

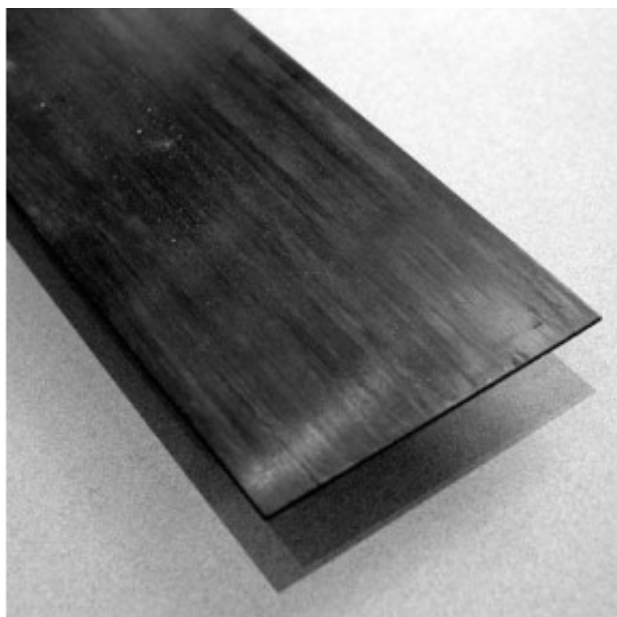


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## Ενίσχυση χαλύβδινων και γωνιακών ελασμάτων με ενισχυμένα πολυμερή FRP



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αγγελική Γεροντάτη & Ευδοξία Καραφέρη

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

ΕΜΚ ΔΕ 2019/13

Γεροντάτη Αγγελική & Καραφέρη Ευδοξία (2019).  
Ενίσχυση χαλύβδινων και γωνιακών ελασμάτων με ενισχυμένα πολυμερή FRP  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019/13  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Gerontati Angeliki & Karaferi Evdoxia (2019).  
Strengthening of steel and angle members with reinforced polymers FRP  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2019/13  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Copyright © Γεροντάτη Αγγελική - Καραφέρη Ευδοξία, 2019  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Gerontati Angeliki - Karaferi Evdoxia, 2019  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).



# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες .....	5
1 Εισαγωγή.....	6
1.1 Γενικά.....	6
1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών .....	6
1.3 Ενισχυτικές ίνες.....	8
1.4 Συνδετικό υλικό (Μήτρα).....	8
1.4.1 Polymer Matrix Composite (PMC).....	9
1.4.2 Metal matrix Composite (MMC) .....	10
1.4.3 Ceramic Matrix Composite (CMC).....	10
1.5 Ανθρακονήματα (CFRP).....	10
1.6 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών .....	12
2 Πειραματική διερεύνηση γωνιακών ελασμάτων ενισχυμένων με CFRP σε κάμψη .....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Προετοιμασία δοκιμών.....	17
2.2.1 Προετοιμασία επιφανειών.....	17
2.2.2 Συντήρηση/Σκλήρυνση .....	26
2.2.3 Περίσφιξη άκρων .....	26
2.2.4 Τοποθέτηση Επιμηκυνσιομέτρων .....	28
2.3 Πειραματική διαδικασία.....	30
2.3.1 Πειραματική διάταξη (set up) .....	31
2.3.2 Πειραματική διαδικασία.....	36
2.3.3 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας - Συμπεράσματα.....	45
2.4 Αναλυτικοί υπολογισμοί .....	51
2.4.1 Υπολογισμός γεωμετρικών και αδρανειακών χαρακτηριστικών .....	51
2.4.2 Υπολογισμός ελαστικής ροπής .....	53
2.4.3 Υπολογισμός ελαστοπλαστικής ροπής.....	54
2.5 Τεκμηρίωση αναλυτικών τύπων.....	55
2.5.1 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών καμπυλών .....	55
2.5.2 Αναλυτικός υπολογισμός θέσης κέντρου βάρους.....	58
3 Ενισχυμένα δοκίμια με ινωπλισμένα πολυμερή σε διάτμηση.....	61
3.1 Εισαγωγή.....	61
3.2 Γενικά στοιχεία.....	61
3.2.1 Μορφές δοκιμών .....	61
3.2.2 Πάχος συνδετικού υλικού και ελασμάτων .....	62
3.3 Πειραματική διαδικασία.....	63
3.3.1 Γενικά στοιχεία .....	63
3.3.2 Προετοιμασία δοκιμών .....	64
3.4 Πειραματική διάταξη (set up).....	67
3.5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας-Συμπεράσματα .....	69
3.5.1 Αποτελέσματα μηχανής εφελκυσμού .....	69
3.5.2 Αποτελέσματα επιμηκυνσιομέτρων .....	72
3.5.3 Αποτελέσματα επιμηκυνσιόμετρου .....	75
3.5.4 Μηχανισμοί αστοχίας σύμμικτων δοκιμών.....	78
3.6 Αναλυτικές σχέσεις .....	82
3.6.1 Κατανομή δυνάμεων.....	82

3.6.2	Υπολογισμός επιμηκύνσεων CFRP.....	84
3.6.3	Υπολογισμός τάσεων CFRP.....	84
3.6.4	Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας CFRP.....	85
4	Αριθμητική προσομοίωση γωνιακών δοκιμών κάμψης στο Abaqus .....	86
4.1	Εισαγωγή.....	86
4.2	Παράμετροι και λεπτομέρειες μοντελοποίησης .....	86
4.2.1	Προσδιορισμός γεωμετρίας.....	86
4.2.2	Προσδιορισμός ιδιοτήτων υλικού .....	87
4.2.3	Προσδιορισμός συνθηκών στήριξης και φόρτισης .....	88
4.2.4	Προσδιορισμός πεπερασμένου στοιχείου και πλέγματος.....	89
4.2.5	Αλληλεπίδραση (Interaction) .....	90
4.2.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα .....	90
5	Συμπεράσματα .....	94
5.1	Γενικά .....	94
5.2	Πειράματα κάμψης.....	94
5.3	Πειράματα διάτμησης.....	95
6	Βιβλιογραφία .....	96
6.1	Βιβλιογραφικές αναφορές .....	96
6.2	Βιβλιογραφία.....	96
	Παράρτημα Α. Σχέση υπολογισμού ελαστοπλαστικής ροπής για σύστημα συντεταγμένων $y - z$ ..	98
	Παράρτημα Β. Σχέση υπολογισμού ελαστοπλαστικής ροπής για σύστημα συντεταγμένων $u - z$ ..	99
	Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika Carbodur S512.....	100
	Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika Carbodur S512 .....	101
	Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika Carbodur S512 .....	102
	Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika Carbodur S512.....	103
	Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30 .....	104
	Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30 .....	105
	Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30 .....	106
	Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30 .....	107

## **Ενίσχυση χαλύβδινων και γωνιακών ελασμάτων με ενισχυμένα πολυμερή FRP**

Γεροντάτη Α. & Καραφέρη Ε. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

### **Περίληψη**

Η χρήση ελασμάτων CFRP για την ενίσχυση χαλύβδινων γωνιακών έχει το πλεονέκτημα της αύξησης της αντοχής και της δυσκαμψίας των μελών αυτών. Για το λόγο αυτό η χρήση τους είναι αντικείμενο πολλών ερευνών και πειραματικών διαδικασιών. Με σκοπό την διαπίστωση της αποτελεσματικότητας της συγκεκριμένης ενίσχυσης πραγματοποιήθηκαν σειρά πειραμάτων σε δοκίμια υπό κάμψη αλλά και σε δοκίμια υπό διάτμηση ώστε να ελεγχθεί και η συμβολή της κόλλας η οποία συχνά είναι αυτή που μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία.

Συγκεκριμένα, το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται τα πειράματα κάμψης που υλοποιήθηκαν για γωνιακά χαλύβδινα μέλη, με τοποθέτηση CFRP είτε μόνο εξωτερικά είτε και εσωτερικά και εξωτερικά των πελμάτων. Επίσης, τα πειράματα έγιναν για διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά της ενίσχυσης και στον ασθενή και στον ισχυρό άξονα. Γίνεται αναλυτικά η περιγραφή των βημάτων για την πραγματοποίηση και διάταξη των πειραμάτων ενώ παρατίθενται και στοιχεία για την ποιότητα των υλικών που εξάχθηκαν από πειράματα εφελκυσμού και δοκιμές σκληρότητας. Η παράθεση των αποτελεσμάτων συνοδεύεται από αναλυτικούς υπολογισμούς με σκοπό την σύγκριση των αναλυτικών καμπύλων με των πειραματικών καθώς και τον υπολογισμό του κεντροειδούς πάλι με τους δύο αυτούς τρόπους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα πειράματα διάτμησης που έγιναν για διάφορα μήκη αγκύρωσης των ελασμάτων CFRP αλλά και σε διαφορετικές επιφάνειες χάλυβα, και για αμμοβολισμένο και για γαλβανισμένο χάλυβα ώστε να ελεγχθούν οι διάφορες μορφές αστοχίας που θα διαπιστωθούν ανάλογα με τη συνάφεια μεταξύ των υλικών αλλά και την πιθανή επιρροή του μήκους. Εκτός των διαφόρων μορφών αστοχίας παρουσιάζονται οι αναλυτικοί υπολογισμοί για τις επιμηκύνσεις και το μέτρο ελαστικότητας ώστε να συγκριθούν οι τιμές τους με τις θεωρητικές.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διαδικασία προσομοίωσης των δοκιμιών κάμψης με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων από τα πειράματα και τις συγκρίσεις τους με τους αναλυτικούς τύπους.

## **Strengthening of steel and angle members with FRP plates**

Gerontati Angeliki - Karaferi Evdoxia (supervised by Vayas I.)

### **Abstract**

The use of CFRP laminates in strengthening steel angle members has the advantage of increasing the strength and stiffness of these members. As a result, their use has been researched a lot with a series of experiments. To ascertain the effectiveness of this particular strengthening a series of experiments have taken place, both bending and shear tests, so as the contribution of the adhesive to also be checked as it can also lead to failure.

Specifically, the first chapter deals with the bending tests at the angle members with CFRP plates either only externally either externally and internally on the flanges. In addition, the experiments take place in different directions so as to draw conclusions about both the weak and strong axes. The steps needed to perform the experiments are described analytically while the results of tensile tests and hardness test are presented to define the strength of steel. The results are accompanied with detailed calculation so as to compare the experimental and analytical curves as well as the position of the centroid in these ways.

In the second chapter, the shear tests are being presented with different bond lengths of the CFRP laminate and for both galvanized and sandblasted so as the different types of failures to be checked and reach to conclusions about the cohesion of the materials and the bond length. Aside from the failure types the detailed calculations about the elongations and the elastic modulus are being presented to be compared with the theoretical values.

In the third chapter, there is the numerical simulation of the bending tests with Abaqus and the comparison with the experimental results.

Finally, in the fourth chapter the results of the experiments and the comparisons with the analytical calculations are being presented.



## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή μας Δρ. Ιωάννη Βάγια, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και διευθυντή του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, για την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας.

Ακόμη, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Δρ. Ξενοφώντα Λιγνό, Ε.Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη συμβολή και καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Κωνσταντίνο Βλαχάκη.

Εξίσου σημαντική ήταν η συνεισφορά των κ. Κατσατσίδα Στυλιανού και κ. Παπαβιέρου Σπυρίδωνα μέλη του εργαστηρίου των Μεταλλικών Κατασκευών, για τη βοήθεια που προσέφεραν στην προετοιμασία και εκτέλεση των πειραμάτων.

Επίσης ευχαριστούμε ιδιαίτερα την εταιρία Sika France για την παραχώρηση όλων των απαραίτητων πληροφοριών για τα ανθρακοελάσματα και τις ρητίνες επικόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαιτέρως τις οικογένειές μας που όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας, μας στήριξαν και ήταν δίπλα μας.

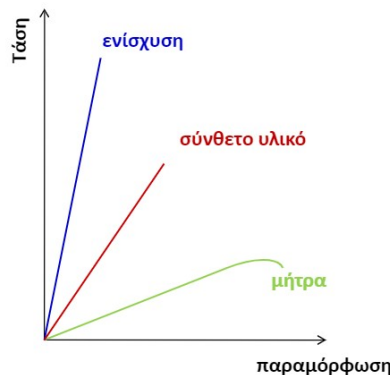
# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στις κατασκευές. Τόσο στις καινούργιες κατασκευές σε συνδυασμό με τα συνήθη υλικά όσο και στις ενισχύσεις στοιχείων που τις απαρτίζουν, αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο χάρη στις βελτιωμένες ιδιότητες τους.

Αρχικά η μαζική παραγωγή και η χρήση τους εμφανίζεται κυρίως στην ναυπηγική λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και της περιορισμένης χρήσης, ενώ με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας, η χρήση τους διευρύνεται σε περισσότερους κλάδους ένας εκ των οποίων και οι κατασκευές πολιτικού μηχανικού όπου και βρίσκουν σημαντική θέση.

Πρόκειται ουσιαστικά για τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων διακριτών υλικών τα οποία συνεργάζονται και δημιουργούν ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες. Τα υλικά αυτά έχουν σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους. Στην πράξη, το ένα από τα δύο επιμέρους υλικά είναι ισχυρό και παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, ενώ το άλλο είναι ασθενές και χρησιμεύει περισσότερο ως συνδετικό μέσο. Το ισχυρό υλικό καλείται οπλισμός ή συστατικό ενίσχυσης και έχει συνήθως τη μορφή ινών, ενώ το ασθενές συνδετικό υλικό καλείται μητρώο ή μήτρα. Μπορεί να γίνει ένα πλήθος συνδυασμών επιμέρους υλικών, ώστε το τελικό προϊόν να έχει ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες.



Σχήμα 1.1: Τυπικές ιδιότητες σύνθετου υλικού καθώς και των υλικών από τα οποία αποτελείται [3]

## 1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

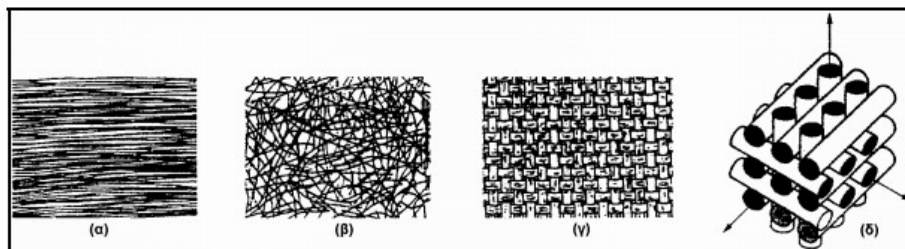
- Ινώδη σύνθετα: Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- Στρωματικά σύνθετα: Με επάλληλες στρώσεις υλικών.

- Κοκκώδη σύνθετα : Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπό-ομάδες:

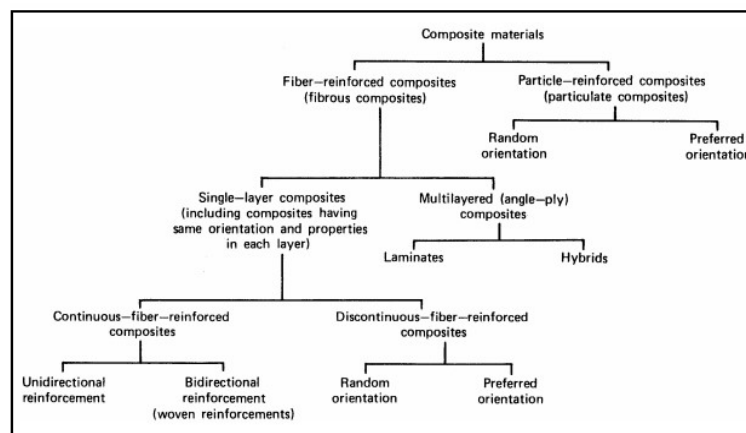
- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.



Σχήμα 1.2.: Διάταξη ινών: (α) Μονοδιευθυντικές ίνες, (β) Ίνες τυχαίας διεύθυνσης, (γ) Ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) Ίνες με τρισσορθογώνια ύφανση [2]

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων σχετίζεται με τον λόγο μήκους προς διάμετρο ( $l/d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες, όταν είναι  $l/d \geq 100$ .
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες, όταν είναι  $l/d < 100$ .
- Νηματίδια ή τριχίτες: Με  $d < 1 \mu\text{m}$  και  $l \cong 100 \mu\text{m}$ .



Σχήμα 1.3: Ταξινόμηση σύνθετων υλικών [2]

### 1.3 Ενισχυτικές ίνες

Οι ίνες προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας. Το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται ανάλογα με το επιδιωκόμενο μέτρο ελαστικότητας, τάση θραύσης σε εφελκυσμό, δυσκαμψία, δυσθραυστότητα και επιπλέον ώστε να έχει μικρή πυκνότητα.

Ανάλογα με τις παραπάνω επιθυμητές ιδιότητες οι ίνες διακρίνονται σε:

- Ίνες γυαλιού (Glass FRP) .
- Ίνες άνθρακα (Carbon FRP) .
- Ίνες πολυμερούς με ευρέως χρησιμοποιούμενες τις ίνες αραμιδίου ή αλλιώς Kevlar (Aramid FRP) .
- Μεταλλικές ίνες .
- Τριχίτες (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).
- Ίνες φυσικών ορυκτών.

### 1.4 Συνδετικό υλικό (Μήτρα)

Η μήτρα έχει ως σκοπό να συγκρατεί τις ίνες μεταξύ τους, μεταβιβάζοντας μ' αυτό τον τρόπο φορτίο σ' αυτές, ενώ παράλληλα τις προστατεύει από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για να ικανοποιεί το ρόλο αυτό η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

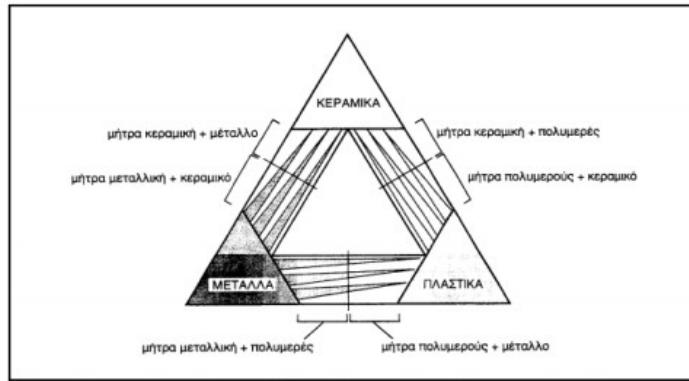
- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν « συμβατότητα » με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1. Ακόμα, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας. Ανάλογα με το υλικό της μήτρας διακρίνονται οι ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές.
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.

Τα σύνθετα υλικά που έχουν σαν βάση τις παραπάνω κατηγορίες συνδετικών υλικών χαρακτηρίζονται αντίστοιχα ως:

- PMC: Polymer Matrix Composite
- MMC: Metal Matrix Composite
- CMC: Ceramic Matrix Composite



Σχήμα 1.4: Ομάδες σύνθετων υλικών [2]

### 1.4.1 Polymer Matrix Composite (PMC)

Τα σύνθετα υλικά PMC έχουν χαμηλό κόστος λόγω της ευκολίας κατασκευής και των πολύπλοκων διαμορφώσεων τους, χαρακτηριστικά τα οποία τα καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλή. Τα πολυμερή αυτά διακρίνονται σε φυσικά και συνθετικά τα οποία δημιουργούνται με προσθήκη επιπλέον ουσιών. Διακρίνονται σε:

- **Θερμοσκληρυνόμενα:** Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

- Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξειδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200°C παρουσιάζοντας καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες καθώς και μεγαλύτερο κόστος.
- Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C.

- **Θερμοπλαστικά:** Βασική ιδιότητα αυτών των υλικών είναι ότι υπό την επίδραση θερμότητας οι δυνάμεις που δρουν μεταξύ των μορίων μειώνονται, οπότε το υλικό μαλακώνει, γίνεται εύκαμπτο και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, ενώ όταν το υλικό κρυώσει μετατρέπεται και πάλι σε στερεό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες, όπου η δομή τους αποτελείται από μοριακές αλυσίδες διασυνδεδεμένες με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες.

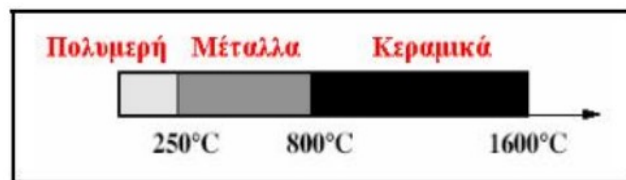
- **Ελαστομερή:** Αυτά τα πολυμερή είναι ιδιαίτερα ελαστικά και επιμηκύνονται με την εφαρμογή φορτίου. Είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και δεν μπορούν να ενωθούν με συγκόλληση.

### 1.4.2 Metal matrix Composite (MMC)

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρας προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων είναι πολύ χαμηλή.

### 1.4.3 Ceramic Matrix Composite (CMC)

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή. Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ιών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας. Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ιών-μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ιών. Ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο.

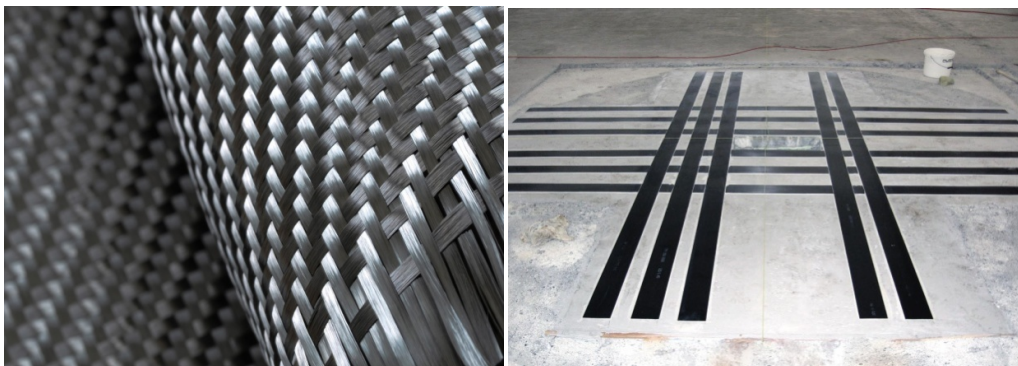


Σχήμα 1.5: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης σύνθετων υλικών [2]

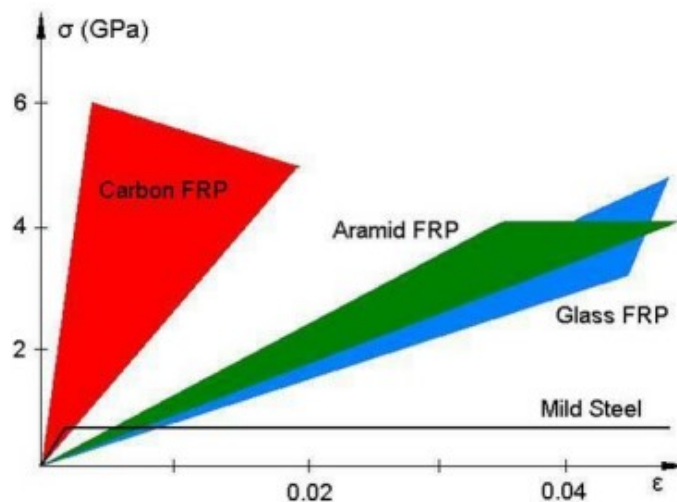
## 1.5 Ανθρακονήματα (CFRP)

Τα CFRP έχουν σημαντική εφαρμογή στο χώρο των στατικών ενισχύσεων των κτιρίων, διότι αυξάνουν την καμπτική και διατμητική αντοχή των φερόντων στοιχείων. Εμφανίζονται σε 2 μορφές τα ανθρακουφάσματα και τα ανθρακοελάσματα.

Τα ανθρακουφάσματα είναι υφάσματα από ίνες άνθρακα τοποθετημένες στην μία ή και στις δύο διευθύνσεις ενώ τα ανθρακοελάσματα είναι ελάσματα («λωρίδες») από συμπυκνωμένες ίνες άνθρακα πολύ μικρού πάχους (1,2-1,4mm) σε διάφορα πλάτη.



Εικόνα 1.1: A: Ανθρακονήμα B: Ανθρακοελάσματα [1]



Σχήμα 1.6: Διάγραμμα τάσης-επιμήκυνσης για σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα, αραμιδίου και γυαλιού σε σύγκριση μεταξύ τους και με τον χάλυβα [4]

Τα σύνθετα υλικά από FRP έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του χάλυβα, με πιο σημαντικά τον λόγο αντοχής προς βάρος καθώς και την αντίσταση σε διάβρωση. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των FRP είναι ότι οι ιδιότητες του υλικού σε διαφορετικές διευθύνσεις μπορούν να προσαρμόζονται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

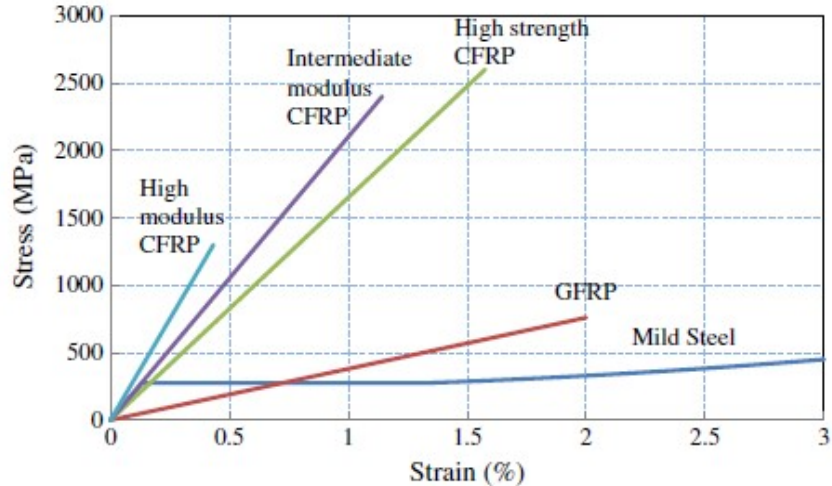
Σε εφαρμογές όπου απαιτείται έντονη πλαστιμότητα φαίνεται με βάση το σχήμα 1.6 ότι η χρήση των GFRP είναι πιο ελκυστική και το κόστος τους είναι μικρότερο, το πρόβλημα όμως είναι ότι όταν έρχονται σε άμεση επαφή με τον χάλυβα προκαλείται γαλβανική διάβρωση.

Αντίθετα τα CFRP προτιμούνται έναντι των GFRP (Glass fiber reinforced polymers) και των AFRP (Aramid fiber reinforced polymers) εξαιτίας του πολύ υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητη η βελτίωση της αντοχής έναντι λυγισμού. Στον παρακάτω πίνακα 1.1 φαίνονται οι κατηγορίες ανθρακοελασμάτων της εταιρίας Sika με τις ιδιότητες τους.

Πίνακας 1.1: Ιδιότητες ανθρακοελασμάτων εταιρίας Sika

Προϊόν	Μέτρο ελαστικότητας E(GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέγιστη παραμόρφωση (%)
Sika CarboDur S (high strength)	165	2800	1.70
Sika CarboDur M (intermediate modulus)	210	2400	1.20
Sika CarboDur H (high modulus)	300	1300	0.45

Συνεπώς υπάρχουν τρεις κατηγορίες ανθρακοελασμάτων της συγκεκριμένης εταιρίας τα ελάσματα τύπου S που είναι υψηλής αντοχής, τα ελάσματα τύπου H τα οποία είναι υψηλού μέτρου ελαστικότητας καθώς και τα M που είναι ενδιάμεσου μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 1.7: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης CFRP της εταιρίας Sika, GFRP και χάλυβα [6]

Στο σχήμα 1.7. φαίνεται η διαφορά τους με βάση την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας την μέγιστη αντοχή καθώς και παραμόρφωση. Ακόμα φαίνεται ότι συμπεριφορά των FRP είναι γραμμική ελαστική μέχρι την ψαθυρή αστοχία.

## 1.6 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα.

Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

### A. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

#### A1. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου

- Χειροποίητη στρώση: Πρόκειται για μια εύκολη διαδικασία η οποία όμως είναι ιδιαίτερα αργή. Αρχικά τοποθετούνται οι ίνες σε στρώσεις μέσα σε καλούπι και έπειτα τοποθετείται η ρητίνη. Με την βοήθεια ενός ρολού γίνεται συμπίεση για την εξασφάλιση καλύτερης συνάφειας και τέλος γίνεται η ξήρανση του υλικού.



Εικόνα 1.2: Χειροποίητη στρώση [2]

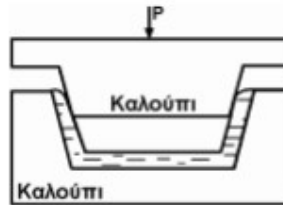


- Χύτευση θαλάμου πίεσης: Η διαδικασία είναι παρόμοια με την παραπάνω με την μόνη διαφοροποίηση ότι εδώ αντί για την χειρονακτική χρήση ρολού εφαρμόζεται πίεση μέσω αερίου.



Εικόνα 1.3: Χύτευση θαλάμου πίεσης [2]

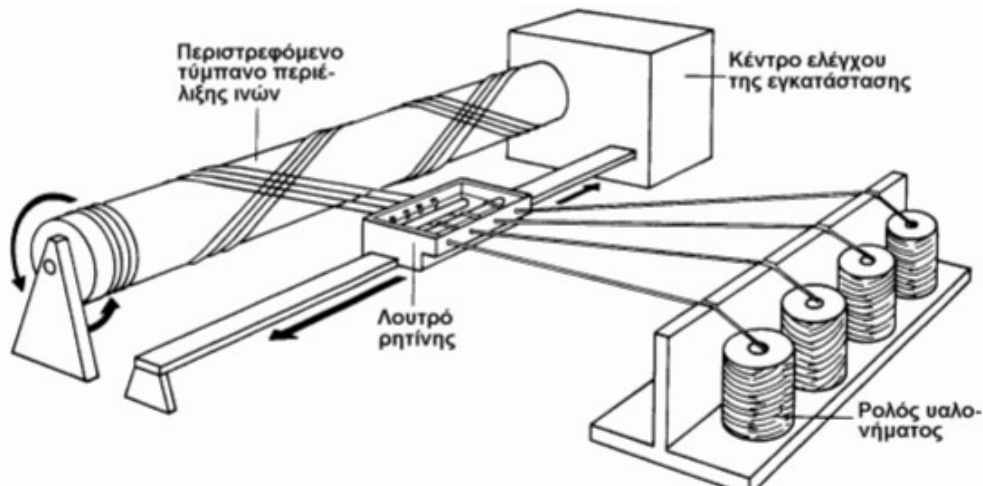
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι: Όλη η διαδικασία πραγματοποιείται σε διμερές καλούπι. Συνεπώς η άσκηση πίεσης πραγματοποιείται με το πάνω τμήμα του καλουπιού.



Εικόνα 1.4: Χύτευση σε διαιρετό καλούπι [2]

## A2. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου

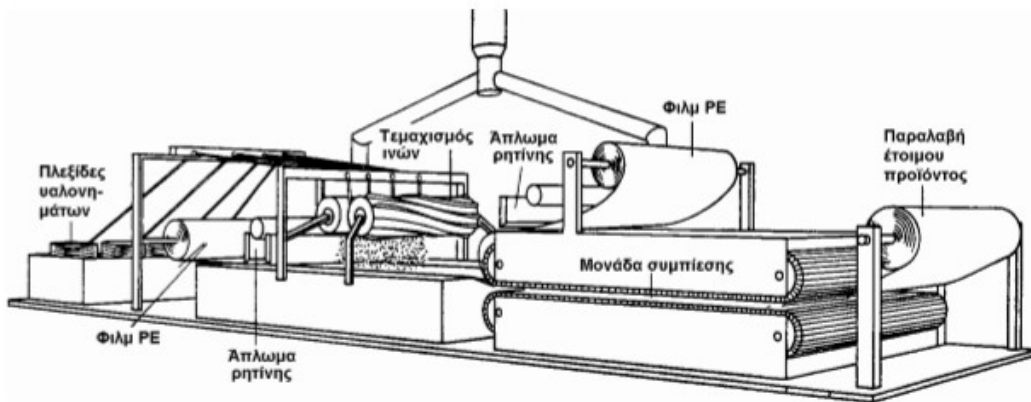
- Περιέλιξη νήματος: Ίνες ευθύγραμμες ή πεπλεγμένες διατιθέμενες σε δεσμίδες τυλίγονται γύρω από κυλινδρικούς οδηγούς. Σε πρώτη φάση οι ίνες αυτές εμβαπτίζονται σε λουτρό ρητίνης και ύστερα περιτυλίγονται σε καλούπι κατάλληλου σχήματος. Το τελικό προϊόν ξηραίνεται σε αέρα ή κλίβανο.



Εικόνα 1.5: Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος [2]

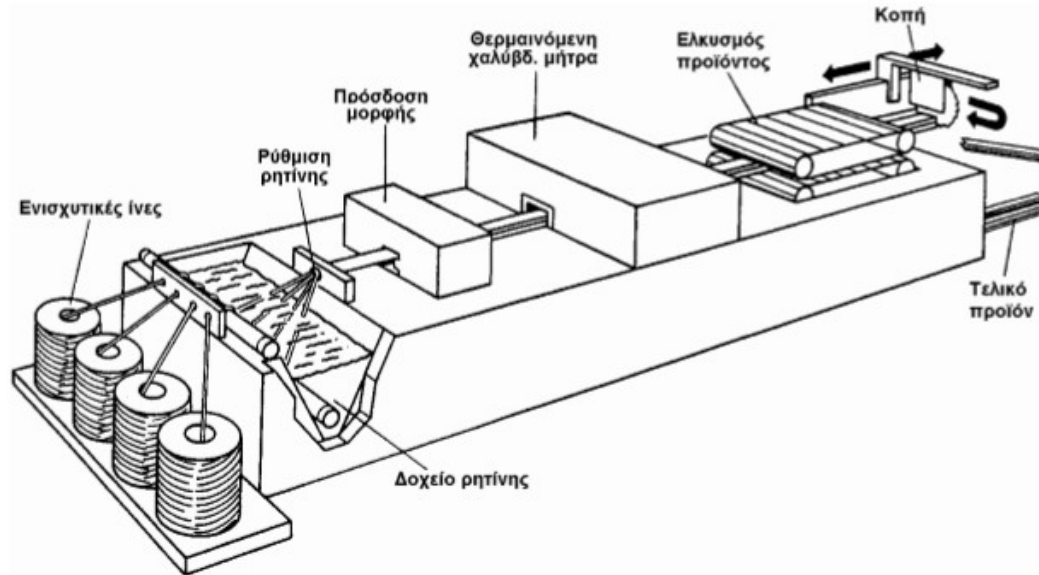
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος: Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης που κινείται σε

λεπτό φιλμ πολυαιθυλενίου. Ένα δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται με όμοιο τρόπο πάνω στο πρώτο, δημιουργώντας έτσι ένα στρωματοειδές υλικό με πυρήνα από ενισχυτικές ίνες. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει τυλίγεται σε ρολά και αφήνεται να στερεοποιηθεί επί 1÷4 ημέρες, οπότε και επιτυγχάνεται καλή συνάφεια μεταξύ ινών - μήτρας. Μετά το πέρας της διαμόρφωσης, η πλάκα συνθέτου κόβεται σε επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι, σε θερμοκρασία περίπου 150°C, όπου εφαρμόζεται υδραυλική πίεση και το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν. Τα προϊόντα της μεθόδου έχουν μεγάλες διαστάσεις και υψηλή ομοιογένεια.



Εικόνα 1.6: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος [2]

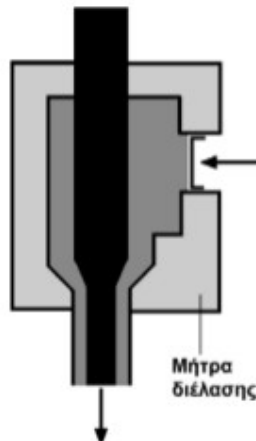
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση: Η παρούσα τεχνική μορφοποίησης εφαρμόζεται όταν απαιτείται σταθερή διατομή προϊόντος. Ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους εμβαπτίζονται κατά τρόπο συνεχή σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη χαλύβδινη μήτρα, όπου το προϊόν λαμβάνει την τελική του διατομή. Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του προϊόντος, παρατηρείται υψηλή μηχανική αντοχή κατά τη διεύθυνση αυτή.



Εικόνα 1.7: Μορφοποίηση με εμφάνιση [2]

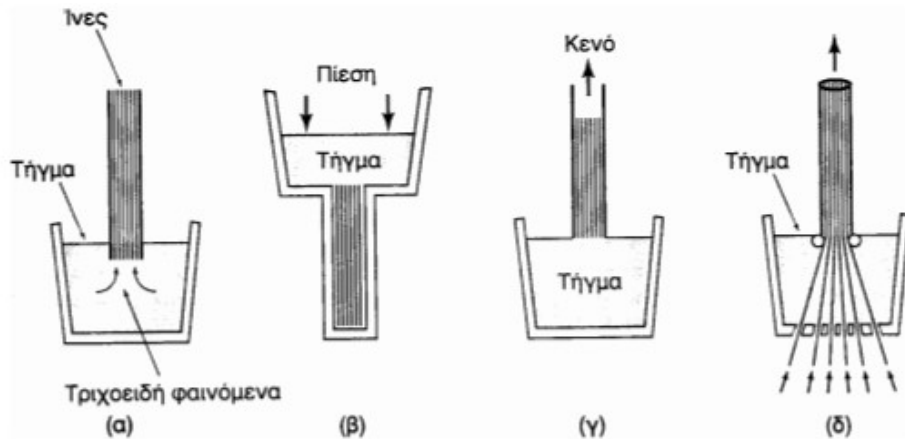
## B. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας

- Συνδιέλαση: Πρόκειται για ταυτόχρονη διέλαση των συστατικών υλικών του συνθέτου και ενδείκνυται η εφαρμογή της στην περίπτωση παρόμοιας ολκιμότητας ινών και μήτρας. Όταν οι ίνες είναι ψαθυρές, η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ενίσχυση της μήτρας με την τεχνική της συνδιέλασης εξασφαλίζει την καλύτερη στιβαρότητα και χαμηλότερη πυκνότητα συνθέτου.



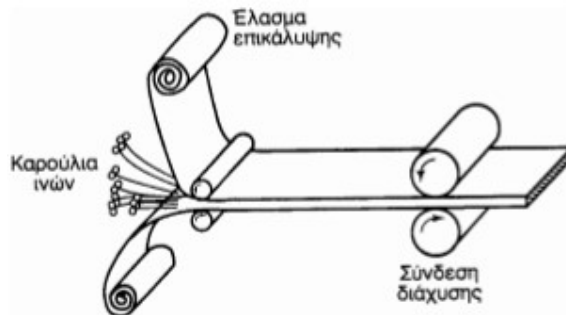
Εικόνα 1.8: Συνδιέλαση [2]

- Μορφοποίηση με χύτευση: Η μήτρα εισάγεται ως τήγμα σε κατάλληλα διευθετημένο σύστημα ενίσχυσης. Η διαβροχή των ινών από το τήγμα επιτυγχάνεται με μηχανισμό τριχοειδών αγγείων, με πίεση λόγω βαρύτητας, με αναρρόφηση λόγω κενού ή με συνεχή χύτευση.



Εικόνα 1.9: Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδῶν φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση [2]

- Συμπίεση σε στερεή κατάσταση: Συνεχείς ίνες, υπό μορφή ταινιών, τοποθετούνται μεταξύ δύο μεταλλικών ελασμάτων και το σύστημα συμπιέζεται κατάλληλα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται συγκόλληση πίεσης και πολύ καλή πρόσφυση μεταξύ ινών και ελασμάτων.



Εικόνα 1.10: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση [2]

- Απόθεση υλικού μήτρας: Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτροπόθεση. Μετά την απόθεση υλικού οι επικαλυμμένες ίνες υποβάλλονται σε έψηση που εξασφαλίζει καλύτερη συνάφεια μεταξύ ινών - μήτρας.

Γ. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας: Οι τεχνικές μορφοποίησης συνθέτων κεραμικής μήτρας στηρίζονται στις τεχνικές μορφοποίησης των κεραμικών υλικών με διαδικασίες έψησης. Η κεραμική μήτρα, υπό τη μορφή σκόνης, το συνδετικό υλικό και οι ίνες υποβάλλονται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία. Στην περίπτωση υαλωδών κεραμικών, οι ενισχυτικές ίνες προστίθενται στη μήτρα, η οποία βρίσκεται υπό μορφή τήγματος.

## **2 Πειραματική διερεύνηση γωνιακών ελασμάτων ενισχυμένων με CFRP σε κάμψη**

### **2.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτεταμένη αναφορά στην διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμών, προκειμένου να ολοκληρωθεί με επιτυχία η πειραματική διαδικασία με όσο γίνεται αντικειμενικότερα αποτελέσματα, στα υλικά και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε καθώς στα αποτελέσματα των πειραμάτων και στον σχολιασμό τους. Σκοπός των πειραμάτων είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς χαλύβδινων γωνιακών δοκιμών, ενισχυμένων με ελάσματα CFRP υπό κάμψη 3 σημείων.

### **2.2 Προετοιμασία δοκιμών**

#### **2.2.1 Προετοιμασία επιφανειών**

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από μια χαλύβδινη δοκό τριγωνικής διατομής με διαστάσεις 70 x 70 x 7 mm (μήκος x πλάτος x πάχος διατομής) και συνολικό μήκος 1,5 m. Στα άκρα της μεταλλικής δοκού είναι συγκολλημένες χαλύβδινες πλάκες διαστάσεων 200 x 200 x 12 mm. Όλα τα μεταλλικά στοιχεία περιβάλλονται εξωτερικά με μια στρώση από ανθρακικό ορυκτό σμιθσονίτη ή αλλιώς καλαμίνα. Προκειμένου να είναι αποτελεσματική η σύνδεση μεταξύ της χαλύβδινης επιφάνειας και της επιφάνειας ενίσχυσης γίνεται αμμοβολή της πρώτης. Το χαλύβδινο δοκίμιο δεν τοποθετείται ολόκληρο στην μηχανή, αλλά γίνεται τοπική αμμοβολή στο τμήμα της ενίσχυσης, όπου χρησιμοποιείται άμμος γενικής χρήσης με μεταβλητή κοκκομετρία για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, χωρίς όμως να αλλοιωθεί η διατομή του δοκιμίου. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η μηχανή αμμοβολής (εικόνα 2.1) που χρησιμοποιήθηκε και τα δοκίμια του χάλυβα μετά την τοπική αμμοβολή (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.1: Μηχανή αμμοβολής



Εικόνα 2.2: Αμμοβολισμένα δοκίμια

Οι επιφάνειες των ελασμάτων από ενισχυμένα πολυμερή δεν μπορούν να καθαριστούν με τον ίδιο τρόπο, διότι ενδέχεται να καταστραφεί η σύνδεση των ινών. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται διάλυμα ακετόνης της εταιρίας Sika France, με το οποίο απομακρύνονται από την επιφάνεια των ελασμάτων υπολείμματα γράσου, λαδιού και άλλων ρύπων που απέμειναν κατά τη διαδικασία.



Εικόνα 2.3: Ανθρακοελάσματα ενίσχυσης

### 2.2.1.1 Χαρακτηριστικά χάλυβα

Οι ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιείται προκύπτουν με δύο τρόπους. Πριν την πειραματική διαδικασία γίνεται σκληρομέτρηση του χάλυβα. Αφού ολοκληρωθούν τα πειράματα λαμβάνονται τμήματα από τα δοκίμια και πραγματοποιούνται δοκιμές εφελκυσμού, ώστε τα αποτελέσματα να είναι πιο ακριβή.

- Σκληρομέτρηση

Η σκληρομέτρηση είναι μια διαδικασία προσδιορισμού της αντίστασης ενός υλικού σε πλαστική παραμόρφωση με αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η στατική μέθοδος σκληρομέτρησης κατά Brinell. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κάθετη, αργή και σταθερή διείσδυση στο δοκίμιο, μιας πολύ σκληρής χαλύβδινης σφαίρας, με διάμετρο  $D$ , υπό την εφαρμογή ενός σταθερού φορτίου  $F$  για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Μετά την αποφόρτιση μετρείται με μικροσκόπιο η διάμετρος του αποτυπώματος  $d$ .



Εικόνα 2.4: Μηχανή σκληρομέτρησης

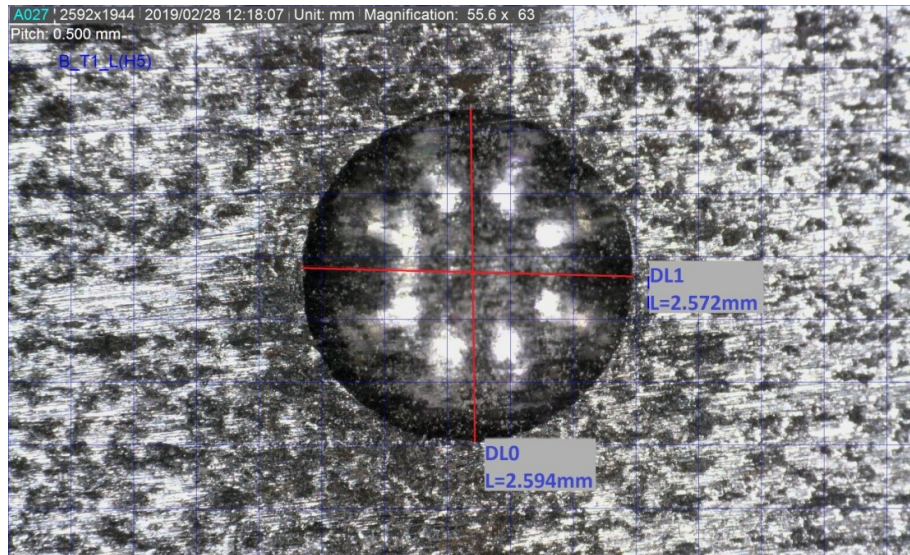
Πριν την διείσδυση της σφαίρας γίνεται τοπική λείανση, με σκοπό αφενός να είναι εύκολη η μέτρηση του αποτυπώματος και αφετέρου οι διάφορες μικροανωμαλίες της επιφάνειας να μην επηρεάσουν την μέτρηση.

Σε κάθε δοκίμιο η διαδικασία επαναλαμβάνεται 3 φορές σε κάθε πέλμα. Για τα εξεταζόμενα δοκίμια επιλέγεται σφαίρα διαμέτρου  $D=5\text{ mm}$  με σταθερό φορτίο  $F=750\text{ kg}$  εφαρμοζόμενη για διάστημα 15 δευτερολέπτων. Η σκληρότητα κατά Brinell προκύπτει από τον τύπο:

$$HBW=0.102 \frac{2F}{\pi D (D-\sqrt{D^2-d^2})} \quad (2.1)$$

Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ακόμα πιο ρεαλιστικά για κάθε σπή, μετριοούνται δύο διαμέτροι κάθετοι μεταξύ τους και η διάμετρος  $d$  λαμβάνεται ως ο μέσος όρος τους.





Εικόνα 2.5: Εικόνα αποτυπώματος οπής στο μικροσκόπιο

Από τις έξι οπές για κάθε δοκίμιο βγαίνει ένας συνολικός μέσος όρος, ο οποίος δίνει την σκληρότητα κατά Brinell. Αυτή γράφεται με την ακόλουθη μορφή π.χ. 137 HBW 5/750/15. Το πρώτο νούμερο εκφράζει την σκληρότητα ενώ τα υπόλοιπα, τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά για την διάμετρο της σφαίρας, την εφαρμοζόμενη δύναμη και το χρονικό διάστημα επιβολής αντίστοιχα.

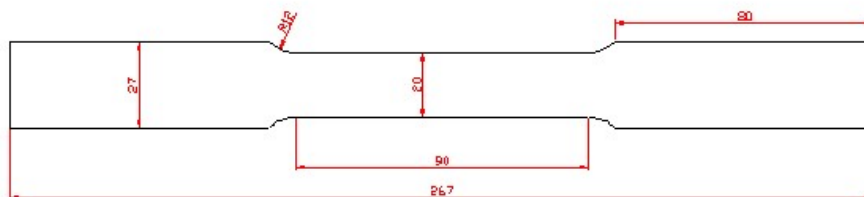
Αφού είναι πια γνωστά τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης, ακολουθεί η μετατροπή τους μέσω ενός πίνακα τιμών, εξαρτώμενου από τα χαρακτηριστικά της δοκιμής, στην εφελκυστική αντοχή του υλικού.

Πίνακας 2.1: Σκληρότητα Brinell και εφελκυστική αντοχή δοκιμίων

	B-T1-V	B-T2-V	B-T2-V2	B-T1-L	B-T1-LI	Average
HBW	137	138	137	135	135	136
fu(MPa)	424	426	430	435	433	430

Το αποτέλεσμα οδηγεί σε χάλυβα με εφελκυστική αντοχή 430 MPa και αντίστοιχο όριο διαρροής 275MPa.

- Δοκιμές εφελκυσμού χάλυβα



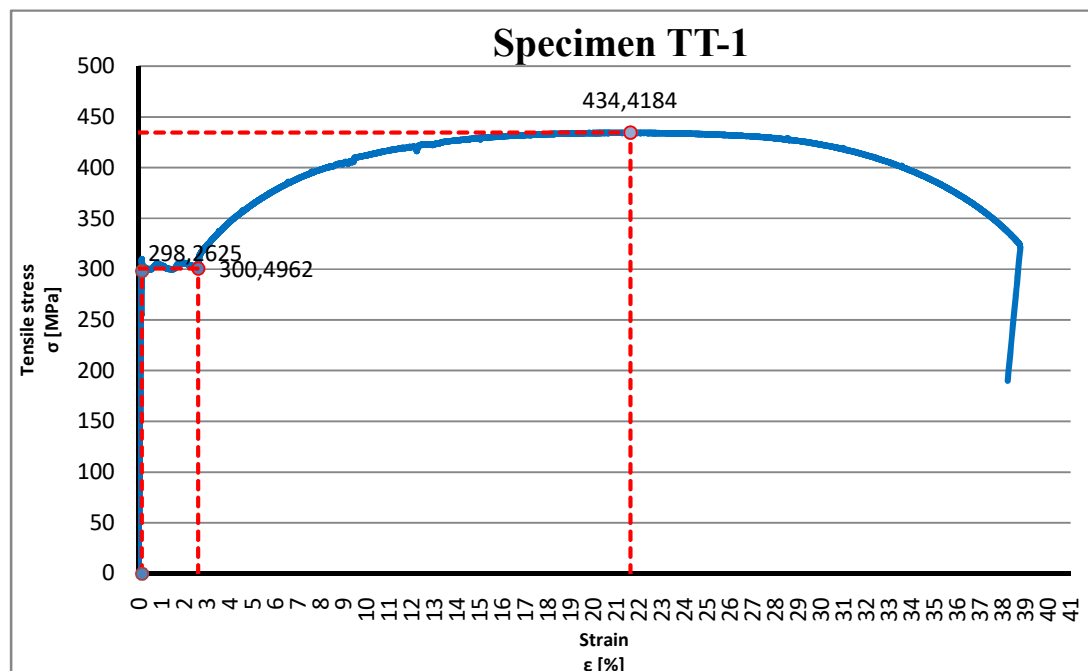
Σχήμα 2.1: Σχήμα και διαστάσεις εξεταζόμενου δοκιμίου

Διαμορφώνονται τρία δοκίμια χάλυβα με την παραπάνω μορφή με βάση τον ευρωπαϊκό κανονισμό EN ISO 6892-1. Στην συνέχεια τοποθετούνται στην υδραυλική μηχανή Instron 300LX, η οποία έχει μέγιστο φορτίο εφελκυσμού 300 kN και αποτελείται από ένα κλειστό πλαίσιο φορτίου, όπου η πάνω κεφαλή έχει τη δυνατότητα κάθετης μετακίνησης για την τοποθέτηση του δοκιμίου και η κάτω κεφαλή επιβάλλει τη μετατόπιση.

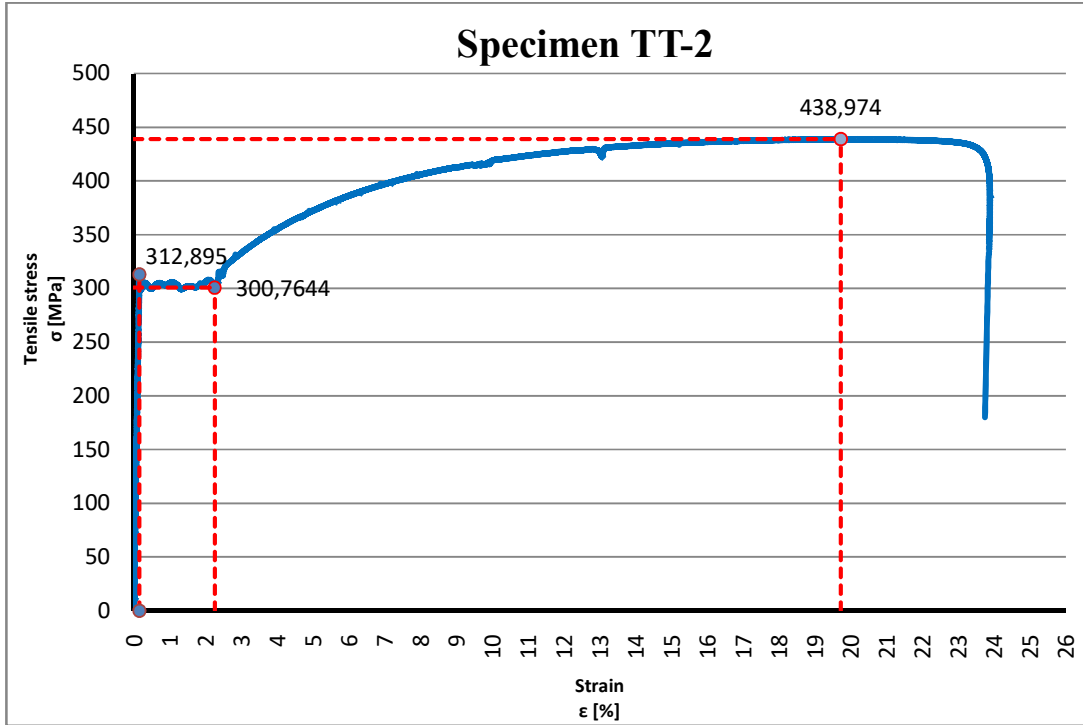


Εικόνα 2.6: Πειραματική διάταξη εφελκυσμού

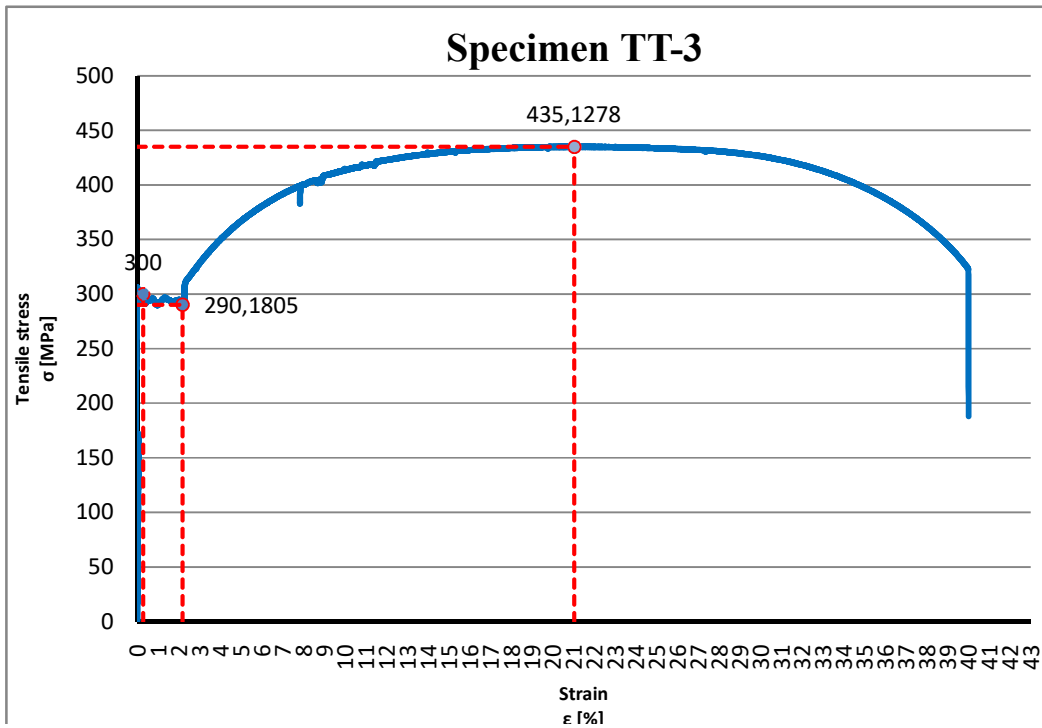
Ο υπολογισμός της παραμόρφωσης και η καταγραφή της δύναμης για τα δοκίμια γίνεται μέσω της μηχανής εφελκυσμού και προκύπτουν τα ακόλουθα διαγράμματα.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου TT-1



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου TT-2



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου TT-3

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες δοκιμίων από δοκιμές εφελκυσμού

	TT-1	TT-2	TT-3	Average
$f_{y,low}$ (Mpa)	300,50	300,76	290,18	297
$f_u$ (Mpa)	434,42	438,97	435,13	436
E(Gpa)	209	197	213	206

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την σκληρομέτρηση και τις δοκιμές εφελκυσμού, παρατηρείται ότι η διαφορά είναι αρκετά μικρή. Σε όλους τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού, διότι έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

### 2.2.1.3. Χαρακτηριστικά CFRP

Τα χαλύβδινα δοκίμια ενισχύονται με ινωπλισμένα πολυμερή άνθρακα σε εποξειδική μήτρα (CFRP) της εταιρίας Sika France. Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι Sika Carbodur S512 με πλάτος 50 mm και πάχος 1.2 mm, που διατίθεται σε ρολό των 100 m.



Εικόνα 2.7: Ρολό Sika Carbodur S512

Τα ελάσματα CFRP δεν υποβάλλονται σε δοκιμή εφελκυσμού προκειμένου να υπολογιστούν τα ακριβή χαρακτηριστικά τους, αλλά χρησιμοποιούνται αυτά που δίνονται από τον κατασκευαστή στο πιο πρόσφατο φύλλο ιδιοτήτων του προϊόντος (Δεκέμβριος 2017) το οποίο δίνεται στο παράρτημα Α. Πρόκειται για ελαστικό υλικό μέχρι την θραύση με μέγιστη εφελκυστική αντοχή 3100 MPa και μέτρο ελαστικότητας ίσο με 170 GPa. Η τιμή για το μέτρο ελαστικότητας επιβεβαιώνεται από αναλυτικούς υπολογισμούς που έγιναν και θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

#### 2.2.1.2 Τοποθέτηση ελασμάτων CFRP

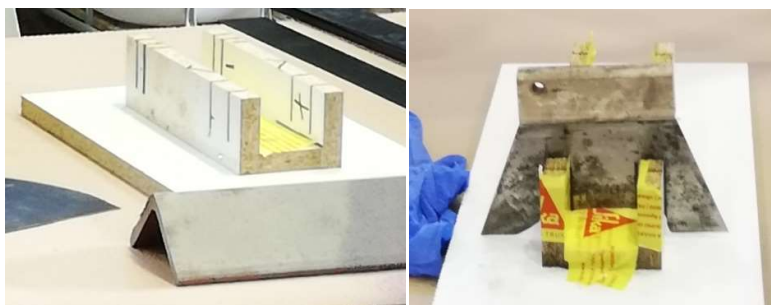
Το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την σύνδεση των επιφανειών είναι η ρητίνη επικόλλησης Sikadur 30 και πρόκειται για την μίξη δύο συστατικών που βασίζεται στο συνδυασμό εποξειδικών ρητινών και ειδικών αδρανών σχεδιασμένο για θερμοκρασίες 8-35°C. Το υλικό αυτό είναι έντονα ψαθυρό και σύμφωνα με τον κατασκευαστή έχει μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό  $E = 11200$  MPa, ενώ σε θλίψη  $E = 9600$  MPa. Με βάση το μέτρο ελαστικότητας, υπολογίζεται το μέτρο διάτμησης του υλικού από τον τύπου  $G = E/2 \cdot (1 + \nu)$ . Επιλέγοντας  $\nu = 0.20$  μετά από σχετική έρευνα για το συγκεκριμένο υλικό,

προκύπτει το μέτρο διάτμησης ίσο με 4660 MPa και 4000 MPa σε εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα.

Αρχικά αναμειγνύονται οι δύο συσκευασίες της ρητίνης A και B σε ποσοστό 70% και 30% αντίστοιχα για 3 λεπτά, με αναδευτήρα προσαρμοσμένο σε ηλεκτρικό αναμεικτήρα χαμηλής ταχύτητας έως 300 στροφές το λεπτό, έως ότου το μείγμα αποκτήσει λεία υφή και ομοιόμορφο γκρι χρώμα. Μετά την ανάμειξη οι εργασίες που ακολουθούν πρέπει να γίνουν γρήγορα και σε λιγότερο από 50 λεπτά, διότι η θερμοκρασία του συνδετικού υλικού σε αυτό το χρονικό διάστημα ανεβαίνει σημαντικά με αποτέλεσμα η κόλλα να χάνει την εργασιμότητα της. Τοποθετείται μια λεπτή στρώση ρητίνης τόσο στην επιφάνεια του χάλυβα όσο και στο έλασμα των CFRP το οποίο περνάει από ειδική διαμόρφωση με spacers, ώστε να έχει την σωστή ποσότητα υλικού. Μετά την επιβολή πίεσης επιτυγχάνεται σταθερό πάχος ρητίνης περίπου 1.0 mm. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία καθαρίζεται και πάλι η επιφάνεια των ελασμάτων και απομακρύνεται όση ρητίνη έχει ξεχειλίσει από τα άκρα των ελασμάτων. Το ίδιο επαναλαμβάνεται σε κάθε πέλα σε όλα τα υπόλοιπα δοκίμια.



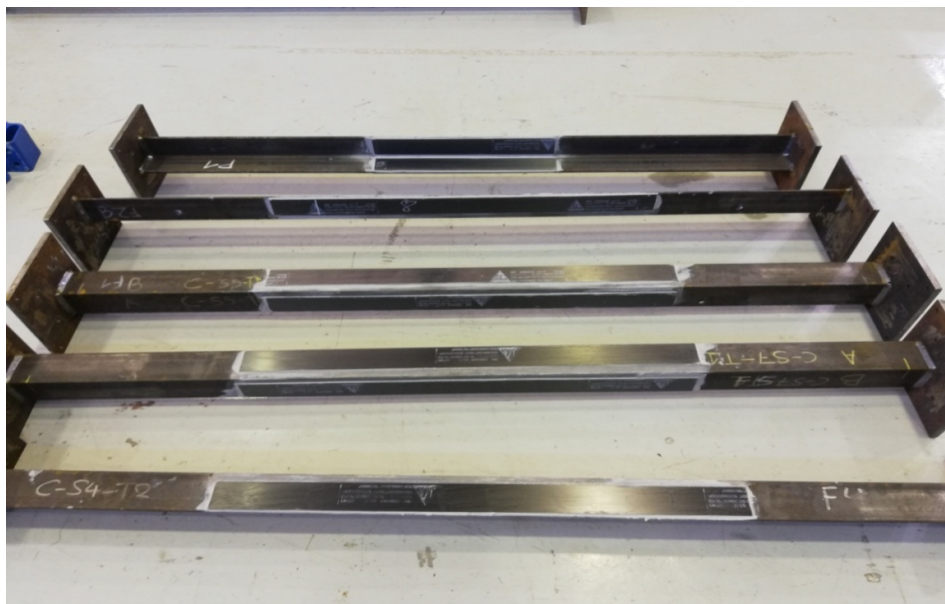
Εικόνα 2.8: A: Διάλυμα ακετόνης B: Ρητίνη επικόλλησης Sikadur 30



Εικόνα 2.9: Βοηθητική διάταξη με spacers

## 2.2.2 Συντήρηση/Σκλήρυνση

Στην συνέχεια τα δοκίμια αποθηκεύονται στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ σε θερμοκρασία 20°C για τουλάχιστον 10 ημέρες, μέχρι να αποκτήσει το συγκολλητικό υλικό τις απαραίτητες αντοχές.

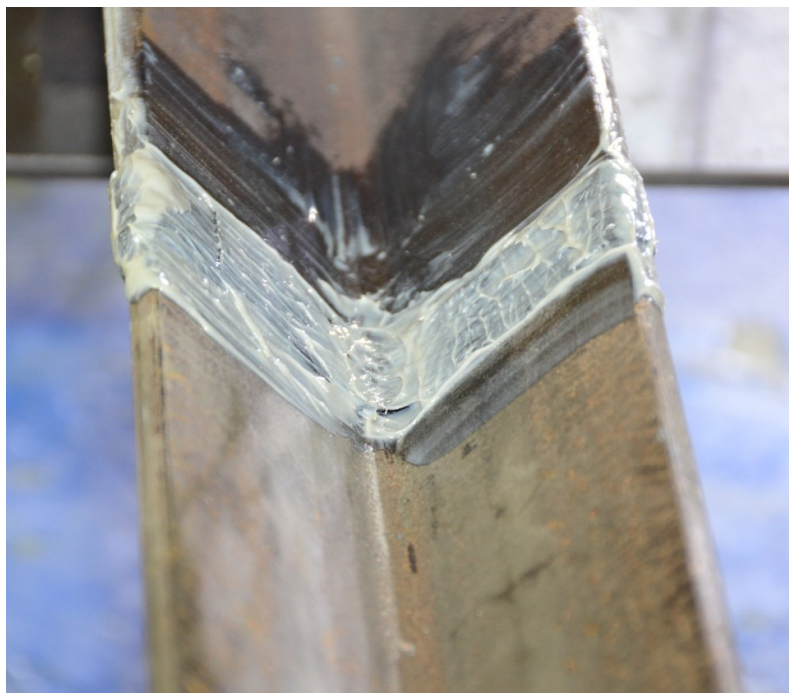


Εικόνα 2.10: Δοκίμια χάλυβα ενισχυμένα με ανθρακοελάσματα

## 2.2.3 Περίσφιξη άκρων

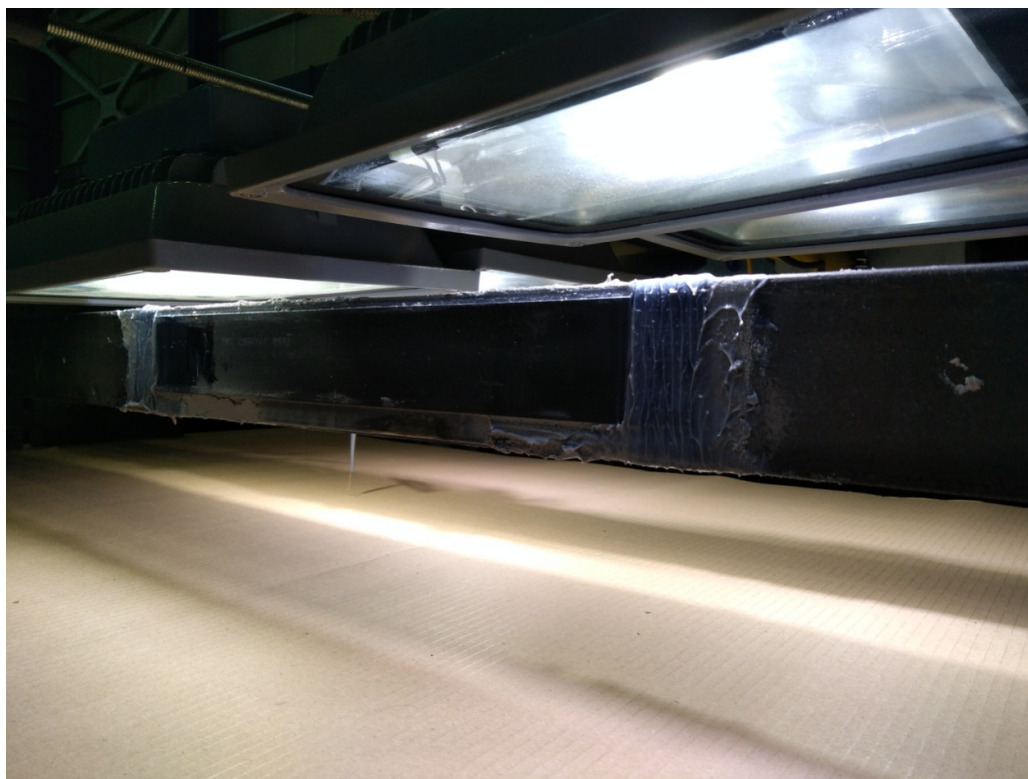
Μετά από την παραπάνω διαδικασία, ακολουθεί ένα ακόμα σημαντικό βήμα στην προετοιμασία των δοκιμίων. Στα άκρα των ελασμάτων τοποθετείται εξασφάλιση με την επικόλληση ανθρακονημάτων μίας διεύθυνσης μέσω εποξειδικής ρητίνης. Τα ανθρακονήματα αυτά τοποθετούνται ώστε να εξασφαλιστεί ότι η αστοχία του ελάσματος δεν θα προκληθεί λόγω του μήκους αγκύρωσης και να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά της ενίσχυσης.

Η ρητίνη αυτή αποτελείται επίσης από δύο συστατικά τα οποία αναμειγνύονται ώστε να προκύψει ένα ομοιόμορφο μείγμα. Μια στρώση υλικού τοποθετείται στα άκρα των ελασμάτων με την βοήθεια ενός μικρού ρολού. Στην συνέχεια ένα κομμάτι ανθρακονήματος περιβάλλει την περίμετρο όλης της διατομής και από πάνω τοποθετείται επιπλέον μια στρώση ρητίνης.



Εικόνα 2.11: Περίσφιξη ενίσχυσης με ανθρακονήματα

Τα δοκίμια αποκτούν αντοχές σε πιο υψηλές θερμοκρασίες για μερικές ώρες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και στην συνέχεια αφήνονται σε θερμοκρασία 23°C.



Εικόνα 2.12: Σκλήρυνση περίσφιξης

## 2.2.4 Τοποθέτηση Επιμηκυνσιομέτρων

Κατά τις δοκιμές κάμψης των δοκιμίων χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα λεγόμενα και ως strain gages. Τοποθετούνται κάτω από τον άξονα του φορτίου σε απόσταση 60mm από το κέντρο της χαλύβδινη δοκού και συγκολλούνται με κυανοακρυλικό υλικό ταχείας πήξης. Οι διατάξεις αυτές έχουν ως σκοπό την καταγραφή των επιμηκύνσεων. Για τον σκοπό αυτό τοποθετούνται τόσο στην επιφάνεια του χάλυβα, όσο και των CFRP με προσανατολισμό παράλληλο στην μεγάλη διάσταση του δοκιμίου.

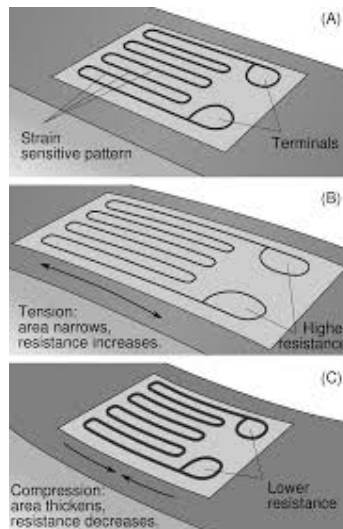


Εικόνα 2.13: Μορφή χρησιμοποιούμενου επιμηκυνσιομέτρου [7]

Η αρχή λειτουργίας του επιμηκυνσιομέτρου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Κατά τον εφελκυσμό τα στοιχεία του επιμηκυνσιομέτρου επιμηκύνονται με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης, ενώ κατά τη θλίψη η βράχυνση του προκαλεί μείωση της αντίστασης. Γενικά ο υπολογισμός της αντίστασης γίνεται από την εξίσωση:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

όπου R η αντίσταση, ρ η ηλεκτρική αντίσταση, L το μήκος του αγωγού και A η διατομή του.



Εικόνα 2.14: Αρχή λειτουργίας επιμηκυνσιομέτρου [7]



Τα επιμηκυνσιόμετρα είναι τυποποιημένα και βαθμονομημένα και δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση για τη βαθμονόμηση τους. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης συνδέεται με την παραμόρφωση μέσω τους συντελεστή του επιμηκυνσιόμετρου ( $S_g$ ). Το  $S_g$  δίνεται από τη σχέση:

$$S_g = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon_{\chi\chi} \quad (2.3)$$

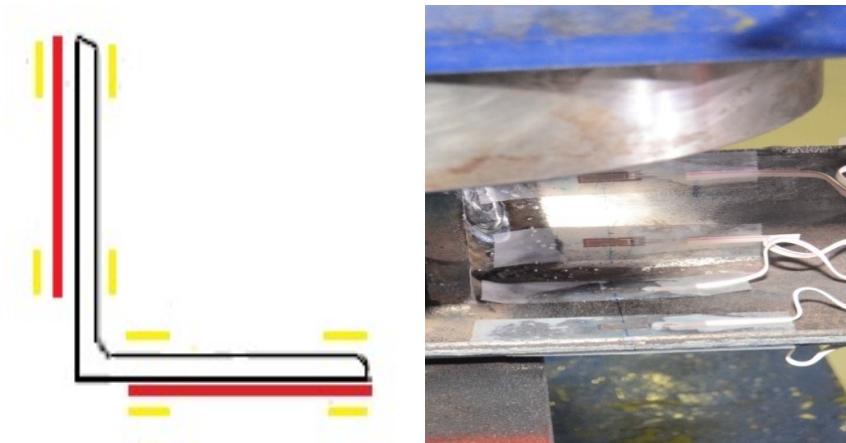
όπου  $\Delta R$  η μεταβολή της αντίστασης,  $R$  η αρχική τιμή της αντίστασης και  $\epsilon_{\chi\chi}$  η παραμόρφωση παράλληλα με τα στοιχεία του επιμηκυνσιόμετρου.

Χρησιμοποιούνται 6 αισθητήρες τύπου Kyowa και 2 Goblet με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

Πίνακας 2.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά επιμηκυνσιόμετρων

	Kyowa	Goblet
Gage length	10mm	10mm
Electrical Resistance	120±0.8Ω	120±0.5Ω
Gage factor Sg	2.09± 1.0%	2.09± 1.0%

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διατομή ενός τυπικού δοκιμίου με τις θέσεις των επιμηκυνσιόμετρων. Με κόκκινο χρώμα προσομοιώνονται τα ελάσματα CFRP και με κίτρινο τα επιμηκυνσιόμετρα.

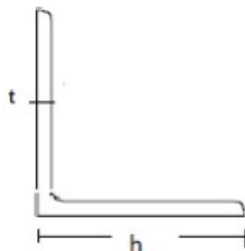


Εικόνα 2.15 Α: Σκαρίφημα θέσεις των επιμηκυνσιόμετρων Β: Πραγματική θέση επιμηκυνσιόμετρων

Η συχνότητα καταγραφής των μετρήσεων είναι 1 Hertz.

## 2.3 Πειραματική διαδικασία

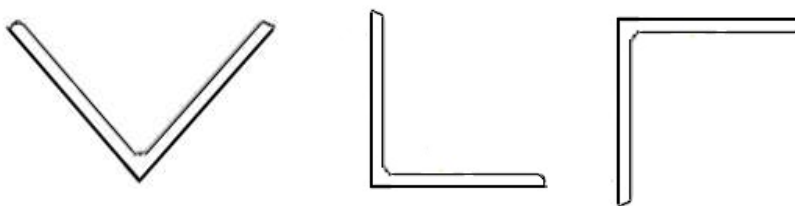
Η γεωμετρία και οι διαστάσεις των δοκιμών φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Η χαλύβδινη διατομή είναι γωνιακή με πλάτος πελμάτων 70 mm και πάχος 7 mm. Η διατομή των CFRP έχει ορθογώνιο σχήμα με διαστάσεις 50 mm x 1.2 mm και το πάχος του συνδετικού υλικού είναι 1.50 mm.



Σχήμα 2.5: Μορφή δοκιμίου

Το μήκος των χαλύβδινων δοκών είναι 1500 mm και το μήκος αγκύρωσης του κάθε ελάσματος CFRP είναι 420 mm, ενώ η διαφορά στον τρόπο φόρτισης έγκειται τόσο στον τρόπο που είναι προσανατολισμένη η διατομή (διατομές L, Γ, V) αλλά και την ύπαρξη επιπλέον ή όχι εσωτερικής ενίσχυσης (διατομή T1, T2).

Συνολικά μελετήθηκαν 4 κατηγορίες διατομών με χαρακτηριστικά που φαίνονται και στην αντίστοιχη ονομασία των δοκιμών. Κάθε δοκίμιο συμβολίζεται αρχικά με το γράμμα B που υποδηλώνει την καταπόνηση του σε κάμψη (bending). Στην συνέχεια ακολουθεί ο συμβολισμός T1 ή T2. Στην πρώτη περίπτωση το δοκίμιο είναι ενισχυμένο μόνο στην εξωτερική πλευρά της διατομής με ανθρακοελάσματα, ενώ στην δεύτερη είναι εξωτερικά και εσωτερικά. Τέλος ακολουθεί ένα γράμμα το οποίο υποδηλώνει τον προσανατολισμό των διατομών. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι διατομές τύπου V, L και LI αντίστοιχα.



Σχήμα 2.6: A: διατομή V, B: διατομή L, Γ: διατομή LI

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν είναι τα ακόλουθα:

B-T1-L

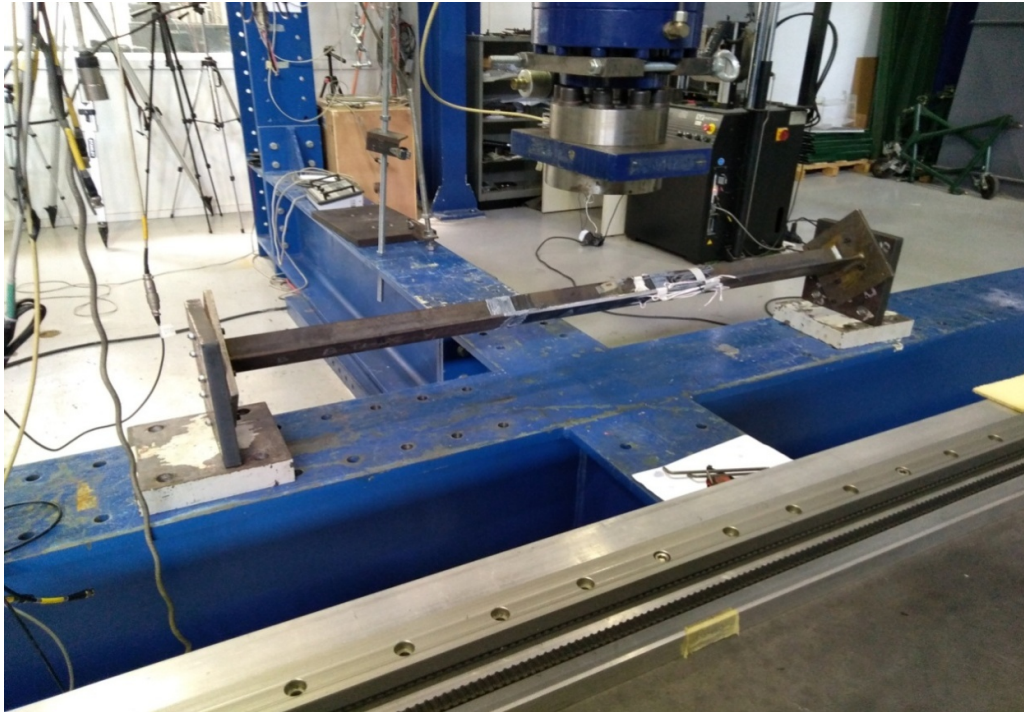
B-T1-LI

B-T1-V

B-T2-V

Καθώς και το B-T2-V2 το οποίο όπως θα αναλυθεί και παρακάτω πραγματοποιήθηκε, διότι υπήρξε αστοχία κατά την εκπόνηση του πειράματος B-T2-V.

### 2.3.1 Πειραματική διάταξη (set up)



Εικόνα 2.15: Πειραματική διάταξη δοκιμίου

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η διάταξη του δοκιμίου στην μηχανή φόρτισης. Το δοκίμιο τοποθετείται σε ευθυγραμμισμένη επιφάνεια κάτω από την μηχανή φόρτισης. Η φόρτιση πραγματοποιείται με ένα υδραυλικό έμβολο. Το έμβολο αυτό ασκεί πίεση σε διάταξη η οποία τοποθετείται στο δοκίμιο και φαίνεται παρακάτω, μέχρι να επιτευχθεί το προκαθορισμένο βέλος των 150 mm στο κέντρο του δοκιμίου. Σε κάθε δοκίμιο χρησιμοποιείται μια τέτοια διάταξη, ώστε το φορτίο να επιβάλλεται στο κέντρο βάρους της διατομής. Το δοκίμιο B-T1-L ήταν το μόνο που έχει συγκολλημένα 2 stiffeners στο κέντρο του, εσωτερικά του πέλματος που προεξέχουν, γι αυτό η φόρτιση εφαρμόζεται απευθείας πάνω σε αυτά.



Εικόνα 2.16: Έμβολο εφαρμογής δύναμης



Εικόνα 2.17: Διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την άσκηση φορτίου στα εξεταζόμενα δοκίμια B-T1-V, B-T2-V/B-T2-V2 και B-T1-LI αντίστοιχα.



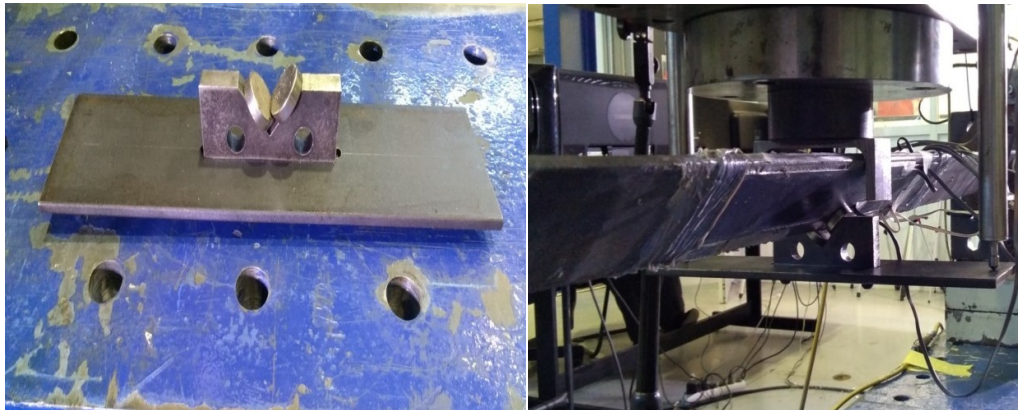
Εικόνα 2.18: Διάταξη επιβολής φόρτισης στο δοκίμιο B-T1-L

Στις άκρες των δοκιμίων υπάρχουν συγκολλημένες μεταλλικές πλάκες, οι οποίες ενώνονται με μεγαλύτερων διαστάσεων πλάκες μέσω κοχλιών προκειμένου κατά την εκτέλεση του πειράματος να επιτευχθεί το επιθυμητό βέλος αλλά και οι συνθήκες στήριξης να προσομοιάζουν αρθρώσεις για τα δοκίμια μορφής V.



Εικόνα 2.19: Οριακές συνθήκες δοκιμίου

Στο κάτω μέρος του δοκιμίου τοποθετείται η ακόλουθη βοηθητική διάταξη. Πάνω σε αυτή τοποθετούνται 2 γραμμικοί αισθητήρες μετατόπισης θέσης (LVDT) προκειμένου να καταγράφεται το βέλος του δοκιμίου.



Εικόνα 2.20: Βοηθητική διάταξη τοποθέτησης LVDT

Στα ακραία τμήματα των δοκιμίων τοποθετούνται ακόμα περιστροφικοί μετασχηματιστές, πάνω σε βοηθητική διάταξη, διότι μ' αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα περιέχουν μικρότερες αβεβαιότητες με βάση παρατηρήσεις. Ακόμα τοποθετούνται 2 οριζόντιοι γραμμικοί αισθητήρες μετατόπισης θέσης (LVDT) προκειμένου να διαπιστωθεί στροφή σ' αυτή τη διεύθυνση. Αν θεωρηθεί ότι κατά μήκος της δοκού είναι ο άξονας  $x$  και κάθετα στο κατακόρυφο επίπεδο που περνάει από αυτόν είναι ο άξονας  $y$  τότε στο οριζόντιο είναι ο άξονας  $z$ . Οπότε ο περιστροφικός μετασχηματιστής μετράει την στροφή γύρω από τον  $y$  και οι γραμμικοί την στροφή γύρω από τον  $z$ .

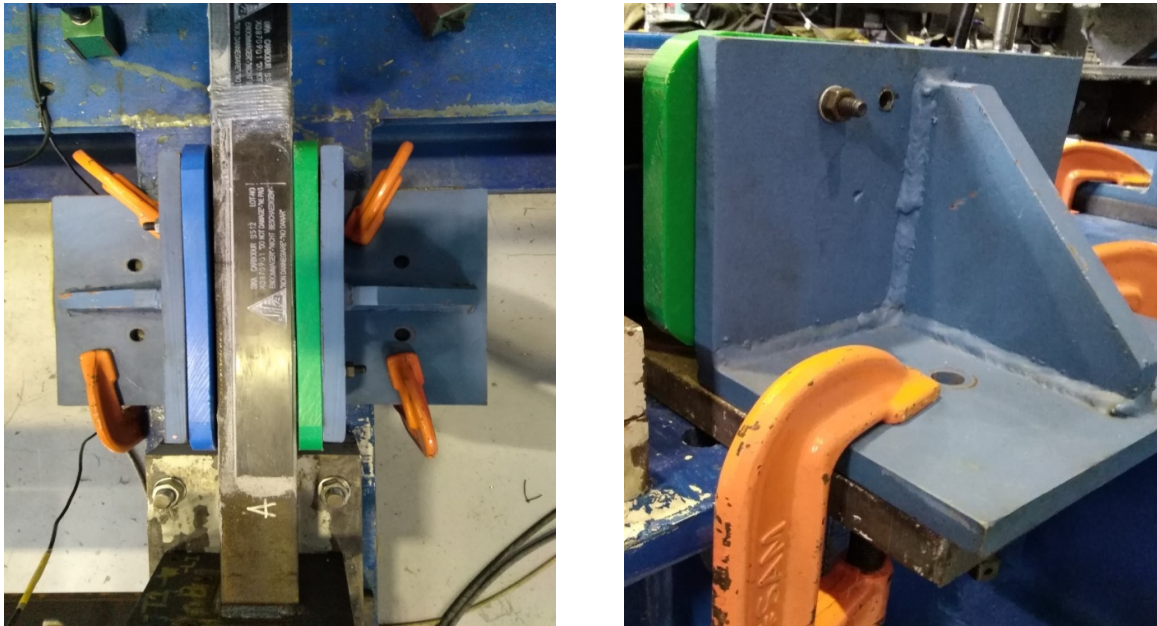


Εικόνα 2.21 Α: Διάταξη στην οποία τοποθετείται ο περιστροφικός μετασχηματιστής  
Β: Περιστροφικός μετασχηματιστής  
Γ: Οριζόντιοι γραμμικοί αισθητήρες

Τα δοκίμια Β-Τ1-Λ και Β-Τ1-ΛΙ φορτίζονται επίσης στο κέντρο βάρους. Λόγω της μορφής τους είναι πιθανή η αστοχία λόγω λυγισμού στην εκτός επιπέδου διεύθυνση, για τον σκοπό αυτό τοποθετούνται πλευρικές εξασφαλίσεις. Οι πλευρικές εξασφαλίσεις αυτές τοποθετούνται και στις δύο πλευρές του δοκιμίου, σε δύο σημεία κατά μήκος της δοκού σε αποστάσεις 185 mm από τα άκρα.



Εικόνα 2.22: Δοκίμιο με πλευρικές εξασφαλίσεις



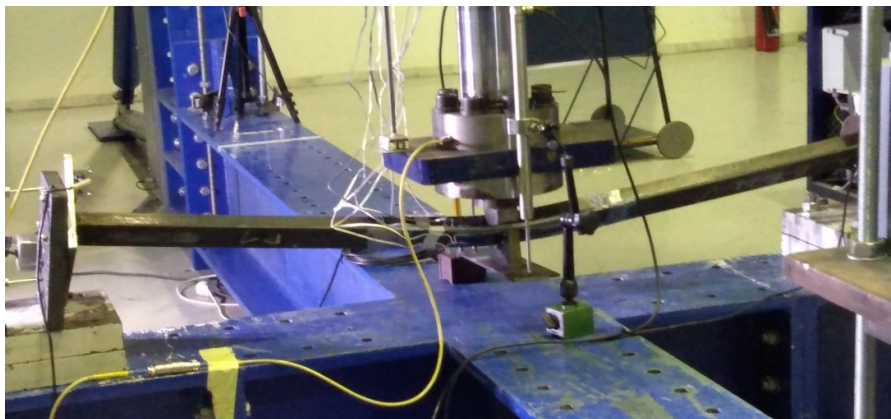
Εικόνα 2.23 Α: Κάτοψη πλευρικών εξασφαλίσεων Β: Πλευρική εξασφάλιση

### 2.3.2 Πειραματική διαδικασία

Τα δοκίμια καταπονούνται σε κάμψη 3 σημείων. Η ταχύτητα επιβολής φόρτισης στο κέντρο του δοκιμίου γίνεται με ταχύτητα 1 mm/min, μέχρι να επιτευχθεί βέλος 150 mm και η συχνότητα μετρήσεων 1 Hz. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος για όλες τις δοκιμές είναι σταθερή στους 23°C.

Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η συμπεριφορά του κάθε δοκιμίου.

- Δοκίμιο Β-T1-V



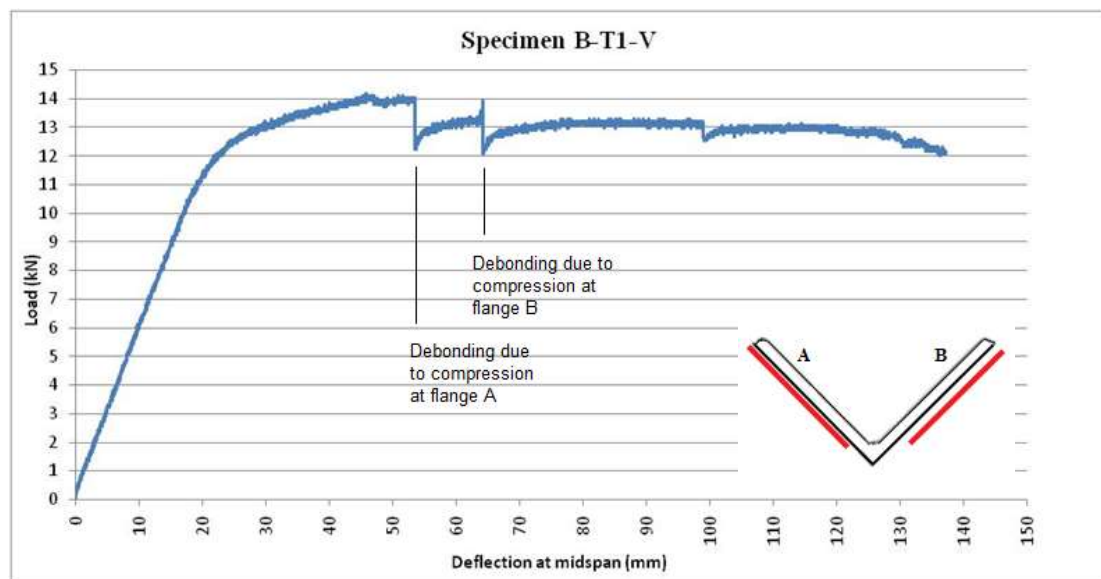
Εικόνα 2.24: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου





Εικόνα 2.25: Α: Αποκόλληση CFRP Β: Αστοχία ινών CFRP

Το δοκίμιο ξεκινάει να αναλαμβάνει φορτίο. Όσο η διαδικασία προχωράει ακούγονται μικροί κρότοι, οι οποίοι οφείλονται στη δημιουργία μικρορωγμών πάνω στο CFRP. Σε κάποιο σημείο της φόρτισης, το πάνω μέρος του ελάσματος CFRP αποκολλάται από την επιφάνεια του χάλυβα στο πέλαμα Α. Το κάτω μέρος παραμένει συνδεδεμένο, οπότε εξαιτίας της διαφορετικής συμπεριφοράς του πάνω και κάτω μέρους το έλασμα σπάει περίπου στο μισό του πλάτους σε όλο το μήκος. Η διαδικασία συνεχίζεται και μετά από λίγο παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά και στο πέλαμα Β. Έπειτα συνεχίζουν να ακούγονται μικροί κρότοι τόσο εξαιτίας καινούργιων ψαθυρών ρωγμών που δημιουργούνται, αλλά εξαιτίας και σταδιακού σπασίματος των ινών του ελάσματος. Τελικά όλες οι ίνες του κάτω μέρους έχουν αστοχήσει και η εικόνα του δοκιμίου είναι αυτή που φαίνεται στην παραπάνω δεξιά εικόνα.



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T1-V

- Δοκίμιο B-T2-V

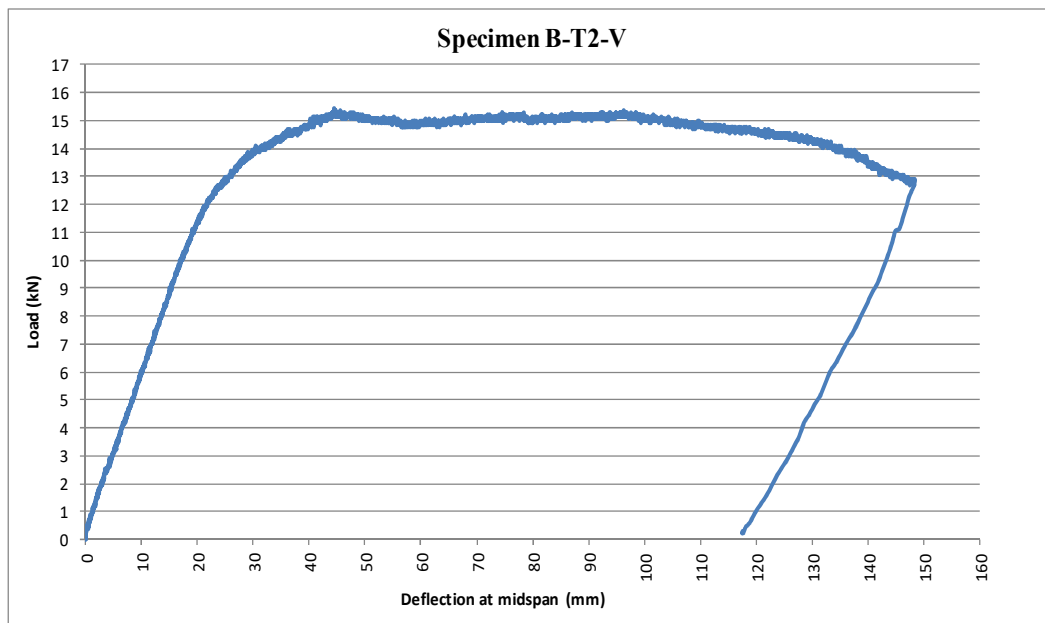


Εικόνα 2.26: Μπροστά φαίνεται το δοκίμιο B-T2-V και πίσω το δοκίμιο B-T1-V

Στο δοκίμιο B-T2-V η ενίσχυση με ανθρακοελάσματα είναι τόσο εσωτερική, όσο και εξωτερική. Το δοκίμιο ξεκινάει να φορτίζεται και η παραμορφωμένη εικόνα του αντιπροσωπεύει κάμψη 3 σημείων. Όσο η φόρτιση συνεχίζεται παρατηρείται ότι η μορφή του αλλάζει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ανακουφίζεται το έλασμα του CFRP και να παίρνει μεγαλύτερη ένταση ο χάλυβας. Τελικά παρατηρούνται τοπικές αστοχίες στα άκρα του ανθρακοελάσματος, μέσα από την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στον χάλυβα. Η τελική μορφή του χάλυβα παραπέμπει σε κάμψη 4 σημείων.



Εικόνα 2.27: Πλαστική άρθρωση



Σχήμα 2.8: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T2-V

- Δοκίμιο B-T2-V2

Το δοκίμιο B-T2-V δεν παρουσιάζει την αναμενόμενη συμπεριφορά. Επομένως το πείραμα επαναλαμβάνεται. Αυτή την φορά για να μην υπάρξουν τα ίδια αποτελέσματα, τοποθετούνται επιπλέον ελάσματα CFRP δίπλα από το κεντρικό τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά στα πέλματα του δοκιμίου. Τα ελάσματα αυτά δεν επηρεάζουν την αντοχή του δοκιμίου, αλλά βοηθούν να μην διαρρεύσει ο χάλυβας σε κάποιο σημείο.

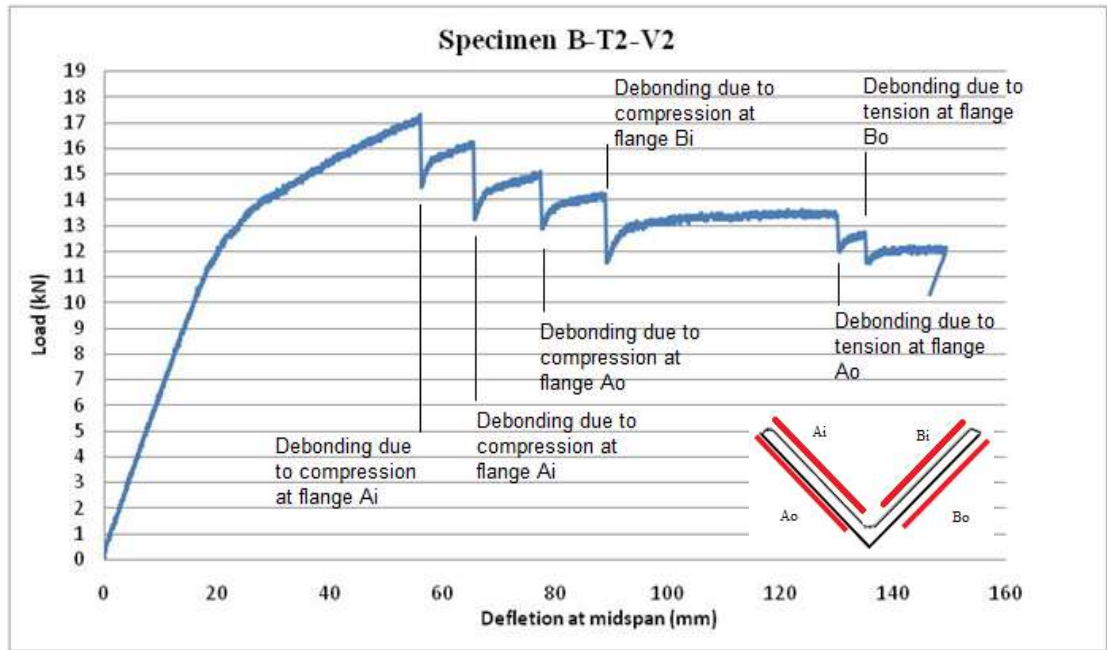


Εικόνα 2.28: Επιπλέον τμήματα ενίσχυσης εσωτερικά και εξωτερικά

Όπως και στο δοκίμιο B-T1-V η πρώτη αστοχία είναι η αποκόλληση του ανθρακοελάσματος που οδηγεί σε θραύση του περίπου στο κέντρο. Αυτό συμβαίνει αρχικά στην πλευρά Βι. Έπειτα συμβαίνει το ίδιο στο αντικριστό εσωτερικό έλασμα στην πλευρά Αι και αργότερα διαδοχικά στα εξωτερικά Αο και Βο αντίστοιχα.



Εικόνα 2.29: Τελική μορφή δοκιμίου B-T2-V2



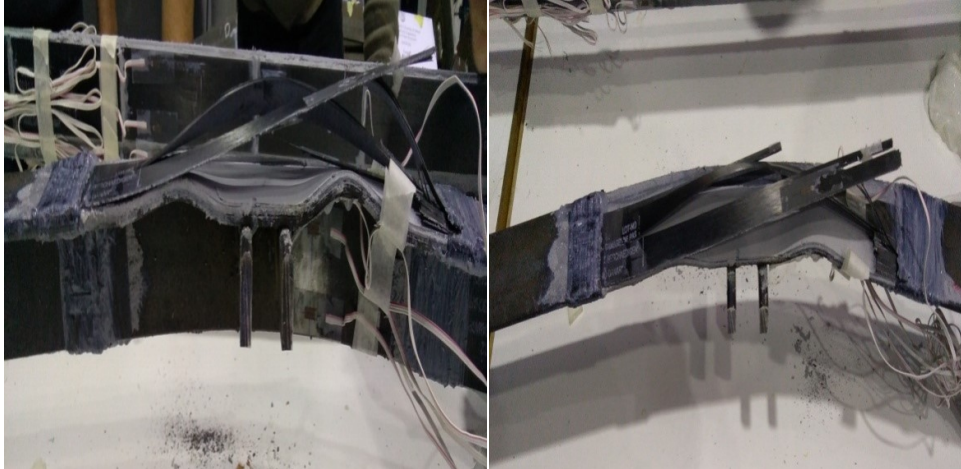
Σχήμα 2.9: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T2-V2

- Δοκίμιο B-T1-L

Η αστοχία γίνεται στο πλάγιο πέλμα Α. Εκεί αρχικά παρατηρείται μια οριζόντια γραμμή θραύσης και έπειτα από δυνατό κρότο το CFRP σπάει κοντά στην περίσφιξη. Εξαιτίας της παραμόρφωσης του πέλματος το έλασμα αποκολλάται πλήρως. Το ανθρακοέλασμα στο κάτω μέρος του δοκιμίου, το οποίο βρίσκεται σε καθαρό εφελκυσμό, δεν παρουσιάζει αποκόλληση παρά μόνο μια οριζόντια ρωγμή, η οποία όμως δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την συνολική συμπεριφορά του.



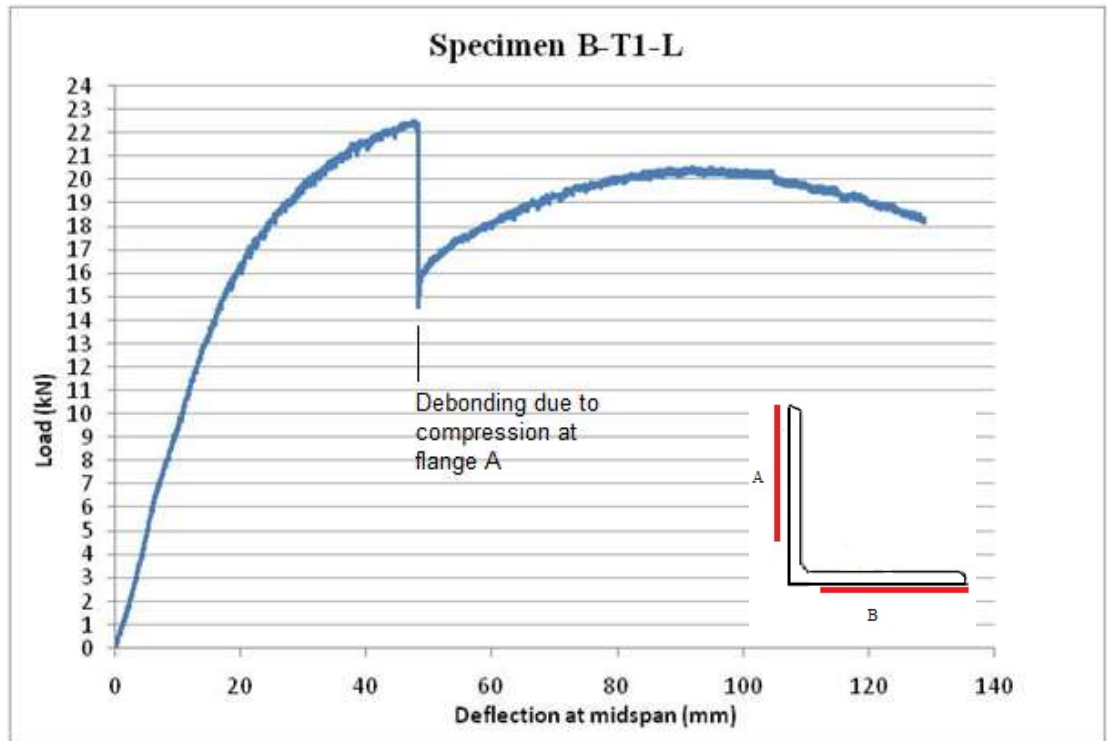
Εικόνα 2.30: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου B-T1-L



Εικόνα 2.31: Παραμορφωμένη εικόνα πλάγιου πέλματος



Εικόνα 2.32: Αστοχία πλάγιου και κάτω πέλματος δοκιμίου



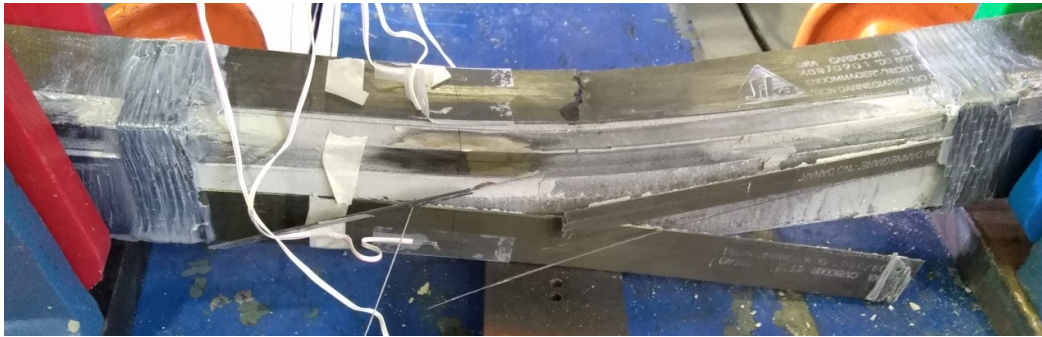
Σχήμα 2.10: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T1-L

- Δοκίμιο B-T1-LI

Το δοκίμιο ξεκινάει να φορτίζεται και η πρώτη αστοχία συμβαίνει στο κατακόρυφο πέλμα. Το ανθρακοέλασμα σε αυτή την πλευρά αποκολλάται στο κάτω μέρος, με αποτέλεσμα την θραύση του καθώς και την καταστροφή της περίσφιξης στο δεξιό άκρο όπως φαίνεται στην εικόνα 2.34. Η παραμόρφωση συνεχίζεται μέχρι που το εναπομείναν τμήμα του ελάσματος αποκολλάται και αυτό. Τελικά σπάει στην μέση. Το έλασμα στο οριζόντιο πέλμα βρίσκεται σε έντονη θλίψη και επειδή δεν έχει την δυνατότητα κατά μήκος παραμόρφωσης, δημιουργείται μια ρωγμή ακριβώς στο κέντρο και κατά μήκος όλου του πλάτους.



Εικόνα 2.33: Γενική παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου



Εικόνα 2.34: Τοπική αστοχία στο κέντρο του δοκμίου

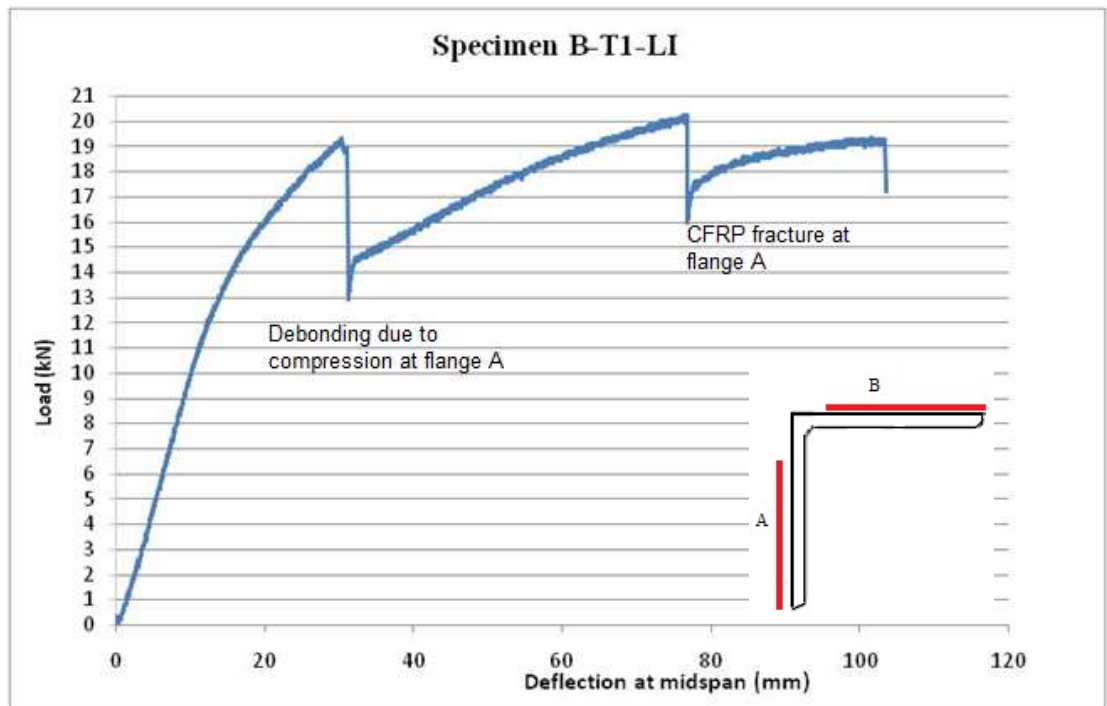


Εικόνα 2.35: Αστοχία περίσφιξης



Εικόνα 2.36: Α: Αστοχία πλάγιου πέλματος Β: Αστοχία πάνω πέλματος



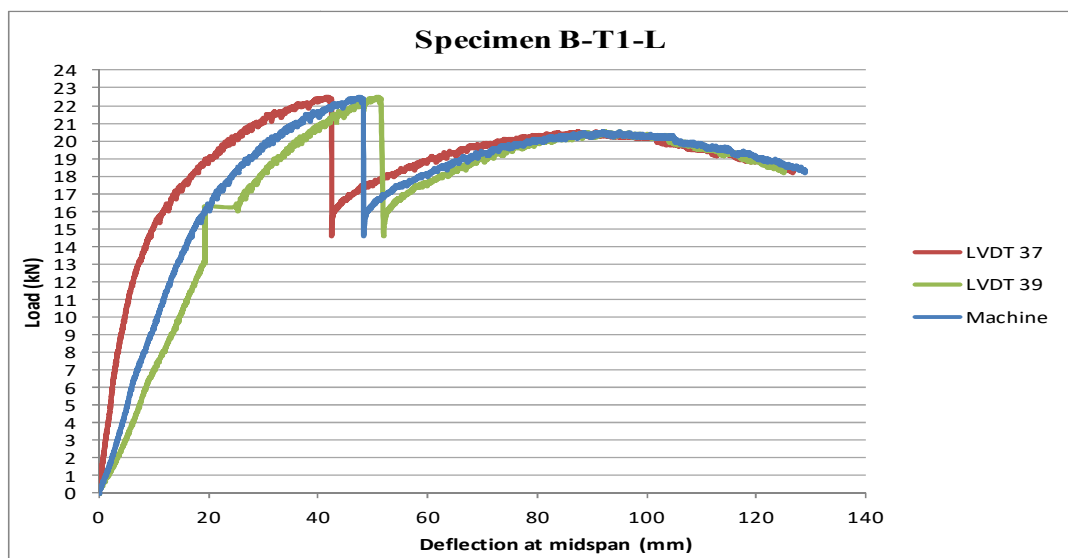


Σχήμα 2.11: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T1-LI

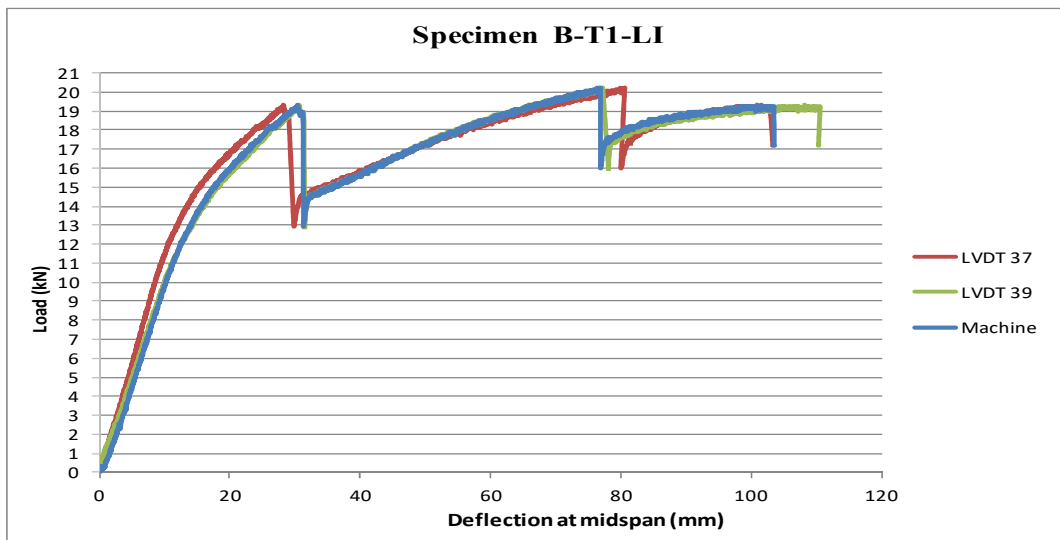
### 2.3.3 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας - Συμπεράσματα

#### 2.3.3.1 Διαγράμματα φορτίου-βέλους κάμψης από τα LVDT

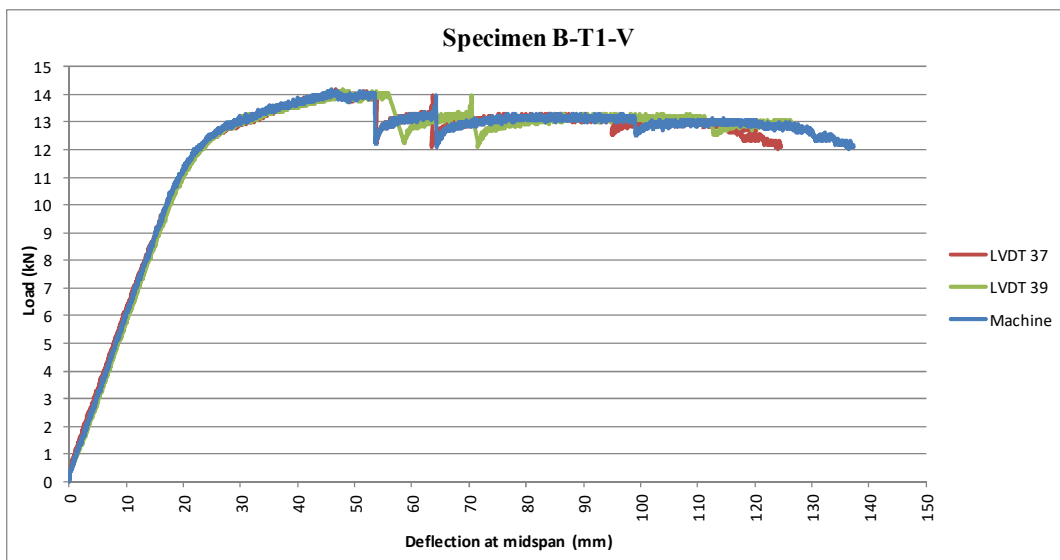
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα διαγράμματα κατακόρυφου φορτίου- βέλους όπως προέκυψαν από τις καταγραφές της μηχανής φόρτισης καθώς και των γραμμικών αισθητήρων μετατόπισης θέσης (LVDT), που είχαν τοποθετηθεί πρόσθετα πάνω στα δοκίμια.



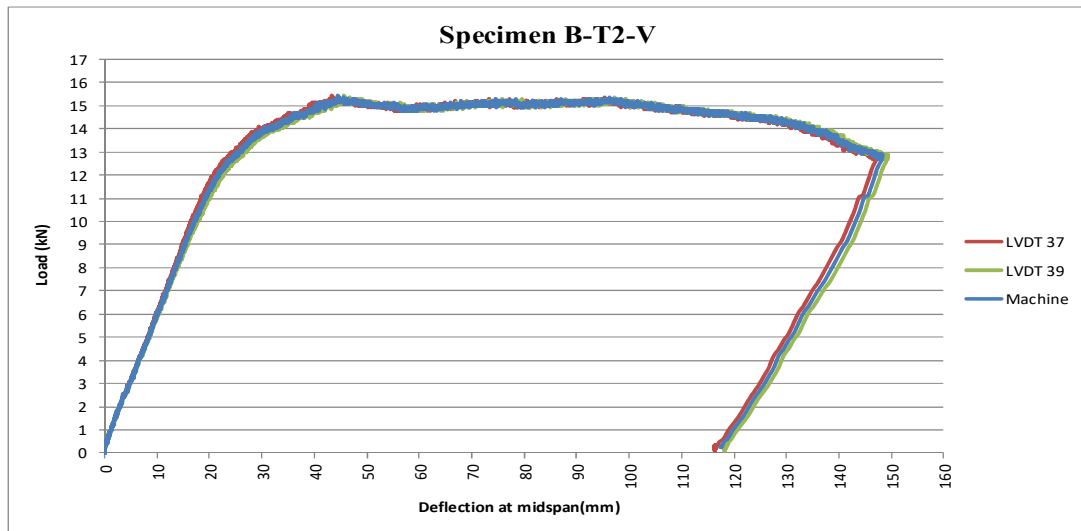
Σχήμα 2.12: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T1-L από μετρήσεις του πειράματος.



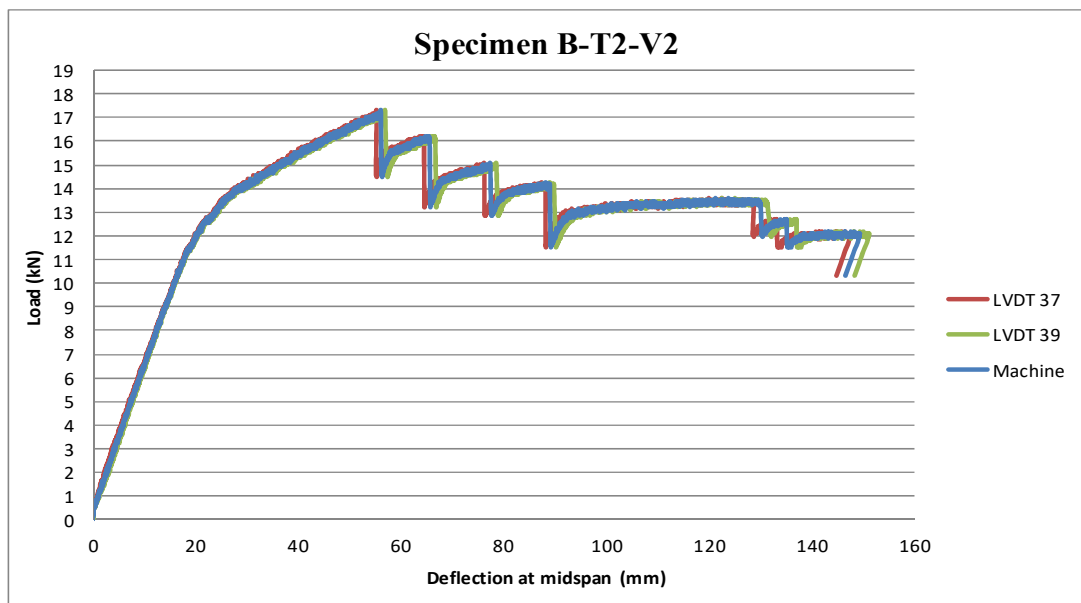
Σχήμα 2.13: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T1-LI από μετρήσεις του πειράματος.



Σχήμα 2.14: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T1-V από μετρήσεις του πειράματος.



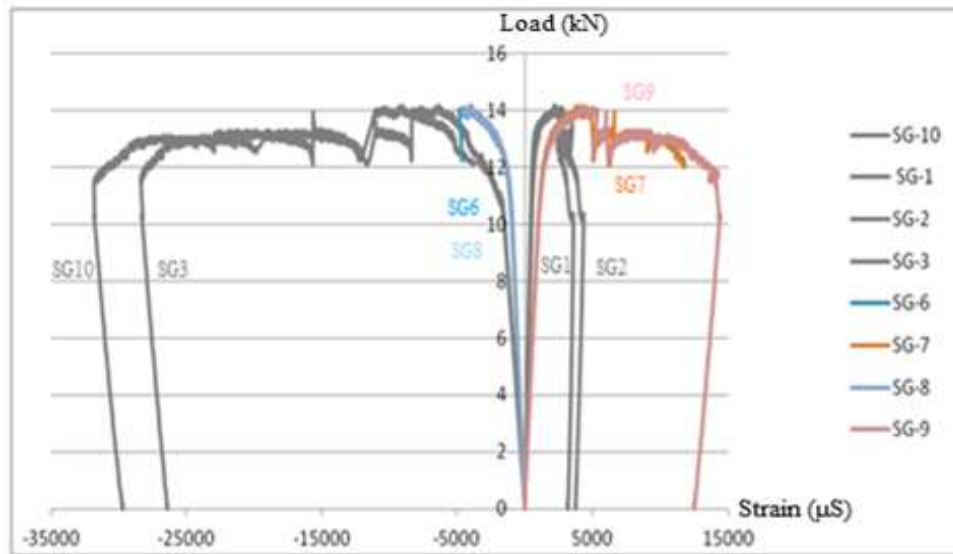
Σχήμα 2.15: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T2-V από μετρήσεις του πειράματος.



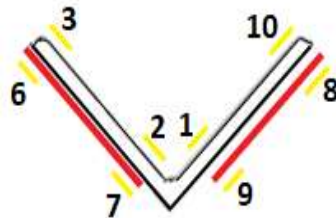
Σχήμα 2.16: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης δοκιμίου B-T2-V2 από μετρήσεις του πειράματος.

Στα δοκίμια B-T1-V, B-T2-V και B-T2-V2 όλες οι μετρήσεις ταυτίζονται σε όλα τα σημεία εκτός των τοπικών αστοχιών. Αντίθετα για τα δοκίμια B-T1-L και B-T1-LI και κυρίως στο πρώτο υπάρχει μια αισθητή διαφορά στις μετρήσεις των βελών, ήδη από την γραμμική περιοχή. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα καθώς και τις παραμορφωμένες εικόνες των δοκιμίων διαπιστώνεται ότι υπάρχει στροφή των διατομών κατά την φόρτιση.

### 2.3.3.2 Διαγράμματα φορτίου-επιμήκνσης από τα Επιμηκνσιόμετρα



Σχήμα 2.17: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκνσης δοκιμίου B-T1-V για κάθε Επιμηκνσιόμετρο μέχρι την αποφόρτιση

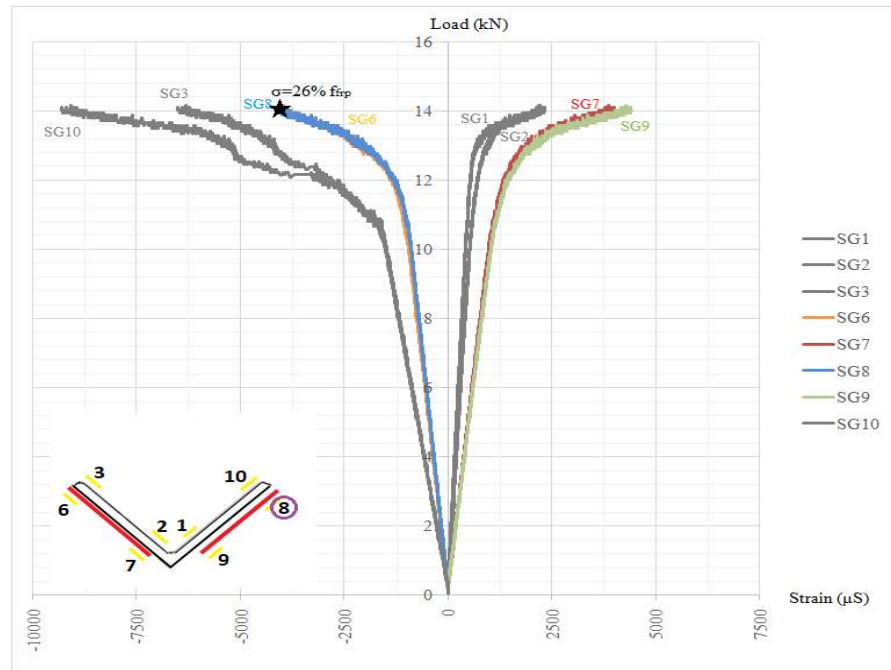


Σχήμα 2.18: Θέσεις επιμηκνσιομέτρων δοκιμίου B-T1-V

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η γενική μορφή που έχουν τα διαγράμματα φορτίου-επιμήκνσης όπως προκύπτουν για το κάθε επιμηκνσιόμετρο μέχρι την στιγμή της αποφόρτισης. Με γκρι χρώμα παρουσιάζονται αυτά που είναι τοποθετημένα πάνω στον χάλυβα ( SG1, SG2, SG3 και SG10) και με τα υπόλοιπα χρώματα αυτά που είναι πάνω στο CFRP ( SG6, SG7, SG8 και SG9) όπως φαίνεται και στην εικόνα.

Το σχήμα αυτό δίνεται για τυπικούς λόγους και προκειμένου να είναι γνωστή όλη η συμπεριφορά των παραμορφώσεων μέχρι την αποφόρτιση. Στην συνέχεια δίνονται τα ίδια διαγράμματα μέχρι την στιγμή της πρώτης αστοχίας.

Η πρώτη αστοχία συμβαίνει στην θέση, όπου κυκλώνεται το αντίστοιχο επιμηκνσιόμετρο. Ακόμα στα σχήματα σημειώνεται το ποσοστό της μέγιστης τάσης του CFRP εκείνη την στιγμή.

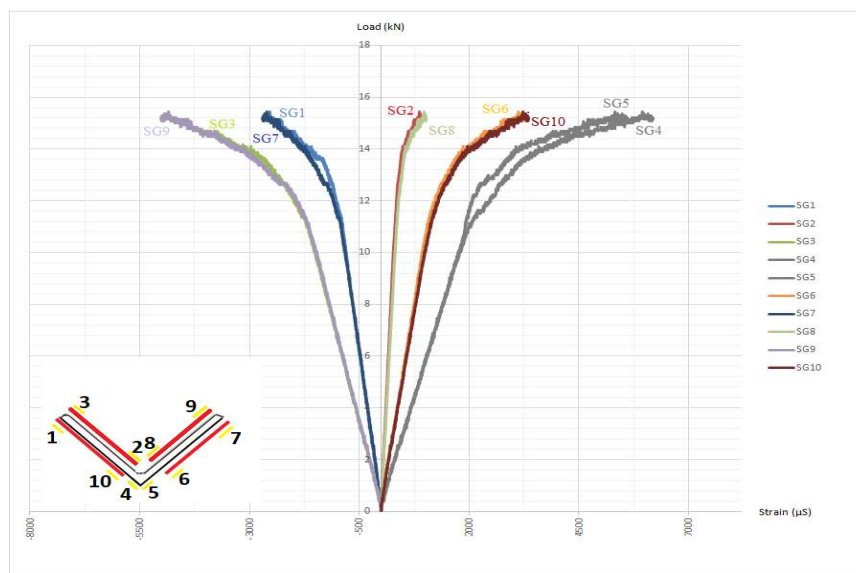


Σχήμα 2.19: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκνσης δοκιμίου B-T1-V για κάθε Επιμηκνσιόμετρο μέχρι την 1<sup>η</sup> αστοχία

Παρατηρείται ότι τα επιμηκνσιόμετρα 6, 3, 10 και 8 βρίσκονται σε θλίψη, ενώ τα υπόλοιπα σε εφελκυσμό. Αυτό λοιπόν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θέση του κάθε σημείου σε σχέση με το κέντρο βάρους έχει σημασία για τον τρόπο συμπεριφοράς του.

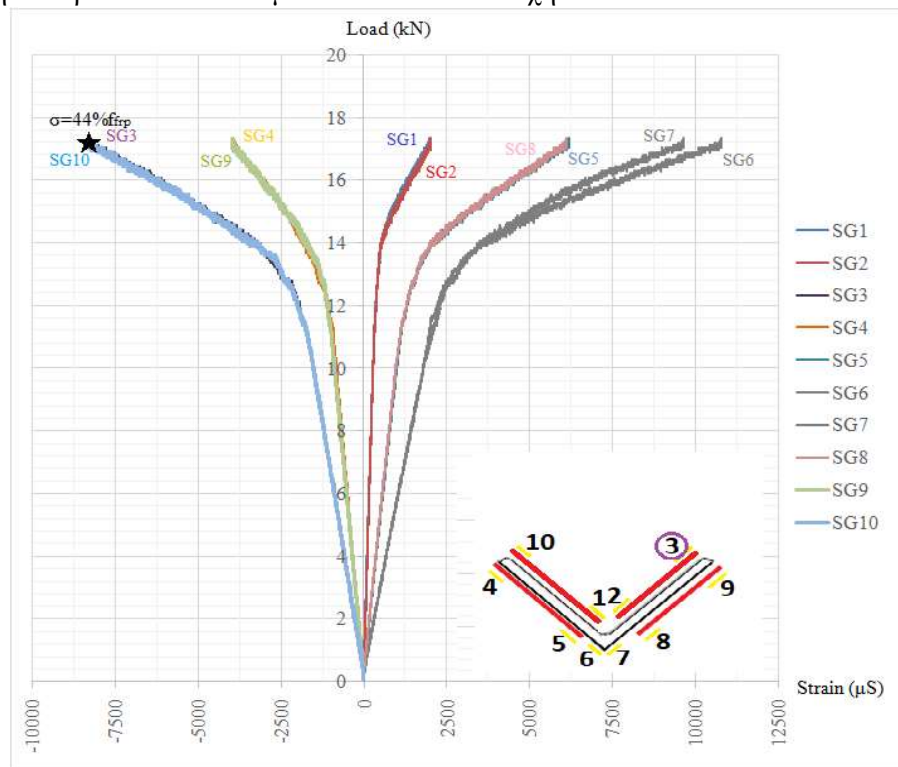
Ακόμα παρατηρείται ότι τα ακόλουθα ζεύγη επιμηκνσιομέτρων SG10,SG3 / SG6,SG8 / SG1,SG2 και SG7,SG9 έχουν ίδια και αντίθετου μεγέθους επιμήκνση. Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα, ότι η επιμήκνση είναι ανάλογη της απόστασης από το κέντρο βάρους της ισοδύναμης διατομής.

Στην συνέχεια δίνονται τα παραπάνω διαγράμματα για τα υπόλοιπα δοκίμια. Οι ίδιες διαπιστώσεις προκύπτουν γι' όλα τα δοκίμια.

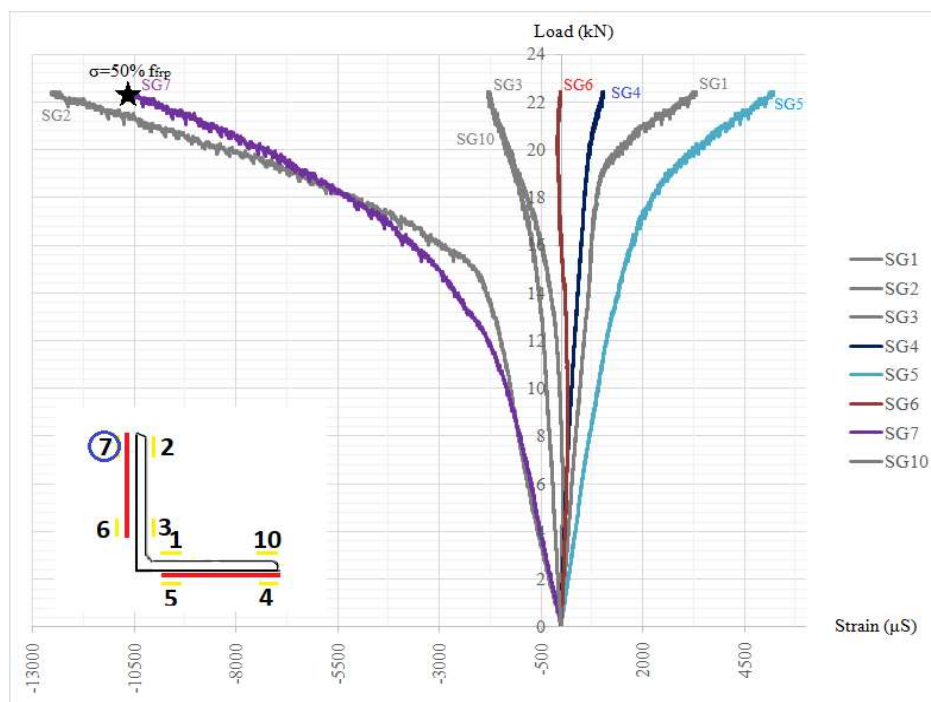


Σχήμα 2.20: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκνσης δοκιμίου B-T2-V για κάθε Επιμηκνσιόμετρο μέχρι την 1<sup>η</sup> αστοχία

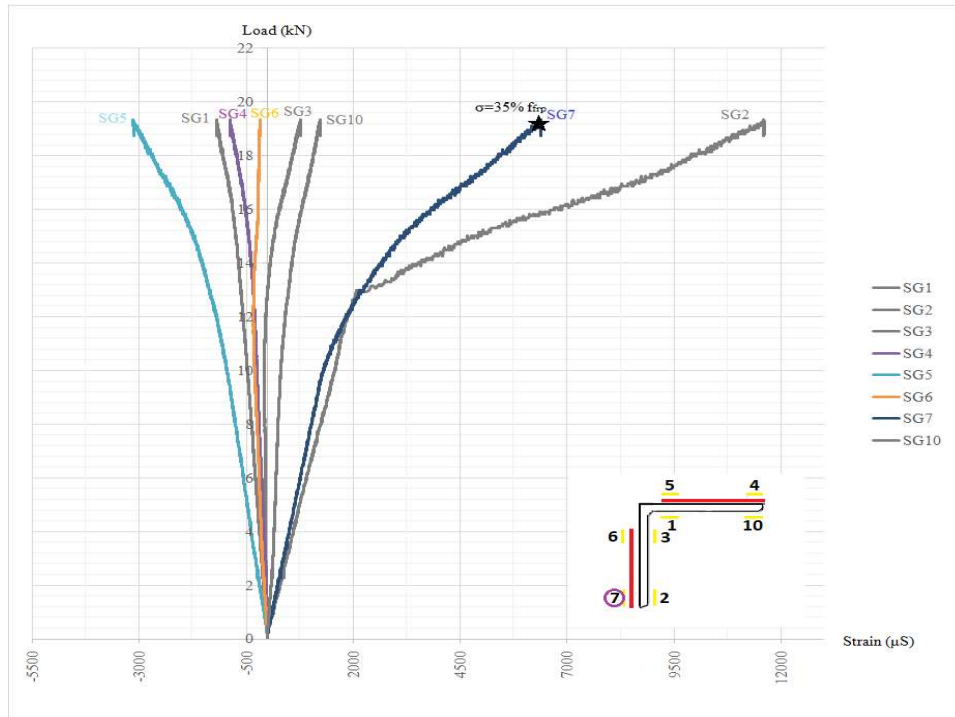
Στο δοκίμιο B-T2-V δεν απεικονίζεται κάποιο σημείο αστοχίας, διότι όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα ελάσματα CFRP δεν αστόχησαν.



Σχήμα 2.21: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης δοκιμίου B-T2-V2 για κάθε Επιμηκνσιόμετρο μέχρι την 1<sup>η</sup> αστοχία



Σχήμα 2.22: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης δοκιμίου B-T1-L για κάθε Επιμηκνσιόμετρο μέχρι την 1<sup>η</sup> αστοχία

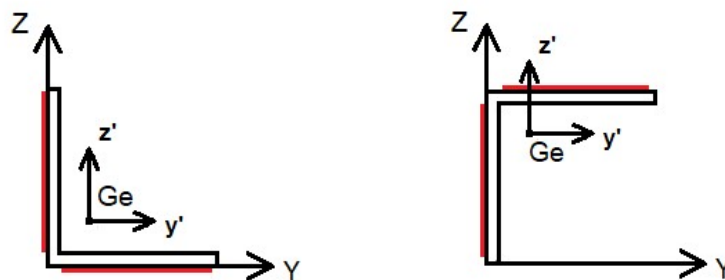


Σχήμα 2.23: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκνσης δοκιμίου B-T1-LI για κάθε Επιμηκνσιόμετρο μέχρι την 1<sup>η</sup> αστοχία

## 2.4 Αναλυτικοί υπολογισμοί

### 2.4.1 Υπολογισμός γεωμετρικών και αδρανειακών χαρακτηριστικών

Στο παρόν κεφάλαιο καθώς και στα παραρτήματα Β και Γ χρησιμοποιούνται οι τύποι του κ. Βάγια (2019) για γωνιακά χαλύβδινα δοκίμια ενισχυμένα με ελάσματα. Με βάση το σύστημα συντεταγμένων y-z υπολογίζονται για τις διατομές B-T1-L και B-T1-LI τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά των διατομών.



Σχήμα 2.24: Αριστερά: Διατομή δοκιμίου B-T1-L Δεξιά: Διατομή δοκιμίου B-T1-LI

- Εμβαδό διατομής  
 Εμβαδό διατομής χάλυβα:  $A_s = 931 \text{ mm}^2$   
 Εμβαδό διατομής FRP:  $A_f = 2 \cdot b_f \cdot t_f = 120 \text{ mm}^2$   
 Εμβαδό ισοδύναμης διατομής:  $A_i = A_s + A_f/n$ , όπου  $n = E_s/E_f = 1.24$

- Θέση κέντρου βάρους  
 Διατομή χάλυβα:  $y_s = 20.08 \text{ mm}$   
 FRP 1:  $y_{f1} = z_{f2} = 55 \text{ mm}$   
 FRP 2:  $y_{f2} = z_{f1} = -0.6 \text{ mm}$   
 Ισοδύναμη διατομή:

$$y_{Gi} = \frac{A_s \cdot y_s + \frac{A_f}{2 \cdot n} \cdot (y_{f1} + y_{f2})}{A_i}, \quad z_{Gi} = y_{Gi} \quad (2.4)$$

- Ροπή αδράνειας  
 Διατομή χάλυβα:  $I_{ys} = 432191 \text{ mm}^4$   
 Ισοδύναμη διατομή:

$$I_{yi} = I_{ys} + A_s \cdot (z_{Gi} - z_s)^2 + \frac{A_f}{2 \cdot n} \cdot (z_{Gi} - z_{f1})^2 + \frac{A_f}{2 \cdot n} \cdot (z_{Gi} - z_{f2})^2 \quad (2.5)$$

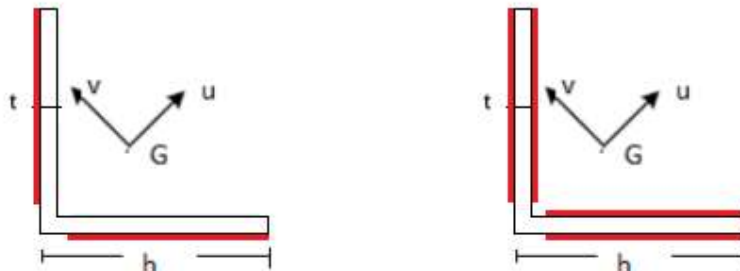
$$I_{zi} = I_{yi} \quad (2.6)$$

Κατά τον υπολογισμό της ροπής αδρανείας για τα ελάσματα του FRP λαμβάνονται υπόψη μόνο οι όροι Steiner.

Πίνακας 2.4: Γεωμετρικά & αδρανειακά χαρακτηριστικά

	B-T1-L	B-T1-LI
$A_i(\text{mm}^2)$	1028.1	1028.1
$z_{Gi}(\text{mm})$	20.3	49.7
$I_{yi}(\text{mm}^4)$	483085	483085

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα ίδια στοιχεία για τα δοκίμια B-T1-V, B-T2-V και B-T2-V2, με την διαφορά ότι αλλάζει το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 2.43: Κύριοι άξονες συντεταγμένων v-u

- Εμβαδό διατομής  
 Εμβαδό διατομής χάλυβα:  $A_s = 931 \text{ mm}^2$   
 Εμβαδό διατομής FRP:  $A_f = 2 \cdot b_f \cdot t_f = 120 \text{ mm}^2$



Εμβαδό ισοδύναμης διατομής:  $A_i = A_s + A_f/n$ , όπου  $n = E_s/E_f = 1.24$

- Θέση κέντρου βάρους  
 $h' = h-t/2$   
FRP  $u_{Gf} = h'/\sqrt{2}$

Ισοδύναμη διατομή:

$$u_{Gi} = \frac{A_s \cdot u_{Gs} + \frac{A_f}{n} \cdot u_{Gf}}{A_i} \quad (2.7)$$

- Ροπή αδράνειας  
Διατομή χάλυβα:  
 $I_{us} = A_s \cdot h'^2/6 = 686186 \text{ mm}^4$   
 $I_{vs} = I_{us}/4 = 171546 \text{ mm}^4$   
Ισοδύναμη διατομή:

$$I_{vi} = I_{vs} + A_s \cdot (u_{Gi} - u_{Gs})^2 + \frac{A_f}{n} \cdot (u_{Gi} - u_{Gf})^2 \quad (2.8)$$

$$I_{ui} = I_{us} + \frac{h^3 - (h-b)^3}{3n} t \quad (2.9)$$

Όλοι οι παραπάνω τύποι ισχύουν για το δοκίμιο B-T1-V. Για τα δοκίμια B-T2-V και B-T2-V2 τροποποιείται το εμβαδό της διατομής των ελασμάτων  $A_f = 4 \cdot b_f \cdot t_f$ .

Πίνακας 2.5: Γεωμετρικά & αδρανειακά χαρακτηριστικά

	B-T1-V	B-T2-V	B-T2-V2
$A_i(\text{mm}^2)$	1028.1	1125.3	1125.3
$u_{Gi}(\text{mm})$	45.6	45.6	44.4
$I_{ui}(\text{mm}^4)$	706517	723337	723337
$I_{vi}(\text{mm}^4)$	191877	208698	208698

## 2.4.2 Υπολογισμός ελαστικής ροπής

- Για την περίπτωση των δοκιμίων B-T1-L και B-T1-LI εφαρμόζεται ο ακόλουθος τύπος.

$$M_{y,el} = \min \left( \frac{f_y \cdot I_{yi}}{h - z_{Gi}}, \frac{f_y \cdot I_{yi}}{z_{Gi}} \right) \quad (2.10)$$

- Για την περίπτωση των δοκιμίων B-T1-V και B-T2-V2 εφαρμόζεται ο ακόλουθος τύπος.

$$M_{v,el,i} = \min \left( \frac{f_y \cdot I_{vi}}{u_{Gi}}, \frac{f_y \cdot I_{vi}}{h/\sqrt{2}-u_{Gi}}, \frac{f_{fc} \cdot I_{vi} \cdot n}{h/\sqrt{2}-u_{Gi}} \right) \quad (2.11)$$

### 2.4.3 Υπολογισμός ελαστοπλαστικής ροπής

Στον υπολογισμό της μέγιστης ροπής του δοκιμίου, γίνεται η παραδοχή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Ο χάλυβας θεωρείται πλήρως πλαστικοποιημένος, ενώ το FRP ότι συμπεριφέρεται ελαστικά.

- Για την περίπτωση των δοκιμίων B-T1-L και B-T1-LI δίνεται η διαδικασία που προκύπτουν οι τύποι στο παράρτημα Β.

Τελικά η ροπή δίνεται από το τύπο:

$$M_{u,y} = f_s \cdot t \cdot (h+z_p) \left( z_p - \frac{t}{2} \right) + \sigma_{fc} \cdot t_f \cdot b_f \cdot z_p + 0.5 \cdot f_s \cdot t \cdot (h-z_p)^2 + \frac{\sigma_{fo} + \sigma_{fu}}{2} \cdot t_f \cdot (h-b_f) \cdot \left( \frac{2}{3} \right) \cdot \left( \frac{5}{3} b_f - z_p \right) \quad (2.12)$$

- Για την περίπτωση των δοκιμίων B-T1-V, B-T2-V και B-T2-V2 εφαρμόζονται οι ακόλουθοι τύποι του παραρτήματος Γ.

Η ροπή υπολογίζεται ως:

$$M_{v,el-pl} = \frac{f_s t}{\sqrt{2}} \cdot ((h-x_0)^2 + x_0^2) + \frac{2 f_f t_f}{3\sqrt{2} (h-x_0)} \cdot ((h-x_0)^3 + (x_0 - (h-b))^3) \quad (2.13)$$

## 2.5 Τεκμηρίωση αναλυτικών τύπων

### 2.5.1 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών καμπυλών

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα των παραπάνω τύπων, γίνεται η σύγκριση της πειραματικής καμπύλης δύναμης-βέλους με την αναλυτική. Η αναλυτική καμπύλη είναι διγραμμική και αποτελείται από το ελαστικό μέρος και ένα ευθύγραμμο πλαστικό κλάδο.

Τα δοκίμια θεωρούνται αρθρωμένα στα δύο άκρα και καταπονούνται σε φόρτιση τριών σημείων. Αυτή η παραδοχή επιτρέπει τον υπολογισμό του μέγιστου βέλους από τον τύπο:

$$\delta = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E_s \cdot I} \quad (2.14)$$

Όπου  $\delta$  είναι το μέγιστο βέλος στο κέντρο του δοκιμίου,  $l$  είναι το συνολικό μήκος της δοκού που ισούται με 1500 mm,  $E_s$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ίσο με 210 GPa και  $I$  είναι η ροπή αδράνειας περί τον άξονα  $y$  ή  $v$  ανάλογα με το εξεταζόμενο δοκίμιο.

Το ελαστικό γραμμικό μέρος σταματάει στην μέγιστη τιμή του φορτίου  $P_u$ :

$$P_u = \frac{4 \cdot M_{el-pl}}{l} \quad (2.15)$$

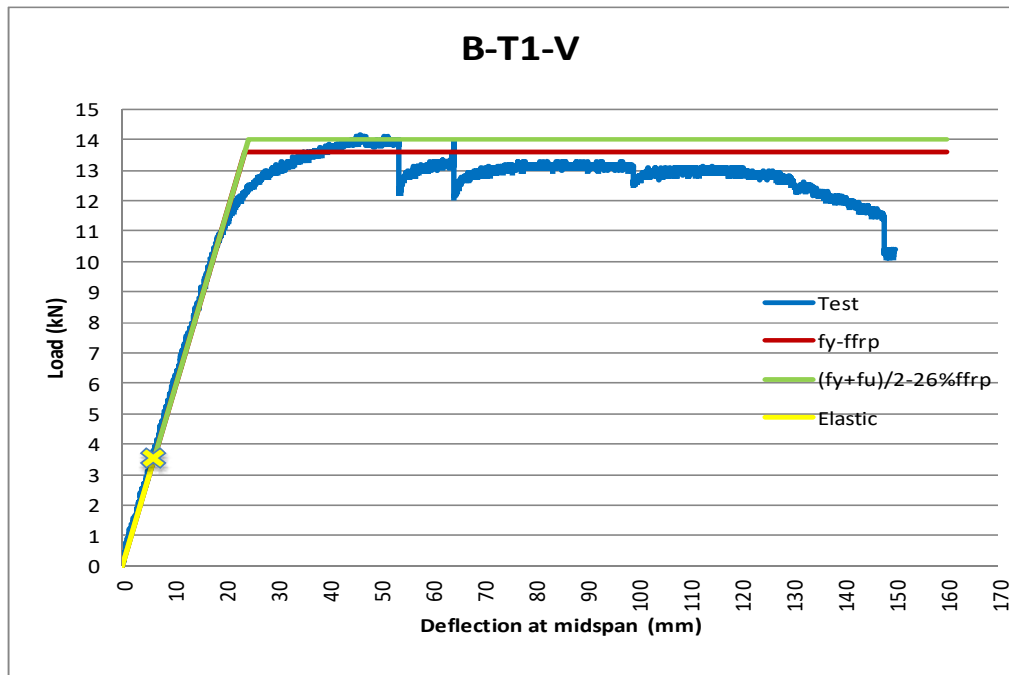
Όπου  $M_{el-pl}$  είναι η αναλυτική ροπή που υπολογίστηκε με τους παραπάνω τύπους.

Η ελαστοπλαστική ροπή υπολογίζεται δύο φορές.

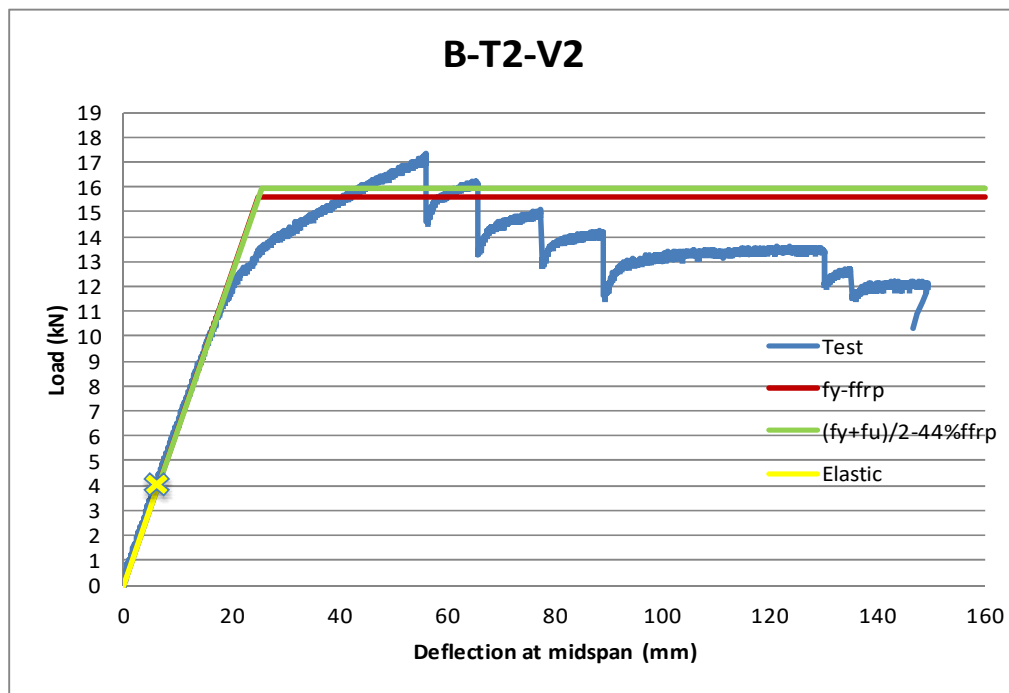
Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται για τον χάλυβα  $f_s = f_y$  και ότι το FRP μπορεί να αναπτύξει την μέγιστη τάση αστοχίας  $f_{frp}$ . Η καμπύλη απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα.

Στην δεύτερη περίπτωση για τον χάλυβα ισχύει  $f_s = (f_y + f_u)/2$ , ενώ το FRP έχει την τάση η οποία εμφανίζεται στην πρώτη αστοχία σύμφωνα με την παράγραφο 2.3.3.2. Εδώ η καμπύλη είναι πράσινη.

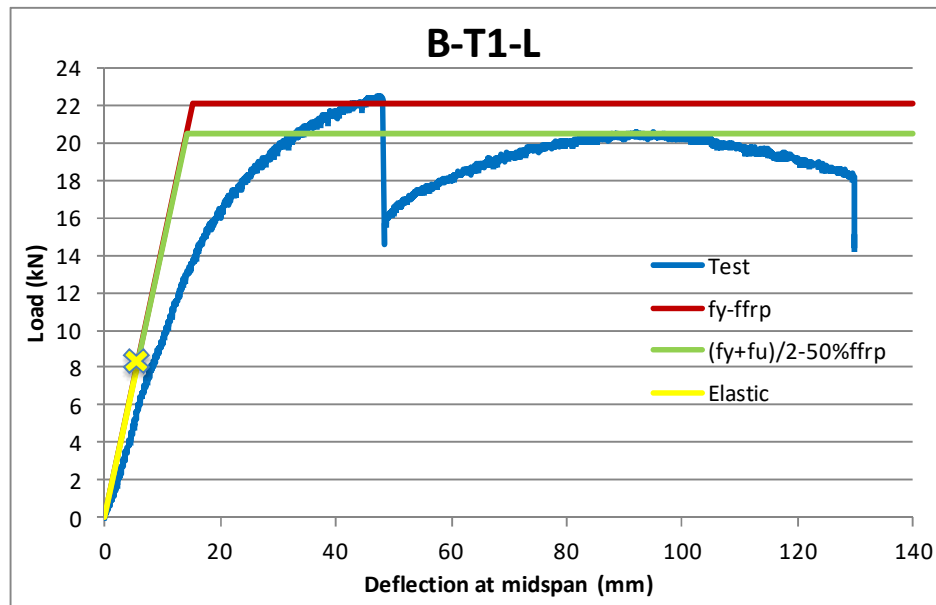
Εκτός από τα παραπάνω στα διαγράμματα απεικονίζεται με σημείο η δύναμη που προκύπτει από την ελαστική ανάλυση.



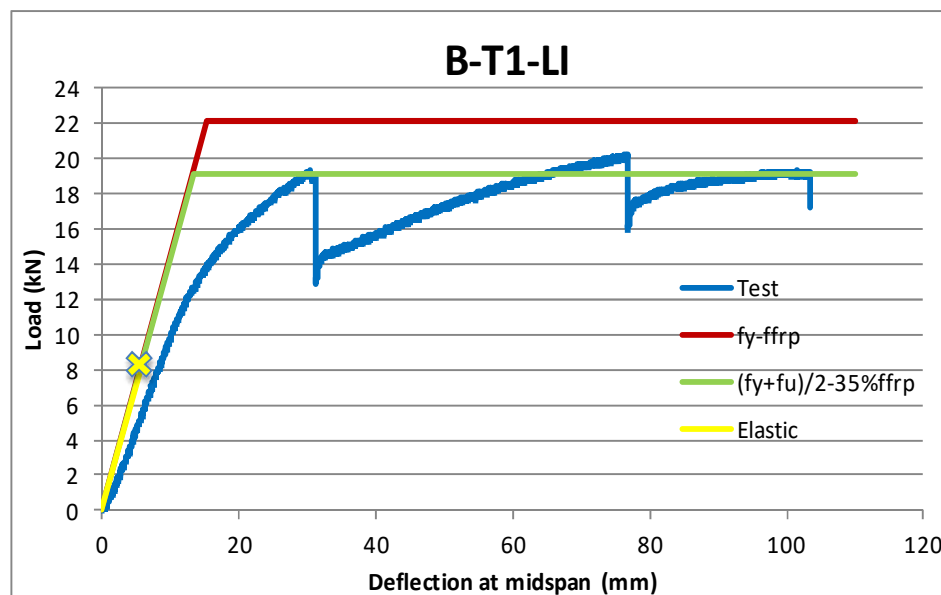
Σχήμα 2.27: Καμπύλες φορτίου- βέλους για το δοκίμιο B-T1-V



Σχήμα 2.28: Καμπύλες φορτίου- βέλους για το δοκίμιο B-T2-V2



Σχήμα 2.29: Καμπύλες φορτίου- βέλους για το δοκίμιο B-T1-L



Σχήμα 2.30: Καμπύλες φορτίου- βέλους για το δοκίμιο B-T1-LI

Αρχικά πρέπει να παρατηρηθεί ότι η ελαστική ανάλυση δίνει αποτελέσματα αρκετά μακριά από την πραγματική συμπεριφορά, άρα είναι ιδιαίτερα αντιοικονομική.

Στην συνέχεια από την σύγκριση των παραπάνω διαγραμμάτων παρατηρείται, ότι η ελαστική γραμμή προσεγγίζει πολύ καλά ιδίως στα δοκίμια B-T1-V και B-T2-V2. Στα δοκίμια B-T1-L και B-T1-LI υπάρχει μια μικρή απόκλιση, η οποία οφείλεται στην στροφή των δοκιμίων κατά την εκπόνηση του πειράματος. Η στροφή αυτή παρατηρείται τόσο από την παραμορφωμένη εικόνα των δοκιμίων όσο από τα αποτελέσματα των LVDT.

Επίσης παρατηρείται ότι η μέγιστη δύναμη που προκύπτει από την ελαστοπλαστική ροπή και στις δύο περιπτώσεις προσεγγίζει πάρα πολύ καλά την πραγματικότητα. Γι αυτό καθώς και για λόγους απλότητας η πρώτη περίπτωση υπολογισμού είναι η πιο κατάλληλη.

## 2.5.2 Αναλυτικός υπολογισμός θέσης κέντρου βάρους

Προκειμένου να διαπιστωθεί ότι η θέση του κέντρου βάρους που υπολογίστηκε και χρησιμοποιήθηκε σε όλους τους παραπάνω υπολογισμούς είναι κοντά στην πραγματική έγινε η παρακάτω διερεύνηση.

Για τιμή της δύναμης  $P = 10 \text{ kN}$  βρέθηκε από τις καταγραφές των επιμηκυνσιομέτρων (τα οποία είναι τοποθετημένα στο μέσο του ανοίγματος των δοκιμίων) η αντίστοιχη επιμήκυνση για κάθε δοκίμιο. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και από τον παρακάτω αναλυτικό τύπο:

$$\varepsilon = \frac{M}{E \cdot I} \cdot e \quad (2.16)$$

όπου  $M = P \cdot l / 4$  η μέγιστη ροπή στο κέντρο του δοκιμίου

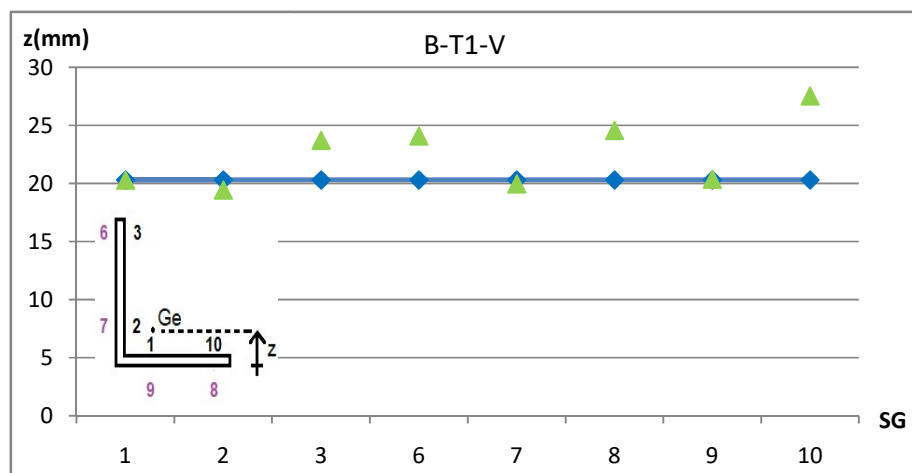
$E$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ή του FRP ανάλογα με την θέση που είναι τοποθετημένο το επιμηκυνσιόμετρο

$I$  η ροπή αδράνειας το κάθε δοκίμιο

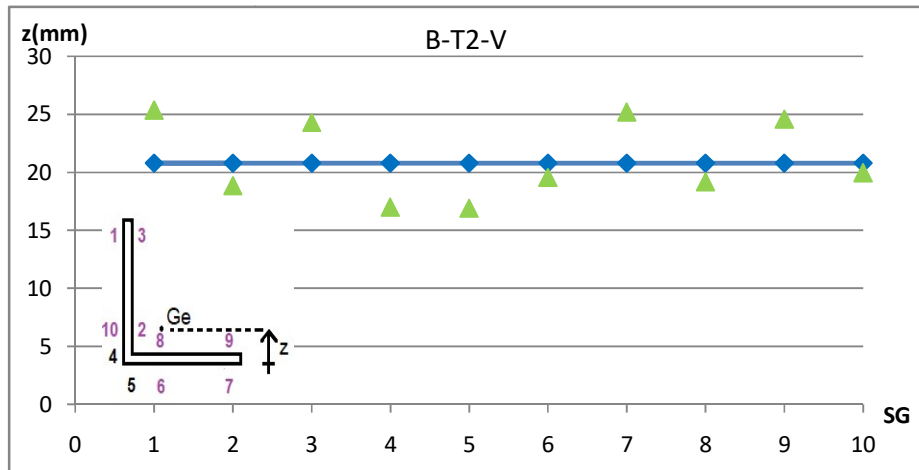
και  $e$  η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους και της θέσης του επιμηκυνσιομέτρου

Υπολογίζεται ο όρος  $e$  μέσα από πεπλεγμένες σχέσεις προσδιορισμού, αφού η ροπή αδράνειας εξαρτάται από την θέση του κέντρου βάρους.

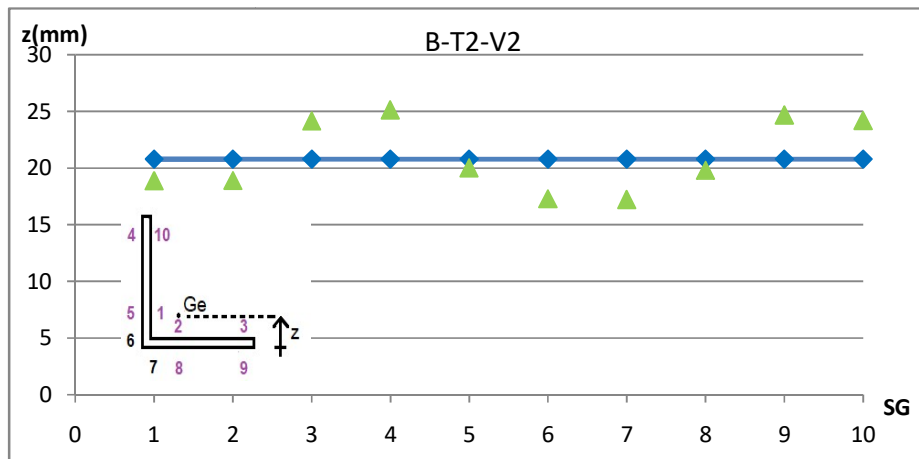
Αφού υπολογιστεί η απόσταση αυτή και με γνωστές τις συντεταγμένες των επιμηκυνσιομέτρων στον κατακόρυφο άξονα υπολογίζεται η κατακόρυφη συντεταγμένη του κέντρου βάρους στο αρχικό σύστημα συντεταγμένων. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η διασπορά μεταξύ της αναλυτικής θέσης του κέντρου βάρους (μπλε χρώμα) καθώς και αυτής που προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα για κάθε δοκίμιο (πράσινο χρώμα).



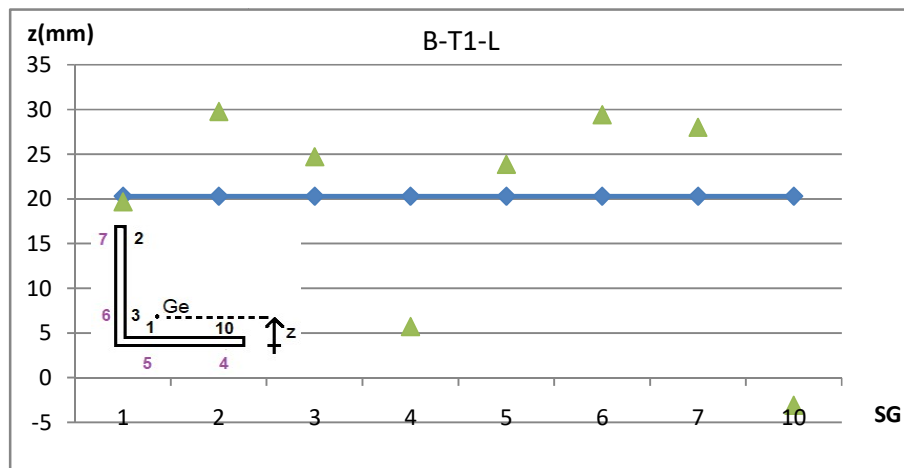
Σχήμα 2.31: Διασπορά θέσης κέντρου βάρους μέσω αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο B-T1-V.



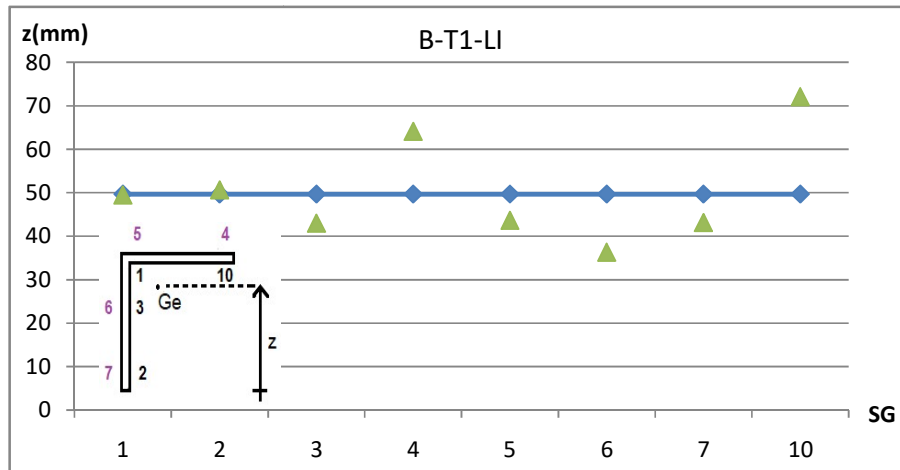
Σχήμα 2.32: Διασπορά θέσης κέντρου βάρους μέσω αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο B-T2-V.



Σχήμα 2.33: Διασπορά θέσης κέντρου βάρους μέσω αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο B-T2-V2.



Σχήμα 2.34: Διασπορά θέσης κέντρου βάρους μέσω αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο B-T1-L.



Σχήμα 2.35: Διασπορά θέσης κέντρου βάρους μέσω αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για το δοκίμιο B-T1-LI.

Προφανώς, δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση μεταξύ των σημείων, που πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός, ότι μπορεί να υπάρχει απόκλιση στις συντεταγμένες των επιμηκυνσιομέτρων πάνω στην διατομή, καθώς και του πάχους της κόλλας το οποίο επηρεάζει κυρίως τα επιμηκυνσιόμετρα που είναι τοποθετημένα πάνω στα FRP. Τέλος δεν πρέπει να αγνοηθεί ότι για τα μέτρα ελαστικότητας χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές τιμές. Παρόλα αυτά η απόκλιση είναι τόσο μικρή, ώστε οι παραπάνω τύποι να επιτρέπονται για χρήση.



## 3 Ενισχυμένα δοκίμια με ινωπλισμένα πολυμερή σε διάτμηση

### 3.1 Εισαγωγή

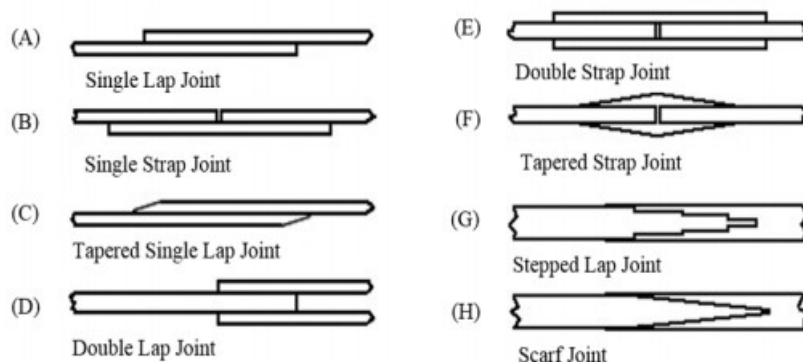
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα υβριδικών δοκιμίων που αποτελούνται από χάλυβα και πολυμερή όταν υπόκεινται σε διάτμηση. Αναλυτικότερα μελετάται ο ρόλος της επιφάνειας του χάλυβα, οι ιδιότητες της ρητίνης επικόλλησης καθώς και των ελασμάτων ενίσχυσης.

### 3.2 Γενικά στοιχεία

#### 3.2.1 Μορφές δοκιμίων

Κατά την πειραματική δοκιμή συγκολλημένων δοκιμίων σε διάτμηση σημαντικό ρόλο παίζει η μορφή των εξεταζόμενων δοκιμίων όσο και το πάχος της κόλλας και των ελασμάτων που χρησιμοποιούνται. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι να επηρεάζεται το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραληφθεί κάθε φορά.

Στο σχήμα 3.1. φαίνονται οι πιο συχνές μορφές δοκιμίων διάτμησης που χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία. Σε κάθε περίπτωση σημαντικές είναι οι τάσεις που συγκεντρώνονται στο συγκολλητικό υλικό. Γι αυτό το λόγο και εξαιτίας της αβεβαιότητας που υπάρχει γι αυτό (πάχος, σημεία ασυνέχειας, κενά κ.λπ.) επιδιώκεται αστοχία των συγκολλημένων τμημάτων πριν από την αστοχία της ρητίνης. Αυτό δεν είναι πάντα εύκολο να συμβεί εξαιτίας του πολύ μικρού πάχους της συγκολλητικής στρώσης σε σχέση με το πάχος των άλλων τμημάτων.



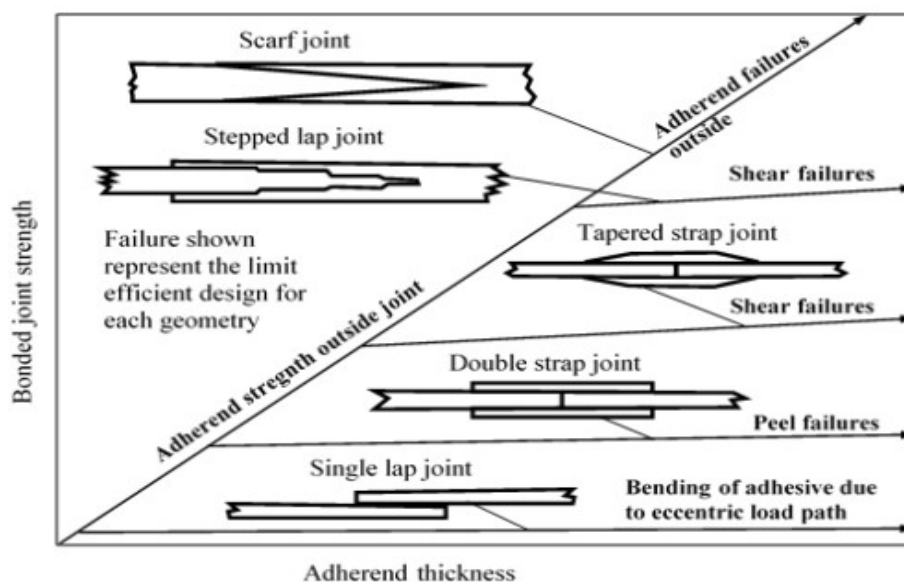
Σχήμα 3.1: Είδη δοκιμίων που υπόκεινται σε πειράματα διάτμησης [5]

Τα δοκίμια με μια μόνο στρώση συνδετικού υλικού (μορφές A και B) είναι τα λιγότερα αποτελεσματικά εξαιτίας της εκκεντρότητας που δημιουργείται μέσα από την κάμψη των συγκολλημένων τμημάτων και η οποία μεγιστοποιεί τις τάσεις αποκόλλησης. Οι τάσεις αυτές εμφανίζονται και στις περιπτώσεις των συμμετρικών δοκιμίων (μορφές

D και E) και γίνονται ο περιοριστικός παράγοντας όταν το πάχος των εξωτερικών ελασμάτων είναι σημαντικό. Τα δοκίμια μορφής C και F έχουν μειωμένες τάσεις αποκόλλησης στις περιοχές εφελκυσμού. Τα δοκίμια μορφής H θεωρητικά είναι τα πιο αποτελεσματικά, αφού με την χρήση ελασμάτων ίδιας δυσκαμψίας μπορούν να εξαλείψουν πλήρως τις τάσεις και μπορούν να αναλάβουν σημαντικά φορτία με την αύξηση του μήκους και του πάχους των ελασμάτων. Ωστόσο χρησιμοποιούνται μόνο στην επισκευή λεπτών κατασκευών γιατί στην πραγματικότητα έχουν την τάση να αστοχούν με μια ερπυστική μορφή, η οποία σχετίζεται με την κατανομή των διατμητικών τάσεων. Τέλος τα δοκίμια μορφής G είναι μια πρακτική λύση όταν χρησιμοποιούνται ελάσματα σημαντικού πάχους. Σημαντικά φορτία επιτυγχάνονται όταν ο αριθμός των βημάτων είναι μεγάλος.

### 3.2.2 Πάχος συνδετικού υλικού και ελασμάτων

Στην βιβλιογραφία υπάρχει ακόμα το ακόλουθο διάγραμμα που έχει προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται το πάχος των συγκολλημένων τμημάτων, ενώ στον κατακόρυφο το φορτίο που αναλαμβάνει το συνολικό δοκίμιο. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι όσο το πάχος των τμημάτων είναι μικρό, τότε επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο με την αστοχία των εξωτερικών τμημάτων να προηγείται της κόλλας. Όσο το πάχος αυξάνεται, αυξάνονται και οι τάσεις στο συνδετικό υλικό μέχρι ένα σημείο στο οποίο το τελευταίο αστοχεί για φορτίο μικρότερο από αυτό που αστοχούν τα εξωτερικά τμήματα. Αυτό οδηγεί στο γενικό συμπέρασμα ότι το πάχος των συγκολλημένων τμημάτων πρέπει να επιλέγεται από ένα εύρος τιμών που εξαρτώνται άμεσα από το πάχος του συνδετικού υλικού.



Σχήμα 3.2: Αποτελέσματα μορφής δοκιμίου [5]

### 3.3 Πειραματική διαδικασία

#### 3.3.1 Γενικά στοιχεία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι σύνδεσμοι που φαίνονται στο σχήμα 3.3 και οι οποίοι στην συνέχεια θα αναφέρονται ως double strap joints (DSJs) για λόγους συντομίας.



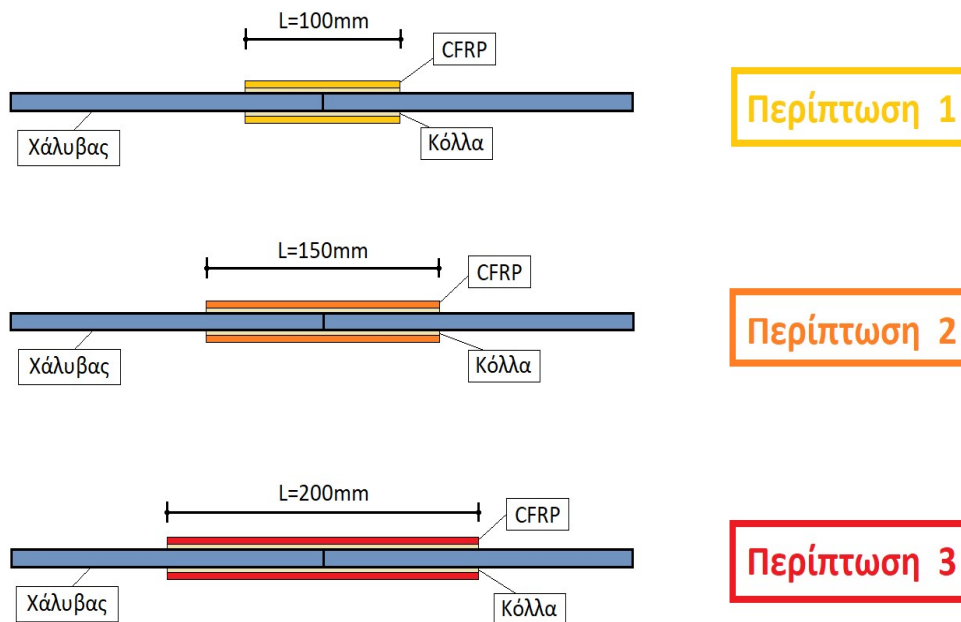
Σχήμα 3.3: Σύνδεσμος double strap

Τα δοκίμια της παραπάνω μορφής είναι σύνθετα. Αποτελούνται από δύο ελάσματα χάλυβα κατηγορίας S275 τα οποία βρίσκονται σε επαφή. Στην πάνω και κάτω πλευρά τους τοποθετούνται με ρητίνη επικόλλησης Sikadur 30, ανθρακοελάσματα Sika Carbodur S512. Η ρητίνη επικόλλησης καθώς και τα ελάσματα CFRP που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια που χρησιμοποιήθηκαν κατά την φόρτιση των 3 σημείων στα ενισχυμένα γωνιακά ελάσματα, οπότε τα χαρακτηριστικά τους δίνονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς και στο παράρτημα.

Όπως είναι αναμενόμενο η διεπιφάνεια μεταξύ των συγκολλημένων υλικών έχει μεγάλη σημασία στην συνολική αντοχή του δοκιμίου. Για τον λόγο αυτό μελετώνται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ο χάλυβας που χρησιμοποιείται είναι γαλβανισμένος. Ο γαλβανισμός του χάλυβα είναι η διαδικασία κατά την οποία σχηματίζεται εξωτερικά του υλικού μια επικάλυψη που αποτελείται από ψευδάργυρο και σίδηρο, ο οποίος βρίσκεται μέσα στο υλικό.

Στην δεύτερη περίπτωση ο χάλυβας είναι αμμοβολισμένος. Η αμμοβολή, δηλαδή η απομάκρυνση σκουριάς, χρώματος και γενικά ξένων υλικών από την επιφάνεια του υλικού γίνεται με τον ίδιο τρόπο που αναφέρεται στην παράγραφο 2.2.1, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη συνάφεια στην διεπιφάνεια.

Τα αμμοβολισμένα χαλύβδινα δοκίμια έχουν διαστάσεις 200x100x10 (μήκος x πλάτος x πάχος), ενώ τα γαλβανισμένα 200x80x10. Το πάχος της στρώσης του συνδετικού υλικού είναι περίπου 1 mm. Ακόμα ελέγχεται η επιρροή που έχει το μήκος του ανθρακοελάσματος. Γι αυτό όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα διακρίνονται 3 περιπτώσεις όπου το μήκος μεταβάλλεται από 100 mm, σε 150 mm και 200 mm αντίστοιχα τόσο για τα αμμοβολισμένα όσο και τα γαλβανισμένα δοκίμια. Το πάχος των CFRP είναι πάντα σταθερό και ίσο με 1.2 mm.



Σχήμα 3.4: Δοκίμια double strap με διαφορετικά μήκη CFRP

### 3.3.2 Προετοιμασία δοκιμών

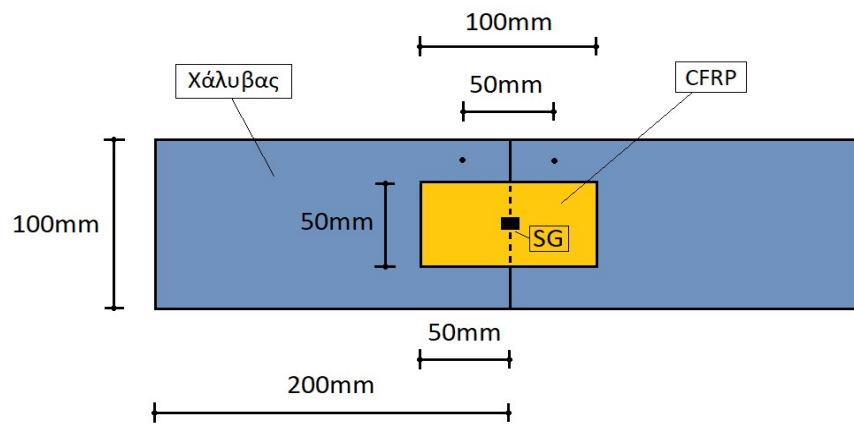
Αρχικά τα χαλύβδινα ελάσματα τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο χωρίς την ύπαρξη κάποιου κενού ανάμεσα τους. Έπειτα τα ανθρακοελάσματα στα οποία έχει τοποθετηθεί μια στρώση ρητίνης επικόλλησης μέσα από ειδική διάταξη με αποστατήρες (spacers), τοποθετούνται με την σειρά τους επάνω στα ελάσματα. Μετά την εφαρμογή πίεσης επιτυγχάνεται το επιθυμητό πάχος κόλλας και στην συνέχεια καθαρίζεται η κόλλα που υπερχειλίζει.

Τα δοκίμια αποθηκεύονται στο εργαστήριο Μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ σε θερμοκρασία 20°C για 2 εβδομάδες για να αποκτήσουν τις κατάλληλες αντοχές.

Προκειμένου να είναι εύκολη η διάκριση και κατανοητά τα χαρακτηριστικά των δοκιμών ακολουθεί η ονοματολογία τους. Αρχικά χρησιμοποιείται το γράμμα S που υποδηλώνει ότι τα δοκίμια υπόκεινται σε διατμητική φόρτιση (shear tests). Στην συνέχεια ακολουθεί ένα γράμμα που χαρακτηρίζει το μήκος του CFRP. Με το γράμμα S (short) υποδηλώνεται το έλασμα μήκους 100 mm, με M (medium) και L(long) τα 150 και 200 mm. Στην συνέχεια για τα γαλβανισμένα δοκίμια χρησιμοποιείται το γράμμα G (galvanized) και τέλος ακολουθεί ο αριθμός 1 ή 2, αφού για κάθε δοκιμή πραγματοποιούνται 2 επαναλήψεις.

Πίνακας 3.1: Ονομασίες δοκιμίων

A/A	Είδος επιφάνειας	Όνομα
1	Αμμοβολισμένο	SS1
2	Αμμοβολισμένο	SS2
3	Αμμοβολισμένο	SM1
4	Αμμοβολισμένο	SM2
5	Αμμοβολισμένο	SL1
6	Αμμοβολισμένο	SL2
7	Γαλβανισμένο	SSG1
8	Γαλβανισμένο	SSG2
9	Γαλβανισμένο	SMG1
10	Γαλβανισμένο	SMG2
11	Γαλβανισμένο	SLG1
12	Γαλβανισμένο	SLG2



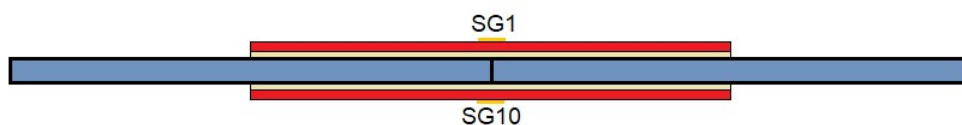
Σχήμα 3.5: Διαστάσεις τυπικού δοκιμίου SS

Πάνω σε κάθε δοκίμιο καταγράφεται η αντίστοιχη ονομασία του. Η μπροστά πλευρά του δοκιμίου συμβολίζεται με A και η πίσω με B. Διάκριση γίνεται και στα ελάσματα του χάλυβα. Για την αριστερή πλευρά χρησιμοποιείται το γράμμα U (under) και για τη δεξιά το γράμμα D (down). Συνεπώς σε κάθε δοκίμιο υπάρχουν συνολικά οι χαρακτηρισμοί AU, AD, BU και BD οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά την τοποθέτησή τους στην μηχανή φόρτισης.



Σχήμα 3.6: Μπροστά και πίσω όψη δοκιμίων

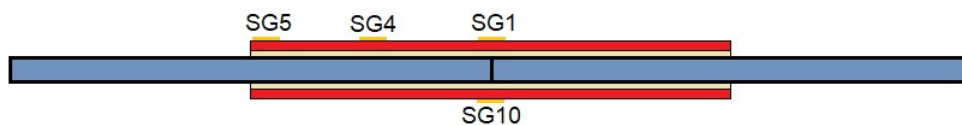
Πάνω στα ελάσματα των CFRP τοποθετούνται με κυανοακρυλική κόλλα ταχείας πήξης Επιμηκνσιόμετρα για την καταγραφή των επιμηκύνσεων. Στα δοκίμια SS1, SM1, SL1, SSG1 και SMG1 τοποθετούνται δύο επιμηκνσιόμετρα SG1 και SG10 αντίστοιχα. Στα SS2, SM2, SL2, SSG2, SMG2 και SLG2 μόνο το SG10. Τέλος στο δοκίμιο SLG1 τοποθετούνται από την μία πλευρά 3 επιμηκνσιόμετρα SG5, SG4 και SG1 σε αποστάσεις 10,50 και 100 mm αντίστοιχα.



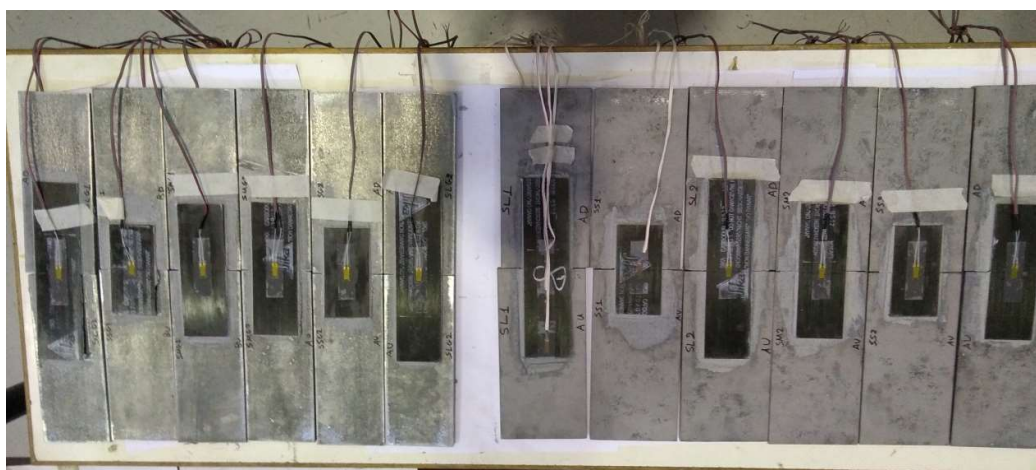
Σχήμα 3.7: Θέσεις επιμηκνσιομέτρων στα δοκίμια SS1, SM1, SL1, SSG1 και SMG1



Σχήμα 3.8: Θέσεις επιμηκνσιομέτρων στα δοκίμια SS1 SS2, SM2, SL2, SSG2, SMG2 και SLG2



Σχήμα 3.9: Θέσεις επιμηκνσιομέτρων στο δοκίμιο SLG1



Εικόνα 3.1 A: Γαλβανισμένα δοκίμια B: Αμμοβολισμένα δοκίμια

### 3.4 Πειραματική διάταξη (set up)

Μετά την σκλήρυνση της ρητίνης επικόλλησης τα δοκίμια τοποθετούνται στην μηχανή φόρτισης. Η φόρτιση γίνεται με την μηχανή εφελκυσμού Instron 300LX.



Εικόνα 3.2: Μηχανή Instron 300LX



Εικόνα 3.3: Γενική διάταξη δοκιμίου SL1 στην μηχανή Instron LX300

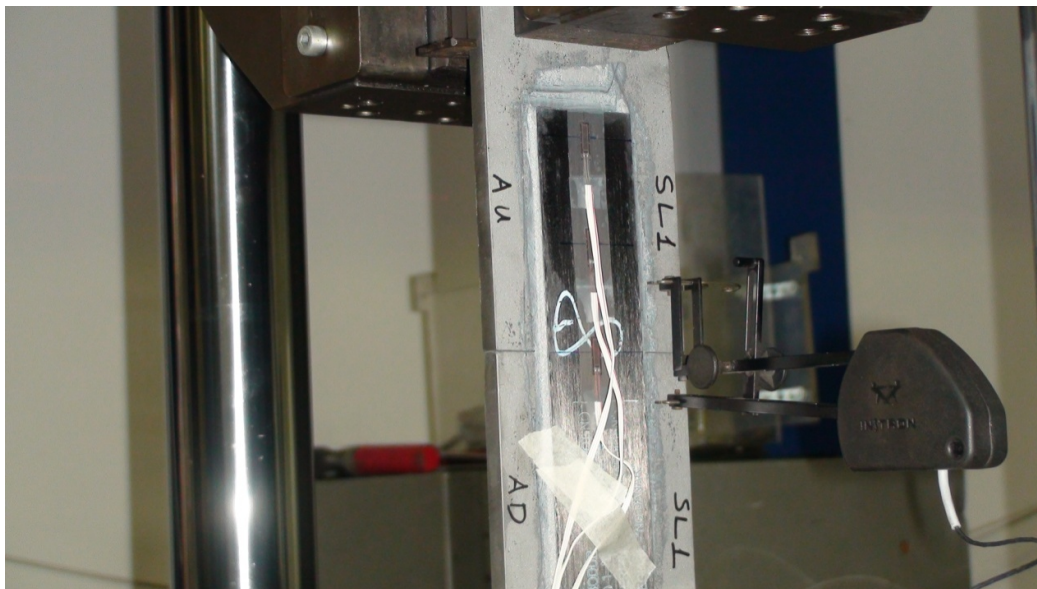
Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα τα δοκίμια τοποθετούνται με την πλευρά AU προς τα πάνω σε κάθε πείραμα.

Πριν την έναρξη της διαδικασίας καταμετράται η ελεύθερη απόσταση μεταξύ των αρπάγων. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται για κάθε δοκίμιο το ελεύθερο μήκος σε mm.

Πίνακας 3.2: Ελεύθερο μήκος δοκιμίων

Δοκίμιο	Μήκος l(mm)
SS1	257
SS2	257
SM1	257
SM2	257
SL1	257
SL2	257
SSG1	252
SSG2	252
SMG1	252
SMG2	252
SLG1	252
SLG2	252

Η κάτω αρπάγη της μηχανής είναι σταθερή, ενώ η πάνω επιβάλλει μετακίνηση με ταχύτητα 0.25m/min. Πριν ξεκινήσει το πείραμα τοποθετείται ακόμα ένα επιμηκυνσιόμετρο με αρχικό άνοιγμα  $l_0 = 50$  mm (εικόνα 3.11).

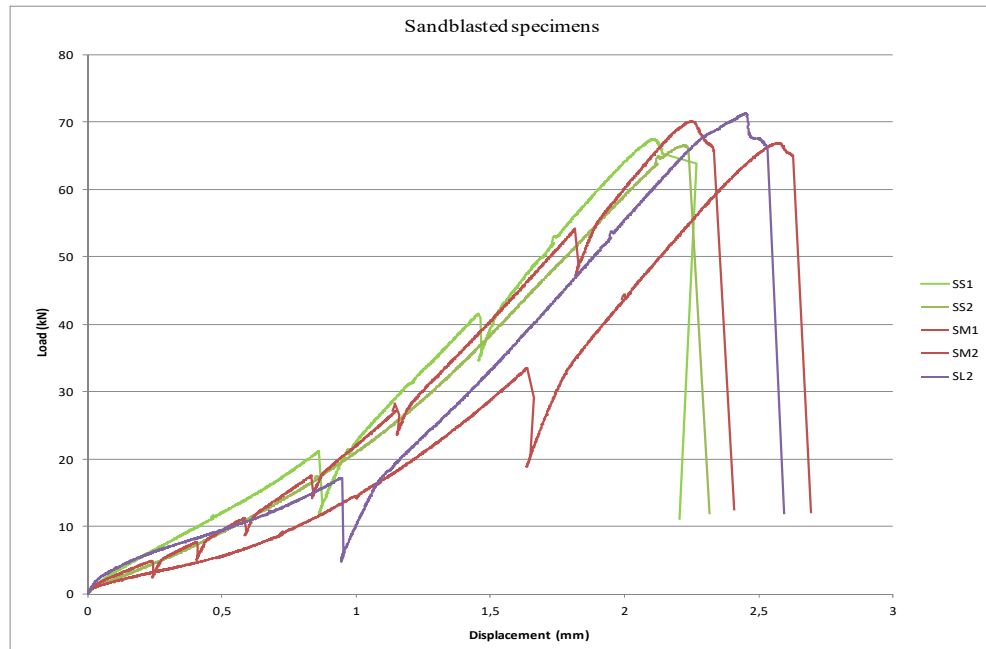


Εικόνα 3.4: Δοκίμιο με τοποθετημένο επιμηκυνσιόμετρο



### 3.5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας-Συμπεράσματα

#### 3.5.1 Αποτελέσματα μηχανής εφελκυσμού



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης αμμοβολισμένων δοκιμίων

Στο σχήμα 3.1 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου μετατόπισης. Με ίδιο χρώμα συμβολίζονται τα δοκίμια τα οποία έχουν το ίδιο μήκος CFRP. Στο σχήμα δεν υπάρχει η καμπύλη για το δοκίμιο SL1, διότι το πείραμα διακόπηκε και συνεχίστηκε. Για τον λόγο αυτό λαμβάνεται υπόψη η δύναμη αστοχίας, αλλά όχι η καμπύλη στο παραπάνω σχήμα. Ακόμα παρατηρούνται τοπικά σημεία πτώσης του φορτίου τα οποία οφείλονται σε ολισθήσεις των χαλύβδινων ελασμάτων στις αρπάγες της μηχανής, χωρίς όμως να επηρεάζουν το συνολικό αποτέλεσμα.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα φορτία αστοχίας για το κάθε δοκίμιο καθώς και οι διατμητικές τάσεις που μεταφέρονται στο κάθε ανθρακοέλασμα. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω του τύπου  $\tau = F / (2 * b * l')$ , όπου:

$\tau$  (MPa) η διατμητική τάση

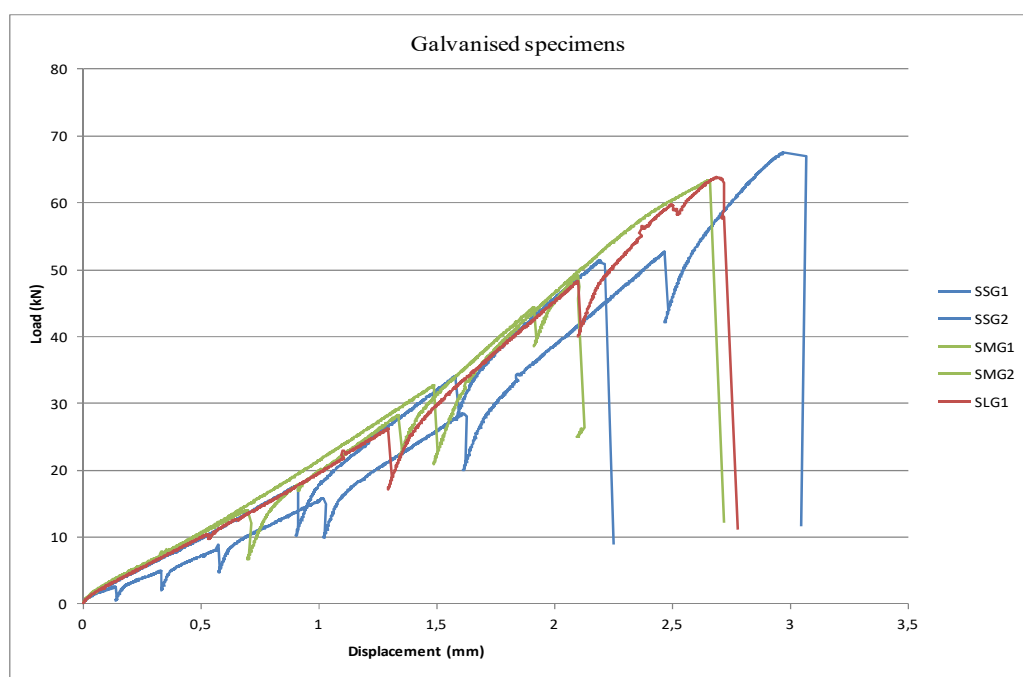
F (kN) τα φορτία αστοχίας των DSJs

b (mm) το πλάτος των CFRP

l' (mm) το ήμισυ του μήκους των CFRP

Πίνακας 3.3: Φορτίο αστοχίας αμβοβολισμένων δοκιμίων

Δοκίμιο	F(kN)	$\tau$ (Mpa)
SS1	67,4	13,5
SS2	66,6	13,3
SM1	70,1	9,3
SM2	66,9	8,9
SL1	65,9	6,6
SL2	71,2	7,1
<b>Average</b>	<b>68,0</b>	<b>9,8</b>



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης γαλβανισμένων δοκιμίων

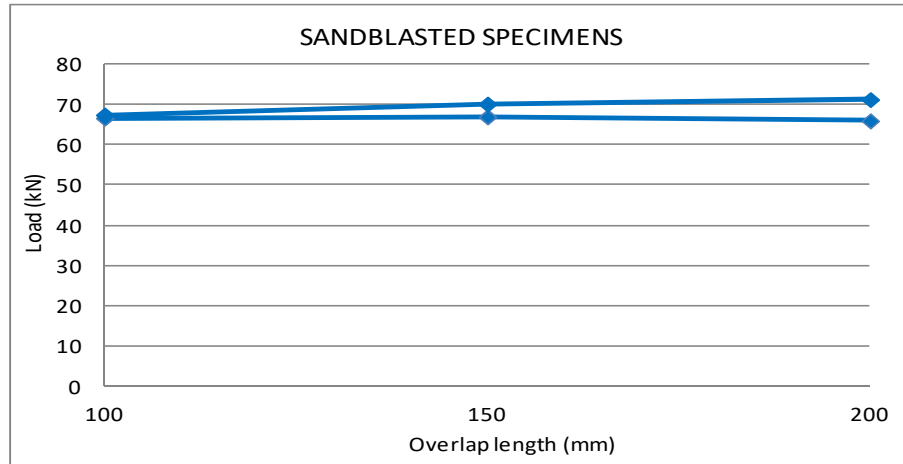
Στο σχήμα 3.11 ισχύουν τα ίδια με το σχήμα 3.10 με την μόνη διαφορά ότι εδώ δεν απεικονίζεται η καμπύλη του δοκιμίου SLG2, διότι κατά την εκπόνηση του πειράματος έφυγε το επιμηκυνσιόμετρο από την θέση του με αποτέλεσμα την διακοπή του πειράματος.

Πίνακας 3.4: Φορτίο αστοχίας γαλβανισμένων δοκιμίων

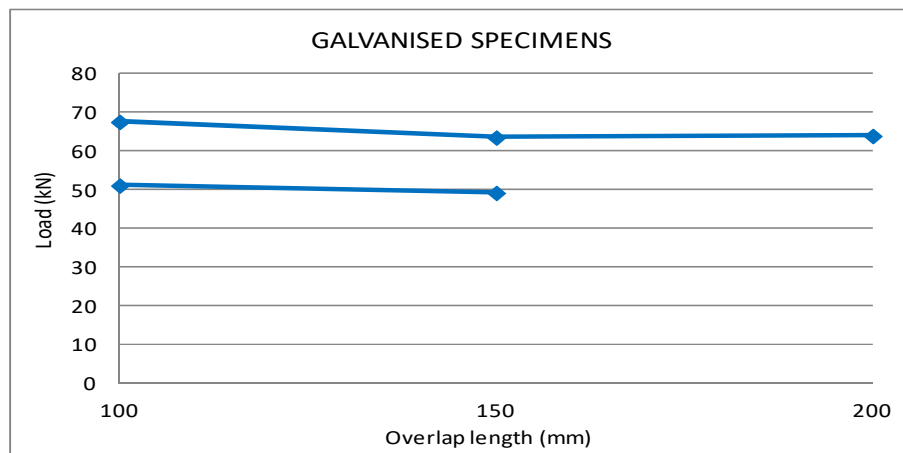
Δοκίμιο	F(kN)	$\tau$ (MPa)
SSG1	51	10,2
SSG2	67,4	13,5
SMG1	49,1	6,5
SMG2	63,4	8,5
SLG1	63,8	6,4
<b>Average</b>	<b>58,9</b>	<b>9,0</b>

Οι παραπάνω καμπύλες είναι γραμμικές μέχρι το μέγιστο φορτίο αστοχίας. Αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι το συνδετικό υλικό Sikadur 30 είναι έντονα ψαθυρό και καθορίζει την συνολική συμπεριφορά των δοκιμίων.

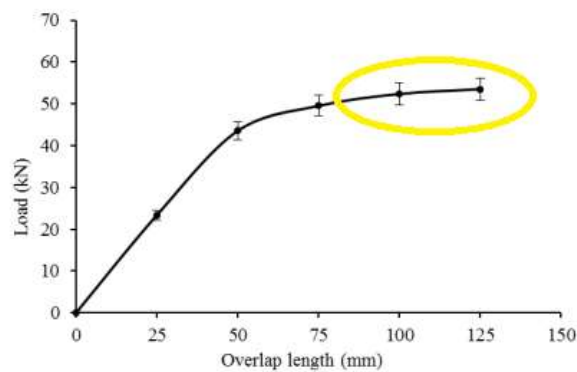
Στην συνέχεια για να κατανοηθεί καλύτερα η επιρροή του μήκους αγκύρωσης των ανθρακοελασμάτων ακολουθούν τα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα φορτίου αστοχίας-μήκους CFRP αμμοβολισμένων δοκιμίων



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα φορτίου αστοχίας-μήκους CFRP γαλβανισμένων δοκιμίων



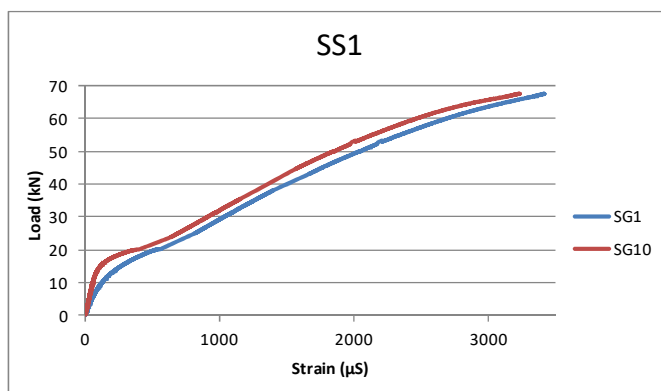
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα φορτίου-μήκους αγκύρωσης

Στο σχήμα 3.12 παρατηρείται ότι τα φορτία αστοχίας τόσο για τα όμοια όσο και για όλα τα δοκίμια είναι παρόμοια μεταξύ τους. Αντίθετα στο σχήμα 3.13 παρατηρείται διασπορά στις τιμές.

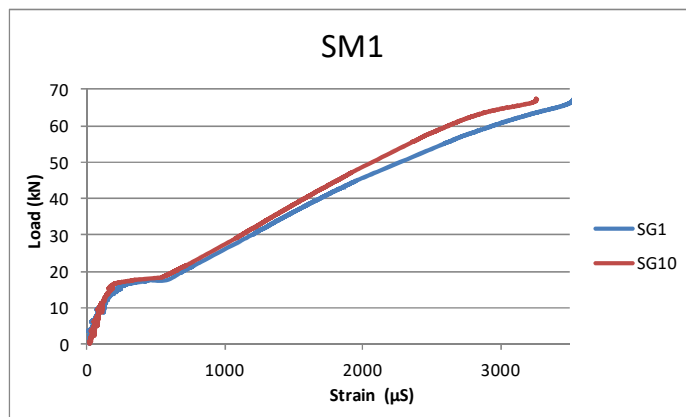
Παρά τις διαφορές μεταξύ των φορτίων από το σχήμα 3.14 βγαίνει το συμπέρασμα ότι η καμπύλη έχει φτάσει στο πλατό. Αυτό σημαίνει ότι όσο και αν αυξηθεί το μήκος αγκύρωσης των CFRP τα αποτελέσματα δεν θα επηρεαστούν ιδιαίτερα. Δεν ισχύει το ίδιο και για τις επιφάνειες του χάλυβα, οι οποίες επηρεάζουν έντονα τα αποτελέσματα, όπως θα φανεί και στην συνέχεια από τις εικόνες αστοχίας των δοκιμίων.

### 3.5.2 Αποτελέσματα επιμηκυνσιομέτρων

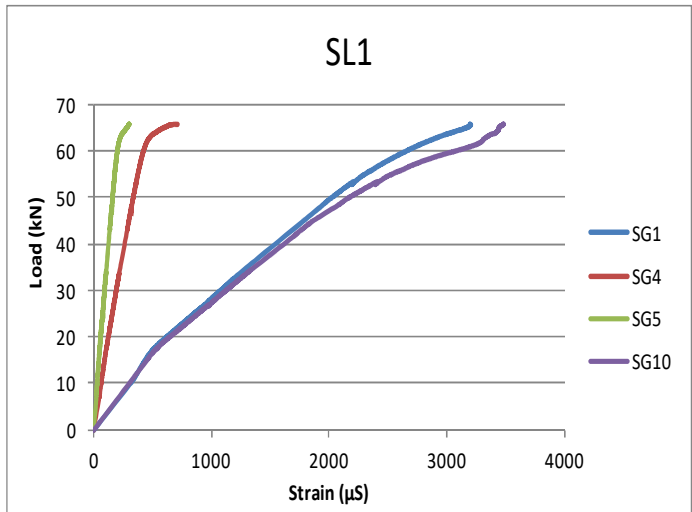
Ακολουθούν τα διαγράμματα φορτίου – επιμήκυνσης από την καταγραφή των επιμηκυνσιομέτρων. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για όσα δοκίμια διαθέτουν επιμηκυνσιόμετρα και στα 2 CFRP.



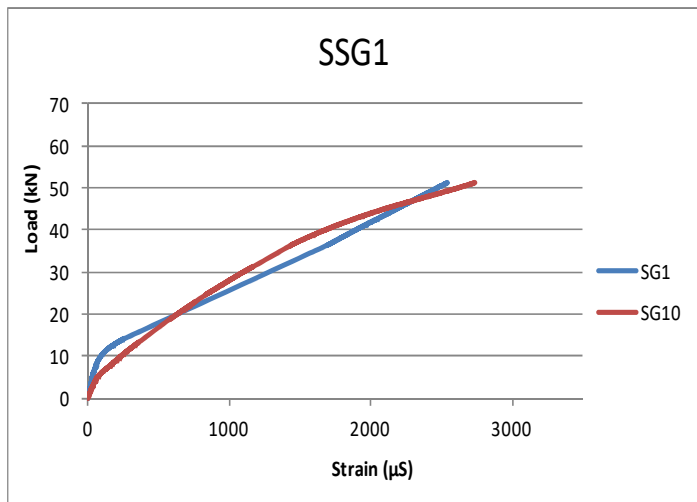
Σχήμα 3.15: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης δοκιμίου SS1



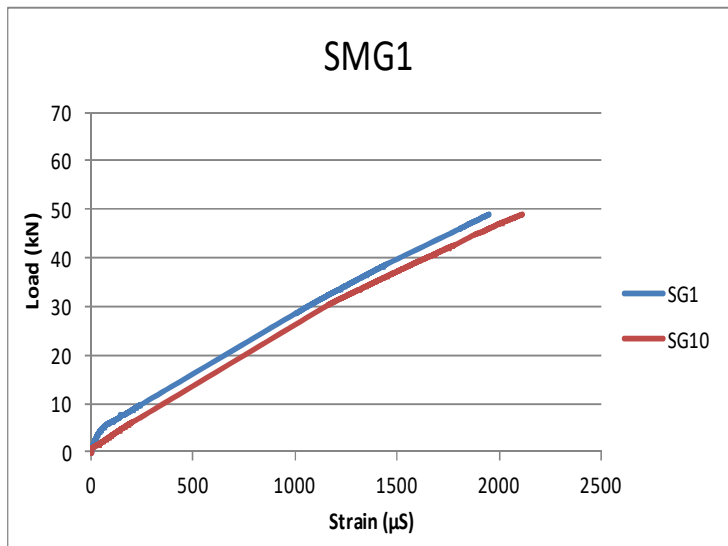
Σχήμα 3.16: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης δοκιμίου SM1



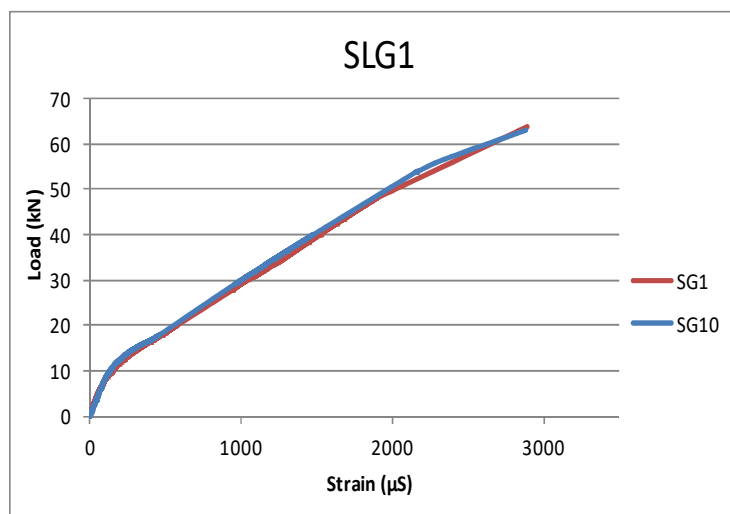
Σχήμα 3.17: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης δοκιμίου SL1



Σχήμα 3.18: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης δοκιμίου SSG1



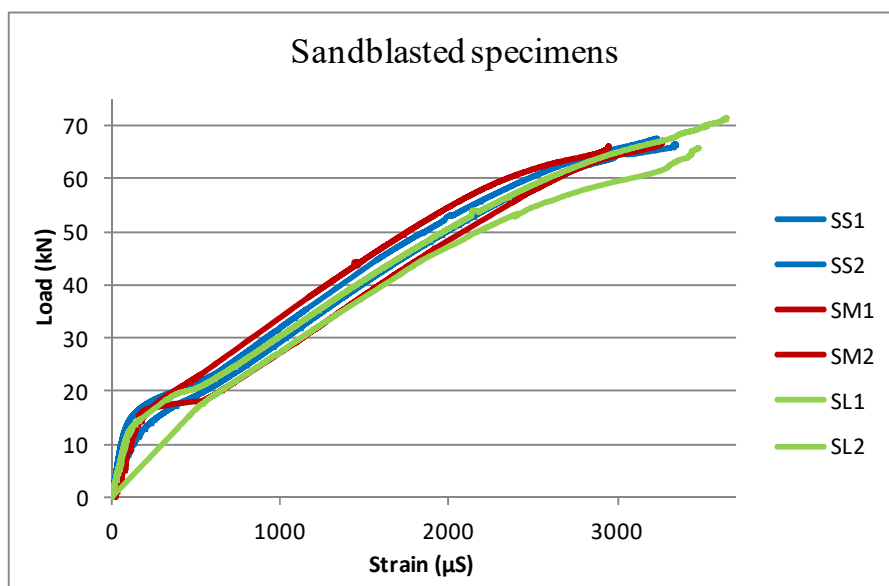
Σχήμα 3.19: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης δοκιμίου SMG1



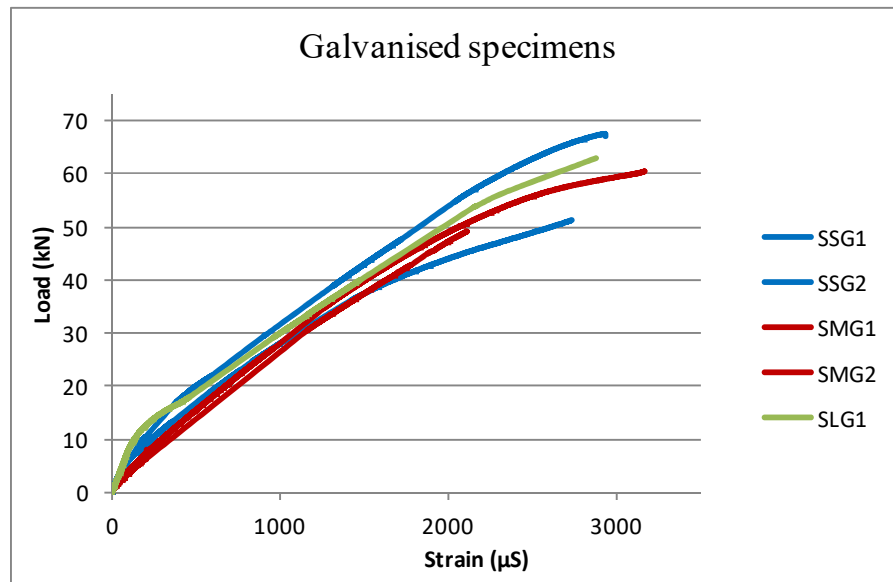
Σχήμα 3.20: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης δοκιμίου SLG1

Από τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνεται, ότι οι επιμηκύνσεις των δύο ανθρακοελασμάτων, είτε ταυτίζονται είτε σε πολλές περιπτώσεις είναι πάρα πολύ κοντά. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την αρχική επιλογή της μορφής συνδέσμου double strap και αποδεικνύει, ότι δεν υπάρχει κάποια διαφορά στην φόρτιση λόγω κάμψης.

Ακολουθούν τα διαγράμματα φορτίου – επιμήκυνσης, όπως προέκυψαν από τις καταγραφές των επιμηκυνσιομέτρων (SG-10).



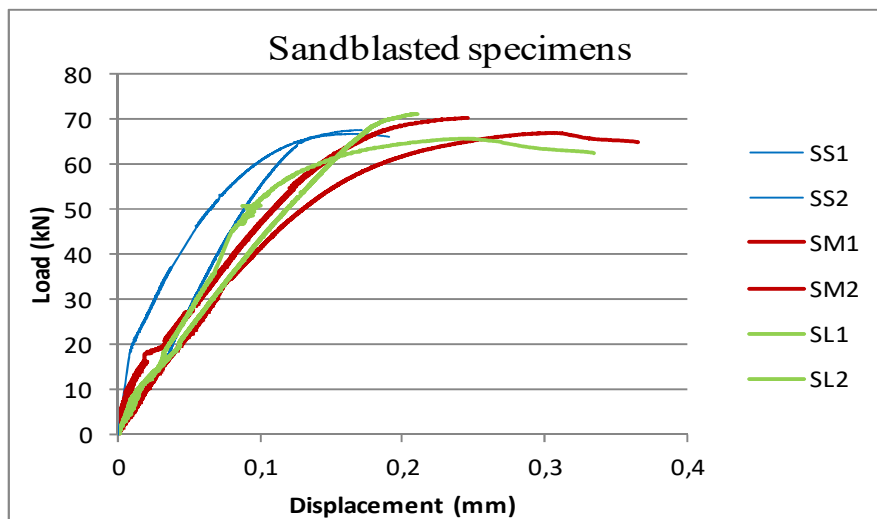
Σχήμα 3.21: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης από το SG-10



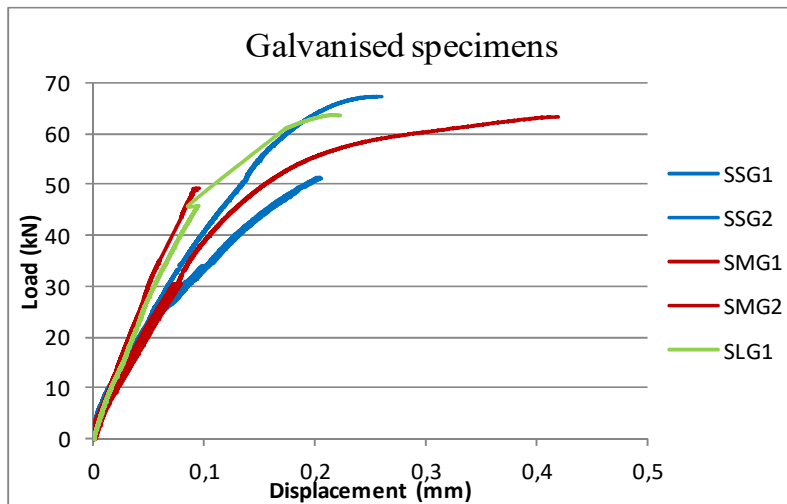
Σχήμα 3.22: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης από το SG-10

Παρατηρείται για μια ακόμη φορά ότι οι μέγιστες επιμηκύνσεις στο κέντρο των CFRP στην περίπτωση των αμμοβολισμένων δοκιμίων είναι πιο μεγάλες από τα γαλβανισμένα.

### 3.5.3 Αποτελέσματα επιμηκυνσιόμετρου

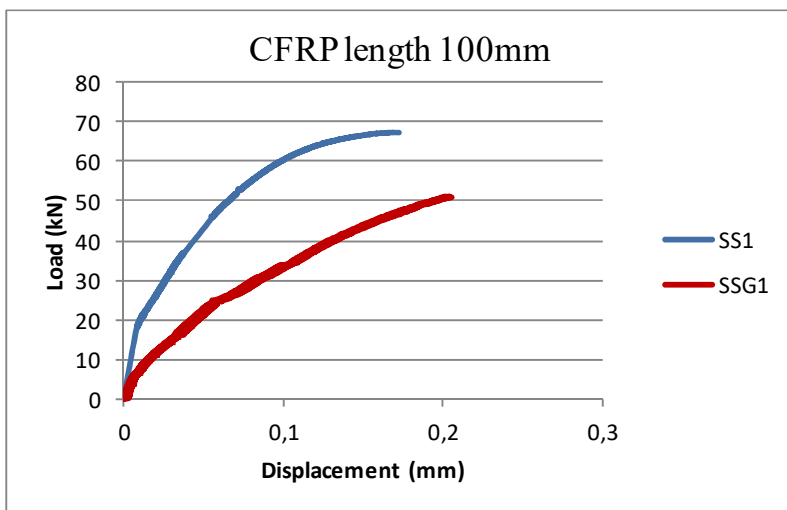


Σχήμα 3.23: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης από το επιμηκυνσιόμετρο



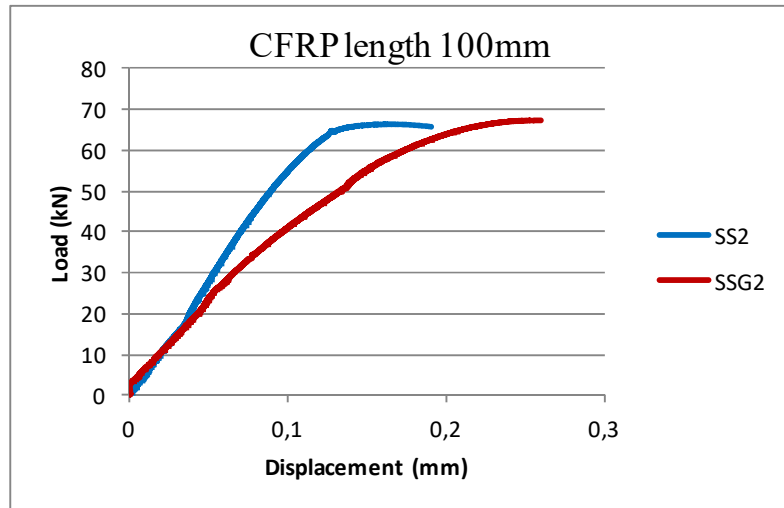
Σχήμα 3.24: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης από το επιμηκυνσιόμετρο

Προκειμένου να γίνει πιο εμφανής η διαφορά μεταξύ αμμοβολισμένων και γαλβανισμένων δοκιμίων για το κάθε μήκος ξεχωριστά ακολουθούν τα παρακάτω διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης.

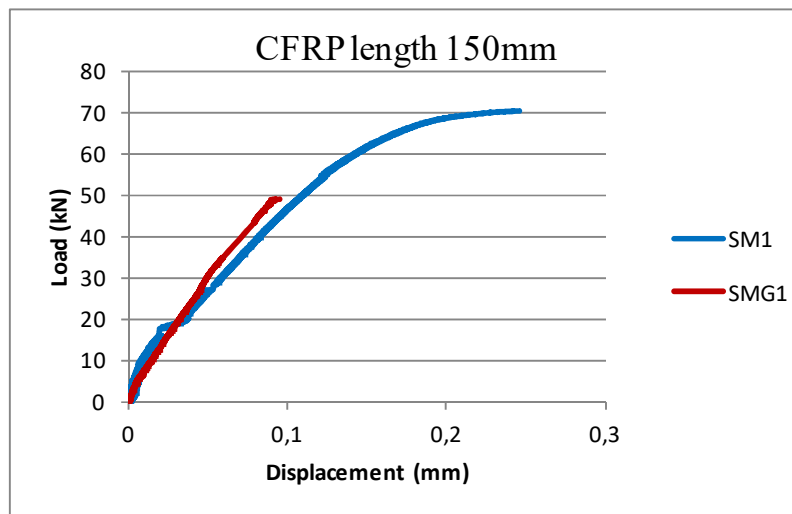


Σχήμα 3.25: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης για δοκίμια με μήκος CFRP 100 mm

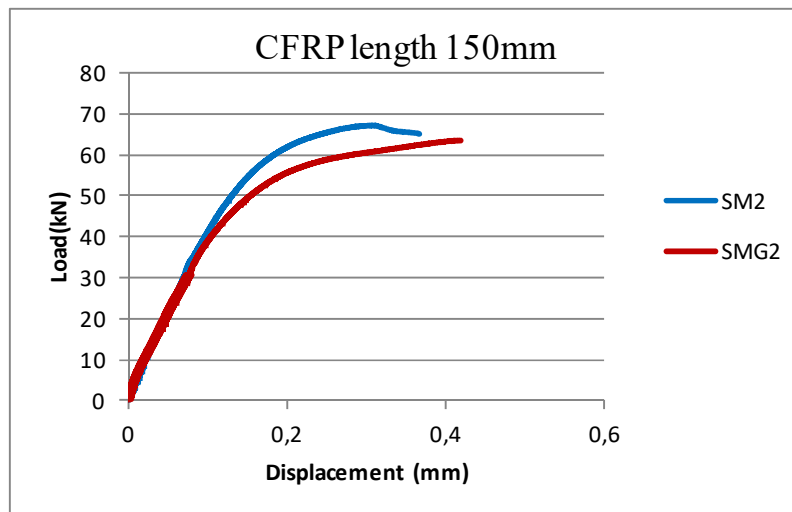




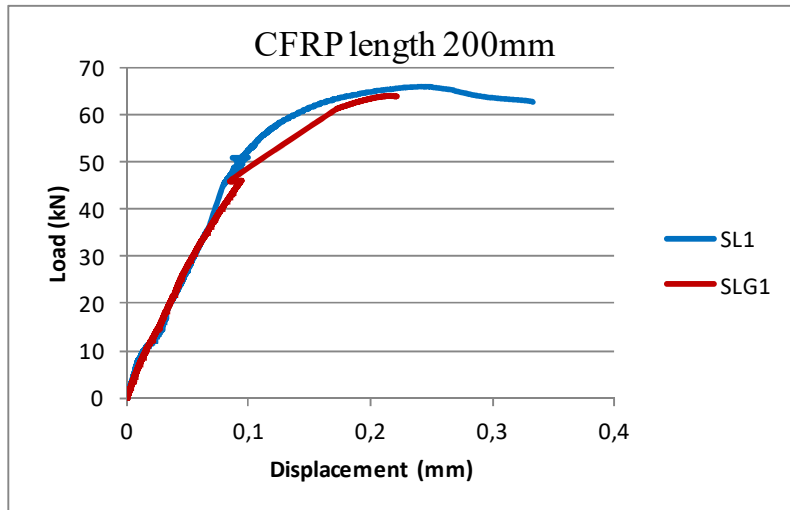
Σχήμα 3.26: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης για δοκίμια με μήκος CFRP 100 mm



Σχήμα 3.27: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης για δοκίμια με μήκος CFRP 150 mm



Σχήμα 3.28: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης για δοκίμια με μήκος CFRP 150 mm

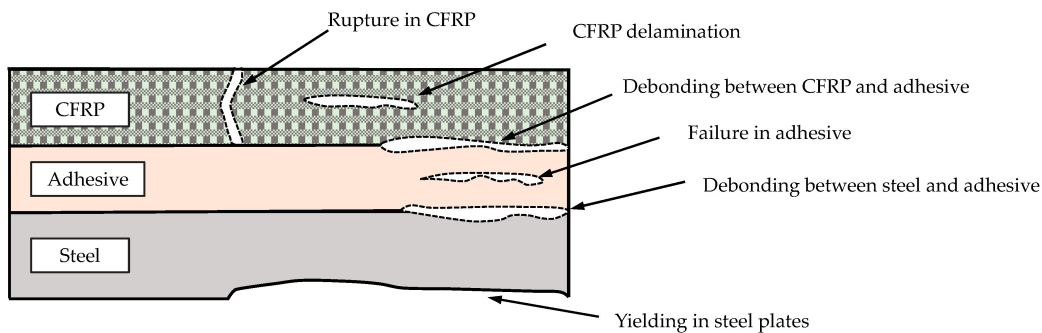


Σχήμα 3.29: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης για δοκίμια με μήκος CFRP 200 mm

Στα σχήματα 3.25 – 3.29 φαίνεται κατά την σύγκριση των δοκιμών με ίδιο μήκος ανθρακοελάσματος και διαφορετική επιφάνεια επαφής, ότι άλλοτε μεταβάλλεται το φορτίο και άλλοτε η μετακίνηση αστοχίας. Συνεπώς η διεπιφάνεια έχει σημαντικό ρόλο στην εκπόνηση του πειράματος και γενικότερα στην συμπεριφορά του δοκιμίου.

### 3.5.4 Μηχανισμοί αστοχίας σύμμικτων δοκιμίων

#### 3.5.4.1 Γενικά στοιχεία



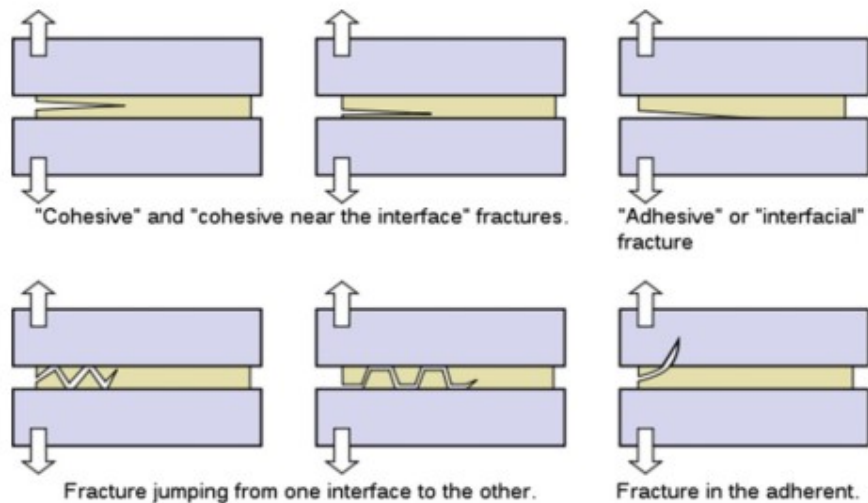
Σχήμα 3.30: Πιο κοινοί μηχανισμοί αστοχίας [5]

Οι κυριότεροι μηχανισμοί αστοχίας φαίνονται στην εικόνα 3.30. Αυτοί μπορούν να συμβούν σε όλα τα χρησιμοποιούμενα υλικά και είναι:

1. Rupture in CFRP - Διάρρηξη CFRP
2. CFRP delamination – Αποκόλληση ινών άνθρακα από την εποξειδική ρητίνη
3. Debonding between CFRP and adhesive – Αστοχία διεπιφάνειας μεταξύ CFRP και συνδετικού υλικού
4. Failure in adhesive – Αστοχία συνδετικού υλικού
5. Debonding between steel and adhesive - Αστοχία διεπιφάνειας μεταξύ χάλυβα και συνδετικού υλικού
6. Yielding in steel plates – Διαρροή χαλύβδινου ελάσματος

Η αποκόλληση των ινών άνθρακα από την ρητίνη εμφανίζεται κυρίως σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ελάσματα χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, ενώ η διαρροή του χάλυβα συμβαίνει σπανίως εξαιτίας του μεγάλου πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων που χρησιμοποιούνται συνήθως.

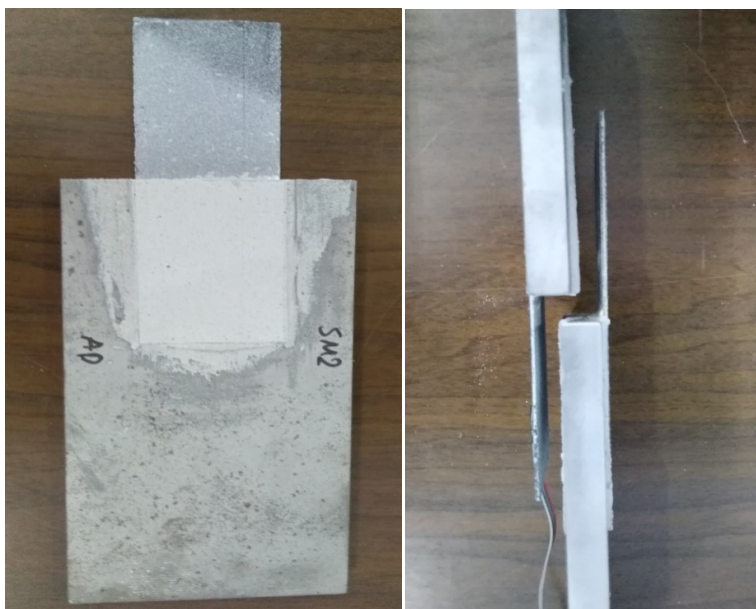
Η πιο συχνή μορφή αστοχίας είναι η αστοχία του συνδετικού υλικού. Αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι ιδιότητες της κόλλας (δηλαδή υψηλό μέτρο ελαστικότητας) , το πάχος της στρώσης του υλικού καθώς και το μήκος των ανθρακοελασμάτων. Από παρατηρήσεις που έχουν γίνει σε ανάλογα πειράματα για normal modulus ελάσματα CFRP, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση ( $E_{CFRP}=170 \text{ MPa}$ ) με μήκος μεγαλύτερο από το μήκος αγκύρωσης, υψηλό μέτρο ελαστικότητας του υλικού  $E_G=11200 \text{ MPa}$  και πάχος στρώσης  $t = 1 < 2 \text{ mm}$  αυτός είναι εμφανιζόμενος μηχανισμός αστοχίας.



Σχήμα 3.31: Διεύθυνση ρωγμών [5]

Η αστοχία του συνδετικού υλικού μπορεί να εμφανιστεί με την δημιουργία ρωγμών σε διάφορα σημεία. Συνήθως εμφανίζεται στο κέντρο του πάχους, κοντά στην διεπιφάνεια καθώς και με συνδυαστικούς τρόπους όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

### 3.5.4.2 Πραγματικοί μηχανισμοί αστοχίας



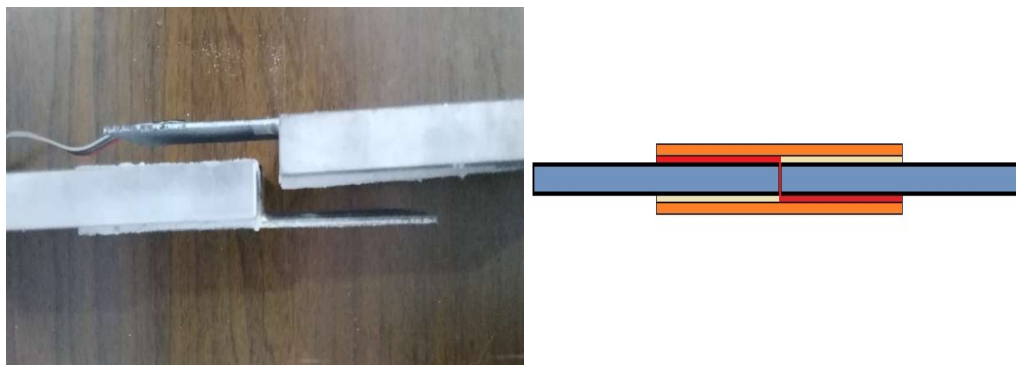
Εικόνα 3.5: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου SM2



Εικόνα 3.6: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου SLG1

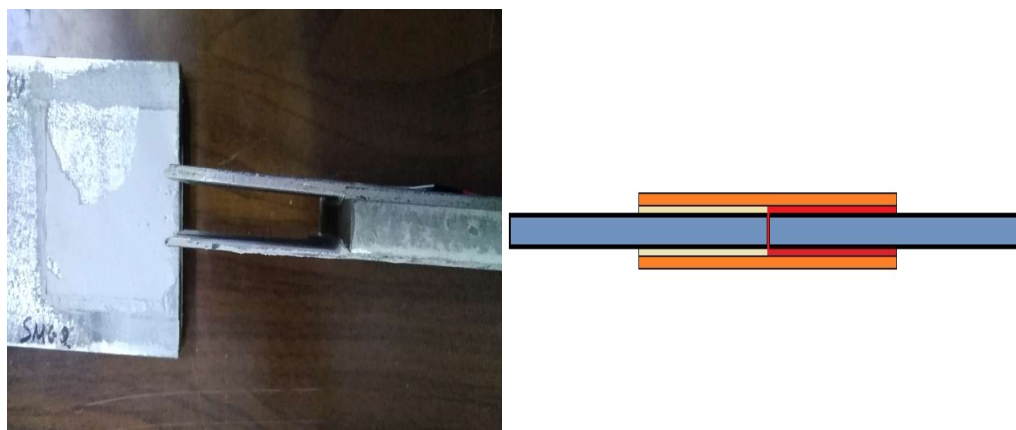
Σε όλα τα πειράματα σαν μορφή αστοχίας εμφανίζεται η αστοχία του συνδετικού υλικού. Υπάρχει διαφοροποίηση όμως ως προς την θέση της διάδοσης των ρωγμών. Στα αμμοβολισμένα δοκίμια η αστοχία εμφανίζεται κοντά στην διεπιφάνεια κόλλας – χάλυβα με αποτέλεσμα ένα μεγάλο τμήμα της κόλλας να μείνει πάνω στα ανθρακοελάσματα, ενώ στα γαλβανισμένα εμφανίζεται στην διεπιφάνεια κόλλας - CFRP.

Ακόμα εκτός από αυτή την κύρια μορφή αστοχίας, παρατηρούνται ακόμη κάποια σπασίματα πάνω στα CFRP. Τα σπασίματα αυτά εμφανίζονται σε κάθε περίπτωση μόνο από την μία πλευρά του CFRP, γι' αυτό προκύπτει το συμπέρασμα ότι δημιουργήθηκαν κατά την έξοδο των δοκιμίων από την μηχανή.



Εικόνα 3.7: Διαδρομή ρωγμής μορφής S

Σχεδόν όλα τα δοκίμια ακολουθούν το ίδιο μοτίβο. Αρχικά δημιουργείται η ρωγή από την μια πλευρά και στην συνέχεια συμβαίνει το ίδιο αντικατοπτρικά στην άλλη πλευρά. Αυτή η διαδρομή της ρωγμής παρατηρείται στα δοκίμια SS1,SS2,SM1,SM2,SL1,SL2,SSG1,SSG2,SMG1 και SLG1.



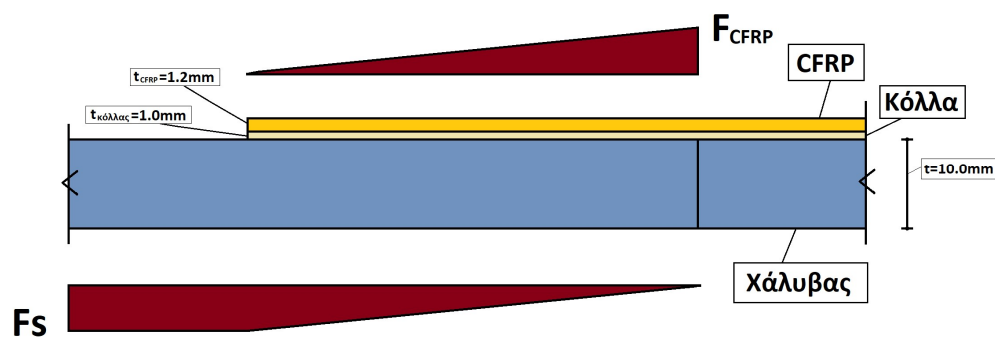
Εικόνα 3.8: Διαδρομή ρωγμής μορφής U

Αυτή η μορφή παρατηρήθηκε μόνο στο δοκίμιο SMG2.

### 3.6 Αναλυτικές σχέσεις

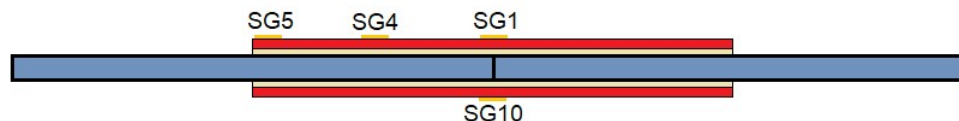
#### 3.6.1 Κατανομή δυνάμεων

Στα δοκίμια εφαρμόζεται δύναμη  $F$ . Η δύναμη αυτή μεταφέρεται σε όλα τα στοιχεία του δοκιμίου και ισχύει  $F = F_S + 2 * F_{FRP} + 2 * F_G$ . Επειδή η αξονική αντοχή του συγκολλητικού υλικού είναι αρκετά μικρή σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά θεωρείται ότι  $F_G = 0$ , άρα  $F = F_S + 2 * F_{FRP}$  σε κάθε σημείο του δοκιμίου. Σε πρώτο βήμα γίνεται η παραδοχή ότι η κατανομή της δύναμης είναι τριγωνική.



Σχήμα 3.32: Τριγωνική κατανομή δυνάμεων

Υπενθυμίζεται ότι στο δοκίμιο SL1 τοποθετούνται 3 επιμηκυσιομέτρα από την μία πλευρά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.33: Θέσεις SG στο δοκίμιο SL1

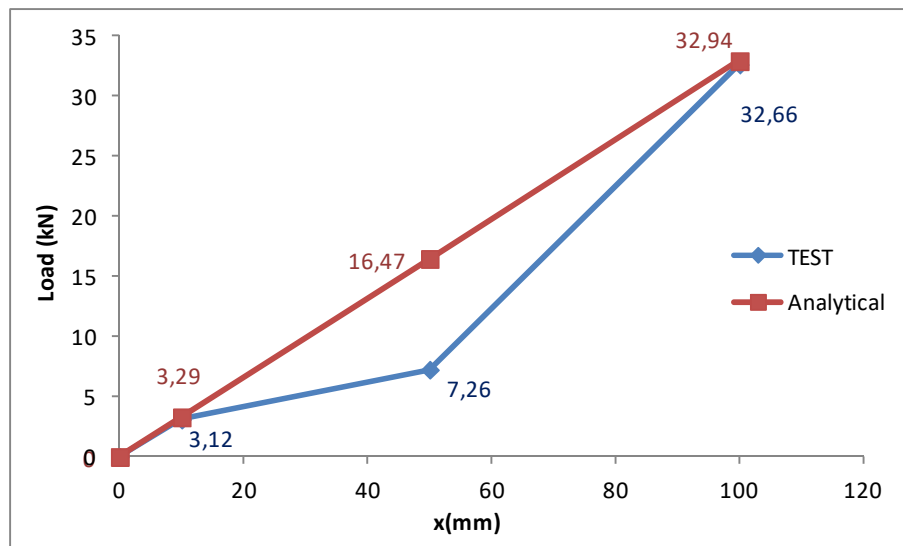
Από τις καταγραφές των επιμηκυσιομέτρων προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας.

Πίνακας 3.6: Καταγραφές επιμηκυσιομέτρων

	-	SG5	SG4	SG1
$x(\text{mm})$	0	10	50	100
$\epsilon_{\text{test}}(\mu\text{S})$	0	306.2	711.4	3202.2
$F_{\text{test}}(\text{kN})$	0	3.12	7.26	32.66
$F_{\text{ανωλ.}}(\text{kN})$	0	3.29	16.47	32.94

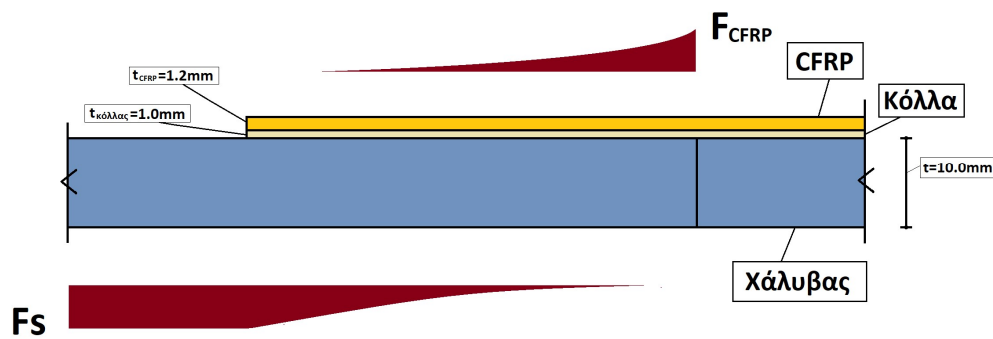
Στην πρώτη γραμμή φαίνεται η θέση τοποθέτησης των επιμηκυσιομέτρων με αφετηρία την ακμή του ανθρακοελάσματος. Στην δεύτερη γραμμή καταγράφεται η επιμήκυνση στο αντίστοιχο σημείο. Με βάση την επιμήκυνση υπολογίζεται η δύναμη από τον τύπο  $F_{\text{test}} = A_{FRP} * E_{FRP} * \epsilon_{\text{test}}$ . Με γνωστό το φορτίο αστοχίας για το δοκίμιο SL1 και από την σχέση υπολογισμού της δύναμης  $F = F_S + 2 * F_{FRP}$ , στην μέση του δοκιμίου ισχύει  $F = 2 * F_{FRP}$ . Άρα είναι γνωστή η δύναμη του CFRP σ' εκείνο το σημείο. Με βάση την

τριγωνική παραδοχή υπολογίζεται η δύναμη και στα υπόλοιπα σημεία. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται τα παραπάνω αποτελέσματα.



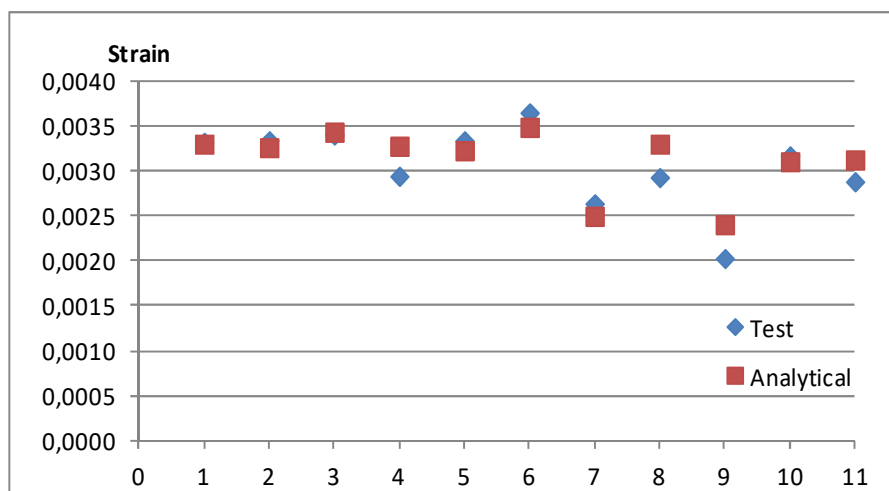
Σχήμα 3.34: Αναλυτικές και πειραματικές δυνάμεις CFRP στις θέσεις των επιμηκυσιομέτρων

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κατανομή ακολουθεί τελικά μια εκθετική μορφή, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.35: Πραγματική κατανομή δυνάμεων

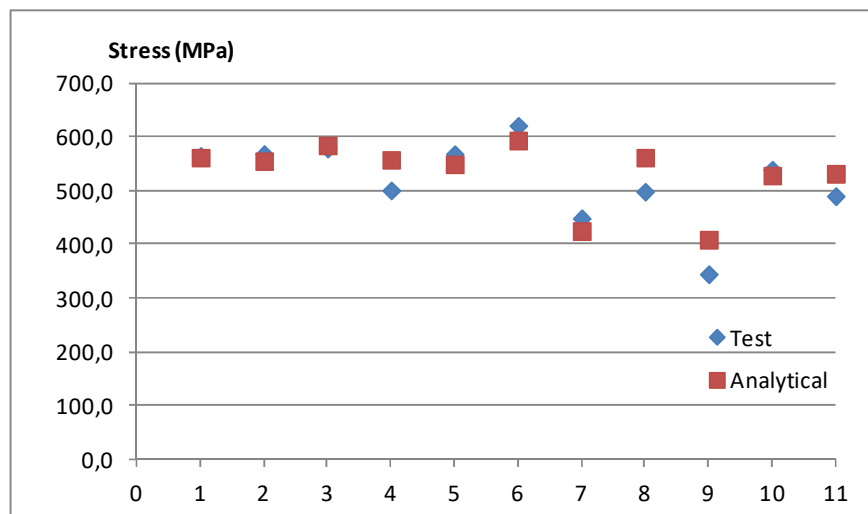
### 3.6.2 Υπολογισμός επιμηκύνσεων CFRP



Σχήμα 3.36: Σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών επιμηκύνσεων CFRP

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι επιμηκύνσεις από τον τύπο  $\varepsilon_{αναλ.} = F_{test} / (2 * b_{FRP} * t_{FRP} * E_{FRP})$ .

### 3.6.3 Υπολογισμός τάσεων CFRP



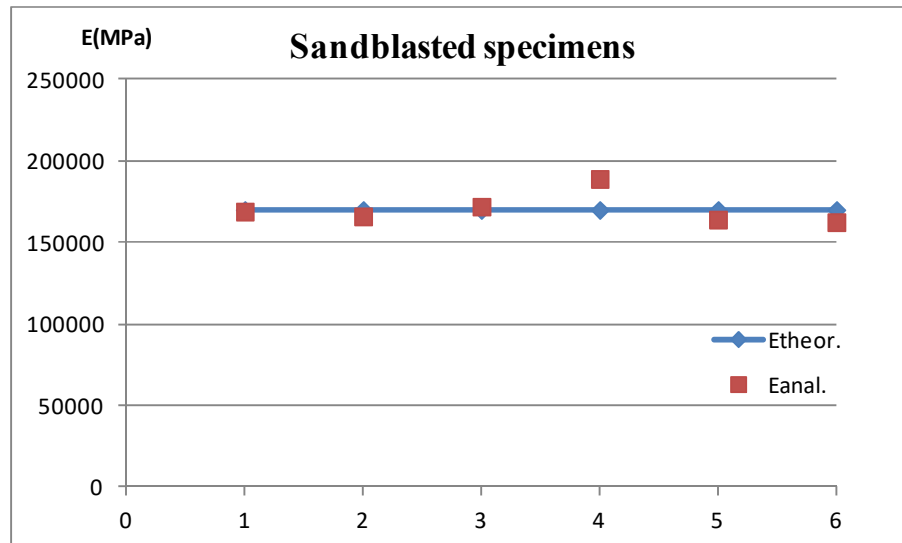
Σχήμα 3.37: Σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών τάσεων CFRP

Έπειτα υπολογίζονται οι αναλυτικές τάσεις από τον τύπο  $\varepsilon_{αναλ.} = F_{test} / (2 * b_{FRP} * t_{FRP})$ . Και στα δύο σχήματα φαίνεται ότι τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται.

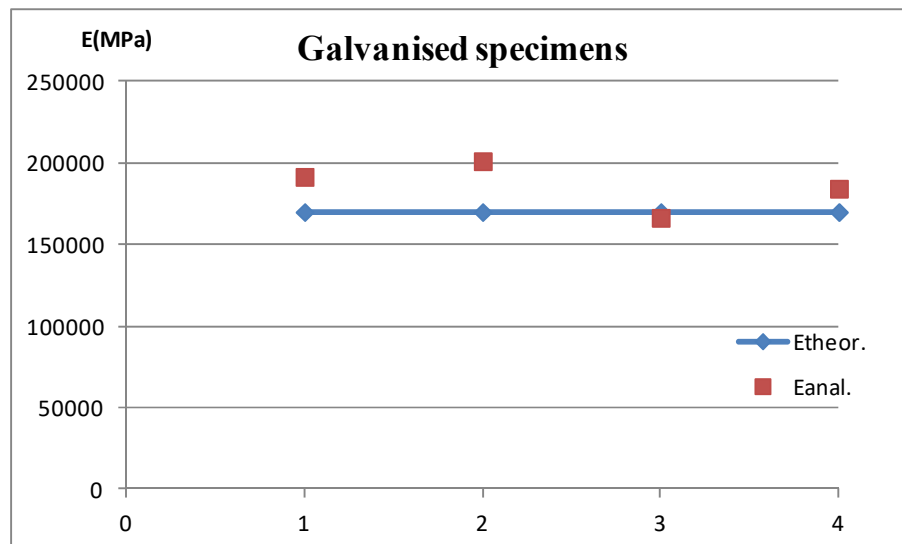


### 3.6.4 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας CFRP

Ακόμα επειδή χρησιμοποιήθηκε το μέτρο ελαστικότητας από το φύλλο ιδιοτήτων του κατασκευαστή για τα CFRP, γίνεται σύγκριση του με βάση τον αναλυτικό υπολογισμό για κάθε δοκίμιο από την σχέση  $E_{FRP}(MPa) = F_{test} * A_{FRP} / \epsilon_{test}$ .



Σχήμα 3.38: Υπολογιστικό μέτρο ελαστικότητας για τα αμμοβολισμένα δοκίμια



Σχήμα 3.39: Υπολογιστικό μέτρο ελαστικότητας για τα γαλβανισμένα δοκίμια

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αφού δεν απέχουν πολύ από την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής.

## 4 Αριθμητική προσομοίωση γωνιακών δοκιμίων κάμψης στο Abaqus

### 4.1 Εισαγωγή

Η αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Είναι μια εύχρηστη μέθοδος, που αποτελεί εξέλιξη των μητρικών μεθόδων επίλυσης διαφορικών εξισώσεων.

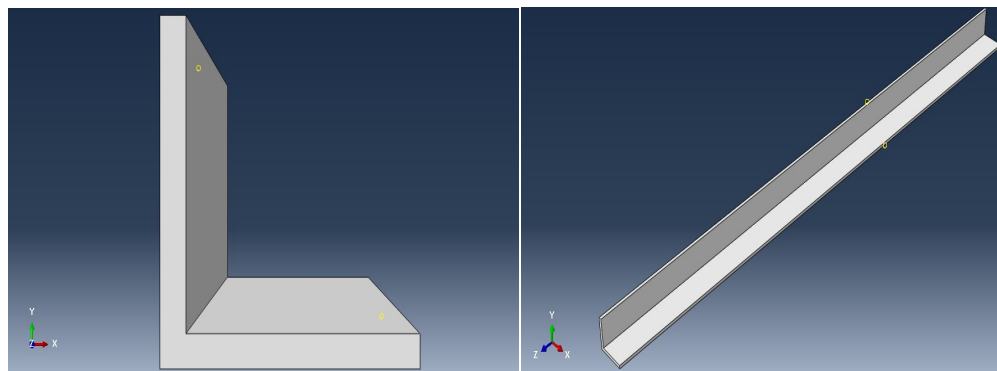
Η αρχή στην οποία βασίζεται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι ο διαμερισμός ενός σύνθετου γεωμετρικού σώματος σε ένα σύνολο απλών γεωμετρικά στοιχείων, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Κάθε ένα από αυτά τα πεπερασμένα στοιχεία αντιπροσωπεύει ένα διακριτό τμήμα της αρχικής δομής. Οι γωνίες των πεπερασμένων στοιχείων και τυχόν επιπλέον σημεία ονομάζονται κόμβοι. Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους μέσω των κόμβων που βρίσκονται στις άκρες τους και δημιουργούν ένα πλέγμα (mesh). Όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα, τόσο πιο ακριβές είναι το αποτέλεσμα και τόσο μεγαλύτερος είναι ο υπολογιστικός φόρτος.

Η αριθμητική προσομοίωση των σύμμικτων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το εμπορικό λογισμικό ABAQUS/CAE, που επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων που κυμαίνονται από σχετικά απλές γραμμικές αναλύσεις μέχρι πιο απαιτητικές μη γραμμικές προσομοιώσεις.

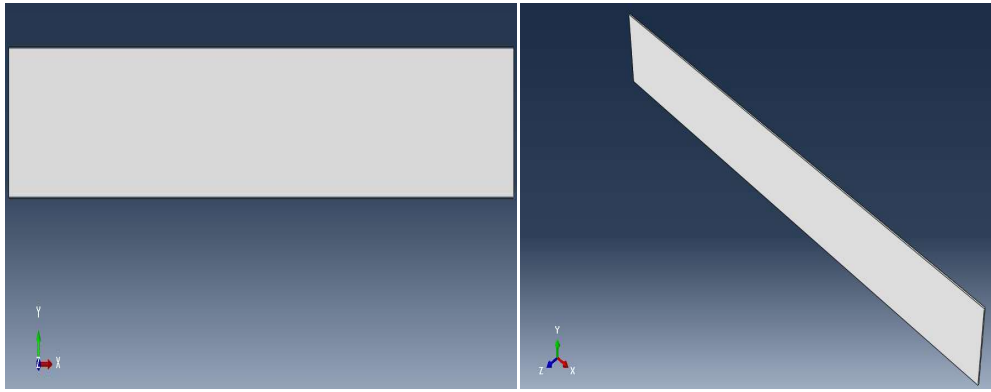
### 4.2 Παράμετροι και λεπτομέρειες μοντελοποίησης

#### 4.2.1 Προσδιορισμός γεωμετρίας

Το δοκίμιο που εξετάζεται αποτελείται από μια τριγωνική διατομή χάλυβα 70x70x7 mm, συνολικού μήκους 1500 mm και ενισχύεται εξωτερικά με δύο ελάσματα CFRP με διαστάσεις 420x50x1.2 mm. Για την προσομοίωση του χάλυβα χρησιμοποιείται τρισδιάστατο μοντέλο (3d deformable solid) με τις παραπάνω διαστάσεις. Το ίδιο χρησιμοποιήθηκε και για τα ανθρακοελάσματα. Αρχικά ορίζονται οι διατομές και των δύο υλικών και ύστερα επιλέγεται η εντολή solid extrude προκειμένου να γίνουν τα προσομοιώματα των στοιχείων τρισδιάστατα.



Σχήμα 4.1: Α: Διατομή χάλυβα Β: 3d προσομοίωμα χάλυβα

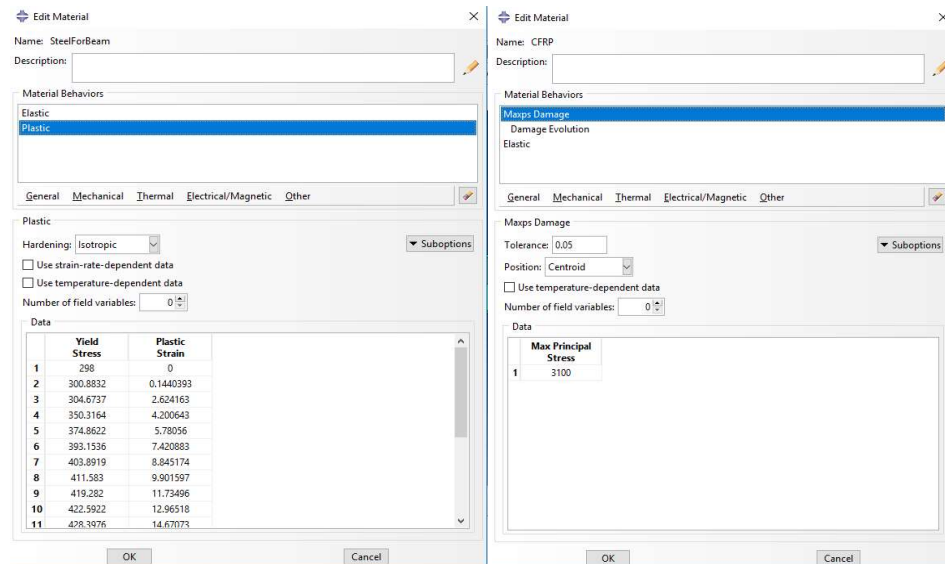


Σχήμα 4.2: A: Διατομή CFRP B: 3d προσομοίωμα CFRP

#### 4.2.2 Προσδιορισμός ιδιοτήτων υλικού

Τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του υλικού του χάλυβα είναι αυτά που αναφέρονται στην δοκιμή εφελκυσμού στην ενότητα 2.2.1.2. Για την ελαστική περιοχή ορίζεται το μέτρο ελαστικότητας  $E=210000$  MPa και ο λόγος Poisson  $\nu=0.3$ . Για την πλαστική περιοχή χρησιμοποιούνται διακριτές τιμές του διαγράμματος από την διαρροή μέχρι την αστοχία (σχήμα 4.3).

Όσον αφορά τις ιδιότητες των CFRP χρησιμοποιήθηκαν οι συνολικές του ελάσματος, αντί να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά οι ιδιότητες των ινών και της εποξειδικής ρητίνης αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι ο προσανατολισμός όλων των ινών είναι ίδιος, οπότε η συμπεριφορά του υλικού σ' αυτήν την διεύθυνση είναι η κρίσιμη. Συνεπώς στην επιλογή material behavior χρησιμοποιείται η κατηγορία Maxps damage. Σ' αυτήν ορίζεται η μέγιστη τάση αστοχίας ίση με 3100 MPa και η μέγιστη παραμόρφωση ίση με 1.7%. Ακόμα ορίζεται το μέτρο ελαστικότητας  $E = 170000$  MPa.



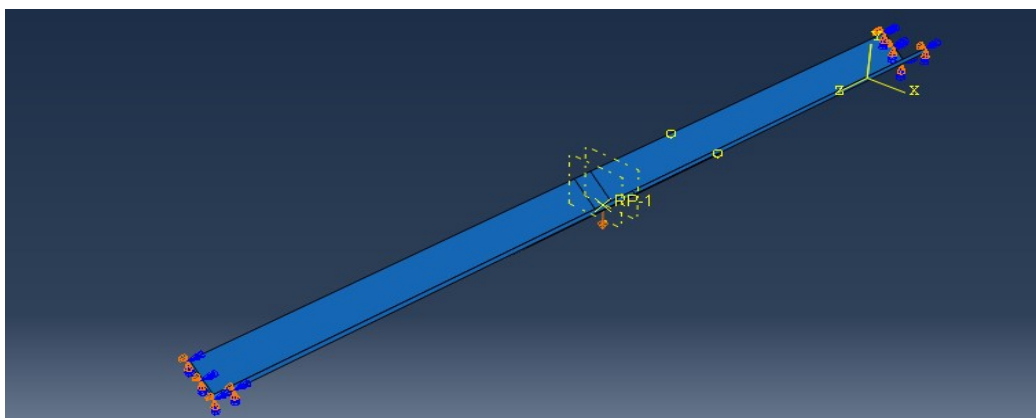
Σχήμα 4.3: A: Ιδιότητες χάλυβα B: Ιδιότητες CFRP

Όλες οι τιμές των τάσεων δίνονται σε MPa, διότι για τον σχεδιασμό των διατομών χρησιμοποιήθηκαν χιλιοστά.

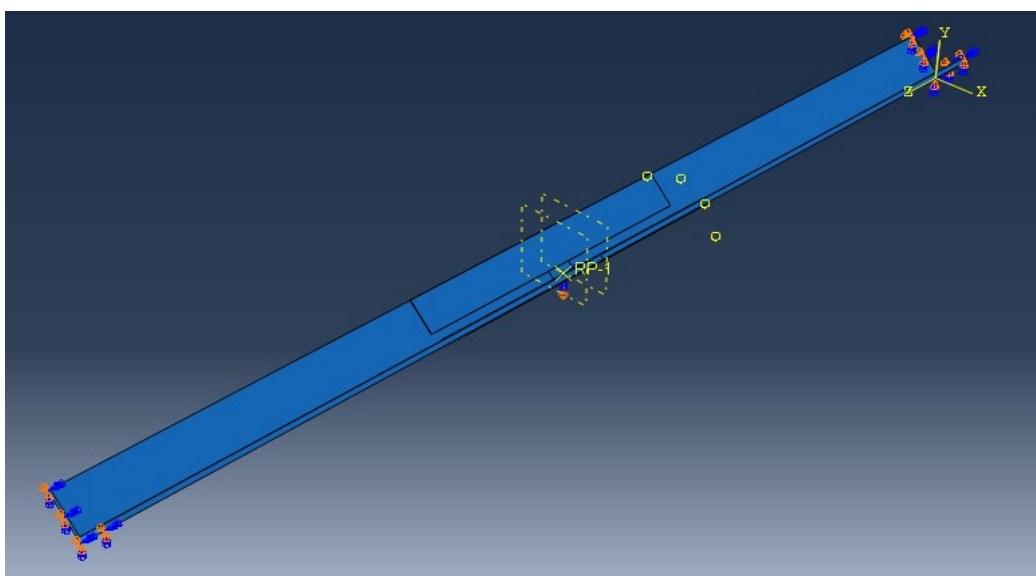
### 4.2.3 Προσδιορισμός συνθηκών στήριξης και φόρτισης

Προκειμένου να προσομοιωθεί ο τρόπος φόρτισης, αρχικά ορίζεται ένα τμήμα πάνω στο κέντρο της δοκού με μήκος ίδιο μ' αυτό που είχαν οι αντίστοιχες βοηθητικές διατάξεις κατά την εκπόνηση των πειραμάτων (εικόνα 2.21). Έπειτα προκειμένου να ασκηθεί το φορτίο ορίζεται ένα σημείο αναφοράς (RP) το οποίο ενώνεται με την κάθε επιφάνεια φόρτισης. Η σύνδεση τους γίνεται με την επιλογή coupling, η οποία συνδέει τις μετακινήσεις της επιφάνειας με του σημείου. Στα δοκίμια B-T1-V και B-T2-V σαν μετακινήσεις του σημείου αναφοράς ορίζεται κατακόρυφη μετατόπιση ίση με 150 mm και όλες οι υπόλοιπες είναι ελεύθερες. Στα δοκίμια B-T1-L και B-T1-LI τα οποία είναι ευαίσθητα σε πλευρικό λυγισμό δεσμεύονται όλες οι μετακινήσεις.

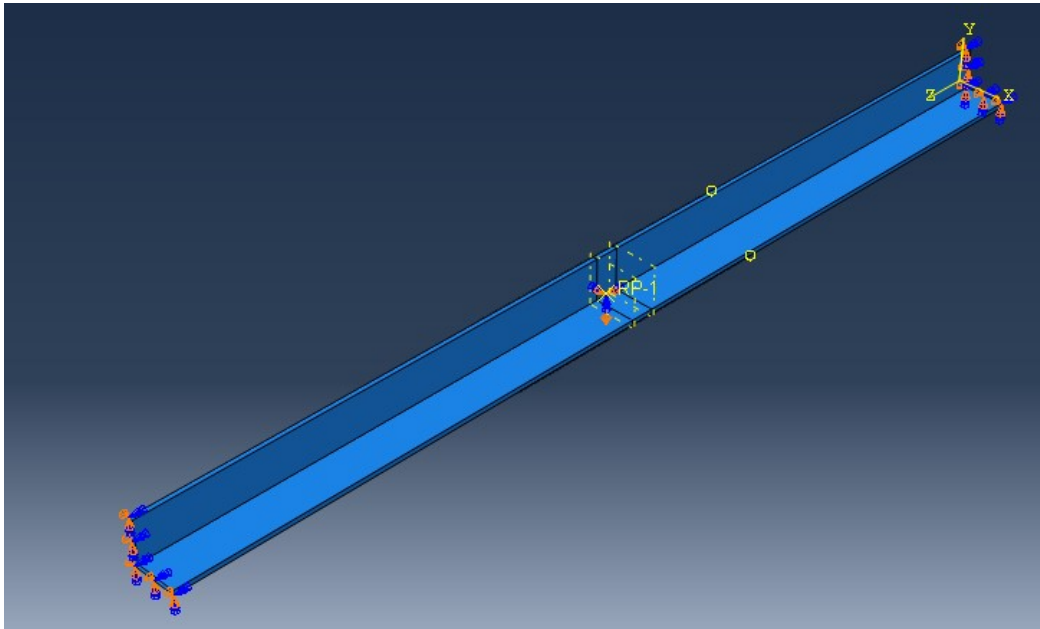
Όσον αφορά τις δεσμεύσεις των στηρίξεων εκεί δεσμεύονται οι μετακινήσεις στους άξονες x,y καθώς και οι στροφές γύρω από τους άξονες y και z.



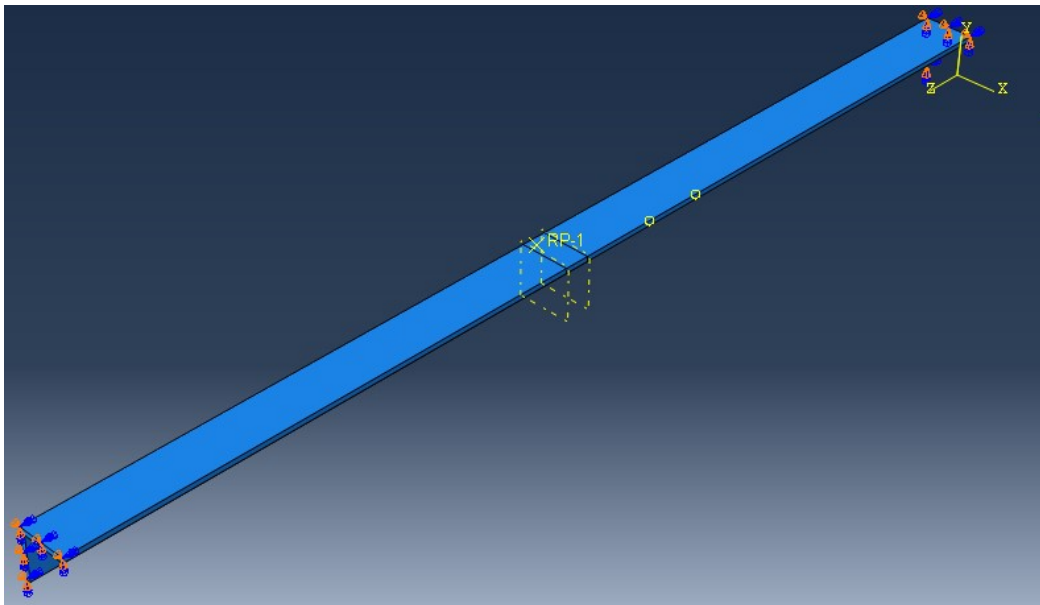
Σχήμα 4.4: Δεσμεύσεις δοκιμίου B-T1-V



Σχήμα 4.5: Δεσμεύσεις δοκιμίου B-T2-V



Σχήμα 4.6: Δεσμεύσεις δοκιμίου B-T1-L

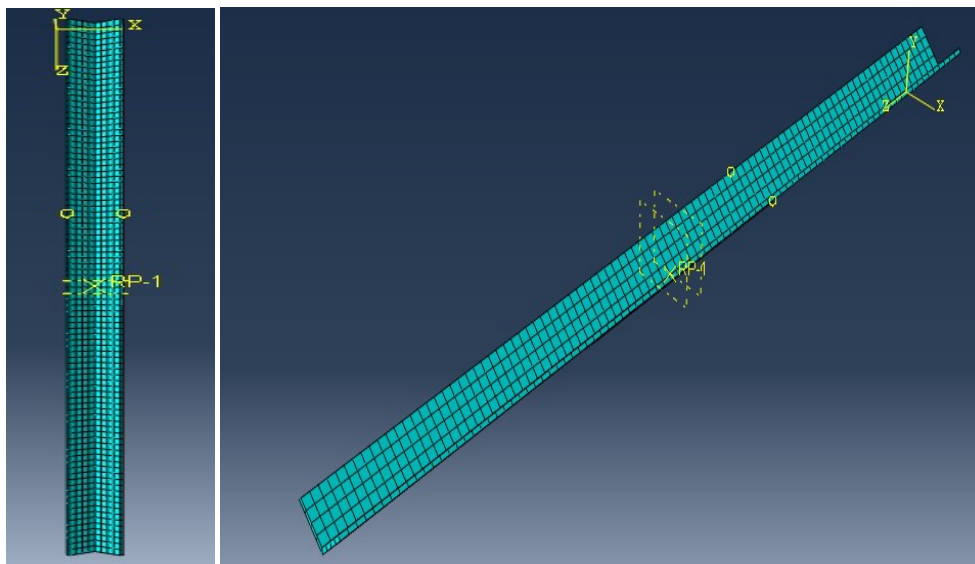


Σχήμα 4.7: Δεσμεύσεις δοκιμίου B-T1-LI

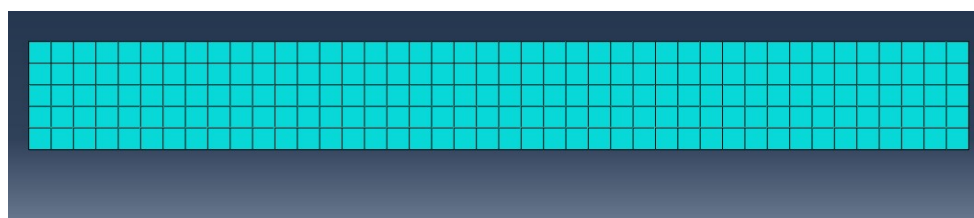
#### 4.2.4 Προσδιορισμός πεπερασμένου στοιχείου και πλέγματος

Τα γεωμετρικά μοντέλα έχουν απλό σχήμα, οπότε η διακριτοποίησή τους είναι σχετικά εύκολη υπόθεση. Επιλέγονται εξαεδρικά γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία μορφής “τούβλου” με οχτώ κόμβους (C3D8R) τόσο για τον χάλυβα όσο και για τα CFRP. Στην συνέχεια επιλέγεται ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων. Σε κάθε πέλμα ο αριθμός των στοιχείων πρέπει να είναι τουλάχιστον τρία γι’ αυτό επιλέγεται σαν καθολικό μέγεθος των στοιχείων 18 mm για την χαλύβδινη δοκό, ενώ 10 mm για τα ελάσματα. Μέσα από επαναληπτικές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι πιο πυκνή διακριτοποίηση στα CFRP δεν οδηγεί

σε διαφορετικά αποτελέσματα, ενώ στον χάλυβα οδηγεί σε τοπικά σημεία διαρροής τα οποία δεν ανταποκρίνονται στην πραγματική συμπεριφορά της δοκού.



Σχήμα 4.8: Διακριτοποίηση χαλύβδινης δοκού



Σχήμα 4.9: Διακριτοποίηση ανθρακοελάσματος

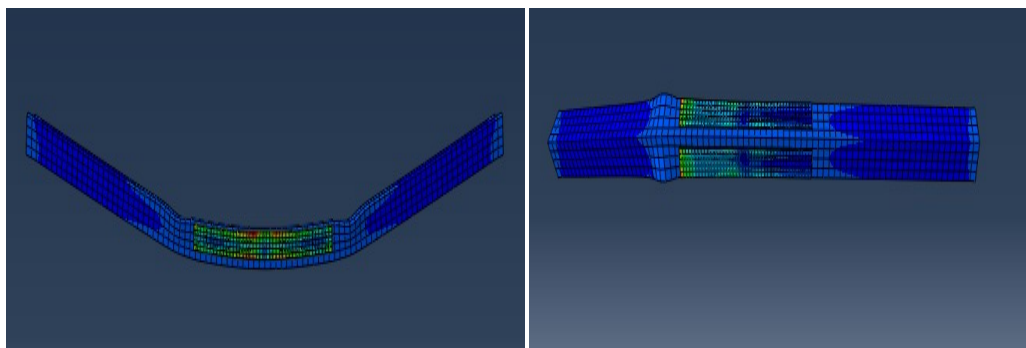
#### 4.2.5 Αλληλεπίδραση (Interaction)

Ένα ακόμα σημείο που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή είναι ο τρόπος σύνδεσης των ανθρακοελασμάτων με τον χάλυβα. Αρχικά επιδιώχτηκε η προσομοίωση της συγκολλητικής ρητίνης. Η προσπάθεια αυτή όμως εγκαταλείφτηκε, διότι προκειμένου η συμπεριφορά της ρητίνης να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα έπρεπε να γίνει προσομοίωση με συνεκτικά στοιχεία (cohesive elements) όπως αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Το πρόβλημα εδώ εντοπίζεται στο γεγονός ότι για τα στοιχεία αυτά και κατ' επέκταση για την ρητίνη έπρεπε να έχουν γίνει πειραματικές δοκιμές από τις οποίες θα προέκυπταν στοιχεία όπως η ενέργεια θραύσης.

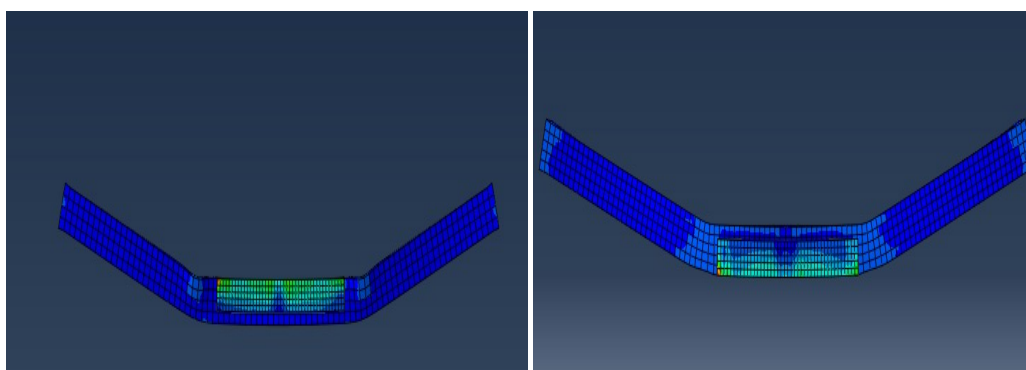
Τελικά οι δύο επιφάνειες συνδέονται με άρρηκτους συνδέσμους (tie constrains). Αυτό δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα αφού εξαιτίας της θλίψης των CFRP αυτά αστοχούσαν πριν από το συνδετικό υλικό.

#### 4.2.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα

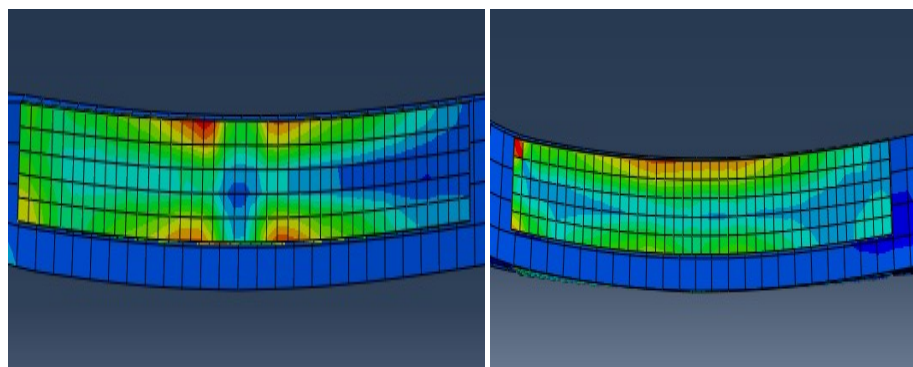
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφωμένες εικόνες των σύμμικτων δοκιμίων όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα ανάλυσης.



Σχήμα 4.10:Α: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου B-T1-V Β: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου B-T2-V



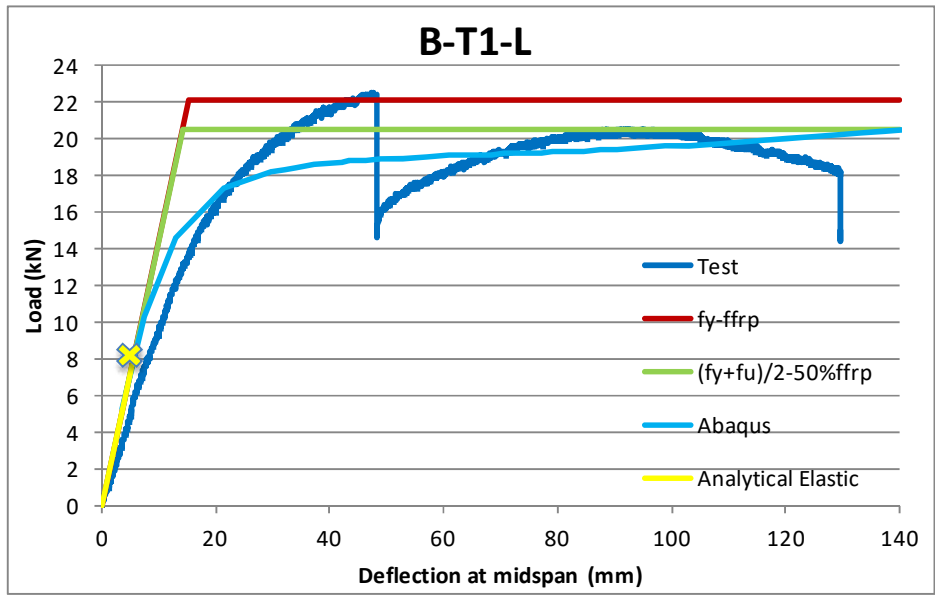
Σχήμα 4.11:Α: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου B-T1-L Β: Παραμορφωμένη εικόνα δοκιμίου B-T1-LI



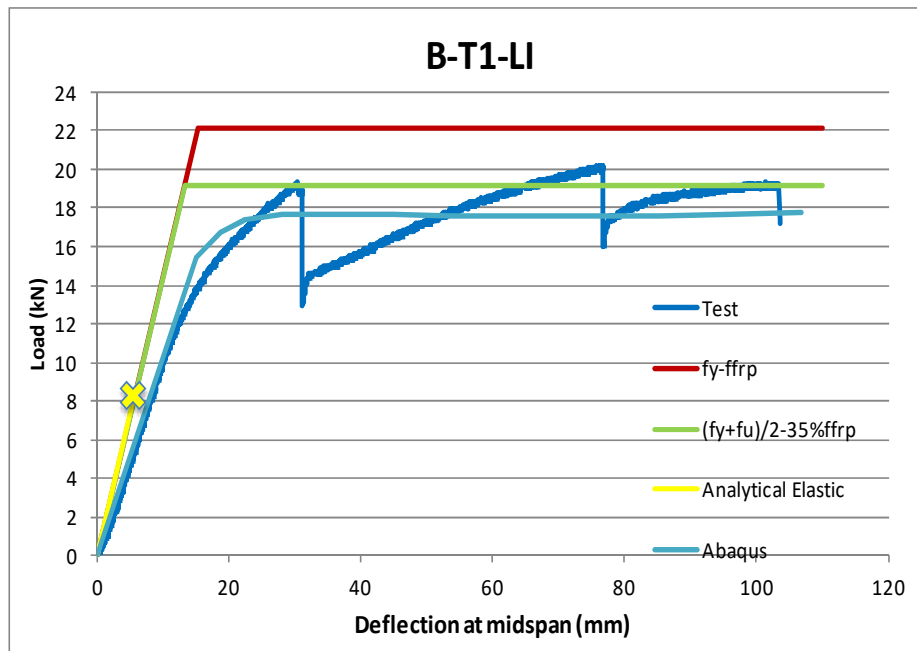
Σχήμα 4.12: Τάσεις Von Mises ανθρακοελασμάτων

Στο σχήμα 4.12 φαίνονται τα τμήματα των CFRP τα οποία καταπονούνται έντονα τόσο στο πάνω όσο και κάτω μέρος, ενώ περίπου στην μέση φαίνεται ο ουδέτερος άξονας. Ακόμα στα άκρα είναι πιο έντονες οι τάσεις, γι αυτό και είχε γίνει περίσφιξη με ανθρακονήματα μιας διεύθυνσης κατά την εκπόνηση των πειραμάτων.

Στην συνέχεια φαίνονται τα διαγράμματα φορτίου-βέλους. Για να γίνουν πιο κατανοητά απεικονίζονται πάνω στα διαγράμματα που δόθηκαν στην ενότητα 2.4.2.

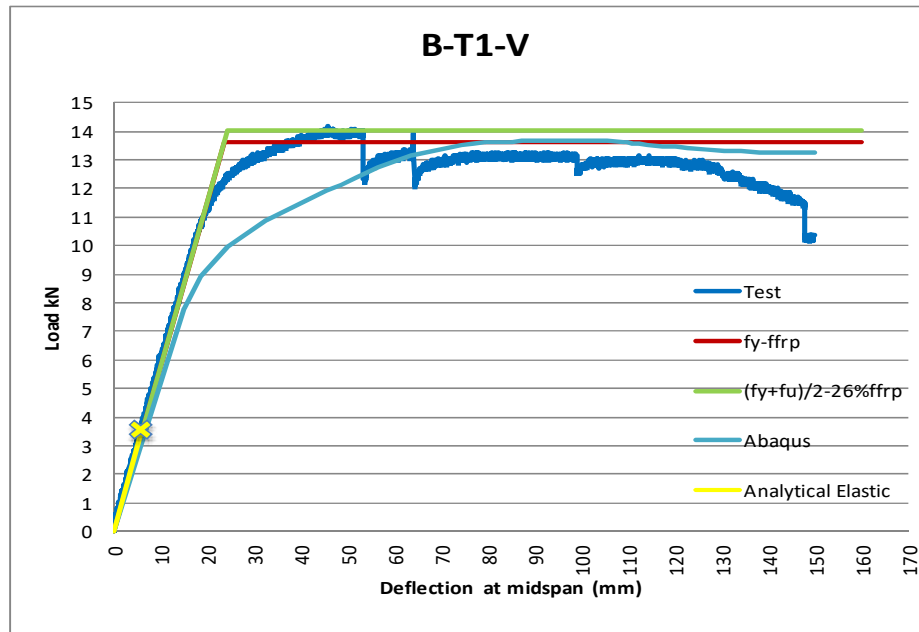


Σχήμα 4.13: Διαγράμματα φορτίου – βέλους δοκιμίου B-T1-L

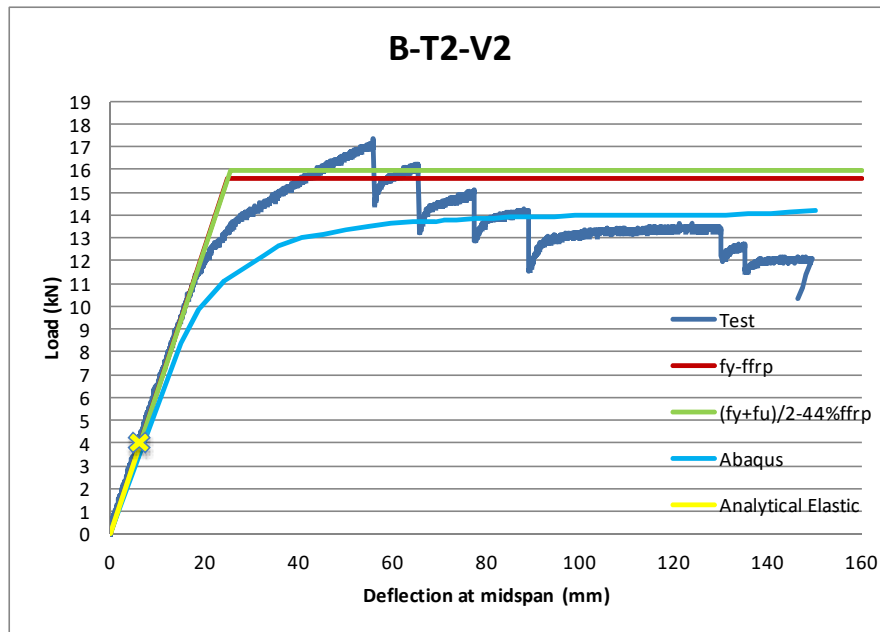


Σχήμα 4.14: Διαγράμματα φορτίου – βέλους δοκιμίου B-T1-LI





Σχήμα 4.15: Διαγράμματα φορτίου – βέλους δοκιμίου B-T1-V



Σχήμα 4.16: Διαγράμματα φορτίου – βέλους δοκιμίου B-T2-V2

## 5 Συμπεράσματα

### 5.1 Γενικά

Η παρούσα εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται η ανάλυση της συμπεριφοράς γωνιακών δοκιμίων χάλυβα ενισχυμένα με ελάσματα CFRP υπό κάμψη με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς των σύμμικτων αυτών δοκιμίων και την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων τόσο με αναλυτικούς τύπους όσο και με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Το δεύτερο μέρος αφορά την μελέτη χαλύβδινων ελασμάτων ενισχυμένων με CFRP με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών τόσο του συνολικού δοκιμίου όσο και των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελείται.

Πριν την εφαρμογή των πειραμάτων πραγματοποιείται σκληρομέτρηση του χάλυβα και έπειτα δοκιμές εφελκυσμού προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή του. Τα αποτελέσματα τους οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα με χάλυβα πραγματικής αντοχής 436 MPa. Στους υπολογισμούς που γίνονται χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού.

### 5.2 Πειράματα κάμψης

Συγκεκριμένα για τα δοκίμια που υπόκεινται σε κάμψη, η ενίσχυση με τα ανθρακοελάσματα οδηγεί σε αύξηση της αντοχής ενώ η δυσκαμψία δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό.

Η αστοχία των δοκιμίων ακολουθεί το ίδιο μοτίβο, με εξαίρεση το δοκίμιο B-T2-V στο οποίο υπήρξε αστοχία λόγω του μήκους αγκύρωσης των CFRP. Στα υπόλοιπα δοκίμια αρχικά παρατηρείται αποκόλληση του θλιβόμενου τμήματος των CFRP με σημεία ψαθυρής αστοχίας στην θλιβόμενη ζώνη όσο και με αστοχία των ινών στην εφελκυστική.

Όσον αφορά την εφαρμογή των αναλυτικών τύπων, προσεγγίζεται η συνολική συμπεριφορά των δοκιμίων με την χρήση διγραμμικής καμπύλης. Για τον προσδιορισμό της καμπύλης γίνεται διερεύνηση της συμπεριφοράς των υλικών. Η παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς οδηγεί σε ιδιαίτερα αντιοικονομικά αποτελέσματα, ενώ για την ελαστοπλαστική γίνεται περαιτέρω διερεύνηση. Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι ο χάλυβας βρίσκεται στην διαρροή και τα CFRP αναπτύσσουν την μέγιστη εφελκυστική τάση. Στην δεύτερη περίπτωση ο χάλυβας είναι στην περιοχή της κράτυνσης και τα ανθρακοελάσματα έχουν την τάση που αναπτύσσεται στην πρώτη αστοχία του εκάστοτε δοκιμίου. Τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω περιπτώσεων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, οπότε θεωρείται ότι η εφαρμογή των τύπων της πρώτης υποπερίπτωσης είναι πιο εύχρηστα.

Ο αναλυτικός προσδιορισμός της ροπής αδράνειας των δοκιμίων ταυτίζεται με τις πραγματικές με εξαίρεση τα δοκίμια μορφής L και LI στα οποία παρατηρείται στροφή κατά την εκπόνηση των πειραμάτων και η οποία επιβεβαιώνεται από τις καταγραφές των LVDT. Η στροφή αυτή θεωρείται ότι οφείλεται για το σφάλμα στον υπολογισμό της δυσκαμψίας.

Όλα τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζοντας μικρές αποκλίσεις στην αντοχή των δοκιμίων. Οι δυσκαμψίες

που προκύπτουν από τις αναλύσεις ταυτίζονται απολύτως μ' αυτές που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους.

### 5.3 Πειράματα διάτμησης

Οι βασικές παράμετροι που εξετάζονται σ' αυτή την περίπτωση είναι το είδος της επιφάνειας του χάλυβα μεταξύ αμμοβολισμένης και γαλβανισμένης. Η αμμοβολισμένη επιφάνεια προσφέρει καλύτερη διεπιφάνεια μεταξύ αυτής και της ρητίνης επικόλλησης με αποτέλεσμα μεγαλύτερη δύναμη αστοχίας σε σχέση με την γαλβανισμένη επιφάνεια.

Επίσης μελετάται το μήκος αγκύρωσης των CFRP. Γίνεται διερεύνηση μεταξύ ανθρακοελασμάτων 100, 150 και 200 mm με σταθερά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των CFRP και της ρητίνης. Παρατηρείται από τα αποτελέσματα, ότι όσο και να αυξάνεται το μήκος δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά η δύναμη αστοχίας. Συνεπώς το μήκος αγκύρωσης είναι μικρότερο ή ίσο με 100 mm.

Όσον αφορά την μορφή αστοχίας στην περίπτωση των αμμοβολισμένων δοκιμίων η αστοχία συμβαίνει μεταξύ της διεπιφάνειας της ρητίνης και των ανθρακοελασμάτων, ενώ για τα γαλβανισμένα δοκίμια εμφανίζεται μεταξύ του χάλυβα και της ρητίνης. Και στις δύο περιπτώσεις η ρωγμή που δημιουργείται και οδηγεί στην αστοχία έχει την μορφή S.

Ακολουθεί ο προσδιορισμός κατανομής των δυνάμεων. Με βάση τα αποτελέσματα των επιμηκυνσιομέτρων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κατανομή των δυνάμεων ακολουθεί εκθετική μορφή, αντί για τριγωνική που ήταν η αρχική παραδοχή.

Τέλος υπολογίζεται με αναλυτικούς τύπους οι επιμηκύνσεις, οι τάσεις και το μέτρο ελαστικότητας των CFRP. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν πολύ μικρή απόκλιση τόσο από τα πειραματικά αποτελέσματα, όσο και από τις τιμές που δίνει ο κατασκευαστής.

## 6 Βιβλιογραφία

### 6.1 Βιβλιογραφικές αναφορές

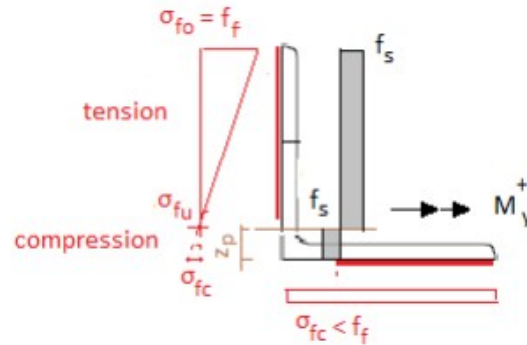
1. Βλαχάκη-Καραγιαννοπούλου Σ. (2018). «Συμπεριφορά στοιχείων από ινοπλισμένα πολυμερή με πειραματικές και αναλυτικές μεθόδους». Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
2. Γκρέτσα Ε., Φλαμιάτος Μ., (2017). «Ενίσχυση τοιχοποιίας με υαλονήματα, ανθρακονήματα, ανθρακόλαμες και ρητίνες». Πτυχιακή εργασία, Τμήμα πολιτικών μηχανικών Τ.Ε., ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα
3. Παϊπέτης Α., Μπάρκουλα Μ. «Σύνθετα υλικά: Χαρακτηρισμός και ιδιότητες». Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα.
4. Vlachakis K. (2018), “Analysis and design of a telecommunication steel tower strengthened with FRP plates”. Master thesis, Institute of steel structures, National Technical University of Athens, Greece.
5. Yahya, Najeb Ali (2015). “Failure analysis of bonded steel/CFRP laminate connections”. PhD thesis, College of Science and Engineering, University of Glasgow, Glasgow, UK.
6. J.G. Teng, T. Yu, D. Fernando (2012). “Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites”. Journal of construction Steel Research 78, 131-143.
7. «[https://en.wikipedia.org/wiki/Strain\\_gauge](https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge)», [cited 25/09/2019]

### 6.2 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (1999). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., (2005β). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. Σταυρουλλά Α., Τρουπάκη Β. (2006) , ). «Συγκριτική μελέτη συμπεριφοράς δοκών οπλισμένων με GFRP και χάλυβα». Διπλωματική εργασία, Τμήμα πολιτικών μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Θεσσαλία.
5. Στάθη Χ. (2011). «Αριθμητική Προσομοίωση Συμπεριφοράς Δομικών Στοιχείων Επισκευασμένων με Εξωτερικές Λωρίδες Ινοπλισμένων Πολυμερών». Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
6. Γκοτσοπούλου Ι., Κρεμαστιώτη Α., (2008). «Σύνθετα υλικά σε νέες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα Ι». Πτυχιακή εργασία, Τμήμα πολιτικών δομικών έργων, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα.
7. Castagnetti D., Dragoni E., Spaggiari A. (2011). “Failure analysis of complex bonded structures: Experimental tests and efficient finite element modeling by tied mesh method”. International Journal of Adhesion & Adhesive 31, 338-346.
8. Campilho, de Moura, Ramantani, Morais, Domingues “Tensile behavior of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single and double strap repairs”. Portugal.

9. Sabrina Fawzia, Riadh Al-Mahaidi, Xiao-Ling Zhao, (2006). "Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP", *Composite structures* 75, 156-162.
10. Chao Wu, Xiao-Ling Zhao, Wing Kong Chiu, Riadh Al-Mahaidi, Wan Hui Duan (2013). "Effect of fatigue loading on the bond behavior between UHM CFRP plates and steel plates", *Composites: Part B* 50, 344-353.
11. Chao Wua, Xiaoling Zhaoa, Wen Hui Duana, Riadh Al-Mahaidib (2011). "Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel", *Thin wall structures* 51, 147-157.
12. Priya Dharsini, Bhuvaneshwari, Palani, Mohan Ganesh, Nagesh R. Iyer, (2014). "FEA Studies on the Interfacial Behavior of Epoxy-CFRP Composites", *Journal of Civil Engineering Research* 4(2A), 26-30.
13. Jae-Seung Yoo, Viet-Hoai Truong, Min-Young Park, Jin-Ho Choi, Jin-Hwe Kweon, (2016). "Parametric study on static and fatigue strength recovery of scarf-patch-repaired composite laminates", *Composite Structures* 140, 417-432.
14. Jofre Luis Duran, Julian Eloy Olague, (2013). "Modelling of moisture ingress and joint degradation", Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.
15. Schnerch D., Stanford K., Lanier B., "Use of high modulus carbon fiber reinforced polymers (CFRP) for strengthening steel structures", Diploma thesis, Department of civil, construction and environmental, North Carolina State University, North Carolina.

## Παράρτημα Α. Σχέση υπολογισμού ελαστοπλαστικής ροπής για σύστημα συντεταγμένων $y - z$



Σχήμα 1: Κατανομή τάσεων για ελαστοπλαστική συμπεριφορά

$$\sigma_{fo} = f_f$$

$$\sigma_{fu} = f_f \cdot \frac{h - z_p - b_f}{h - z_p}$$

$$\sigma_{fc} = f_f \cdot \frac{z_p}{h - z_p}$$

$$\text{Tension force} \quad N_t = f_s \cdot t \cdot (h - z_p) + \frac{\sigma_{fo} + \sigma_{fu}}{2} \cdot t_f \cdot b_f$$

$$\text{Compression force} \quad N_c = f_s \cdot t \cdot (h + z_p) + f_f \cdot \frac{z_p}{h - z_p} \cdot t_f \cdot b_f$$

$N_c = N_t \rightarrow$  Determination of position of neutral axis from relation

$$a \cdot z_p^2 - 2b \cdot z_p - c = 0$$

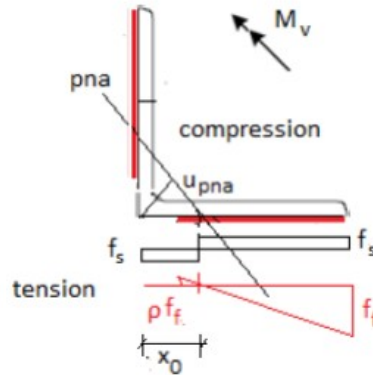
Where:

$$a = 2 f_y t \quad b = f_s t h + f_f b_f t_f \quad c = - f_f b_f t_f (h - b_f/2)$$

$$\text{position of neutral axis } z_p = \frac{b - \sqrt{b^2 + ac}}{a} > t + r$$

$$M_{u,y} = f_s \cdot t \cdot (h + z_p) \cdot \left(z_p - \frac{t}{2}\right) + \sigma_{fc} \cdot t_f \cdot b_f \cdot z_p + 0.5 \cdot f_s \cdot t \cdot (h - z_p)^2 + \frac{\sigma_{fo} + \sigma_{fu}}{2} \cdot t_f \cdot (h - b_f) \cdot \frac{2}{3} \left(\frac{5}{3} b_f - z_p\right)$$

## Παράρτημα Β. Σχέση υπολογισμού ελαστοπλαστικής ροπής για σύστημα συντεταγμένων $u - z$



Σχήμα 2: Κατανομή τάσεων για ελαστοπλαστική συμπεριφορά

$$\text{Stress ratio: } \rho = \frac{x_0 - (h-b)}{h-x_0}$$

$$\text{Compression/force } N_c = f_s \cdot t \cdot (h - x_0) + 0,5 f_f t_f \cdot (h - x_0)$$

$$\text{Tension/force } N_t = f_s \cdot t \cdot x_0 + 0,5 f_f t_f \cdot \frac{[x_0 - (h-b)]^2}{h-x_0}$$

Determination of the position of the neutral axis from the condition:

$$N_c = N_t$$

Which is written as

$$ax_0^2 - bx_0 + c = 0$$

where:

$$a = 2f_s t$$

$$b = 3f_s t h + f_f t_f b_f$$

$$c = f_s t h^2 - f_f t_f b_f \left( \frac{b_f}{2} - h \right)$$

$$x_0 = \frac{\frac{b}{2} - \sqrt{(b/2)^2 - ac}}{a}$$

The distance of the neutral axis from the angle heel is then equal to:

$$u_{pna} = \frac{x_0}{\sqrt{2}}$$

$$M_{v,el-pl} = \frac{f_s t}{\sqrt{2}} \cdot [(h - x_0)^2 + x_0^2] + \frac{2f_f t_f}{3\sqrt{2}(h-x_0)} \{ (h - x_0)^3 + [x_0 - (h - b)]^3 \}$$

# Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika CarboDur S512

BUILDING TRUST



## NOTICE PRODUIT

# Sika® CarboDur® S

### INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Les Sika® CarboDur® S sont des P.R.F.C. pultrudés (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone), à base de fibres de carbone noyées dans une matrice époxydique. Ils se présentent sous forme de lamelles préfabriquées en usine, et sont conçus pour le renforcement des structures en béton armé, en béton précontraint, en bois, en maçonnerie, en métal.

Les lamelles de Sika® CarboDur® S sont collées sur la structure à renforcer à l'aide de l'adhésif structural Sikadur® -30.

Consulter le Notice Produit de l'adhésif concerné.

### DOMAINES D'APPLICATION

Sika® CarboDur® S ne peut être utilisé que par des professionnels expérimentés.

#### Augmentation de charges

- Augmentation de la capacité portante des poutres, des dalles : augmentation des charges d'exploitation, trafic, changement de destination du local, ...

#### Endommagement des éléments de structures

- Dégradation des matériaux de la structure
- Corrosion, diminution ou sectionnement d'armatures internes
- Accidents (impact de véhicule, séisme, incendie,...)

#### Amélioration des conditions de service et de durabilité

- Réduction de flèche et d'ouverture de fissure
- Réduction des contraintes dans les armatures internes
- Amélioration de la résistance/tenue à la fatigue de la structure

#### Modification de la structure

- Création de trémies (voile, dalle, poutre...)
- Suppression de murs, poteaux

#### Renforcement préventif

- Renforcement parasismique (Eurocode 8)
- Impact, explosion, etc

#### Défauts de conception, défauts de calcul

- Insuffisance ou déficience des sections d'acier in-

terne

- Défaut de positionnement des armatures dans le béton

### CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

- Insensible à la corrosion
- Très haute performance
- Excellente durabilité et résistance/tenue à la fatigue
- Facile à transporter (légereté, conditionnement en rouleau)
- Longueur illimitée (rouleau de 10 à 250 mètres suivant le type de lamelle)
- Application économique (pas de matériel de levage, ni de serrage)
- Peut recevoir un revêtement (peinture, mortier...)
- Croisement aisé des lamelles grâce à la faible épaisseur
- Facilité d'application, en particulier en sous face, sans moyen auxiliaire de placage ni de serrage
- Facile à préparer, applicable en plusieurs couches superposées
- Finition excellente des bords de lamelles (imprégnation et alignement des fibres) obtenue lors de la fabrication par pultrusion
- Tests approfondis et approuvés disponibles dans de nombreux pays

### AGRÈMENTS / NORMES

#### France:

- Avis Technique CSTB n°3/16-875 Sika® CarboDur® SikaWrap®
- Essais de traction et de cisaillement inter-laminaire sur les Lamelles PRFC (avant et après vieillissement accéléré)
- Essai de cisaillement sur béton, et traction directe, après 18 mois de vieillissement en enceinte climatique (40°C et 95% HR)
- Essai de tenue aux UV du système Sika® CarboDur® (avec et sans revêtement de protection Sikagard®)

Notice Produit  
Sika® CarboDur® S  
Décembre 2017, Version 05.01  
020206010010000040



# Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika CarboDur S512

**Pologne:** Technical Approval ITB AT-15-5604/2011: Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i naprawy konstrukcji betonowych (Polish)

**Pologne:** Technical Approval IBDiM Nr AT/2008-03-0336/1 „Płaskowniki, pręty, kształtki i maty kompozytowe do wzmacniania betonu o nazwie handlowej: Zestaw materiałów Sika CarboDur” do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych (Polish)

**USA:** ACI 440.2R-08, Guide for the Design and construction of Externally Bonded FRP Systems for strengthening concrete structures, July 2008, (USA).

**Royaume Uni:** Concrete Society Technical Report No. 55, Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite material, 2012 (UK).

**Suisse:** SIA 166:2004 Klebebewehrungen

**Italie:** CNR-DT 200/2004 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures

**International:** Fib, Technical Report, bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, July 2001.

## DESCRIPTION DU PRODUIT

<b>Conditionnement</b>	Suremballage carton pour les rouleaux de 10, 25, 50 m Suremballage en caisse en bois pour les rouleaux de 250 m			
<b>Aspect / Couleur</b>	PRFC (Polymère Renforcé de Fibres de Carbone – matrice résine époxy) de couleur noire			
<b>Durée de Conservation</b>	Illimité, à condition que les conditions de stockage soient respectées.			
<b>Conditions de Stockage</b>	Illimité à l'abri d'une exposition directe au soleil, au sec et à une température inférieure à 50°C. Transport : uniquement en emballage d'origine ou protégé contre toutes dégradations mécaniques			
<b>Densité</b>	1,60			
<b>Dimensions</b>	<b>Sika CarboDur</b>	<b>Largeur</b>	<b>Epaisseur</b>	<b>Section</b>
	S 512	50 mm	1,2 mm	60 mm <sup>2</sup>
	S 812	80 mm	1,2 mm	96 mm <sup>2</sup>
	S 1012	100 mm	1,2 mm	120 mm <sup>2</sup>
	S 1512	150 mm	1,2 mm	180 mm <sup>2</sup>
	Tenu en stock (rouleau de 10, 25, 50, 250m)			
<b>Teneur en Fibres</b>	> 68 %			

## INFORMATIONS TECHNIQUES

<b>Résistance en Traction du Stratifié</b>	Valeurs dans le sens longitudinal des fibres		
	Valeur moyenne	3 100 MPa	(EN 2561)
	Valeur au fractile 5%	2 900 MPa	
<b>Module d'Élasticité en Traction du Stratifié</b>	Valeurs dans le sens longitudinal des fibres		
	Valeur moyenne	170 000 MPa	(EN 2561)
	Valeur au fractile 5 %	165 000 MPa	
<b>Allongement à la Rupture en Traction du Stratifié</b>	Valeur dans le sens longitudinal des fibres		
	Valeur moyenne	> 1,80 %	(EN 2561)
<b>Température de Transition vitreuse</b>	> 100 °C		(EN 61006)

Notice Produit  
Sika® CarboDur® S  
Décembre 2017, Version 05.01  
020206010010000040



# Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika CarboDur S512

## INFORMATIONS SUR LE SYSTÈME

<b>Structure du Système</b>	Le système décrit dans cette Notice doit être respecté et ne peut faire l'objet de modification. Adhésif structural : Sikadur®-30 Pour des informations détaillées concernant la mise en oeuvre, consulter l'avis technique CSTB n°3/16-875, et les notices des produits concernés.
-----------------------------	---

## RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Consommation	Largeur du Sika® CarboDur® S	Consommation de Sikadur®-30* (sur support et lamelle)
	50 mm	0,20 à 0,28 kg/m
	80 mm	0,32 à 0,44 kg/m
	100 mm	0,44 à 0,64 kg/m
	150 mm	0,68 à 1,00 kg/m

\*La consommation indiquée correspond à une application standard. La rugosité et la planéité du support, le croisement de lamelles, la perte et les déchets peuvent entraîner une consommation plus élevée de l'adhésif, jusqu'à 20% supplémentaires.

## INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

### QUALITÉ DU SUPPORT

Consulter l'avis technique CSTB n°3/16-875  
La qualité du support doit être contrôlée dans tous les cas. Un diagnostic de l'ouvrage est recommandé (norme NF EN 1504-9, Réparation et protection des structures en béton).

#### \* application sur béton :

La valeur moyenne de résistance en traction directe de la surface de béton préalablement préparée doit être de 1,5 MPa. Si cette valeur n'est pas atteinte, les solutions alternatives peuvent être :

- les barres Sika® CarboDur® S utilisées selon la technique « NSM », engravées en surface du béton
- Les tissus SikaWrap® se reporter à la notice Produit du SikaWrap®-230 C ou -600 C.

Le béton doit généralement être âgé de plus de 28 jours (prendre aussi en considération les conditions environnementales de durcissement, le type de béton, sa résistance).

#### \* application sur autres types de supports (hors Avis technique) :

La structure bois, maçonnerie, ou métallique doit également faire l'objet d'un diagnostic.

### PRÉPARATION DU SUPPORT

Consulter l'Avis technique CSTB n°3/16-875.

Le support doit recevoir une préparation de surface adaptée pour le rendre propre, sain, exempt de laitance, d'agents polluants, de graisse, d'huile, de particules friables, d'anciens revêtements, ...

Le support ne doit pas être gelé, ni présenter de film d'eau en surface au moment de la mise en œuvre de la colle.

Ne pas réaliser d'opération de collage en cas de risque de condensation sur le support. Contrôle à faire préalablement au démarrage du mélange du kit de l'adhésif Sikadur®-30.

### MÉTHODE D'APPLICATION / OUTILS

Consulter l'Avis technique CSTB n°3/16-875 et la Notice Produit du Sikadur®-30.

- Température (support, ambiante) : Consulter la Notice Produit de Sikadur®-30.
- Humidité du support : Consulter la Notice Produit de Sikadur®-30.
- Béton : max. 4%. Quand le support est légèrement humide (sans film d'eau en surface), bien faire pénétrer la colle dans le support.
- Condensation - point de rosée : consulter la Notice Produit de Sikadur®-30.
- Nettoyage des outils : nettoyer le matériel avec le produit Nettoyant Sikadur® avant polymérisation de la résine.
- Durée de vie en pot : consulter la Notice Produit de Sikadur®-30.

### LIMITATIONS

Consulter l'Avis technique CSTB n°3/16-875 et la Notice Produit du Sikadur®-30.

#### **Dimensionnement des renforts.**

Il est conseillé de faire appel à un Bureau d'Etudes qualifié en calcul de structures pour réaliser le dimensionnement des renforts Sika® CarboDur®. Nous consulter.

#### **Qualification de l'entreprise spécialisée**

Le Maître d'ouvrage, le Maître d'œuvre, doivent faire appel à une entreprise spécialisée pour la réalisation des travaux de réparation et de renforcement des structures. L'entreprise retenue doit être qualifiée, expérimentée, assurée pour la réalisation de ces travaux spéciaux. Le personnel de l'entreprise doit être formé par le service Formation Sika pour l'application des composites PRFC et des produits associés.

#### **Précautions d'emploi.**

Consulter la Fiche de données de sécurité du Sikadur-30.

Pendant la préparation, notamment pendant la phase de découpage des lamelles, ainsi que pendant l'application du système, veiller à se conformer à la fiche de données de sécurité et porter les Equipements de Protection Individuelle : vêtement adapté, gants, lunettes, appareil respiratoire si nécessaire, ...

Notice Produit  
Sika® CarboDur® S  
Décembre 2017, Version 05.01  
020206010010000040

BUILDING TRUST



# Παράρτημα Γ. Φύλλα ιδιοτήτων Sika Carbodur S512

Les lamelles, une fois mises en place, doivent être protégées du rayonnement solaire direct permanent. Le revêtement de protection vis-à-vis des rayons UV est soit un produit à base de résine (Sikagard®-550 W Elastico, Sikagard®-680 S BetonColor, ou Sikagard® -675 W ElastoColor -Coloris disponible suivant nuancier RAL) soit un produit à base de liant hydraulique modifié (SikaTop®-121 ou 107).

Par ailleurs, des essais en laboratoire montrent que la protection de la lamelle notamment par un revêtement Sikagard® -680 S de couleur blanche permet de limiter la sensibilité du composite vis-à-vis de la température: réduction de 10°C environ de la température au niveau de la lamelle Sika® CarboDur® (comparativement à la lamelle non protégée).

Les lamelles doivent également être protégées de l'humidité et/ou de l'eau.

## VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

## RESTRICTIONS LOCALES

## ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

### RÉGULATION (EC) NO 1907/2006 - REACH

Ce produit est un article au sens de l'article 3 du règlement (CE) n° 1907/2006 (REACH). Il ne contient pas de substances qui sont susceptibles d'être libérées dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation. Une fiche de données de sécurité conforme à l'article 31 du même règlement n'est pas nécessaire pour la mise sur le marché, le transport ou l'utilisation de ce produit. Pour une utilisation en toute sécurité, les instructions sont données dans cette notice produit. Basé sur nos connaissances actuelles, ce produit ne contient pas de substances extrêmement préoccupantes (SVHC) comme indiqué à l'annexe XIV du règlement REACH ou sur la liste candidate publiée par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) à une concentration supérieure à 0,1% (m/ m).

## INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

SIKA FRANCE S.A.S.  
84 rue Edouard Vaillant  
93350 LE BOURGET  
FRANCE  
Tél.: 01 49 92 80 00  
Fax: 01 49 92 85 88  
www.sika.fr



Notice Produit  
Sika® CarboDur® S  
Décembre 2017, Version 05.01  
020206010010000040

SikaCarboDurS\_fr\_FR\_(12-2017)\_S\_1.pdf

BUILDING TRUST



# Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30



## NOTICE PRODUIT Sikadur®-30

ADHÉSIF STRUCTURAL POUR LE COLLAGE DE RENFORTS PRFC OU PLATS MÉTALLIQUES

### INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sikadur®-30 est une colle structurale thixotrope à 2 composants, mélange de résine époxydique et de fillers spéciaux, conçue pour une utilisation à une température comprise +8°C et +35°C.

### DOMAINES D'APPLICATION

Sikadur®-30 ne peut être utilisé que par des professionnels expérimentés.

Produit de collage de renforts structuraux selon la norme NF EN 1504-9, principe 4 Renforcement Structural, méthode 4.3 Renforcement par plats collés:

- Procédé Sika® CarboDur® de renforcement de structures en béton, brique, bois, métal par matériaux composites (voir détails sur la Notice Produit Sika® CarboDur® S et l'Avis Technique du CSTB n°3/16-875).
- Procédé par plats métalliques collés (Procédé L'Hermitte) : ex guide du STRRES;

### CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

- Facile à mélanger et à appliquer.
- Application sans primaire.
- Excellente résistance au fluage sous charge permanente.
- Excellente adhérence sur les lamelles Sika® CarboDur®, béton, maçonnerie, acier, fonte, aluminium, bois.
- Durcissement non affecté par l'humidité.
- Colle à hautes performances
- Thixotropie: aptitude à l'application sur surfaces verticales et en sous-face.
- Durcit sans retrait.
- Composants de couleurs différentes : permet le contrôle de l'homogénéité du mélange.
- Hautes résistances mécaniques initiales et finales.
- Hautes résistances à l'abrasion et aux chocs.
- Imperméable aux liquides et à la vapeur d'eau.

### AGRÉMENTS / NORMES

- Marquage CE selon la norme NF EN 1504-4 (collage structural).
- Avis Technique N° 3/16-875 - procédé Sika® CarboDur®
- IBM B, TU Braunschweig, test report No. 1871/0054, 1994: Approval for Sikadur®-30 Epoxy adhesive.
- IBM B, TU Braunschweig, test report No. 1734/6434, 1995: Testing for Sikadur®-41 Epoxy mortar in combination with Sikadur®-30 Epoxy adhesive for bonding of steel plates.

Notice Produit  
Sikadur®-30  
Décembre 2017, Version 03.01  
02020604001000001

# Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30

## DESCRIPTION DU PRODUIT

<b>Base chimique</b>	Résine époxydique	
<b>Conditionnement</b>	Kit prédosé de 6 kg (comp A : 4,5 kg - comp B : 1,5 kg)	
<b>Couleur</b>	Composant A:	blanc
	Composant B:	noir
	Mélange A+B:	gris clair
<b>Durée de Conservation</b>	24 mois à partir de la date de fabrication. (Voir mention sur étiquette : "best before")	
<b>Conditions de Stockage</b>	Stockage dans son emballage d'origine intact, non entamé, à l'abri du gel, de l'humidité et des rayons solaires directs, à une température comprise entre +5°C et +30°C.	
<b>Densité</b>	1,65 kg/l + 0,1 kg/l (mélange A+B, à +23°C)	

## INFORMATIONS TECHNIQUES

<b>Dureté Shore D</b>	≥ 70 (après 48h à +23°C)				
<b>Résistance en Compression</b>	Echéance	Température de durcissement +10°C	Température de durcissement +35°C	(EN 196)	
	12 h	-	~85 MPa		
	1 jour	~55 MPa	~90 MPa		
	3 jours	~70 MPa	~90 MPa		
	7 jours	~75 MPa	~90 MPa		
<b>Module d'Elasticité à la Compression</b>	~9600 MPa (à +23°C)			(ASTM D695)	
<b>Résistance à la Traction</b>	Echéance	Température de durcissement +15°C	Température de durcissement +35°C	(NF EN ISO 527-3)	
	1 jour	~20 MPa	~26 MPa		
	3 jours	~23 MPa	~27 MPa		
	7 jours	~26 MPa	~29 MPa		
<b>Module d'Elasticité en Traction</b>	~11200 MPa (à +23°C)			(ISO 527)	
<b>Résistance au Cisaillement</b>	Echéance	Temp. durcissement +15°C	Temp. durcissement +23°C	Temp. durcissement +35°C	(FIP 5.15)
	1 jour	~4 MPa	-	~17 MPa	
	3 jours	~15 MPa	-	~18 MPa	
	7 jours	~16 MPa	~18 MPa <sup>(1)</sup>	~18 MPa	
	Rupture du béton (~ 15 MPa) <sup>(1)</sup> (EN ISO 4624)				
<b>Retrait</b>	0,04%		(FIP : Fédération Internationale de la Précontrainte)		
<b>Tensile Adhesion Strength</b>	Echéance	Support	Temp. durcissement	Adhérence	(EN ISO 4624, EN 1542, EN 12188)
	7 jours	Béton durci	+23°C	> 4 MPa <sup>(1)</sup>	
	7 jours	Acier	+23°C	> 21 MPa <sup>(2)</sup>	
	<sup>(1)</sup> 100% rupture dans le support béton <sup>(2)</sup> sur support décapé par projection d'abrasifs suivant le degré de soin Sa. 2.5				
<b>Coefficient d'Expansion Thermique</b>	2,5 · 10 <sup>-5</sup> par °C (température de -20°C à +40°C)			(EN 1770)	

Notice Produit  
Sikadur®-30  
Décembre 2017, Version 03.01  
020206040010000001

BUILDING TRUST



## Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30

<b>Température de Transition vitreuse</b>	Echéance	Température de durcissement	T <sub>g</sub>	(EN 12614)
	30 jours	+30°C	+52°C	
<b>Température de Déflexion thermique</b>	Echéance	Température de durcissement	HDT	(ASTM-D 648)
	3 heures	+80°C	+53°C	
	6 heures	+60°C	+53°C	
	7 jours	+35°C	+53°C	
	7 jours	+10°C	+36°C	
<b>Température de Service</b>	-40°C à +45°C (après durcissement à température +23°C)			

### RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

<b>Proportions du Mélange</b>	Comp A : Comp B = 3 : 1 en poids ou en volume			
<b>Épaisseur de la Couche</b>	30 mm max. Quand plusieurs Kits doivent être utilisés : les préparer au fur et à mesure des besoin (et non à l'avance) afin de ne pas réduire la durée d'utilisation du kit (durée de vie de pot).			
<b>Taux d'affaissement</b>	selon la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) Aptitude à la mise en place sur surfaces verticales : aucun affaissement jusqu'à 3-5 mm d'épaisseur à +35°C.			
<b>Squeezeability</b>	selon la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) 4000 mm <sup>2</sup> à +15°C à 15 kg			
<b>Température du Produit</b>	Sikadur®-30 doit être appliqué à une température comprise entre +8°C et +35°C.			
<b>Température de l'Air Ambiant</b>	+8°C min. / +35°C max			
<b>Point de Rosée</b>	Réduire le risque de condensation sur le support: au moment de l'application de la colle, la température du support doit être au moins 3 degrés au-dessus de la température du point de rosée.			
<b>Température du Support</b>	+8°C min. / +35°C max.			
<b>Humidité du Support</b>	Max. 4% Quand le support est légèrement humide (sans film d'eau en surface), appliquer la colle à la brosse et bien faire pénétrer dans le support.			
<b>Durée de Vie en Pot</b>	Température	Pot-life	Temps ouvert	(FIP : Fédération Internationale de la Précontrainte)
	+8°C	~ 120 mn	~ 150 mn	
	+20°C	~ 90 mn	~ 110 mn	
	+35°C	~ 20 mn	~ 50 mn	
La durée de vie en pot débute quand les 2 composants sont mélangés. Elle est plus courte à hautes températures et plus longue à basses températures. Plus la quantité mélangée est importante, plus la durée de vie en pot est courte. Pour obtenir une durée de vie en pot plus longue à hautes températures, diviser le produit une fois mélangé en plusieurs portions. Une autre méthode consiste à rafraîchir (pas en dessous de 5°C) les composants A et B avant de les mélanger.				

### INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

#### QUALITÉ DU SUPPORT

Consulter la Notice Produit du Sika® CarboDur® S et l'Avis Technique CSTB N° 3/16-875.

#### PRÉPARATION DU SUPPORT

Consulter la Notice Produit du Sika® CarboDur® S et l'Avis Technique CSTB N° 3/16-875.

#### MÉLANGE

Vider complètement le composant B dans le composant A (grand emballage).  
Mélanger avec un malaxeur muni de l'hélice de malaxage spéciale Sikadur, pendant au moins 3 minutes à

Notice Produit  
Sikadur®-30  
Décembre 2017, Version 03.01  
02020604001000000

BUILDING TRUST



# Παράρτημα Δ. Φύλλα ιδιοτήτων Sikadur 30

faible vitesse (maxi 300 tours/minute) pour entraîner le moins d'air possible, jusqu'à obtention d'une consistance homogène et d'une teinte uniforme (couleur gris clair). Ensuite verser le mélange dans un autre contenant propre, et continuer le malaxage pendant encore une minute à faible vitesse pour limiter au minimum l'inclusion d'air.

Attention de ne mélanger que le nombre de kits qui pourront être mis en place durant la Durée Pratique d'Utilisation (potlife).

## MÉTHODE D'APPLICATION / OUTILS

Consulter la Notice Produit du Sika® CarboDur® S et l'Avis Technique CSTB n°3/16-875.

## NETTOYAGE DES OUTILS

Nettoyer le matériel avec le produit Nettoyant Sikadur® immédiatement après emploi, avant polymérisation de la résine. Une fois durcie, la résine s'enlève mécaniquement.

## DOCUMENTS COMPLÉMENTAIRES

Système Sika® CarboDur® :

En ce qui concerne les détails de mise en oeuvre des Lamelles Sika® CarboDur® à l'aide du Sikadur®-30, consulter la Notice Produit Sika® CarboDur® et l'avis technique du CSTB n°3/16-875.

## LIMITATIONS

Les résines Sikadur® sont formulées pour avoir un faible fluage sous charge permanente. Toutefois, pour tenir compte du comportement au fluage sous charge de tous les matériaux polymères, l'effort de calcul à long terme doit tenir compte de ce fluage. Généralement, cet effort de calcul doit être 20 à 25 % plus faible que l'effort de rupture. Consulter un Ingénieur en structures pour les calculs d'effort pour votre cas particulier.

## VALEURS DE BASE

Toutes les données techniques de cette notice sont basées sur des résultats d'essais de laboratoires. Les caractéristiques mesurées peuvent varier en fonction de circonstances indépendantes de notre contrôle.

## RESTRICTIONS LOCALES

### ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

RÉGULATION (EC) NO 1907/2006 - REACH

DIRECTIVE 2004/42/CE - LIMITATION DES ÉMISSIONS DE COV

## INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits

lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Notice Produit  
Sikadur®-30  
Décembre 2017, Version 08.01  
020206040010000001

BUILDING TRUST

