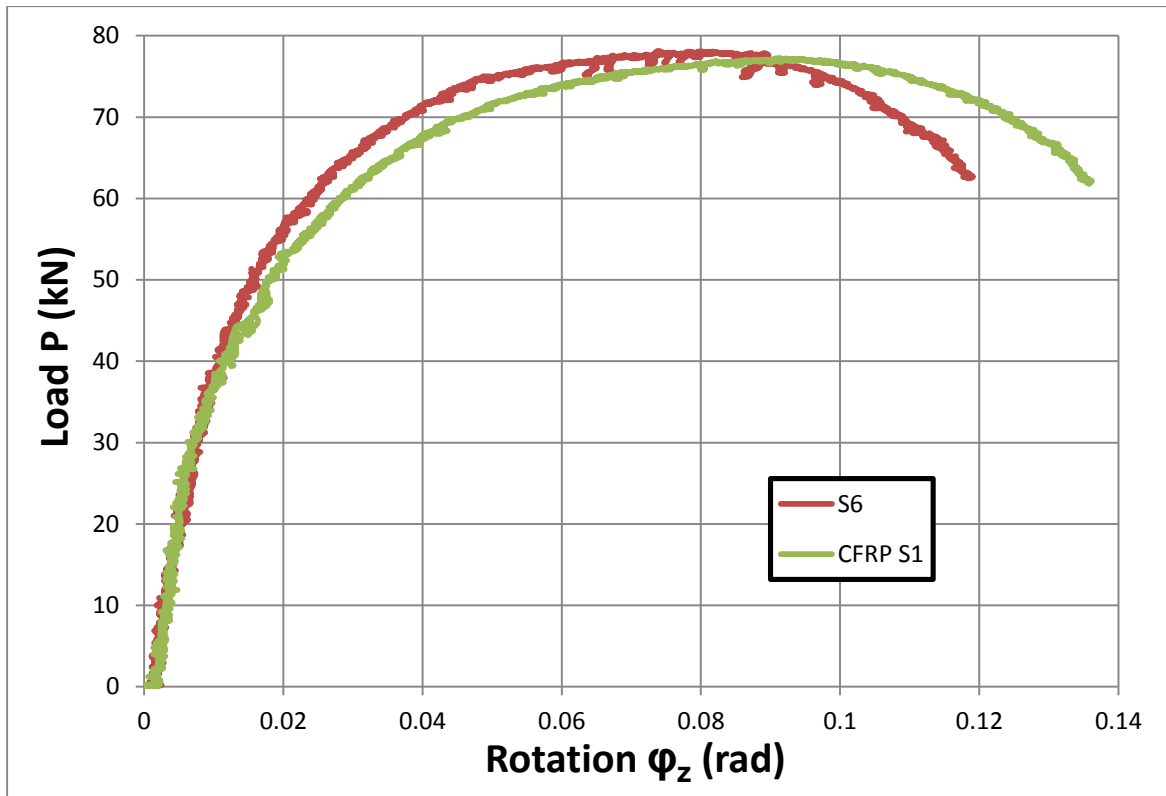
Για να διαπιστωθεί η όποια συμβολή του συγκεκριμένου τρόπου ενίσχυσης στη συμπεριφορά του αμιγώς χαλύβδινου θλιβόμενου μέλους, είναι απαραίτητος ο παραλληλισμός και η σύγκριση με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων δοκιμίων. Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται υπό τη μορφή κοινών διαγραμμάτων τα αποτελέσματα του ενισχυμένου γωνιακού με τα εν λόγω των αντίστοιχων μη ενισχυμένων. Τόσο η εκκεντρότητα φόρτισης, όσο και καθολικά η πειραματική διάταξη ήταν ακριβώς η ίδια στα τρία αυτά δοκίμια.



α) διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης μέσω του ισχυρού κύριου άξονα



β) διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης μέσω του ασθενή κύριου άξονα



γ) διαγράμματα φορτίου-στροφής μέλους περί το διαμήκη του άξονα

Σχήμα 5.14: Συμπεριφορά ενισχυμένου και μη ενισχυμένου μέλους σε έκκεντρη ως προς τον ασθενή κύριο άξονα θλίψη

Στον ακόλουθο Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δύο αυτών θλιβόμενων μελών και γίνονται οι απαραίτητες συγκρίσεις των συμπεριφορών τους. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην οριακή τιμή του μέγιστου φορτίου κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 5.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων θλιβόμενων δοκιμίων με εκκεντρότητα ως προς τον ισχυρό κύριο άξονα

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο $P_{max}$	Παραμόρφ. μέσου κατά τον ισχυρό $du^{(P_{max})}$	Παραμόρφ. μέσου κατά τον ασθενή $dv^{(P_{max})}$	Περιστροφή μέλους $\varphi_z^{(P_{max})}$	Στροφή άκρου περί τον ισχυρό $\theta_u^{(P_{max})}$	Στροφή άκρου περί τον ασθενή $\theta_v^{(P_{max})}$
Μη ενισχυμένο						
S6	78,1 kN	21,37 mm	14,56 mm	0,074 rad	0,03 rad	0,04 rad
Ενισχυμένο						
CFRP S1	77,21 kN	24,2 mm	26,51 mm	0,091 rad	0,03 rad	0,04 rad
Μεταβολή	-1,13%	+13,24%	+82,07%	+22,97%	-	-

#### 5.5.4 Συμπεράσματα

Παρ' ότι ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης δεν οδήγησε στην αύξηση του οριακού φορτίου του θλιβόμενου μέλους, όπως γίνεται αντιληπτό από τον Πίνακα 5.4, εντούτοις σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στην παραμορφωσιμότητα του μέλους.

Όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.3, κατά το συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης του γωνιακού παρατηρήθηκε το εξής παράδοξο. Από τη μία το μέτρο ελαστικότητας του μέλους μειώθηκε λόγω της ενίσχυσης (ως απόρροια του πολύ χαμηλού μέτρου ελαστικότητας που παρουσίασε το ινοπλισμένο πολυμερές που δημιουργήθηκε), από την άλλη όμως, οι κύριες ροπές αδρανείας της διατομής αυξήθηκαν (λόγω αύξησης της συνολικής της γεωμετρίας). Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας ήταν 18%, ενώ η αύξηση των κύριων ροπών αδρανείας του μέλους ήταν της τάξης του 30%.

Η εν λόγω αντίστροφη μεταβολή αυτών των δύο χαρακτηριστικών του μέλους (μείωση μέτρου ελαστικότητας, αύξηση κύριων ροπών αδρανείας), οδήγησαν σε μεταβολές των δυσκαμψιών του μέλους ως προς τους κύριους άξονες της διατομής του. Αναλυτικότερα, οι τελικές δυσκαμψίες του ενισχυμένου μέλους περί τους κύριους άξονες εμφανίζονται αυξημένες κατά περίπου 8%. Το εν λόγω ποσοστό *θα μπορούσε να είναι αρκετά μεγαλύτερο* αν είχε χρησιμοποιηθεί *καλύτερης ποιότητας* ινοπλισμένο πολυμερές, το οποίο θα οδηγούσε σε αύξηση και του μέτρου ελαστικότητας του μέλους.

Συνεπώς, το εξεταζόμενο μέλος έγινε ελαφρώς πιο δύσκαμπτο περί τους δύο κύριους άξονες του. Παρ' όλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν επιβεβαιώνεται από τα αντίστοιχα διαγράμματα (P-du) και (P-dv) του Σχήματος 5.14. Συγκεκριμένα, παρατηρείται περίπου ίδια συμπεριφορά του ενισχυμένου και του μη ενισχυμένου μέλους κατά την παραμόρφωσή τους περί τον ασθενή κύριο άξονά της διατομής, ενώ κατά την παραμόρφωση περί τον ισχυρό το ενισχυμένο μέλος ανέπτυξε *σημαντικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις*.

Οι στροφές των άκρων του μέλους παρέμειναν ανεπηρέαστες από την εφαρμογή της ενίσχυσης, όπως μετρήθηκαν από τα προσαρμοσμένα κλινόμετρα. Όμως, παρατηρήθηκε αύξηση της περιστροφής του μέλους, κατά 23%, η οποία οφείλεται στην μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα που εμφάνισε το ενισχυμένο δοκίμιο κατά το λυγισμό του περί τον ισχυρό του κύριο άξονα. Αναλυτικότερα, σημειώνεται ότι ενώ το μη ενισχυμένο μέλος εμφάνισε λυγισμό κατά κύριο λόγο ως προς τον ασθενή κύριο άξονα της διατομής του, στο ενισχυμένο μέλος οι παραμορφώσεις κατά τους δύο κύριους άξονες είναι περίπου οι ίδιες. Αυτό ερμηνεύεται και από την αύξηση της περιστροφής του ενισχυμένου μέλους.

Πάντως, καθώς ο λυγισμός αποτελεί ένα φαινόμενο αστάθειας και σχετίζεται κυρίως με τη γεωμετρία του θλιβόμενου μέλους, ήταν αναμενόμενο να μην παρατηρηθούν εξαιρετικά μεγάλες διαφοροποιήσεις κατά το συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης που εφαρμόστηκε. Η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη συμπεριφορά του θλιβόμενου μέλους άλλωστε παρατηρήθηκαν στην παρούσα εργασία, όπως σχολιάστηκε από την μεταβολή των ροπών αδρανείας του μέλους. Σε αντίθεση λοιπόν με την αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση των [38] όπου παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του θλιβόμενου γωνιακού, στη συγκεκριμένη περίπτωση κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε. Ο λόγος είναι η κατά πολύ *ασθενέστερη ενίσχυση* που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, απόρροια οικονομικών περιορισμών.

Βέβαια, αξίζει να τονιστεί ότι όλα αυτά επιτεύχθηκαν απλά με τη χρήση πολύ μικρού ποσοστού ενίσχυσης. Αρκεί να αναλογιστεί κανείς ότι χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο στρώσεις υφάσματος ινών, πάχους 0,12mm η καθεμία, ενώ και το ποσοστό συμμετοχής των ινών στην τελική σύνθεση του πολυμερούς ήταν πολύ χαμηλή, της τάξεως του 15%.

## 5.6 2<sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S2 ε<sub>u</sub>30)



Σχήμα 5.15: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης θλίψης για το δεύτερο δοκίμιο, στην απαραμόρφωτη (αριστερά) και στην παραμορφωμένη (δεξιά) του κατάσταση

### 5.6.1 Περιγραφή πειράματος

Η φόρτιση που επιβλήθηκε στο συγκεκριμένο δοκίμιο ήταν έκκεντρη *ως προς τον ασθενή κύριο άξονα* της ενισχυμένης γωνιακής διατομής. Η εκκεντρότητα που εφαρμόστηκε ήταν και σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη δυνατή, ήτοι 30mm κατά τη διεύθυνση του ισχυρού κύριου άξονα της διατομής. Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του εν λόγω πειράματος, ενώ έπειτα, στην ενότητα 5.6.3 γίνεται σύγκριση αυτών με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενός *μη*

ενισχυμένου χαλύβδινου δοκιμίου ίδιας διατομής. Και σε αυτή την περίπτωση επιλέχθηκε ο ίδιος ρυθμός καταπόνησης, δηλαδή 0,0025mm/sec.

Αναλυτικά οι διαστάσεις του συγκεκριμένου δοκιμίου, συμπεριλαμβανομένου του πάχους του στις ενισχυμένες περιοχές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5 παρακάτω. Στον Πίνακα 5.6 αμέσως μετά περιέχονται συγκεντρωτικά τα σημαντικότερα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ενισχυμένης γωνιακής διατομής. Τέλος, στον Πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι μεταβολές των κυριότερων ιδιοτήτων του δοκιμίου λόγω της ενίσχυσής του. Η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας της σύνθετης διατομής χάλυβα-CFRP έγινε σύμφωνα με το *Modular ratio concept* (εξίσωση (5.1)).

Πίνακας 5.5: Γεωμετρία δοκιμίου L2300 CFRP S2

συνολικό μήκος δοκιμίου ( $L'$ )	καθαρό μήκος δοκιμίου ( $L$ )	μήκος ενισχυτικής στρώσης ( $l_{CFRP}$ )	πλάτος σκέλους γωνιακού ( $b_{steel}$ )	πλάτος ενίσχυσης ( $b_{CFRP}$ )	πάχος σκέλους γωνιακού ( $t_{steel}$ )	συνολ. πάχος ενισχυμένου σκέλους ( $t_{tot}$ )	πάχος ενισχυτικής στρώσης ( $t_{CFRP} = t_{tot} - t_{steel}$ )
2300 mm	2170 mm	1010 mm	70 mm	70 mm	7 mm	8,74 mm	1,74 mm

Πίνακας 5.6: Κυριότερα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου L2300 CFRP S2

θέση κέντρου βάρους ως προς άξονα αναφοράς $X$ ( $X_{oc}$ )	θέση κέντρου βάρους ως προς άξονα αναφοράς $Y$ ( $Y_{oc}$ )	ροπή αδρανείας περί τον ισχυρό κύριο άξονα ( $I_u$ )	ροπή αδρανείας περί τον ασθενή κύριο άξονα ( $I_v$ )	μέτρο ελαστικότητας ενισχυμένης διατομής ( $E_{steel-CFRP}$ )
19,16 mm	19,16 mm	879029 mm <sup>4</sup>	227904 mm <sup>4</sup>	173,8 GPa

Πίνακας 5.7: Μεταβολή κυριότερων ιδιοτήτων δοκιμίου S2 λόγω ενίσχυσής του με CFRP

Μέλος	εμβαδόν $A$ (mm <sup>2</sup> )	μέτρο ελαστικ. $E$ (GPa)	κύριες ροπές αδρανείας $I_u$ (mm <sup>4</sup> )	$I_v$ (mm <sup>4</sup> )	δυσκαμψία ως προς κύριους άξονες $EI_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$EI_v$ (kN/m <sup>2</sup> )
χαλύβδινο	940	210	671000	176000	140910	36960
ενισχυμένο	1184	173,8	879029	227904	152765	39607
μεταβολή	+25,91%	-17,24%	+31,00%	+29,49%	+8,41%	+7,16%

## 5.6.2 Πειραματικά αποτελέσματα

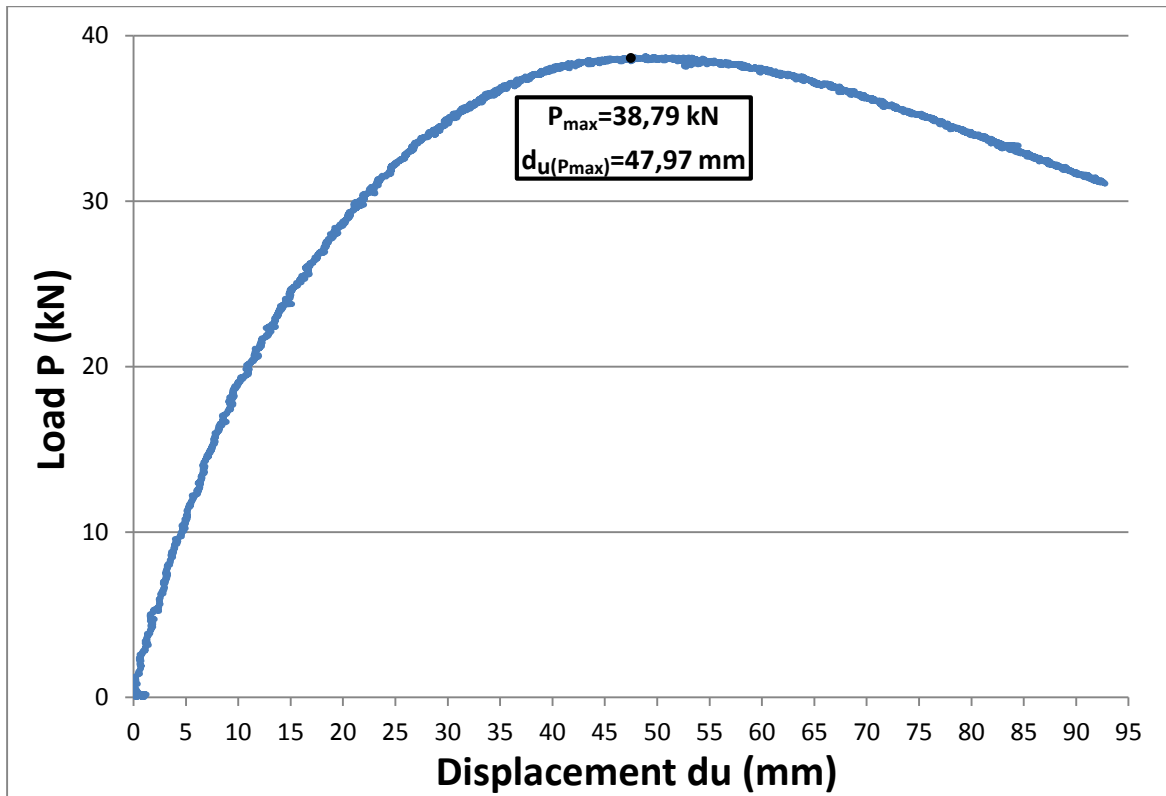
Η αστοχία του συγκεκριμένου δοκιμίου, που υποβλήθηκε σε έκκεντρη ως προς τον ασθενή του άξονα θλίψη, επήλθε και σε αυτή την περίπτωση λόγω *ελαστικού καθολικού λυγισμού* τύπου Euler ολόκληρου του μέλους. Ο λυγισμός του μέλους, εφόσον και η εκκεντρότητα φόρτισης ήταν ως προς αυτόν τον άξονα, παρατηρήθηκε όπως ήταν αναμενόμενο περί τον *ασθενή κύριο άξονα* της διατομής του (άξονας u-u Σχήματος 5.11).

Οι ενισχυτικές στρώσεις από CFRP, όπως και στο πρώτο πείραμα, δεν αστόχησαν (απουσία θραύσης αυτών), ενώ οι ακραίες περιοχές σύνδεσης της ενίσχυσης με το χαλύβδινο μέλος, οι οποίες είναι περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, έμειναν και σε

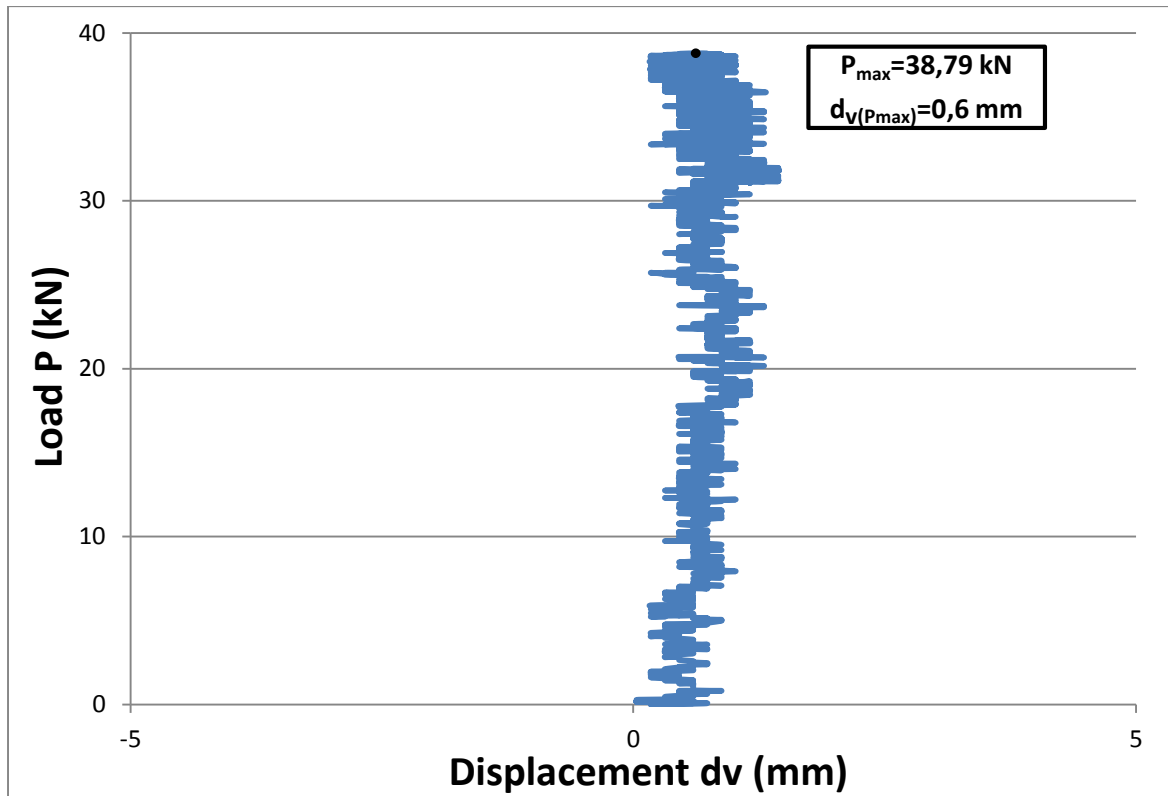


αυτή την περίπτωση ανέπαφες χωρίς την παραμικρή ύπαρξη αποκόλλησής τους (debonding).

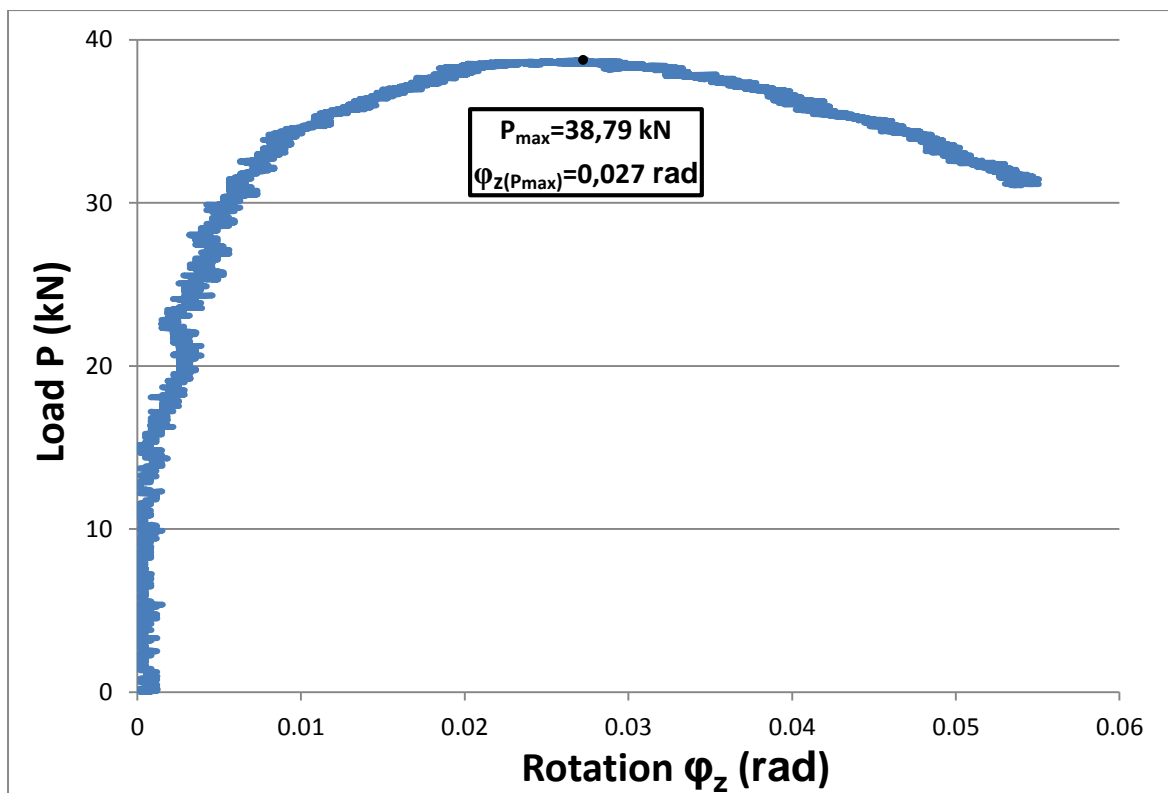
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ακολούθως στο Σχήμα 5.16 υπό τη μορφή τριών διαγραμμάτων: α) κατακόρυφου φορτίου-μετατόπισης κατά τον ισχυρό κύριο άξονα, β) κατακόρυφου φορτίου-μετατόπισης κατά τον ασθενή κύριο άξονα και γ) κατακόρυφου φορτίου-στροφής μέλους περί το διαμήκη του άξονα. Στο Σχήμα 5.17 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κλινομέτρων, δηλαδή η χρονική εξέλιξη της στροφής των δύο άκρων του δοκιμίου κατά τη διάρκεια όλου του πειράματος. Συμφώνως προς τις διατάξεις του κανονισμού, το πείραμα διεκόπη μόλις η τιμή του φορτίου απομειώθηκε περίπου κατά το ένα πέμπτο της μέγιστης τιμής του.



α) διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης μέσου κατά τον ισχυρό κύριο άξονα

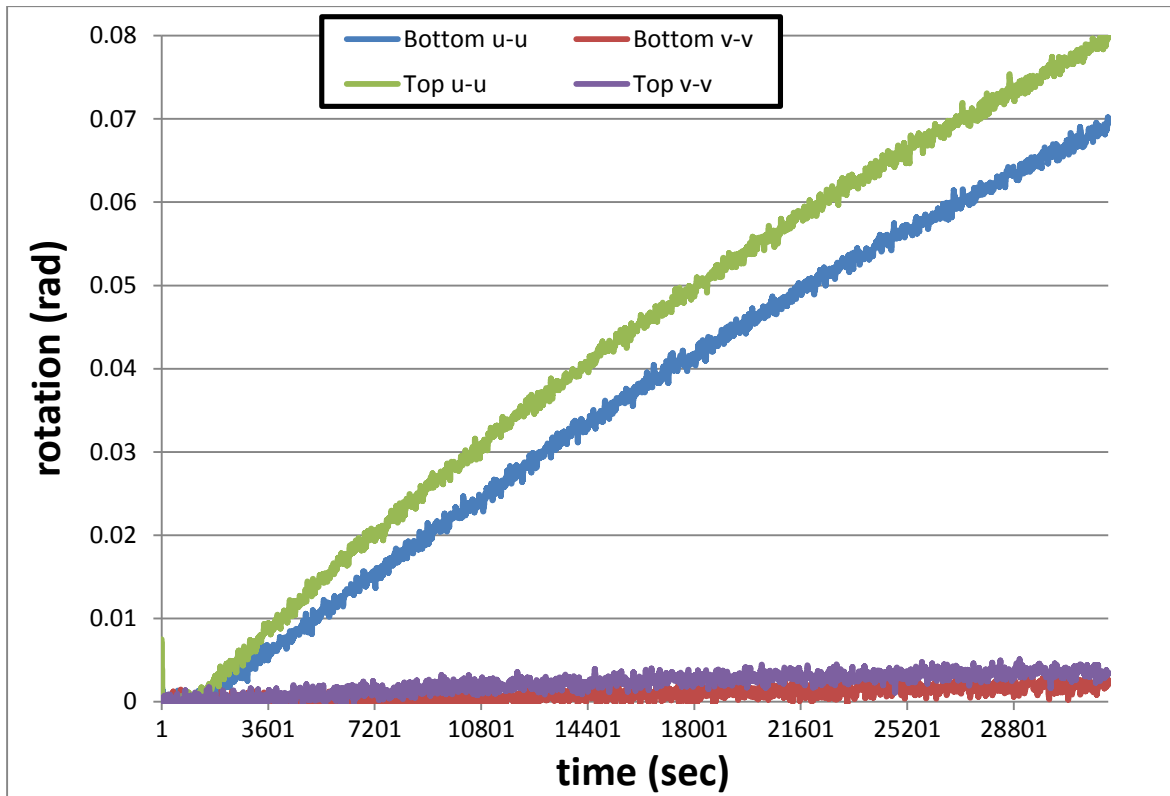


β) διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης μέσου κατά τον ασθενή κύριο άξονα



γ) διάγραμμα φορτίου-στροφής μέλους περί το διαμήκη του άξονα

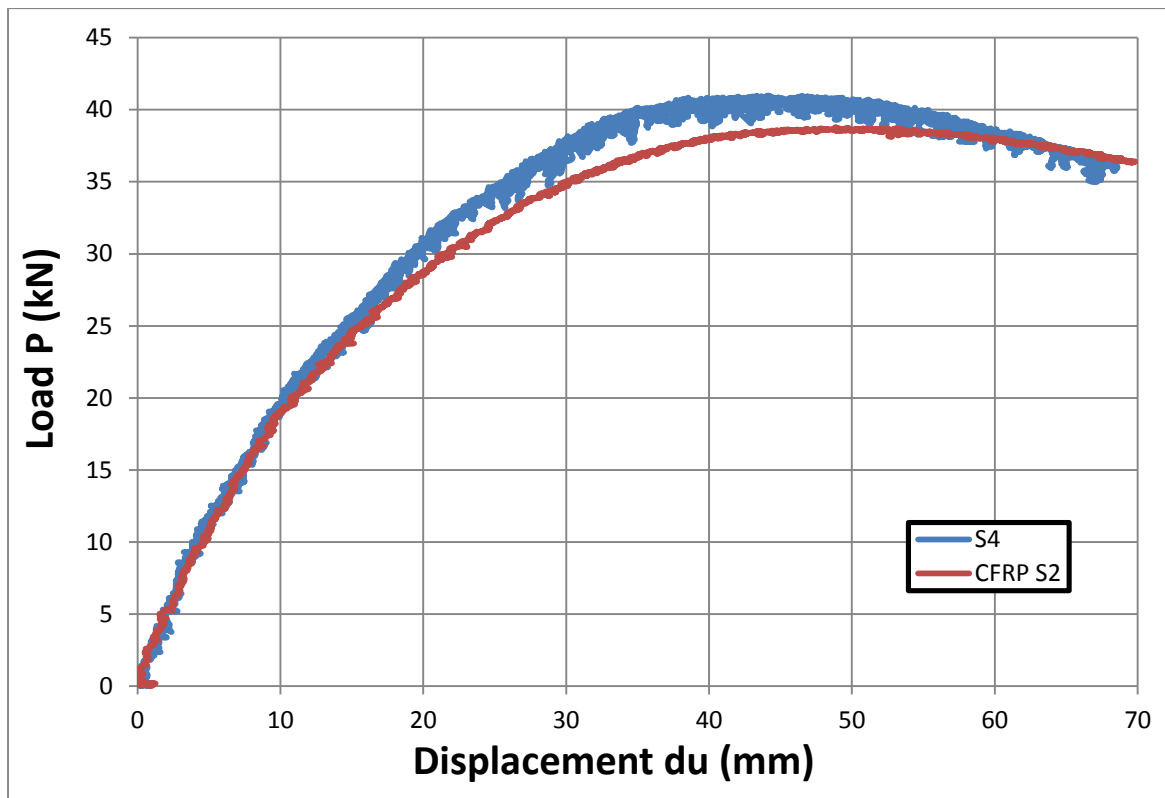
Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα πειράματος θλίψης δοκιμίου S2 υπό τη μορφή διαγραμμάτων



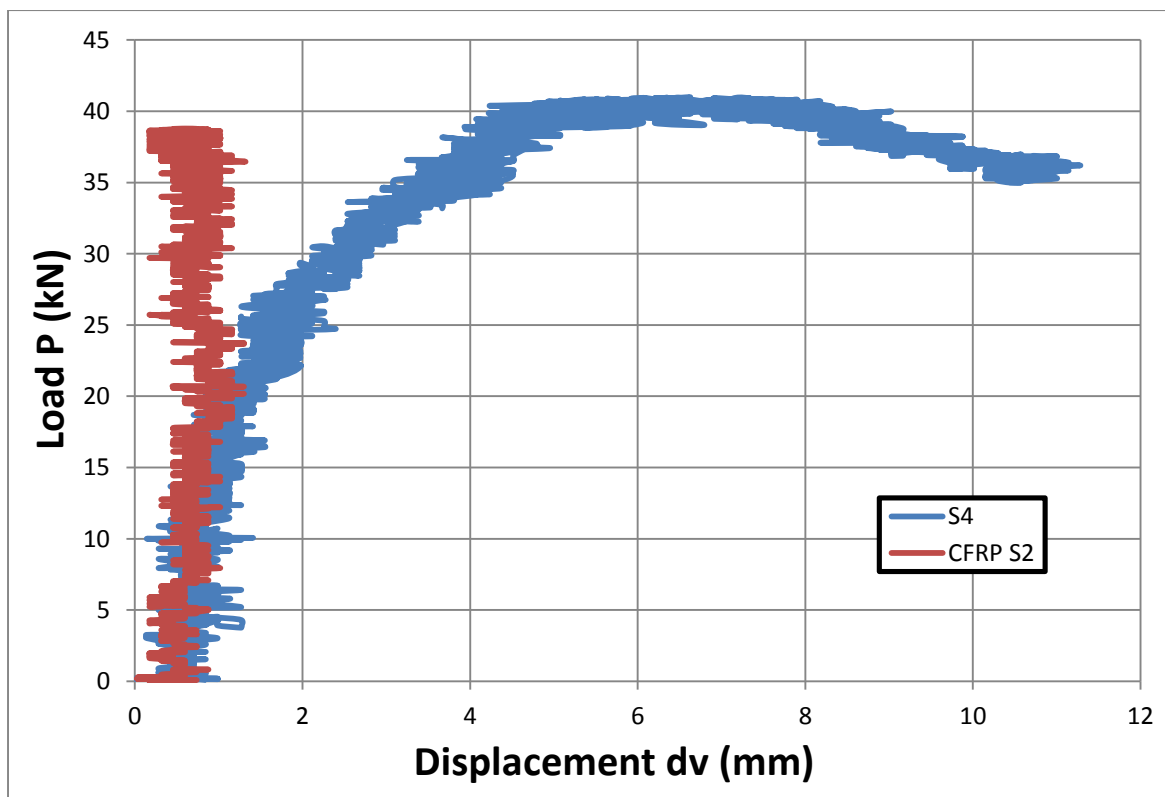
Σχήμα 5.17: Χρονική εξέλιξη στροφής άκρων δοκιμίου S2

### 5.6.3 Σύγκριση με αντίστοιχο μη ενισχυμένο

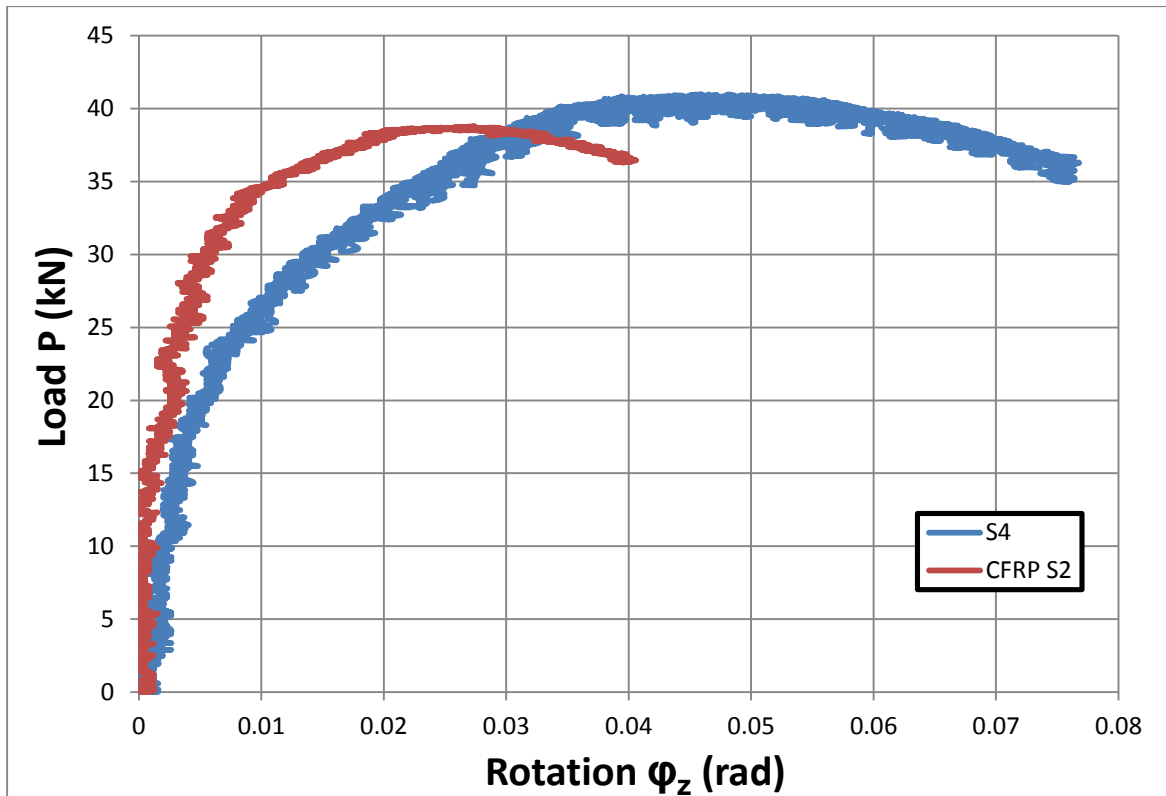
Όπως και στην αντίστοιχη υποενότητα 5.5.3, έτσι και εδώ, για την ορθή κατανόηση της αποτελεσματικότητας ή μη του συγκεκριμένου τρόπου ενίσχυσης στη συμπεριφορά των θλιβόμενων γωνιακών, είναι απαραίτητος ο παραλληλισμός των αποτελεσμάτων του ενισχυμένου μέλους με αυτά του αντίστοιχου αμιγώς χαλύβδινου. Συνεπώς, τα αποτελέσματα τόσο του ενισχυμένου γωνιακού όσο και του αντίστοιχου μη ενισχυμένου παρουσιάζονται ακολούθως στα κοινά διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 5.18). Τόσο η εκκεντρότητα φόρτισης όσο και καθολικά η πειραματική διάταξη ήταν ακριβώς η ίδια στα δύο αυτά δοκίμια.



α) διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης μέσου κατά τον ισχυρό κύριο άξονα



β) διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης μέσου κατά τον ασθενή κύριο άξονα



γ) διαγράμματα φορτίου-στροφής μέλους περί το διαμήκη του άξονα

Σχήμα 5.18: Συμπεριφορά ενισχυμένου και μη ενισχυμένου μέλους σε έκκεντρη ως προς τον ισχυρό κύριο άξονα θλίψη

Στον ακόλουθο Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δύο αυτών θλιβόμενων μελών και γίνονται οι απαραίτητες συγκρίσεις των συμπεριφορών τους. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην οριακή τιμή του μέγιστου φορτίου κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 5.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων θλιβόμενων δοκιμίων με εκκεντρότητα ως προς τον ασθενή κύριο άξονα

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο $P_{max}$	Παραμόρφ. μέσου κατά τον ισχυρό $du^{(P_{max})}$	Παραμόρφ. μέσου κατά τον ασθενή $dv^{(P_{max})}$	Περιστροφή μέλους $\varphi_z^{(P_{max})}$	Στροφή άκρου περί τον ισχυρό $\theta_u^{(P_{max})}$	Στροφή άκρου περί τον ασθενή $\theta_v^{(P_{max})}$
Μη ενισχυμένο						
S4	40,99 kN	43,11 mm	5,5 mm	0,046 rad	0,003 rad	0,08 rad
Ενισχυμένο						
CFRP S2	38,79 kN	47,97 mm	0,6 mm	0,027 rad	0,003 rad	0,08 rad
Μεταβολή	-5,37%	+11,27%	-89,09%	-41,3%	-	-

#### 5.6.4 Συμπεράσματα

Παρ' ότι ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης δεν οδήγησε ούτε εδώ σε αύξηση του οριακού φορτίου του θλιβόμενου μέλους, όπως γίνεται αντιληπτό από τον Πίνακα 5.8, εντούτοις σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στην παραμορφωσιμότητα του μέλους.

Όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.7, κατά το συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης του γωνιακού παρατηρήθηκε και σε αυτό το δοκίμιο το εξής παράδοξο. Από τη μία το μέτρο ελαστικότητας του μέλους μειώθηκε λόγω της ενίσχυσης (ως απόρροια του πολύ χαμηλού μέτρου ελαστικότητας που παρουσίασε το ινοπλισμένο πολυμερές που δημιουργήθηκε), από την άλλη όμως, οι κύριες ροπές αδρανείας της διατομής αυξήθηκαν (λόγω αύξησης της συνολικής της γεωμετρίας). Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας ήταν 17%, ενώ η αύξηση των κύριων ροπών αδρανείας του μέλους ήταν της τάξης του 30%.

Η εν λόγω αντίστροφη μεταβολή αυτών των δύο χαρακτηριστικών του μέλους (μείωση μέτρου ελαστικότητας, αύξηση κύριων ροπών αδρανείας), οδήγησαν σε μεταβολές των δυσκαμψιών του μέλους ως προς τους κύριους άξονες της διατομής του. Αναλυτικότερα, οι τελικές δυσκαμψίες του ενισχυμένου μέλους περί τους κύριους του άξονες εμφανίζονται αυξημένες και εδώ κατά περίπου 8%. Το εν λόγω ποσοστό *θα μπορούσε να είναι αρκετά μεγαλύτερο αν είχε χρησιμοποιηθεί καλύτερης ποιότητας ινοπλισμένο πολυμερές, το οποίο θα οδηγούσε σε αύξηση και του μέτρου ελαστικότητας του μέλους.*

Συνεπώς, το εξεταζόμενο μέλος έγινε ελαφρώς πιο δύσκαμπτο περί τους δύο κύριους άξονές του. Αυτό το γεγονός φαίνεται έντονα στο διάγραμμα (P-dv) του Σχήματος 5.18. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι *περί τον ισχυρό του κύριο άξονα το ενισχυμένο μέλος εμφανίζεται ακλόνητο, τη στιγμή που το αντίστοιχο μη ενισχυμένο παραμορφώθηκε αισθητά.* Από την άλλη, κατά την παραμόρφωσή τους περί τον ασθενή κύριο άξονά της διατομής, δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μελών.

Οι στροφές των άκρων του μέλους παρέμειναν ανεπηρέαστες από την εφαρμογή της ενίσχυσης, όπως μετρήθηκαν από τα προσαρμοσμένα κλινόμετρα. Όμως, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της περιστροφής του μέλους, κατά 41%, η οποία οφείλεται στην αμελητέα παραμορφωσιμότητα που εμφάνισε το ενισχυμένο δοκίμιο κατά το λυγισμό του περί τον ισχυρό του κύριο άξονα. Αναλυτικότερα, σημειώνεται ότι ενώ το μη ενισχυμένο μέλος εμφάνισε αισθητή παραμόρφωση και περί τον ισχυρό του κύριο άξονα, το ενισχυμένο μέλος έμεινε ακλόνητο ως προς αυτό τον άξονα. Αυτό ερμηνεύεται από την μεγάλη μείωση της περιστροφής του ενισχυμένου μέλους.

Πάντως, καθώς ο λυγισμός αποτελεί ένα φαινόμενο αστάθειας και σχετίζεται κυρίως με τη γεωμετρία του θλιβόμενου μέλους, ήταν αναμενόμενο να μην παρατηρηθούν εξαιρετικά μεγάλες διαφοροποιήσεις κατά το συγκεκριμένο τρόπο ενίσχυσης που εφαρμόστηκε. Η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στη συμπεριφορά του θλιβόμενου μέλους άλλωστε παρατηρήθηκαν στην παρούσα εργασία, όπως σχολιάστηκε από την μεταβολή των ροπών αδρανείας του μέλους. Σε αντίθεση λοιπόν με την αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση των [38] όπου παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του θλιβόμενου γωνιακού, στη συγκεκριμένη περίπτωση κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε. Ο λόγος είναι η κατά πολύ *ασθενέστερη ενίσχυση* που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, απόρροια οικονομικών περιορισμών.

Βέβαια, αξίζει να τονιστεί ότι όλα αυτά επιτεύχθηκαν απλά με τη χρήση πολύ μικρού ποσοστού ενίσχυσης. Αρκεί να αναλογιστεί κανείς ότι χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο στρώσεις υφάσματος ινών, πάχους 0,12mm η καθεμία, ενώ και το ποσοστό συμμετοχής των ινών στην τελική σύνθεση του πολυμερούς ήταν πολύ χαμηλή, της τάξεως του 15%.

## 5.7 Συμπεράσματα

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως σε κάθε ενότητα ξεχωριστά, η επίδραση αυτού του τρόπου ενίσχυσης στη συμπεριφορά του μέλους σε λυγισμό ήταν μηδαμινή. Συγκριτικά με τη συμπεριφορά του αμιγώς χαλύβδινου μέλους, δεν παρατηρήθηκε κάποια αύξηση της φέρουσας ικανότητας αυτού λόγω του συγκεκριμένου τρόπου ενίσχυσης που εφαρμόστηκε.

Συγκεκριμένα, το οριακό φορτίο του μέλους δεν μεταβλήθηκε σε κανένα από τα δύο ενισχυμένα δοκίμια. Παρ' ότι οι ροπές αδρανείας αυξήθηκαν σημαντικά, περίπου 30% σε κάθε δοκίμιο, το χαμηλής ποιότητας ινοπλισμένο πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας του ενισχυμένου μέλους. Συνεπώς η μεγάλη αύξηση των ροπών αδρανείας δεν συνοδεύτηκε από αντίστοιχου μεγέθους αύξηση των δυσκαμψιών του μέλους. Αν και αυτές αυξήθηκαν, η μεταβολή αυτή ήταν μικρότερη από 10%, τη στιγμή που οι ροπές αδρανείας του μέλους παρουσίασαν αύξηση της τάξης του 30%.

Καθώς ο λυγισμός είναι ένα φαινόμενο αστάθειας και επηρεάζεται κυρίως από τη γεωμετρία του θλιβόμενου στοιχείου παρατηρήθηκαν ορισμένες διαφοροποιήσεις στην παραμορφωσιμότητα του μέλους. Αναλυτικότερα, στο πρώτο πείραμα που διεξήχθη, εφαρμόζοντας εκκεντρότητα φόρτισης περί τον ισχυρό κύριο άξονα της διατομής του μέλους, το ενισχυμένο μέλος παρουσίασε σημαντική διαφοροποίηση κατά την παραμόρφωση περί αυτόν τον άξονα. Πιο συγκεκριμένα, εμφάνισε περίπου ίδιου μεγέθους παραμόρφωση με αυτή που παρατηρήθηκε περί τον ασθενή κύριο άξονά του, συνοδευόμενη και από αύξηση της περιστροφής του συγκριτικά με το αντίστοιχο μη ενισχυμένο μέλος.

Όσον αφορά το δεύτερο πείραμα, η εκκεντρότητα φόρτισης ήταν ως προς τον ασθενή κύριο άξονα της διατομής του μέλους, οδηγώντας προφανώς σε λυγισμό του μέλους περί αυτόν τον άξονα. Αν και το αμιγώς χαλύβδινο στοιχείο παρουσιάζει μία αισθητή παραμορφωσιμότητα ως προς τον ισχυρό κύριο άξονα της διατομής του, το ενισχυμένο μέλος εμφανίστηκε ακλόνητο περί αυτόν τον άξονα. Αυτό ήταν απόρροια της αύξησης της δυσκαμψίας του μέλους λόγω της ενίσχυσής του με ανθρακόνημα.

Όσον αφορά τις στροφές των άκρων του μέλους, αυτές δεν παρουσίασαν διαφοροποιήσεις μεταξύ του ενισχυμένου και του μη ενισχυμένου δοκιμίου. Αντιθέτως, παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση αναφορικά με την περιστροφή του μέλους, ανάλογα με τις αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στην παραμορφωσιμότητά του. Έτσι, στο πρώτο πείραμα η περιστροφή του μέλους αυξήθηκε, ενώ στο δεύτερο πείραμα αυτή μειώθηκε λόγω της ενίσχυσής του.

Κλείνοντας, πρέπει να τονιστεί ότι, καθώς ο λυγισμός είναι ένα φαινόμενο αστάθειας, επηρεάζεται κυρίως από τη γεωμετρία του μέλους. Στη συγκεκριμένη εργασία, η ενίσχυση που εφαρμόστηκε ήταν πολύ μικρή αναλογικά με τη συνολική επιφάνεια του ενισχυόμενου μέλους. Αναλυτικότερα, το πάχος του υφάσματος ινών ήταν 0,12mm, ενώ το συνολικό πάχος της ενισχυτικής στρώσης του πολυμερούς δεν ξεπέρασε τα 2mm. Στην αντίστοιχη εργασία των --- όπου η ενίσχυση του γωνιακού οδήγησε σε διπλασιασμό της φέρουσας ικανότητάς του έναντι θλίψη, το συνολικό πάχος της ενίσχυσης που εφαρμόστηκε ήταν όσο το πάχος του ενισχυόμενου μέλους. Πέραν τούτου, η ποιότητα της ενισχυτικής στρώσης ήταν κατά πολύ καλύτερη, καθώς χρησιμοποιήθηκαν προεμποτισμένα ελάσματα από ίνες άνθρακα, στα οποία το ποσοστό συμμετοχής των ινών ξεπερνάει το 50% τη στιγμή που στην παρούσα εργασία το ποσοστό συμμετοχής των ινών στο τελικό ινοπλισμένο πολυμερές ήταν της τάξεως του 15%.





## **6 Πειράματα κάμψης χαλύβδινων δοκών διατομής γωνιακού ενισχυμένων εξωτερικά με ανθρακονήματα**

### **6.1 Εισαγωγή**

Η τελευταία σειρά πειραμάτων που περιελάμβανε η συγκεκριμένη διερεύνηση του συστήματος χάλυβα-ανθρακονημάτων αφορούσε τη μελέτη της συμπεριφοράς αυτών σε απλή κάμψη. Λόγω της απουσίας ψαθυρής μορφής αστοχίας των ενισχυμένων δοκιμίων που εξετάστηκαν προηγουμένως υπό αξονική θλίψη, αποφασίστηκε η εκ νέου χρησιμοποίησή τους στα πειράματα κάμψης.

Η πειραματική αυτή διαδικασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση του κατά πόσο η εξωτερική ενίσχυση των χαλύβδινων δοκών με τη συγκεκριμένη διάταξη ανθρακονημάτων (CFRP) δύναται να βελτιώσει την καμπτική συμπεριφορά του αμιγώς χαλύβδινου μέλους. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της ενίσχυσης από ανθρακονήματα, επιλέχθηκε η πειραματική διάταξη να είναι τέτοια ώστε οι στρώσεις από CFRP να βρίσκονται στην εφελκυσόμενη ζώνη. Συνεπώς, η ενισχυτική στρώση σε αυτή την περίπτωση θα λειτουργήσει, παραλαμβάνοντας φορτίο και βελτιώνοντας τη φέρουσα ικανότητα της αμιγώς χαλύβδινης δοκού.

Για να ευρεθεί ο βαθμός συμμετοχής της ενίσχυσης στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας του μέλους, εξετάστηκε επιπλέον η συμπεριφορά ενός αμιγώς χαλύβδινου μέλους, ίδιων διαστάσεων, υπό την ίδια εντατική καταπόνηση. Πριν εξαχθούν τα όποια συμπεράσματα, λοιπόν, τα αποτελέσματα των ενισχυμένων δοκιμίων παραλληλίζονται με τα αντίστοιχα του μη ενισχυμένου μέλους, για να διαπιστωθεί ο βαθμός λειτουργίας της ενίσχυσης (υποκεφάλαιο 6.5)..

Συγκεκριμένα, τα δύο ενισχυμένα δοκίμια, CFRP S1 και CFRP S2, εξετάστηκαν έναντι κάμψης τριών σημείων. Η κάμψη αυτών πραγματοποιήθηκε περί τον ασθενή τους κύριο άξονα, εφαρμόζοντας φόρτιση υπό τη διεύθυνση του ισχυρού, στο μέσον του δοκιμίου. Ακριβώς η ίδια φόρτιση επιβλήθηκε και στο μη ενισχυμένο χαλύβδινο μέλος, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μεταξύ τους σύγκριση και η εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά όσα προαναφέρθηκαν, συνοδευόμενα από φωτογραφίες και τα κατάλληλα διαγράμματα, όπου αυτό κρίνεται δόκιμο.

### **6.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας**

Η πειραματική διαδικασία ήταν η ίδια και για τα τρία δοκίμια που εξετάστηκαν. Η επιβαλλόμενη φόρτιση ήταν μονοτονική και υλοποιήθηκε υπό τη μορφή επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, μέσω του επενεργητή εφαρμογής φόρτισης (Σχήμα 5.1β) και της εφαρμοζόμενης σε αυτό δυναμοκυψέλης. Η επιβαλλόμενη ένταση εφαρμόστηκε στο μέσον του μήκους κάθε δοκιμίου και είχε τη διεύθυνση του ισχυρού κύριου άξονά της διατομής του. Συνεπώς, διερευνήθηκε η ροπή αντοχής των μελών περί τον ασθενή τους κύριο άξονα. Ο ρυθμός καταπόνησης που επιλέχθηκε για τα τρία πειράματα κάμψης ήταν 0,005mm/sec.



Σχήμα 6.1: Κοπή πλάκας απόληξης γωνιακού (αριστερά) και τελική τοποθέτηση μέλους (δεξιά)

Για να υλοποιηθεί η εντατική κατάσταση που μόλις περιγράφηκε, η ειδική διαμόρφωση των άκρων των δοκιμίων ήταν απαραίτητη. Πιο συγκεκριμένα, όπως έγινε αντιληπτό από το κεφάλαιο 5, τα άκρα των εν λόγω γωνιακών μελών κατέληγαν σε δύο τετραγωνικές πλάκες. Προκειμένου, λοιπόν, να υλοποιηθεί η διάταξη κάμψης που περιγράφηκε (κάμψη περί τον ασθενή κύριο άξονα της διατομής), οι πλάκες απόληξης των μελών κόπηκαν ειδικώς. Η κοπή τους πραγματοποιήθηκε με την πριονοκορδέλα IMET και ως αποτέλεσμα η επιδιωκόμενη διάταξη του μέλους κατέστη εφικτή (Σχήμα 6.1).

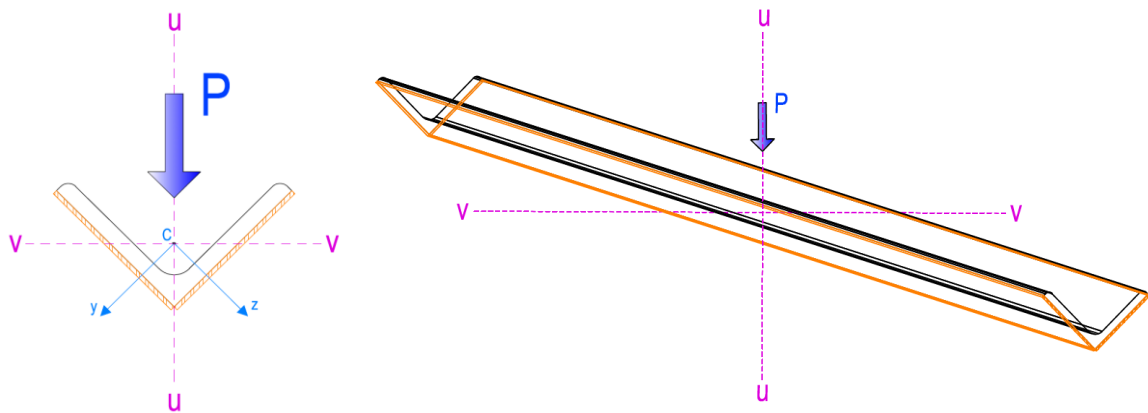
Η επιβαλλόμενη ένταση εφαρμόστηκε μέσω του επενεργητή εφαρμογής φόρτισης και της εφαρμοζόμενης σε αυτόν δυναμοκυψέλης. Η συλλογή των δεδομένων και ο έλεγχος του επενεργητή έγιναν ηλεκτρονικά μέσω του συστήματος PXI-SCXI (παράγραφος 5.2). Για την ακριβή μέτρηση της μετατόπισης του μέσου του δοκιμίου (μέγιστη παραμόρφωση) χρησιμοποιήθηκαν δύο *αισθητήρες γραμμικής μετατόπισης-LVDT* (Linear Variable Differential Transformer). Είναι ο πιο κοινός αισθητήρας που μετατρέπει τη μετατόπιση σε τάση. Η λειτουργία του βασίζεται στη μετατόπιση ενός σιδηροπυρήνα που προκαλεί μεταβολές στην επαγωγή ενός ηλεκτρικού πηνίου. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο LVDT, τύπου AML/IE+/-25mm-s-C15 (Σχήμα 6.2).

Η φόρτιση του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε κατά την εσωτερική πλευρά του γωνιακού μέσω ειδικού σφηνοειδούς μεταλλικού τεμαχίου που εφαρμοζόταν κατάλληλα. Μεταξύ της δυναμοκυψέλης και του εν λόγω ειδικού τεμαχίου προσαρμόστηκε λεπτό ορθογώνιο πλακίδιο, απ τις άκρες του οποίου έπαιρναν μετρήσεις τα δύο LVDT.

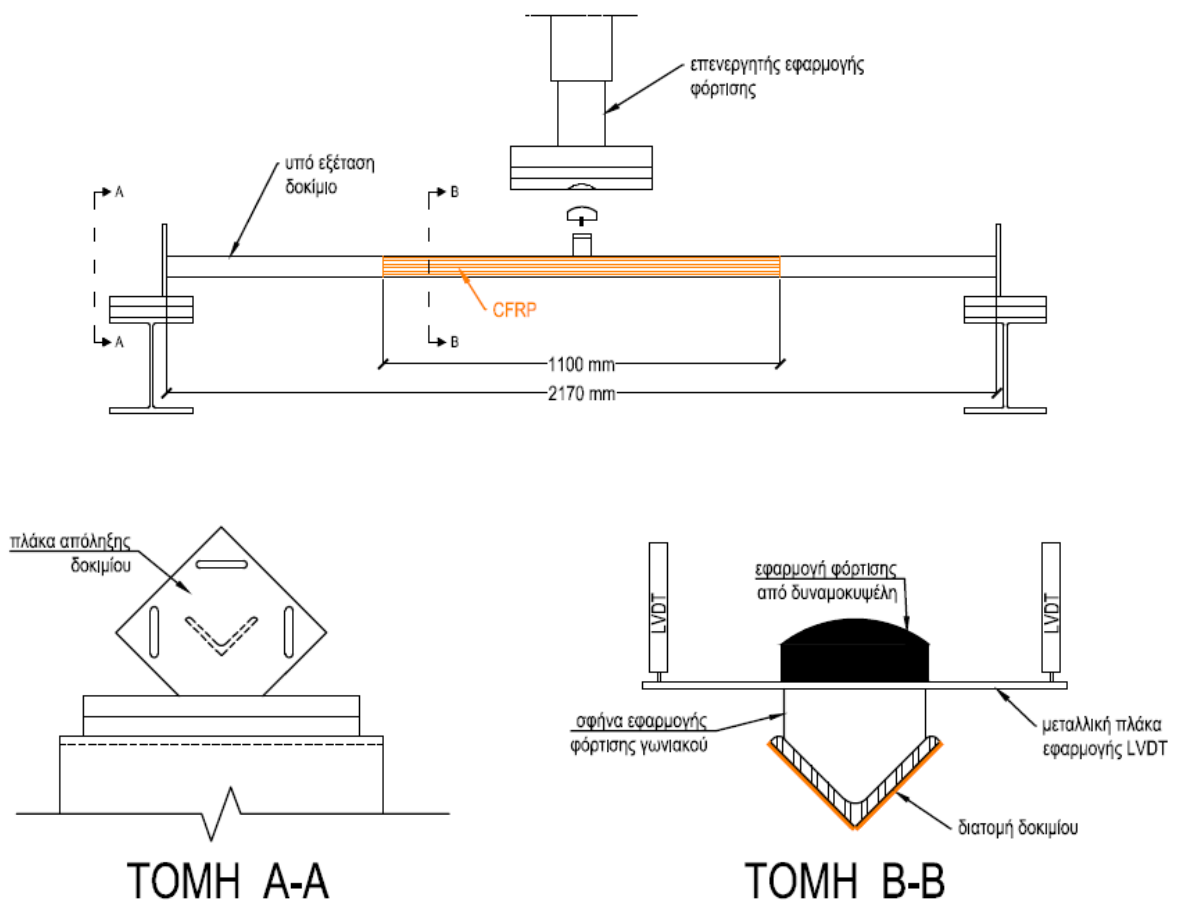


Σχήμα 6.2: Αισθητήρας γραμμικής μετατόπισης LVDT

Στα Σχήματα 6.3 και 6.4 που ακολουθούν απεικονίζονται σχεδιαστικά τόσο ο τρόπος φόρτισης των δοκιμίων όσο και συνολικότερα η γενικότερη διάρθρωση της πειραματικής διάταξης των πειραμάτων κάμψης όπως διενεργήθηκαν.



Σχήμα 6.3: Σχεδιαστική απεικόνιση διεύθυνσης φόρτισης ως προς τη διατομή του μέλους (αριστερά) και υπό προοπτική εμφάνιση (δεξιά)



Σχήμα 6.4: Σχεδιαστική διάταξη πειραμάτων κάμψης

### 6.3 1<sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S1)



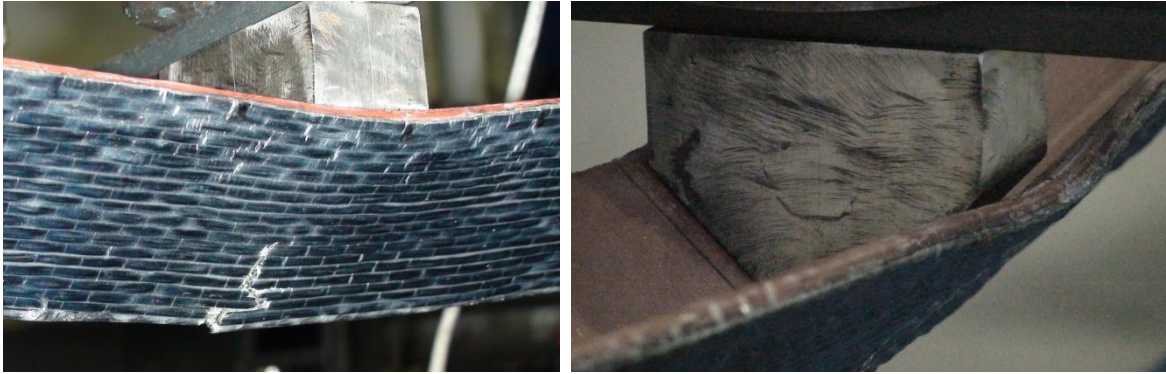
Σχήμα 6.5: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης πρώτου πειράματος κάμψης

Το συγκεκριμένο δοκίμιο υποβλήθηκε σε κάμψη περί τον ασθενή κύριο άξονα της διατομής του. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε έναντι κάμψης τριών σημείων (3 point bending) μέσω επιβολής έντασης στο μέσον του μήκους του. Η φόρτιση ήταν μονοτονική, υπό την μορφή επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και υλοποιήθηκε μέσω του επενεργητή εφαρμογής φόρτισης. Ο ρυθμός επιβολής επιλέχθηκε να είναι 0,05mm/sec.

Οι διαστάσεις του δοκιμίου καθώς επίσης και τα κυριότερα μηχανικά και γεωμετρικά του χαρακτηριστικά δίνονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3 του υποκεφαλαίου 5.5.1. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 6.5, για την καταγραφή της μετατόπισης τοποθετήθηκαν καταλλήλως δύο LVDT στο μέσον του μήκους του δοκιμίου (καταγραφή μέγιστης μετατόπισης) και κατά τη διεύθυνση της φόρτισης, δηλαδή στη διεύθυνση του ισχυρού κύριου άξονα της διατομής.

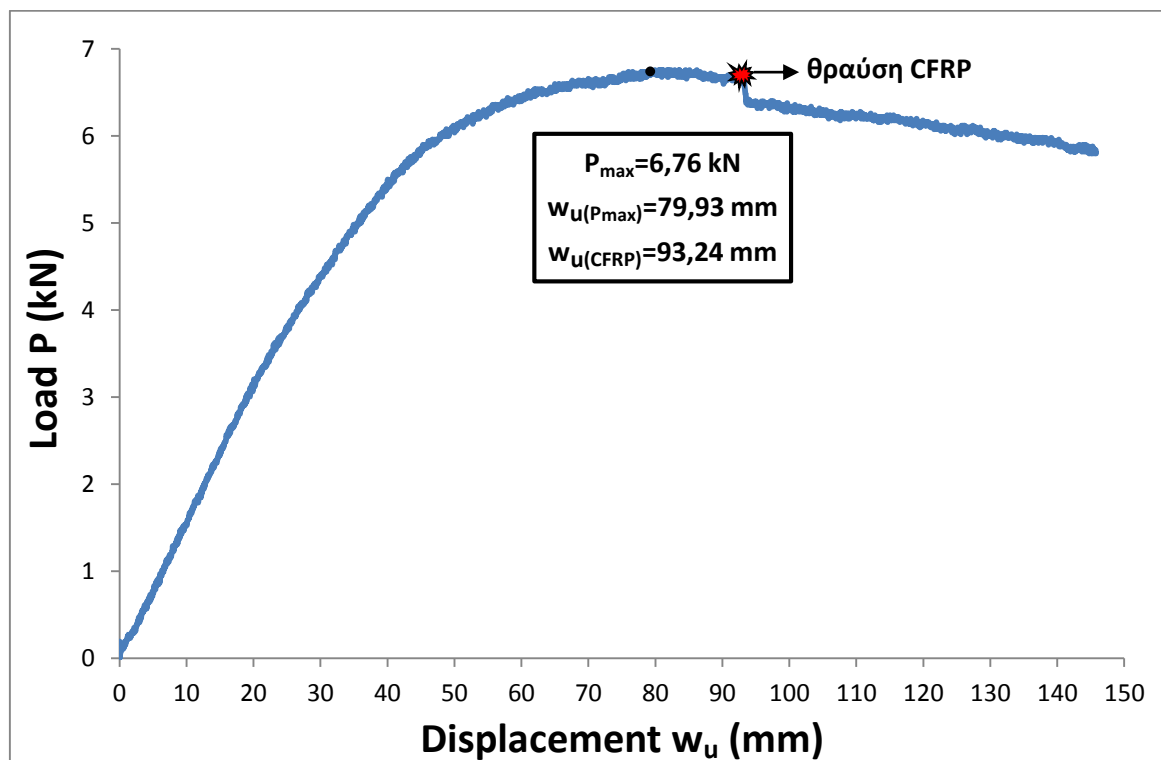
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί πλήρης εκμετάλλευση της ενισχυτικής στρώσης, το δοκίμιο τοποθετήθηκε κατά τέτοιο τρόπο υπό την επιβαλλόμενη ένταση τα ανθρακονήματα να βρίσκονται στην εφελκυστική ζώνη και να λειτουργήσουν στο μέγιστο εφικτό βαθμό.

Η αστοχία του αναφερόμενου ενισχυμένου μέλους επήλθε λόγω αστοχίας της ενισχυτικής στρώσης. Αναλυτικότερα, παρατηρήθηκε *θραύση* της στρώσης από ανθρακονήματα στο μέσον του μήκους του μέλους (μέγιστη καταπόνηση). Η αστοχία του ήταν, όπως αναμενόταν, *τελείως ψαθυρή* χωρίς την οιαδήποτε προειδοποίηση. Μετά τη θραύση της ενισχυτικής στρώσης σε αυτό το σημείο, επήλθε *απότομη μείωση της αντοχής του μέλους* και η ένταση από εκεί κι έπειτα παραλαμβάνονταν αποκλειστικά από τη χαλύβδινη δοκό. Επίσης, παρατηρήθηκε *ανάπτυξη τοπικού λυγισμού* των δύο σκελών της γωνιακής διατομής του μέλους. Αυτός εμφανίστηκε επίσης στο μέσον του μήκους του δοκιμίου, στην ελεύθερη ακμή των σκελών της γωνιακής διατομής του. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η σύνδεση της ενισχυτικής στρώσης με το χαλύβδινο στοιχείο διατηρήθηκε ανέπαφη, χωρίς να λάβουν χώρα φαινόμενα αποκόλλησης της ενίσχυσης (debonding). Στο Σχήμα 6.6 που ακολουθεί απεικονίζονται αυτά τα δύο φαινόμενα αστοχίας (θραύση ανθρακονήματος και τοπικός λυγισμός των σκελών του χαλύβδινου μέλους).

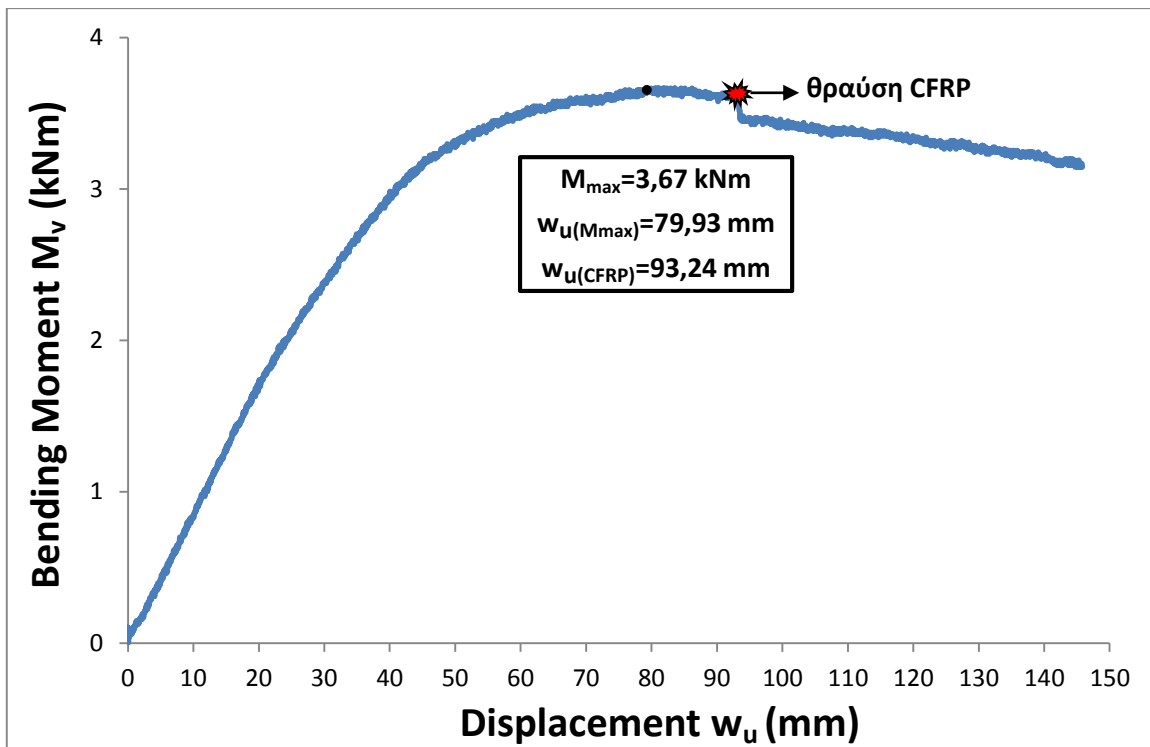


Σχήμα 6.6: Θραύση ανθρακονήματος (αριστερά) και τοπικός λυγισμός σκέλους γωνιακού (δεξιά)

Αναλυτικά, τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7 που ακολουθεί υπό τη μορφή διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης και ροπής-μετατόπισης. Μέσα σε αυτά αναγράφονται: το μέγιστο φορτίο ( $P_{max}$ ) ή η μέγιστη ροπή κάμψης ( $M_{max}$ ) ανάλογα το διάγραμμα, η βύθιση του μέσου τη στιγμή της μέγιστης έντασης ( $w_u^{P_{max}}$ ) και η βύθιση του μέσου τη στιγμή θραύσης της ενίσχυσης από ανθρακόνημα ( $w_u^{CFRP}$ ). Τέλος, στον Πίνακα 6.7 της επόμενης σελίδας, που έπεται των διαγραμμάτων, παρουσιάζεται η μεταβολή στο φορτίο και την ροπή κάμψης που παραλαμβάνει το δοκίμιο πριν και μετά την αστοχία της ενισχυτικής στρώσης.



α) διάγραμμα φορτίου-βύθισης μέσου



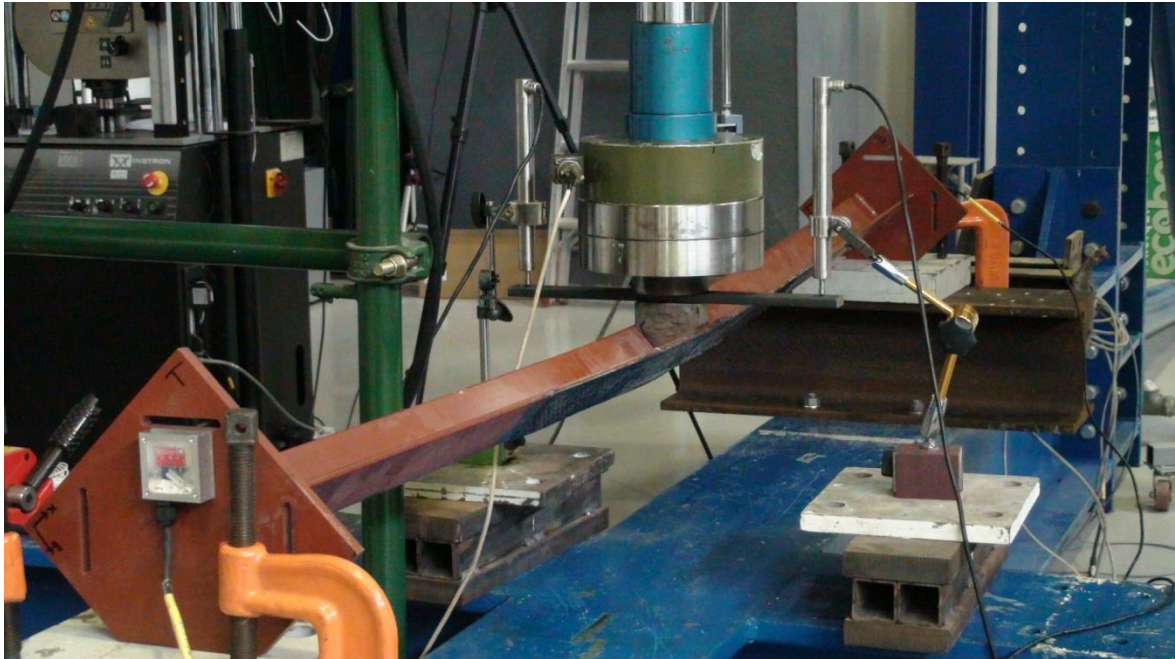
β) διάγραμμα ροπής κάμψης-βύθισης μέσου

Σχήμα 6.7: Αποτελέσματα πειράματος κάμψης δοκιμίου S1 υπό τη μορφή διαγραμμάτων

Πίνακας 6.7: Μεταβολή παραλαβόμενης έντασης δοκιμίου S1 λόγω θραύσης της ενίσχυσης από ανθρακόνημα

Εντατικό μέγεθος	Παραλαβόμενο Φορτίο $P(kN)$	Παραλαβόμενη Ροπή κάμψης $M(kNm)$
ακριβώς πριν την αστοχία της ενίσχυσης	6,66 kN	3,61 kNm
αμέσως μετά την αστοχία της ενίσχυσης	6,38 kN	3,46 kNm
Μεταβολή	-4,2%	-4,16%

## 6.4 2<sup>ο</sup> Πείραμα (L2300 CFRP S2)



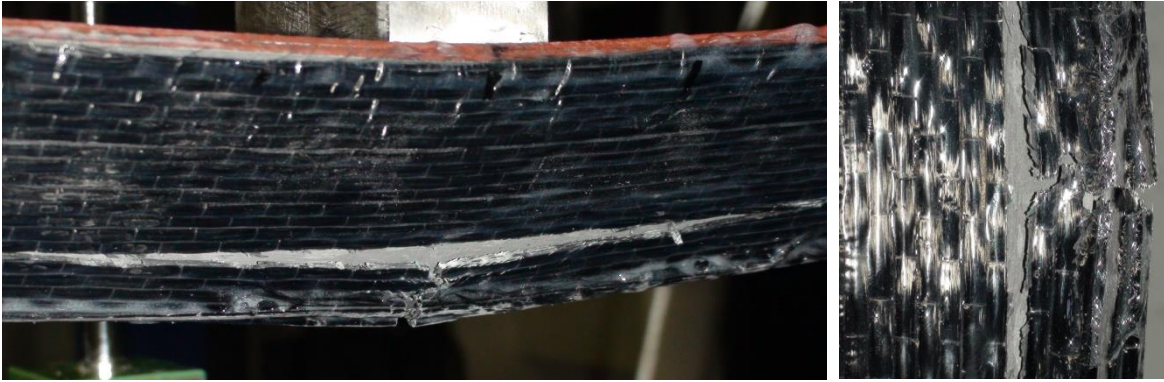
Σχήμα 6.8: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης δεύτερου πειράματος κάμψης

Όμοια με το προηγούμενο, έτσι και το συγκεκριμένο δοκίμιο υποβλήθηκε σε κάμψη τριών σημείων περί τον ασθενή κύριο άξονα της διατομής του. Η φόρτιση ήταν μονοτονική και υλοποιήθηκε μέσω επιβαλλόμενης παραμόρφωσης με ρυθμό 0,05mm/sec.

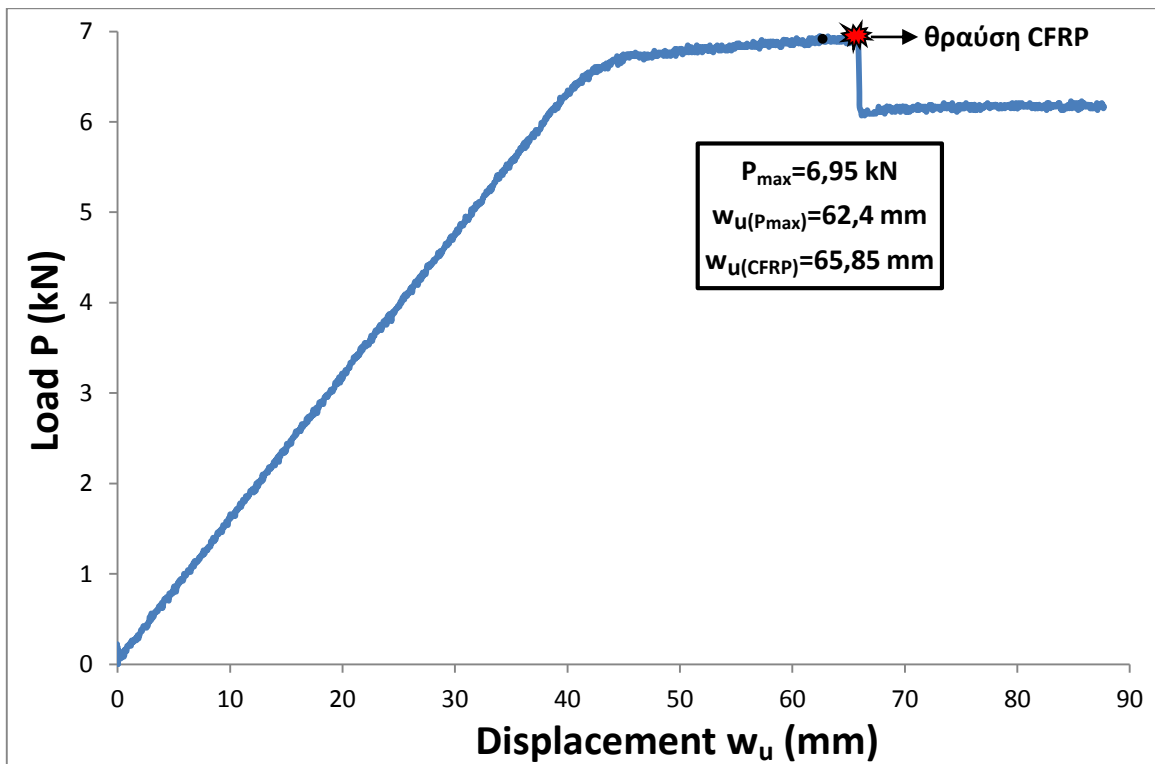
Οι διαστάσεις του δοκιμίου καθώς επίσης και τα κυριότερα μηχανικά και γεωμετρικά του χαρακτηριστικά δίνονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.5, 5.6 και 5.7 του υποκεφαλαίου 5.6.1. Η καθολική διάταξη του πειράματος απεικονίζεται στο παραπάνω Σχήμα 6.8, όπου είναι ευκρινές τόσο η διάταξη των δύο LVDT όσο και η διεύθυνση φόρτισης η οποία ήταν ακριβώς η ίδια με το προηγούμενο δοκίμιο S1.

Όσον αφορά τον τρόπο αστοχίας του ενισχυμένου μέλους, όπως και στο πρώτο πείραμα έτσι και εδώ αυτή επήλθε από την *ψαθυρή* αστοχία της ενισχυτικής στρώσης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε *θραύση* της στρώσης από ανθρακόνημα, στο σημείο της μέγιστης καταπόνησης (μέσον του μέλους). Αφότου έπαψε να λειτουργεί η ενίσχυση, παρατηρήθηκε *απότομη μείωση του φορτίου* το οποίο παραλαμβάνοταν πλέον αποκλειστικά από το χαλύβδινο μέλος. Η αστοχία της χαλύβδινης δοκού επήλθε μέσω *τοπικού λυγισμού* των δύο σκελών της μεσαίας γωνιακής διατομής του μέλους (στην ελεύθερη ακμή τους). Πάντως, και σε αυτή την περίπτωση η σύνδεση χάλυβα-ανθρακονήματος απεδείχθη ισχυρή, απουσίας φαινομένων αποκόλλησης (debonding). Στο Σχήμα 6.9 που ακολουθεί απεικονίζεται η θραύση της ενισχυτικής στρώσης από ανθρακόνημα, όπως αυτή επήλθε στο συγκεκριμένο πείραμα.

Αναλυτικά, τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.10 της επόμενης σελίδας, υπό τη μορφή διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης και ροπής-μετατόπισης. Μέσα σε αυτά αναγράφονται: το μέγιστο φορτίο ( $P_{max}$ ) ή η μέγιστη ροπή κάμψης ( $M_{max}$ ) ανάλογα το διάγραμμα, η βύθιση του μέσου τη στιγμή της μέγιστης έντασης ( $w_u^{P_{max}}$ ) και η βύθιση του μέσου τη στιγμή θραύσης της ενίσχυσης από ανθρακόνημα ( $w_u^{CFRP}$ ). Τέλος, στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζεται η μεταβολή στην ένταση που παραλαμβάνει το δοκίμιο πριν και μετά την αστοχία της ενισχυτικής στρώσης.

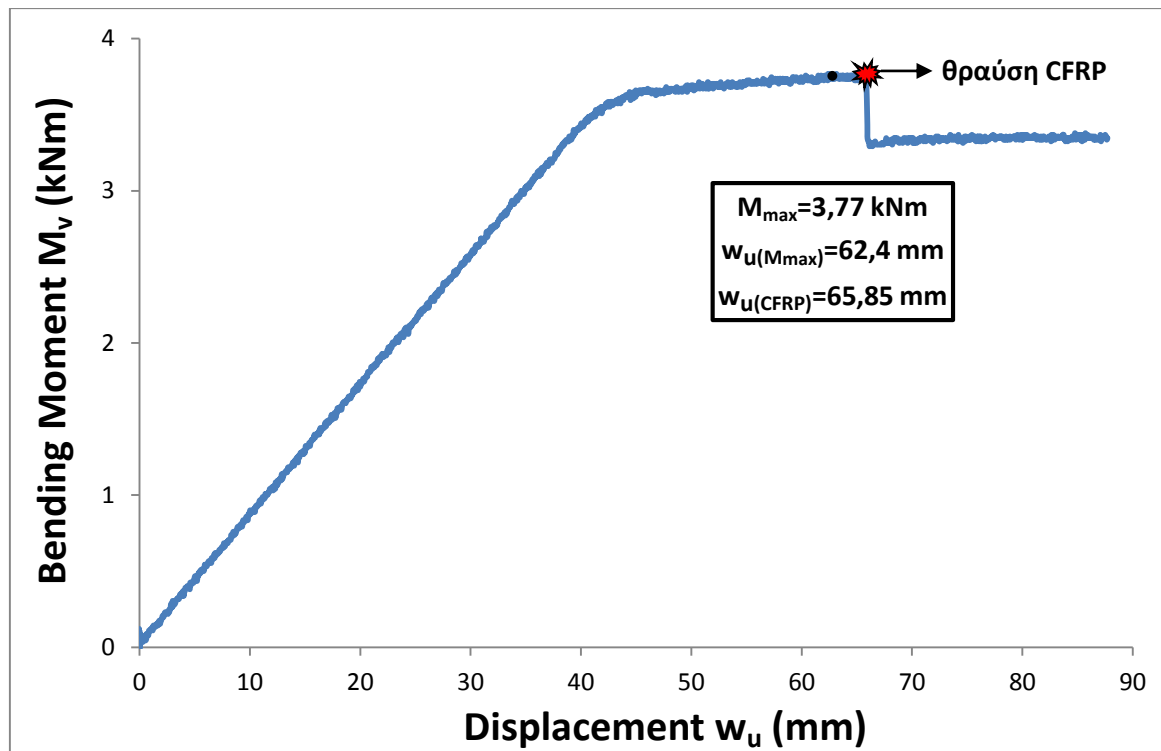


Σχήμα 6.9: Ψαθυρή αστοχία ενισχυτικής στρώσης ανθρακονήματος



α) διάγραμμα φορτίου-βύθισης μέσου





β) διάγραμμα ροπής κάμψης-βύθισης μέσου

Σχήμα 6.10: Αποτελέσματα πειράματος κάμψης δοκιμίου S2 υπό τη μορφή διαγραμμάτων

Πίνακας 6.8: Μεταβολή παραλαβόμενης έντασης δοκιμίου S2 λόγω θραύσης της ενίσχυσης από ανθρακόνημα

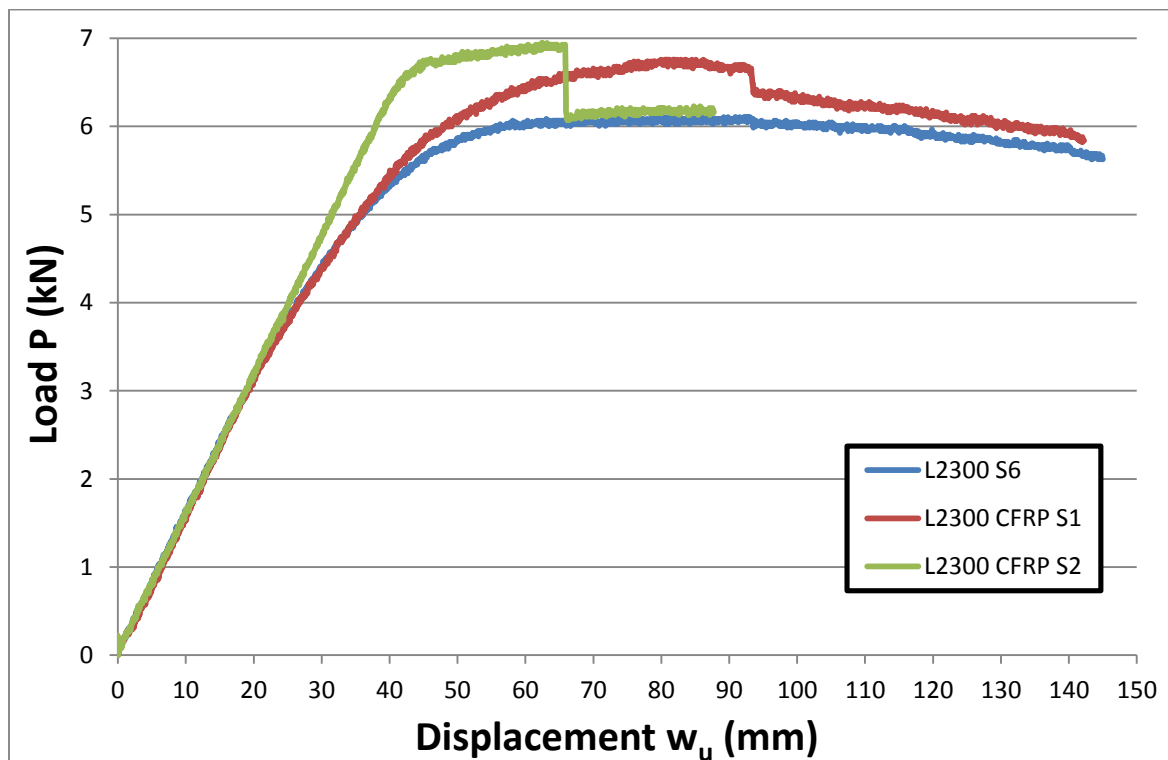
Εντατικό μέγεθος	Παραλαβόμενο Φορτίο $P(kN)$	Παραλαβόμενη Ροπή κάμψης $M(kNm)$
ακριβώς πριν την αστοχία της ενίσχυσης	6,93 kN	3,76 kNm
αμέσως μετά την αστοχία της ενίσχυσης	6,07 kN	3,29 kNm
Μεταβολή	-12,41%	-12,5%

## 6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα του μη ενισχυμένου δοκιμίου

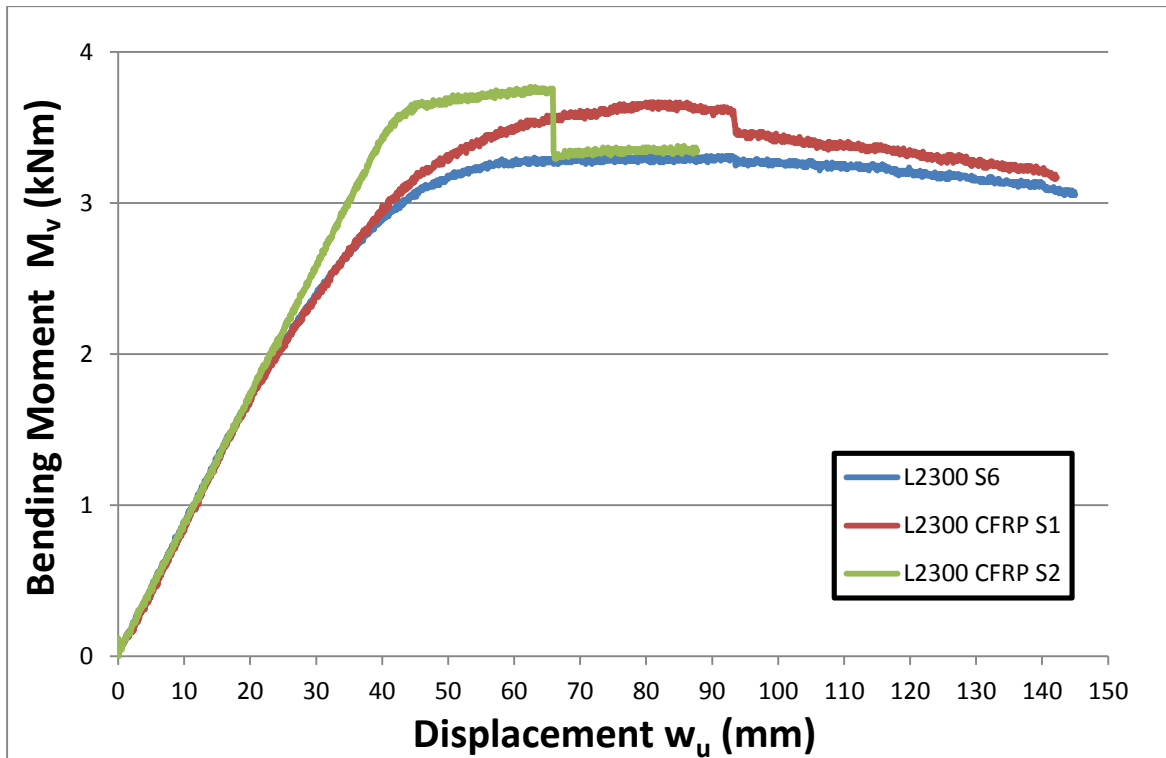
Για να διαπιστωθεί η όποια συμβολή του συγκεκριμένου τρόπου ενίσχυσης στη συμπεριφορά του αμιγώς χαλύβδινου καμπτόμενου μέλους, είναι απαραίτητος ο παραλληλισμός και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των ενισχυμένων δοκιμίων με τα αντίστοιχα του μη ενισχυμένου μέλους. Για το σκοπό αυτό, υποβλήθηκε στην ίδια μορφή κάμψης ένα όμοιο μη ενισχυμένο δοκίμιο. Η πειραματική διάταξη, καθώς και ο ρυθμός φόρτισης ήταν ακριβώς όπως και στα δύο ενισχυμένα δοκίμια.

Στο Σχήμα 6.11 αμέσως μετά, παρουσιάζονται υπό τη μορφή κοινών διαγραμμάτων τα αποτελέσματα των δύο ενισχυμένων γωνιακών με τα εν λόγω του αντίστοιχου μη ενισχυμένου. Η ονομασία του μη ενισχυμένου δοκιμίου είναι *L2300 S6*.

Τέλος, στον Πίνακα 6.9 που έπεται των δύο διαγραμμάτων, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων κάμψης και γίνονται οι απαραίτητες συγκρίσεις των συμπεριφορών τους. Με αυτό τον τρόπο διαπιστώνεται η όποια συνεισφορά της ενίσχυσης που εφαρμόστηκε.



α) κοινό διάγραμμα φορτίου-βύθισης μέσου



β) κοινό διάγραμμα ροπής κάμψης-βύθισης μέσου

Σχήμα 6.11: Παραλληλισμός διαγραμμάτων ενισχυμένων και μη ενισχυμένου δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων

Πίνακας 6.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων καμπτόμενων δοκιμίων

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο $P_{\max}$	Μέγιστη ροπή κάμψης $M_{\max}$	Βέλος κάμψης στο μέγιστο φορτίο $w_u^{(P_{\max})}$	Βέλος κάμψης στην αστοχία της ενίσχυσης $w_u^{(CFRP)}$
Μη ενισχυμένο				
S6	6,11 kN	3,31 kNm	68,61 mm	N/A
Ενισχυμένα				
CFRP S1	6,76 kN	3,67 kNm	79,93 mm	93,24 mm
CFRP S2	6,95 kN	3,77 kNm	62,4 mm	65,85 mm
μέσος όρος	6,86 kN	3,72 kNm	71,17 mm	79,55 mm
Μεταβολή	+12,27%	+12,39%	+3,73%	N/A

## 6.6 Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα και τους πίνακες που παρατέθηκαν στο τρέχον κεφάλαιο, ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης από ανθρακονήματα οδήγησε σε βελτίωση της καμπτικής συμπεριφοράς του χαλύβδινου μέλους.

Αναφορικά με την καμπτική αντοχή του μέλους, απεδείχθη ότι η εξωτερική επικόλληση ανθρακονήματος στην εφελκυσόμενη περιοχή του μέλους βελτίωσε την αντοχή του. Συγκεκριμένα, το μέγιστο φορτίο που δύναται να παραλάβει το μέλος υποβαλλόμενο σε κάμψη τριών σημείων αυξήθηκε κατά μέσο όρο 12,3% λόγω της ενίσχυσης. Όμοια, και η μέγιστη ροπή στο μέσον του μέλους αυξήθηκε κατά μέσο όρο 12,4%.

Η δυσκαμψία των δύο ενισχυμένων μελών που εξετάστηκαν παρέμεινε αμετάβλητη συγκριτικά με το αντίστοιχο μη ενισχυμένο χαλύβδινο στοιχείο. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του χαλύβδινου μέλους λόγω της ενίσχυσης που εφαρμόστηκε ήταν πολύ μικρή. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του καθαρά ελαστικού κλάδου του ενισχυμένου δοκιμίου S2, σε αντίθεση με το ενισχυμένο δοκίμιο S1 του οποίου ο καθαρά ελαστικός κλάδος ήταν ίδιος με του μη ενισχυμένου (Σχήμα 6.11). Όμως, ο μετελαστικός κλάδος μέχρι τη στιγμή θραύσης της ενίσχυσης είναι μικρότερος στο ενισχυμένο δοκίμιο S2 απ' ότι στο S1.

Κατά τη θραύση της ενισχυτικής στρώσης από ανθρακόνημα παρατηρήθηκε απότομη μείωση της παραλαβόμενης έντασης του ενισχυμένου μέλους. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα των δύο ενισχυμένων δοκιμίων αυτή αστοχία δηλώνεται με ακαριαία πτώση (άλμα) της καμπύλης. Στο δοκίμιο S1, η αστοχία της ενίσχυσης παρατηρήθηκε όταν το βέλος κάμψης ήταν 93,24mm και απώλεια της παραλαβόμενης έντασης λόγω της θραύσης του ανθρακονήματος ήταν 4,2%. Μετά την αστοχία της ενίσχυσης, το δοκίμιο S1 παρουσιάζει σταδιακή φθίνουσα συμπεριφορά μέχρι να φτάσει στο επίπεδο αυτής του μη ενισχυμένου δοκιμίου, λόγω του ότι μετά τη θραύση του ανθρακονήματος κάποιες εφελκυσόμενες ίνες συνέχισαν να λειτουργούν. Από την άλλη, η αστοχία της ενίσχυσης στο δοκίμιο S2 παρατηρήθηκε για βέλος κάμψης ίσο με 65,85mm, αρκετά μικρότερο ως απόρροια του αυξημένου ελαστικού κλάδου σε συνδυασμό με το συντομότερο μετελαστικό κλάδο που παρουσίασε. Η μείωση της παραλαβόμενης έντασης του δοκιμίου S2 κατά την αστοχία της ενίσχυσης ήταν κατά πολύ μεγαλύτερη, ίση με 12,5%, ενώ στο συγκεκριμένο δοκίμιο αστόχησε ο μεγαλύτερος αριθμός εφελκυσόμενων ινών και γι αυτό η απομείωση της έντασης ήταν απότομη, φτάνοντας ακαριαία αυτή του μη ενισχυμένου.

Αυτές οι διαφορές της συμπεριφοράς των δύο ενισχυμένων δοκιμίων καταδεικνύουν την κρισιμότητα της μεθόδου εφαρμογής της ενίσχυσης και την αβεβαιότητα ως προς την όποια εκτίμηση της συμπεριφοράς τους. Η συμπεριφορά του ενισχυμένου δοκιμίου S2 πάντως μοιάζει να είναι πιο κοντά στη θεωρητική συμπεριφορά ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά (αύξηση ελαστικού κλάδου, μείωση μετελαστικής συμπεριφοράς μέχρι την αστοχία). Από την άλλη, το δοκίμιο S1, αν και εμφάνισε αύξηση της φέρουσας ικανότητάς του, μοιάζει περισσότερο να ακολουθεί τη συμπεριφορά του χαλύβδινου στοιχείου. Πιθανότατα, αυτή η διαφορά στη συμπεριφορά των δύο ενισχυμένων στοιχείων να οφείλεται στον τρόπο δημιουργίας και εφαρμογής της ενισχυτικής στρώσης.

Η αστοχία των ενισχυμένων μελών προήλθε από τη θραύση της στρώσης από ανθρακόνημα, η οποία συνέβη περίπου στο μέσον των δοκιμίων (σημείο μέγιστης καταπόνησης). Όπως ήταν αναμενόμενο από τη φύση των ινοπλισμένων πολυμερών σύνθετων υλικών, η αστοχία της ενίσχυσης από ανθρακόνημα ήταν τελείως ψαθυρή και χωρίς καμία προειδοποιητική ένδειξη. Ακολούθως, μετά την αστοχία της ενίσχυσης το δοκίμιο συνέχισε να λειτουργεί ως καθαρά χαλύβδινο πλέον, αστοχώντας λόγω εμφάνισης τοπικού λυγισμού στα θλιβόμενα ακραία σκέλη της μεσαίας διατομής του.

Αξίζει να σημειωθεί πάντως πως σε κανένα από τα δύο ενισχυμένα δοκίμια δεν παρατηρήθηκε κάποιο φαινόμενο αποκόλλησης της ενισχυτικής στρώσης από το χαλύβδινο στοιχείο (debonding failure). Ακόμη και στις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων όπως είναι οι δύο ακραίες περιοχές της σύνδεσης του ανθρακονήματος με το χαλύβδινο στοιχείο δεν παρατηρήθηκαν τέτοια φαινόμενα αστοχίας της σύνδεσης.



## 7 Συμπεράσματα

Από το σύνολο των πειραμάτων που διενεργήθηκαν, καθώς και από την μετέπειτα ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα αναφορικά με τον τρόπο ενίσχυσης που εξετάστηκε:

- Αξιολόγηση της μεθόδου ενίσχυσης με σύνθετα υλικά

Η συγκεκριμένη μέθοδος ενίσχυσης εμφανίζει αρκετά θετικά στοιχεία. Από τη μία, τα σύνθετα υλικά δύναται να αποκτήσουν εξαιρετικά υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με την ποιότητα τόσο των ινών όσο και της μεθόδου παραγωγής συνολικότερα. Πέρα όμως από τα υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν, πρόκειται για υλικά με ιδιαίτερα μικρό ειδικό βάρος. Αυτό το στοιχείο είναι ιδιαίτερα κρίσιμο κατά τη διαδικασία ενίσχυσης ενός υφιστάμενου μέλους. Λαμβάνοντας αυτό υπ' όψιν, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο δεν προστίθενται περαιτέρω φορτία στο μέλος, τα οποία διαφορετικά θα έπρεπε να προσμετρηθούν στο σχεδιασμό.

Επιπλέον, πρόκειται για ιδιαίτερα εύχρηστα υλικά, τα οποία είναι διαθέσιμα σε κάθε μέγεθος, ενώ η εφαρμογή τους γίνεται σύντομα και με ευκολία, όποια κι αν είναι η ενισχυόμενη επιφάνεια. Σημαντικό είναι επίσης, ότι λόγω των μικρών τους διαστάσεων, δεν μεταβάλλουν τις διαστάσεις του προς ενίσχυση στοιχείου και συνεπώς τα αρχιτεκτονικά του χαρακτηριστικά παραμένουν αμετάβλητα. Τέλος, σημειώνεται ότι δεν απαιτείται σημαντικός εξοπλισμός για την εφαρμογή του, αν και χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό για αποτελεσματική εφαρμογή.

Στα αρνητικά της μεθόδου, είναι το υψηλό κόστος αγοράς των υλικών αυτών, αν και συγκριτικά με παλαιότερα εμφανίζεται μειωμένο, καθώς και η μέχρι σήμερα έλλειψη κανονιστικού σχεδιαστικού πλαισίου για εφαρμογή σε χαλύβδινα στοιχεία. Παρ' όλα αυτά, τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει φαίνεται να υπερτερούν των λιγότερων μειονεκτημάτων της μεθόδου.

- Ενίσχυση αξονικά θλιβόμενου μέλους

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε θλίψη που διενεργήθηκαν, δεν έδειξαν κάποια βελτίωση της συμπεριφοράς του χαλύβδινου μέλους. Συγκεκριμένα, το φορτίο αστοχίας παρέμεινε αμετάβλητο μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης. Οι μόνες διαφοροποιήσεις αφορούσαν την παραμορφωμένη κατάσταση του μέλους, όπου παρατηρήθηκαν διαφοροποιήσεις ως απόρροια της αύξησης των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών (αύξηση κύριων ροπών αδρανείας, αύξηση εμβαδού).

Ουσιαστικά, η ενίσχυση που εφαρμόστηκε δεν λειτούργησε καν, ευρισκόμενη κυρίως υπό θλίψη. Δεν παρατηρήθηκε πουθενά θραύση της ενισχυτικής στρώσης, αλλά ούτε και αποκόλληση αυτής από τη χαλύβδινη επιφάνεια. Ακόμη και στις ακραίες περιοχές της, που είναι ζώνες υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, η σύνδεση παρέμεινε άθικτη.

Αν και, λόγω της φύσεως του φαινομένου του λυγισμού, το οποίο σχετίζεται με την ευστάθεια του μέλους, κρίσιμος παράγοντας είναι η γεωμετρία, εντούτοις πιθανώς να ήταν δυνατή η βελτίωση της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου μέλους, αν είχε χρησιμοποιηθεί καλύτερης ποιότητας ινοπλισμένο πολυμερές. Η χρήση προεμποτισμένων

ελασμάτων έναντι του συγκεκριμένου ασθενούς σύνθετου υλικού που δημιουργήθηκε σίγουρα θα είχε καλύτερα αποτελέσματα. Αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι ο βαθμός συμμετοχής των ινών, στο συγκεκριμένο ινοπλισμένο πολυμερές που κατασκευάστηκε και αξιοποιήθηκε, ήταν της τάξης του 15%. Αυτό δικαιολογεί απόλυτα τα πολύ ασθενή μηχανικά χαρακτηριστικά που εμφάνισε, καθώς όπως ειπώθηκε και στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, οι ίνες είναι αυτές που κατά κύριο λόγο ρυθμίζουν τη συμπεριφορά του παραγόμενου σύνθετου υλικού. Όσο μικρότερος ο βαθμός συμμετοχής τους τόσο ασθενέστερα θα είναι τα τελικά χαρακτηριστικά του.

Επομένως, για την κατάσταση του λυγισμού απαιτείται περαιτέρω έρευνα, με αξιοποίηση ισχυρών ινοπλισμένων πολυμερών, στα οποία ο βαθμός συμμετοχής των ινών θα είναι από 50% και πάνω. Η χρήση προεμποτισμένων ελασμάτων μάλιστα φαίνεται να ενδείκνυται όπως φάνηκε και σε αντίστοιχη εργασία [38].

#### ➤ Ενίσχυση καμπτόμενου μέλους

Υπό τη συγκεκριμένη καταπόνηση, η ενίσχυση μέσω εφαρμογής ανθρακονημάτων λειτούργησε, αυξάνοντας ικανοποιητικά την αντοχή του μέλους. Παρότι το ινοπλισμένο πολυμερές σύνθετο υλικό που εφαρμόστηκε ήταν πολύ χαμηλής ποιότητας συγκριτικά με αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, εντούτοις συνεισέφερε αρκετά στη βελτίωση της καμπτικής συμπεριφοράς του μέλους.

Φυσικά, μελετήθηκε κάμψη τέτοια ώστε το σύνθετο υλικό να βρίσκεται υπό εφελκυσμό και να λειτουργήσει στο μέγιστο βαθμό. Η αστοχία του μέλους ήταν τελείως ψαθυρή, όπως αναμενόταν άλλωστε, ενώ μόλις συνέβη η θραύση του, η αντοχή του μέλους μειώθηκε ακαριαία. Η αστοχία επήλθε στο μέσο του δοκιμίου, όπου παρατηρούταν η μέγιστη ένταση του μέλους. Και σε αυτή την περίπτωση, δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση της ενισχυτικής στρώσης από το χαλύβδινο στοιχείο σε κανένα σημείο του.

Πάντως, η ενίσχυση του μέλους με σύνθετα υλικά έναντι κάμψης μοιάζει να έχει ευεργετική επίδραση. Αυτό άλλωστε ενισχύεται από το γεγονός ότι επετεύχθη αύξηση της καμπτικής αντοχής του μέλους της τάξης του 12%, χρησιμοποιώντας μονάχα δύο στρώσεις ινών άνθρακα, συνολικού πάχους 0,24mm. Προφανώς, η χρήση ισχυρότερου σύνθετου υλικού θα μπορούσε να επιτύχει κατά πολύ σημαντικότερα αποτελέσματα.

#### ➤ Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Αν και η συμπεριφορά του θλιβόμενου μέλους έναντι λυγισμού έμεινε αμετάβλητη λόγω της ενίσχυσης, παρόλα αυτά θα ήταν χρήσιμο να εξεταστεί η συμπεριφορά του κατά την ενίσχυση με ινοπλισμένο πολυμερές σύνθετο υλικό μεγαλύτερου πάχους και σαφώς καλύτερων μηχανικών χαρακτηριστικών. Η αξιοποίηση προεμποτισμένων ελασμάτων για το σκοπό αυτό θα ήταν εξαιρετικά ενδιαφέροντα.

Όσον αφορά την κάμψη, και σε αυτή την περίπτωση θα ήταν σκόπιμη μία περαιτέρω διερεύνηση του ζητήματος, κάνοντας χρήση καλύτερης ποιότητας ενίσχυσης σύνθετου υλικού ενώ παράλληλα θα είχε νόημα και η εξέταση διαφορετικών μηκών ενίσχυσης για να διαπιστωθεί η επιρροή και αυτού του παράγοντα.

Τέλος, θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμη μία προσπάθεια επαλήθευσης των πειραματικών αποτελεσμάτων κάνοντας χρήση αριθμητικών αναλύσεων περνώντας τα δεδομένα σε κάποιο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



## 8 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Ραυτογιάννης Ι. (2009). «Σύνθετα υλικά», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
3. Σπυράκος Κ. (2004). «Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
4. American Institute of Steel Construction: “Load and resistance factor design specification for single-angle members”, November 2000.
5. American Institute of Steel Construction: “Specification for structural steel buildings”, March 2005.
6. Bambach MR et al. (2008). “Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP.” *Thin-Walled Structures*, doi:10.1016/j.tws.2008.10.006.
7. Ben et al. (2014). “Compressive Strength of Uniformly Corroded Steel Angle Members Retrofitted with CFRP.” ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 4, Issue 8, August 2014.
8. Bocciarelli M., Colombi P. “Elasto-plastic analysis of steel beams reinforced by carbon fibre reinforced polymer strips.”
9. CEN, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–1: “General rules and rules for buildings.” European Standard prEN 1993–1–1, final draft, December 2003.
10. CEN, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–3: “General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting.” European Standard prEN 1993–1–3, final draft, December 2003.
11. CNR-DT 200/2004: “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures”, July 2004, Rome.
12. CNR-DT 202/2005: “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures-Metallic structures”, June 2007, Rome.
13. Colombi P., Poggi C.(2006) “An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips” *Composites, Part B* 37 (2006) 64–73.
14. Dawood M., Guddati M., Rizkalla S. “Effectiveness of CFRP strengthening for steel structures”, North Carolina State University, USA.
15. Davison Buick, Owens W. Graham (2012). «Steel designers’ manual, 7th edition», Wiley Blackwell, Great Britain.
16. Deng J., Lee M. (2005). “Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate.” *Composite Structures*, 78 (2007), 232–242.
17. Fib Bulletin 14 (2001). “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.” Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures.
18. Galambos, T. V. (1991), “Stability of Axially Loaded Compressed Angles”, Structural Stability Research Council, Annual Technical Session Proceedings, Apr. 15–17, Chicago, IL.
19. Gebremeskel A. (2010). “Working With Single-Angle Members.” *Modern Steel Construction*, 56-57.
20. Haedir J. Zhao X.L. (2011). “Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns.” *Journal of Constructional Steel Research* 67 (2011) 497–509

21. Hong, W.S., Zhi, M.W., Zhi, M.X., and Xing, W.D. (2000). "Axial Impact Behaviour and Energy Absorption Efficiency of Composite Wrapped Metal Tubes". *International Journal of Impact Engineering*, 24, 385-401.
22. ISO 527-1: Plastics-"General principles for the determination of tensile properties."
23. ISO 527-5: Plastics-"Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites."
24. Kalavagunta S. et al. (2013). "Design equation for CFRP strengthened cold formed steel channel column sections." *IJASCSE* , Vol 2, Issue 1.
25. Kalavagunta S. et al. (2013). "Experimental study on CFRP strengthened cold formed channel columns." *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6(21): 4058-4062, 2013.
26. Kalavagunta S. et al. (2014). "Axially loaded steel columns strengthened with CFRP." *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 8, No. 1, 2014.
27. Linghoff D. et al. (2008). "Carbon-fibre composites for strengthening steel structures." *Thin-Walled Structures* 47 (2009) 1048–1058.
28. McKenzie M. C. William (2013). «Design of structural elements to Eurocodes, 2nd edition», Palgrave MacMillan, China.
29. Narmashiri K. et al. (2011). "Flexural strengthening of steel I-beams by using CFRP strips." *International Journal of the Physical Sciences* Vol. 6(7), pp. 1620-1627.
30. Rizkalla S., Dawood M. (2006). "High modulus carbon fiber materials for retrofit of steel structures and bridges". *Proceedings of the Developments in Composites: Advanced, Infrastructural, Natural and Nano-composites*, Sydney, Australia.
31. Rizkalla S., Schnerch D., Stanford K., Lanier B. "Use of high modulus carbon fiber reinforced polymers for strengthening steel structures".
32. Rosato Donald.V., Rosato Dominick. V. (2005). "Reinforced Plastics Handbook", Elsevier.
33. Schnerch D., Dawood M., Rizkalla S. (2007). "Design Guidelines for the use of HM strips." Technical report No. IS-06-02.
34. Schnerch D., Dawood M., Sumner E., Rizkalla S. "Strengthening steel bridges with new high modulus CFRP materials".
35. Sen R, Liby L, Mullins G. Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates. *Compos B:Eng* 2001;32(4):309–22.
36. Shaat A, Fam A. Axial loading tests on CFRP-retrofitted short and long HSS steel columns. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2006;33(4): 458–70.
37. Stratford T.J., Chen J.F. (2005). "Designing for tapers and defects in FRP-strengthened metallic structures." *International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*.
38. Tamai H., Hattori A., Ozawa Y., Haitani T., Takamatsu T. (2012). "Design Formula for Rehabilitated Angle Steel Member Using Carbon Fiber Reinforced Plastic Plates." 15 WCEE, Lisboa 2012.
39. Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. (2003). "Repair of damaged steel-concrete composite girders using carbon fiber-reinforced polymer sheets." *J Compos Constr* 2003;7(4):311–22.
40. Teng JG, Hu YM. (2007). "Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression." *Construct Build Mater* 2007;21(4): 827–38.
41. Teng et al.(2012). "Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites." *Journal of Constructional Steel Research* 78 (2012) 131–143.
42. Trahair N. S. (2001). "Moment Capacities of Steel Angle Sections" Report No. R809, Centre for Advanced Structural Engineering, The University of Sydney, AU.

43. Vayas I., Charalampakis A., Koumousis V. (2009). "Inelastic resistance of angle sections subjected to biaxial bending and normal forces." *Steel Construction*, 138-146.
44. Zhao XL., Zhang L. (2007). "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures." *Engineering Structures*, 29, 1808-1823.