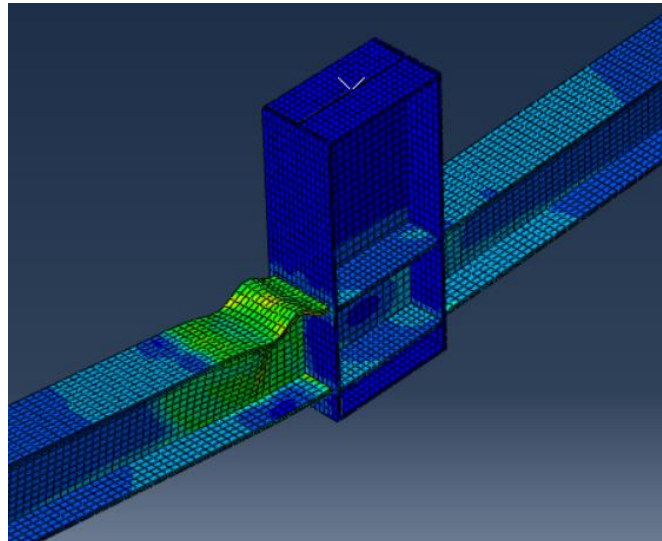




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Διερεύνηση Συμπεριφοράς Μεσαίων Συγκολλητών
Κόμβων Δοκών-Υποστυλωμάτων Ενισχυμένων ή
μη με FRP



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Σοφοκλέους

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Ιούλιος 2020

ΕΜΚ ΔΕ 2020/21

Σοφοκλέους Ε. (2020).
Διερεύνηση συμπεριφοράς μεσαίων συγκολλητών κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων
ενισχυμένων ή μη με FRP
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2020/21
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Sofokleous I. (2020).
Investigation of the behaviour of internal welded steel joints with or without FRP
strengthening
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2020/21
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	5
1 Εισαγωγή	6
1.1 Γενικά	6
1.2 Σύνθετα υλικά - Ορισμός	6
1.3 Δομή και σύνδεση σύνθετων υλικών	7
1.4 Ταξινόμηση με βάση το υλικό της μήτρας	8
1.4.1 Metal Matrix Composites (MMC):	8
1.4.2 Ceramic Matrix Composites (CMC)	9
1.4.3 Polymer Matrix Composites (PMC)	9
1.5 Ταξινόμηση με βάση τη δομή της ενισχυτικής φάσης:	10
1.5.1 Κοκκώδη Σύνθετα – Particulate Composites	10
1.5.2 Πολυστρωματικά Σύνθετα – Laminate Composites	11
1.5.3 Ινώδη Σύνθετα – Fibrous Composites	11
1.6 Ενισχυτικές ίνες	12
1.7 Σύγκριση ενισχυτικών ινών	13
1.8 Πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα – CFRP	14
1.8.1 Ιδιότητες CFRP	14
1.8.2 Μειονεκτήματα CFRP	15
2 Πειραματική διερεύνηση εσωτερικού κόμβου από χάλυβα ενισχυμένου με CFRP σε κάμψη	16
2.1 Εισαγωγή	16
2.2 Υλικά δοκιμίων	16
2.3 Όργανα μέτρησης παραμορφώσεων	17
2.4 Πείραμα 1 – μη ενισχυμένος κόμβος	19
2.4.1 Διάταξη πειράματος 1	20
2.4.2 Πειραματική διαδικασία 1	23
2.4.3 Αποτελέσματα πειράματος 1	24
2.5 Πείραμα 2 – κόμβος ενισχυμένος με CFRP	27
2.5.1 Διάταξη πειράματος 2	28
2.5.2 Πειραματική διαδικασία 2	29
2.5.3 Αποτελέσματα πειράματος 2	32
2.6 Σύγκριση πειραμάτων 1 και 2	35
3 Αριθμητική προσομοίωση κόμβου πειράματος στο ABAQUS	37
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Διαδικασία και παράμετροι μοντελοποίησης	37
3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου 1	42
3.4 Σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων	44

4	Διερεύνηση συμπεριφοράς κόμβων στο Abaqus	46
4.1	Άρρηκτα συνδεδεμένα CFRP στο μοντέλο	46
4.2	Μεταβλητός αριθμός και θέση ενισχυτικών φύλλων CFRP	48
4.2.1	Μοντέλα διερεύνησης	48
4.2.2	Σύγκριση συμπεριφοράς των υπό μελέτη κόμβων.....	54
4.2.3	Σύγκριση συμπεριφοράς κόμβων διερεύνησης με τους κόμβους των πειραμάτων	60
4.2.4	Διερεύνηση φορτίου και μετατόπισης αστοχίας	60
4.2.5	Σύγκριση αστοχίας αναλυτικών και πειραματικών μοντέλων	66
5	Διατάξεις Ευρωκώδικα 3 για συγκολλητούς κόμβους.....	68
5.1	Γενικά	68
5.2	Υπολογισμός αντοχής κόμβου κατά EN1993-1-8.....	68
5.3	Αριθμητικός υπολογισμός αντοχών συστατικών μερών κόμβου	73
5.4	Υπολογισμός στροφικής δυσκαμψίας κόμβου κατά EN1993-1-8	77
5.5	Υπολογισμός στροφικής ικανότητας κόμβου κατά EN1993-1-8.....	79
5.6	Διαγράμματα M-φ	79
5.7	Ταξινόμηση κόμβου σύμφωνα με τον EN 1993-1-8.....	83
5.7.1	Με βάση τη δυσκαμψία του	83
5.7.2	Με βάση την αντοχή τους	86
6	Συμπεράσματα	88
6.1	Αποτελέσματα αναλυτικών μοντέλων και διερεύνησης	88
6.2	Αποτελέσματα σύγκρισης πραγματικής και θεωρητικής συμπεριφοράς..	89
7	Βιβλιογραφία.....	90
	Παράρτημα Α. Φύλλα ιδιοτήτων CFRP	92
	Παράρτημα Β. Φύλλα ιδιοτήτων εποξικής ρητίνης.....	98
	Παράρτημα Γ. Πιστοποιητικό ιδιοτήτων υλικού χάλυβα S235.....	100
	Παράρτημα Δ. Πιστοποιητικό ιδιοτήτων υλικού χάλυβα S275.....	101

Διερεύνηση συμπεριφοράς μεσαίων συγκολλητών κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων ενισχυμένων ή μη με FRP

Σοφοκλέους Ε. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Οι μεταλλικοί κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής καθώς συχνά υφίστανται σύνθετες καταπονήσεις και ο ρόλος τους στην ευστάθεια των κατασκευών είναι καθοριστικός. Για το λόγο αυτό μελετάται η ενίσχυσή τους με το σύνθετο υλικό CFRP με απώτερο σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Αρχικά, περιγράφονται τα είδη, οι κατηγορίες των σύνθετων υλικών και οι αντίστοιχες ιδιότητες τους έτσι ώστε να κατανοηθεί η συμπεριφορά τους και έπειτα σε συνδυασμό με το χάλυβα.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ στο πλαίσιο ενός ερευνητικού προγράμματος. Στα πειράματα αυτά μελετήθηκαν δύο εσωτερικοί συγκολλητοί κόμβοι σε κάμψη, ενισχυμένοι και μη με CFRP. Λόγω της αποκόλλησης των CFRP από τα αρχικά στάδια του πειράματος, τα αποτελέσματα δεν ήταν αντιπροσωπευτικά. Ωστόσο, τα αποτελέσματα του μη ενισχυμένου κόμβου χρησιμοποιούνται για σύγκριση της πραγματικής συμπεριφοράς του με τη συμπεριφορά των αναλυτικών προσομοιωμάτων κόμβων που μορφώθηκαν για διερεύνηση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αναλυτικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν στο λογισμικό ABAQUS. Έπειτα γίνεται ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και συγκρίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα του μοντέλου με τα πειραματικά. Αφού εξασφαλιστεί η αξιοπιστία του αριθμητικού μοντέλου, στο τρίτο κεφάλαιο διερευνάται ο κόμβος στην περίπτωση όπου τα CFRP είναι άρρηκτα συνδεδεμένα σε αυτόν. Τα αποτελέσματα έδειξαν βελτιωμένη συμπεριφορά, γεγονός που δεν φάνηκε στα πειράματα. Έπειτα μελετάται η επιρροή της θέσης και του αριθμού των ενισχυτικών φύλλων στη συμπεριφορά του κόμβου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο υπολογίστηκαν η αντοχή, η στροφική δυσκαμψία και κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα ροπής αντοχής-στροφής M-φ του μη ενισχυμένου με CFRP κόμβου, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Έπειτα, συγκρίθηκε η θεωρητική συμπεριφορά του, βάση του κανονισμού, με την πραγματική, όπως αυτή προέκυψε από τα πειράματα.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση και τη σύγκριση της πραγματικής και θεωρητικής συμπεριφοράς των κόμβων.

Investigation of the behaviour of internal welded steel joints with or without FRP strengthening

Sofokleous I. (supervised by Vayas I.)

Abstract

Beam to column steel joints need special attention since they are often subjected to complex loads and they play crucial role in the stability of structures. For these reasons, the present thesis studies strengthening steel joints with composite materials - like carbon fiber-reinforced polymers (CFRP) - with the ultimate goal of improving their capacity properties. First of all, several types and categories of composite materials as well as their corresponding properties are described in order to examine their behavior on their own and then in combination with steel.

The first chapter represents two experiments performed in the Institute of Steel Structures of NTUA, in the framework of a research project. Through these experiments, two internal welded joints, reinforced and not with CFRP, subjected to bending were studied. Due to the detachment of CFRP laminates through the initial stages of the experiment, the results were not representative. However, the results of the initial joint, the non-reinforced joint, were used in order to compare the experimental behavior with the corresponding numerical simulations.

The second chapter deals with the numerical model which was simulated using the software Abaqus. Subsequently, a finite element analysis was performed and the computational results of the model were compared with the experimental ones. After the validity of the numerical model was ensured, in the third chapter the joint was investigated in the case where the CFRPs are rigidly connected to steel. The results indicated an improved behavior, which was not observed in the experiments. In addition, the influence of the position and the number of the reinforcement laminates on the behavior of the joint was studied.

In the fourth chapter, both the design resistance and the rotational stiffness were calculated; thus the moment-rotation curve of the non-reinforced joint was evaluated, according to the provisions of the Eurocode 3. Then, the analytical estimation of the joint capacity, based on the regulation, was compared with the experimental one.

Finally, the fifth chapter presents the conclusions that emerged from the investigation and the comparison of the real and theoretical study that describe the behavior of steel joints.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον εισηγητή και επιβλέποντα της εργασίας αυτής Δρ. Ιωάννη Βάγια, καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και διευθυντή του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, για την ιδιαίτερα σημαντική βοήθεια και καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα την οικογένεια και τους φίλους μου για τη διαρκή τους στήριξη σε κάθε βήμα της ζωής μου.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Από την αρχαιότητα, ο άνθρωπος εκ φύσεως βρίσκεται ενώπιον μιας αέναης αναζήτησης για κάτι καλύτερο. Το ίδιο παρατηρείται και στην ιστορική εξέλιξη των υλικών. Καθώς υπάρχει η αντίληψη ότι οι ιδιότητες ενός υλικού δεν ικανοποιούν τις ανάγκες μίας κατασκευής, ο συνδυασμός περισσοτέρων του ενός εξ αυτών φαντάζει υποσχόμενος. Έτσι γεννιέται η ιδέα των σύνθετων υλικών, τα οποία συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των υλικών που τα απαρτίζουν εξασφαλίζοντας συνολικά καλύτερη μηχανική συμπεριφορά. Το ωπλισμένο σκυρόδεμα για παράδειγμα, ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό, αποτελεί ένα από τα αρχαιότερα σύνθετα υλικά, λόγω του ευφυούς συνδυασμού του σκυροδέματος με το χάλυβα οπλισμού για ανάκτηση εφελκυστικής αντοχής. Στο μεταξύ, η εξέλιξη της τεχνολογίας ανέδειξε πολλά νέα υλικά, ιδανικά για συνδυασμό με τα συχνά χρησιμοποιούμενα, των οποίων η μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς τους αποδεικνύεται προσοδοφόρα.

Τα υλικά αυτά δίνουν λύση στο σύννητες πρόβλημα των κατασκευών επιτυγχάνοντας με μικρό βάρος σημαντική αύξηση αντοχής και κατ' επέκταση εξοικονόμηση ενέργειας. Έτσι, ο λόγος αντοχής/βάρους είναι πλέον καθοριστικός για το προβάδισμά τους έναντι των παραδοσιακών υλικών.

Σήμερα, τα σύνθετα υλικά εισέβαλαν στις νέες τεχνολογίες κατασκευών και επηρέασαν σημαντικά το σχεδιασμό, την παραγωγή, τον έλεγχο και τη συντήρησή τους. Η σύγχρονη αγορά περιλαμβάνει ποικιλία ινών και ρητινών και ταυτόχρονα προτείνει διάφορα συστήματα υλικών, προσαρμοσμένα στις εκάστοτε ανάγκες των μηχανικών. Ένας μεγάλος αριθμός κατασκευαστικών κλάδων αξιοποιεί τα υλικά αυτά στη βιομηχανία αυτοκινήτων, κατασκευής προϊόντων καθημερινής χρήσης, αεροδιαστημική και φυσικά τα τεχνικά έργα. Στις κατασκευές του πολιτικού μηχανικού, βρίσκουν εφαρμογή σε ράβδους ή πλέγματα οπλισμού, τένοντες προέντασης, υφάσματα ή ελάσματα για ενίσχυση δομικών μελών αλλά και σε ειδικές ολόσωμες κατασκευές.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης που ακολουθεί, θα μελετηθεί η συνεισφορά ενός συγκεκριμένου σύνθετου υλικού στην ενίσχυση συγκολλητών κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων καθώς οι κόμβοι αποτελούν βασικό στοιχείο κάθε κατασκευής και συχνά υφίστανται σύνθετες καταπονήσεις.

1.2 Σύνθετα υλικά - Ορισμός

Με τον όρο 'σύνθετο υλικό' νοείται το υλικό που αποτελείται από τουλάχιστον δύο επιμέρους υλικά ή φάσεις, διαφορετικών μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών μεταξύ τους και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει διαφορετικές ιδιότητες από αυτές των υλικών που το συνθέτουν. Σε ένα σύνθετο υλικό, διακρίνονται το συστατικό ενίσχυσης και η μήτρα. [3]

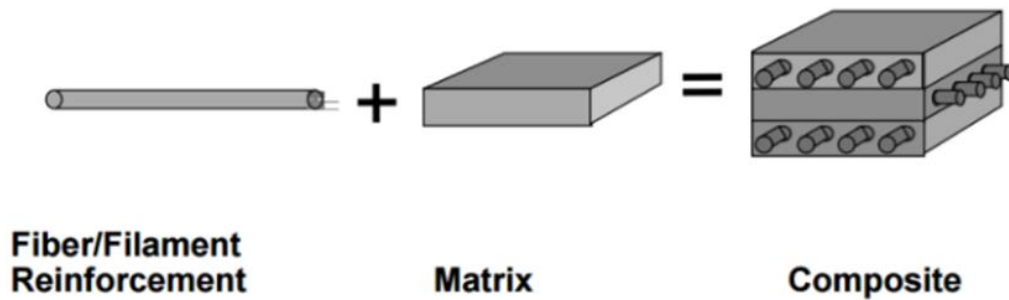
Φάση Μήτρας (Matrix)

Το πρωτογενές υλικό *matrix*, έχει συνήθως χαμηλότερη πυκνότητα και χρησιμοποιείται για να εκμεταλλευτούν στο έπακρον οι ιδιότητες της ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, η μήτρα έχει το ρόλο του συνδετικού υλικού, το οποίο εξασφαλίζει το

αμετάβλητο της σχετικής θέσης των ινών στο σύνθετο υλικό. Σαν υλικό, είναι λιγότερο σκληρό άρα και περισσότερο όλκιμο από το υλικό ενίσχυσης.

Ενισχυτική φάση

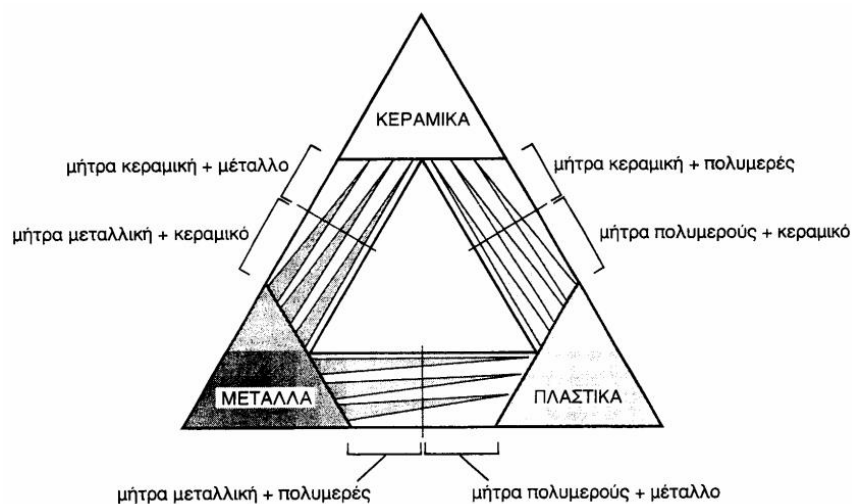
Το ενισχυτικό υλικό βρίσκεται διασκορπισμένο στη μήτρα και είναι ενσωματωμένο σε αυτή σε ασυνεχή ή συνεχή μορφή. Είναι υπεύθυνο για τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες του υλικού καθώς είναι ισχυρότερο από τη μήτρα.



Εικόνα 1.1 Δομή σύνθετου υλικού [7]

1.3 Δομή και σύνδεση σύνθετων υλικών

Οι βασικές οικογένειες υλικών, μέταλλα, κεραμικά και πολυμερικά, όταν συνδυαστούν μεταξύ τους ανά δύο δημιουργούν τα σύνθετα υλικά, όπως φαίνονται στην Εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών [2]

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή τους. Ειδικότερα, στους δομικούς παράγοντες που επηρεάζουν συγκαταλέγονται η αντοχή της συγκόλλησης στη διεπιφάνεια μεταξύ μήτρας και φάσεων ενίσχυσης, το σχήμα των φάσεων ενίσχυσης αλλά και ο προσανατολισμός τους. Μεταξύ των δύο φάσεων, μήτρας και διεσπαρμένης ενίσχυσης, είναι απαραίτητο να υπάρχει καλή σύνδεση – πρόσφυση – έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά φορτίων μέσω της

διεπιφάνειας. Η πρόσφυση είναι επίσης αναγκαία για την ανάπτυξη των βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Πιο κάτω αναφέρονται οι τρεις μορφές σύνδεσης των δύο φάσεων.

- 1 Άμεση σύνδεση χωρίς ενδιάμεσο στρώμα. Στην περίπτωση αυτή η πρόσφυση – διαβροχή – παρέχεται είτε με ομοιοπολική σύνδεση είτε με δυνάμεις van der Waals.
- 2 Ενδιάμεση στιβάδα σε μορφή στερεού διαλύματος της μήτρας και των συστατικών ενίσχυσης.
- 3 Ενδιάμεσο στρώμα (ενδιάμεση φάση) σε μορφή τρίτης φάσης συγκόλλησης, δηλαδή με χρήση κόλλας.

1.4 Ταξινόμηση με βάση το υλικό της μήτρας

1.4.1 Metal Matrix Composites (MMC):

Η μήτρα είναι μεταλλική, από χαλκό, αλουμίνιο, μαγνήσιο, σίδηρο ή κοβάλτιο ενώ το ενισχυτικό υλικό που είναι διασπαρμένο σε αυτήν είναι κεραμικό (οξειδία ή καρβίδια) ή μεταλλικό (μόλυβδος, βολφράμιο ή μολυβδαίνιο). [13]

- Aluminum Matrix Composites:* Τα σύνθετα υλικά αλουμινίου αποτελούν την μεγαλύτερη ομάδα των MMC. Ενισχύονται με σωματίδια, συνεχείς ίνες ή ασυνεχείς ίνες αλουμινίου ή καρβιδίου του πυριτίου. Ένα τυπικό σύνθετο αλουμινίου έχει υψηλή αντοχή ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, μεγάλη ακαμψία, χαμηλή πυκνότητα, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και εξαιρετική αντοχή στην τριβή. Για τις προαναφερθείσες ιδιότητες, χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή ανταλλακτικών αυτοκινήτων, φρένων τρένων υψηλής ταχύτητας, ποδηλάτων, καλωδίων υψηλής τάσης κ.α.
- Magnesium Matrix Composites:* Τα σύνθετα υλικά μαγνησίου ενισχύονται κυρίως από σωματίδια καρβιδίου του πυριτίου και χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα με μεγάλη ακαμψία. Επιπλέον, έχουν υψηλή αντοχή στη φθορά, στις υψηλές θερμοκρασίες και στον ερπυσμό. Τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή εξαρτημάτων για αγωνιστικά αυτοκίνητα, ανταλλακτικά αεροσκαφών, κιβώτια ταχυτήτων κ.α.
- Titanium Matrix Composites:* Τα σύνθετα υλικά τιτανίου ενισχύονται κυρίως από συνεχείς ίνες καρβιδίου του πυριτίου ή σωματίδια βαριδίου του τιτανίου και καρβιδίου του τιτανίου. Επίσης για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται πούδρα μεταλλουργίας. Όπως και τα προηγούμενα σύνθετα αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και ακαμψία. Επίσης παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά σε φαινόμενα ερπυσμού και στη φθορά, ενώ έχουν υψηλή θερμική σταθερότητα. Τα υλικά αυτά προτιμώνται γενικά για την κατασκευή εξαρτημάτων μηχανών.

- iv. *Copper Matrix Composites*: Τα σύνθετα υλικά χαλκού ενισχύονται από συνεχείς ίνες άνθρακα, άνθρακα πυριτίου, βολφραμίου και ανοξείδωτου χάλυβα ή από σωματίδια καρβιδίου του πυριτίου. Όπως και στα σύνθετα τιτανίου, έτσι και σε αυτό, για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται πούδρα μεταλλουργίας. Σημαντικές ιδιότητες τους αποτελούν η υψηλή ακαμψία και θερμική αγωγιμότητα, ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής, η καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και η αντοχή στη φθορά. Η χρήση τους είναι διαδεδομένη στην κατασκευή υβριδικών μονάδων, ηλεκτρονικών εξαρτημάτων κ.α.

1.4.2 Ceramic Matrix Composites (CMC)

Η μήτρα είναι κεραμική, συνήθως ένα κεραμικό πλέγμα, ενώ η φάση ενίσχυσης αποτελείται από ίνες διαφορετικού κεραμικού, μακρές ή βραχείες. Σκοπός τους είναι η βελτίωση των ιδιοτήτων των συμβατικών κεραμικών, αυξάνοντας την ανθεκτικότητά τους και μειώνοντας την ευθραυστότητα. Τα σύνθετα κεραμικά ενισχύονται κυρίως από μακρές, συνεχείς ίνες καρβιδίου του πυριτίου, λόγω της σημαντικής αντοχής τους και της μεγάλης ακαμψίας τους. Οι ενισχύσεις βραχέων ινών προσδίδουν ανθεκτικότητα έναντι των ρωγμών, ωστόσο μια αστοχία τους μπορεί να αποβεί καταστροφική σε αντίθεση με την αστοχία των μακρών ινών. Οι τυπικές ιδιότητες των υλικών αυτών είναι η σημαντική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, η ανθεκτικότητα, η θερμική σταθερότητα, η χαμηλή πυκνότητα και η καλή συμπεριφορά έναντι της διάβρωσης.

1.4.3 Polymer Matrix Composites (PMC)

Η μήτρα είναι θερμοσκληρυνόμενη (thermoset-Unsaturated Polyester, Epoxy) ή θερμοπλαστικό (thermoplastic-Polycarbonate, Polyvinylchloride, Nylon, Polystyrene). Το ενισχυτικό υλικό είναι συνήθως ίνες γυαλιού, άνθρακα, χάλυβα ή Kevlar. Το χαμηλό κόστος και οι απλές μέθοδοι κατασκευής τους, τα καθιστούν τα δημοφιλέστερα ανάμεσα στα σύνθετα υλικά. Η ανάγκη για σύνθετα πολυμερικά υλικά έγκειται στις μηχανικές ιδιότητες των μη ενισχυμένων, οι οποίες δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των κατασκευών. Αν αναλογιστεί κανείς ότι το ισχυρότερο πολυμερές – η εποξική ρητίνη – έχει αντοχή σε εφελκυσμό 140 MPa και πολύ χαμηλή αντοχή επίσης σε κρούση, η ιδέα της ενίσχυσης αποτελεί αναγκαία λύση.

Τα PMC χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, τριβή, διάτρηση και διάβρωση αλλά και σημαντική ακαμψία. Ωστόσο, τα δύο κύρια μειονεκτήματα των σύνθετων πολυμερών είναι η χαμηλή θερμική αντίσταση και ο υψηλός συντελεστής θερμικής διαστολής τους. Οι παραπάνω ιδιότητες των PMC καθορίζονται από τις ιδιότητες, τον προσανατολισμό και τη συγκέντρωση των ινών ενίσχυσης αλλά και από τις ιδιότητες της μήτρας.

Τα υλικά ενίσχυσης – ίνες – μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει της μορφής τους στις εξής ομάδες:

- i. Μονοκατευθυντικές ίνες

- ii. Rovings
- iii. Veil mat: λεπτή στήλη από συνεχείς ίνες με τυχαίο προσανατολισμό.
- iv. Τεμαχισμένα νήματα: λεπτή στήλη από τυχαία προσανατολισμένες κοντές ίνες.
- v. Ίνες σε πλέξη ύφανσης

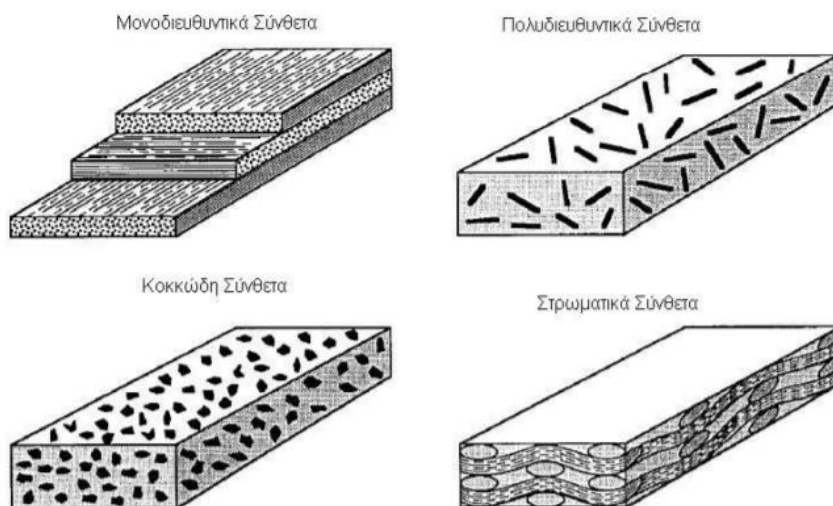
Τέλος, σύμφωνα με το υλικό ενίσχυσης που χρησιμοποιείται, τα PMC χωρίζονται στις εξής ομάδες:

- i. Glass Fiber Reinforced Polymers: Πολυμερή υαλοβάμβακα (Fiberglasses) – ενισχυμένα με ίνες γυαλιού
- ii. Carbon Fiber Reinforced Polymers: Ενισχυμένα πολυμερή με ίνες άνθρακα
- iii. Kevlar Fiber Reinforced Polymers: Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες Kevlar.

Τα σύνθετα υλικά PMC χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δευτερευουσών φέροντων αεροδιαστημικών μελών, σωμάτων σκαφών, αθλητικών ειδών, αλεξίσφαιρων γιλέκων κ.α.

1.5 Ταξινόμηση με βάση τη δομή της ενισχυτικής φάσης:

Οι παράμετροι σχήμα και προσανατολισμός της διεσπαρμένης φάσης είναι σημαντικοί καθώς αποτελούν σύστημα ταξινόμησης των σύνθετων υλικών στις κατηγορίες που παρουσιάζονται στη συνέχεια. [13]



Εικόνα 1.3 Ταξινόμηση με βάση τη δομή της ενισχυτικής φάσης [4]

1.5.1 Κοκκώδη Σύνθετα – Particulate Composites

Αποτελούνται από μία μήτρα ενισχυμένη από διάσπαρτα σωματίδια, προσανατολισμένα σύμφωνα με έναν από αυτούς τους τρόπους:

- i. Σύνθετα με τυχαίο προσανατολισμό σωματιδίων.

- ii. Σύνθετα με καθορισμένο προσανατολισμό σωματιδίων. Στην υποκατηγορία αυτή, το ενισχυτικό υλικό αποτελείται από διαδιάστατες επίπεδες 'νιφάδες', οι οποίες είναι τοποθετημένες παράλληλα μέσα στη μήτρα, καθιστώντας το υλικό ανισότροπο. Το υλικό έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις σε κάθε επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο των νιφάδων.

Επίσης, οι διαστάσεις των σωματιδίων έχουν επίδραση στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Τα μικρά σωματίδια, με διάμετρο μικρότερη από 0,25 μικρά, εμποδίζουν την παραμόρφωση του υλικού και παραμένουν αμετακίνητα ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, διατηρώντας έτσι το αποτέλεσμα της ενίσχυσης. Όσον αφορά τα μεγαλύτερα σωματίδια, παραλαμβάνουν με καλύτερο τρόπο τα φορτία που δέχεται το υλικό, αυξάνοντας έτσι την ακαμψία και μειώνοντας την ολκιμότητά του. Ωστόσο, το αποτέλεσμα ενίσχυσης τους είναι χαμηλότερο.

Τα σκληρά σωματίδια που βρίσκονται διάσπαρτα σε μια μαλακότερη μήτρα, προσδίδουν μεγαλύτερη αντοχή στη φθορά και την τριβή. Αντιθέτως, τα μαλακά σωματίδια σε μια σκληρή μήτρα αυξάνουν την εργασιμότητα του υλικού και μειώνουν τον συντελεστή τριβής, π.χ. σωματίδια μολύβδου σε μήτρα χαλκού. Τέλος, ο συνδυασμός μήτρας με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (χαλκός, ασήμι) με πυρίμαχη ενισχυτική φάση (βολφράμιο, μολυβδαίνιο) χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας.

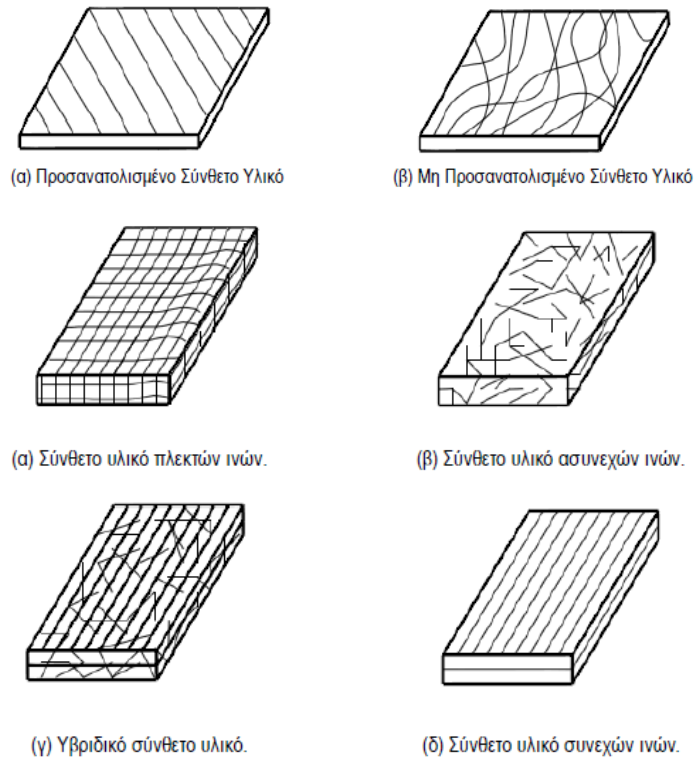
1.5.2 Πολυστρωματικά Σύνθετα – Laminate Composites

Το σύνθετο υλικό αποτελείται από πολλές στρώσεις, με διαφορετικό, ανισότροπο προσανατολισμό ινών σε κάθε μία ή μια μήτρα ενισχυμένη με φύλλα. Τα σύνθετα φύλλα παρέχουν αυξημένη μηχανική αντοχή σε δύο διευθύνσεις, ενώ στην κάθετη στα φύλλα διεύθυνση οι ιδιότητες είναι χαμηλότερες.

1.5.3 Ινώδη Σύνθετα – Fibrous Composites

Η μήτρα είναι ενισχυμένη με ίνες οι οποίες βελτιώνουν την αντοχή, την ακαμψία και τη σκληρότητα του σύνθετου, εμποδίζοντας την ανάπτυξη ρωγμών κατά την κατεύθυνση των ινών.

1. Σύνθετα ενισχυμένα με βραχείες ίνες. Η μήτρα ενισχύεται με βραχείες ίνες μήκους μικρότερο από 100 φορές τη διάμετρό τους, ασυνεχούς μορφής.
 - 1.1 Σύνθετα με τυχαίο προσανατολισμό ινών.
 - 1.2 Σύνθετα με συγκεκριμένο προσανατολισμό ινών
2. Σύνθετα ενισχυμένα με μακρές ίνες. Η μήτρα ενισχύεται με μακρές ίνες συνεχούς μορφής.
 - 2.1 Σύνθετα με μονοκατευθυντικό προσανατολισμό ινών.
 - 2.2 Σύνθετα με αμφίδρομο προσανατολισμό ινών.

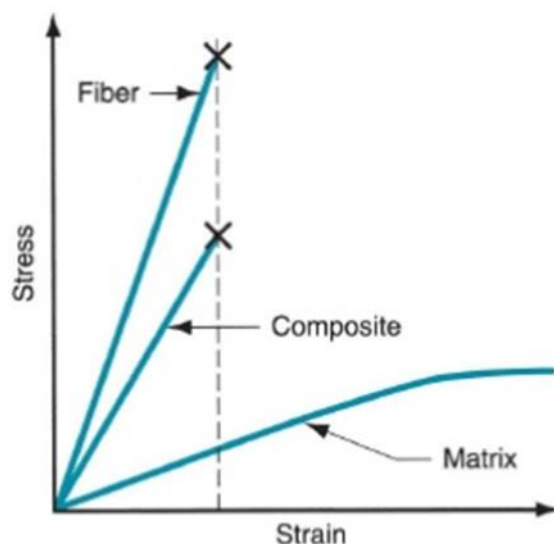


Εικόνα 1.4 Τύποι σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες [5]

Στην περίπτωση όπου οι ίνες έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό, η επίδραση της ενίσχυσης είναι εντονότερη όταν εφαρμόζεται τάση κατά την ίδια διεύθυνση. Επίσης, το ενισχυτικό αποτέλεσμα είναι υψηλότερο με ίνες μακρές και συνεχείς από ότι με βραχείες, όπου η μήτρα έχει περιορισμένη ικανότητα να κατανέμει το φορτίο. Ωστόσο, όταν το φορτίο επιβάλλεται σε σύνθετο με μακρές ίνες, παραλαμβάνεται κυρίως από αυτές και η μήτρα χρησιμεύει μόνο ως συνδετικό υλικό, διατηρώντας το σχήμα και τις ιδιότητες του υλικού.

1.6 Ενισχυτικές ίνες

Όπως έχει τονισθεί ανωτέρω, ο σκοπός των φάσεων ενίσχυσης είναι να βελτιώσουν τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Για το λόγο αυτό, οι ίνες επιλέγονται έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, μεγάλη ακαμψία, χαμηλή δυσθραυστότητα και μικρή πυκνότητα. Στην Εικόνα 1.5 φαίνονται σχηματικά οι αντοχές των επιμέρους μερών ενός σύνθετου υλικού αλλά και η αντοχή του σαν σύνολο. Το κύριο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η γραμμική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, σε αντίθεση με τη μήτρα η οποία έχει ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Οι ίνες, ως κύριος μηχανισμός παραλαβής φορτίου, καθορίζουν τη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού, για αυτό το τελευταίο συμπεριφέρεται ελαστικά. [16]



Εικόνα 1.5 Συγκριτικά η μηχανική συμπεριφορά ενισχυτικών ινών, σύνθετου υλικού και μήτρας [12]

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι εξής:

- Ίνες γυαλιού
- Ίνες άνθρακα
- Ίνες πολυμερούς – νάιλον, πολυαιθυλένιο, kevlar (αραμίδιο)
- Μεταλλικές ίνες
- Κεραμικές ίνες
- Τριχίτες
- Ίνες φυσικών ορυκτών

1.7 Σύγκριση ενισχυτικών ινών

Οι τυπικές ιδιότητες των ινών που ενισχύουν τη μήτρα ενός σύνθετου υλικού, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1. Επιπλέον, στην τελευταία γραμμή παρουσιάζονται και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα.

Πίνακας 1.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων ενισχυτικών ινών [3]

Ίνες	Πυκνότητα ($\text{kg/m}^3 \times 10^3$)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Παραμόρφωση Αστοχίας (%)
Άνθρακα υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-4800	1.40-2.00
Άνθρακα πολύ υψηλής αντοχής	1.80	215-235	3500-6000	1.50-2.30
Άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.90	350-500	2500-3100	0.50-0.90
Άνθρακα πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.90	500-700	2100-2400	0.20-0.40
Γυαλιού τύπου E	2.55	70-75	1900-3000	3.00-4.50

Γυαλιού τύπου S	2.45	85-90	3500-4800	4.50-5.50
Αραμιδίου χαμηλού μέτρου ελαστικότητας	1.45	70-80	3500-4100	4.30-5.00
Αραμιδίου υψηλού μέτρου ελαστικότητας	1.45	115-130	3500-4000	2.50-3.50
Χάλυβας	7.86	200	400-1700	12.0-25.0

Όπως διακρίνεται στον Πίνακα 1.1, οι ίνες άνθρακα έχουν εντυπωσιακά υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας από τις υπόλοιπες ίνες αλλά και σημαντικά μικρή παραμόρφωση αστοχίας. Αισθητή είναι και η διαφορά της παραμόρφωσης αστοχίας του χάλυβα, η οποία είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν των ινών, όπως επίσης και το μέτρο ελαστικότητας του που είναι μικρότερο από των ινών άνθρακα. Επίσης, παρατηρώντας τη 2^η και την 4^η στήλη είναι εμφανές ότι τα ανθρακονήματα είναι ελαφρύτερα από τι γυαλί και έχουν σχεδόν διπλάσια αντοχή σε εφελκυσμό από αυτά αλλά και από το χάλυβα.

1.8 Πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα – CFRP

Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (*Carbon Fiber Reinforced Polymers – CFRP*) χαρακτηρίζονται για την υψηλή αναλογία της αντοχής προς το βάρος τους. Παρόλο που η παραγωγή τους είναι δαπανηρή, οι εφαρμογές τους επεκτείνονται ολοένα και περισσότερο σε τομείς πέραν του πολιτικού μηχανικού, όπως η αεροδιαστημική, η κατασκευή πλοίων, αυτοκινήτων κ.α.

Στα CFRP, ως σύνθετα υλικά, διακρίνεται η μήτρα και η ενίσχυση. Η μήτρα ή αλλιώς το συνδετικό υλικό είναι συχνά μία πολυμερής ρητίνη, όπως έποξυ, ή κάποιο άλλο θερμοπλαστικό. Η ενίσχυσή τους επιτυγχάνεται με ανθρακονήματα, τα οποία παρέχουν την ισχυρή αντοχή στο υλικό. Εκτός από ανθρακονήματα, η ενίσχυση μπορεί να περιλαμβάνει και αραμίδιο (kevlar), πολυαιθυλένιο, αλουμίνιο ή γυαλί.

1.8.1 Ιδιότητες CFRP

Όπως και στα υπόλοιπα σύνθετα υλικά, έτσι και στα CFRP, οι ιδιότητες τους επηρεάζονται από τις δύο φάσεις που τα απαρτίζουν. Πιο συγκεκριμένα, τα ανθρακονήματα ευθύνονται για την ακαμψία του σύνθετου υλικού. Επίσης, οι ιδιότητες του επηρεάζονται από τη διεύθυνση των ινών ενίσχυσης, σε αντίθεση με τα ισότροπα υλικά όπως ο χάλυβας, αλλά και από την αναλογία άνθρακα και πολυμερές.

Το μέτρο ελαστικότητας E_c των ενισχυμένων με άνθρακα πολυμερών δίνεται από τις σχέσεις που ακολουθούν για τις εξής δύο περιπτώσεις [9]:

1. Σύνθετα υλικά με ίνες προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση με αυτήν του επιβαλλόμενου φορτίου

$$E_c = V_m E_m + V_f E_f \quad (1.1)$$

Όπου

$V_m E_m$: Ο όγκος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της μήτρας και

$V_f E_f$: Ο όγκος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού των ινών ενίσχυσης.

2. Σύνθετα υλικά με ίνες προσανατολισμένες στην εγκάρσια διεύθυνση από αυτήν του επιβαλλόμενου φορτίου

$$E_c = \left(\frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \right)^{-1} \quad (1.2)$$

1.8.2 Μειονεκτήματα CFRP

Ένα βασικό μειονέκτημα των υλικών αυτών είναι η έλλειψη ολκιμότητας. Η αστοχία υπό μορφή θραύσης στα υλικά αυτά μπορεί να προκληθεί λόγω κακής σύνδεσης μεταξύ των δύο φάσεων – ίνες άνθρακα και πολυμερές - από απόσυρση ινών ή λόγω αποκόλλησης των φύλλων CFRP. Τα CFRP με εποξική μήτρα παρουσιάζουν μηδαμινή πλαστικότητα αφού αστοχούν σε ανηγμένη παραμόρφωση μικρότερη του 0.5%. Παρά τη μεγάλη αντοχή και το σημαντικό μέτρο ελαστικότητάς τους, η ευαισθησία τους σε θραύση είναι καταστροφική, γεγονός που αποτελεί πρόκληση για τους μηχανικούς.

Επιπλέον, λόγω της ευαισθησίας τους στην έκθεση σε κάποιες περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υπεριώδης ακτινοβολία, θαλάσσιο περιβάλλον) , η ανθεκτικότητά τους σε διάρκεια αμφισβητείται. Παρόλο που έχουν εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η έκθεσή τους σε υγρασία μπορεί να υποβαθμίσει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η φάση που θα πληγεί από την υγρασία είναι η πολυμερική μήτρα και όχι οι ίνες, η οποία θα πλαστικοποιηθεί. Ακόμη, έχουν χαμηλή ανθεκτικότητα σε θερμοκρασίες πέραν των 60°C, καθώς η ρητίνη αλλοιώνεται, μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή της και κατ' επέκταση η αντοχή του υλικού.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα ερπυσμού, αφού παρουσιάζουν μείωση εφελκυστικής αντοχής υπό σταθερή τάση. Επίσης, σε αντίθεση με τον χάλυβα και πολλά άλλα μέταλλα, δεν παρουσιάζουν συγκεκριμένο όριο κόπωσης. Έτσι, είναι δύσκολο να προβλεφθεί ο κύκλος φόρτισης στον οποίο θα αστοχήσουν με αποτέλεσμα να υπερδιαστασιολογούνται, δηλαδή να σχεδιάζονται με πολύ μεγάλα περιθώρια ασφαλείας. [3]

Τέλος, η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους, κάποιες φορές μπορεί να θεωρηθεί πλεονέκτημα, άλλες μειονέκτημα, ανάλογα με την εφαρμογή τους. Στον τομέα της παραγωγής, τα CFRP παρουσιάζουν δυσκολία στην επεξεργασία καθώς ο προσανατολισμός των ινών πολλές φορές φθείρει το χρησιμοποιούμενο εργαλείο. Φυσικά το κόστος τους είναι αυτό που πολλές φορές καθιστά απαγορευτική την εφαρμογή τους, με τις ίνες άνθρακα να είναι μέχρι και 25 φορές ακριβότερες από άλλα υλικά. [16]

2 Πειραματική διερεύνηση εσωτερικού κόμβου από χάλυβα ενισχυμένου με CFRP σε κάμψη

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών με απώτερο σκοπό την κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς των κόμβων και τη συμμετοχή του σύνθετου υλικού CFRP σε αυτήν. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των πειραμάτων θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα αναλυτικών μοντέλων για διαπίστωση της ορθότητας και τους και για περεταίρω διερεύνηση της συμπεριφοράς τους. Κατά τη διάρκεια τους προσομοιάστηκαν ένας εσωτερικός συγκολλητός μεταλλικός κόμβος, ενισχυμένος με CFRP και ένας μη ενισχυμένος, υποβαλλόμενοι στο ίδιο κατακόρυφο φορτίο. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο ενός ευρύτερου ερευνητικού προγράμματος, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το 'Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)'. Σκοπός των πειραμάτων ήταν να διερευνηθεί η συμπεριφορά των χάλυβινων δοκιμίων σε συνδυασμό με το σύνθετο υλικό.

2.2 Υλικά δοκιμίων

Χάλυβες

Τα μέλη του κόμβου είναι κατασκευασμένα από δύο ποιότητες χάλυβα. Συγκεκριμένα, ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στα πέλματα του υποστυλώματος και των δύο δοκών εκατέρωθεν του είναι ποιότητας S275JR ενώ του κορμού είναι S235JR. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών όπως προέκυψαν από δοκιμές στο εργοστάσιο παραγωγής τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. [Παράρτηματα Γ και Δ]

Πίνακας 2.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα ποιότητας S275

Steel		Tension	
Grade	Yield (MPa)	Tensile (MPa)	Elongation (%)
S275JR	332.00	475.00	32.00

Πίνακας 2.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα ποιότητας S235

Steel		Tension	
Grade	Yield (MPa)	Tensile (MPa)	Elongation (%)
S235JR	308.00	413.00	35.00
S235JR	308.00	413.00	35.00
S235JR	301.00	403.00	34.80
S235JR	308.00	413.00	35.00
S235JR	308.00	413.00	35.00
S235JR	315.00	401.00	34.30
S235JR	305.00	411.00	34.70
Average	307.57	409.57	34.83

CFRP

Ο χαλύβδινος κόμβος ενισχύεται με ανθρακονήματα σε εποξειδική μήτρα. Είναι υλικό το οποίο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι να φτάσει τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του. Οι διαστάσεις των ελασμάτων σε χιλιοστά είναι 50x560x1.2. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των CFRP τύπου S512 που αναφέρονται στη συνέχεια, λαμβάνονται από τα φύλλα ιδιοτήτων της εταιρίας κατασκευής τους, Sika.

- i. Πυκνότητα: $\rho = 1.60 \text{ gm/cm}^3$
- ii. Μέτρο Ελαστικότητας: $E = 170000 \text{ MPa}$
- iii. Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό: $\sigma = 2900 \text{ MPa}$
- iv. Παραμόρφωση αστοχίας: $\varepsilon > 1.80\%$

Εποξική ρητίνη

Τα ινοπλισμένα με άνθρακα πολυμερή ενσωματώθηκαν στο δοκίμιο χάλυβα με χρήση ρητίνης επικόλλησης, Sikadur 30, υψηλής αντοχής, της ίδιας εταιρίας. Η κόλλα αυτή προκύπτει από συνδυασμό εποξειδικών ρητίνων και ειδικών αδρανών, σε αναλογία 3:1, σχεδιασμένη για χρήση σε θερμοκρασίες μεταξύ +8°C έως +35 °C. Επίσης, είναι εύκολη στην ανάμειξη και την εφαρμογή της, έχει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, η σκλήρυνσή της δεν επηρεάζεται από την υγρασία του υποστρώματος, δεν συρρικνώνεται και είναι αδιαπέραστη από υγρά και υδρατμούς.

Τα κυριότερα μηχανικά χαρακτηριστικά της είναι:

- i. Αντοχή σε εφελκυσμό: 21-24 MPa
- ii. Παραμόρφωση αστοχίας: 1%
- iii. Μέτρο Ελαστικότητας σε εφελκυσμό: 11.2 MPa
- iv. Μέτρο Ελαστικότητας σε Θλίψη: 9.6 MPa
- v. Διατμητική αντοχή : 13-16 MPa

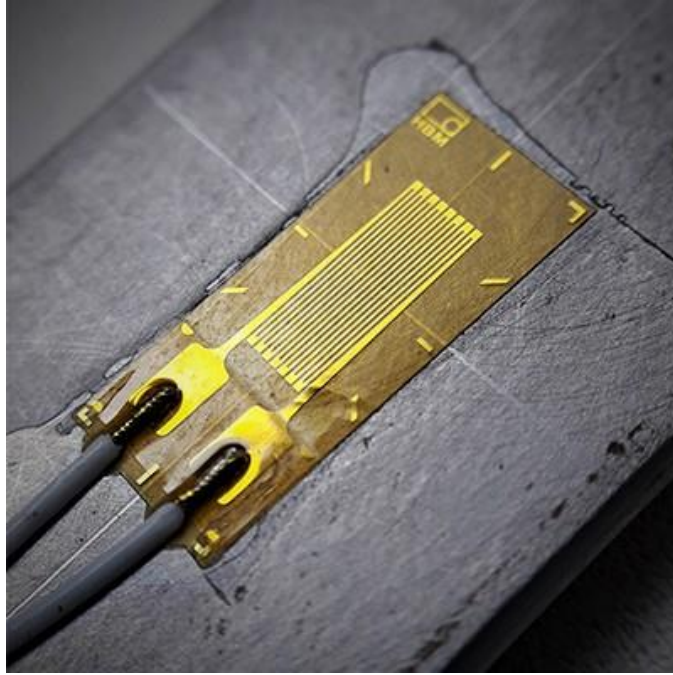
Τα φύλλα ιδιοτήτων των δύο υλικών της εταιρίας Sika δίνονται στα Παραρτήματα Α και Β.

2.3 Όργανα μέτρησης παραμορφώσεων

Τα αποτελέσματα του πειράματος λήφθηκαν με τη βοήθεια μετρητών, strain gauges και LVDTs, τα οποία τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις στα δύο μοντέλα και κατέγραψαν τις παραμορφώσεις τους.

Strain Gauges

Τα strain gauges είναι αισθητήρες οι οποίοι μετρούν με μεγάλη ακρίβεια παραμορφώσεις. Αποτελούνται από ένα μονωτικό εύκαμπτο στήριγμα που υποστηρίζει ένα φύλλο αλουμινίου. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μετατροπή παραμέτρων όπως δύναμη, πίεση, τάση ή βάρος σε μία αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση, η οποία μπορεί να μετρηθεί. Η αντίσταση τους ποικίλλει ανάλογα με την δύναμη που δέχονται.[11]



Εικόνα 2.1 Τυπική μορφή μετρητή strain gauge [10]

Οι μετρητές εκμεταλλεύονται την εξάρτηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της γεωμετρίας του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, η αντίσταση εξαρτάται άμεσα από το μήκος και τη διατομή του αγωγού κατά αυτόν τον τρόπο: [10]

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

Όπου

R : η αντίσταση

ρ : η ειδική αντίσταση (εξαρτάται από τη φύση του υλικού)

L : το μήκος

A : η διατομή του αγωγού

Οι μετρητές προσαρτώνται στο μοντέλο με τη βοήθεια κόλλας και έτσι το φύλλο αλουμινίου παραμορφώνεται μαζί με αυτό. Η παραμόρφωση του πρώτου προκαλεί αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση και τα δύο αυτά μεγέθη σχετίζονται μέσω του συντελεστή *Gauge Factor GF*.

$$GF = \frac{\Delta R/R_G}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Όπου

ΔR : η αλλαγή στην αντίσταση που προκαλείται λόγω παραμόρφωσης

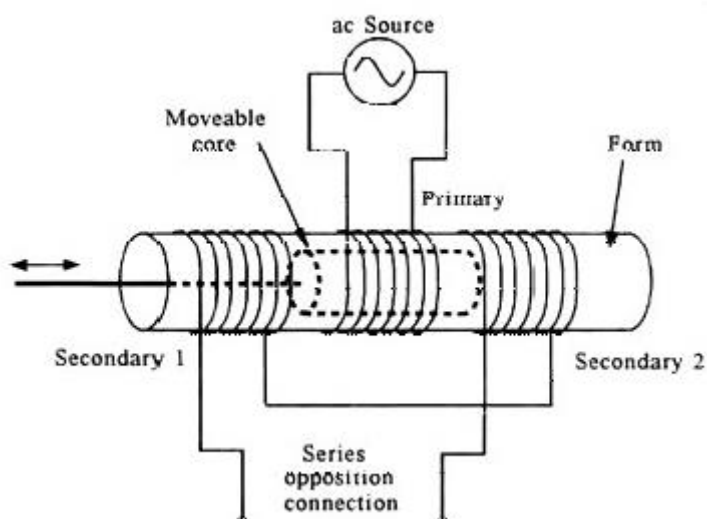
R_G : η αντίσταση του απαραμόρφωτου μετρητή

ε : η παραμόρφωση

Linear Variable Differential Transformers

Με τους γραμμικά μεταβλητούς διαφορικούς μετασχηματιστές LVDTs μετρήθηκαν μετατοπίσεις στα δύο μοντέλα. Η λειτουργία τους έγκειται στο μετασχηματισμό μιας γραμμικής μετατόπισης σε ανάλογο ηλεκτρικό σήμα, μέσω της δημιουργίας μαγνητικής ροής, δίνοντας πληροφορίες τόσο για την απόσταση όσο και για την κατεύθυνση.

Ένα LVDT αποτελείται από έναν πυρήνα, προσαρτημένο στο μοντέλο, ένα κεντρικό σωληνοειδές πηνίο και άλλα δύο δευτερεύοντα εκατέρωθεν του. Τα τρία πηνία είναι τυλιγμένα γύρο από τον πυρήνα, σε μία κοίλη επιφάνεια, ο οποίος είναι ελεύθερος να ολισθήσει. Το κεντρικό πηνίο διεγείρεται από μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος AC και αυτό προκαλεί τάση AC και στα δευτερεύοντα πηνία που είναι συνδεδεμένα μαζί του. Η συχνότητα κυμαίνεται από 1 έως 10 kHz. Η αλλαγή των επαγόμενων τάσεων μεταξύ των κεντρικού και δευτερευόντων πηνίων προκαλείται από την κίνηση του πυρήνα. Η μέτρηση αυτής της τάσης, δηλαδή της φάσης και του πλάτους της, οδηγεί στον προσδιορισμό της κίνησης του πυρήνα άρα και της μετατόπισης. [14]

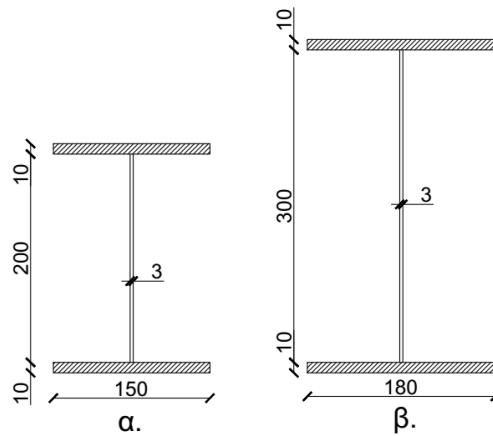


Εικόνα 2.2 Γενική διάταξη LVDT [14]

Τα LVDTs χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και χαμηλά επίπεδα φθοράς καθώς δεν υπάρχει φυσική επαφή με το αισθητήριο στοιχείο, τον πυρήνα. Επίσης οι μετρήσεις προκύπτουν αποκλειστικά από τη μονοαξονική γραμμική κίνηση του πυρήνα και δεν επηρεάζονται από άλλες κινήσεις ή τυχόν περιστροφή του.

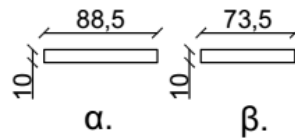
2.4 Πείραμα 1 – μη ενισχυμένος κόμβος

Τόσο οι χαλύβδινες δοκοί διατομής I όσο και το υποστύλωμα, αποτελούνται από συγκολλητές διατομές, η γεωμετρία και οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 2.1. Όλες οι διαστάσεις δίνονται σε χιλιοστά. Τα μήκη των δύο δοκών είναι 2360mm και του υποστύλωματος είναι 660mm.



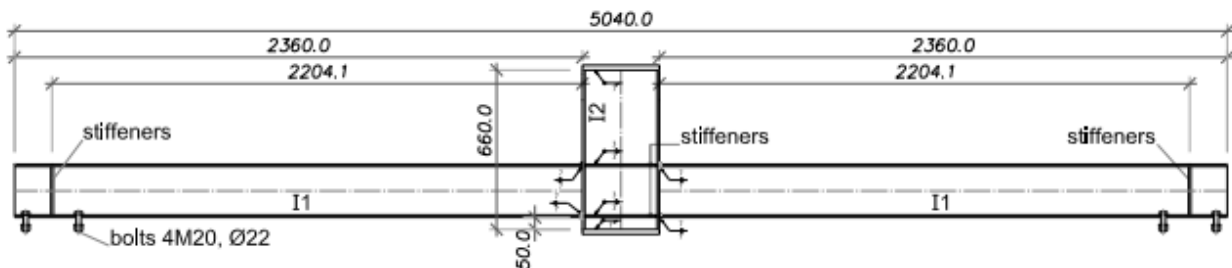
Σχήμα 2.1α. Συγκολλητή διατομή δοκού, β. Συγκολλητή διατομή υποστυλώματος

Στις θέσεις πάνω από τις στηρίξεις, τοποθετήθηκαν ενισχύσεις ορθογωνικής διατομής στη δοκό. Ενισχύσεις τοποθετήθηκαν επίσης και στον κορμό του υποστυλώματος στα σημεία όπου συνδέεται με τη δοκό για αποφυγή ασυνεχειών αλλά και στην κορυφή, όπου επιβάλλεται το φορτίο. Οι διαστάσεις των stiffener φαίνονται στο Σχήμα 2.2 ενώ το ύψος τους είναι ίσο με το ύψος του αντίστοιχου κορμού τον οποίο ενισχύουν, 200mm και 300mm.



Σχήμα 2.2 α. Ενισχυτικό έλασμα κορμού υποστυλώματος, β. Ενισχυτικό έλασμα κορμού δοκού

2.4.1 Διάταξη πειράματος 1



Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης 1 [17]

Στις φωτογραφίες της Εικόνας 2.3 φαίνεται η διάταξη του πρώτου πειράματος, όπως αυτό πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών. Οι δύο δοκοί συγκολλήθηκαν εκατέρωθεν του υποστυλώματος και οι κορμοί τους ενισχύθηκαν με τα Stiffeners όπως παρουσιάστηκαν ανωτέρω (Σχήμα 2.2). Το μοντέλο στηρίζεται αμφιαρθρωτά στα άκρα των δοκών.

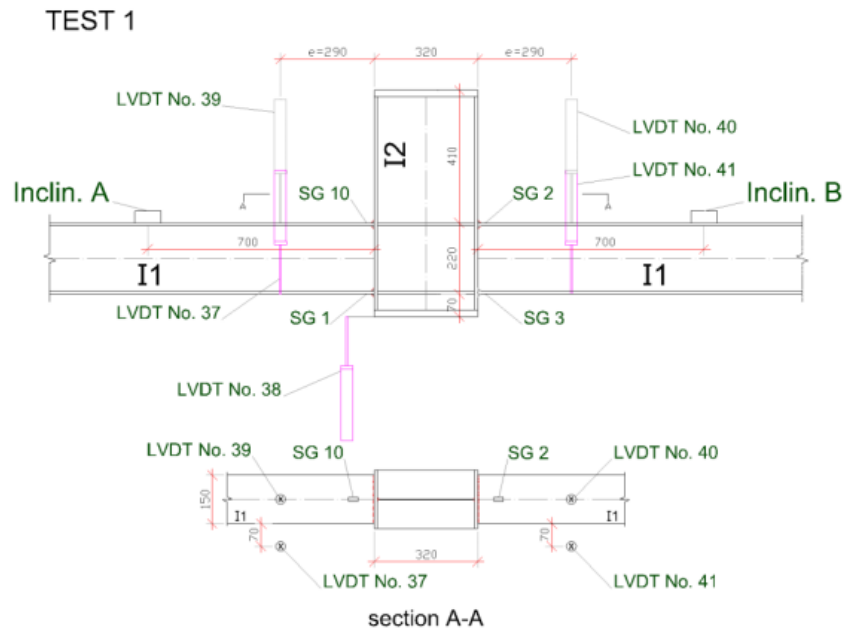


Εικόνα 2.3 Διάταξη πειράματος 1 στο Εργαστήριο Μεταλλικών κατασκευών

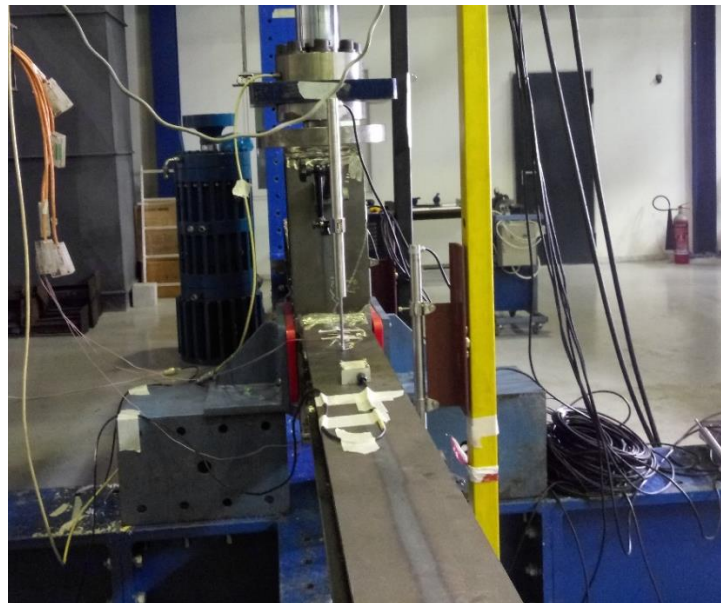


Εικόνα 2.4 Υδραυλικό έμβολο επιβολής κατακόρυφης πίεσης

Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο υποβάλλεται στη μηχανή φόρτισης, ένα υδραυλικό έμβολο (Εικόνα 2.4). Είναι ευθυγραμμισμένο κάτω από αυτό, ενώ το υποστύλωμα εξασφαλίζεται πλευρικά ούτως ώστε να μην εκτραπεί και να εμφανιστεί η παραμόρφωση αποκλειστικά στα θλιβόμενα πέλματα. Επίσης, στα πέλματα των δοκών, εκεί όπου αναμένεται και η αστοχία, τοποθετήθηκαν οι μετρητές παραμορφώσεων και μετακινήσεων, strain gauges και LVDTs (Σχήμα 2.4). Πιο συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν 4 strain gauges, ένα σε κάθε πέλμα των δοκών, πλησίον του υποστύλωματος για μέτρηση των παραμορφώσεων τους. Τα LVDTs τοποθετήθηκαν στα τέσσερα πέλματα των δοκών, σε απόσταση περίπου 290mm από τα πέλματα του υποστύλωματος και ένα στη βάση του για μέτρηση κατακόρυφων βελών.



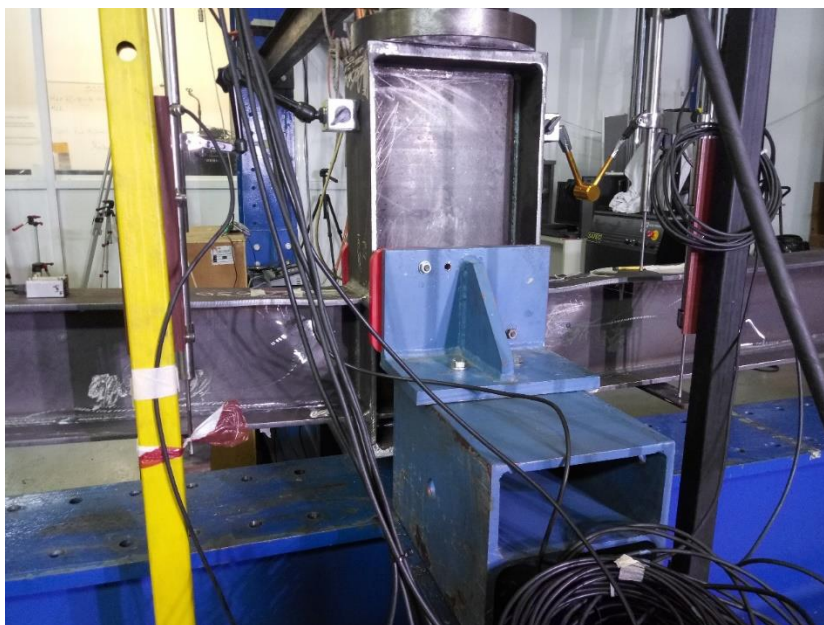
Σχήμα 2.4 Διάταξη μετρητών strain gauges και LVDTs στο μοντέλο πειράματος 1 [17]



Εικόνα 2.5 Τοποθέτηση μετρητών παραμόρφωσης στις επιφάνειες του μοντέλου

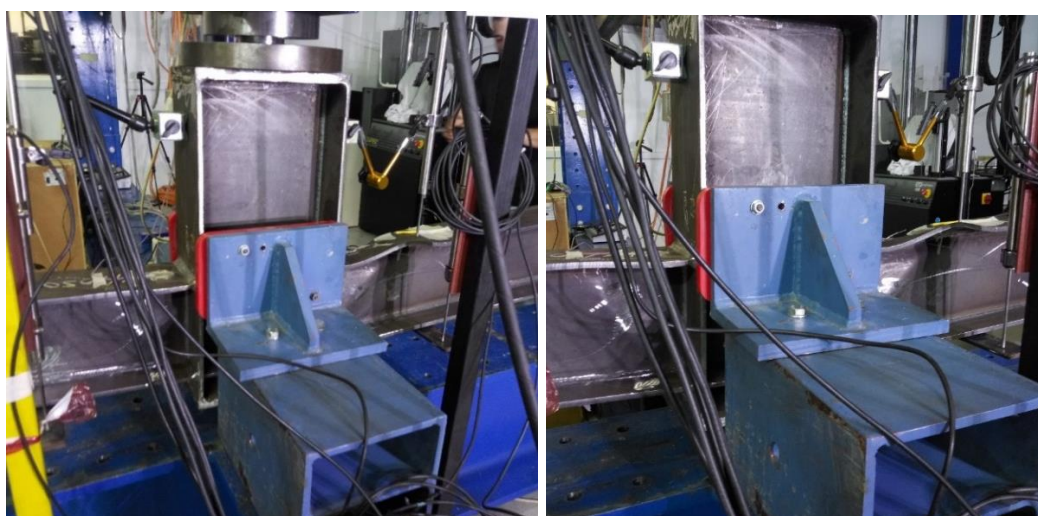
2.4.2 Πειραματική διαδικασία 1

Το μοντέλο καταπονείται σε κάμψη, αφού επιβάλλεται κατακόρυφο φορτίο στο υποστύλωμα και αναπτύσσονται δύο ίσες και αντίρροπες ροπές στις δοκούς εκατέρωθεν του. Το φορτίο επιβάλλεται μέσω του υδραυλικού εμβόλου, υπό μορφή πίεσης με ρυθμό 0.022mm/sec. Η εξέλιξη του πειράματος και η παραμόρφωση του μοντέλου φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 2.6 Αρχικό στάδιο πειράματος – μικρές παραμορφώσεις στις δοκούς

Καθώς αρχίζει η επιβολή του φορτίου, αρχίζουν να παραμορφώνονται τα θλιβόμενα πέλματα και αντίστοιχα ο κορμός των δοκών. Με την αύξηση του φορτίου η παραμόρφωση γίνεται όλο και πιο έντονη τόσο στα πέλματα όσο και στους κορμούς των δοκών (Εικόνα 2.7). Στο τέλος φαίνεται η πλαστικοποίηση του πέλματος δεξιά του υποστύλωματος το οποίο αστοχεί σε τοπικό λυγισμό (Εικόνα 2.8).



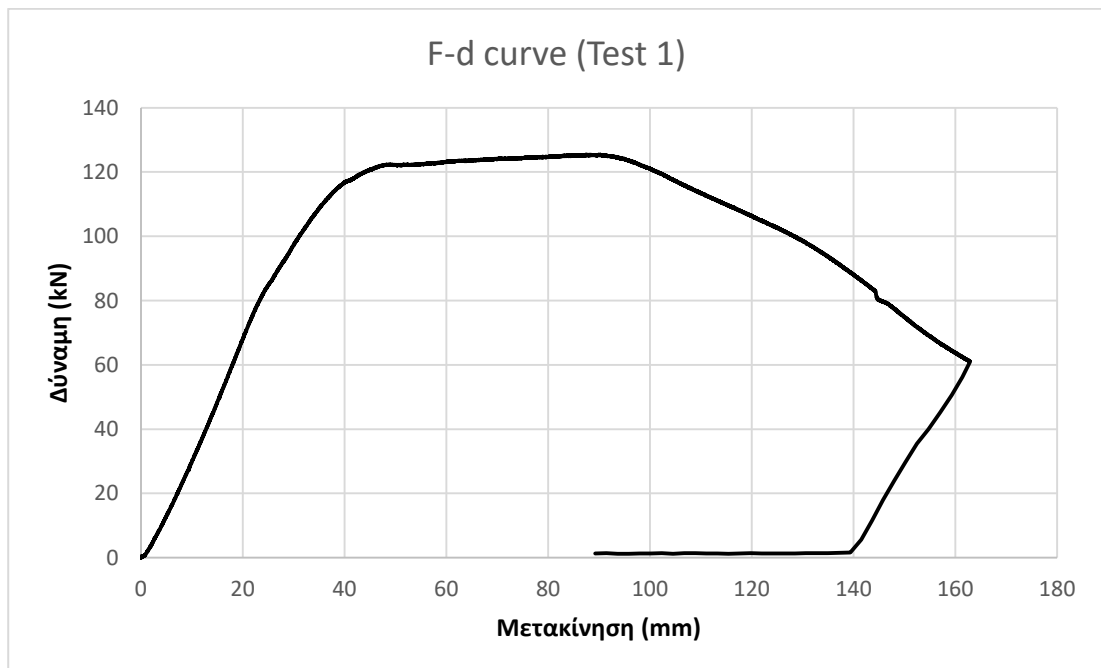
Εικόνα 2.7 Αύξηση παραμόρφωσης καθώς εξελίσσεται το πείραμα



Εικόνα 2.8 Αστοχία - Πλαστικοποίηση θλιβόμενου πέλματος

2.4.3 Αποτελέσματα πειράματος 1

Αφού τελειώσει το πείραμα, λήφθηκαν οι αντίστοιχες τιμές μετατόπισης για κάθε τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου και κατασκευάστηκε η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης εμβόλου (Σχήμα 2.5).



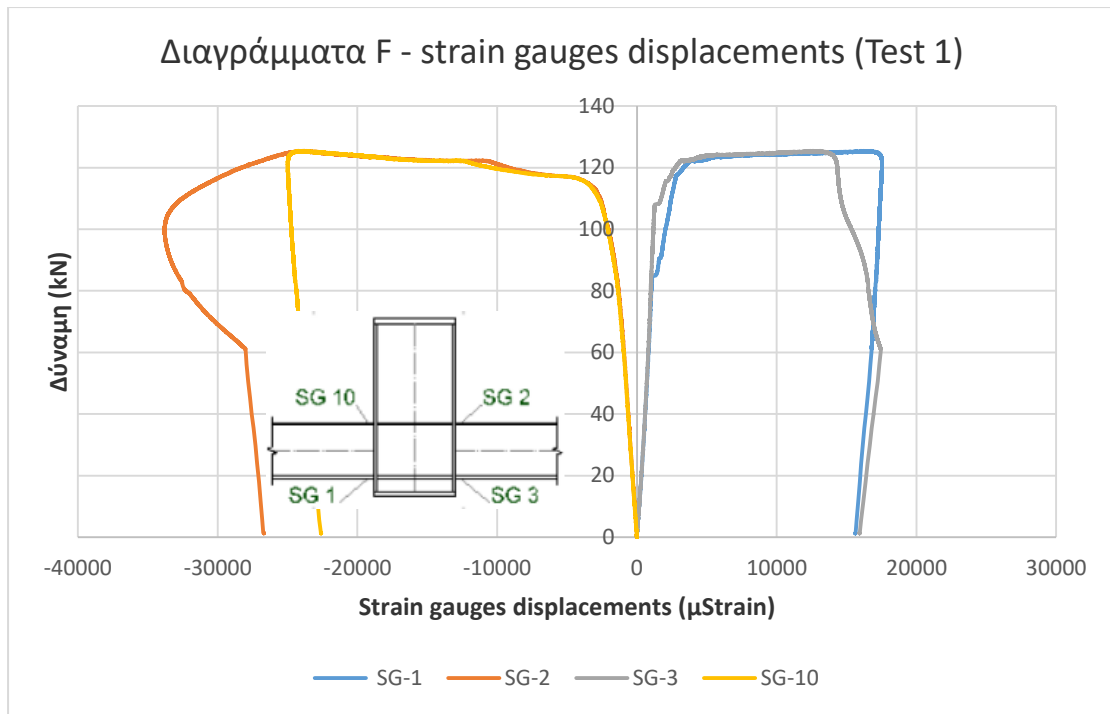
Σχήμα 2.5 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης πειράματος 1

Από την ανωτέρω καμπύλη προκύπτει ότι το μοντέλο διαρρέει για φορτίο περίπου $F_y=122\text{kN}$ και μετατόπιση $d_y=49\text{mm}$. Μετά τη διαρροή, το φορτίο συνεχίζει να αυξάνει μέχρι την τιμή $F_{\max}=125\text{kN}$, για την οποία και αστοχεί σε μετατόπιση $d_u=88.41\text{mm}$. Η μέγιστη μετατόπιση του εμβόλου είναι $d_{\max}=163\text{mm}$.

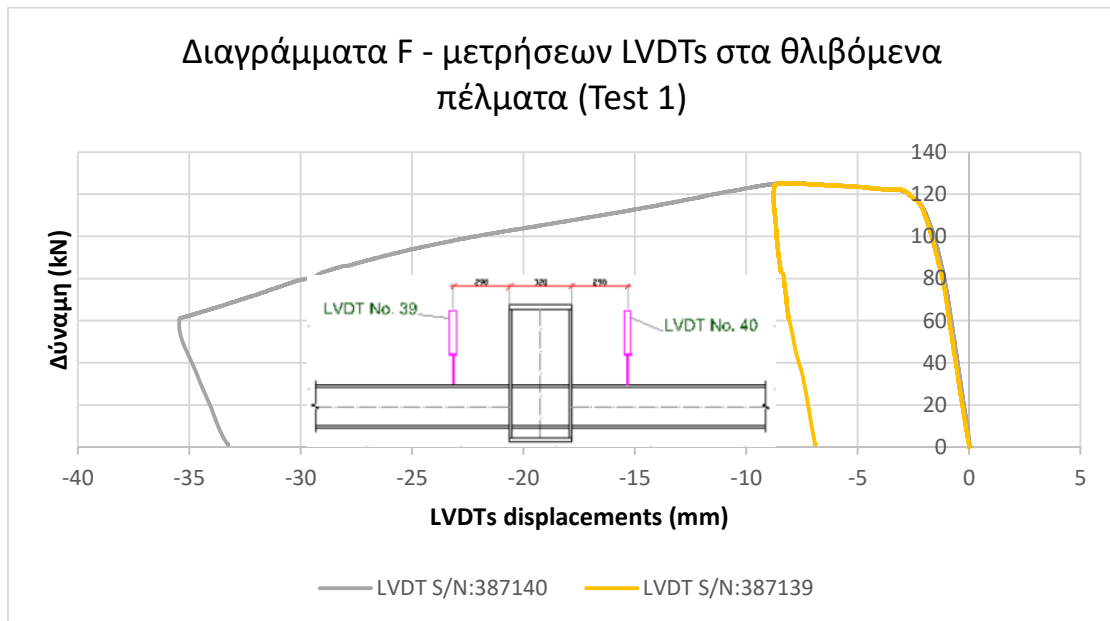


Εικόνα 2.9 Οι μετρητές στο παραμορφωμένο πλέον μοντέλο

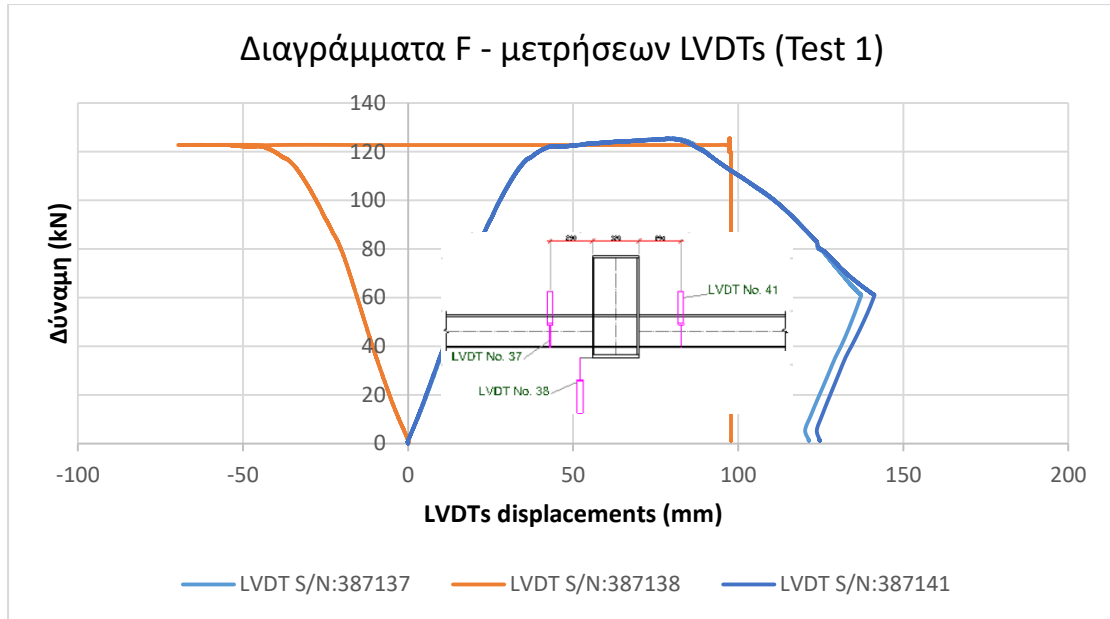
Στη συνέχεια λήφθηκαν οι μετρήσεις παραμόρφωσης των strain gauges και των LVDTs καθώς αυτά ήταν συνδεδεμένα με υπολογιστή και κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες, οι μετρητές SG-1 και SG-3, οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι στα κάτω πέλματα, κατέγραψαν θετικές παραμορφώσεις όπως ήταν αναμενόμενο αφού αυτά εφελκύνονταν. Αντίστοιχα, οι SG-2 και SG-10 έδειξαν θλίψη καθώς είχαν τοποθετηθεί στα άνω πέλματα των δοκών. Το ίδιο παρουσιάστηκε και στους μετασχηματιστές LVDTs. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται συγκριτικά τα βέλη των θλιβόμενων πελμάτων των δύο δοκών εκατέρωθεν του υποστυλώματος. Στο δεξιά πέλμα (LVDT S/N:387140) όπου η παραμόρφωση φαίνεται μεγαλύτερη είναι αυτό το οποίο πλαστικοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 2.6 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης μετρητών strain gauges



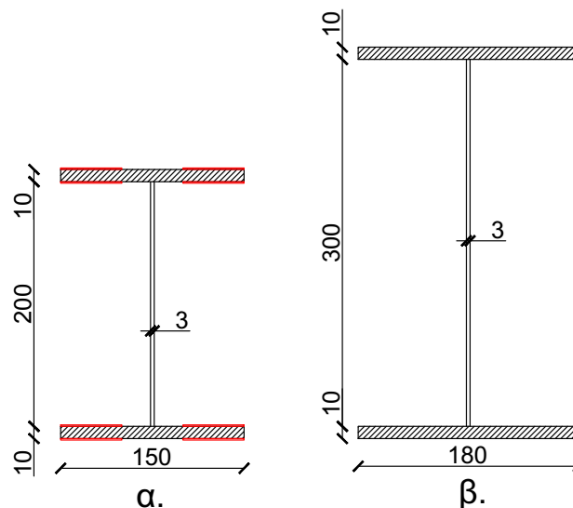
Σχήμα 2.7 Καμπύλες φορτίου-βέλους θλιβόμενων πελμάτων



Σχήμα 2.8 Καμπύλες φορτίου-βέλους εφελκόμενων πελμάτων

2.5 Πείραμα 2 – κόμβος ενισχυμένος με CFRP

Για την εκτέλεση του πειράματος αυτού δημιουργήθηκε ένα όμοιο μοντέλο με το προηγούμενο. Έπειτα τοποθετήθηκαν σε αυτό τα ελάσματα CFRP στα πέλατα κοντά στο υποστύλωμα, για ενίσχυση των περιοχών οι οποίες καταπονούνται περισσότερο. Οι περιοχές αυτές περιλαμβάνουν και το πέλα στο οποίο παρουσιάστηκε η αστοχία τοπικού λυγισμού στο πείραμα 1. Τα CFRP είναι ορθογωνικής διατομής 50x560mm και έχουν πάχος 1.2mm. Προσαρτήθηκαν στο μοντέλο με τη βοήθεια της εποξικής ρητίνης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.2.

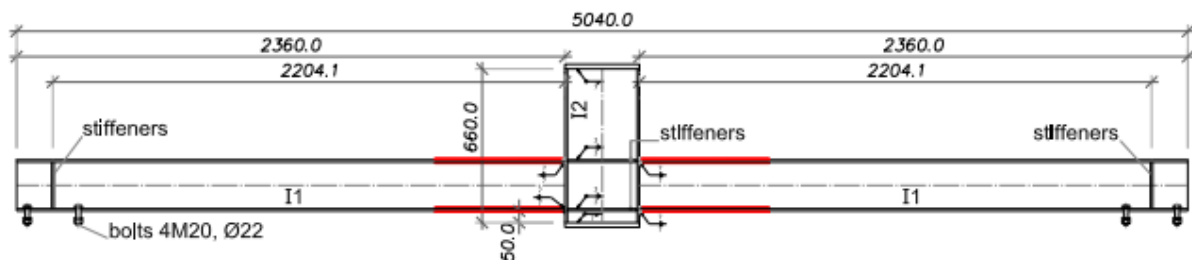


Σχήμα 2.9 α. Συγκολλητή διατομή δοκού ενισχυμένης με CFRP, β. Συγκολλητή διατομή υποστυλώματος



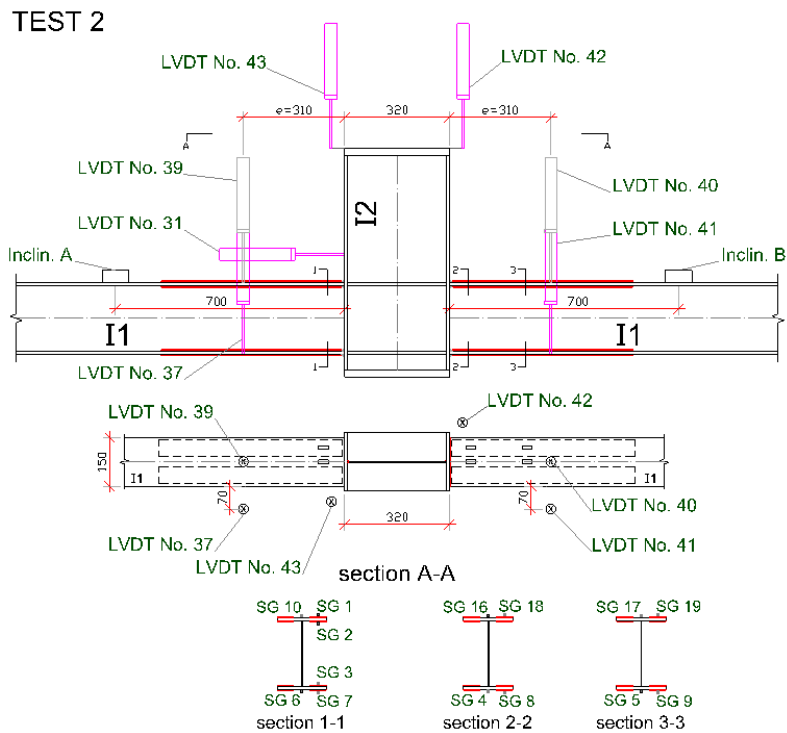
Εικόνα 2.10 Προετοιμασία μοντέλου για το πείραμα 2 - ενίσχυση με CFRP

2.5.1 Διάταξη πειράματος 2

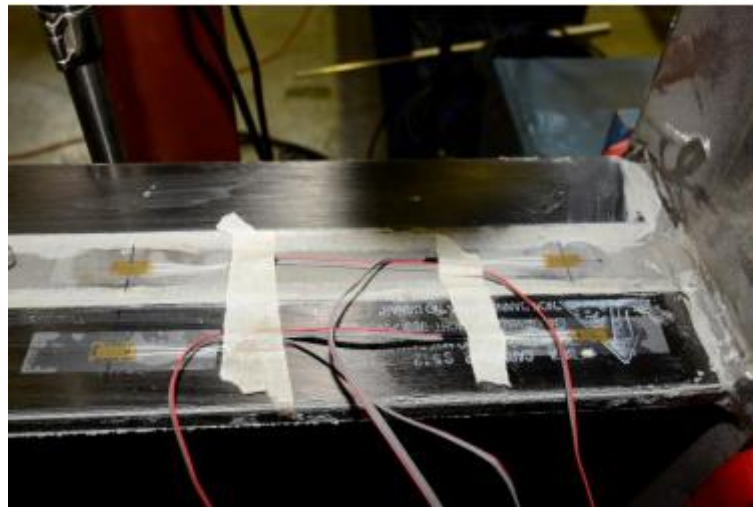


Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης 2 [17]

Η διάταξη του πειράματος είναι ακριβώς ίδια με πριν καθώς σκοπός του είναι να μελετηθεί η συμβολή των CFRP. Έτσι, τοποθετήθηκε το μοντέλο στη μηχανή φόρτισης, με το υποστύλωμα να βρίσκεται κάτω από το υδραυλικό έμβολο και αρθρώνονται οι δοκοί στα άκρα τους. Επίσης διατάχθηκαν οι μετρητές strain gauges και LVDTs πυκνότερα από αυτά του πειράματος 1, σύμφωνα με το Σχήμα 2.11, μαζί με δύο μετρητές γωνιών στροφής των πελμάτων των δοκών. Τέσσερα LVDTs τοποθετήθηκαν στα πέλματα των δοκών και δύο στην κορυφή του υποστύλωματος για μέτρηση κατακόρυφων βελών. Επίσης ένα LVDT υπήρχε στο πέλμα του υποστύλωματος για μέτρηση οριζόντιων μετατοπίσεων. Τέλος, στις δοκούς τοποθετήθηκαν συνολικά 14 strain gauges.



Σχήμα 2.11 Διάταξη μετρητών strain gauges και LVDTs στο μοντέλο πειράματος 2 [17]



Εικόνα 2.11 Τοποθέτηση μετρητών strain gauges στα φύλλα CFRP

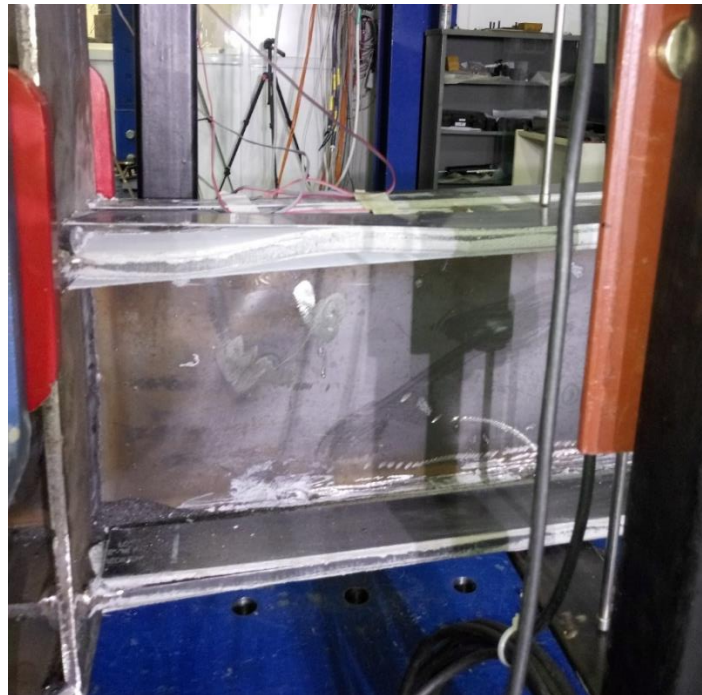
2.5.2 Πειραματική διαδικασία 2

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε όπως περιεγράφηκε και στο πείραμα 1 είναι η σταδιακή επιβολή κατακόρυφης μετατόπισης μέσω του υδραυλικού εμβόλου στο υποστύλωμα. Από πολύ νωρίς, μόλις άρχισαν τα πέλματα να θλίβονται, τα ελάσματα CFRP που βρίσκονταν εξωτερικά του άνω πέλματος αποκολλήθηκαν στο εσωτερικό τους άκρο, πλησίον του υποστύλωματος. Εσωτερικά του άνω πέλματος η αποκόλληση ήταν μικρότερη ωστόσο υπήρξε αποκόλληση και στο μέσον τους, λόγω του λυγισμού του πέλματος. Από τα αρχικά στάδια επίσης, άρχισαν να αποκολλώνται τα ελάσματα και από τα κάτω πέλματα τα οποία εφελκύνονταν.



Εικόνα 2.12 Αρχικό στάδιο πειράματος

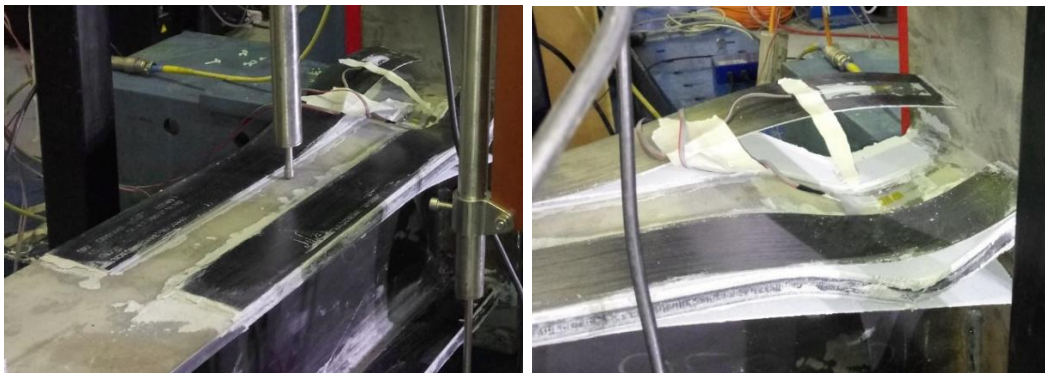
Σύντομα με την αύξηση του φορτίου και της παραμόρφωσης των πελμάτων, τα ελάσματα αποκολλήθηκαν περισσότερο χωρίς ωστόσο να παρουσιάσουν κάποια μορφή θραύσης. Στο εφελκόμενο πέλημα η αποκόλληση δεν φάνηκε να αυξάνει ιδιαίτερα (Εικόνα 2.13). Στη συνέχεια, ο λυγισμός του άνω πέματος έγινε εντονότερος με αποτέλεσμα τα CFRP να αποκολλώνται ακόμα περισσότερο και το έλασμα στο εσωτερικό του άνω πέματος ‘μοιράστηκε’ στο πλάτος του (Εικόνα 2.14). Τέλος, παρουσιάστηκε και πάλι αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού στο άνω πέλημα της δοκού (Εικόνα 2.17).



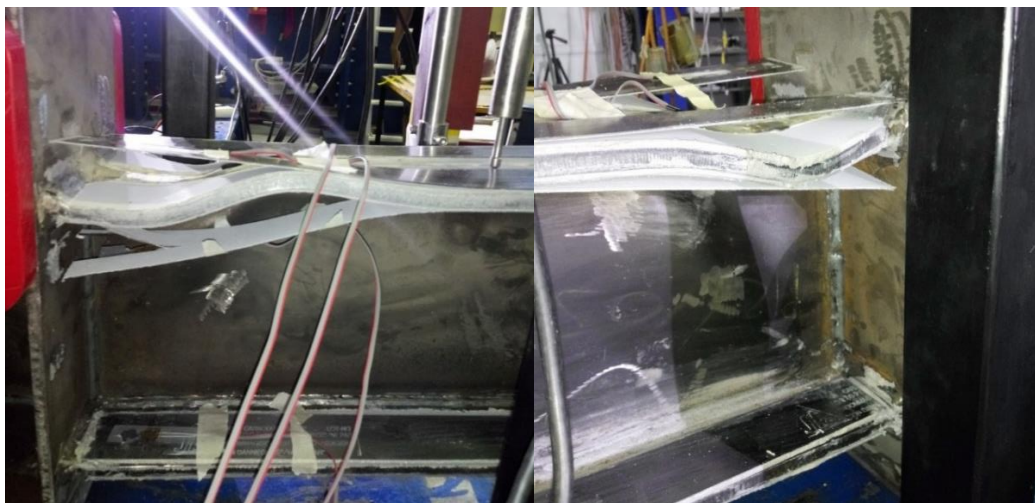
Εικόνα 2.13 Αύξηση παραμόρφωσης με αποτέλεσμα εντονότερη αποκόλληση CFRP



Εικόνα 2.14 Θραύση ελάσματος CFRP



Εικόνα 2.15 Παραμόρφωση ελασμάτων CFRP



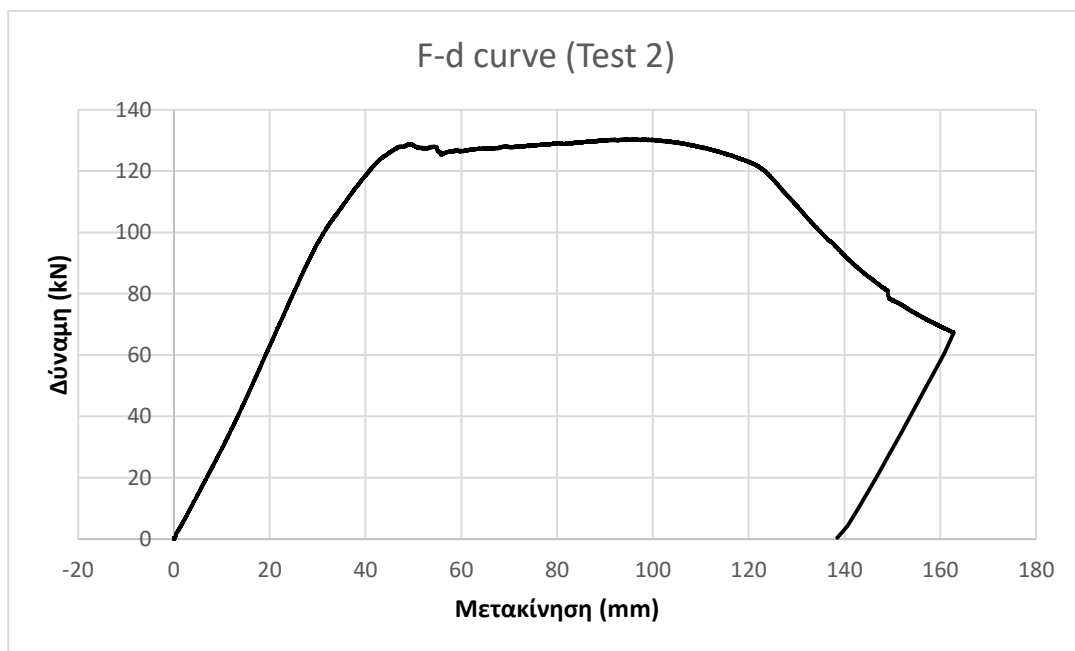
Εικόνα 2.16 Δύο όψεις ίδιου πέλματος



Εικόνα 2.17 Πλαστικοποίηση άνω πέλματος

2.5.3 Αποτελέσματα πειράματος 2

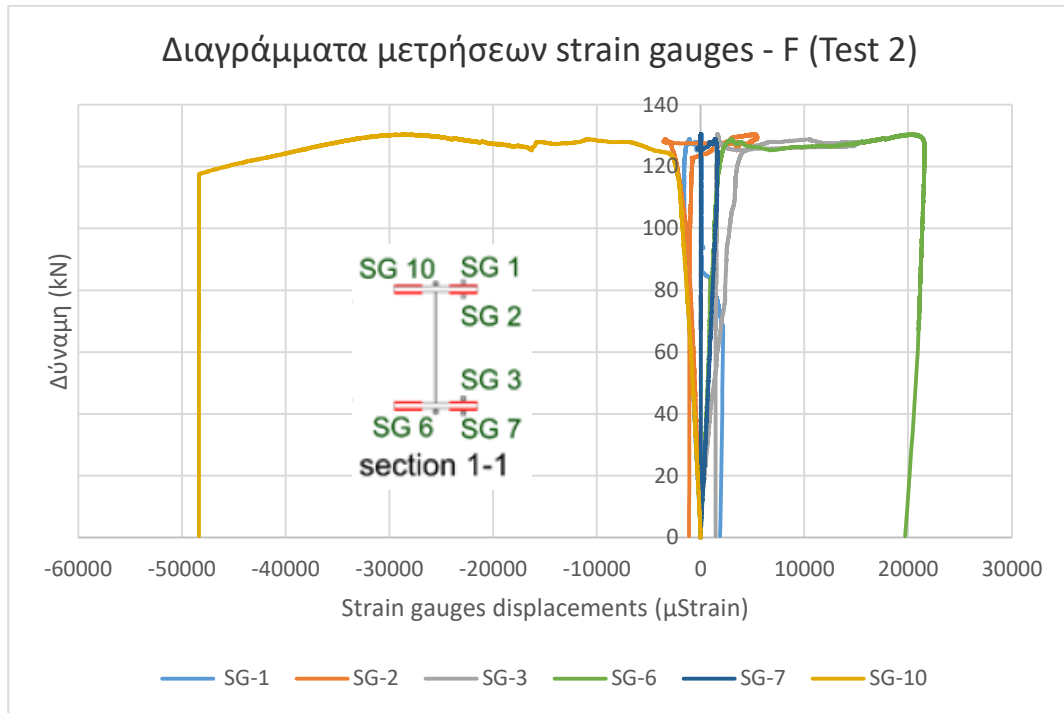
Μετά το τέλος του δεύτερου πειράματος κατασκευάστηκε η καμπύλη δύναμης εμβόλου και αντίστοιχης μετακίνησης όπως φαίνεται πιο κάτω.



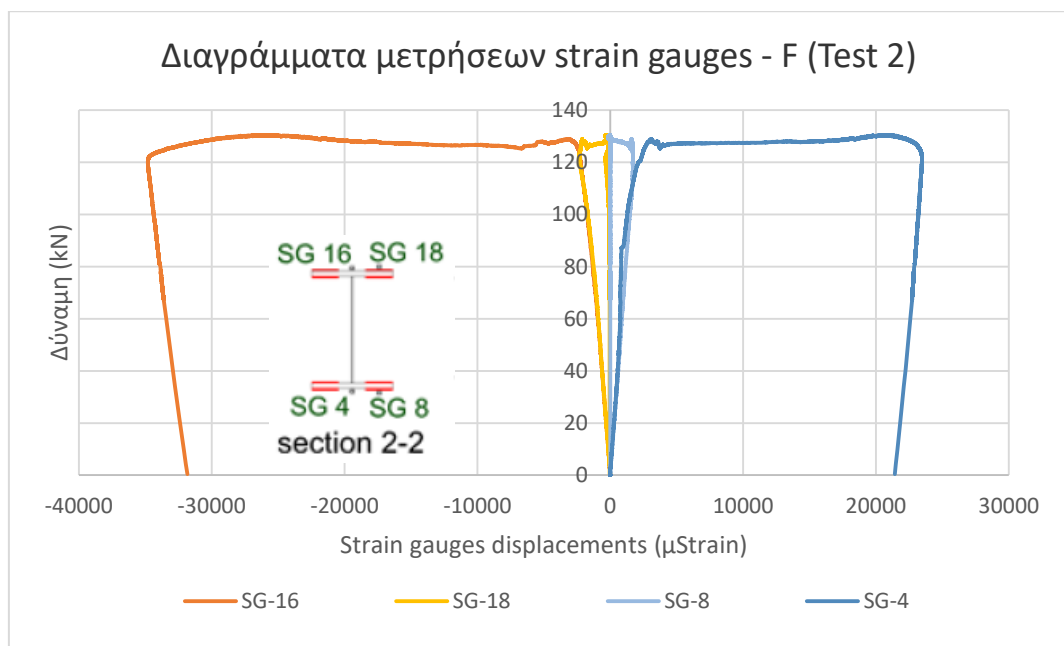
Σχήμα 2.12 Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης πειράματος 2

Από την καμπύλη του Σχήματος Σχήμα 2.12 προκύπτει ότι το μοντέλο διαρρέει για φορτίο $F_y=129\text{kN}$ και μετατόπιση $d_y=49\text{mm}$. Μετά τη διαρροή, το φορτίο αυξάνει ελάχιστα μέχρι τη μέγιστη τιμή του $F_{\max}=130.4\text{kN}$ ενώ μετατόπιση αστοχίας είναι $d_u=94\text{mm}$. Τέλος η μέγιστη μετατόπιση είναι $d_{\max}=162.8\text{mm}$.

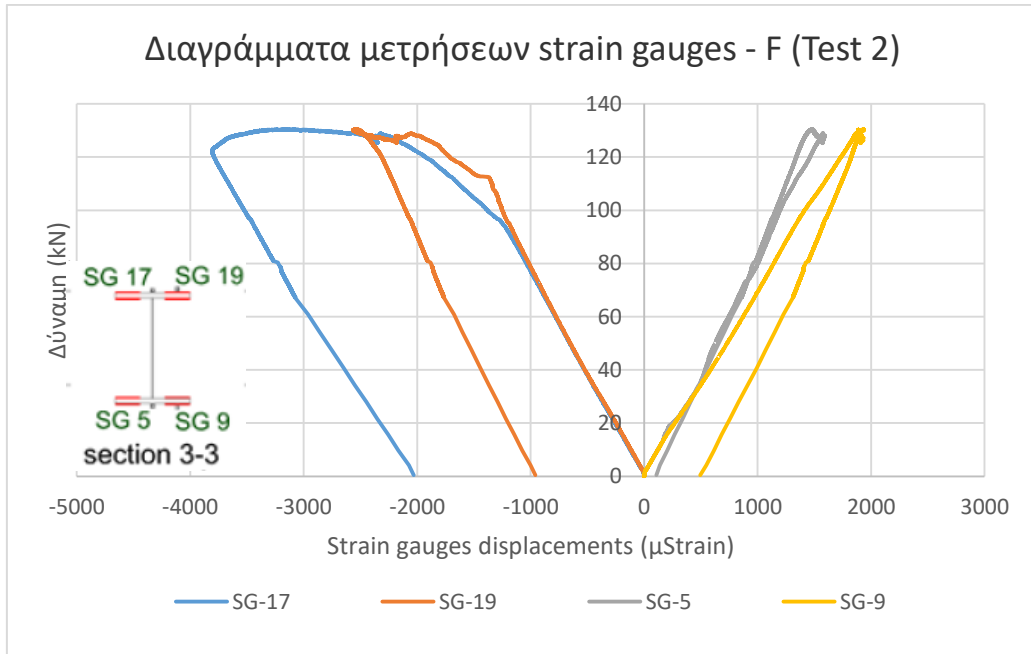
Στο μοντέλο του δεύτερου πειράματος τοποθετήθηκαν 14 strain gauges, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 2.13 Καμπύλες μετρήσεων strain gauges-Section 1-1

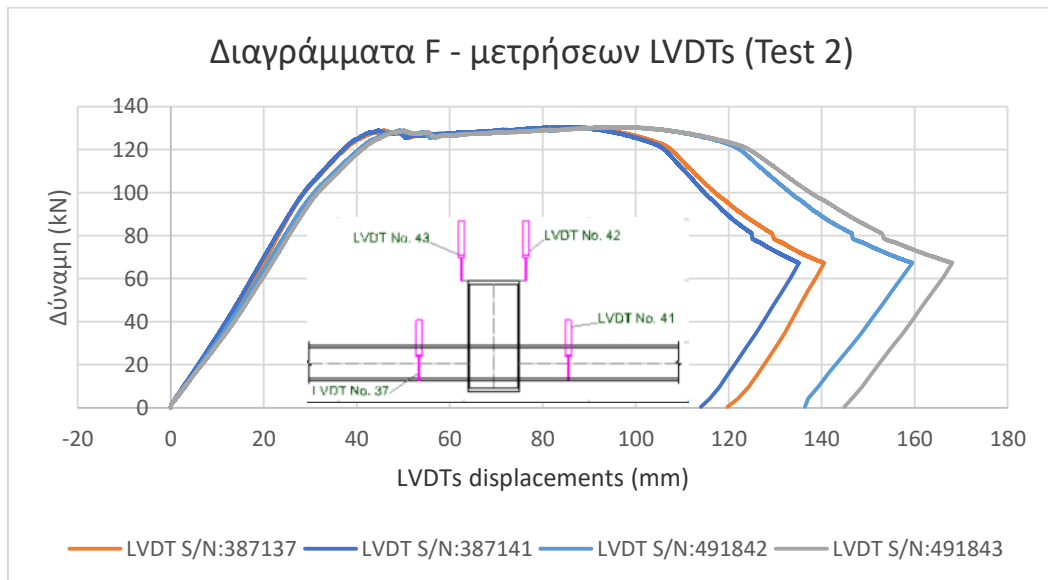


Σχήμα 2.14 Καμπύλες μετρήσεων strain gauges-Section 2-2

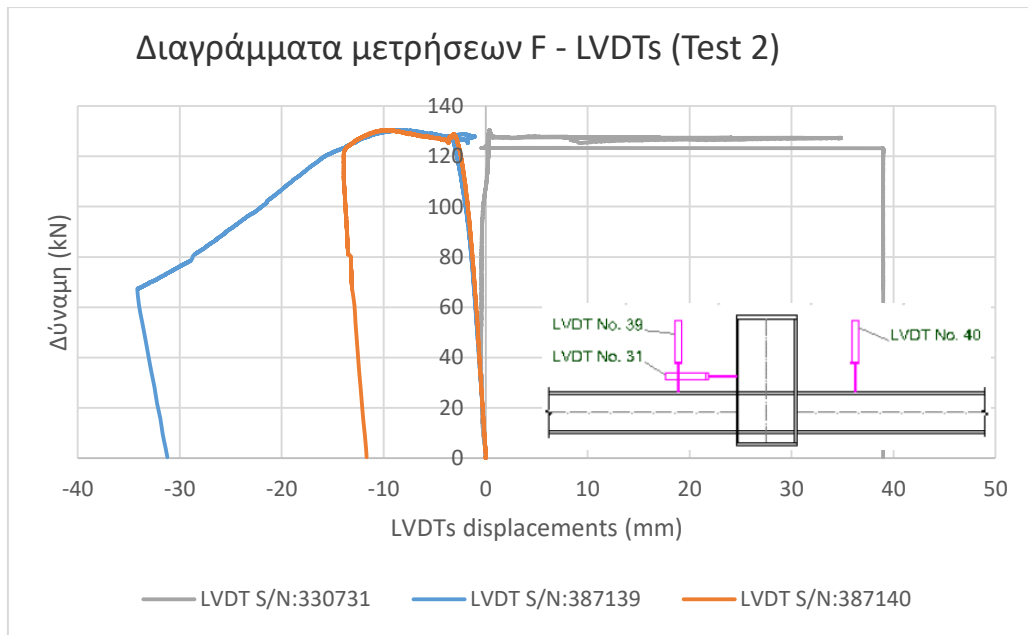


Σχήμα 2.15 Καμπύλες μετρήσεων strain gauges-Section 3-3

Στη συνέχεια φαίνονται οι μετρήσεις των μετασχηματιστών LVDTs συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



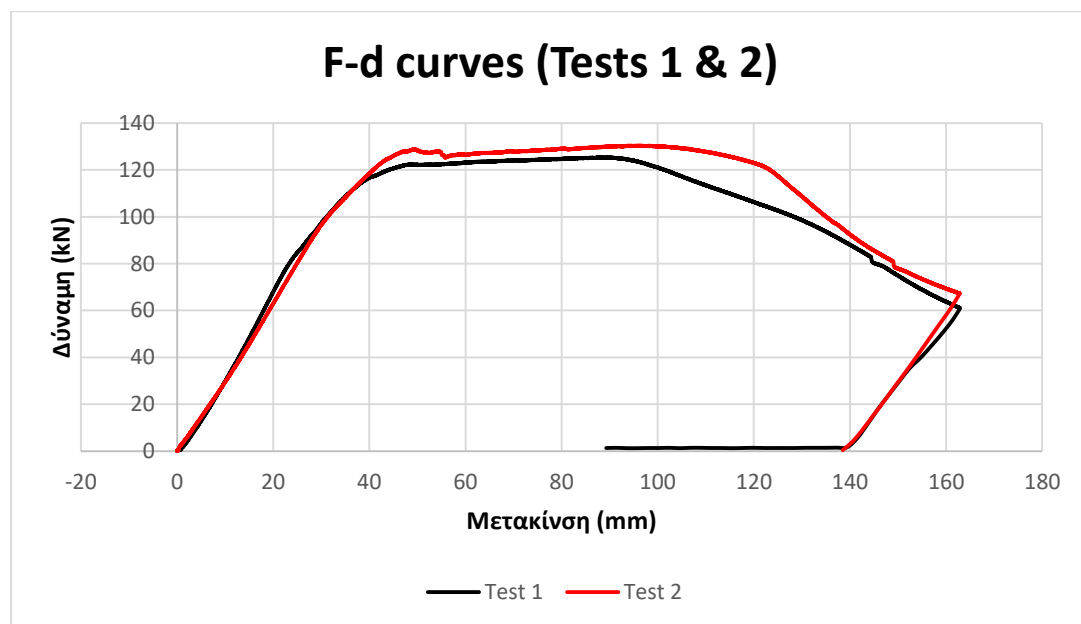
Σχήμα 2.16 Καμπύλες μετρήσεων LVDTs



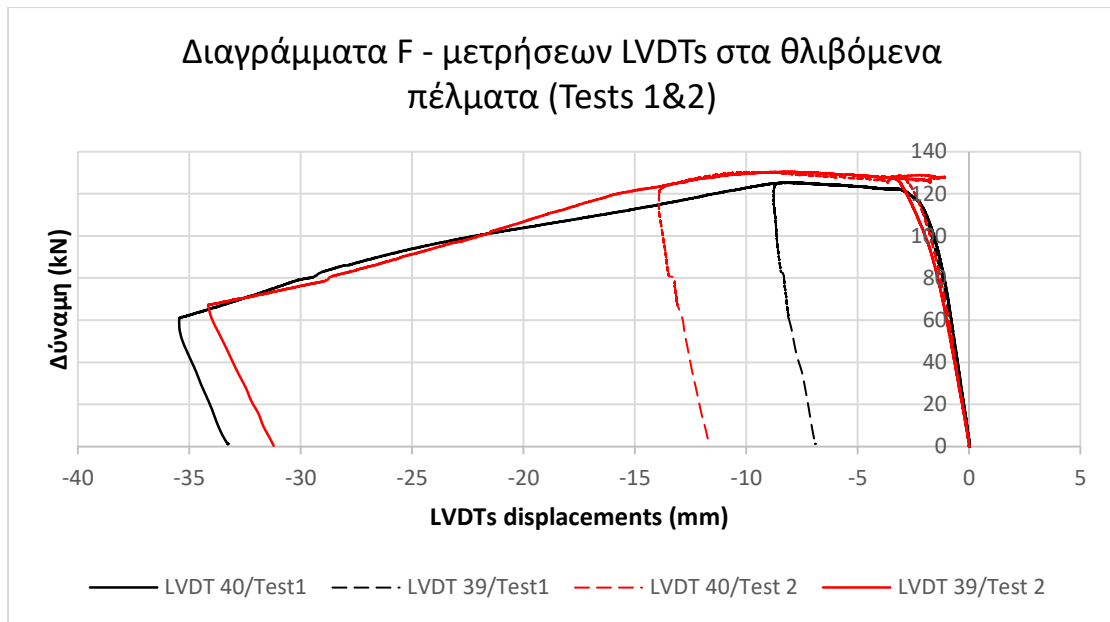
Σχήμα 2.17 Καμπύλες μετρήσεων LVDTs

2.6 Σύγκριση πειραμάτων 1 και 2

Μετά το πέρας των πειραμάτων, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων τους για την επίτευξη του σκοπού τους, δηλαδή τη μελέτη της συμβολής των CFRP. Στο πείραμα 1, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες σε προηγούμενη ενότητα, η αστοχία επήλθε όταν η δοκός υπερέβη την αντοχή της σε κάμψη και εμφανίστηκε τοπικός λυγισμός τόσο στο θλιβόμενο πέλμα της, όσο και στον κορμό της. Το δεύτερο πείραμα, παρόλο που είχε ενισχυμένα πέλματα, δεν είχε τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Οι καμπύλες δύναμης εμβόλου-μετατόπισης των δύο πειραμάτων φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.18 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης πειραμάτων



Σχήμα 2.19 Σύγκριση μετρητών LVDT στα θλιβόμενα πέλματα των δύο μοντέλων

Δυστυχώς τα CFRP αποκολλήθηκαν σε πολύ αρχικά στάδια του πειράματος 2 με αποτέλεσμα το ενισχυμένο μοντέλο να μην παρουσιάσει σημαντικά βελτιωμένη συμπεριφορά. Έτσι, τα δύο μοντέλα φαίνονται να διαρρέουν περίπου την ίδια στιγμή, με το δεύτερο να αστοχεί λίγο αργότερα από το πρώτο (Σχήμα 2.18). Ακόμη, παρατηρώντας τις μετρήσεις που λήφθηκαν από τα θλιβόμενα πέλματα των δοκών των δύο μοντέλων, σε περίπου ίδιες θέσεις, φαίνεται ότι η συνεισφορά των CFRP δεν ήταν σημαντική (Σχήμα 2.19).

3 Αριθμητική προσομοίωση κόμβου πειράματος στο ABAQUS

3.1 Εισαγωγή

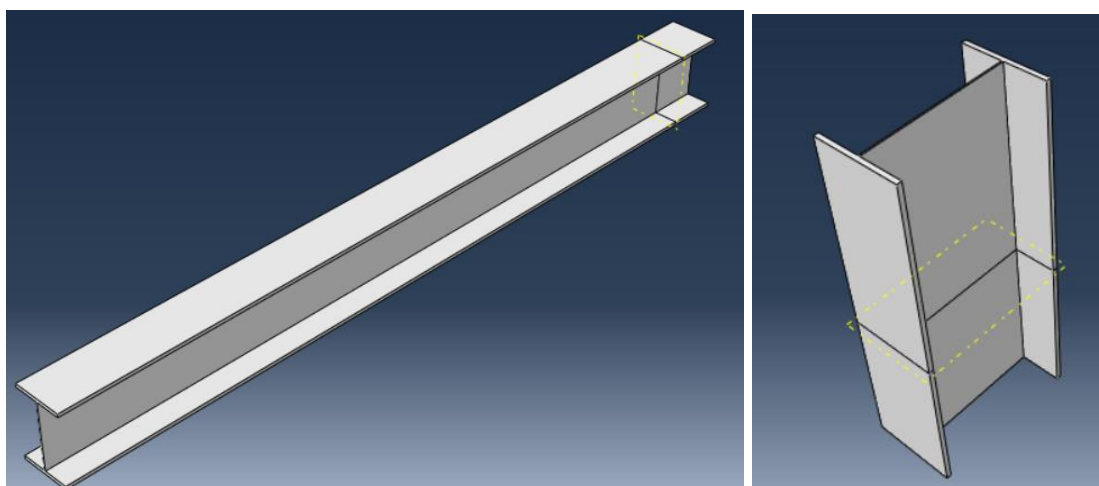
Το μοντέλο κόμβου που χρησιμοποιήθηκε στα ανωτέρω πειράματα προσομοιώνεται στο λογισμικό Abaqus με σκοπό να γίνει αριθμητική ανάλυση. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων. Παρόλο που είναι μία προσεγγιστική μέθοδος, τα αποτελέσματα της είναι αξιόπιστα και για αυτό εφαρμόζεται σχεδόν σε όλα τα προβλήματα.

Η αρχή λειτουργίας της είναι ο διαχωρισμός του μοντέλου σε μικρότερα στοιχεία, τα 'πεπερασμένα στοιχεία', το οποίο εισάγεται μαζί με όλα τα υπόλοιπα δεδομένα του προβλήματος σε κάποιο πρόγραμμα 'solver' και γίνεται η αριθμητική επίλυση του. Στην παρούσα εργασία ως solver επιλέγεται το λογισμικό ABAQUS/CAE το οποίο επιτρέπει τόσο γραμμικές όσο και μη γραμμικές επιλύσεις. Κύριος στόχος είναι η κατασκευή ενός αξιόπιστου προσομοιώματος του μοντέλου κόμβου των πειραμάτων το οποίο θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για περαιτέρω διερεύνηση και κατανόηση της συμπεριφοράς των κόμβων ενισχυμένων με CFRP και μη.

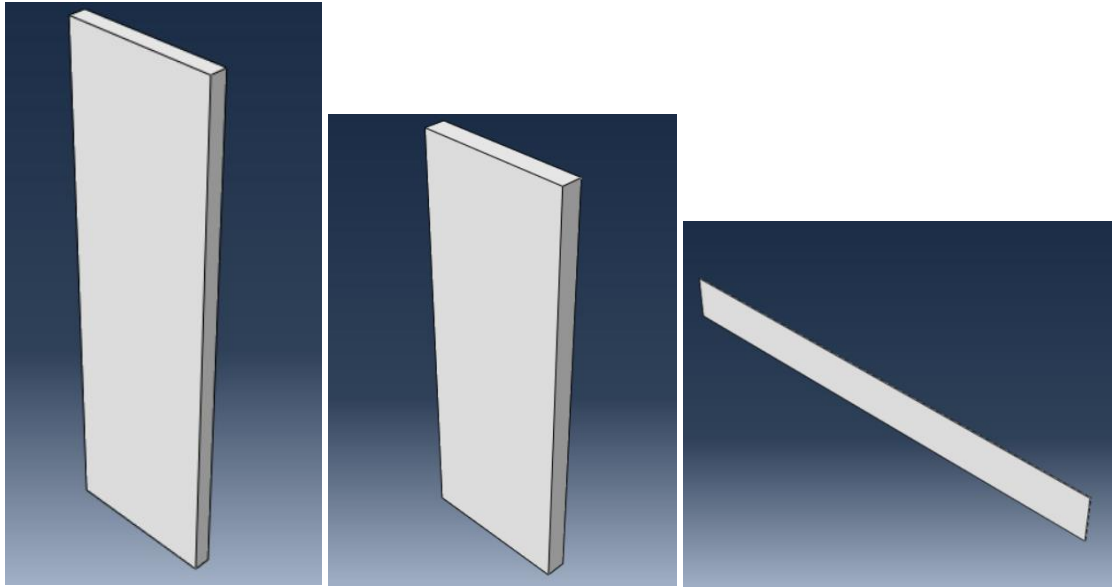
3.2 Διαδικασία και παράμετροι μοντελοποίησης

3.2.1 Γεωμετρία μοντέλων

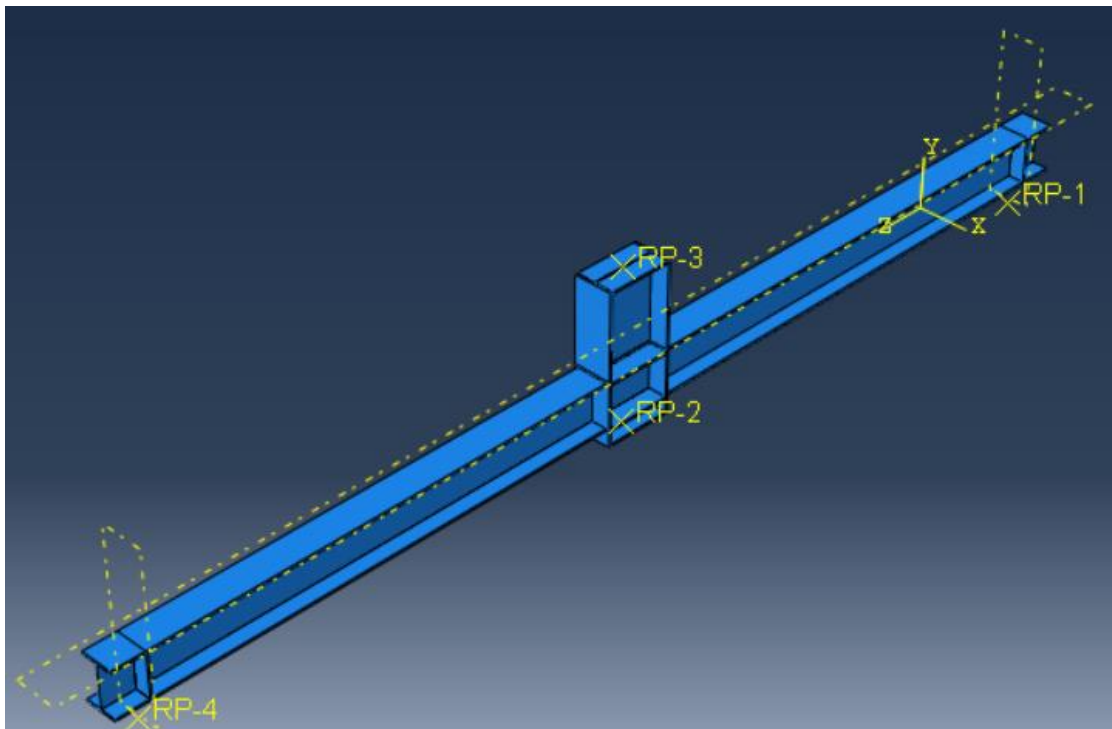
Τα μοντέλα μορφώθηκαν σαν τρισδιάστατα στοιχεία με τις ακριβείς πραγματικές τους διαστάσεις. Οι δοκοί και το υποστύλωμα που απαρτίζουν τον κόμβο αποτελούνται από συγκολλητά επιμέρους στοιχεία τα οποία προσομοιάζονται ξεχωριστά και στη συνέχεια συναρμολογούνται. Επίσης κατασκευάζονται τα stiffeners και τα φύλλα CFRP με τις διαστάσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.



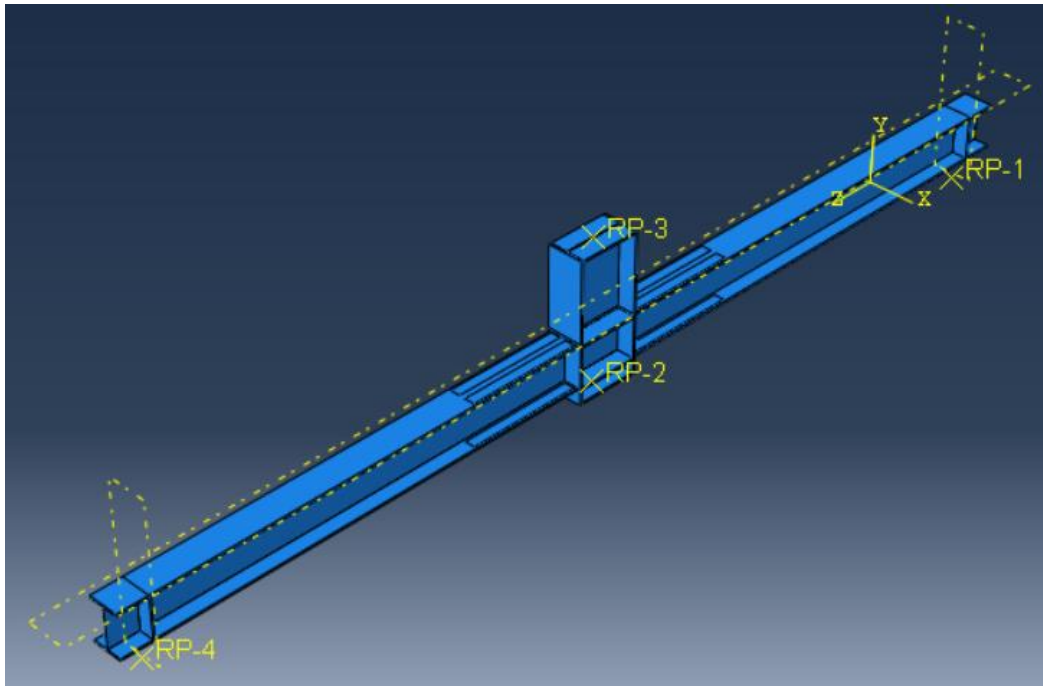
Εικόνα 3.1 Γεωμετρία δοκού και υποστυλώματος



Εικόνα 3.2 α,β.Ενισχύσεις κορμών υποστύλματος και δοκών, γ. Φύλλο CFRP



Εικόνα 3.3 Μοντέλο πειράματος 1

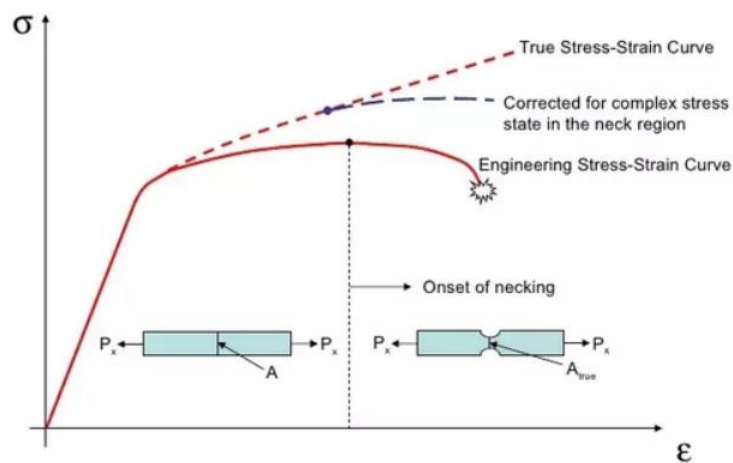


Εικόνα 3.4 Μοντέλο πειράματος 2

3.2.2 Υλικά

Μετατροπή True strain & stress

Κατά την προσομοίωση του χάλυβα στο Abaqus, δεν χρησιμοποιήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών όπως αυτές φαίνονται στα πιστοποιητικά τους. Αντ' αυτού, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις *True stress & strain* για την εύρεση των πραγματικών τιμών τους. Οι σχέσεις αυτές λαμβάνουν υπόψη τη δημιουργία λαιμού κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού στην οποία υποβάλλονται τα δοκίμια. Καθώς σχηματίζεται ο λαιμός, η διατομή του υλικού μειώνεται. Έτσι, αφού η τάση εξαρτάται από το εμβαδόν A της διατομής κατά τη σχέση $\sigma = P/A$, η πραγματική τιμή της θα είναι μεγαλύτερη από την υπολογιστική.



Εικόνα 3.5 Καμπύλες True stress-strain

Οι πραγματικές τιμές λοιπόν προσδιορίζονται ως εξής:

$$\sigma_T = \frac{P}{A_I} = \sigma * (1 + \varepsilon) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_T = \ln\left(\frac{l_i}{l_o}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3.2)$$

Όπου

σ : η τάση στο πιστοποιητικό του υλικού

ε : η παραμόρφωση στο πιστοποιητικό του υλικού

Έτσι, οι τιμές οι οποίες εισήχθησαν στο λογισμικό, μετά από μετατροπή σύμφωνα με τις ανωτέρω σχέσεις φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

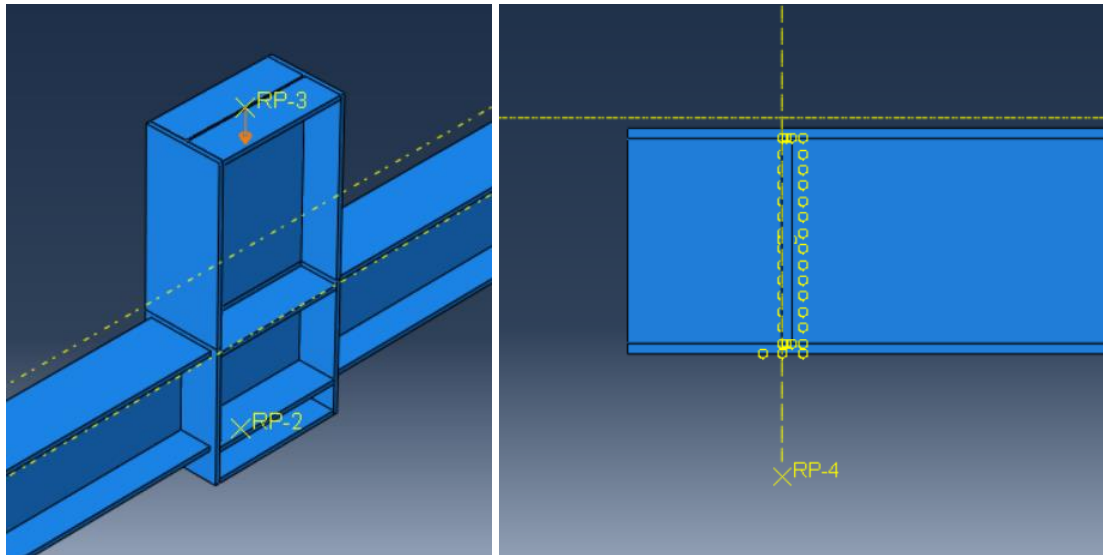
Πίνακας 3.1 Μετατροπή Engineering-True stress-strain

Material	Young's Module	Engineering Stress-Strain			True Stress-Strain		
		Yield (MPa)	Tensile (MPa)	Elongation (%)	Yield (MPa)	Tensile (MPa)	Elongation
S275JR	210000.00	332.00	475.00	32.00	332.52	627.00	0.28
S235JR	210000.00	307.57	409.57	34.83	308.02	552.22	0.30

Το σύνθετο υλικό, το CFRP προσομοιάστηκε σαν ισότροπο υλικό, καθώς δουλεύει σε μία κατεύθυνση, αυτή του προσανατολισμού των ινών τους. Επίσης η συμπεριφορά του θεωρήθηκε ελαστοπλαστική, αφού λειτουργεί ελαστικά. Στην πραγματικότητα δεν πρόλαβε να διαρρεύσει λόγω της αποκόλλησης του στα αρχικά στάδια του πειράματος.

3.2.3 Συνθήκες στήριξης και φόρτιση

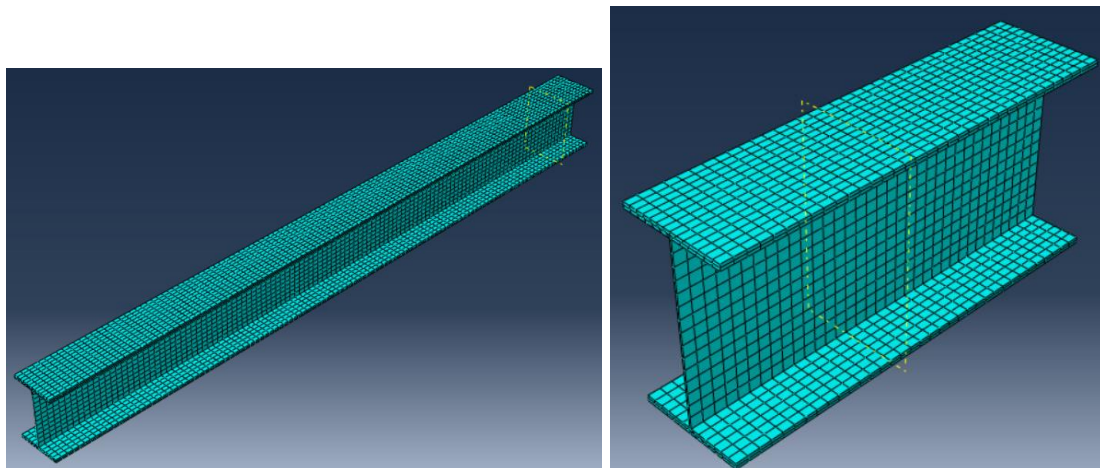
Η φόρτιση στο λογισμικό προσομοιώνεται με επιβαλλόμενη μετατόπιση, κατακόρυφη, στο κέντρο του υποστυλώματος, όπως έγινε και στο πείραμα. Οι αρθρώσεις στα άκρα των δοκών επιτυγχάνονται ορίζοντας ένα σημείο κάτω από αυτές, στην ακριβή θέση όπου ήταν στην πραγματικότητα οι αρθρώσεις και δεσμεύονται οι μετακινήσεις των σημείων εκείνης της περιοχής. Η μόνη ελεύθερη μετακίνηση είναι η στροφή περί άξονα κάθετο στον άξονα της δοκού. Επίσης, εξασφαλίζεται το υποστύλωμα πλευρικά, δεσμεύοντας τις οριζόντιες μετακινήσεις του.



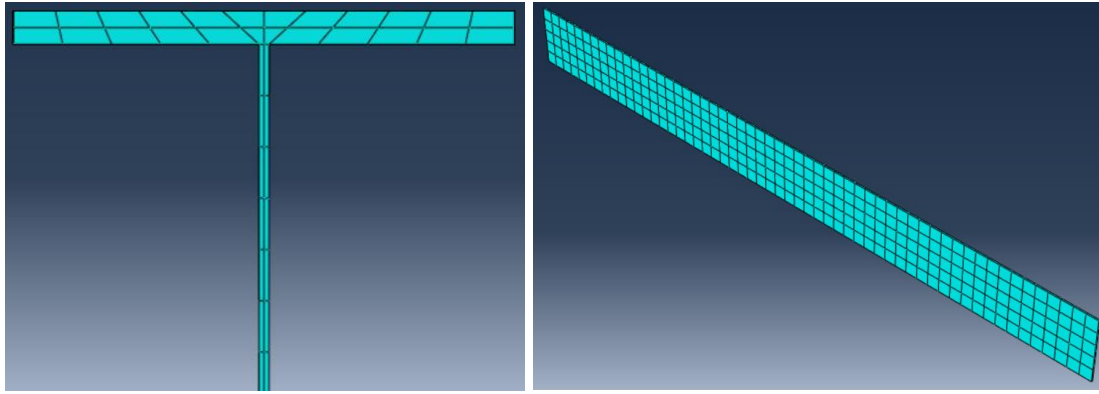
Εικόνα 3.6 Συνθήκες φόρτισης και στήριξης μοντέλου

3.2.4 Διακριτοποίηση μοντέλων σε πεπερασμένα στοιχεία

Τα μοντέλα αποτελούνται από απλά γεωμετρικά σχήματα, έτσι η διακριτοποίηση τους δεν είναι πολύπλοκη. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία 3D Stress με λόγο length ratio=0.1. Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία είναι γραμμικά εξαεδρικά με 8 κόμβους (C3D8R), ίδια για τα χαλύβδινα μέλη και τα CFRP. Οι κορμοί των δοκών και των υποστυλωμάτων, παρόλο το πολύ μικρό τους πάχος (3mm) χωρίστηκαν στα δύο, για να προσεγγίσουν καλύτερα την αστοχία του σε τοπικό λυγισμό, κατά την οποία αναπτύσσεται διάτμηση (Εικόνα 3.8α).



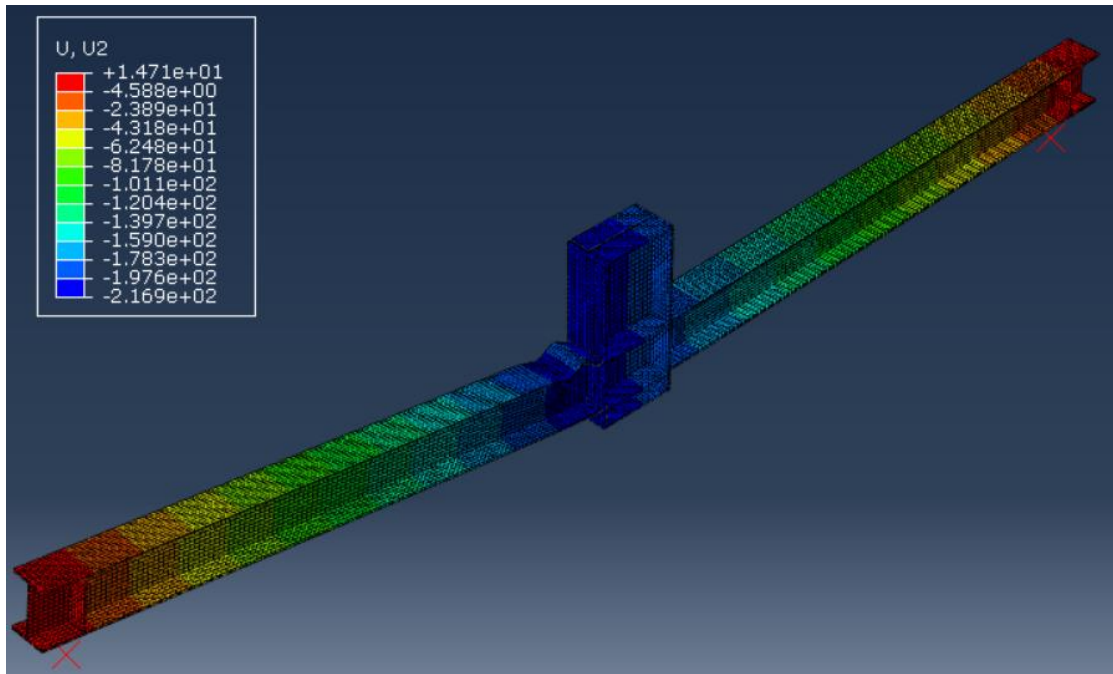
Εικόνα 3.7 Διακριτοποίηση δοκού και υποστυλώματος



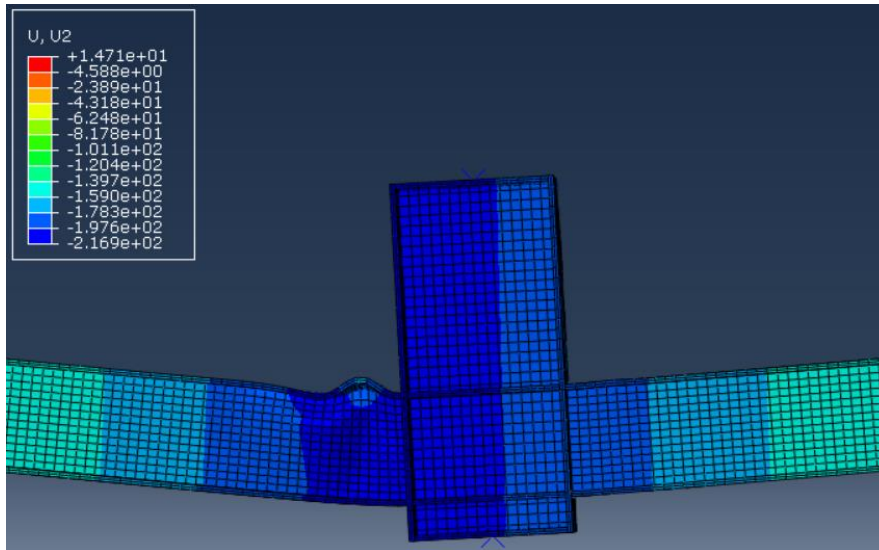
Εικόνα 3.8 α. Λεπτομέρεια διακριτοποίησης κορμού δοκού, β. Διακριτοποίηση CFRP

3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου 1

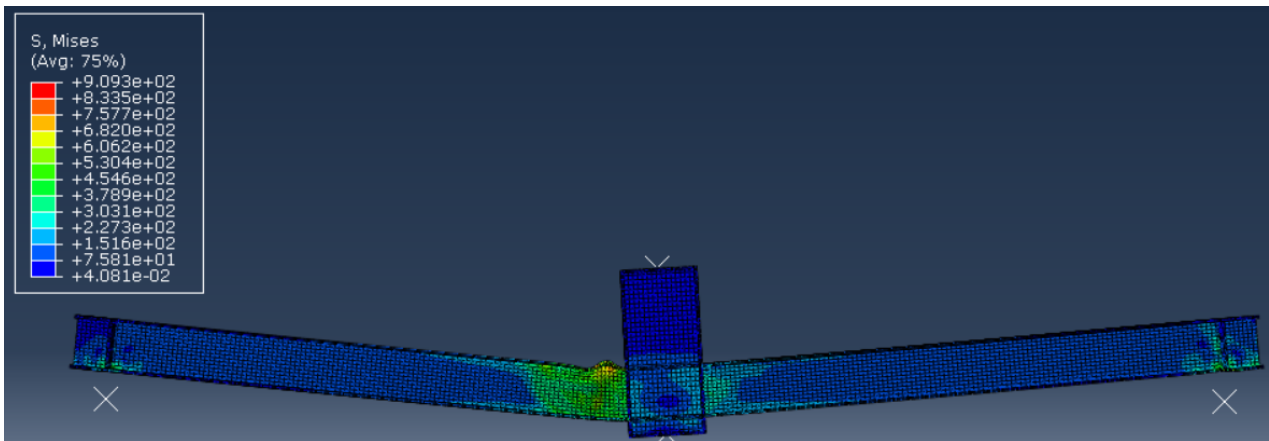
Στην Εικόνα 3.9 φαίνεται η παραμορφωμένη κατάσταση του μοντέλου του πειράματος 1. Το προσομοίωμα δείχνει να αστοχεί όπως και το πραγματικό μοντέλο, με την πλαστικοποίηση του θλιβόμενου πέλματος και την εμφάνιση τοπικού λυγισμού στο πέλμα και τον κορμό της δοκού. Επίσης, η Εικόνα 3.10 δείχνει και μία μικρή στροφή στο υποστύλωμα, η οποία εμφανίστηκε και στο πείραμα στο Εργαστήριο. Στη συνέχεια, στις Εικόνες 3.11 και 3.12, φαίνονται οι τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται στο μοντέλο. Παρατηρείται αύξηση τάσεων, πέραν της τάσης αντοχής της δοκού, στο σημείο σχηματισμού τοπικού λυγισμού, οι οποίες μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό.



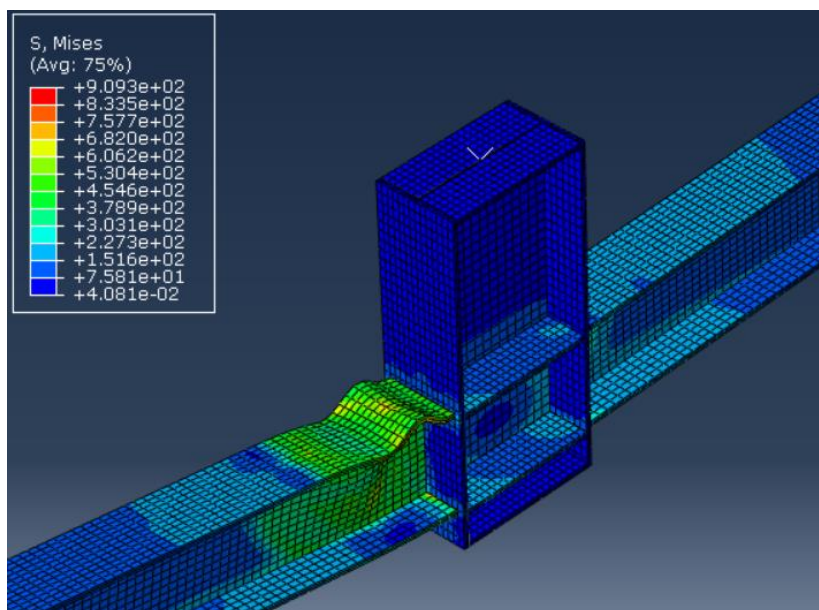
Εικόνα 3.9 Εικόνα παραμορφωμένου φορέα 1



Εικόνα 3.10 Σχηματισμός τοπικού λυγισμού στο θλιβόμενο πέλμα



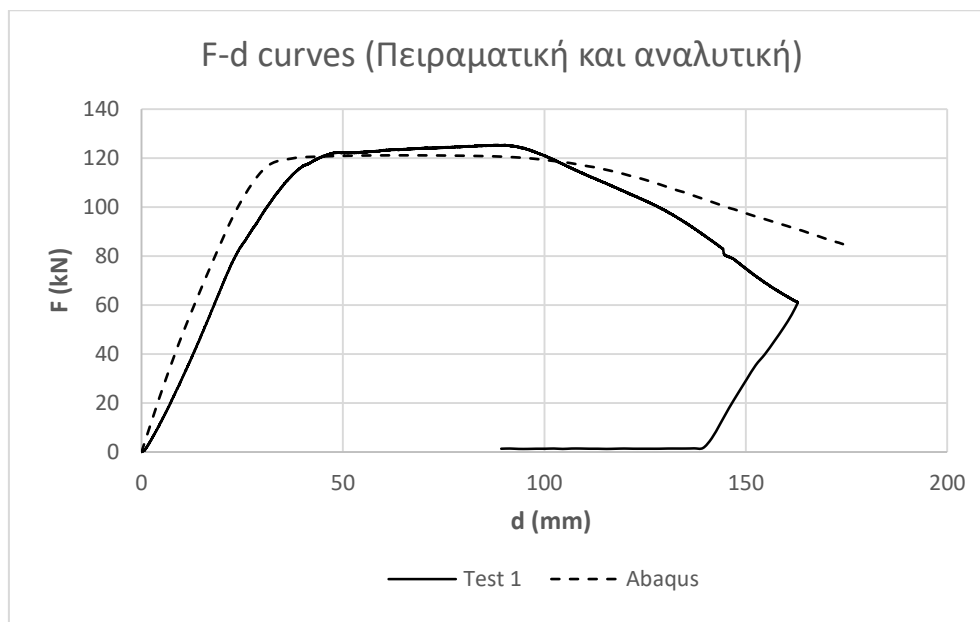
Εικόνα 3.11 Κατανομή τάσεων Von Mises



Εικόνα 3.12 Αύξηση τάσεων στο θλιβόμενο πέλμα

3.4 Σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Για τον έλεγχο ακρίβειας των αποτελεσμάτων του αναλυτικού μοντέλου, παραστάθηκαν στο ίδιο γράφημα οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης που προέκυψαν από το λογισμικό και από το πείραμα.



Σχήμα 3.1 Αναλυτική και πειραματική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης

Από το Σχήμα 3.1 προκύπτει ότι η συμπεριφορά του προσομοιώματος πλησιάζει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα του πειράματος. Το αναλυτικό μοντέλο δείχνει να έχει λίγο πιο δύσκαμπτο ελαστικό κλάδο όμως το φορτίο διαρροής είναι σχεδόν ίδιο. Η μετελαστική συμπεριφορά φαίνεται επίσης να πλησιάζει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτό φαίνεται τόσο από τις τιμές του διαγράμματος αλλά και από τη μορφή αστοχίας, τα οποία υπακούουν στο πείραμα.

Με σκοπό να επαληθευτεί και αριθμητικά ότι η μορφή αστοχίας του αναλυτικού μοντέλου είναι κοντά στην πραγματική, συγκρίνονται οι παραμορφώσεις ενός συγκεκριμένου σημείου στο θλιβόμενο πέλμα της δοκού. Στο πείραμα υπήρχε μετρητής strain gauge σε αυτό το σημείο, οι μετρήσεις του οποίου συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του ABAQUS, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Οι αναλυτικές παραμορφώσεις της καμπύλης F - ϵ έχουν την ίδια μορφή και πολύ κοντινές τιμές με τις πραγματικές. Έτσι το αριθμητικό μοντέλο αυτό μπορεί να προσομοιώσει επιτυχώς το πειραματικό και για αυτό χρησιμοποιείται στη συνέχεια για περεταίρω διερεύνηση των πειραμάτων.



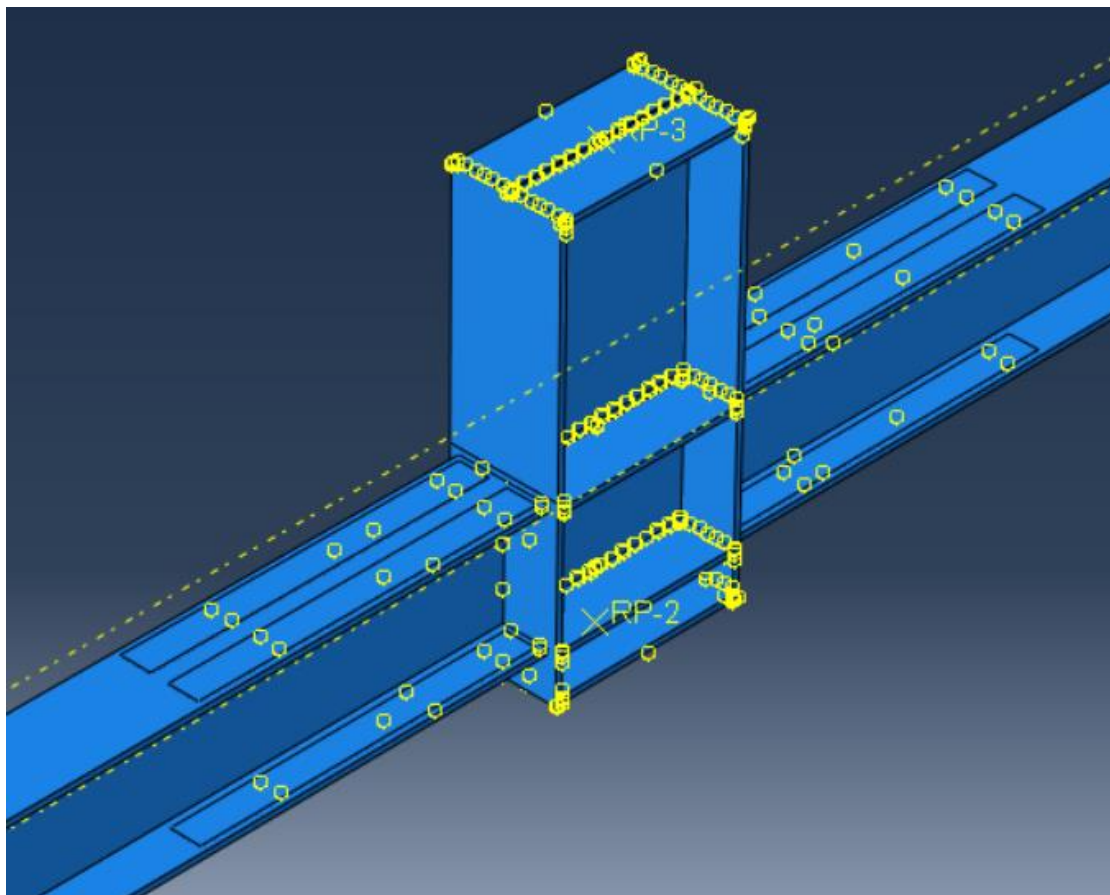
Σχήμα 3.2 Σύγκριση παραμορφώσεων συγκεκριμένου σημείου στο θλιβόμενο πέλμα της δοκού

4 Διερεύνηση συμπεριφοράς κόμβων στο Abaqus

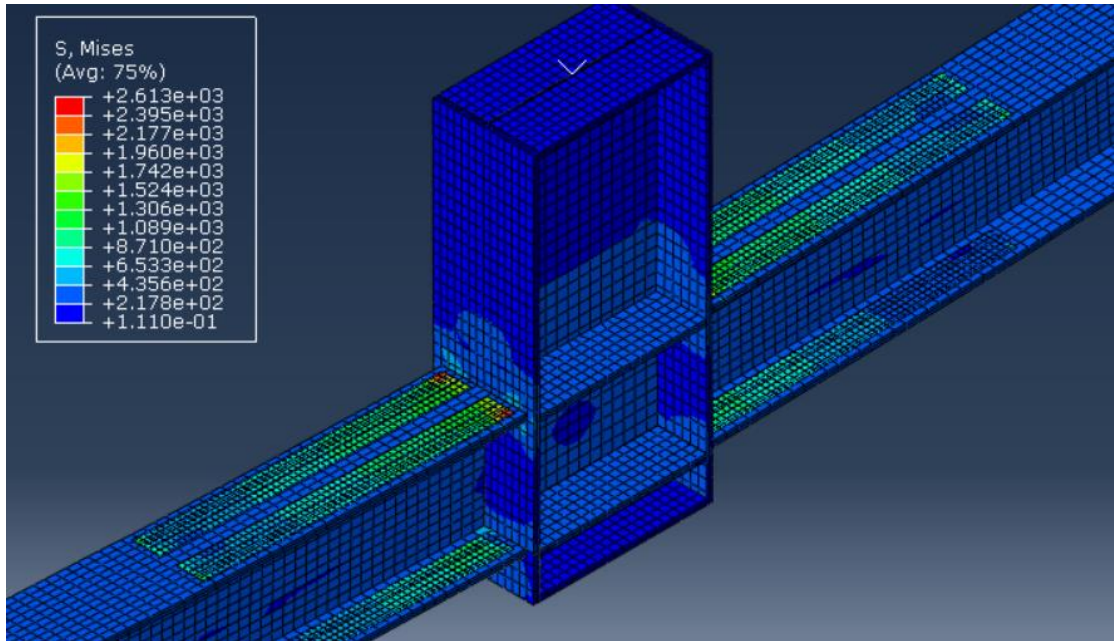
4.1 Άρρηκτα συνδεδεμένα CFRP στο μοντέλο

Όπως παρουσιάστηκε μέχρι τώρα, η ενίσχυση του αρχικού μοντέλου κόμβου με CFRP δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αδυναμία τους να διατηρηθούν συνδεδεμένα με το μοντέλο. Έτσι, είναι εύλογο να διερευνηθεί η περίπτωση κατά την οποία τα φύλλα των CFRP είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με το χάλυβδινο μοντέλο και δεν αποκολλιούνται κατά την εξέλιξη του πειράματος για να φανεί η πραγματική συνεισφορά τους σε ένα συγκολλητό κόμβο. Αυτό θα δείξει κατά πόσο αξίζει να επαναληφθούν πειράματα, με κύριο μέλημα την καλύτερη σύνδεση μεταξύ των δύο υλικών.

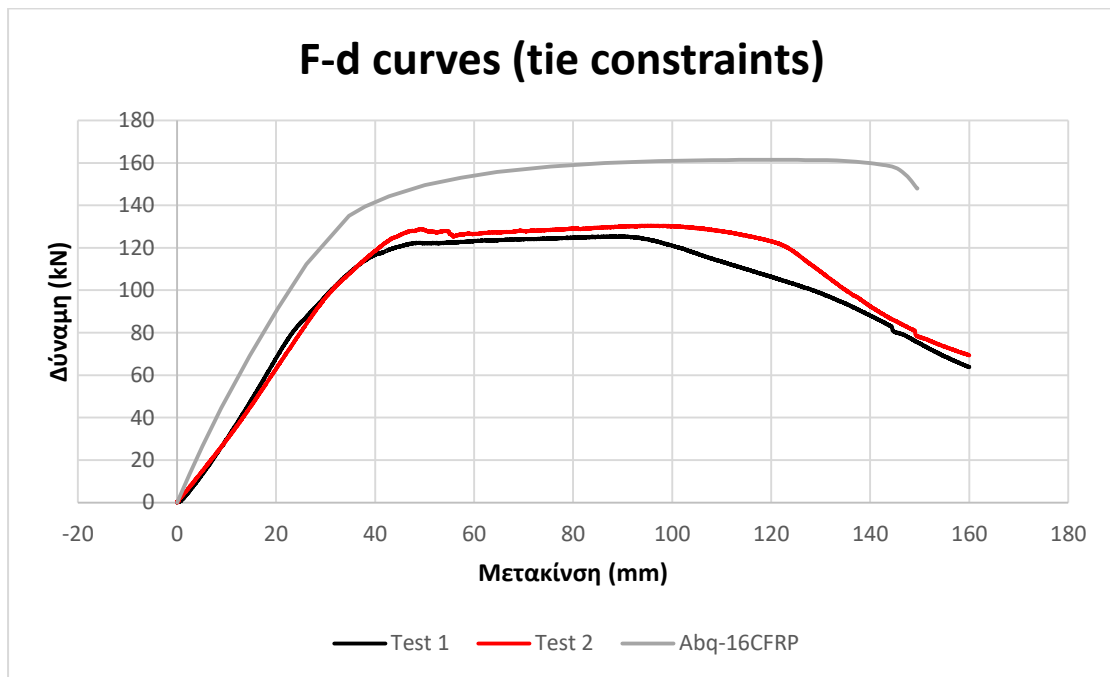
Χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα του μοντέλου, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.2, τοποθετούνται σε αυτό τα 16 CFRP, ακριβώς στις ίδιες θέσεις που τοποθετήθηκαν στο πείραμα 2, και ορίζεται άρρηκτος σύνδεσμος (tie constraint [15]) μεταξύ αυτών και των δοκών. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης του κόμβου αυτού συγκριτικά με τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων, φαίνονται στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1 Άρρηκτοι σύνδεσμοι μεταξύ CFRP και χάλυβα



Εικόνα 4.2 Τάσεις Von Mises στο μοντέλο κόμβου

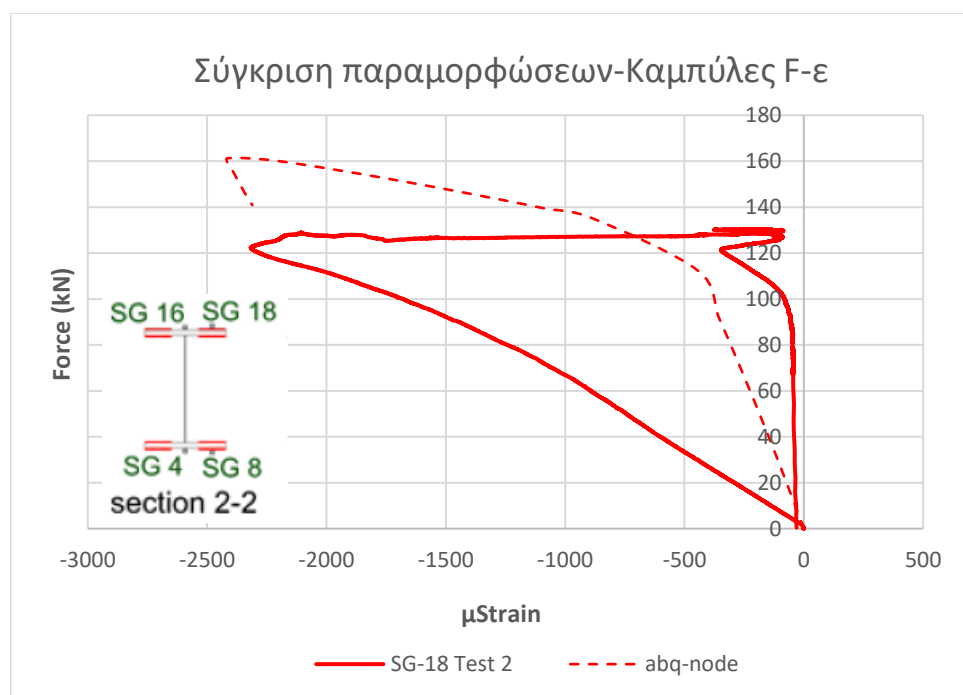


Σχήμα 4.1 Σύγκριση μοντέλου με άρρηκτους συνδέσμους με τα πειραματικά

Όπως ήταν αναμενόμενο, στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ότι η διαφορά ανάμεσα στις πειραματικές και την αναλυτική καμπύλη είναι αισθητή. Ο κόμβος παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά στη θεωρητική περίπτωση κατά την οποία τα CFRP παραμένουν συνδεδεμένα μέχρι τέλους σε αυτό. Από τις 3 καμπύλες συμπεραίνεται ότι για τις ίδιες μετακινήσεις απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο στην περίπτωση άρρηκτων συνδέσμων (αύξηση περίπου της τάξεως του 30%). Επιπλέον, η αστοχία φαίνεται να συμβαίνει για πολύ μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων στο τελευταίο μοντέλο αφού μετά τη διαρροή του συνεχίζει να αυξάνει το φορτίο μέχρι τη μέγιστη τιμή μετακίνησης που είναι περίπου ίση με 150mm. Επίσης, παρατηρείται ότι στον ελαστικό κλάδο η

συμβολή των CFRP ήταν επίσης σημαντική καθώς κλίση του διαγράμματος είναι αυξημένη.

Για πιο ακριβή σύγκριση, θα μελετηθεί η παραμόρφωση ενός συγκεκριμένου στοιχείου στο προσομοίωμα, στη θέση του οποίου στο πραγματικό μοντέλο υπήρχε μετρητής strain gauge. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται αυτή η σύγκριση. Το στοιχείο του CFRP στο μοντέλο με τα άρρηκτα συνδεδεμένα CFRP αναπτύσσει θλιπτικές παραμορφώσεις, με μια πιο ομαλή εξέλιξη καθώς δεν παρουσιάζει τοπικό λυγισμό, απλώς θλίβεται. Αντίθετα, το σημείο αυτό στα CFRP δείχνει να παραμορφώνεται ανομοιόμορφα καθώς αποκολλήθηκε για πολύ μικρές παραμορφώσεις.



Σχήμα 4.2 Σύγκριση παραμόρφωσης ενός σημείου στο CFRP του θλιβόμενου πέλματος αναλυτικού και πειραματικού μοντέλου

4.2 Μεταβλητός αριθμός και θέση ενισχυτικών φύλλων CFRP

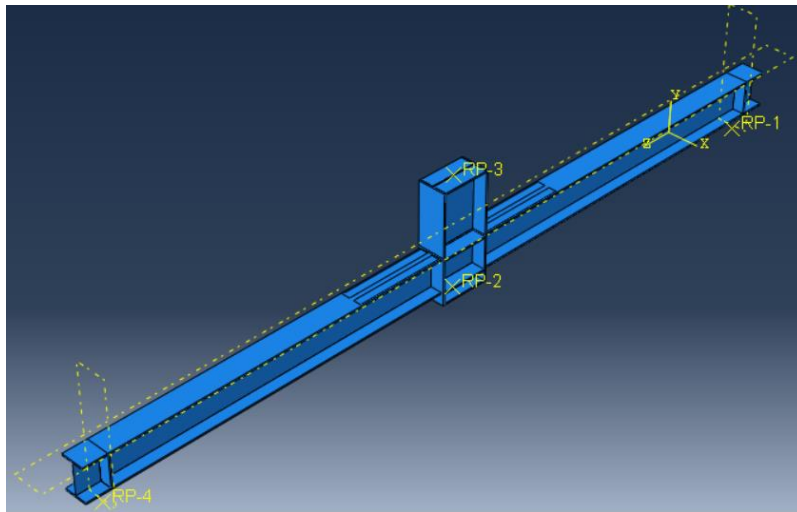
Καθώς το μοντέλο κόμβου με τα άρρηκτα συνδεδεμένα CFRP έδειξε βελτιωμένη συμπεριφορά, σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθεί κατά πόσο οι θέσεις και ο αριθμός τους επηρεάζουν τη συμπεριφορά του κόμβου. Για το σκοπό αυτό, μορφώθηκαν τα μοντέλα κόμβων που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στα μοντέλα αυτά επιβλήθηκε φορτίο υπό μορφή κατακόρυφης μετατόπισης ίσο με $d_y=170\text{mm}$, περίπου όση ήταν και η μετατόπιση στα πειράματα που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών για να μπορούν να συγκριθούν στη συνέχεια τα αναλυτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα.

4.2.1 Μοντέλα διερεύνησης

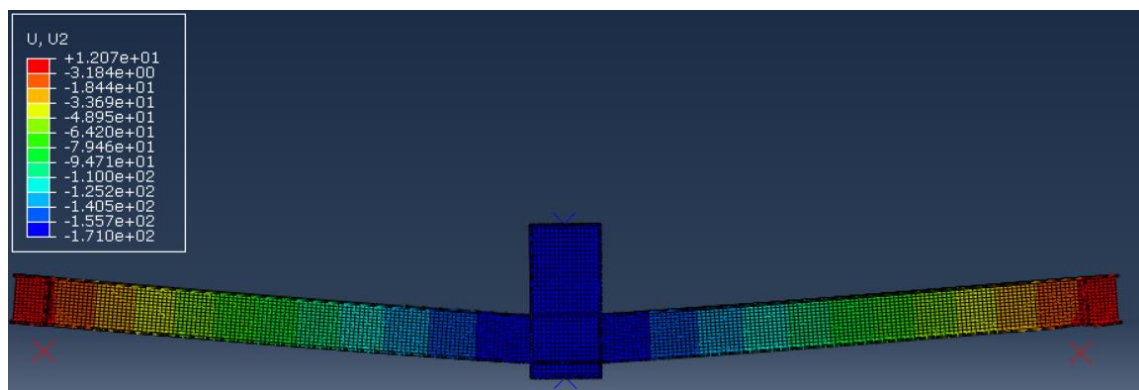
Μοντέλο 1 – 4 φύλλα CFRP στα άνω πέλματα

Το πρώτο μοντέλο, περιλαμβάνει 4 φύλλα CFRP τοποθετημένα στο εξωτερικό των άνω πέλματων των δύο δοκών όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Για την μετατόπιση που

επιβλήθηκε στο μοντέλο δεν έδειξε να αστοχεί, ούτε να παραμορφώνεται καθόλου το θλιβόμενο πέλμα των δοκών του (Εικόνα 4.4).

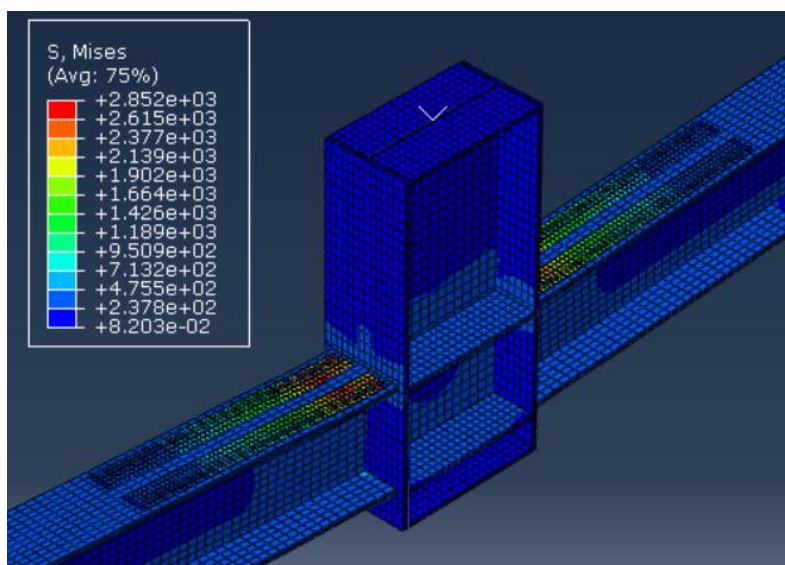


Εικόνα 4.3 Μοντέλο 1 - 4 CFRP



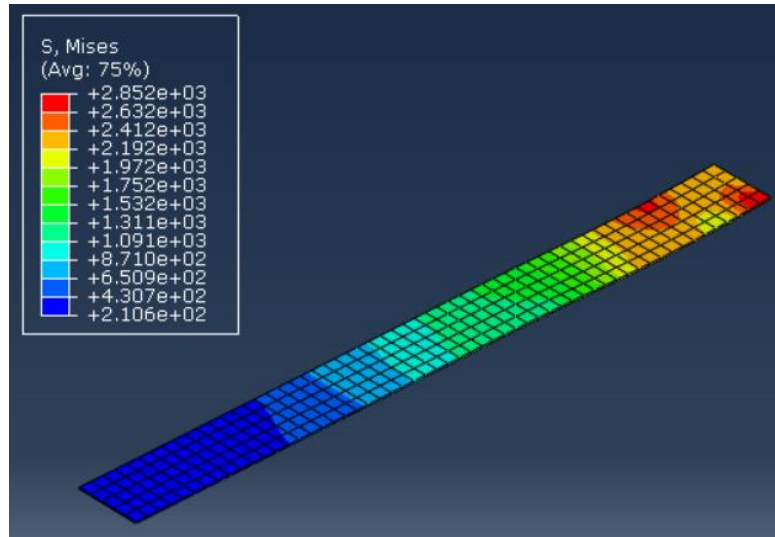
U, U2	
+	+1.207e+01
-	-3.184e+00
-	-1.844e+01
-	-3.369e+01
-	-4.895e+01
-	-6.420e+01
-	-7.946e+01
-	-9.471e+01
-	-1.100e+02
-	-1.252e+02
-	-1.405e+02
-	-1.557e+02
-	-1.710e+02

Εικόνα 4.4 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 1



S, Mises (Avg: 75%)	
+	+2.852e+03
+	+2.615e+03
+	+2.377e+03
+	+2.139e+03
+	+1.902e+03
+	+1.664e+03
+	+1.426e+03
+	+1.189e+03
+	+9.509e+02
+	+7.132e+02
+	+4.755e+02
+	+2.378e+02
+	+8.203e-02

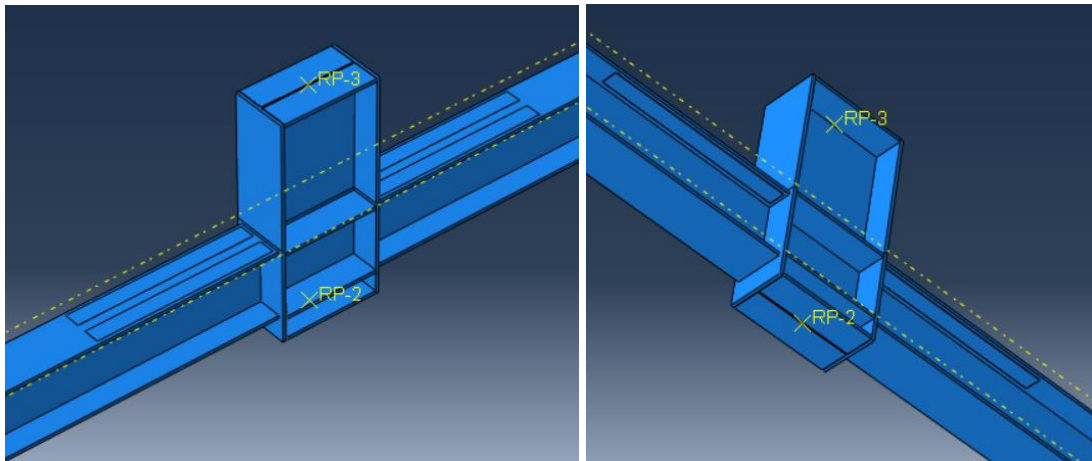
Εικόνα 4.5 Τάσεις Von Mises στον κόμβο του μοντέλου 1



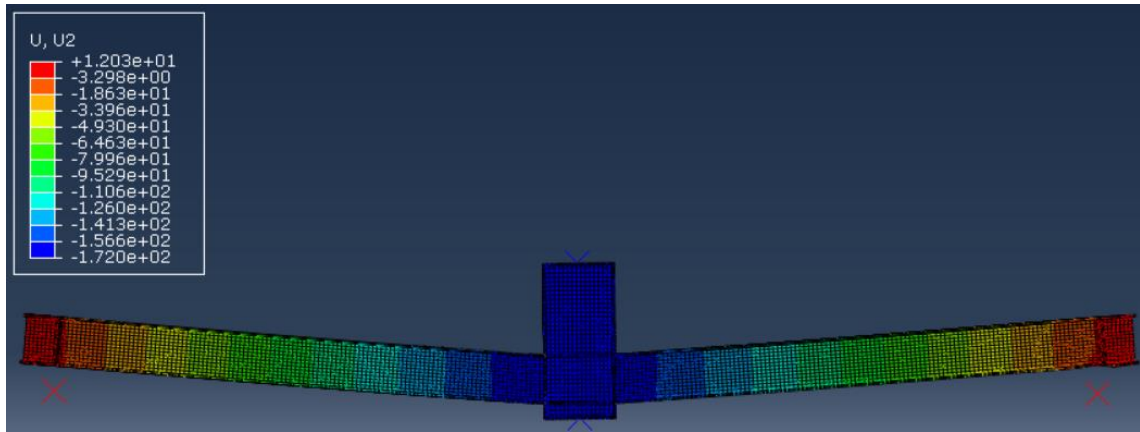
Εικόνα 4.6 Τάσεις Von Mises στο CFRP του μοντέλου 1

Μοντέλο 2 – 8 φύλλα CFRP στα άνω πέλματα

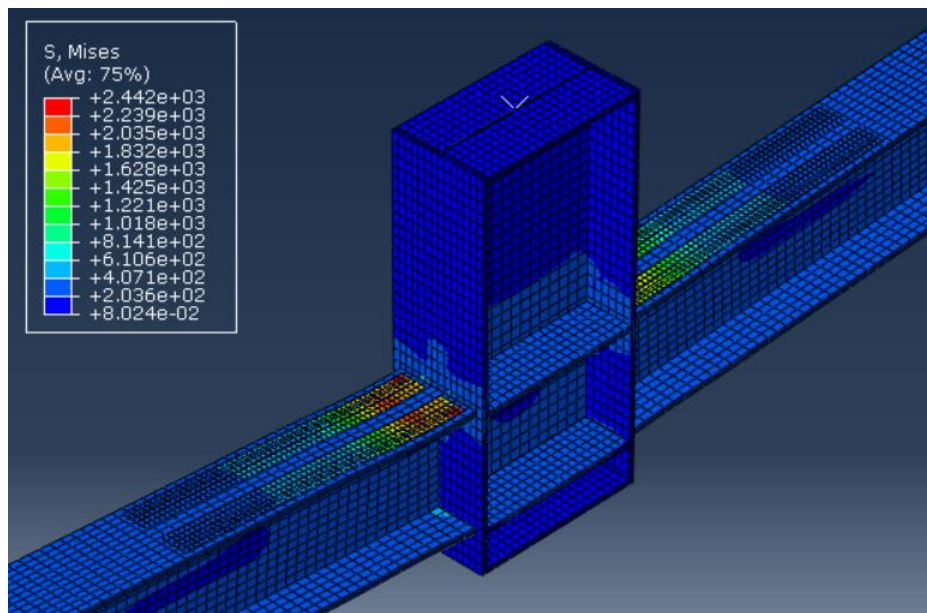
Το δεύτερο μοντέλο έχει ενισχυμένο και το εσωτερικό αλλά και το εξωτερικό του άνω πέλματος των δοκών, περιλαμβάνοντας συνολικά 8 φύλλα CFRP (Εικόνα 4.7). Η συμπεριφορά του ήταν παρόμοια με του Μοντέλου 1 καθώς δεν εμφανίστηκε τοπικός λυγισμός στα θλιβόμενα πέλματα (Εικόνα 4.8).



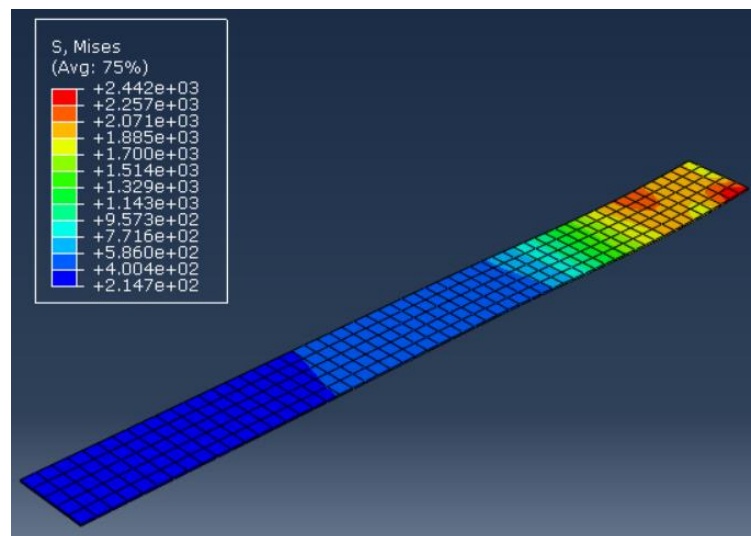
Εικόνα 4.7 Μοντέλο 2 - 8 CFRP



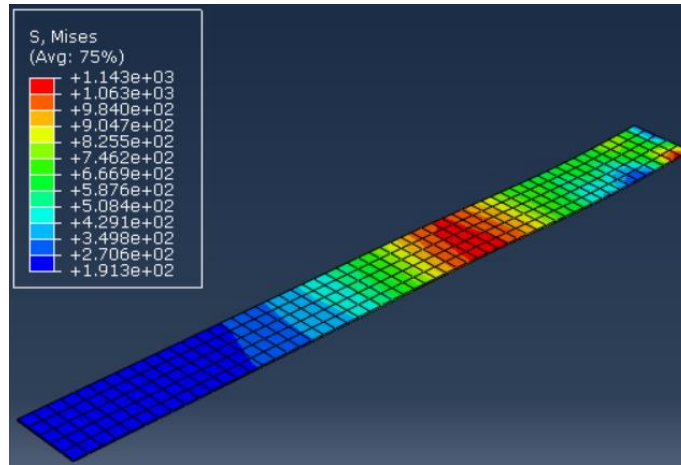
Εικόνα 4.8 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 2



Εικόνα 4.9 Τάσεις Von Mises στον κόμβο του μοντέλου 2



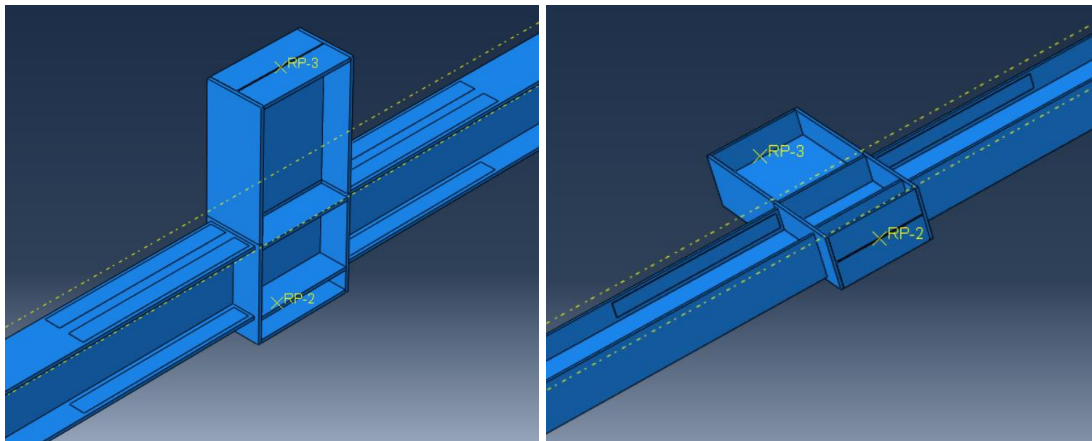
Εικόνα 4.10 Τάσεις Von Mises στο εξωτερικό CFRP του μοντέλου 2



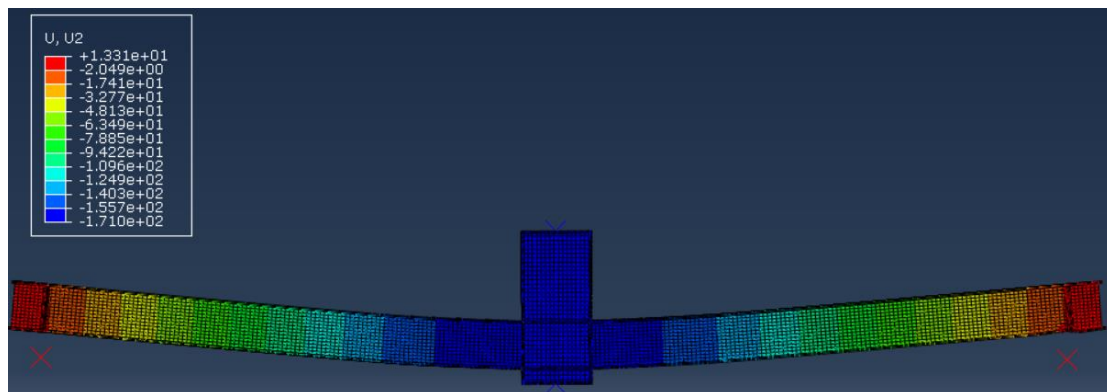
Εικόνα 4.11 Τάσεις Von Mises στο εσωτερικό CFRP του μοντέλου 2

Μοντέλο 3 – 12 φύλλα CFRP

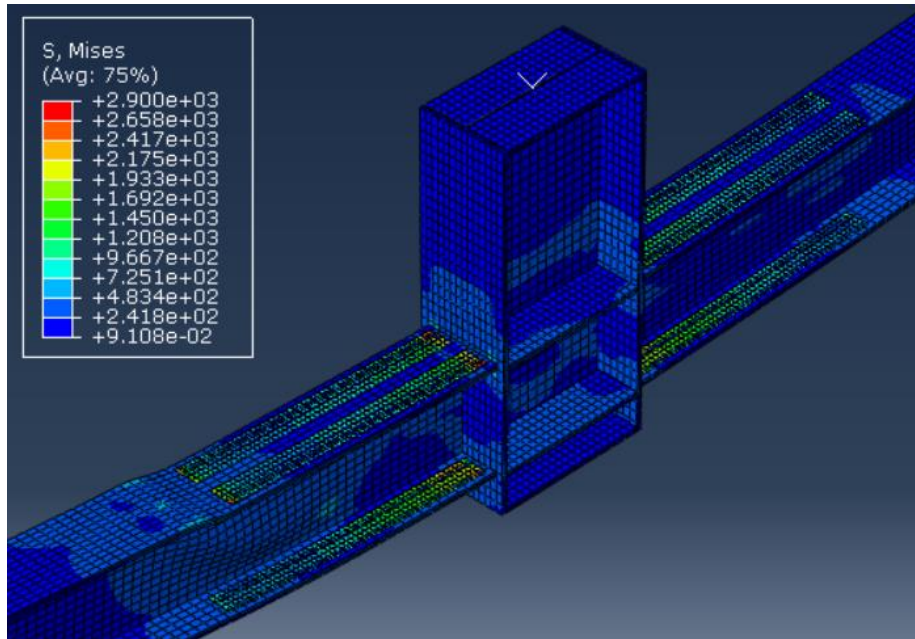
Στο τρίτο μοντέλο, τοποθετούνται CFRP, πέραν αυτών στα θλιβόμενα πέλματα, και στο εσωτερικό του εφελκόμενου πέλματος. Η συμπεριφορά του κόμβου μέχρι το $d_y=170\text{mm}$ ήταν επίσης παρόμοια με τα προηγούμενα δύο μοντέλα με μόνη διαφορά τη μικρή παραμόρφωση στον κορμό της δοκού μετά το πέρασ των CFRP.



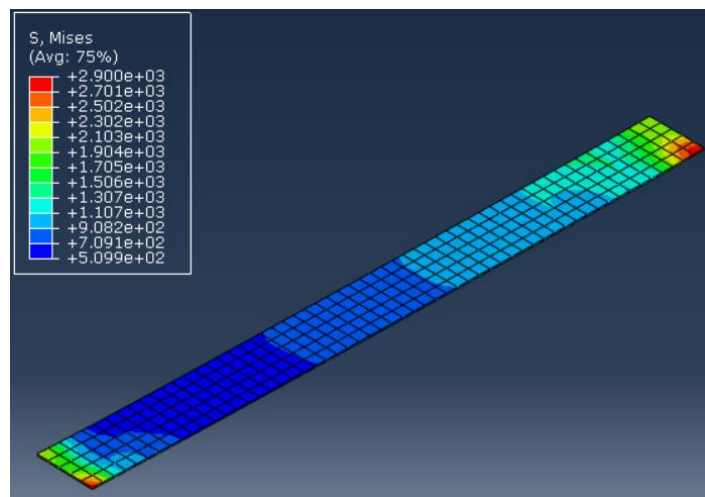
Εικόνα 4.12 Μοντέλο 3 - 12 CFRP



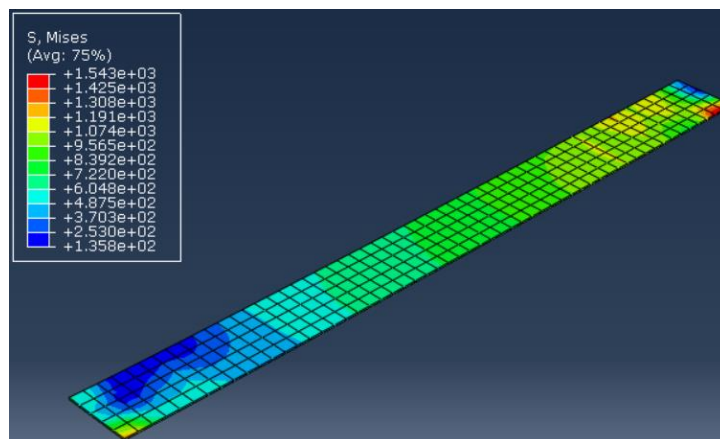
Εικόνα 4.13 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 3



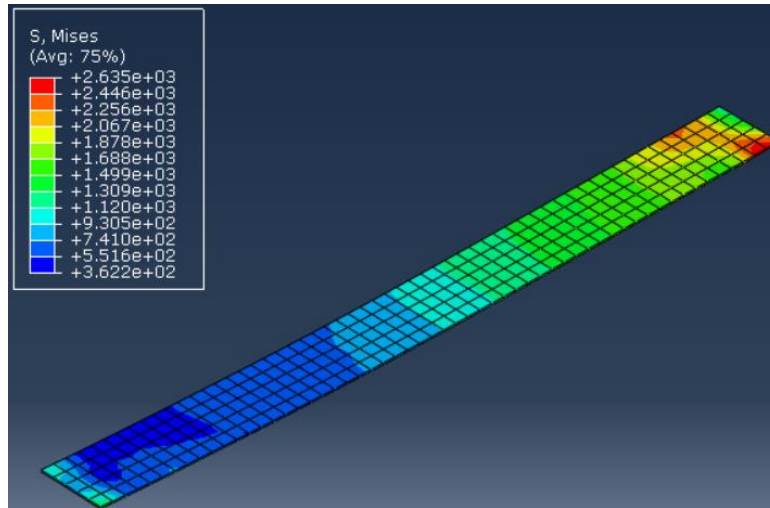
Εικόνα 4.14 Τάσεις Von Mises στον κόμβο του μοντέλου 3



Εικόνα 4.15 Τάσεις Von Mises στο εξωτερικό CFRP του πάνω πέλματος του μοντέλου 3



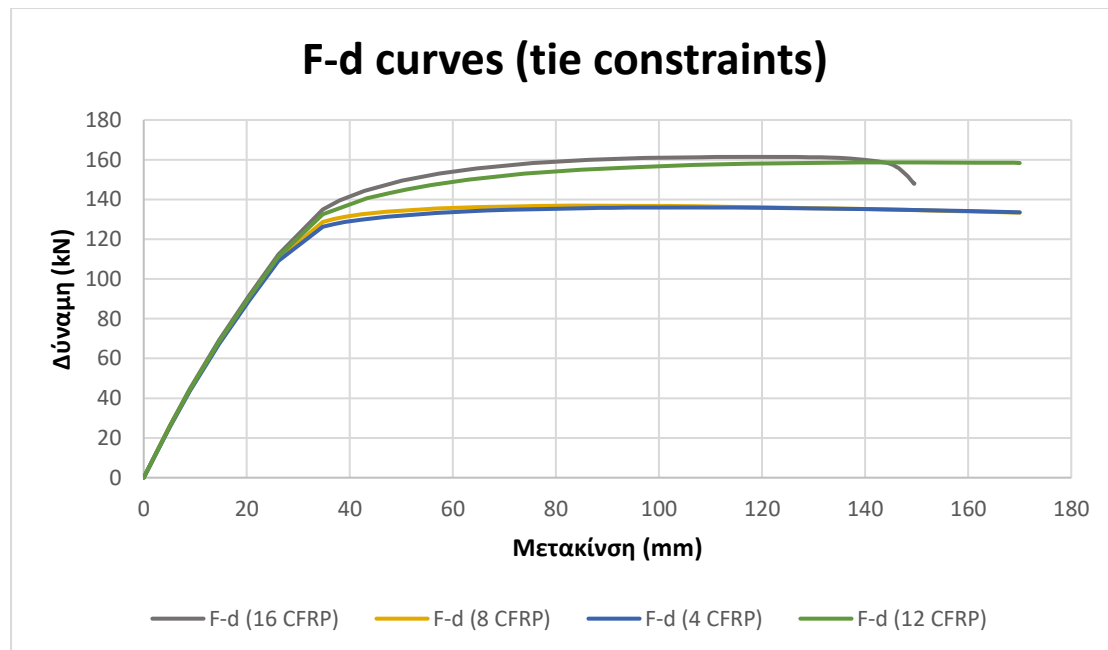
Εικόνα 4.16 Τάσεις Von Mises στο εσωτερικό CFRP του πάνω πέλματος του μοντέλου 3



Εικόνα 4.17 Τάσεις Von Mises στο εσωτερικό CFRP του κάτω πέλματος του μοντέλου 3

4.2.2 Σύγκριση συμπεριφοράς των υπό μελέτη κόμβων

Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί φαίνονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των 3 κόμβων αυτής της ενότητας με τους διαφορετικούς αριθμούς φύλλων CFRP και του κόμβου της ενότητας 4.1 με όλα τα CFRP που υπήρχαν στο πείραμα, όλα άρρηκτα συνδεδεμένα στον χάλυβα.



Σχήμα 4.3 Καμπύλες φορτίου μετατόπισης των υπό διερεύνηση κόμβων

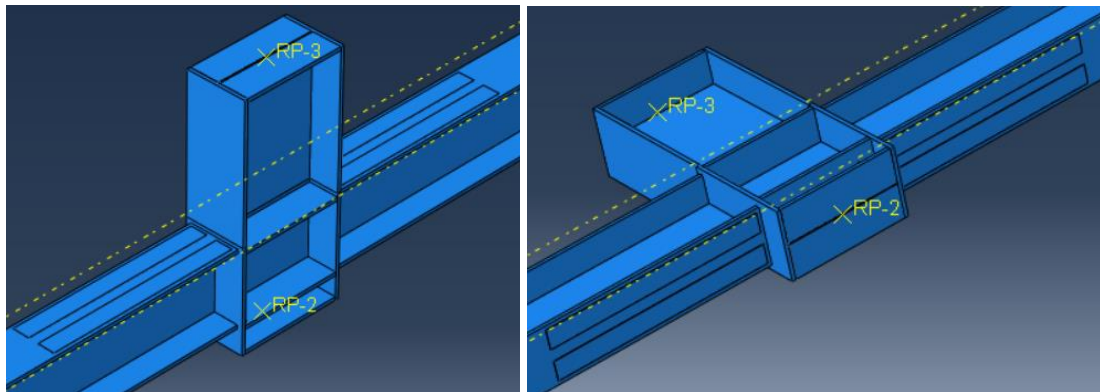
Τα τέσσερα μοντέλα κόμβων φαίνεται να διαρρέουν για περίπου ίδια κατακόρυφη μετατόπιση και ελάχιστα διαφορετικό φορτίο καθώς οι ελαστικοί κλάδοι και των τεσσάρων καμπυλών σχεδόν ταυτίζονται. Όπως ήταν αναμενόμενο, επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα ότι οι κόμβοι οι οποίοι ενισχύθηκαν με 12 και 16 φύλλα CFRP παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από τους κόμβους με 4 και 8 ενισχυτικά φύλλα αφού για ίδιες μετατοπίσεις μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερο φορτίο.

Ωστόσο, προκύπτει ότι δεν επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα είτε ένα πέλμα είναι ενισχυμένο μόνο εξωτερικά είτε και εξωτερικά και εσωτερικά. Αυτό φαίνεται και παρατηρώντας τις τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται στα 4 μοντέλα. Τα CFRP στο εξωτερικό των θλιβόμενων πελμάτων αναπτύσσουν παρόμοιες τάσεις (περίπου 2800MPa) ενώ όπου υπάρχουν CFRP και στο εσωτερικό των θλιβόμενων πελμάτων οι τάσεις αυτών είναι περίπου οι μισές (περίπου 1200MPa). Έτσι, καθοριστικά για την παραλαβή των φορτίων προκύπτουν τα εξωτερικά φύλλα. Στα CFRP του τρίτου μοντέλου, τα οποία ενισχύουν το κάτω πέλμα αναπτύσσονται επίσης σημαντικές τάσεις, παρόμοιες με αυτές των εξωτερικών CFRP των θλιβόμενων πελμάτων. Γενικά, η ενίσχυση με άρρηκτα συνδεδεμένα CFRP της μίας μόνο όψης των πελμάτων των δοκών μπορεί να θεωρηθεί επαρκής. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα μοντέλα που εξετάστηκαν, οι τάσεις που αναπτύχθηκαν στο χάλυβα ήταν μίας τάξης μεγέθους μικρότερες από τις τάσεις στα CFRP.

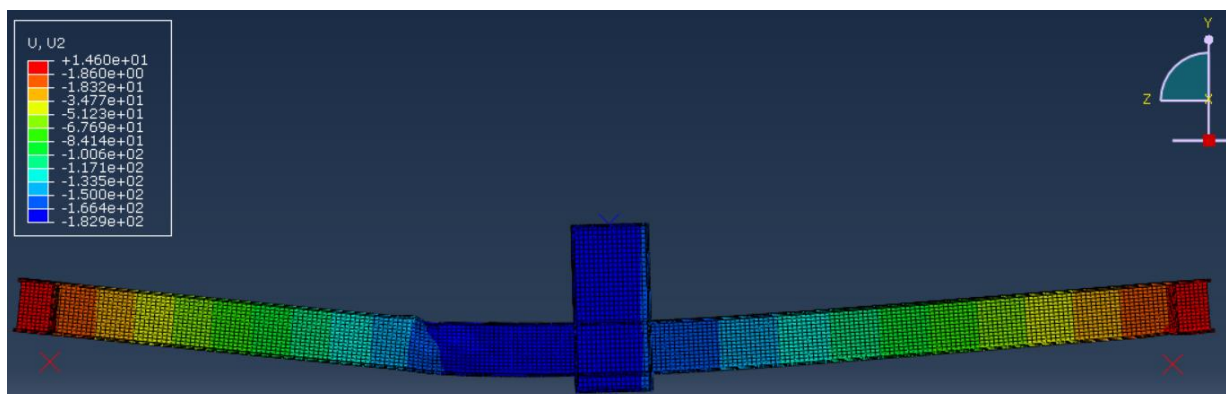
Στο σημείο αυτό είναι εύλογο να κατασκευαστεί ακόμη ένα μοντέλο κόμβου, το οποίο θα έχει ενισχυτικά φύλλα CFRP και στα δύο πέλματά του, αλλά μόνο στην μία όψη τους. Το μοντέλο αυτό θα εξετάσει τις προηγούμενες παρατηρήσεις, σύμφωνα με τις οποίες δεν επηρεάζεται σημαντικά η συμπεριφορά του κόμβου είτε ενισχυθούν μόνο εξωτερικά, είτε εξωτερικά και εσωτερικά τα πέλματα των δοκών.

Μοντέλο 4 – 8 φύλλα CFRP

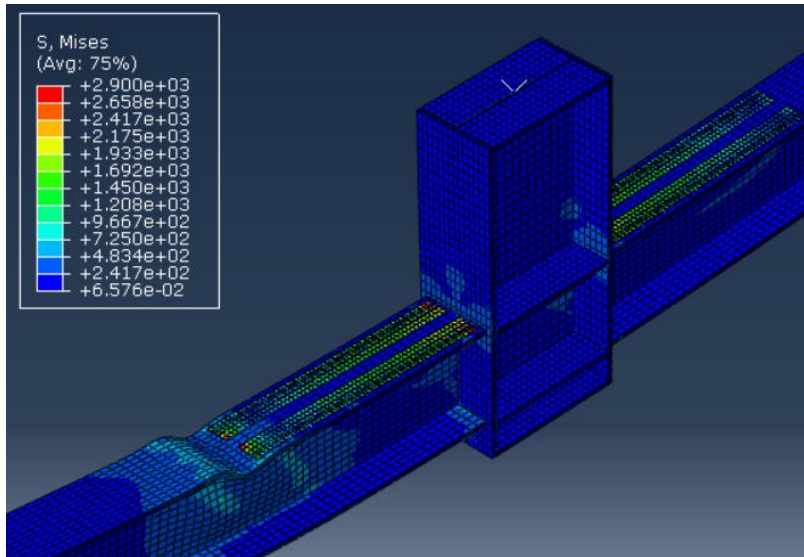
Στο μοντέλο αυτό τοποθετούνται 8 φύλλα CFRP στην εξωτερική μόνο όψη των δύο πελμάτων των δοκών (εφελκυσμένο και θλιβόμενο).



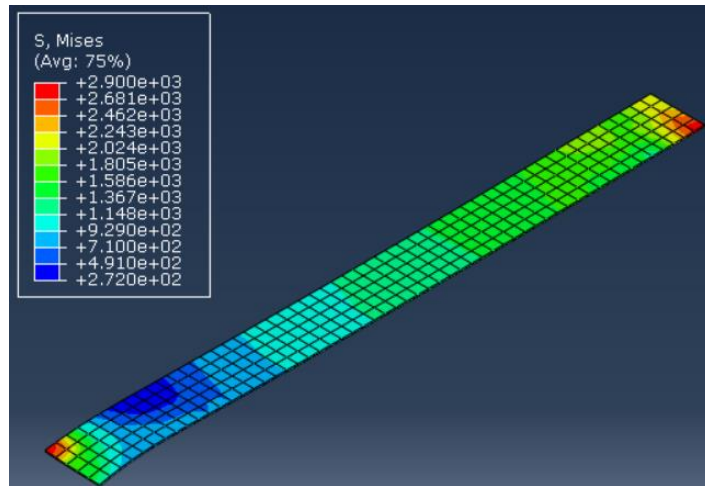
Εικόνα 4.18 Μοντέλο 4 - 8 CFRP



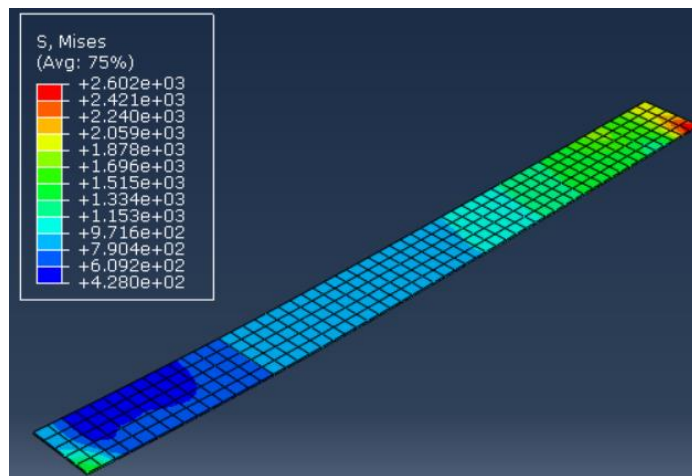
Εικόνα 4.19 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 4



Εικόνα 4.20 Τάσεις Von Mises στον κόμβο του μοντέλου 4

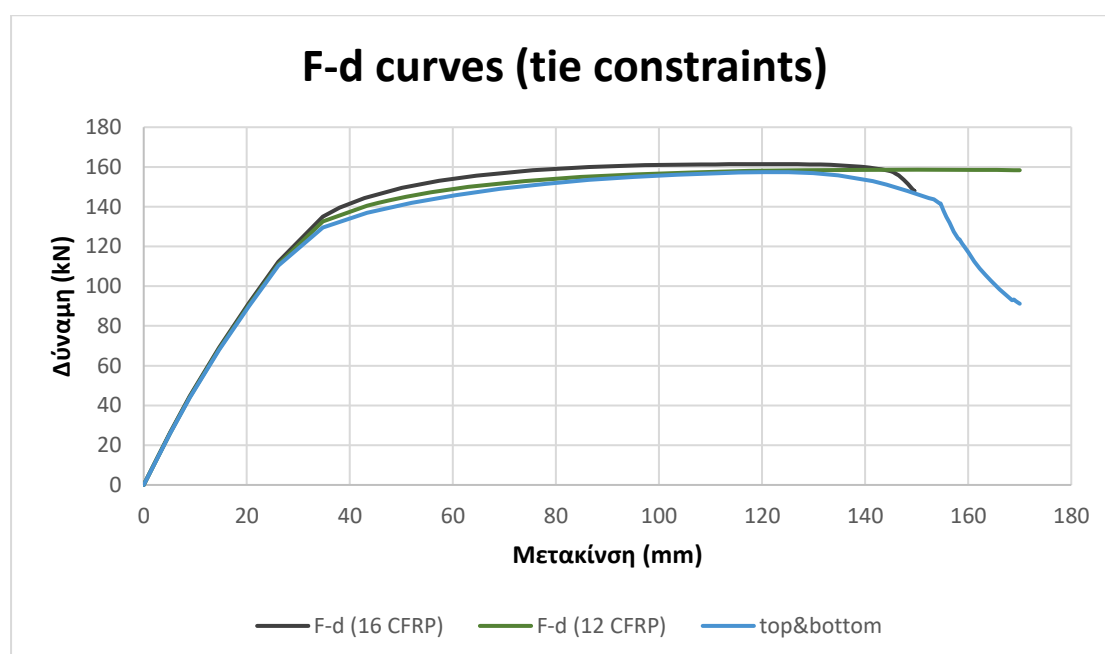


Εικόνα 4.21 Τάσεις Von Mises στο εξωτερικό CFRP του πάνω πέλματος (θλιβόμενου) του μοντέλου 4



Εικόνα 4.22 Τάσεις Von Mises στο εξωτερικό CFRP του κάτω πέλματος (εφελκυσμένου) του μοντέλου 4

Ο φορέας αυτός φαίνεται να παρουσιάζει τοπικό λυγισμό στο θλιβόμενο πέλμα της δοκού, μετά το πέρασ των CFRP. Η συμπεριφορά του κόμβου φαίνεται από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισής του, η οποία παρουσιάζεται στο ίδιο διάγραμμα με τις άλλες αναλυτικές καμπύλες των κόμβων με ενισχυμένα τα άνω και κάτω πέλματά τους. (Σχήμα 4.4). Η καμπύλη αυτή επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προηγούμενη διερεύνηση. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται ότι τα μη αποκολλώμενα CFRP βελτιώνουν τη συμπεριφορά του κόμβου αλλά και ότι δεν χρειάζεται να ενισχυθούν και οι δύο όψεις των πελμάτων των δοκών. Η καμπύλη “top&bottom” του μοντέλου 4 είναι πολύ κοντά στην καμπύλη “F-d (16 CFRP)” ενώ το μοντέλο της πρώτης έχει τα μισά ενισχυτικά φύλλα από αυτό της δεύτερης. Επιπλέον, οι τάσεις που αναπτύσσονται τόσο στο χάλυβα όσο και στα φύλλα CFRP είναι πολύ κοντά στα μοντέλα των 8,12 ή 16 ενισχυτικών φύλλων. Τέλος, οι τάσεις που παραλαμβάνουν τα CFRP στα δύο πέλματα είναι παρόμοιες, σε αντίθεση με τις τάσεις που παρελάμβαναν το CFRP που ενίσχυαν το εσωτερικό των πελμάτων οι οποίες ήταν πολύ χαμηλότερες.

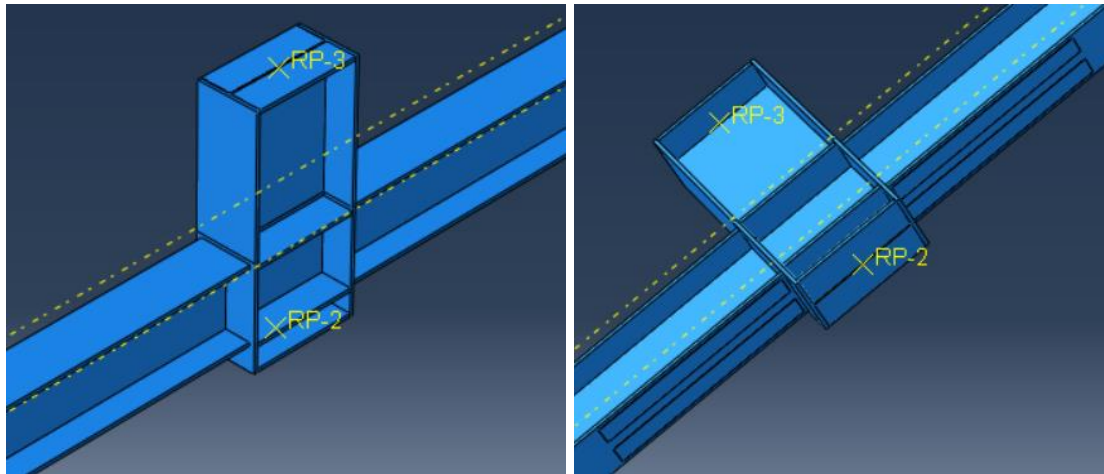


Σχήμα 4.4 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης κόμβων με ενισχυμένα και τα δύο πέλματα δοκών

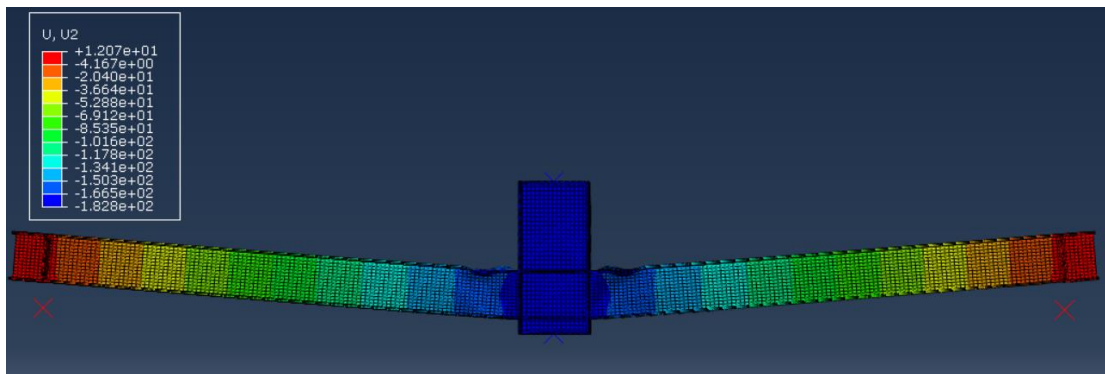
Παρόλο που το κρίσιμο στοιχείο στη συμπεριφορά του κόμβου ήταν το θλιβόμενο πέλμα των δοκών, δοκιμάζεται για λόγους πληρότητας και το ενδεχόμενο ενίσχυσης του κάτω πέλματος μόνο. Έτσι, κατασκευάζεται ένα πέμπτο μοντέλο, στο οποίο τοποθετούνται 4 φύλλα CFRP στο εξωτερικό του εφελκυόμενου πέλματος. Όπως προέκυψε από την προηγούμενη σύγκριση, η δημιουργία μοντέλου με ενισχυμένο και εσωτερικά και εξωτερικά το κάτω πέλμα δεν δύναται να δώσει ουσιαστικά διαφορετικά αποτελέσματα.

Μοντέλο 5 – 4 φύλλα CFRP στα κάτω πέλματα

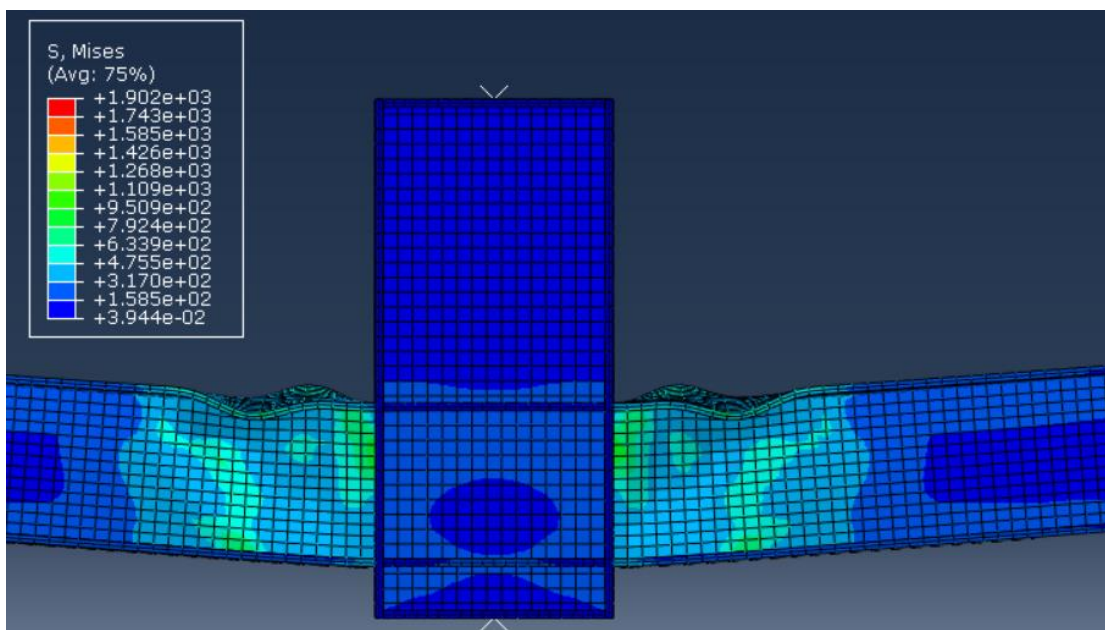
Σε αυτό το μοντέλο δοκιμάζεται το ενδεχόμενο να ενισχυθεί το εφελκυόμενο πέλμα των δοκών, εξωτερικά.



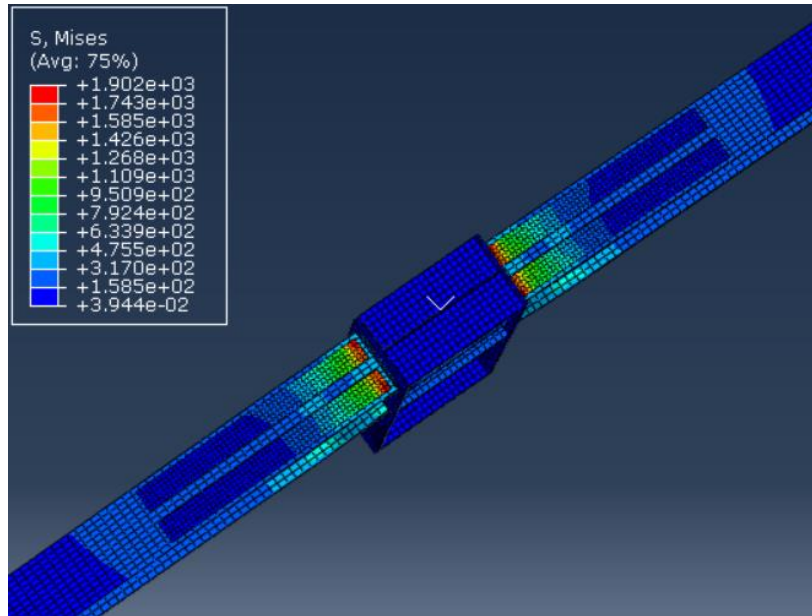
Εικόνα 4.23 Μοντέλο 5 - 4 CFRP



Εικόνα 4.24 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 4

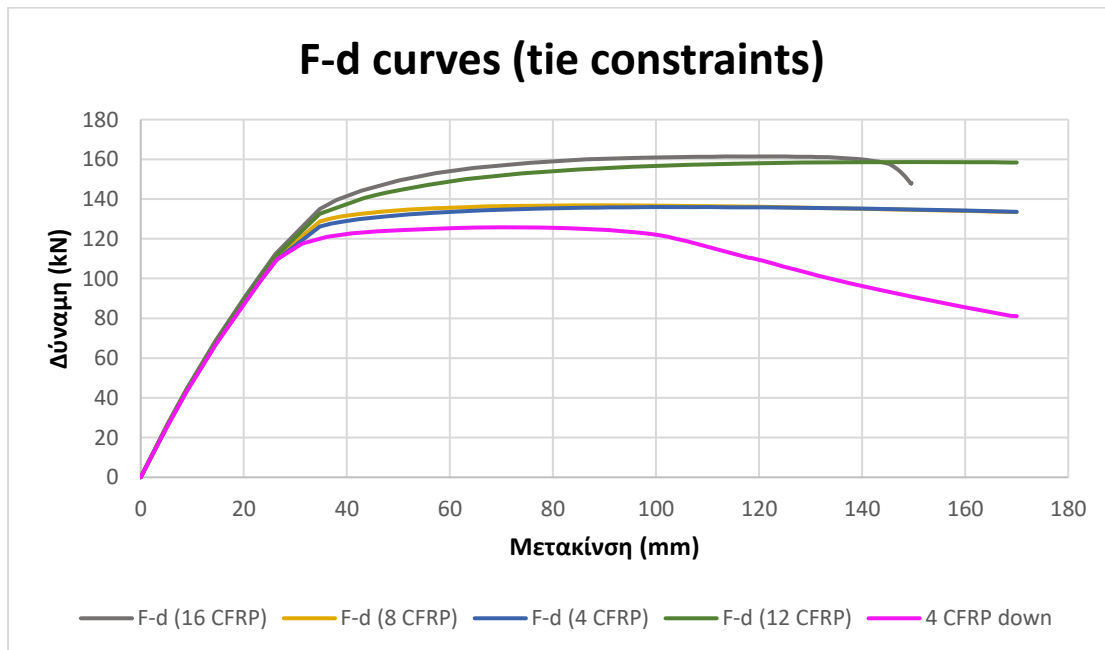


Εικόνα 4.25 Κατανομή τάσεων Von Mises



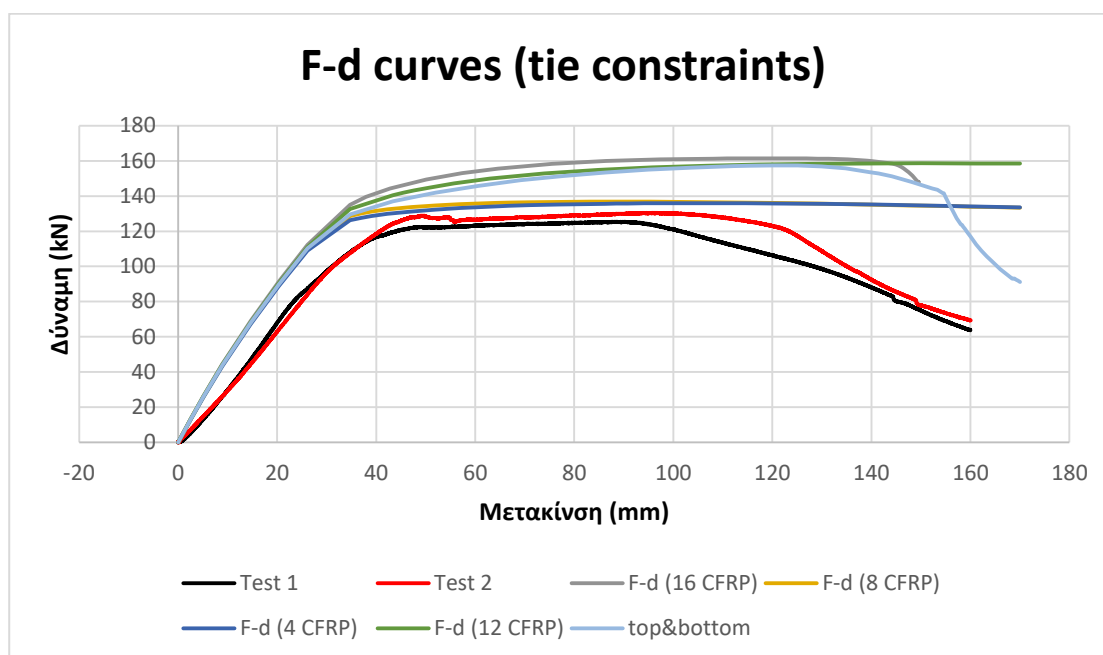
Εικόνα 4.26 Κατανομή τάσεων Von Mises στα CFRP

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 4.24 έως 4.26, η ενίσχυση του εφελκόμενου πέλματος όχι μόνο δεν βοηθά αλλά στο συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στα θλιβόμενα πέλματα και των δύο δοκών. Προφανώς μία τέτοια μορφή ενίσχυσης μπορεί να χαρακτηριστεί άτοπη καθώς δεν στοχεύει στην ενίσχυση των περιοχών όπου παρουσιάστηκε αστοχία. Παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε γιατί στο πείραμα αποκολλήθηκαν και τα CFRP των κάτω πελμάτων, οπότε εξετάστηκε η περίπτωση μη αποκόλλησης τους. Τα αποτελέσματα αυτής της προσπάθειας παρουσιάζονται μαζί με τις καμπύλες του σχήματος για καλύτερη εποπτεία. Η αντίστοιχη καμπύλη είναι χαμηλότερα και από τις 4 καμπύλες της προηγούμενης ενότητας.



Σχήμα 4.5 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των υπό διερεύνηση κόμβων

4.2.3 Σύγκριση συμπεριφοράς κόμβων διερεύνησης με τους κόμβους των πειραμάτων



Σχήμα 4.6 Συμπεριφορά κόμβων διερεύνησης και πειραμάτων

Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται οι αναλυτικές καμπύλες της συμπεριφοράς των κόμβων της ενότητας 4.2.2 σε συνδυασμό με τις πειραματικές καμπύλες των κόμβων 1 και 2. Η καμπύλη που προέκυψε από το μοντέλο 5 με ενισχυμένο μόνο το κάτω πέλμα δεν λαμβάνεται υπόψη.

Εκ πρώτης όψεως, παρατηρείται πιο απότομη κλίση στον ελαστικό κλάδο, δηλαδή αύξηση της δυσκαμψίας, των αριθμητικών μοντέλων λόγω των ενισχύσεων. Οι κόμβοι με ενισχυμένο μόνο το πάνω πέλμα, δηλαδή οι καμπύλες F-d (4 CFRP) και F-d (8 CFRP) παρουσιάζουν ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από τα δύο μοντέλα του πειράματος. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι όταν τα CFRP δεν αποκολλιούνται από τα θλιβόμενα πέλματα των δοκών δεν εμφανίζεται καθόλου τοπικός λυγισμός σε αυτά. Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των άλλων τριών μοντέλων, με 8 ('top&down'), 12 και 16 CFRP φαίνονται υψηλότερα από τις πειραματικές. Έτσι, στην περίπτωση μη αποκολλώμενων CFRP, η ενίσχυση των πελμάτων θα έδινε βελτιωμένη συμπεριφορά στον κόμβο. Ο μετελαστικός τους κλάδος δείχνει να μπορεί να παραλάβει φορτίο ακόμη και μετά τη διαρροή και να αστοχεί σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

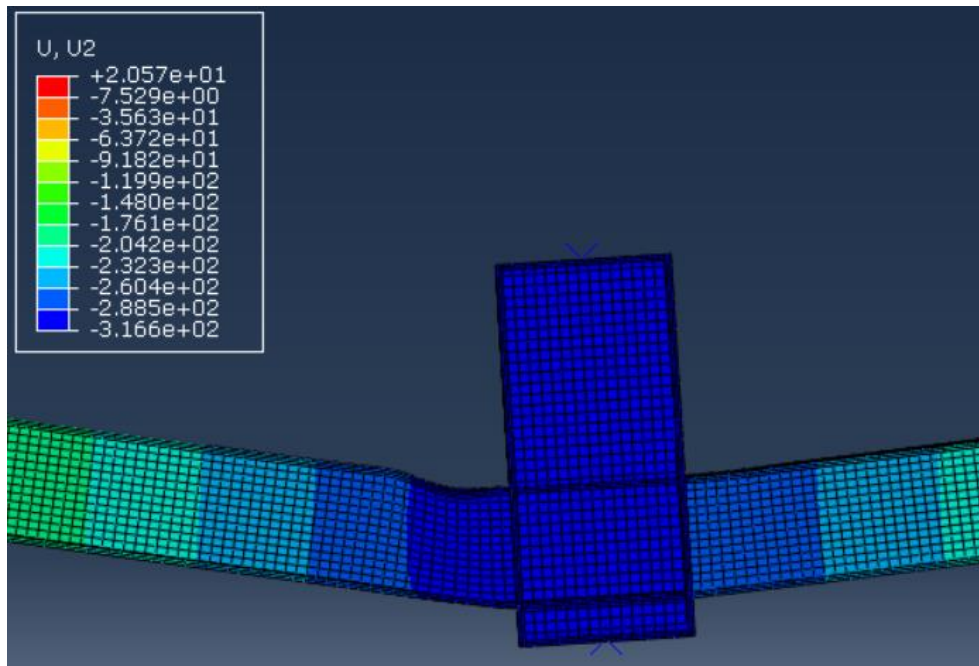
4.2.4 Διερεύνηση φορτίου και μετατόπισης αστοχίας

Στα προηγούμενα μοντέλα επιβλήθηκε κατακόρυφη μετατόπιση μεγέθους $d_y=170\text{mm}$ καθώς περίπου σε αυτήν αστόχησαν τα πειραματικά. Ωστόσο, οι καμπύλες κάποιων από αυτά δεν δείχνουν να αστοχούν για αυτή τη μετατόπιση καθώς ο μετελαστικός τους κλάδος παραμένει οριζόντιος. Προφανώς ακόμη και για μικρότερες τιμές δυνάμεων και μετατοπίσεων, κάποια από τα αναλυτικά μοντέλα δείχνουν να έχουν βελτιωμένη συμπεριφορά από τα πειραματικά. Παρόλα αυτά, στα μοντέλα με 4,8 και 12 φύλλα CFRP στα οποία η αστοχία δεν φαίνεται μέχρι στιγμής, επιβλήθηκαν

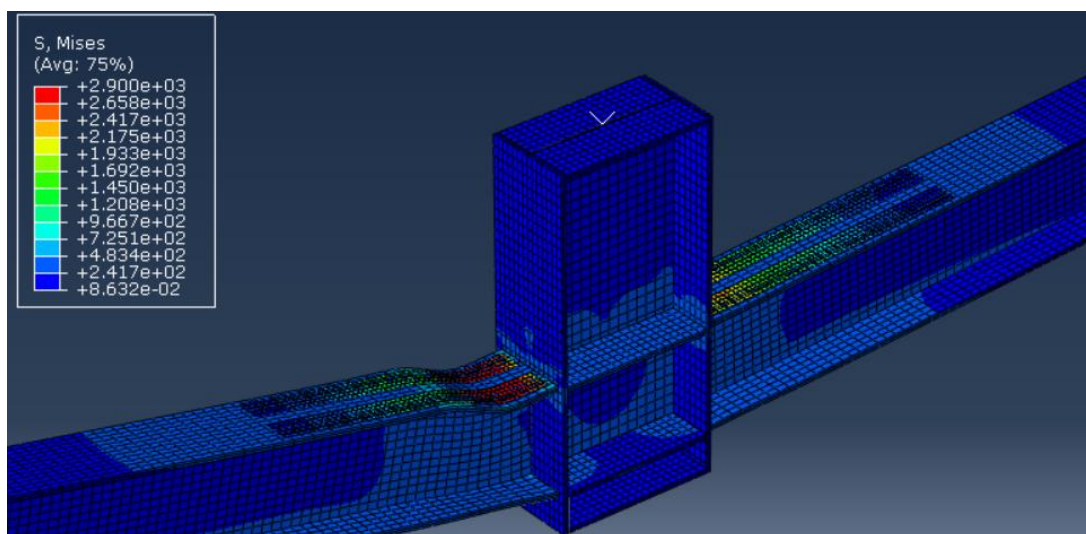
μεγαλύτερες μετατοπίσεις και έγιναν οι αντίστοιχες επιλύσεις μέχρι να προκληθεί η αστοχία τους.

Μοντέλο 1 – 4 φύλλα CFRP

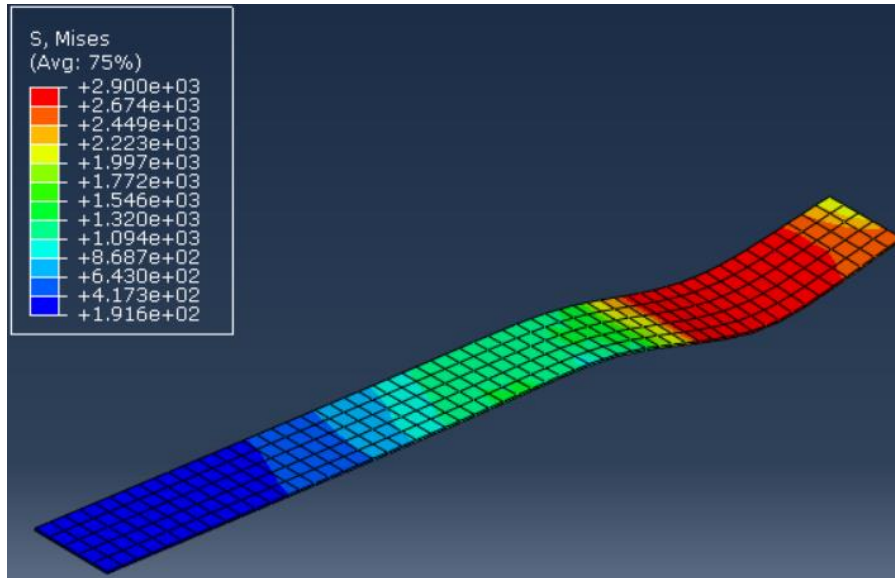
Το μοντέλο αυτό μετά τη διαρροή έδειξε να έχει οριζόντιο μετελαστικό κλάδο μέχρι τα 170mm. Μετά από διαδοχικές επιλύσεις κατά τις οποίες αυξανόταν το φορτίο, δηλαδή η επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετατόπιση, σχηματίστηκε τοπικός λυγισμός στο θλιβόμενο πέλμα της μίας εκ των δύο δοκών για βύθιση πέραν των 300mm. Για αυτή τη μετατόπιση, στα φύλλα CFRP αναπτύχθηκε η μέγιστη τάση αντοχής σε εφελκυσμό (2900 MPa), η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τάσεις για μετατόπιση 170mm (Εικόνα 4.29 και Εικόνα 4.6).



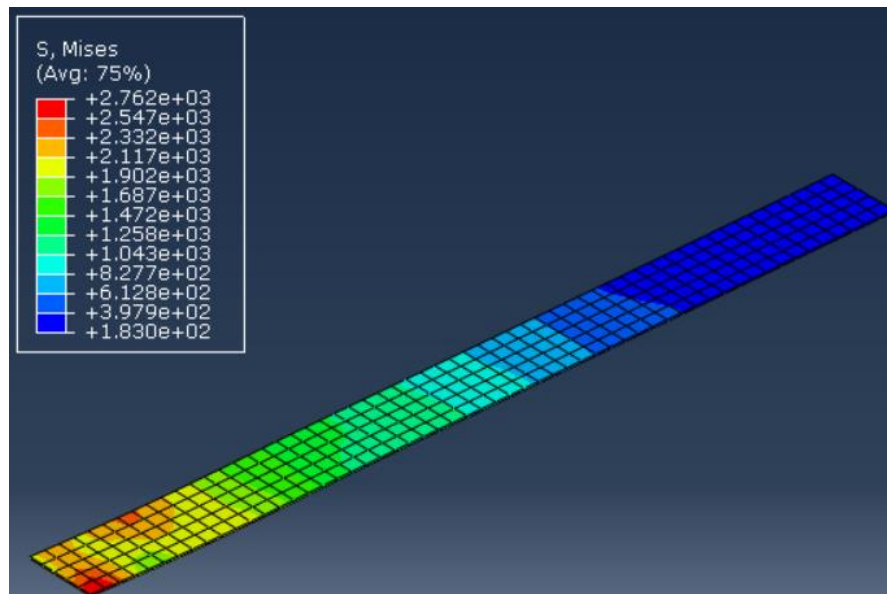
Εικόνα 4.27 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 1 για $dy=300\text{mm}$



Εικόνα 4.28 Τάσεις Von Mises για $dy=300\text{mm}$



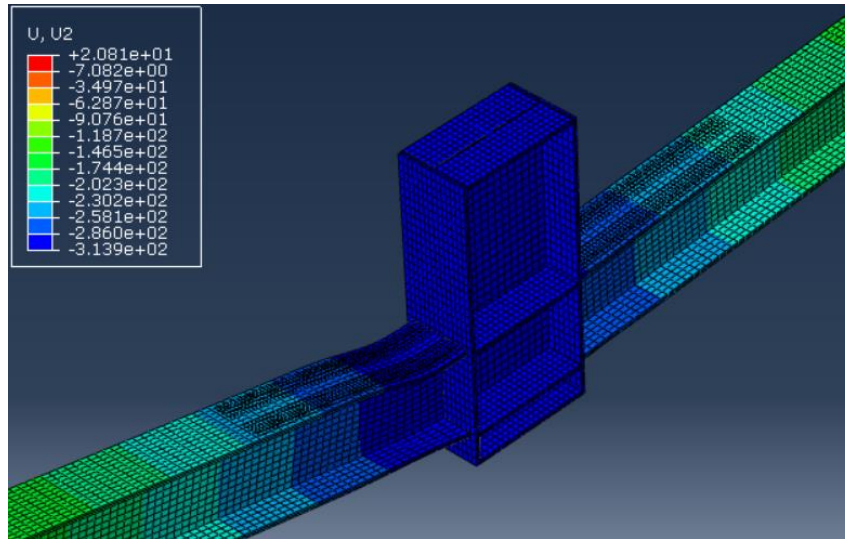
Εικόνα 4.29 Τάσεις Von Mises στο CFRP αριστερά του υποστρώματος για $d_y=300\text{mm}$



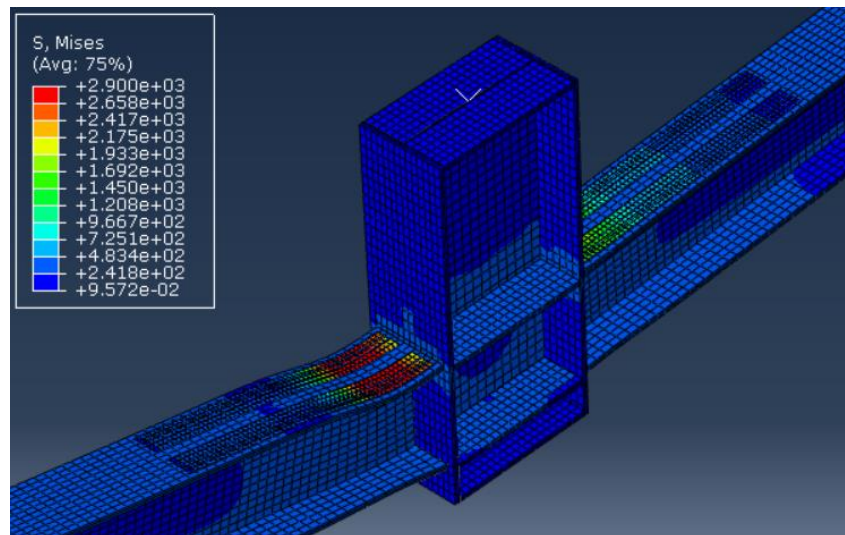
Εικόνα 4.30 Τάσεις Von Mises στο CFRP δεξιά του υποστρώματος για $d_y=300\text{mm}$

Μοντέλο 2 – 8 φύλλα CFRP

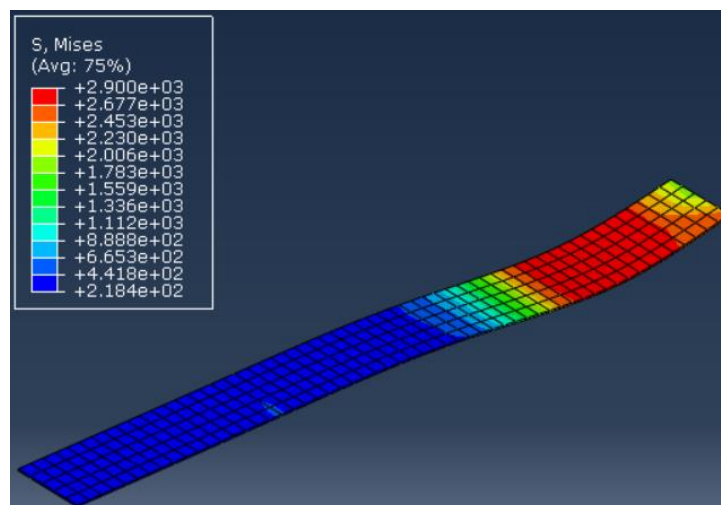
Το δεύτερο μοντέλο κόμβου, έχοντας σχεδόν ίδια συμπεριφορά με το προηγούμενο (με τα 4 CFRP) μετά τη διαρροή δεν δείχνει να αστοχεί μέχρι τα 170mm. Όμοια με το Μοντέλο 1, φαίνεται ότι για κατακόρυφη μετατόπιση $d_y=300\text{mm}$ σχηματίζεται τοπικός λυγισμός, όμως λιγότερο έντονος. Παρόλα αυτά, στα CFRP αναπτύσσεται επίσης η μέγιστη τάση αντοχής τους, 2900MPa (Εικόνα 4.33).



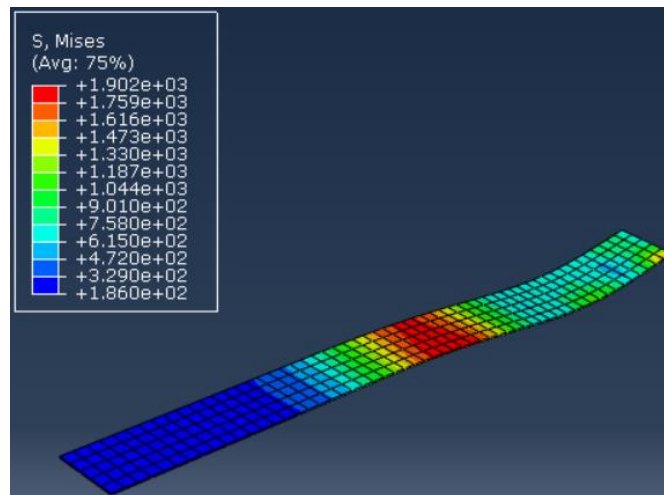
Εικόνα 4.31 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 2 για $dy=300\text{mm}$



Εικόνα 4.32 Τάσεις Von Mises για $dy=300\text{mm}$



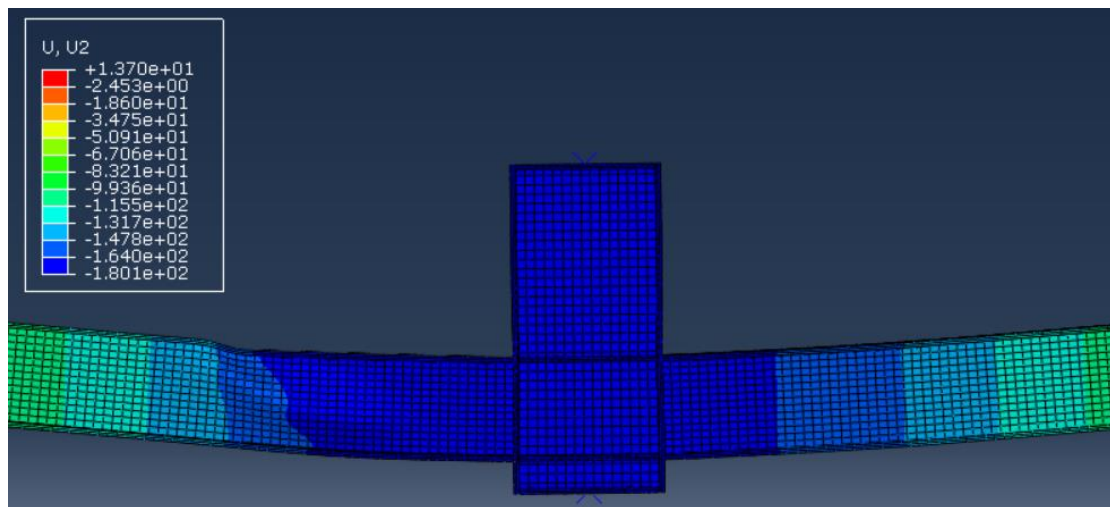
Εικόνα 4.33 Τάσεις Von Mises στο CFRP εξωτερικά του θλιβόμενου πέλματος για $dy=300\text{mm}$



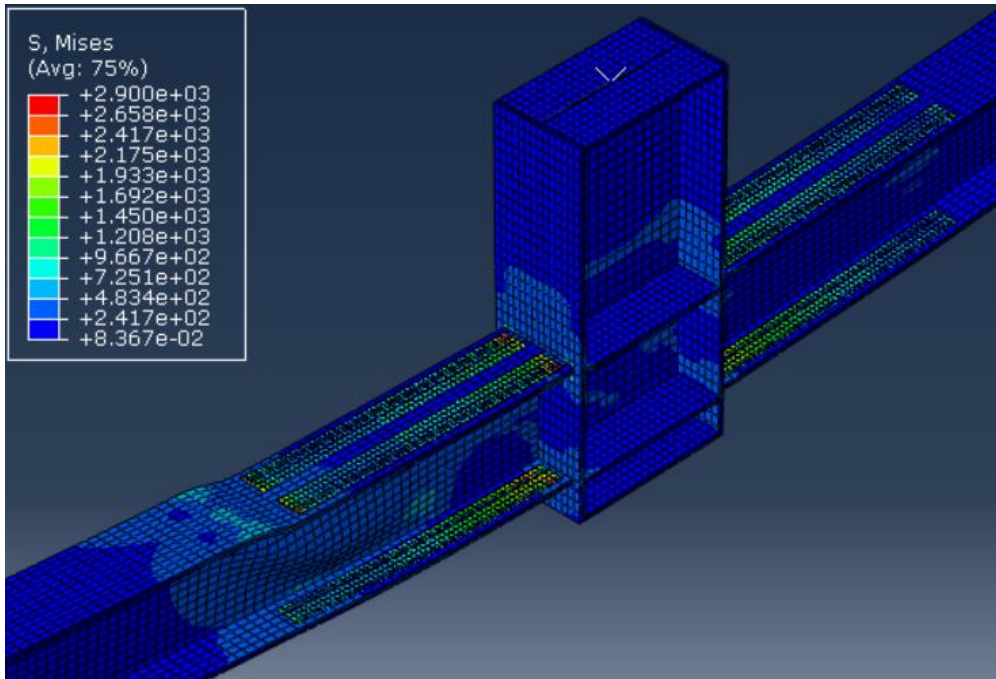
Εικόνα 4.34 Τάσεις Von Mises στο CFRP εσωτερικά του θλιβόμενου πέλματος για $dy=300\text{mm}$

Μοντέλο 3 – 12 φύλλα CFRP

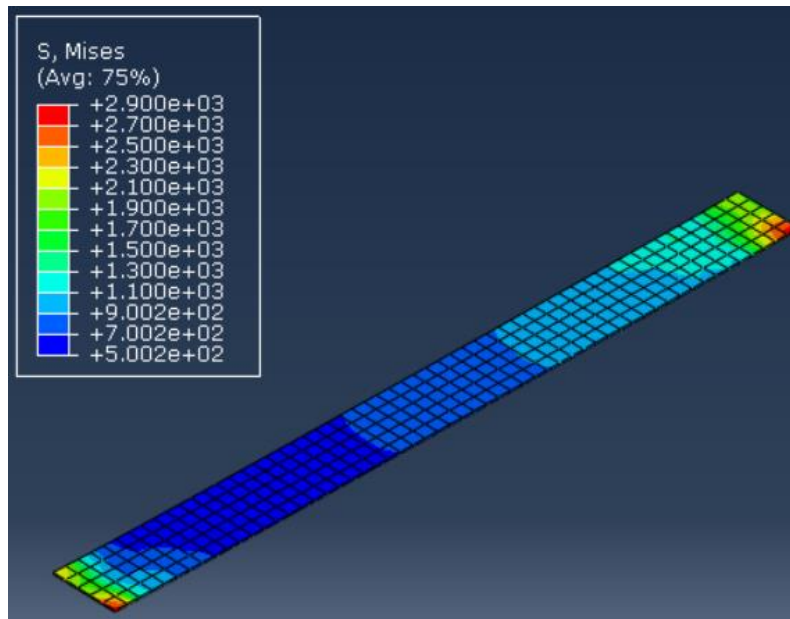
Αυτό το μοντέλο, παρόλο που δείχνει μετά την διαρροή να έχει κρατυνόμενη συμπεριφορά μέχρι τα 170mm, όταν η μετατόπιση αυτή αυξήθηκε ελάχιστα, έδειξε να μην μπορεί να παραλάβει περεταίρω φορτίο. Έτσι η παραμορφωμένη κατάσταση και οι τάσεις που αναπτύσσονται διαφοροποιούνται ελάχιστα σε σχέση με αυτά που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.2.1.



Εικόνα 4.35 Παραμορφωμένο σχήμα μοντέλου 3



Εικόνα 4.36 Τάσεις Von Mises στο μοντέλο 3

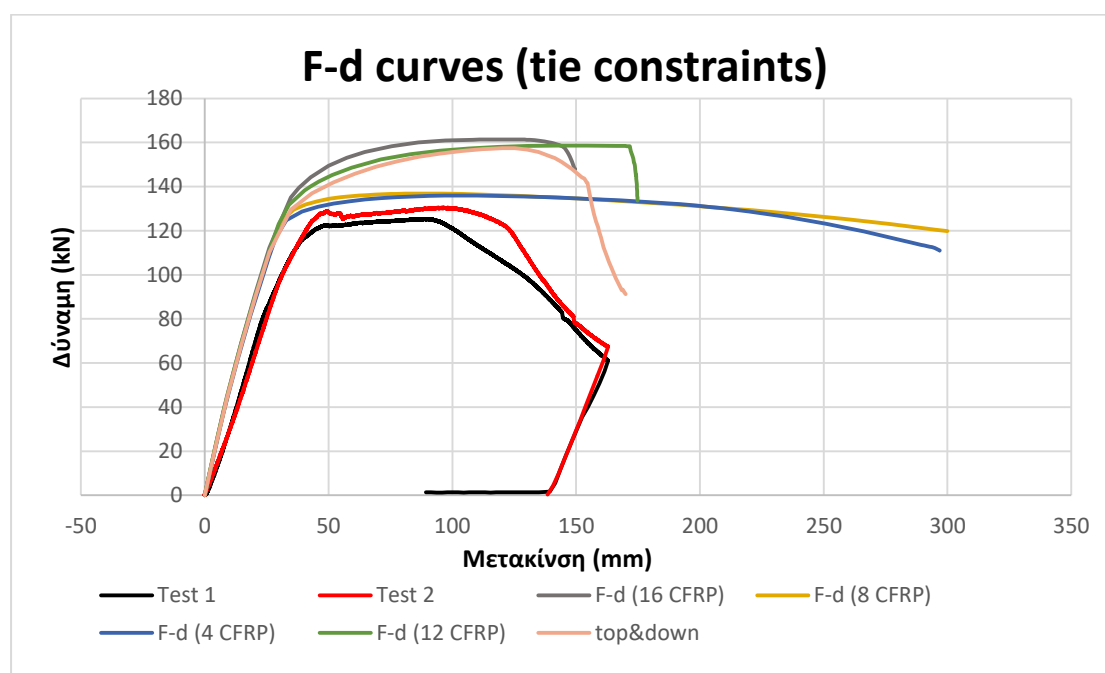


Εικόνα 4.37 Τάσεις στο CFRP στο εξωτερικό του θλιβόμενου πέλματος

Όπως φαίνεται από τις εικόνες με τις τάσεις Von Mises, όσο αυξάνεται η καταπόνηση του μοντέλου, τόσο περισσότερο φορτίο παραλαμβάνεται από τα CFRP και ανακουφίζεται ο χάλυβας. Στα σημεία όπου αναπτύσσεται και η μεγαλύτερη θλίψη, δηλαδή πλησιέστερα στο υποστύλωμα, οι τάσεις των ενισχύσεων είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στις χαλύβδινες δοκούς.

4.2.5 Σύγκριση αστοχίας αναλυτικών και πειραματικών μοντέλων

Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των τελευταίων επιλύσεων παραστάθηκαν γραφικά στο ίδιο διάγραμμα με τις πειραματικές (Σχήμα 4.7). Τα αποτελέσματα είναι ενδιαφέρον καθώς παρατηρώντας τη συνολική συμπεριφορά των μοντέλων, τα συμπεράσματα τροποποιούνται. Τα μοντέλα των κόμβων με ενισχυμένα και τα δύο πέλματα, δηλαδή αυτά που αντιστοιχούν στις καμπύλες 'F-d (16 CFRP)', 'F-d (12 CFRP)' και 'top&down', μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερο φορτίο για τις ίδιες μετατοπίσεις, ωστόσο αστοχούν περίπου στα 148, 176 και 156 mm αντίστοιχα. Αντίθετα, τα δύο μοντέλα με ενισχυμένο μόνο το πάνω πέλμα, οι καμπύλες των οποίων είναι οι 'F-d (4 CFRP)' και 'F-d (8 CFRP)', μπορεί να μην παραλαμβάνουν ουσιαστικά μεγαλύτερο φορτίο από τα πειραματικά, όμως ο μετελαστικός τους κλάδος επεκτείνεται σημαντικά.



Σχήμα 4.7 Μετακίνηση αστοχίας αναλυτικών και πειραματικών μοντέλων κόμβων

Ακόμη και για μετατόπιση $d_y=300\text{mm}$, σχεδόν διπλάσια από τη μετατόπιση αστοχίας των μοντέλων των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, τα μοντέλα δεν φαίνεται να παραμορφώνονται σημαντικά. Ωστόσο, το επιτρεπόμενο βέλος για παράδειγμα σε μία δοκό στέγης είναι ίσο με $L/200$ (EN 1993-1-1/1992 Πίν.4.1) που στην εξεταζόμενη περίπτωση αυτό προκύπτει 2.52cm. Έτσι, εννοείται ότι μία κατασκευή η οποία περιλαμβάνει έναν παρόμοιο κόμβο, ο οποίος υφίσταται μετατόπιση πέραν των 30cm, δεν είναι πλέον λειτουργική, παρόλα αυτά δεν καταρρέει.

Πίνακας 4.1 Σύγκριση μέγιστου φορτίου αναλυτικών και πειραματικών μοντέλων

Μοντέλα Διερεύνησης		Μοντέλα Πειραμάτων	
CFRP	maxF (kN)	CFRP	maxF (kN)
16	161.41	0	125.41
12	158.61	16	130.38
8 (top&down)	157.37		
8	136.86		
4	135.95		

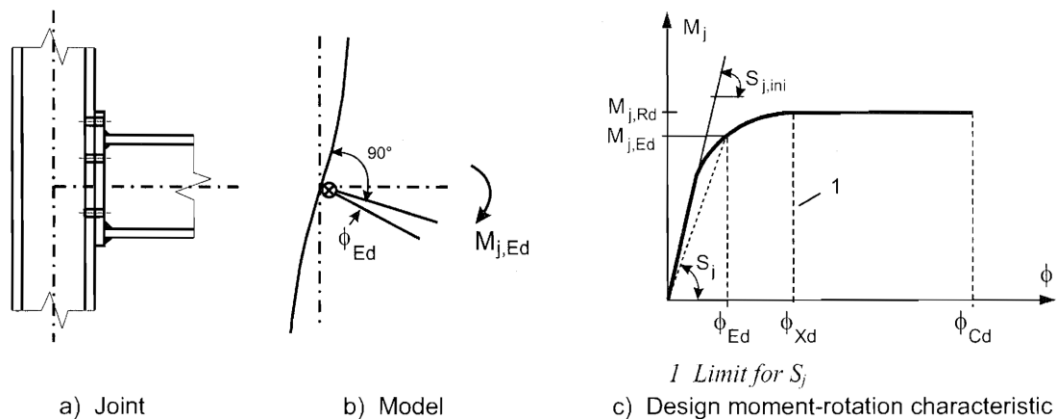
Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται συγκεντρωτικά τα μέγιστα φορτία που μπορούν να παραλάβουν τα αναλυτικά και τα πειραματικά μοντέλα. Τα μοντέλα με ενισχυμένα και τα δύο πέλματα, είτε αυτά έχουν 16, είτε 8 (top&down) CFRP παραλαμβάνουν σχεδόν το ίδιο φορτίο, περίπου 30kN μεγαλύτερο από το μοντέλο του πειράματος με τα 16 φύλλα CFRP. Αντίθετα, τα μοντέλα με 8 και 4 CFRP στο θλιβόμενο μόνο πέλμα παραλαμβάνουν φορτίο λίγο μεγαλύτερο από τα μοντέλα του πειράματος, ενισχυμένο και μη.

5 Διατάξεις Ευρωκώδικα 3 για συγκολλητούς κόμβους

5.1 Γενικά

Μελετώντας της συμπεριφορά των κόμβων είναι απαραίτητη η κατανόηση των διατάξεων του Ευρωκώδικα σχετικά με αυτήν. Το μέρος του Ευρωκώδικα 3 που αφορά του κόμβους δεν περιλαμβάνει διατάξεις σχετικά με ενισχυμένους κόμβους, όπως τον κόμβο του πειράματος 2 ο οποίος περιείχε CFRP. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι υπολογισμού που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο θα εφαρμοστούν μόνο στον κόμβο του πειράματος 1 (μη ενισχυμένος) προκειμένου να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για την πραγματική συμπεριφορά του αλλά και για τη θεωρητική, όπως ορίζεται από τον κανονισμό.

Η συμπεριφορά των κόμβων μίας κατασκευής μπορεί να προσομοιωθεί μέσω ενός στρωφικού ελατηρίου το οποίο συνδέει τους άξονες των μελών που συντρέχουν σε αυτό. Οι παράμετροι του ελατηρίου μπορούν να εκφραστούν μέσα από το χαρακτηριστικό διάγραμμα ροπής-στροφής $M-\phi$, το οποίο περιγράφει τη σχέση μεταξύ της καμπτικής ροπής $M_{j,Ed}$ και της αντίστοιχης στροφής ϕ_{Ed} μεταξύ των συνδεόμενων μελών του κόμβου. Ένα τέτοιο διάγραμμα θα μπορεί να προσδιορίσει την ροπή αντοχής $M_{j,Rd}$, τη στρωφική δυσκαμψία $S_{j,ini}$ και τη στρωφική ικανότητα του κόμβου ϕ_{Cd} όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1 του EN 1993-1-8 (Εικόνα 5.1).



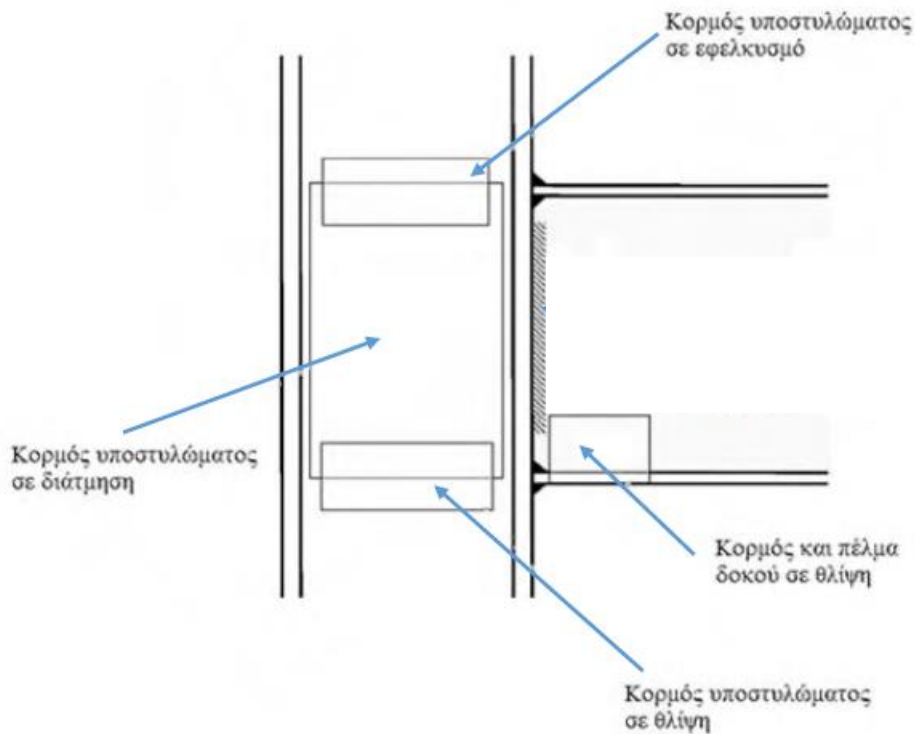
Εικόνα 5.1 Διάγραμμα $M-\phi$ κόμβου [8]

5.2 Υπολογισμός αντοχής κόμβου κατά EN1993-1-8.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 6 (Κόμβοι σύνδεσης διατομών Η ή Ι) του Μέρους 1.8 (Σχεδιασμός κόμβων) του Ευρωκώδικα 3, η ροπή αντοχής $M_{j,Rd}$ του κόμβου προσδιορίζεται μέσω των αντοχών των επιμέρους συστατικών μερών του. Η μέθοδος στην οποία βασίζονται οι υπολογισμοί είναι η μέθοδος των «συστατικών μερών» (“component method”). Για τον συγκολλητό κόμβο του πειράματος, τα συστατικά μέρη τα οποία θα μελετηθούν, όπως ορίζονται στον Πίνακα 6.1 του EN 1993-1-8, είναι τα εξής:

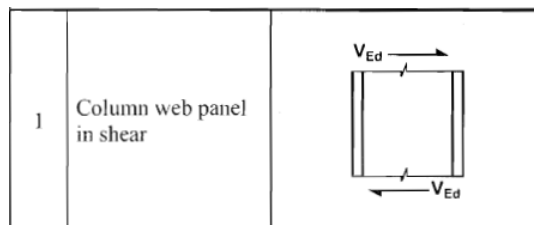
1. Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση [EN 1993-1-8 6.2.6.1]
2. Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη [EN 1993-1-8 6.2.6.2]

3. Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό [EN 1993-1-8 6.2.6.3]
4. Πέλμα και κορμός δοκού σε θλίψη [EN 1993-1-8 6.2.6.4]



Εικόνα 5.2 Συστατικά μέρη συγκολλητού κόμβου δοκού-υποστυλώματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 [6]

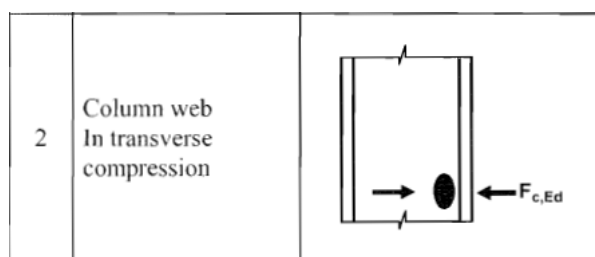
Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση



Εικόνα 5.3 Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση [8]

Σε ακραίους συγκολλητούς κόμβους ή σε ενδιάμεσους κόμβους που υποβάλλονται σε μη συμμετρική φόρτιση, η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση λαμβάνεται υπόψη. Καθώς όμως εξετάζεται αμφίπλευρος συμμετρικός κόμβος, στον οποίο αναπτύσσεται συμμετρική φόρτιση, δηλαδή οι ροπές εκατέρωθεν του υποστυλώματος είναι ίσες, η παράμετρος μετασχηματισμού β μηδενίζεται και κατά συνέπεια η δυσκαμψία του απειρίζεται. Έτσι, και η αντίστοιχη αντοχή σε διάτμηση είναι θεωρητικά άπειρη.

Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη



Εικόνα 5.4 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη [8]

Για μη ενισχυμένους κόμβους (δηλαδή χωρίς εγκάρσιες νευρώσεις ή ενισχυτικές πλάκες κορμού), η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος που υποβάλλεται σε εγκάρσια θλίψη καθορίζεται ως εξής, σύμφωνα με τη Σχέση 6.9 του EN 1993-1-8:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (5.1)$$

Όπου

ω : μειωτικός συντελεστής για αλληλεπίδραση με διάτμηση

- Για $M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$, ο συντελεστής μετασχηματισμού λαμβάνεται από τον Πίνακα 5.4 του EN 1993-1-8 $\beta = 0$. Έτσι, από τον Πίνακα 6.3 λαμβάνεται $\omega = 1$.

$b_{eff,c,wc}$: ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη

- Για συγκολλητούς κόμβους, το πλάτος αυτό υπολογίζεται από τη Σχέση 6.10 του EN 1993-1-8

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2} a_b + 5(t_{fc} + s) \quad (5.2)$$

Όπου

t_{fb} : πάχος πέλματος δοκού

a_b : πάχος συγκόλλησης

t_{fc} : πάχος πέλματος υποστυλώματος

$s = \sqrt{2} a_c$, όπου ($a_c = a_b$)

ρ : μειωτικός συντελεστής λόγω πιθανής κύρτωσης του κορμού του υποστυλώματος

- Για συγκολλητές διατομές I ή H, υπολογίζεται από τις Σχέσεις 6.13a, 6.13b, 6.13c του EN 1993-1-8

$$\bar{\lambda}_p \leq 0,72 \quad \rho = 1,0 \quad (5.3)$$

$$\bar{\lambda}_p > 0,72 \quad \rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2)/\bar{\lambda}_p^2$$

Όπου

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 * \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}} \quad (5.4)$$

Όπου

$$d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + \sqrt{2} a_c)$$

h_c : ύψος διατομής υποστυλώματος

t_{fc} : πάχος κορμού

$f_{y,wc}$: τάση διαρροής χάλυβα κορμού

t_{wc} : πάχος κορμού υποστυλώματος

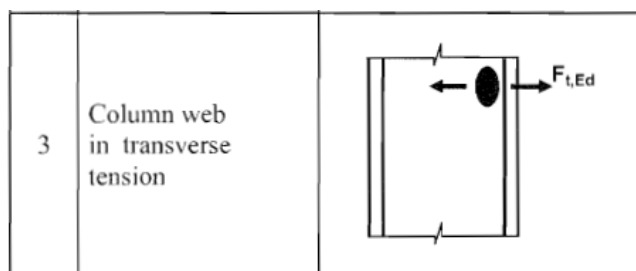
k_{wc} : μειωτικός συντελεστής λόγω υπαρχουσών ορθών τάσεων κατά τη διαμήκη έννοια του κορμού

- Οι τάσεις στο υποστίλωμα λόγω ροπών αλληλοαναιρούνται, οπότε λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ορθές τάσεις λόγω αξονικής δύναμης. Αφού υπολογιστούν οι τάσεις $\sigma_{com,Ed}$, τότε ο συντελεστής υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 6.14 του EN 1993-1-8 ως εξής:

$$\begin{aligned} \sigma_{com,Ed} \leq 0,7 f_{y,wc} & : k_{wc} = 1,0 \\ \sigma_{com,Ed} > 0,7 f_{y,wc} & : k_{wc} = 1,7 - \sigma_{com,Ed} / f_{y,wc} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Ο Ευρωκώδικας επίσης αναφέρει ότι τυχόν εγκάρσιες ενισχύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την αντοχή σε εγκάρσια θλίψη του κόμβου. Σε συγκολλητές διατομές οι ενισχύσεις αυτές πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένες με τα αντίστοιχα πέλατα των δοκών εκατέρωθεν του κόμβου (Σημείωση 6.2.6.2 (5) EN 1993-1-8).

Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό



Εικόνα 5.5 Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό [8]

Για μη ενισχυμένους κόμβους, η αντοχή του κορμού του υποστυλώματος που υποβάλλεται σε εγκάρσια θλίψη καθορίζεται ως εξής, σύμφωνα με τη Σχέση 6.15 του EN 1993-1-8:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (5.6)$$

Όπου όπως προκύπτει από τη Σχέση 6.16 του EN 1993-1-8:

$$b_{eff,t,wc} = b_{eff,c,wc}$$

Ο Ευρωκώδικας αναφέρει και σε αυτή την περίπτωση ότι τυχόν εγκάρσιες ενισχύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την αντοχή σε εγκάρσιο εφελκυσμό του κόμβου. Σε συγκολλητές διατομές οι ενισχύσεις αυτές πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένες με τα αντίστοιχα πέλαμα των δοκών εκατέρωθεν του κόμβου (Σημείωση 6.2.6.3 (6) EN 1993-1-8).

Αντοχή εγκάρσιων ενισχύσεων κορμού

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στον Ευρωκώδικα αναφέρεται ότι οι αντοχές του κορμού του υποστυλώματος σε εγκάρσια θλίψη και εφελκυσμό μπορούν να αυξηθούν με τη χρήση εγκάρσιων ενισχύσεων. Ωστόσο, δεν παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τον υπολογισμό της αντοχής τους. Για το λόγο αυτό, εφόσον τα ελάσματα αυτά καταπονούνται αποκλειστικά σε θλίψη και εφελκυσμό, οι αντοχές τους θα υπολογιστούν με βάση τις παραγράφους 6.2.3 και 6.2.4 του EN 1993-1-1.

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.7)$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.8)$$

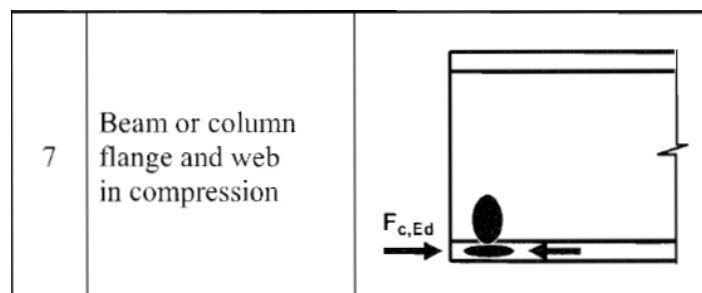
Όπου

A : το εμβαδόν διατομής των ελασμάτων

f_y : η τάση διαρροής των ελασμάτων

Οι αντοχές των εγκάρσιων ενισχύσεων που προκύπτουν σε αυτή την ενότητα θα προστεθούν στις αντοχές $F_{c,wc,Rd}$ και $F_{t,wc,Rd}$ που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αυτής της ενότητας.

Πέλαμα και κορμός δοκού σε θλίψη



Εικόνα 5.6 Πέλαμα και κορμός δοκού σε θλίψη [8]

Σύμφωνα με την παράγραφο 6.2.6.7 του EN 1993-1-8, η αντοχή σε θλίψη του πέλματος της δοκού και της παρακείμενης θλιβόμενης ζώνης του κορμού της μπορεί να υπολογιστεί από τη Σχέση 6.21 ως εξής:

$$F_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_{fb}) \quad (5.9)$$

Όπου

h : το ύψος της διατομής της συνδεόμενης δοκού

t_{fb} : το πάχος του πέλματος της συνδεόμενης δοκού

$M_{c,Rd}$: η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή της διατομής της δοκού, απομειωμένη αν χρειάζεται λόγω φαινομένων διάτμησης.

Αντοχή συγκολλητού κόμβου σε ροπή $M_{j,Rd}$

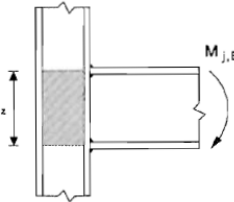
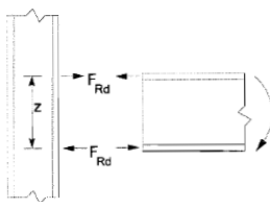
Τελικά, η αντοχή του κόμβου υπολογίζεται μετά τον προσδιορισμό των αντοχών και των τριών ζωνών από τη σχέση:

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} * z \quad (5.10)$$

Όπου

$$F_{Rd} = \min\{F_{c,wc,Rd}, F_{t,wc,Rd}\}$$

z : μοχλοβραχίονας-κεντροβαρική απόσταση πελμάτων δοκού (Εικόνα 5.7)

Type of connection	Centre of compression	Lever arm	Force distributions
a) Welded connection 	In line with the mid thickness of the compression flange	$z = h - t_{fb}$ h is the depth of the connected beam t_{fb} is the thickness of the beam flange	

Εικόνα 5.7 Αντοχή κόμβου, [8]

5.3 Αριθμητικός υπολογισμός αντοχών συστατικών μερών κόμβου

Υπολογισμός εντατικών μεγεθών

Από τις πειραματικές μετρήσεις λαμβάνεται το μέγιστο κατακόρυφο φορτίο που δέχεται το υποστύλωμα $F_{max} = 125.41 \text{ kN}$. Το στατικό προσομοίωμα της πειραματικής διάταξης είναι αυτό της αμφιερίστης δοκού, με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον. Έτσι, υπολογίζεται η ροπή στο μέσον της αμφιερίστου ίση με $M_m = 148.24 \text{ kNm}$ και η ροπή στην παρειά του υποστυλώματος, δηλαδή αυτή που καταπονεί τις δοκούς, $M_{Ed} = 138.21 \text{ kNm}$. Στους υπολογισμούς που ακολουθούν λαμβάνονται οι αντοχές των υλικών από τα πιστοποιητικά τους, όπως προέκυψαν από δοκιμές.

Πίνακας 5.1 Αντοχές μελών κόμβου

Μέλος	f_y (MPa)	f_u (MPa)
Κορμοί	307.57	409.57
Πέλματα	332.00	475.00
Stiffeners	332.00	475.00

1. Αντοχή κορμού σε εγκάρσια θλίψη

$$s = \sqrt{2} * 3 = 4.24 \text{ mm}$$

$$b_{eff,c,wc} = 10 + 2\sqrt{2} * 3 + 5(10 + 4.24) = 89.70 \text{ mm}$$

$$d_{wc} = 320 - 2(10 + \sqrt{2} * 3) = 291.51 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 * \sqrt{\frac{89.70 * 291.51 * 307.57}{210000 * 3^2}} = 1.92 > 0.72$$

$$\rho = \frac{1.92 - 0,2}{1.92^2} = 0.47$$

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{125.41}{900+3600} = 27.87 \text{ MPa} \leq 0,7 * 307.57 = 215.30 \text{ MPa}$$

$$k_{wc} = 1,0$$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{1.0 * 1.0 * 89.70 * 3 * 307.57}{1.0 * 1000} = 82.77 \text{ kN}$$

Έλεγχος

$$F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega k_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} = \frac{1.0 * 1.0 * 0.47 * 89.70 * 3 * 307.57}{1.0 * 1000} = 38.57 \text{ kN}$$

Άρα $F_{c,wc,Rd} = 38.57 \text{ kN}$.

2. Αντοχή κορμού σε εγκάρσιο εφελκυσμό

$$b_{eff,t,wc} = b_{eff,c,wc} = 89.70 \text{ mm}$$

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{1.0 * 1.0 * 89.70 * 3 * 307.57}{1.0 * 1000} = 82.77 \text{ kN}$$

3. Αντοχή εγκάρσιων ενισχύσεων (Stiffeners)

$$A = (2 * 88.5) * 10 = 1770 \text{ mm}$$

$$F_{c,stif,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1770 * 332}{1.0 * 1000} = 587.64 \text{ kN}$$

$$F_{t,stif,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1770 * 332}{1.0 * 1000} = 587.64 \text{ kN}$$

4. Αντοχή πέλματος και κορμού δοκού σε θλίψη

Κατηγορία διατομής δοκού

i. Κορμός δοκού σε κάμψη

$$c/t = 200/3 = 66.67$$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/307.57} = 0.87$$

$$c/t < 83 * \varepsilon = 72.55$$

Ο κορμός είναι κατηγορίας 2.

ii. Θλιβόμενο πέλμα δοκού

$$c/t = 67/10 = 6.7$$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/332.0} = 0.84$$

$$c/t < 9 * \varepsilon = 7.57$$

Το πέλμα είναι κατηγορίας 1.

Η διατομή της δοκού είναι Κατηγορίας 2, έτσι μπορεί να ελεγχθεί πλαστικά.

Έλεγχος απομείωσης της αντοχής σε ροπή κάμψης λόγω παρουσίας διάτμησης

Η αντοχή σε διάτμηση της δοκού υπολογίζεται σύμφωνα με την παράγραφο 6.2.6 του EN 1993-1-1.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{(200 * 3) * 307.57}{\sqrt{3} * 1.0 * 1000} = 106.55 \text{ kN}$$

Η δρώσα τέμνουσα στη δοκό προκύπτει από στατική επίλυση αμφιερίστου υπό συγκεντρωμένο φορτίο, ίση με $V_{Ed} = 62.71 \text{ kN}$.

$$0.5 V_{pl,Rd} = 53.27 \text{ kN} < V_{Ed}$$

Απαιτείται απομείωση της ροπής αντοχής της διατομής κατά τον συντελεστή ρ (EN 1993-1-1 6.2.8).

$$\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 * 62.71}{106.55} - 1 \right)^2 = 0.03$$

Έτσι, η ροπή αντοχής της δοκού υπολογίζεται από την επόμενη σχέση.

$$M_{v,Rd} = \min \left\{ \left[W_{pl} - \frac{\rho A_v^2}{4t_w} \right] * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}; M_{c,Rd} \right\}$$

Λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των υλικών των μελών που απαρτίζουν τη δοκό, η αντοχή των πελμάτων και του κορμού υπολογίζονται ξεχωριστά και απομειώνεται αυτή του κορμού καθώς αυτή περιλαμβάνει τον όρο A_v .

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,w} f_{y,w}}{\gamma_{M0}} + \frac{W_{pl,f} f_{y,f}}{\gamma_{M0}} = \frac{30000 * 307.57}{1.0 * 1000000} + \frac{315000 * 332.0}{1.0 * 1000000} = 113.81 \text{ kNm}$$

$$M_{v,Rd} = \min \left\{ \left[\left(W_{pl,w} - \frac{\rho A_v^2}{4t_w} \right) * \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} + \frac{W_{pl,f} f_{y,f}}{\gamma_{M0}} \right]; M_{c,Rd} \right\} \\ = \min \left\{ \left[\left(30000 - \frac{0.03 * 600^2}{4 * 3} \right) * \frac{307.57}{1.0} + \frac{315000 * 332.0}{1.0 * 1000000} \right]; M_{c,Rd} \right\} = \min\{113.52; 113.81\} = 113.52 \text{ kNm}$$

Έτσι προκύπτει

$$F_{c,fb,Rd} = 113.52 / \frac{(220 - 10)}{1000} = 540.56 \text{ kN}$$

Τελικές αντοχές συστατικών μερών κόμβου

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τελικές αντοχές των συστατικών μερών. Οι αντοχές $F_{t,wc,Rd}$ και $F_{c,wc,Rd}$ είναι προσαυξημένες κατά τις αντοχές των stiffeners, $F_{c,stif,Rd}$ και $F_{t,stif,Rd}$ αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2 Αντοχές συστατικών μερών κόμβου

Συστατικό μέρος	Αντοχή	Αντοχή (kN)
Κορμός υποστυλώματος	$F_{c,wc,Rd}$	626.21
Κορμός υποστυλώματος	$F_{t,wc,Rd}$	670.41
Πέλμα και κορμός δοκού	$F_{c,fb,Rd}$	540.56

Αντοχή σχεδιασμού σε ροπή του κόμβου

$$F_{Rd} = \min\{626.21, 670.41\} = 626.21 \text{ kN}$$

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} * z = 626.21 * \frac{220 - 10}{1000} = 131.50 \text{ kNm}$$

5.4 Υπολογισμός στρωφικής δυσκαμψίας κόμβου κατά EN1993-1-8

Η στρωφική δυσκαμψία S_j του κόμβου υπολογίζεται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 6 (Κόμβοι σύνδεσης διατομών Η ή Ι) του μέρους 1.8 (Σχεδιασμός κόμβων) του Ευρωκώδικα 3. Σε ένα διάγραμμα Μ-φ, η στρωφική δυσκαμψία S_j αναπτύσσεται όταν η δρώσα ροπή $M_{j,Ed}$ φτάσει για πρώτη φορά την τιμή $M_{j,Rd}$ και η αντίστοιχη στρωφή του κόμβου γίνει φ_{Xd} . Η κλίση του ελαστικού κλάδου του διαγράμματος Μ-φ, δίνει την αρχική δυσκαμψία του κόμβου, $S_{j,ini}$ (Εικόνα 5.1).

Ο υπολογισμός της δυσκαμψίας βασίζεται στη μέθοδο των συστατικών μερών, ομοίως με τον υπολογισμό της αντοχής του κόμβου. Κάθε συστατικό μέρος του κόμβου προσομοιώνεται με ένα ελατήριο και αντιπροσωπεύεται από μία σταθερά ελαστικής δυσκαμψίας k_i (“elastic stiffness coefficient”). Η μέθοδος που περιγράφεται στην παράγραφο 6.3.1 (4) του EN 1993-1-8 εφαρμόζεται σε στοιχεία στα οποία η αξονική δύναμη N_{Ed} δεν υπερβαίνει το 5% της αντοχής τους $N_{pl,Rd}$. Στον κόμβο που μελετάται δεν αναπτύσσεται αξονική δύναμη στη δοκό (αμφιέριστη υπό κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο).

Η στρωφική δυσκαμψία του κόμβου υπολογίζεται από τη Σχέση 6.27 της παραγράφου 6.3.1 (4) του EN 1993-1-8.

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (5.11)$$

Όπου

E : μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

z : μοχλοβραχίονας

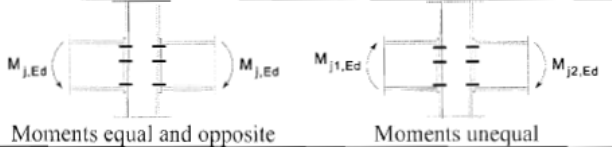
μ : λόγος δυσκαμψίας $S_{j,ini}/S_j$

- Για τον υπολογισμό της αρχικής δυσκαμψίας $S_{j,ini}$ ο συντελεστής μ λαμβάνεται ίσος με μονάδα. (EN 1993-1-8 6.3.1 (4))

k_i : σταθερά δυσκαμψίας για το συστατικό μέρος i του κόμβου

- Για αμφίπλευρο συγκολλητό κόμβο με συμμετρική φόρτιση, οι σταθερές δυσκαμψίας που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της στρωφικής δυσκαμψίας προκύπτουν από τον Πίνακα 6.9 (EN 1993-1-8 6.3.1). Όπως προκύπτει από τον πίνακα πρέπει να οριστούν οι συντελεστές k_2 και k_3 (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.3 Σταθερές δυσκαμψίας συστατικών μερών που πρέπει να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της S_j [8]

Beam-to-column joint with welded connections	Stiffness coefficients k_i to be taken into account
Single-sided	$k_1; k_2; k_3$
Double-sided – Moments equal and opposite	$k_2; k_3$
Double-sided – Moments unequal	$k_1; k_2; k_3$
Beam-to-column joint with Bolted angle flange cleat connections	Stiffness coefficients k_i to be taken into account
Single-sided	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_6; k_{10}; k_{11}^*); k_{12}^{**})$
Double-sided – Moments equal and opposite	$k_2; k_3; k_4; k_6; k_{10}; k_{11}^*); k_{12}^{**})$
Double-sided – Moments unequal	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_6; k_{10}; k_{11}^*); k_{12}^{**})$
 <p>Moments equal and opposite Moments unequal</p>	<p>*) Two k_{11} coefficients, one for each flange; **) Four k_{12} coefficients, one for each flange and one for each cleat.</p>

Η τιμές των συντελεστών δυσκαμψίας k_2 και k_3 λαμβάνονται από τον Πίνακα 6.11 (EN 1993-1-8 6.3.1), ανάλογα με το αν ο κόμβος είναι ενισχυμένος η όχι. Για την περίπτωση που μελετάται όπου ο κόμβος είναι ενισχυμένος με εγκάρσιες νευρώσεις (*stiffened*), ο Ευρωκώδικας προβλέπει ότι οι συντελεστές αυτοί απειρίζονται.

Πίνακας 5.4 Τιμές σταθερών δυσκαμψίας για συγκολλητούς αμφίπλευρους κόμβους [8]

<i>Column web in compression</i>	unstiffened	stiffened
	$k_2 = \frac{0,7 b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c}$ <i>b_{eff,c,wc}</i> is the effective width from 6.2.6.2	$k_2 = \infty$
<i>Column web in tension</i>	stiffened or unstiffened bolted connection with a single bolt-row in tension or unstiffened welded connection	stiffened welded connection
	$k_3 = \frac{0,7 b_{eff,t,wc} t_{wc}}{d_c}$ <i>b_{eff,t,wc}</i> is the effective width of the column web in tension from 6.2.6.3. For a joint with a single bolt-row in tension, <i>b_{eff,t,wc}</i> should be taken as equal to the smallest of the effective lengths <i>ℓ_{eff}</i> (individually or as part of a group of bolt-rows) given for this bolt-row in Table 6.4 (for an unstiffened column flange) or Table 6.5 (for a stiffened column flange).	$k_3 = \infty$

Απειρίζοντας τους συντελεστές αυτούς, ο παρονομαστής στη Σχέση 6.27 της παραγράφου 6.3.1 (4) του EN 1993-1-8 μηδενίζεται, με αποτέλεσμα η αρχική στροφική δυσκαμψία του κόμβου να είναι άπειρη.

Ωστόσο, για να τονισθεί η σημασία της συμμετοχής των εγκάρσιων ενισχύσεων στον κόμβο, υπολογίζεται η αρχική στροφική δυσκαμψία του στην περίπτωση όπου αυτός δεν είναι ενισχυμένος με εγκάρσιες νευρώσεις (*unstiffened joint*).

Αριθμητικός υπολογισμός αρχικής στροφικής δυσκαμψίας μη ενισχυμένου κόμβου

$$\mu = 1.0$$

$$z = 220 - 10 = 210 \text{ mm}$$

$$k_2 = \frac{0.7 b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 * 89.70 * 3}{300} = 0.63$$

$$k_3 = \frac{0.7 b_{eff,t,wc} t_{wc}}{d_c} = \frac{0.7 * 89.70 * 3}{300} = 0.63$$

$$S_{j,ini} = \left(\frac{210000 * 210^2}{1.0 * \sum_2 \frac{1}{0.63} + \frac{1}{0.63}} \right) * \frac{1}{1000} = 2907441.84 \text{ kNmm}$$

Η τιμή της δυσκαμψίας αυτής θα συγκριθεί με την αντίστοιχη για ενισχυμένο κόμβο στην συνέχεια, όπου θα γίνει η ταξινόμηση των δύο κόμβων (Ενότητα 5.7.1).

5.5 Υπολογισμός στροφικής ικανότητας κόμβου κατά EN1993-1-8

Στροφική ικανότητα ενός κόμβου καλείται η μέγιστη στροφή που λαμβάνεται από ένα διάγραμμα Μ-φ και αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή αντοχής σχεδιασμού του. Η ελάχιστη τιμή της ορίζεται από τη Σχέση 6.33 της παραγράφου 6.4.3 (1) του EN 1993-1-8 για ενισχυμένους κόμβους στους οποίους η ροπή αντοχής σχεδιασμού δεν διέπετε από διάτμηση, ως εξής:

$$\varphi_{cd} = 0.025 h_c / h_b \quad (5.12)$$

Όπου

h_c : το ύψος της διατομής της δοκού

h_b : το ύψος της διατομής του υποστρώματος

Για μη ενισχυμένους κόμβους σχεδιασμένους σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, η παράγραφος 6.4.3 (2) του EN 1993-1-8 προτείνει η στροφική ικανότητα να λαμβάνεται τουλάχιστον ίση με 0.015 ακτίνια.

Αριθμητικός υπολογισμός στροφικής ικανότητας ενισχυμένου κόμβου

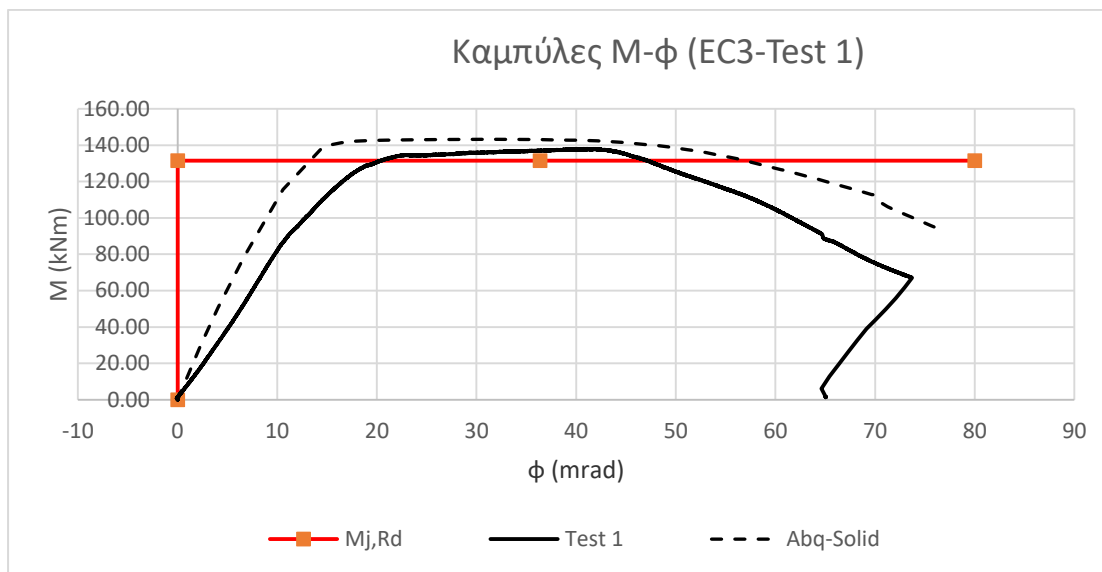
$$h_c = 320 \text{ mm}$$

$$h_b = 220 \text{ mm}$$

$$\varphi_{cd} = \frac{0.025 h_c}{h_b} = 0.025 * \frac{320}{220} = 0.036 \text{ rad}$$

5.6 Διαγράμματα Μ-φ

Η καμπύλη ροπής αντοχής-στροφής του ενισχυμένου με εγκάρσιες νευρώσεις κόμβου είναι μία οριζόντια γραμμή καθώς ο ελαστικός του κλάδος είναι κατακόρυφος (άπειρη δυσκαμψία) και ο επόμενος κλάδος ορίζεται από την $M_{j,Rd}$ που υπολογίστηκε στην ενότητα 5.3. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντοχή του μη ενισχυμένου κόμβου, δηλαδή χωρίς τις εγκάρσιες νευρώσεις, είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντοχή του ενισχυμένου. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται οι καμπύλες Μ-φ του Πειράματος 1 (αναλυτική και πειραματική χωρίς CFRP) και η καμπύλη του Ευρωκώδικα.



Σχήμα 5.1 Αναλυτική και πειραματική καμπύλη Μ-φ συγκριτικά με την καμπύλη του Ευρωκώδικα 3

Προκειμένου να προσεγγιστεί καλύτερα η πειραματική συμπεριφορά από τη θεωρητική, υπολογίζονται οι ελαστικές παραμορφώσεις των δοκών οι οποίες θα προστεθούν στο διάγραμμα του κανονισμού, μεταβάλλοντας την κλίση του ελαστικού κλάδου. Το πειραματικό μοντέλο κόμβου είναι αρθρωμένο στα δύο άκρα για αυτό επιτρέπεται ο υπολογισμός του μέγιστου βέλους από την εξής σχέση:

$$\delta = \frac{P l^3}{48 E_S I} \quad (5.13)$$

Όπου,

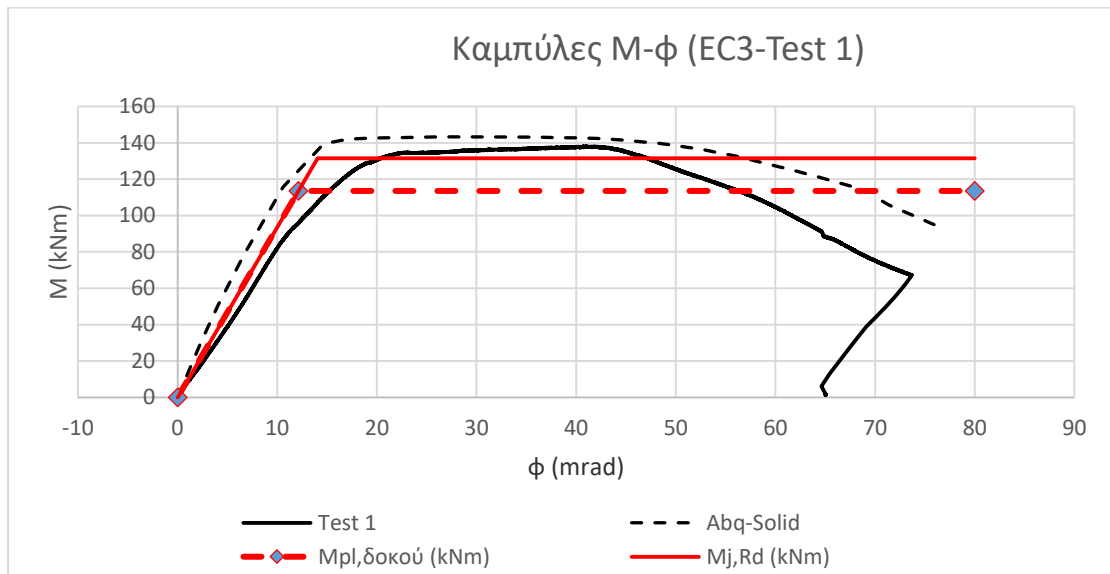
- δ : το μέγιστο βέλος στο μέσο του μοντέλου
- P : κατακόρυφο φορτίο
- l : το συνολικό μήκος του μοντέλου
- E_S : το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα
- I : η ροπή αδρανείας της διατομής των δοκών

Το φορτίο P λαμβάνει την τιμή του μέγιστου φορτίου για την οποία σταματά η ελαστική συμπεριφορά της δοκού και υπολογίζεται βάση της πλαστικής αντοχής των δοκών, $M_{v,Rd}$ που υπολογίστηκε στην Ενότητα 5.3.

$$P_u = \frac{4M_{v,Rd}}{l} \quad (5.14)$$

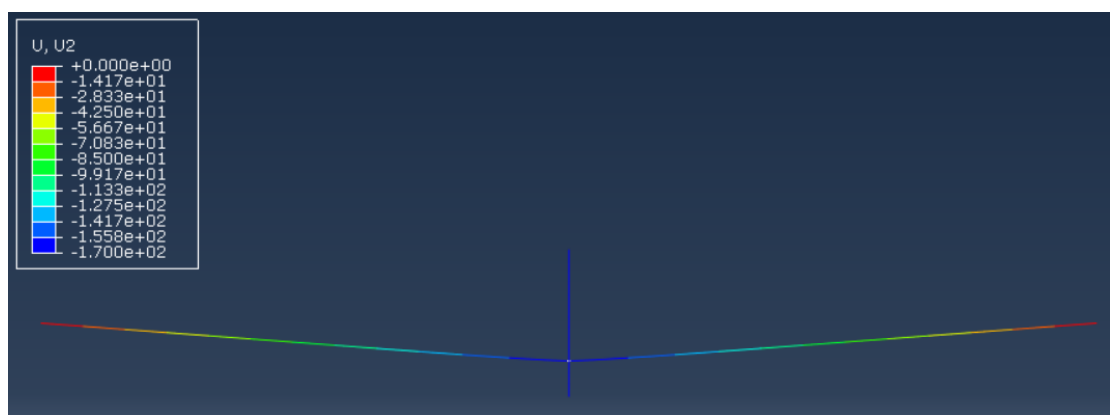
Αφού βρεθεί το μέγιστο βέλος των δοκών, μετατρέπεται σε στροφή και τοποθετείται στο διάγραμμα του κανονισμού. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη και τις ελαστικές παραμορφώσεις των δοκών, ο ελαστικός κλάδος πλέον δεν είναι κατακόρυφος αλλά υπό κλίση. Στο Σχήμα 5.2 φαίνονται η αναλυτική και πειραματική καμπύλη Μ-φ του Σχήματος 5.1 με την τροποποιημένη καμπύλη ροπής αντοχής του

κόμβου, και η καμπύλη ροπής αντοχής της δοκού. Η νέα κλίση της καμπύλης του κανονισμού η οποία αντιστοιχεί στη δυσκαμψία των δοκών ισούται με 9354 kNm/rad.

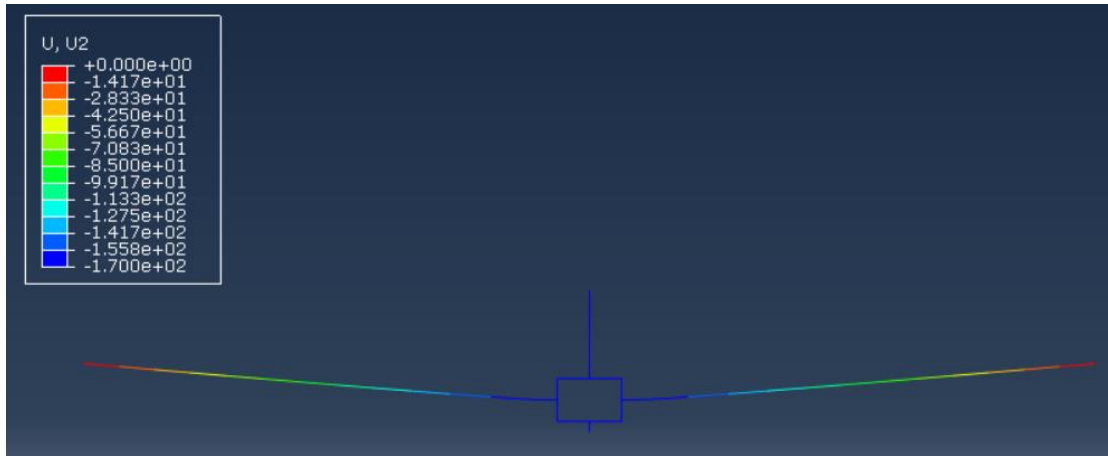


Σχήμα 5.2 Καμπύλες M-φ στις οποίες λαμβάνοντας υπόψη τις ελαστικές παραμορφώσεις των δοκών

Η κλίση της πειραματικής καμπύλης (Test 1) του Σχήματος 5.2 πλησιάζει πλέον την κλίση της θεωρητικής καμπύλης, ενώ η κλίση του μοντέλου του Abaqus δείχνει να είναι ελαφρώς πιο απότομη. Στο σημείο αυτό, δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα στο Abaqus στα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν solid στοιχεία αλλά beam elements (wire [15]) όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στις συνήθεις μελέτες για να διερευνηθεί κατά πόσο αυτά προσεγγίζουν καλύτερα τη θεωρητική συμπεριφορά του κόμβου. Στην Εικόνα 5.8 απεικονίζεται το πρώτο μοντέλο, το οποίο αντιστοιχεί στη συνήθη προσομοίωση όπου αγνοείται η συμπεριφορά των κόμβων. Το δεύτερο μοντέλο (Εικόνα 5.9) είναι λίγο πιο δύσκαμπτο καθώς το ραβδωτό στοιχείο δοκού φτάνει μέχρι την παρειά του υποστυλώματος και όχι τον άξονά του.

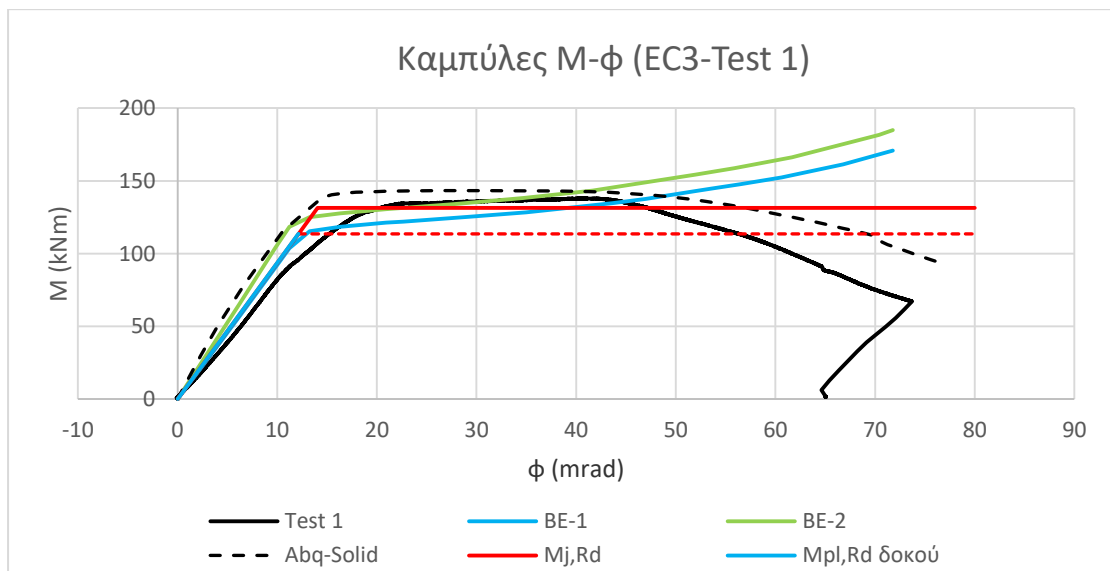


Εικόνα 5.8 Μοντέλο με Beam Elements 1



Εικόνα 5.9 Μοντέλο με Beam Elements 2

Τα διαγράμματα ροπών-στροφών των δύο αυτών μοντέλων απεικονίζονται μαζί με τις καμπύλες του Σχήματος 5.2 για καλύτερη εποπτεία στο Σχήμα 5.3. Από τις καμπύλες M-φ των μοντέλων με τα Beam Elements φαίνεται ότι ο ελαστικός κλάδος του πρώτου (καμπύλη BE-1) πλησιάζει το πείραμα, έτσι δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή της άκαμπτης ζώνης στη συμβατική προσομοίωση. Επίσης, η καμπύλη BE-1 σχεδόν ταυτίζεται με τη θεωρητική καμπύλη του κανονισμού ενώ παράλληλα η διαρροή φαίνεται να συμβαίνει όταν η δοκός φτάσει την πλαστική ροπή αντοχής της. Έτσι, συμπεραίνεται ότι η συμβατική και απλοποιημένη ανάλυση που γίνεται στις συνήθεις περιπτώσεις δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά που προβλέπει ο Ευρωκώδικας. Η απόκλιση στη μετελαστική συμπεριφορά των μοντέλων των Beam Elements από την πειραματική και αναλυτική συμπεριφορά του κόμβου οφείλεται στο γεγονός ότι μοντέλα με τέτοιου είδους στοιχεία δεν μπορούν να δείξουν τοπικά φαινόμενα όπως ο τοπικός λυγισμός οποίος αναπτύχθηκε στο πείραμα.

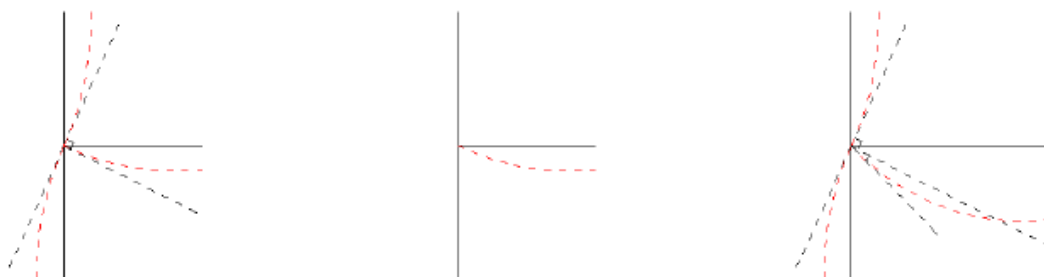


Σχήμα 5.3 Καμπύλες Σχήματος 5.2 μαζί με τις καμπύλες των μοντέλων Beam Elements

5.7 Ταξινόμηση κόμβου σύμφωνα με τον EN 1993-1-8

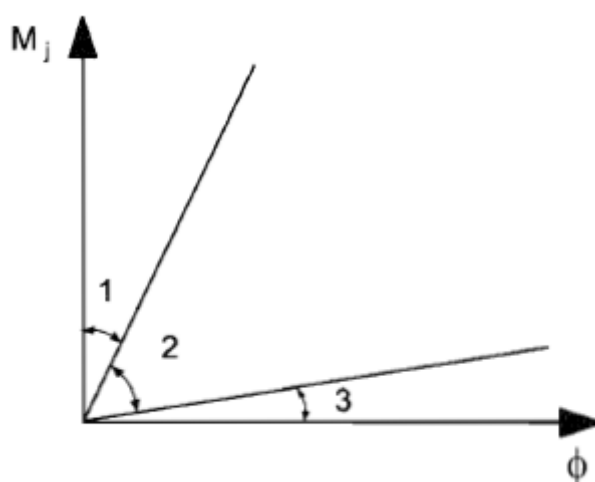
5.7.1 Με βάση τη δυσκαμψία του

Ο Ευρωκώδικας 3 προτείνει δύο τρόπους ταξινόμησης κόμβων, βάση της αρχικής στροφικής δυσκαμψίας και βάσει της αντοχής τους. Ο πρώτος τρόπος διαχωρίζει τους κόμβους σε άκαμπτους, ημιάκαμπτους και αρθρωτούς. Στους άκαμπτους κόμβους δεν μεταβάλλεται η αρχική γωνία μεταξύ των συνδεόμενων μελών, λειτουργούν και προσομοιώνονται σαν πάκτωση. Αντίθετα, οι ονομαστικά αρθρωτοί κόμβοι, έχουν την δυνατότητα μεταφοράς εσωτερικών δυνάμεων χωρίς την ανάπτυξη ροπών ενώ υπάρχει δυνατότητα ελεύθερης σχετικής στροφής μεταξύ των μελών τους. Οι κόμβοι που δεν συγκαταλέγονται σε κάποια από τις δύο αυτές κατηγορίες, ανήκουν στην τρίτη και ενδιάμεση κατηγορία, καλούνται ημιάκαμπτοι και προσομοιώνονται σαν ελαστική πάκτωση με χρήση στροφικών ελατηρίων. Η γωνία μεταξύ των μελών τους μεταβάλλεται ανάλογα με την επιβαλλόμενη ροπή στα μέλη.[1]



Σχήμα 5.4 Διάκριση κόμβων με βάση τη δυσκαμψία τους: άκαμπτος (αριστερά), αρθρωτός (κέντρο), ημιάκαμπτος (δεξιά).[6]

Τα όρια για την ταξινόμηση προβλέπονται στην παράγραφο 5.2.2.5 (1) του EN 1993-1-8 και φαίνονται στο Σχήμα 5.4 της ίδιας παραγράφου.



Σχήμα 5.5 Όρια Ευρωκώδικα 3 για τη διακριτοποίηση των κόμβων: άκαμπτος (1), αρθρωτός (3), ημιάκαμπτος (2). [8]

Περιοχή 1: Άκαμπτοι κόμβοι εάν $S_{j,ini} \geq k_b EI_b/L_b$

Όπου

$k_b = 8$ για πλαίσια στα οποία το σύστημα δυσκαμψίας μειώνει τις οριζόντιες μετακινήσεις τουλάχιστον κατά 80% (Αμετάθετα πλαίσια)

$k_b = 25$ σε όλα τα άλλα πλαίσια, με την προϋπόθεση ότι σε κάθε όροφο ισχύει $K_b/K_c \geq 0.1$ (*) (Μεταθετά πλαίσια)

Περιοχή 2: Ημιάκαμπτοι κόμβοι.

Οι κόμβοι της περιοχής 2 πρέπει να ταξινομούνται ως ημιάκαμπτοι. Οι κόμβοι των περιοχών 1 και 3 μπορούν και αυτοί προαιρετικά να θεωρηθούν ημιάκαμπτοι.

Περιοχή 3: Ονομαστικά αρθρωτοί κόμβοι εάν $S_{j,ini} \geq 0.5 EI_b/L_b$

(*) Σε πλαίσια όπου $K_b/K_c < 0.1$ οι κόμβοι πρέπει να ταξινομούνται ως ημιάκαμπτοι.

K_b : η μέση τιμή του I_b/L_b για όλες τις δοκούς στην άνω στάθμη ενός ορόφου

K_c : η μέση τιμή του I_c/L_c για όλα τα υποστυλώματα του ορόφου

I_b : η ροπή αδρανείας δοκού

I_c : η ροπή αδρανείας υποστυλώματος

L_b : το άνοιγμα δοκού (μεταξύ των αξόνων των υποστυλωμάτων)

L_c : το ύψος ορόφου ενός υποστυλώματος

Ταξινόμηση κόμβου πειράματος

Πίνακας 5.5 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κόμβου

I_b (mm⁴)	35100000
L_b (mm)	2364.1

Η κλίση της ευθείας που ορίζει την περιοχή 1 υπολογίζεται για τις δύο περιπτώσεις πλαισίων ως εξής:

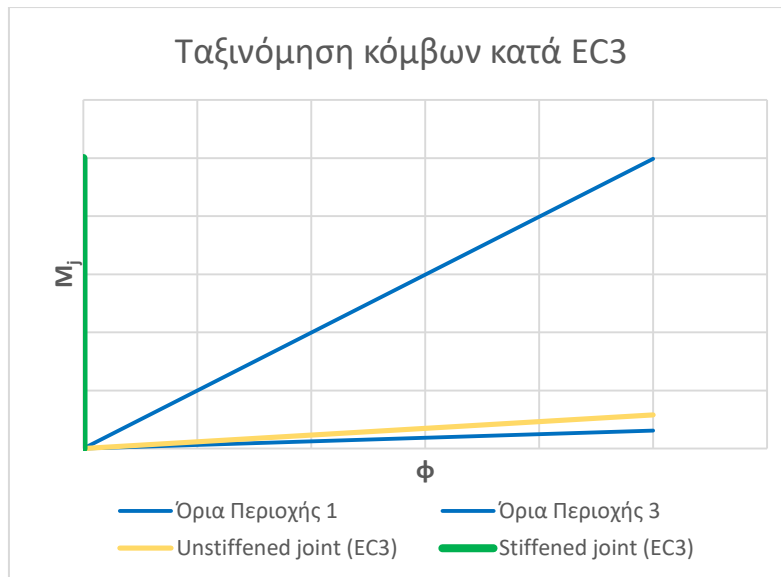
$$S_{j,ini,1} = \frac{8 * 210000 * 35100000}{2364.1} = 24943107.31 \text{ kNmm}$$

$$S_{j,ini,1} = \frac{25 * 210000 * 35100000}{2364.1} = 77947210.35 \text{ kNmm}$$

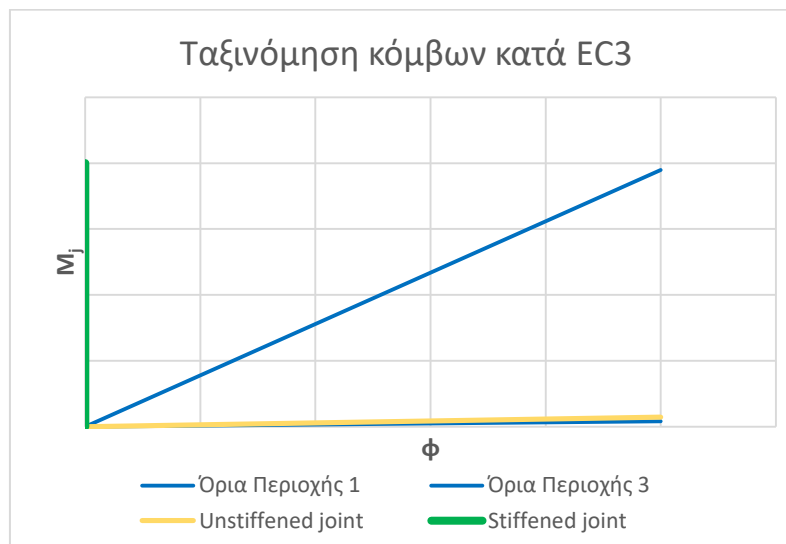
Η κλίση της ευθείας που ορίζει την περιοχή 3 υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{j,ini,3} = \frac{0.5 * 210000 * 35100000}{2364.1} = 155894420.70 \text{ kNmm}$$

Στα Σχήματα 5.6 και 5.7 φαίνονται τα όρια των περιοχών ταξινόμησης αλλά και οι καμπύλες των δύο κόμβων, του ενισχυμένου με εγκάρσιες νευρώσεις του πειράματος 1 και του μη ενισχυμένου όπως αυτά ορίζονται από τον Ευρωκώδικα 3, για αμετάθετα και μεταθετά πλαίσια αντίστοιχα.

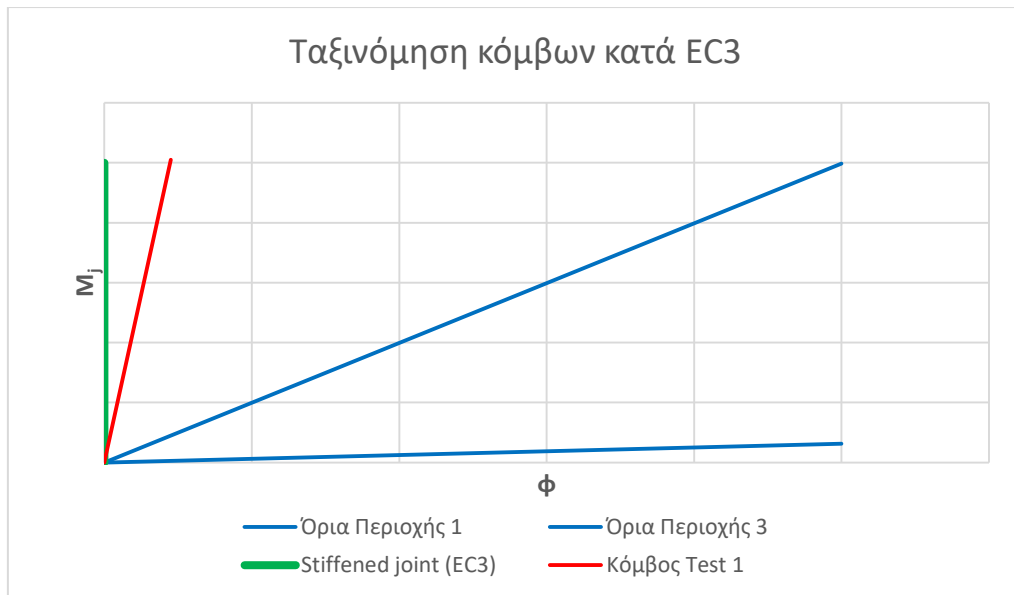


Σχήμα 5.6 Ταξινόμηση με βάση τη δυσκαμψία (Αμετάθετα πλαίσια)



Σχήμα 5.7 Ταξινόμηση με βάση τη δυσκαμψία (Μετάθετα πλαίσια)

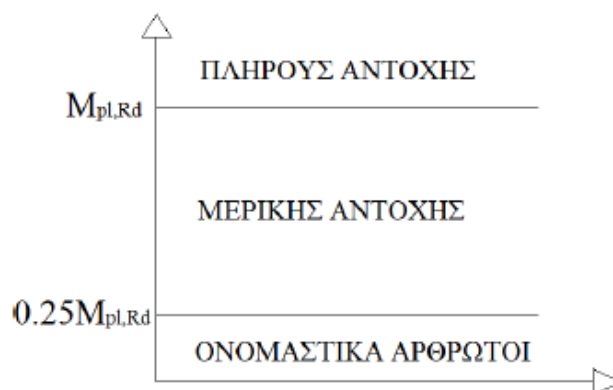
Όπως φαίνεται στα διαγράμματα των δύο Σχημάτων 5.5 και 5.7, ο ρόλος των εγκάρσιων ενισχύσεων σε έναν κόμβο είναι καθοριστικός σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Τόσο στα μεταθετά όσο και στα αμετάθετα πλαίσια, ο κόμβος χωρίς τις ενισχύσεις κατατάσσεται οριακά στην Περιοχή 2, στους ημιάκαμπτους κόμβους καθώς έχει ελάχιστα πιο μεγάλη δυσκαμψία από αυτήν που ορίζει ο κανονισμός σαν αρθρωτός κόμβος. Από την άλλη, ο ενισχυμένος κόμβος του πειράματος, έχοντας άπειρη δυσκαμψία, βρίσκεται στην Περιοχή 1 και κατατάσσεται στους άκαμπτους κόμβους. Η πραγματική δυσκαμψία $S_{j,ini}$ του κόμβου του πειράματος 1 υπολογίζεται από την κλίση στην αρχή του διαγράμματος $M-\phi$ με τις πειραματικές μετρήσεις και κατατάσσεται ως άκαμπος καθώς $S_{j,ini} = 280647 \text{ kNm/rad}$. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η κατάταξη του κόμβου του πειράματος, ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή 1.



Σχήμα 5.8 Κατάταξη κόμβου πειράματος σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3

5.7.2 Με βάση την αντοχή τους

Ο δεύτερος τρόπος διάκρισης των κόμβων γίνεται βάσει της σύγκρισης της αντοχής σε ροπή σχεδιασμού τους $M_{j,Rd}$ με τις αντοχές σε ροπή κάμψης των μελών που συνδέουν (EN 1993-1-8 5.2.3). Έτσι, ταξινομούνται σε κόμβους πλήρους αντοχής, μερικής αντοχής και ονομαστικά αρθρωτούς κόμβους όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.9 Διάκριση κόμβων με βάση την αντοχή τους [6]

Οι ονομαστικά αρθρωτοί κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν εσωτερικές δυνάμεις σε μία κατασκευή χωρίς να αναπτύσσουν σημαντικές ροπές. Ένας κόμβος κατατάσσεται στους ονομαστικά αρθρωτούς εάν η αντοχή σε ροπή σχεδιασμού του $M_{j,Rd}$ είναι μικρότερη από $0,25 M_{pl,Rd}$ των συνδεόμενων μελών του. Εάν η αντοχή του κόμβου είναι μεγαλύτερη από την αντοχή των συνδεόμενων μελών του τότε θεωρείται κόμβος πλήρους αντοχής. Στην περίπτωση κόμβου όπου κανένα από τα δύο κριτήρια δεν ικανοποιείται, τότε αυτός ταξινομείται στην κατηγορία κόμβων μερικής αντοχής.

Ταξινόμηση κόμβου πειράματος

$$M_{j,Rd} = 131.50 \text{ kNm}$$

Πίνακας 5.6 Αντοχή σε ροπή δοκών

Δοκοί	
$M_{pl,Rd}$ (kNm)	113.81
$0.25M_{pl,Rd}$ (kNm)	28.45

Πίνακας 5.7 Αντοχή σε ροπή υποστυλώματος

Υποστύλωμα	
$M_{pl,Rd}$ (kNm)	146.26
$0.25M_{pl,Rd}$ (kNm)	36.56

Εφόσον η αντοχή του κόμβου είναι μεγαλύτερη από το 25% της αντοχής των συνδεόμενων μελών και μικρότερη από την πλήρη αντοχή τους, θεωρείται κόμβος μερικής αντοχής.

6 Συμπεράσματα

Αναμφισβήτητα οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών και η εξαιρετική αναλογία της αντοχής προς το βάρος τους τα καθιστά ιδανική επιλογή για ενίσχυση των συνηθισμένων δομικών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η αντοχή των ενισχυμένων με ίνες άνθρακα πολυμερών CFRP είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν του χάλυβα. Δυστυχώς στο πείραμα που παρουσιάστηκε στο πρώτο μέρος της εργασίας, η επιρροή τους στη συμπεριφορά τους κόμβου δεν φάνηκε λόγω της αποκόλλησης τους από τα αρχικά στάδια του πειράματος.

6.1 Αποτελέσματα αναλυτικών μοντέλων και διερεύνησης

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, το αναλυτικό μοντέλο που μορφώθηκε προσέγγισε ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του κόμβου του πειράματος με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο σύγκρισης της συμπεριφοράς των κόμβων που διερευνήθηκαν με την πραγματική. Στη θεωρητική περίπτωση κατά την οποία τα φύλλα CFRP είναι άρρηκτα συνδεδεμένα στα πέλματα των δοκών και παραμένουν συνδεδεμένα σε αυτά μέχρι τέλους, παρατηρήθηκε μία αύξηση περίπου 30% στο μέγιστο φορτίο το οποίο μπορεί να παραλάβει ο κόμβος. Αυξημένη ήταν επίσης και η μέγιστη μετατόπιση αστοχίας στο αναλυτικό μοντέλο σε σχέση με το μη ενισχυμένο πειραματικό, περίπου κατά 60mm. Ακόμη παρατηρήθηκε ότι ο ελαστικός κλάδος της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης του μοντέλου με τα άρρηκτα συνδεδεμένα CFRP ήταν πιο δύσκαμπτος σε σχέση με την πειραματική καμπύλη. Αυτό φαίνεται και από το παραμορφωμένο σχήμα των δύο μοντέλων καθώς η στροφή του υποστυλώματος του ενισχυμένου κόμβου προέκυψε μικρότερη από την αντίστοιχη του μη ενισχυμένου. Επίσης, παρατηρώντας τις τάσεις που αναπτύχθηκαν στα φύλλα CFRP και στο χάλυβα, φαίνεται ότι εξαιτίας της πολύ μεγαλύτερης αντοχής των πρώτων, παρέλαβαν αυτά το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου και ο χάλυβας δεν ξεπέρασε την τάση αντοχής του.

Όσον αφορά τη διερεύνηση του αριθμού και των θέσεων στις οποίες τοποθετούνται τα ενισχυτικά φύλλα CFRP τα αποτελέσματα έδειξαν ότι εάν ενισχυθούν τα σωστά σημεία στον κόμβο, μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν ίδια συμπεριφορά χρησιμοποιώντας τα μισά φύλλα. Η συμπεριφορά του μοντέλου στο οποίο τοποθετήθηκαν 16 CFRP, ενισχύοντας και τις δύο όψεις των πελμάτων των δοκών, πλησίαζε εντυπωσιακά τη συμπεριφορά του μοντέλου με 8 CFRP τα οποία ενίσχυαν μόνο τη μία όψη των δύο πελμάτων. Αντίθετα ο κόμβος με ενισχυμένο μόνο το θλιβόμενο πέλμα των δοκών με 8 CFRP μπόρεσε να παραλάβει σχεδόν το ίδιο φορτίο με αυτό του μη ενισχυμένου κόμβου. Η αξία του ανωτέρω συμπεράσματος είναι σημαντική σε όρους οικονομίας λόγω του αυξημένου κόστους των σύνθετων υλικών. Η ενίσχυση του θλιβόμενου πέλματος απέτρεψε το σχηματισμό τοπικού λυγισμού στο πέλμα και τον κορμό των δοκών πλησίον του υποστυλώματος σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Επίσης, η μετελαστική συμπεριφορά όλων των ενισχυμένων μοντέλων ήταν βελτιωμένη σε σχέση με του μη ενισχυμένου καθώς τα περισσότερα από αυτά μετά τη διαρροή μπορούσαν να παραλάβουν ακόμη φορτίο και να πλαστικοποιηθούν σε πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

Τα αποτελέσματα των μοντέλων με τα άρρηκτα συνδεδεμένα CFRP μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα ιδεατό άνω όριο της αντοχής τους. Για να επιτευχθεί στην πράξη η ανωτέρω βελτιωμένη συμπεριφορά των κόμβων πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η διατημητική τάση συνάφειας της ρητίνης, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ αυτών και του χάλυβα, δεν θα ξεπεραστεί. Στην περίπτωση του πειράματος 2 που έγινε στο

εργαστήριο, πιθανόν να υπήρξε υπέρβαση αυτής της τάσης, η οποία οδήγησε στην αποκόλλησή τους από το μοντέλο κόμβου.

6.2 Αποτελέσματα σύγκρισης πραγματικής και θεωρητικής συμπεριφοράς

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ξανά ο κόμβος του πειράματος 1 με σκοπό να συγκριθούν τα πραγματικά μηχανικά χαρακτηριστικά του με τα θεωρητικά, όπως ορίζονται από τον EN 1993-1-8. Οι πολύπλοκες διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 σχετικά με τον υπολογισμό της αντοχής και της δυσκαμψίας των κόμβων απλοποιήθηκαν στην παρούσα περίπτωση λόγω της συμμετρίας στη φόρτιση και τη γεωμετρία του. Το διάγραμμα M-φ του κόμβου, το οποίο υπολογίστηκε βάση του Ευρωκώδικα, όταν τροποποιήθηκε έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι ελαστικές παραμορφώσεις των δοκών, πλησίασε την πραγματική συμπεριφορά του κόμβου, όχι όμως την αναλυτική. Παρόλα αυτά, τα συμβατικά μοντέλα ανάλυσης με beam elements πλησίασαν ικανοποιητικά τη θεωρητική συμπεριφορά του κόμβου. Η κλίση της καμπύλης M-φ των μοντέλων με τα beam elements σχεδόν ταυτίστηκε με την τροποποιημένη καμπύλη του κανονισμού, ενώ παράλληλα η διαρροή τους φάνηκε να συμβαίνει όταν η δοκός ξεπεράσει την πλαστική αντοχή της σε ροπή και όχι όταν ξεπεραστεί η συνολική αντοχή του κόμβου. Αυτό πιθανόν να συμβαίνει γιατί στα απλοποιημένα μοντέλα, δεν μπορούν να προσομοιωθούν τα stiffeners που στην περίπτωση που πραγματικού κόμβου ήταν τα καθοριστικά στον υπολογισμό της αντοχής του. Γενικά, προκύπτει ότι οι απλοποιημένες αναλύσεις που γίνονται στις συνήθεις μελέτες προσομοιάζουν ικανοποιητικά τη θεωρητική συμπεριφορά των κόμβων. Τέλος, λόγω των εγκάρσιων ενισχύσεων στον κορμό του υποστυλώματος, ο κανονισμός τον κατατάσσει ως άκαμπτο, θεωρώντας ότι έχει άπειρη δυσκαμψία. Αυτό επαληθεύτηκε με τον υπολογισμό της αρχικής δυσκαμψίας του πειραματικού κόμβου, η οποία κατατάσσεται στην περιοχή των άκαμπτων κόμβων στο διάγραμμα ταξινόμησής τους.

7 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., (2013). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα με παραδείγματα εφαρμογής», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 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. Δρίτσος Σ., (2006). «Τα Σύνθετα Υλικά Στις Κατασκευές», 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, Ελλάδα.
4. Προκοπάκης Γ., (2017). «Μελέτη αντοχής σε θλίψη σύνθετου πολυμερούς (επόξυ-ρητίνης ενισχυμένης με υαλούφασμα)». Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Κρήτη.
5. Στάθη Χ., (2011). «Αριθμητική Προσομοίωση Συμπεριφοράς Δομικών Στοιχείων Επισκευασμένων Με Εξωτερικές Λωρίδες Ινοπλισμένων Πολυμερών». Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
6. Χατζηκωνσταντίνου Ν., Γανωτόπουλος Δ., (2018). «Ανάπτυξη Και Τεκμηρίωση Λογισμικού Για Τον Υπολογισμό Συνήθων Συνδέσεων Δοκών-Υποστυλωμάτων Σε Χαλύβδινα Πλαίσια Ροπής». Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Θεσσαλία.
7. Brent Strong A., (2008). “Fundamentals of composite manufacturing: Materials, methods and application”, Society of manufacturing Engineers, pp.640.
8. EN 1993-1-8 (2005). “Eurocode 3: Design of steel structures”, Part 1-8: Design of joints.
9. En.m.wikipedia.org. n.d. Carbon Fiber Reinforced Polymer. [online] Available at: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Carbon_fiber_reinforced_polymer
10. Encardio-Rite, (2019). “Strain Gauge: Principle, Types, Features And Applications”. [online] Medium. Available at: <https://medium.com/@encardio/strain-gauge-principle-types-features-and-applications-357f6fed86a5>
11. Engineering, O., 2020. “What Is A Strain Gauge?” | Omega Engineering. [online] Omega.co.uk. Available at: <https://www.omega.co.uk/prodinfo/StrainGauges.html>.
12. Groover M., (2019). “Fundamentals Of Modern Manufacturing: Materials, Processes, And Systems”, 7th ed., Wiley.
13. Kopeliovich D., (2012). Classification Of Composites. [online] SubsTech. Available at: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_composites.
14. Ni.com. 2019. “Measuring Position And Displacement With Lvdts - National Instruments”. [online] Available at: <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/06/measuring-position-and-displacement-with-lvdts.html>
15. SIMULIA, (2011).” Abaqus/CAE User's Manual”. [ebook] Available at: http://130.149.89.49:2080/v6.11/pdf_books/CAE.pdf.

16. Todd J., (2020). “Understanding CFRP Composites” ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/understanding-cfrp-composites-820393>
17. Vayas I., Fasoulakis Z., Lignos X., (2019). “Report On Experimental Investigations Of Beam-To-Column Joints Without Or With FRP Strengthening”, Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Athens.

Παράρτημα Α. Φύλλα ιδιοτήτων CFRP

Product Data Sheet
Edition: 23/12/2014
Identification no: 02 04 02 01 001
Version : GCC
Sika CarboDur® S

Sika CarboDur® S

Pultruded Carbon Fibre Plates for Structural Strengthening As Part of a Sika CarboDur® System

Construction

System Description	<p>Sika CarboDur® S plates are pultruded carbon fibre reinforced polymer (CFRP) laminates, designed for strengthening concrete, timber, masonry, steel and fibre reinforced polymer structures.</p> <p>Sika CarboDur® S plates are bonded onto the structure as externally bonded reinforcement using Sikadur®-30 epoxy resin based adhesive for normal, or Sikadur®-30 LP epoxy resin based adhesive for elevated temperatures during application and / or service.</p> <p>Sika CarboDur® plates can also be bonded into slots as near surface mounted (NSM) reinforcement, please refer to separate product data sheet Sika CarboDur® S NSM.</p> <p>Please refer to the relevant Product Data Sheet for more detailed information about each of these adhesives.</p>
Uses	<p>Sika CarboDur® systems are used to improve, increase or repair the performance and resistance of structures for:</p> <p><i>Increased Load Carrying Capacity:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ Increasing the load capacity of floor slabs, beams and bridge sections▪ For the installation of heavier machinery▪ To stabilise vibrating structures▪ For changes in building use <p><i>Damage to structural elements due to:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ Deterioration of the original construction materials▪ Steel reinforcement corrosion▪ Accidents (Vehicle impact, earthquakes, fire) <p><i>Improvement of serviceability and durability:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ Reduced deflection and crack width▪ Stress reduction in the steel reinforcement▪ Improved fatigue resistance <p><i>Change of the structural system:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ Removal of walls and / or columns▪ Removal of floor and wall sections to create access / openings <p><i>Resistance to possible events:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ Increased resistance to earthquakes, impact or explosion etc. <p><i>To repair design or construction defects such as:</i></p> <ul style="list-style-type: none">▪ Insufficient / inadequate reinforcement▪ Insufficient / inadequate structural depth



Characteristics / Advantages

- Non corroding
- Very high strength
- Excellent durability and fatigue resistance
- Unlimited lengths, no joints required
- Low system thickness, simple execution of plate intersections or crossings
- Easy transportation (rolls)
- Lightweight, very easy to install, especially overhead (without temporary support)
- Minimum preparation of plate, applicable in several layers
- Smooth edges without exposed fibres as result of production by pultrusion
- Extensive Testing and Approvals available from many countries worldwide

Tests**Approval / Standards**

France: CSTB - Avis Technique 3/10-669, SIKA CARBODUR SIKA WRAP

Slovakia: TSUS, Building Testing and research institutes, Technical Approval TO-09/0080, 2009: Systémy dodatočného zosilňovania konštrukcií Sika® CarboDur® a SikaWrap® (Slovak).

Poland: Technical Approval ITB AT-15-5604/2011: Zestaw wyrobów Sika CarboDur do wzmacniania i napraw konstrukcji betonowych (Polish).

Poland: 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).

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

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

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

Switzerland: SIA 166:2004 Klebebewehrungen

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

Product Data

Form	Preformed plate profiles			
Appearance / Colour	Carbon fibre reinforced polymer with an epoxy matrix, black			
Packaging	Cut to size as follows in non-returnable cardboard packaging. Supplied in rolls of 100 or 250 m in nonreturnable cardboard boxes.			
Types	Type	Width	Thickness	Cross sectional area
	Sika® CarboDur® S512	50 mm	1.2 mm	60 mm ²
	Sika® CarboDur® S514	50 mm	1.4 mm	70 mm ²
	Sika® CarboDur® S613	60 mm	1.3 mm	78 mm ²
	Sika® CarboDur® S614	60 mm	1.4 mm	84 mm ²
	Sika® CarboDur® S626	60 mm	2.6 mm	156 mm ²
	Sika® CarboDur® S812	80 mm	1.2 mm	96 mm ²
	Sika® CarboDur® S814	80 mm	1.4 mm	112 mm ²
	Sika® CarboDur® S912	90 mm	1.2 mm	108 mm ²
	Sika® CarboDur® S914	90 mm	1.4 mm	126 mm ²
	Sika® CarboDur® S1012	100 mm	1.2 mm	120 mm ²
	Sika® CarboDur® S1014	100 mm	1.4 mm	140 mm ²

Sika® CarboDur® S1214	120 mm	1.4 mm	168 mm ²
Sika® CarboDur® S1512	150 mm	1.2 mm	180 mm ²
Sika® CarboDur® S1514	150 mm	1.4 mm	210 mm ²

Storage

Storage Conditions / Shelf Life	Unlimited, provided there is no exposure to direct sunlight (UV light). Store in dry conditions and at temperatures at max. 50°C Transportation: only in the original packaging, or otherwise adequately protected against any mechanical damage
--	---

Technical Data

Density (at 23°C)	1.60 gm/cm ³	
Glass Transition Temperature	> 100°C	(according to EN 61006)
Fibre Volume Content	> 68%	

Mechanical / Physical Properties

E-Modulus	Values in the longitudinal direction of the fibres (according to EN 2561)	
	Mean Value	170'000 N/mm ²
	5% Fractile-Value	165'000 N/mm ²
Tensile Strength	Values in longitudinal direction of fibres (according to EN 2561)	
	Mean Value	3'100 N/mm ²
	5% Fractile-Value	2'900 N/mm ²
Strain at break	Value in longitudinal direction of fibres (according to EN 2561)	
	Minimum value	> 1.80%

System Information

System Structure	<p>The system build-up and configuration as described must be fully complied with and may not be changed.</p> <p>Resin Adhesive: Sikadur[®]-30 or Sikadur[®]-30 LP.</p> <p>Structural strengthening Carbon plates - CarboDur[®] S.</p> <p>For detailed information on Sikadur[®]-30 and Sikadur[®]-30 LP, together with the application details, please refer to the Sikadur[®]-30 or Sikadur[®]-30 LP Product Data Sheet and the "Method Statement Sika CarboDur[®] Externally Bonded Reinforcement"</p>
-------------------------	---

Application Details

Consumption	Width of CarboDur [®] plate	Typical Consumption of Sikadur [®] 30
	50 mm	0.20 – 0.28 kg/m*
	60 mm	0.24 – 0.32 kg/m*
	80 mm	0.32 – 0.44 kg/m*
	90 mm	0.40 – 0.56 kg/m*
	100 mm	0.44 – 0.64 kg/m*
	120 mm	0.45 – 0.80 kg/m*
	150 mm	0.68 – 1.00 kg/m*

*Note: Consumption is for standard application only. Rough or uneven substrate surfaces, plate crossings, loss and wastage can lead to a higher adhesive consumption of up to 20%.

Substrate Quality	<p><i>Sika CarboDur[®] plates externally bonded to the concrete surface:</i></p> <p>Recommended minimum concrete pull-off strength after surface preparation</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mean: 2.0 N/mm² - Minimum: 1.5 N/mm² <p>The effective concrete pull-off strength after surface preparation has to be verified.</p> <p>When the concrete pull-off strength is below the stated minimum requirements, alternative Sika[®] solutions are available:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sika CarboDur[®] applied in slots as near surface mounted (NSM) reinforcement - SikaVWrap[®] fabrics: Please refer to the Product Data Sheet for the SikaVWrap[®] fabrics <p>Concrete must generally be older than 28 days (dependent on curing conditions and the type of concrete etc.)</p> <p><i>Sika CarboDur[®] externally bonded to other substrates:</i></p> <p>For application of Sika CarboDur[®] plates to all other substrates (brick, stone, steel, wood, fibre reinforced polymer etc.) please refer to the "Method Statement for Sika CarboDur[®] Externally Bonded Reinforcement"</p>
--------------------------	--

Substrate Preparation	<p>Concrete must be cleaned and prepared to achieve a laitance and contaminant free, open textured surface.</p> <p>Please also refer to the "Method Statement Sika CarboDur[®] Externally Bonded Reinforcement"</p>
------------------------------	--

Application Conditions / Limitations

Application Conditions / Limitations Please refer to the relevant Sika® epoxy adhesive Product Data Sheet:
- Sikadur®-30
- Sikadur®-30 LP

Application Instructions

Application Method / Tools Please refer to the relevant Product Data Sheet
- Sikadur®-30
- Sikadur®-30 LP
CarboDur® plates can be cut with a diamond saw or a hacksaw.
Please refer the "Method Statement Sika CarboDur® Externally Bonded Reinforcement"

Notes on Application / Limitations A suitably qualified Structural Engineer must be responsible for the design of the strengthening works.
Additionally as this application is structural, great care must also be taken in selecting suitably experienced and trained specialist contractors.
Sika CarboDur® strengthening systems with Sika CarboDur® plates must be protected from permanent exposure to direct sunlight, moisture and/or water. Please refer to the relevant Method Statement and Product Data Sheets for the selection of suitable overcoating materials, in situations where systems will be fully or partially exposed.
Maximum permissible continuous service temperature is approx. +50°C.
Note: When using the Sika® CarboHeater® for curing Sikadur®-30 LP to be used at elevated temperatures, the maximum continuous service temperature can be increased to max. +80°C. Please refer to the Sika® CarboHeater Product Data Sheet for further information.
Please also refer to the "Method Statement Sika CarboDur® Externally Bonded Reinforcement"
Detailed advice can always be obtained from Sika® Technical Services Department

Fire Protection Where required for local regulations, Sika CarboDur® plates can also be overcoated with additional fire protection materials.

Value Base	All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.
Local Restrictions	Please note that as a result of specific local regulations the performance of this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact description of the application fields.
Health and Safety Information	For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Material Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.
Legal Notes	The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

All products are manufactured under a management system certified to conform to the requirements of the quality, environmental and occupational health & safety standards ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001



Sika UAE L.L.C
P.O. Box 126212
Dubai,
United Arab Emirates
Phone: +971 4 4398200
info@ae.sika.com
http://gcc.sika.com

Sika Gulf B.S.C (c)
P.O. Box 15776
Adliya,
Kingdom of Bahrain
Phone: +973 17738 188
sika.gulf@bh.sika.com
http://gcc.sika.com

Sika Saudi Arabia Co. Ltd
P.O. Box 58647,
Riyadh 11583,
Kingdom of Saudi Arabia
Phone: +9661 2176532
info@sa.sika.com
http://gcc.sika.com



Παράρτημα Β. Φύλλα ιδιοτήτων εποξικής ρητίνης

Construction

Product Data Sheet
Edition 9.23.2014
Sikadur® 30

Sikadur® 30

High-modulus, high-strength, structural epoxy paste adhesive for use with Sika® CarboDur® reinforcement.

Description	Sikadur® 30 is a 2-component, 100% solids, moisture-tolerant, high-modulus, high-strength, structural epoxy paste adhesive. It conforms to the current ASTM C-881 Type I, IV Grade 3, Class C and AASHTO M-235 specifications.
Where to use	<ul style="list-style-type: none"> ■ Adhesive for bonding external reinforcement to concrete, masonry, steel, wood, stone, etc. ■ Structural bonding of composite laminates (Sika® CarboDur® CFRP) to concrete. ■ Structural bonding of steel plates to concrete. ■ Suitable for use in vertical and overhead configurations. ■ As a binder for epoxy mortar repairs.
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> ■ Long pot life. ■ Long open time. ■ Tolerant of moisture before, during and after cure. ■ High strength, high modulus, structural paste adhesive. ■ Excellent adhesion to concrete, masonry, metals, wood and most structural materials. ■ Fully compatible and excellent adhesion to Sika® CarboDur® CFRP composite laminate. ■ Paste consistency ideal for vertical and overhead applications of Sika® CarboDur®. ■ High abrasion and shock resistance. ■ Convenient easy mix ratio A:B=3:1 by volume. ■ Solvent-free. ■ Color-coded components to ensure proper mixing control.
Coverage	Type S 512 CarboDur®: approx. 50 LF/gal.; Type S 812 CarboDur: approx. 32 LF/gal.; Type S 1012 CarboDur®: approx. 22 LF/gal.
Packaging	1 gal. units.

Typical Data (Material and curing conditions @ 73°F {23°C} and 50% R.H.)

RESULTS MAY DIFFER BASED UPON STATISTICAL VARIATIONS DEPENDING UPON MIXING METHODS AND EQUIPMENT, TEMPERATURE, APPLICATION METHODS, TEST METHODS, ACTUAL SITE CONDITIONS AND CURING CONDITIONS.

Shelf Life	2 years in original, unopened containers.		
Storage Conditions	Store dry at 40°-95°F (4°-35°C). Condition material to 65°-85°F (18°-29°C) before using.		
Color	Light gray		
Mixing Ratio	Component 'A': Component 'B' = 3:1 by volume.		
Consistency	Non-sag paste.		
Pot Life	Approximately 70 minutes @ 73°F (23°C) (1 qt.)		
Tensile Properties (ASTM D-638)			
7 day	Tensile Strength	3,600 psi (24.8 MPa)	
	Elongation at Break	1%	
	Modulus of Elasticity	6.5 X 10 ⁵ psi (4,482 MPa)	
Flexural Properties (ASTM D-790)			
14 day	Flexural Strength (Modulus of Rupture)	6,800 psi (46.8 MPa)	
	Tangent Modulus of Elasticity in Bending	1.7 X 10 ⁶ psi (11,721 MPa)	
Shear Strength (ASTM D-732)	14 day	Shear Strength	3,600 psi (24.8 MPa)
Bond Strength (ASTM C-882): Hardened Concrete to Hardened Concrete			
2 day (moist cure)	Bond Strength	2,700 psi (18.6 MPa)	
2 day (dry cure)	Bond Strength	3,200 psi (22.0 MPa)	
14 day (moist cure)	Bond Strength	3,100 psi (21.3 MPa)	
Hardened Concrete to Steel			
2 day (moist cure)	Bond Strength	2,600 psi (17.9 MPa)	
2 day (dry cure)	Bond Strength	3,000 psi (20.6 MPa)	
14 day (moist cure)	Bond Strength	2,600 psi (17.9 MPa)	
Heat Deflection Temperature (ASTM D-648)			
7 day	[fiber stress loading=264 psi (1.8 MPa)]	118°F (47°C)	
Water Absorption (ASTM D-570)	7 day (24 hour immersion)	0.03%	



PRIOR TO EACH USE OF ANY SIKA PRODUCT, THE USER MUST ALWAYS READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTIONS ON THE PRODUCT'S MOST CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET WHICH ARE AVAILABLE ONLINE AT [HTTP://USA.SIKA.COM/](http://usa.sika.com/) OR BY CALLING SIKA'S TECHNICAL SERVICE DEPARTMENT AT 800.933.7452 NOTHING CONTAINED IN ANY SIKA MATERIALS RELIEVES THE USER OF THE OBLIGATION TO READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTIONS FOR EACH SIKA PRODUCT AS SET FORTH IN THE CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET PRIOR TO PRODUCT USE.

C140

Compressive Properties (ASTM D-695) - Compressive Strength, psi (MPa)			
	40°F* (4°C)	73°F* (23°C)	90°F* (32°C)
4 hour	-	-	5,500 (37.9)
8 hour	-	3,500 (24.1)	6,700 (46.2)
16 hour	-	6,700 (46.2)	7,400 (51.0)
1 day	750 (5.1)	7,800 (53.7)	7,800 (53.7)
3 day	6,800 (46.8)	8,300 (57.2)	8,300 (57.2)
7 day	8,000 (55.1)	8,600 (59.3)	8,600 (59.3)
14 day	8,500 (58.6)	8,600 (59.3)	8,900 (61.3)
28 day	8,500 (58.6)	8,600 (59.3)	9,000 (62.0)
Compressive Modulus	7 day	3.9 x 10 ⁵ psi (2,689 MPa)	

*Material cured and tested at the temperatures indicated.

How to Use

Surface Preparation

The concrete surface should be prepared to a minimum concrete surface profile (CSP) 3 defined by the ICRI surface-profile chips. Localized out-of-plane variations, including form lines, should not exceed 1/32 in. (1 mm). Surface must be clean and sound. It may be dry or damp, but free of standing water and frost. Remove dust, laitance, grease, curing compounds, impregnations, waxes, foreign particles, disintegrated materials, and other bond inhibiting materials from the surface. Existing uneven surfaces must be filled with an appropriate repair mortar (e.g., Sikadur[®] 30 with the addition of 1 part oven-dried sand). The adhesive strength of the concrete must be verified after surface preparation by random pull-off testing (as defined by ACI 503R, ASTM C 1583) at the discretion of the engineer. Minimum tensile strength, 200 psi (1.4 MPa) with concrete substrate failure.

Concrete - Blast clean, shot blast or use other approved mechanical means to provide an open roughened texture.

Steel - Should be cleaned and prepared thoroughly by blast cleaning to a white metal finish.

CarboDur[®] - Wipe clean with appropriate cleaner (e.g. MEK).

Mixing

Pre-mix each component. Proportion 1 part Component 'B' to 3 parts Component 'A' by volume into a clean pail or appropriately sized mixing container. Mix thoroughly for 3 minutes with Sika paddle on low-speed (400-600 rpm) drill until uniform in color. Mix only that quantity which can be used within its pot life.

To prepare an epoxy mortar: slowly add up to 1 part by loose volume of an oven-dried aggregate to 1 part of the mixed Sikadur[®] 30 and mix until uniform in consistency.

Application

For bonded, external reinforcement: Apply the neat mixed Sikadur[®] 30 onto the concrete with a trowel or spatula to a nominal thickness of 1/16" (1.5 mm). Apply the mixed Sikadur[®] 30 onto the CarboDur[®] laminate with a "roof-shaped" spatula to a nominal thickness of 1/16" (1.5 mm). Within the open time of the epoxy, depending on the temperature, place the CarboDur[®] laminate onto the concrete surface. Using a hard rubber roller, press the laminate into the epoxy resin until the adhesive is forced out on both sides. Remove excess adhesive. Glue line should not exceed 1/8 inch (3 mm). The external reinforcement must not be disturbed for a minimum of 24 hours. The epoxy will reach its design strength after 7 days.

For interior vertical and overhead patching: Work the material into the prepared substrate, filling the cavity. Strike off level. Lifts should not exceed 1 inch (25 mm).

Limitations

- Minimum substrate and ambient temperature is 40°F (4°C).
- Do not thin. Addition of solvents will prevent proper cure.
- Use oven-dried aggregate only.
- Maximum glue line of neat epoxy is 1/8 inch (3 mm).
- Maximum epoxy mortar thickness is 1 inch (25 mm) per lift.
- Minimum age of concrete must be 21-28 days, depending upon curing and drying conditions.
- Porous substrates must be tested for moisture vapor transmission prior to mortar applications.
- Not an aesthetic product. Color may alter due to variations in lighting and/or UV exposure.

PRIOR TO EACH USE OF ANY SIKA PRODUCT, THE USER MUST ALWAYS READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTIONS ON THE PRODUCT'S MOST CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET WHICH ARE AVAILABLE ONLINE AT [HTTP://USA.SIKA.COM/](http://usa.sika.com/) OR BY CALLING SIKA'S TECHNICAL SERVICE DEPARTMENT AT 800.933.7452. NOTHING CONTAINED IN ANY SIKAMATERIALS RELIEVES THE USER OF THE OBLIGATION TO READ AND FOLLOW THE WARNINGS AND INSTRUCTIONS FOR EACH SIKA PRODUCT AS SET FORTH IN THE CURRENT PRODUCT DATA SHEET, PRODUCT LABEL AND SAFETY DATA SHEET PRIOR TO PRODUCT USE.

KEEP CONTAINER TIGHTLY CLOSED. KEEP OUT OF REACH OF CHILDREN. NOT FOR INTERNAL CONSUMPTION. FOR INDUSTRIAL USE ONLY. FOR PROFESSIONAL USE ONLY.

For further information and advice regarding transportation, handling, storage and disposal of chemical products, users should refer to the actual Safety Data Sheets containing physical, ecological, toxicological and other safety related data. Read the current actual Safety Data Sheet before using the product. In case of emergency, call CHEMTREC at 1-800-424-9300, International 703-527-3887.

Prior to each use of any Sika product, the user must always read and follow the warnings and instructions on the product's most current Product Data Sheet, product label and Safety Data Sheet which are available online at <http://usa.sika.com/> or by calling Sika's Technical Service Department at 800-933-7452. Nothing contained in any Sika materials relieves the user of the obligation to read and follow the warnings and instruction for each Sika product as set forth in the current Product Data Sheet, product label and Safety Data Sheet prior to product use.

Sika warrants this product for one year from date of installation to be free from manufacturing defects and to meet the technical properties on the current Product Data Sheet if used as directed within shelf life. User determines suitability of product for intended use and assumes all risks. Buyer's sole remedy shall be limited to the purchase price or replacement of product exclusive of labor or cost of labor. NO OTHER WARRANTIES EXPRESS OR IMPLIED SHALL APPLY INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. SIKA SHALL NOT BE LIABLE UNDER ANY LEGAL THEORY FOR SPECIAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES. SIKA SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR THE USE OF THIS PRODUCT IN A MANNER TO INFRINGE ON ANY PATENT OR ANY OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS HELD BY OTHERS. SALE OF SIKA PRODUCTS ARE SUBJECT SIKA'S TERMS AND CONDITIONS OF SALE AVAILABLE AT [HTTP://USA.SIKA.COM/](http://usa.sika.com/) OR BY CALLING 201-933-8800.

Visit our website at usa.sika.com

1-800-933-SIKA NATIONWIDE

Regional Information and Sales Centers. For the location of your nearest Sika sales office, contact your regional center.

Sika Corporation
201 Polito Avenue
Lyndhurst, NJ 07071
Phone: 800-933-7452
Fax: 201-933-6225

Sika Canada Inc.
601 Delmar Avenue
Pointe Claire
Quebec H9R 4A9
Phone: 514-697-2610
Fax: 514-694-2792

Sika Mexicana S.A. de C.V.
Carretera Libre Celaya Km. 8.5
Fracc. Industrial Balvanera
Corregidora, Queretaro
C.P. 76920
Phone: 52 442 2385800
Fax: 52 442 2250537



Sika and Sikadur are registered trademarks.
Printed in Canada.



