



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΟΚΩΝ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ CFRP

ΜΙΝΩΣ ΚΥΠΡΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Τσούβαλη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την ουσιαστική καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Ευχαριστώ για την άψογη συνεργασία τους, τον κ. Χάρη Ξάνθη και τον κ. Αθανάσιο Μαρκουλή, χωρίς τη συνεισφορά των οποίων στη κατασκευή των δοκιμίων, την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών και τις μηχανουργικές εργασίες δεν θα είχε πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ηλία Μπιλάλη, τον υποψήφιο διδάκτορα Αστρινό Παπαδάκη, καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή Κωνσταντίνο Ανυφαντή για τις χρήσιμες συμβουλές τους και την βοήθεια στην ανάπτυξη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε, με την ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και με πειραματικές δοκιμές μεγάλης κλίμακας, η δυνατότητα ενίσχυσης χαλύβδινων δοκών με επιθέματα από CFRP.

Σε πειραματικές δοκιμές υποβλήθηκαν οκτώ δοκοί εκ των οποίων οι τέσσερις ήταν διατομής «I» και οι τέσσερις κοίλης τετραγωνικής διατομής. Οι δοκοί ενισχύθηκαν με επιθέματα CFRP στην εφελκόμενη πλευρά τους. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν: το πάχος του επιθέματος, το μήκος του επιθέματος και το είδος κολλητού συνδέσμου. Σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια αυξήθηκε η δυσκαμψία και το μέγιστο φορτίο που μπορούν να παραλάβουν οι δοκοί. Προβλήματα πρόωρης αποκόλλησης εμφάνισε μόνο ένα δοκίμιο, ενώ δύο δοκίμια δεν αποκολλήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκε, επίσης, ειδική βάση, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι πειραματικές δοκιμές στο επιθυμητό ανυποστήρικτο μήκος.

Η αριθμητική ανάλυση υλοποιήθηκε με το πρόγραμμα ANSYS 18.2. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα και του CFRP. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης είχαν ικανοποιητική σύγκλιση με τα πειραματικά στα περισσότερα μεγέθη. Τα ανεπτυγμένα μοντέλα χαρακτηρίζονται αξιόπιστα για την εκτίμηση της δυσκαμψίας, του φορτίου εισόδου στη διαρροή και του μέγιστου φορτίου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενίσχυση κατασκευών με χρήση επιθεμάτων CFRP.....	1
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	5
1.3 Στόχος διπλωματικής εργασίας.....	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Σχεδιασμός πειραματικών δοκιμών	11
2.2.1 Γενική διάταξη	11
2.2.2 Επιλογή μεταλλικών δοκιμών.....	12
2.2.3 Καθορισμός επιθεμάτων CFRP	13
2.2.4 Μετρούμενα μεγέθη κατά την πειραματική διαδικασία	15
2.3 Κατασκευή δοκιμών	18
2.3.1 Προετοιμασία Επιφάνειας- Τραχύτητες.....	18
2.3.2 Κατασκευή επιθεμάτων CFRP.....	19
2.3.3 Εφαρμογή Κόλλας	21
2.3.4 Τελικές διαστάσεις επιθεμάτων	23
2.3.5 Τοποθέτηση των Strain Gauges	24
2.4 Κατασκευή βάσης στήριξης της πειραματικής διάταξης.....	24
2.4.1 Καθορισμός στοιχείων βάσης.....	25
2.4.2 Κατασκευή.....	27
2.4.3 Έλεγχος αντοχής.....	29
2.5 Παράμετροι δοκιμών και περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων βέλους κάμψης	34
3.1.1 Δοκίμια IPE.....	35
3.1.2 Δοκίμια O.....	39
3.1.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	43
3.1.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	46
3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων παραμορφώσεων	48
3.2.1 Διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης δοκιμών IPE	48
3.2.2 Διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης δοκιμών O.....	51
3.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	54

3.3 Έλεγχος ποιότητας κολλητών συνδέσμων	57
3.3.1 Συσκευές ελέγχου	57
3.3.2 Διαδικασία ελέγχου- Δειγματοληψία.....	58
3.3.3 Αποτελέσματα.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	
4.1 Εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.....	66
4.2 Προ- επεξεργασία	66
4.2.1 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων.....	66
4.2.2 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων.....	68
4.2.3 Γεωμετρία μοντέλου	70
4.2.4 Δημιουργία Πλέγματος	73
4.2.5 Δημιουργία Επαφών.....	79
4.3 Επίλυση.....	81
4.3.1 Συνοριακές Συνθήκες.....	81
4.3.2 Τύπος ανάλυσης.....	82
4.4 Μετ- επεξεργασία	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	
5.1 Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης βέλους κάμψης.....	84
5.1.1 Διαγράμματα δοκιμίων ΙΡΕ	84
5.1.2 Διαγράμματα δοκιμίων Ο	86
5.1.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα	88
5.1.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	89
5.2 Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης.....	91
5.2.1 Δοκίμια ΙΡΕ.....	91
5.2.2 Δοκίμια Ο.....	95
5.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	99
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	115
B.1 Πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας CFRP.....	115
B.2 Πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού ιδιοτήτων χάλυβα.....	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενίσχυση κατασκευών με χρήση επιθεμάτων CFRP

Τα ινοπλισμένα πολυμερή ινών άνθρακα, γνωστά ως CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), είναι σύνθετα υλικά τα οποία δημιουργούνται από μια δέσμη ινών άνθρακα συγκολλημένων σε μια σκληρυμένη μήτρα ρητίνης. Η εφαρμογή του CFRP σε διάφορους κλάδους της βιομηχανίας είναι υπό εντατική μελέτη για πάνω από μισό αιώνα, γεγονός που οφείλεται στα πολλαπλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υλικό αυτό ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες σε σχέση με τα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά, όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο, το ξύλο. Μεταξύ άλλων, βασικά χαρακτηριστικά του CFRP που ευνοούν την ενίσχυση και μετασκευή κατασκευών είναι (Zhao 2007):

- Υψηλός λόγος αντοχής/βάρους
- Αντοχή σε διάβρωση από το περιβάλλον
- Χαμηλό κόστος συντήρησης
- Υψηλή αντοχή σε κόπωση
- Ευελιξία στο σχεδιασμό και την κατασκευή

Υπάρχουν πολυάριθμοι λόγοι που οδηγούν στην ανάγκη ενίσχυσης ή μετασκευής υπαρχόντων κατασκευών. Μερικοί από αυτούς είναι οι αυξημένες απαιτήσεις για δομική αντοχή λόγω νέων κανονισμών, η αλλαγή χρήσης των κτιρίων και ο επαναυπολογισμός της επάρκειας αντοχής λόγω δυσμενέστερων φορτίων σχεδιασμού, η φθορά στην οποία υπόκεινται οι κατασκευές λόγω καταπονήσεων (πχ. σεισμών, ατυχήματα) και διάβρωσης από το περιβάλλον. Οι συνηθέστεροι παραδοσιακοί τρόποι αντιμετώπισης του εν λόγω ζητήματος είναι η κατασκευή μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα, η κόλληση με χρήση εποξικής ρητίνης χαλύβδινων πλακών και η συγκόλληση χαλύβδινων επιθεμάτων επάνω στην κατασκευή. Σε σχέση με τις μεθόδους αυτές, η χρήση του CFRP προσφέρει μία εξαιρετική εναλλακτική λύση, λόγω του συνδυασμού των ιδιοτήτων του. Το χαμηλό βάρος του, η υψηλή του αντοχή και η αντοχή σε διάβρωση είναι μόνο λίγοι από τους παράγοντες που προσπαθούν να εκμεταλλευτούν οι μηχανικοί έναντι των παραδοσιακών μεθόδων ενίσχυσης. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια, η χρήση των επιθεμάτων CFRP για ενίσχυση υπαρχόντων κατασκευών αποτελεί μια πρακτική που έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη.

Στο πεδίο εφαρμογής του πολιτικού μηχανικού και στην ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος (RC) η εν λόγω τεχνική είναι ανταγωνίσιμη των συμβατικών μεθόδων ενίσχυσης και έχει συναντήσει αναρίθμητες εφαρμογές (Παππά). Πιο συγκεκριμένα στόχος είναι να αξιοποιηθεί η υψηλή αντοχή του CFRP σε εφελκυσμό, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα, και να χρησιμοποιηθεί για την παραλαβή καμπτικών ή διατμητικών καταπονήσεων. Η πραγματοποίηση της ενίσχυσης γίνεται με την τοποθέτηση φύλλων ή ελασμάτων από CFRP επάνω στην επιφάνεια της κατασκευής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Στην περίπτωση που θέλουμε αύξηση της καμπτικής αντοχής του στοιχείου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν φύλλα με τις ίνες τους σε διεύθυνση παράλληλη με το μήκος της κατασκευής, όπως στο Σχήμα 1.1 (α) και (β). Αντίθετα, αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε αξονικό φορτίο σε ένα υποστυλώμα επιτυγχάνεται μέσω περίσφιξης με τοποθέτηση μανδύων από CFRP περιμετρικά του υποστυλώματος, με τις ίνες κάθετα στη διεύθυνση του μήκους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 (γ).



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1.1: Παραδείγματα χρήσης CFRP για ενίσχυση κτιρίων: (α) ενισχυμένες δοκοί (Gustavo) (β) ενίσχυση δαπέδου έναντι ροπής (Gustavo) (γ) Ενίσχυση υποστυλώματος μέσω περίσφιξης (Περιοδικό Έγλη και Κτίριο 2002)

Το 2001 στη γέφυρα A10062 (CIRIA 2002) στο St. Luis, Missouri, Η.Π.Α., μία οριζόντια δοκός υπέστη ζημιά, που φαίνεται στο Σχήμα 1.2, από πρόσκρουση ψηλού οχήματος. Εκτιμήθηκε ότι η φέρουσα ικανότητα της γέφυρας είχε μειωθεί κατά 10% λόγω του ατυχήματος. Για να αποκτήσει πάλι η γέφυρα την αρχική της αντοχή επιλέχθηκε η χρήση φύλλων CFRP. Αφότου αποκαταστάθηκε το σκυρόδεμα, τοποθετήθηκαν δύο στρώσεις CFRP, με διεύθυνση ινών παράλληλη στο μήκος της δοκού, που την τύλιξαν σε σχήμα U. Μετά τη επισκευή, η φέρουσα ικανότητα της γέφυρας εκτιμήθηκε πως ήταν 7% μεγαλύτερη από ότι ήταν αρχικά.



(α)



(β)

Σχήμα 1.2: Επισκευή της γέφυρας A10062 (Nanni 2001)
(α) Η δοκός που υπέστη ζημιά (β) Εργασίες επισκευής και εφαρμογής του CFRP

Παράλληλα με τις περιπτώσεις του σκυροδέματος, μεγάλος αριθμός μεταλλικών κατασκευών όπως γέφυρες, πλατφόρμες εξοπλισμός μεταλλείων και κτίρια χρειάζονται μετασκευές. Η συμβατική μέθοδος για να επισκευαστεί ή να ενισχυθεί μία μεταλλική κατασκευή είναι να κοπούν και να αντικατασταθούν ελάσματα της κατασκευής ή να προσκολληθούν σε αυτήν εξωτερικά ελάσματα. Η μέθοδος αυτή έχει αρκετά μειονεκτήματα στα οποία εάν δεν δοθεί προσοχή μπορεί να επιβαρύνουν την κατασκευή. Μεταξύ αυτών είναι (Haider 2012):

- Η αύξηση βάρους της κατασκευής
- Δυσκολία κατασκευής
- Τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων
- Κακή συμπεριφορά σε κόπωση
- Κακή συμπεριφορά σε διάβρωση
- Ανάγκη για συγκόλληση, που μπορεί να επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα όπως μεταλλουργικές αλλοιώσεις, τοπικές τάσεις κ.α.

Η χρήση ινώδων πολυμερών φαίνεται να είναι μία εξαιρετική εναλλακτική λύση με την οποία μπορεί να αποφευχθεί η πλειοψηφία των άνωθεν προβλημάτων (Teng 2012).

Αρχικά, το χαμηλό βάρος του CFRP (1/4- 1/5 του βάρους του χάλυβα) μειώνει σημαντικά τα πρόσθετα φορτία λόγω ενίσχυσης. Έπειτα, η χρήση επιθεμάτων CFRP δεν απαιτεί συγκόλληση μετάλλων, το οποίο συνεπάγεται πολλά πλεονεκτήματα, καθώς αποφεύγεται ο κίνδυνος εμφάνισης παραμενουσών τάσεων και μεταλλουργικής αλλοίωσης στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες. Ακόμα, σε ορισμένες ειδικές εφαρμογές όπου η μεταλλουργική συγκόλληση είναι επικίνδυνη (π.χ. δεξαμενές πετρελαίου, χημικές εγκαταστάσεις), η χρήση επιθεμάτων μοιάζει ακόμα πιο ελκυστική. Τέλος, το CFRP είναι ανθεκτικό στην περιβαλλοντική διάβρωση καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογή σε κατασκευές που βρίσκονται σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον όπως πλωτές εξέδρες, παραθαλάσσιες κατασκευές κ.α.

Για παράδειγμα, η γέφυρα Tickford στη Βρετανία (Σχήμα 1.3), που χτίστηκε το 1810 και είναι η παλαιότερη χρησιμοποιούμενη γέφυρα φτιαγμένη από χυτοσίδηρο, εκτιμήθηκε πως δεν διαθέτει επαρκή αντοχή (CIRIA 2002). Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα, επιλέχθηκε η επίστρωση φύλλων CFRP επάνω στο σίδηρο. Τοποθετήθηκαν ως και 14 στρώσεις CFRP, ενώ χρησιμοποιήθηκε και ένα κάλυμμα από πολυεστέρα για μόνωση και για αποφυγή πιθανής εμφάνισης γαλβανικής διάβρωσης. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του CFRP ήταν η υψηλή αντοχή του, η ταχύτητα στην εφαρμογή, η αποφυγή επιβάρυνσης της κατασκευής με μεταλλουργικές εργασίες και η ελάχιστη δυνατή παρέμβαση στην αισθητική της γέφυρας. Αξίζει να τονισθεί ότι η μέθοδος ήταν και οικονομικότερη από τις εναλλακτικές της.



Σχήμα 1.3: Η γέφυρα Tickford (Wikipedia)

Στην ναυπηγική, η χρήση επιθεμάτων CFRP για την ενίσχυση μεταλλικών κατασκευών δεν έχει ευρεία εφαρμογή. Ωστόσο, ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του CFRP μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό πλεονέκτημα στην επισκευή ή την ενίσχυση ναυπηγικών κατασκευών σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η αντοχή σε κόπωση του υλικού, καθώς τα πλοία καταπονούνται έντονα σε περιοδικά φορτία (π.χ. λόγω κυματισμών). Επίσης, οι ενισχύσεις χαλύβδινων κατασκευών με επιθέματα από CFRP έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να αυξήσουν τη ζωή σε κόπωση ενός καταπονημένου ελάσματος και να μειώσουν τη διάδοση ρωγμών (Zhao 2007). Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του CFRP, μείζονος σημασίας για τη ναυπηγική, είναι η δυνατότητα άμεσης επισκευής. Όταν ένα πλοίο παρουσιάσει δομική αστοχία εν ώρα υπηρεσίας πιθανότατα θα βρίσκεται χιλιάδες ναυτικά μίλια μακριά από τους πιθανούς τόπους επισκευής του. Όταν, λοιπόν, εντοπιστεί η αστοχία το πλοίο οφείλει να μεταβάλλει το δρομολόγιο του και να επισπεύσει στο κοντινότερο ναυπηγείο που δύναται να επισκευάσει το πρόβλημά του. Αυτή η μεταβολή του δρομολογίου μπορεί να έχει πολύ σημαντική επίπτωση στην οικονομική εκμετάλλευση του πλοίου. Με τη χρήση επιθεμάτων CFRP είναι δυνατή η προσωρινή επισκευή μίας ζημιάς, και να την αποκαταστήσει πλήρως αφότου ολοκληρωθεί το κανονικό δρομολόγιο. Τέλος από τα πιθανά πλεονεκτήματα χρήσης του CFRP στη ναυπηγική δεν μπορούν να μην συνυπολογιστούν για άλλη μια φορά το χαμηλό του βάρος, η αποφυγή της συγκόλλησης και η αντοχή του στο διαβρωτικό περιβάλλον της θάλασσας.

Βεβαίως, η χρήση επιθεμάτων από CFRP δεν αποτελεί πανάκεια και η χρήση τους ενέχει και ορισμένα μειονεκτήματα όπως (Τσούβαλης 1998):

- Έλλειψη ολκιμότητας
- Δυσκολία στη επιθεώρηση
- Αυξημένο κόστος
- Ευπάθεια σε φωτιά

Ειδικά στην περίπτωση των μεταλλικών κατασκευών, το κυρίαρχο πρόβλημα είναι ο κολλητός σύνδεσμος μεταξύ μετάλλου και επιθέματος (Danilov 2016). Τόσο στις εφαρμογές σκυροδέματος, όσο και στις μεταλλικές εφαρμογές, ο κύριος τρόπος σύνδεσης του επιθέματος στην ενισχυόμενη επιφάνεια είναι μέσω εποξικής ρητίνης. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, η εποξική ρητίνη είναι πιο ανθεκτική από αυτό, και αποκολλήσεις- αστοχίες συμβαίνουν λόγω επιφανειακών αστοχιών του τσιμέντου. Στις μεταλλικές εφαρμογές συναντάται ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή η εποξική ρητίνη είναι το πρώτο στοιχείο που αστοχεί λόγω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται μεταξύ μετάλλου και επιθέματος.

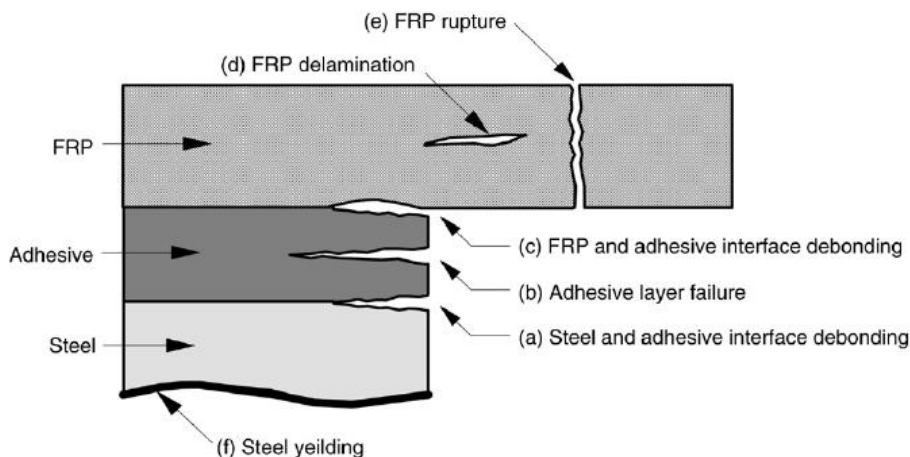
Στα ανωτέρω μειονεκτήματα μπορεί να προστεθεί το γεγονός ότι οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διαδικασία κατασκευής του, δυσχεραίνοντας σημαντικά την ανάπτυξη τυποποιημένων δοκιμών πιστοποίησης, ενιαίου αναλυτικού πλαισίου κανονισμών και απαιτεί από τους μηχανικούς πολύ καλή γνώση των ιδιοτήτων του υλικού και του τρόπου παραγωγής του. Η μη ύπαρξη κανονισμών ή σταδίων μεθοδολογίας που μπορούν να ακολουθηθούν για την τυποποίηση των εργασιών εμποδίζει την ευρεία χρήση της τεχνολογίας των εργασιών. Αυτή τη στιγμή, κάθε περίπτωση αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή, κάτι που σημαίνει μελέτη της επισκευής από την αρχή, αυξημένο χρόνο προετοιμασίας και το σημαντικότερο, όχι εξασφαλισμένη έκδοση πιστοποιητικού από την αρμόδια αρχή.

Όπως συμβαίνει με κάθε νέο υλικό άλλωστε απαιτείται χρόνος ώστε να τυποποιηθούν οι μέθοδοι παραγωγής τους, να πιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά τους, να κερδηθεί η εμπιστοσύνη της αγοράς και να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογών.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

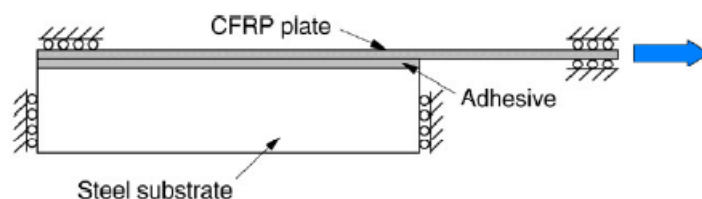
Όπως διαπιστώθηκε, το CFRP μπορεί να αποτελέσει μία ανταγωνιστική επιλογή των μηχανικών στην ενίσχυση και μετασκευή κατασκευών. Ενώ, όμως, για τη χρήση του CFRP ως ενίσχυση σε κατασκευές από σκυρόδεμα έχουν γίνει πολυάριθμες μελέτες και εφαρμογές, η χρήση του σε μεταλλικές κατασκευές δεν έχει γνωρίσει την ίδια ανάπτυξη. Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση καλύπτει ορισμένα πεδία μελέτης σχετικά με την ενίσχυση χαλύβδινων κατασκευών με επιθέματα από CFRP, τα οποία έχουν δείξει ραγδαίες εξελίξεις τα τελευταία χρόνια. Αυτά είναι η μελέτη της αντοχής του κολλητού δεσμού, η μείωση διάδοσης ρωγμών, η ενίσχυση δοκών έναντι λυγισμού και η αύξηση της αντοχής καμπτόμενων δοκών.

Μεγάλο μέρος της ερευνητικής βιβλιογραφίας, επικεντρώνεται στη μελέτη της αντοχής της σύνδεσης του CFRP με τον χάλυβα, καθώς αφορά έναν από τους κύριους τρόπους αστοχίας των ενισχυμένων κατασκευών (Lu et al. 2005). Προσπάθειες έχουν γίνει και για τη διατύπωση εξισώσεων κλειστού τύπου για την εκτίμηση την μέγιστης διατμητικής τάσης που μπορεί να υποστηρίξει ο σύνδεσμος πριν επέλθει αστοχία (Cadei 2004). Σύμφωνα με τους Zhao & Zhang (2006), η αστοχία σύνδεσης μεταξύ μετάλλου και επιθέματος μπορεί να επέλθει με τους μηχανισμούς που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.4:



Σχήμα 1.4: Τρόποι αστοχίας κολλητού συνδέσμου χάλυβα- FRP

Σειρά πειραματικών μελετών έχουν γίνει για τον προσδιορισμό της αντοχής και του τρόπου αστοχίας του κολλητού συνδέσμου μεταξύ χάλυβα και CFRP (Jiao & Zhao 2004, Fawzia 2005). Οι Xia & Teng (2005) σε σχετική μελέτη, εκτέλεσαν πειραματικές δοκιμές όπου ασκείτο εφελκυστικό φορτίο στο επίθεμα CFRP και το αντίθετο άκρο του χαλύβδινου δοκιμίου ήταν ακλόνητο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5:



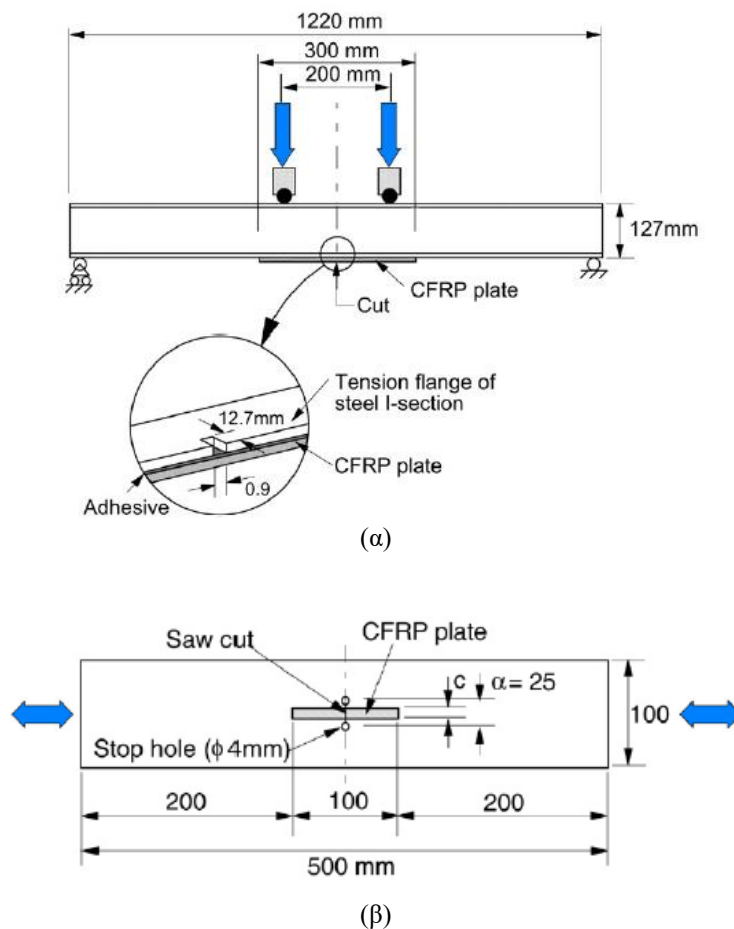
Σχήμα 1.5: Αναπαράσταση της πειραματικής δοκιμής των Xia, Teng

Συμπεράναν πως για επιθέματα μικρού πάχους ο συνήθης τρόπος αστοχίας είναι η αστοχία του στρώματος κόλλας (adhesive layer failure), ενώ σε επιθέματα αυξημένου πάχους επικρατεί η αποκόλληση των στρώσεων του επιθέματος. Τόνισαν, επίσης, ότι ο δεύτερος τρόπος αστοχίας είναι πιο

ψαθυρός από τον πρώτο. Αστοχίες λόγω αποκόλλησης μεταξύ μετάλλου και επιθέματος δεν παρατηρήθηκαν, γεγονός που αποδόθηκε στην καλή συνάφεια δεσμού μεταξύ του κολλητικού μέσου και της τραχυμένης χαλύβδινης επιφάνειας ή του επιθέματος. Κατέληξαν επίσης, στο ότι το φορτίο αστοχίας ήταν ανάλογο του μέτρου ελαστικότητας, του πάχους και του πλάτους του επιθέματος.

Η αύξηση της ζωής έναντι κόπωσης χαλύβδινων κατασκευών με ενίσχυση επιθεμάτων FRP έχει καταγραφεί εκτενώς στην ερευνητική βιβλιογραφία (Jones 2003, Shaat et al. 2004, Cadei & Stanford 2004). Αρκετές πειραματικές μελέτες έχουν γίνει ώστε να μελετηθεί η επίδραση του CFRP στην διάδοση ρωγμών λόγω κόπωσης (Tavakkolizadeh & Saadatmanesh 2003, Colombi et al. 2003, Suzuki 2004).

Οι Tavakkolizadeh & Saadatmanesh μελέτησαν το ρυθμό διάδοσης ρωγμών σε δοκούς διατομής «I» με τεχνητά δημιουργημένες ρωγμές στην εφελκόμενη φλάντζα τους, που είχαν ενισχυθεί με CFRP, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6 (α):



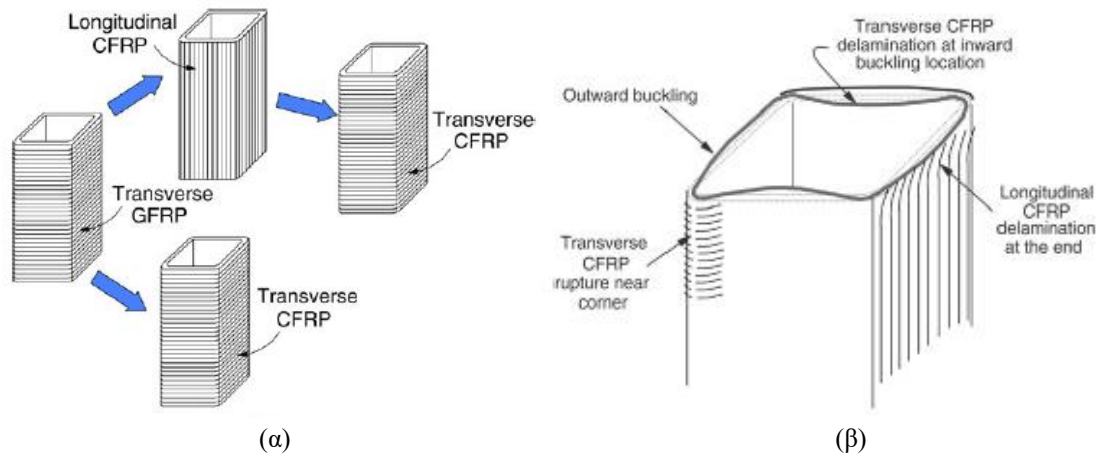
Σχήμα 1.6: Πειραματική διάταξη των (α) Tavakkolizadeh και Saadatmanesh (β) Suzuki

Συμπεράναν πως ο ρυθμός διάδοσης των ρωγμών στα ενισχυμένα δοκίμια ήταν κατά μέσο όρο ίσος με το 35% του ρυθμού διάδοσης των ρωγμών των δοκίμιων που δεν είχε τοποθετηθεί επίθεμα.

Ο Suzuki, εκτέλεσε πειράματα σε επίπεδες πλάκες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6 (β) και εξέτασε την επίδραση του λόγου πλάτος επιθέματος/μήκος ρωγμής (c/a) στο ρυθμό διάδοσης των ρωγμών. Στα δοκίμια όπου ο λόγος c/a έλαβε την τιμή 0,4 ο ρυθμός διάδοσης των ρωγμών μετρήθηκε ίσος με 60% του ρυθμού διάδοσης χωρίς το επίθεμα. Στα δοκίμια όπου $c/a=1$ ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής ήταν μόλις 10% του ρυθμού διάδοσης χωρίς τη χρήση επιθέματος.

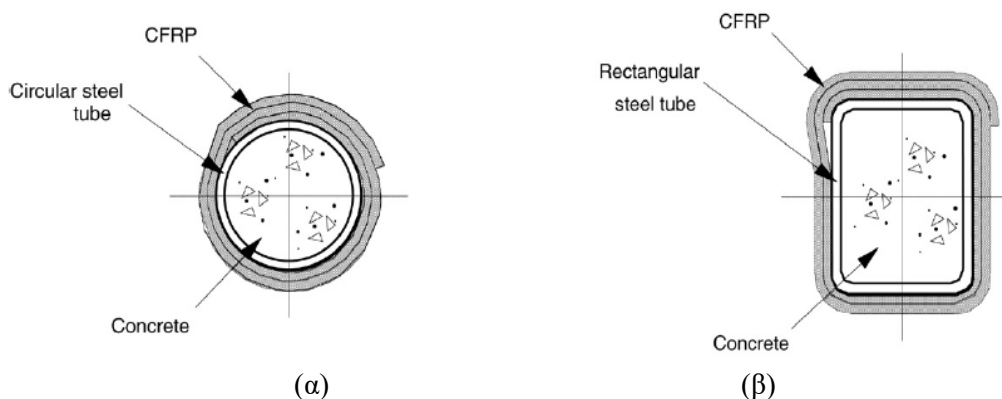
Αρκετές μελέτες έχουν γίνει και για την αντιμετώπιση του φαινομένου του λυγισμού σε κοίλες χαλύβδινες δοκούς, ενισχύοντάς τες με επιθέματα CFRP. Οι Shaat & Fan (2006), εκτέλεσαν πειραματικές δοκιμές ενισχύοντας κοντές και μακρές δοκούς κοίλης ορθογωνικής διατομής με

διαφορετικούς τρόπους. Οι δοκοί ενισχύθηκαν με συνδυασμούς στρώσεων CFRP και GFRP (ινοπλισμένα πολυμερή ινών γυαλιού) με διευθύνσεις ινών και κάθετα και παράλληλα στο μήκος των δοκών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7 (α). Για τις κοντές δοκούς παρατήρησαν τρεις τρόπους αστοχίας των δοκιμίων τους. Αυτοί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7 (β), ήταν η αποκόλληση μεταξύ χάλυβα και διαμήκους επιθέματος στο τέλος του δοκιμίου, η αστοχία του εγκάρσιου επιθέματος CFRP κοντά στις γωνίες των δοκιμίων και αποκόλληση μεταξύ χάλυβα και εγκάρσιου επιθέματος όπου υπήρχε λυγισμός προς το εσωτερικό της διατομής. Οι μακριές δοκοί αστόχησαν όλες λόγω έντονου λυγισμού. Συμπεράναν, επίσης, ότι το μέγιστο φορτίο πριν εμφάνιση λυγισμού αυξήθηκε κατά 18% στις κοντές δοκούς και 13-23% στις μακριές.



Σχήμα 1.7: (α) τρόπου ενίσχυσης δοκών (β) μηχανισμοί αστοχίας κοντών δοκών

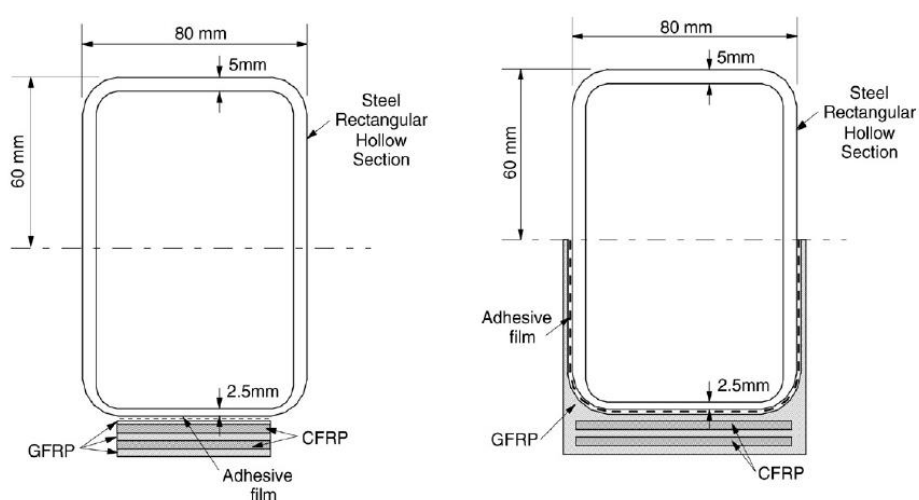
Τους μελετητές έχει επίσης απασχολήσει η διερεύνηση ενίσχυσης σύμμεικτων δοκών, δηλαδή κοίλων χαλύβδινων δοκών που περιβάλλουν σκυρόδεμα (Teng et al. 2002, Xiao 2004, Zhao et al. 2005). Οι Zhao et al. (2005) εκτέλεσαν πειραματικές δοκιμές λυγισμού σε σύμμεικτους φορείς κυκλικής διατομής που είχαν ενισχυθεί περιμετρικά με CFRP, Σχήμα 1.8 (α). Συμπεράναν πως με μία στρώση CFRP μπορούσε να επιτευχθεί αύξηση του μέγιστου φορτίου μέχρι την εμφάνιση του λυγισμού 5-22%, ενώ, με 2 στρώσεις CFRP η αύξηση του μέγιστου φορτίου κυμαινόταν στο 20-44%. Με αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές οι Tao et al. (2005) διαπιστώσαν πως οι σύμμεικτοι φορείς ορθογωνικής διατομής, που φαίνονται στο Σχήμα 1.8 (β), παρουσίαζαν μικρότερη αύξηση του μέγιστου φορτίου.



Σχήμα 1.8: Ενίσχυση σύμμεικτων δοκών με CFRP (α) Zhao et al. (β) Tao et al.

Όμοια με τις δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι χαλύβδινες δοκοί μπορούν επίσης να ενισχυθούν έναντι κάμψης τοποθετώντας επιθέματα CFRP στην εφελκυστική πλευρά τους. Με τη χρήση επιθεμάτων CFRP μπορεί αυξηθεί και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει μία καμπύμενη δοκός αλλά και η δυσκαμψία της (Colombi 2006).

Ο Photiou (2006) υπέβαλε σε κάμψη 4 σημείων κοίλες ορθογωνικές δοκούς στις οποίες είχαν υποβαθμιστεί τεχνητά οι μηχανικές τους ιδιότητες. Η υποβάθμιση πραγματοποιήθηκε μειώνοντας το πάχος της εφελκυστικής φλάντζας από 5mm σε 2,5mm. Για την ενίσχυση επικολλήθηκαν επιθέματα CFRP και GFRP στην εφελκυστική πλευρά τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα (1.9). Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν πως οι ενισχυμένες, «αποδυναμωμένες» δοκοί κατέρρευσαν σε φορτίο μεγαλύτερο από το φορτίο πλαστικής κατάρρευσης των μη- αποδυναμωμένων δοκών και, μάλιστα, χωρίς να παρουσιάσουν προβλήματα αποκόλλησης ή αστοχίας των επιθεμάτων. Αστοχία στο επίθεμα εμφανίστηκε μόνο στις περιπτώσεις όπου τα επιθέματα είχαν πολύ ψηλό μέτρο ελαστικότητας (640 GPa).



Σχήμα 1.9: Οι μέθοδοι ενίσχυσης του Photiou

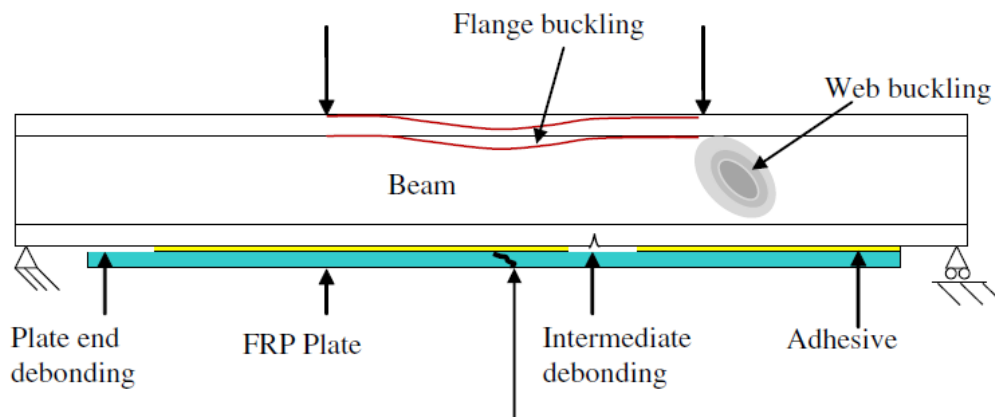
Αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές κάμψης 4 σημείων πραγματοποιήθηκαν από το Seica (2006) σε δοκούς κοίλης κυκλικής διατομής. Σε αυτήν την περίπτωση, ο πολυμερισμός κάποιων επιθεμάτων είχε πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον αέρα ενώ κάποιον άλλων σε θαλασσινό νερό, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του περιβάλλοντος στην ποιότητα ενίσχυσης. Και στις δύο περιπτώσεις τα επιθέματα δεν αποκόλληθηκαν, δείχνοντας ότι το περιβάλλον πολυμερισμού δεν επηρεάζει σημαντικά τη ποιότητα του κολλητού συνδέσμου. Ωστόσο, ως προς τη δυνατότητα ενίσχυσης, τα δοκίμια που είχαν πολυμεριστεί σε θαλασσινό νερό ήταν λιγότερο αποτελεσματικά. Πιο αναλυτικά, τα πρώτα δοκίμια που είχαν πολυμεριστεί σε περιβάλλον αέρα πέτυχαν αύξηση του μέγιστου φορτίου 16%-27%, ενώ, η ενίσχυση που επετεύχθη από αυτά που είχαν πολυμεριστεί σε θαλασσινό νερό κυμαινόταν στο 8%-21%.

Πειραματικές δοκιμές κάμψης 4 σημείων πραγματοποίησε και ο Lingoff (2010) σε δοκούς διατομής I, τύπου HEA180, των οποίων τα πέλατα ενίσχυσε με επιθέματα CFRP. Τα αποτελέσματα του έδειξαν ότι το μέγιστο φορτίο που παρέλαβε η δοκός αυξήθηκε ως και 20%. Το πρόβλημα αποκόλλησης του επιθέματος παρατηρήθηκε σε μία μόνο από τις δοκιμασμένες δοκούς και αποδόθηκε στην κακή προσκόλληση μεταξύ CFRP και μετάλλου. Τη βέλτιστη συμπεριφορά έδειξαν τα δοκίμια που είχαν CFRP υψηλής αντοχής και μέτρο ελαστικότητας παραπλήσιο με αυτό του χάλυβα. Για ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του μέγιστου φορτίου πρότεινε τη χρήση μεγαλύτερου επιθέματος ή/και επιθέματος με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Το πρόβλημα που πιθανώς θα προέκυπτε με τη δεύτερη λύση είναι ότι τα επιθέματα με πιο υψηλό μέτρο ελαστικότητας αστοχούν πρόωρα και με πιο ψαθυρό τρόπο. Τα πειραματικά του αποτελέσματα συγκρίθηκαν με απλοποιημένες αναλυτικές λύσεις.

Οι αναλυτικές λύσεις έδειξαν ότι περαιτέρω αύξηση της δυσκαμψίας δεν είναι εφικτή καθώς η διαρροή της άνω φλάντζας των δοκιμίων καθορίζει την αντοχή της διατομής.

Για άλλη μία φορά, όπως φαίνεται, σημαντικό ζήτημα που απασχολεί τους μελετητές είναι ο μηχανισμός αστοχίας κατασκευών που έχουν ενισχυθεί με CFRP. Οι Teng et al. (2012), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10, συνοψίζουν τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να αστοχήσει μια καμπτώμενη χαλύβδινη δοκός ενισχυμένη με CFRP στους:

- Λυγισμός άνω μεταλλικής φλάντζας
- Λυγισμός χαλύβδινου κορμού
- Αποκόλληση επιθέματος στο τέλος του μήκους του
- Αποκόλληση επιθέματος στη μέση του μήκους του
- Αστοχία επιθέματος



Σχήμα 1.10: Τρόποι αστοχίας χαλύβδινης δοκού ενισχυμένης με FRP (Teng 2012)

Εκτενής παραμετρική μελέτη πραγματοποιήθηκε επίσης από τους Omar et al. (2018) για να μελετήσουν τις δυνατότητες ενίσχυσης της καμπτικής δυσκαμψίας με επιθέματα CFRP. Αναλύθηκαν εκατόν-εβδομήντα-οκτώ μοντέλα σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Εξετάστηκε η επίδραση 6 παραμέτρων στην αύξηση της δυσκαμψίας, οι οποίες ήταν η επιφάνεια του επιθέματος, το μέτρο ελαστικότητας του CFRP, η αντοχή εφελκυσμού του CFRP, το μήκος του επιθέματος, ο λόγος επιφανειών της εφελκόμενης προς την θλιβόμενη φλάντζα της δοκού, και ο λόγος μήκους προς πάχος του χαλύβδινου κορμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η αντοχή της υβριδικής διατομής ήταν ανάλογη της επιφάνειας του επιθέματος καθώς και της αντοχής του σε εφελκυσμό. Διαπίστωσαν, ακόμα, πως το μέτρο ελαστικότητας του CFRP δεν επιδρά σημαντικά στο φορτίο που μπορεί να παραλάβει συνολικά η δοκός. Οι δοκοί με μη-συμπαγείς διατομές (π.χ. κοίλες δοκοί) δεν μπορούσαν να αξιοποιήσουν όλη την αντοχή του CFRP, καθώς κατέρρεαν πρόωρα από την εμφάνιση τοπικού λυγισμού.

1.3 Στόχος διπλωματικής εργασίας

Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό πως το CFRP και γενικότερα τα ινώδη πολυμερή παρουσιάζουν κάποιους εξαιρετικούς συνδυασμούς μηχανικών ιδιοτήτων. Τα πολυάριθμα αυτά πλεονεκτήματα μπορούν να προσφέρουν συμφέρουσες λύσεις και να αναβαθμίσουν τις δυνατότητες επισκευής και μετασκευής υπαρχουσών μεταλλικών κατασκευών. Ωστόσο, περισσότερες μελέτες και εφαρμογές πρέπει να πραγματοποιηθούν έως ότου η τεχνογνωσία χαρακτηριστεί επαρκής και να αρχίσουν να χρησιμοποιούνται συστηματικά τα σύνθετα υλικά- CFRP σε περισσότερους τομείς και στη ναυπηγική.

Σε αυτήν την κατεύθυνση, κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία η οποία με τη χρήση πειραματικών δοκιμών και αριθμητικής ανάλυσης διερευνά την δυνατότητα αύξησης της αντοχής χαλύβδινων δοκών με τη χρήση επιθεμάτων CFRP.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να προσδιοριστεί με δοκιμές κάμψης τριών σημείων, μεγάλης κλίμακας η επίδραση της ενίσχυσης με επιθέματα CFRP σε μία καμπτώμενη δοκό. Στόχος των πειραματικών δοκιμών είναι να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά της ενισχυμένης δοκού. Αυτά αφορούν κυρίως την επίδραση στην αύξηση της δυσκαμψίας της και στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει πριν καταρρεύσει.

Επίσης, στο πλαίσιο της εργασίας, αναπτύχθηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με χρήση του προγράμματος ANSYS®18.2. Σκοπός της αριθμητικής ανάλυσης ήταν να προσομοιάσει κατά το δυνατόν τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και να κριθεί αν η προσομοίωση της καμπτικής συμπεριφοράς της ενισχυμένης δοκού, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, είναι αξιόπιστη. Ένα αξιόπιστο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, που έχει επαληθευτεί από πειραματικές δοκιμές μεγάλης κλίμακας, θα μπορούσε να αποτελέσει μελλοντικά χρήσιμο εργαλείο για εκτενέστερη σχετική αριθμητική μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Εισαγωγή

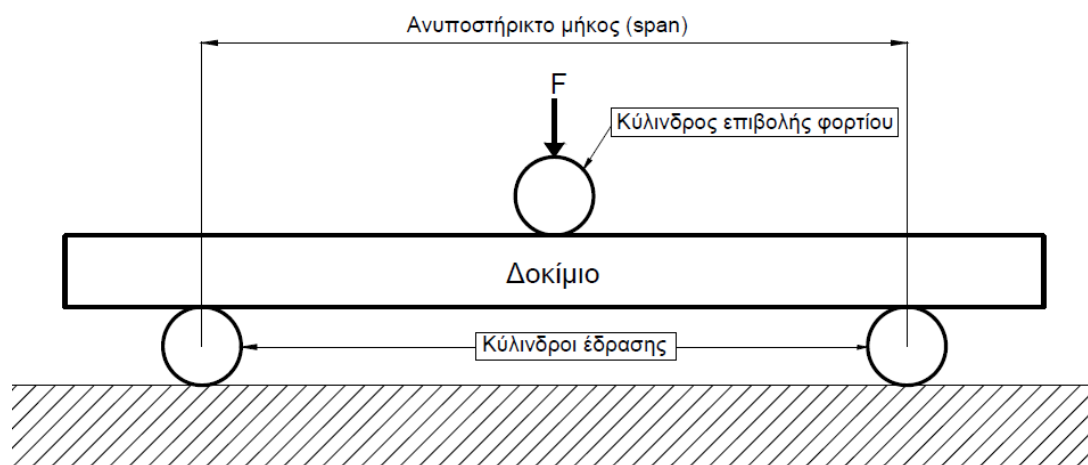
Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας, παρουσιάζοντας όλες τις εργασίες που έλαβαν χώρα για την προετοιμασία και την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών. Όλες οι εργασίες πραγματοποιήθηκαν εντός του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (Ε.Ν.Τ.) του Ε.Μ.Π.

Κύριο αντικείμενο του πειραματικού μέρους ήταν η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών κάμψης τριών σημείων σε μεγάλα δοκίμια που είχαν ενισχυθεί με επιθέματα από CFRP. Σκοπός των πειραματικών δοκιμών ήταν να εξεταστεί η δυνατότητα ενίσχυσης χαλύβδινων δοκών με χρήση επιθεμάτων CFRP, καθώς και να μελετηθεί η επίδραση του επιθέματος στη μηχανική συμπεριφορά της δοκού.

2.2 Σχεδιασμός πειραματικών δοκιμών

2.2.1 Γενική διάταξη

Η πειραματική δοκιμή που επιλέχθηκε είναι η «κάμψη τριών σημείων», η γενική διάταξη της οποίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Κατά την εκτέλεση αυτής το δοκίμιο εδράζεται σε δύο κυλίνδρους (rollers) και στο μέσον του επιβάλλεται φορτίο από έναν τρίτο όμοιο κύλινδρο (pusher), οδηγώντας το σε κάμψη.



Σχήμα 2.1: Κάμψη 3 σημείων

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να υποβληθούν σε κάμψη τριών σημείων δοκοί υβριδικής διατομής, δηλαδή μεταλλικές δοκοί που έχουν ενισχυθεί με CFRP. Τα μεταλλικά δοκίμια ενισχύθηκαν στην εφελκυστική πλευρά τους, προκειμένου να αξιοποιηθεί η υψηλή αντοχή του CFRP σε εφελκυσμό. Αυτή η μέθοδος ενίσχυσης είχε αναδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική, μετά από σχετική αριθμητική ανάλυση διάφορων περιπτώσεων (Λιβερέτος 2016).

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση του CFRP στη μεταλλική δοκό, θα πρέπει να γνωρίζουμε τη συμπεριφορά της μη ενισχυμένης δοκού σε κάμψη τριών σημείων. Επομένως, για κάθε διαφορετικό είδος μεταλλικής δοκού πρώτα θα πρέπει να εκτελεστεί μία «δοκιμή αναφοράς», δηλαδή, να υποβληθεί ένα μη-ενισχυμένο δοκίμιο σε κάμψη τριών σημείων.

Οι πειραματικές δοκιμές εκτελέστηκαν στην υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS μέγιστου φορτίου 250 kN, του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. Το ανυποστήρικτο μήκος (span) στις

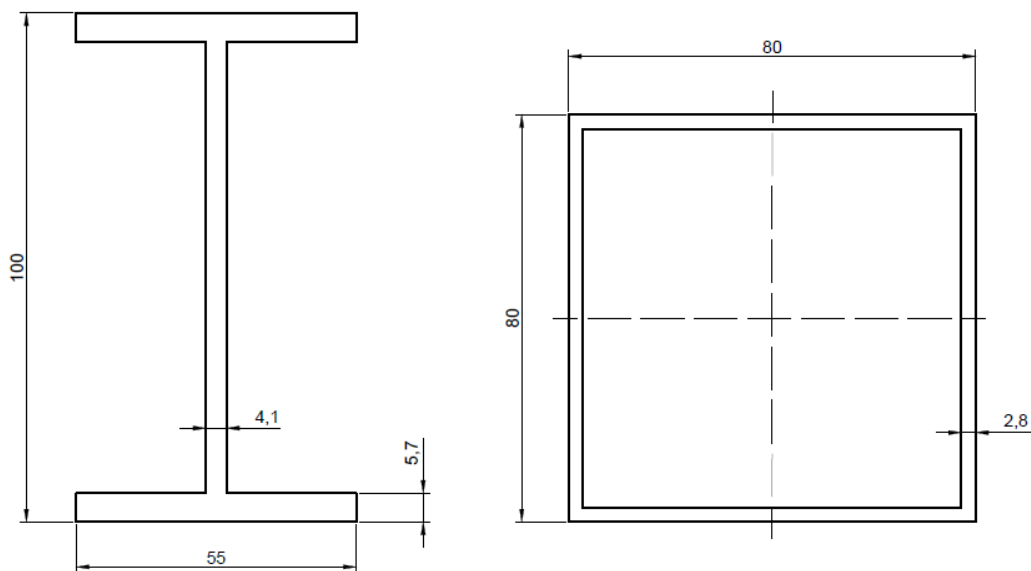
πειραματικές δοκιμές κρίθηκε σκόπιμο να είναι το μεγαλύτερο εφικτό, προκειμένου οι δοκιμές να προσομοιάζουν κατά το δυνατόν πραγματικές περιπτώσεις που μπορεί να συναντηθούν σε ναυπηγικές, και όχι μόνο, κατασκευές. Εξετάζοντας τις δυνατότητες του Ε.Ν.Τ. και τις παραμέτρους της κάμψης τριών σημείων, επιλέχθηκε ανυποστήρικτο μήκος δοκιμίων: $span = 1200\text{mm}$.

2.2.2 Επιλογή μεταλλικών δοκιμίων

Το υλικό των μεταλλικών δοκιμίων επιλέχθηκε να είναι κοινός χάλυβας, καθώς είναι ένα υλικό με ευρεία εφαρμογή στη ναυπηγική.

Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές διατομές χαλύβδινων δοκών, μία διατομή τύπου I και μία κοίλη τετραγωνική διατομή. Η διατομή I επιλέχθηκε διότι λόγω της γεωμετρίας της προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό τη γεωμετρία ενός ενισχυτικού πλοίου, ενώ η κοίλη τετραγωνική διατομή επιλέχθηκε διότι στη βιβλιογραφία συναντώνται συχνά σχετικές μελέτες σε κοίλες χαλύβδινες διατομές (Ρhoτίου 2006) και κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί αντίστοιχη μελέτη.

Από τις τυποποιημένες διατομές χαλύβδινων δοκών προτιμήθηκαν οι «IPE 34,2» και η «Κοίλη τετραγωνική διατομή πλάτους 80mm και πάχους 2,8mm». Οι ονομαστικές διαστάσεις των διατομών φαίνονται στο Σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2: Διαστάσεις διατομών χαλύβδινων δοκών: διατομή IPE34,2 (αριστερά), κοίλη τετραγωνική διατομή (δεξιά)

Οι διατομές αυτές επιλέχθηκαν διότι έχουν ορισμένα σχεδιαστικά πλεονεκτήματα που εξυπηρετούν την πειραματική διαδικασία:

- Είναι συμμετρικές και δεν δημιουργούνται έκκεντρες και στρεπτικές φορτίσεις κατά την εκτέλεση του πειράματος κάμψης.
- Προσφέρουν επαρκές πλάτος στην κάτω μεταλλική επιφάνεια ώστε να διευκολυνθεί η ενίσχυσή τους και να είναι και πιο έντονη η επίδρασή του επιθέματος.
- Η ροπή αντίστασης τους δεν είναι πολύ μεγάλη, γεγονός που εξυπηρετεί δύο λόγους. Αφενός, το φορτίο διαρροής της δοκού, για το δεδομένο $span$, είναι μικρότερο από το μέγιστο που μπορεί να ασκήσει η υδραυλική μηχανή δοκιμών. Αφετέρου, η βάση στήριξης των δοκιμίων μπορεί να υποστηρίξει το συγκεκριμένο φορτίο. Το κριτήριο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενο εδάφιο.

Το μήκος των χαλύβδινων δοκών επιλέχθηκε στα 1500mm ως το πλησιέστερο τυποποιημένο μήκος που εξασφαλίζει span 1200mm. Από κάθε είδος διατομής λήφθηκαν τέσσερις δοκοί, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συνολικά διαθέσιμα οκτώ χαλύβδινα δοκίμια.

2.2.3 Καθορισμός επιθεμάτων CFRP

Ο σχεδιασμός των επιθεμάτων CFRP αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι της παρούσας εργασίας. Το υλικό κατασκευής τους, η μέθοδος κατασκευής τους, η γεωμετρία τους και ο τρόπος σύνδεσης επιθέματος με χαλύβδινη δοκό είναι παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού και κατ' επέκταση την ενίσχυση των χαλύβδινων δοκών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε να εξεταστούν οι εξής παράμετροι: το πάχος του επιθέματος, το μήκος του, καθώς και το είδος του κολλητού συνδέσμου μεταξύ χάλυβα και επιθέματος.

Καθορισμός μεθόδου κατασκευής επιθεμάτων CFRP

Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα επιθέματα θα τοποθετηθούν στην εφελκόμενη πλευρά των χαλύβδινων δοκών. Επομένως, θα υποστούν κυρίως μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση στη διεύθυνση του μήκους. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκαν για την κατασκευή των επιθεμάτων υφάσματα ινών άνθρακα που έχουν όλες τις ίνες τους προσανατολισμένες σε μία διεύθυνση (Unidirectional). Όλες οι στρώσεις υφασμάτων των ινών άνθρακα τοποθετήθηκαν μονοαξονικά διευθετημένες στις 0°, ως προς το μήκος, προκειμένου το τελικό προϊόν να έχει βελτιωμένες ιδιότητες αντοχής και μέτρου ελαστικότητας στην συγκεκριμένη διεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, για την κατασκευή των επιθεμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι ίνες **C322U Carbon fiber fabric** της εταιρίας FIBERMAX. Για τη ρητίνη επιλέχθηκε το εποξικό σύστημα Ρητίνης- Σκληρυντή: **R9330 / H9054 Epoxy system** της εταιρείας FIBERMAX. Οι χημικές-μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα και του εποξικού συστήματος ρητίνης- σκληρυντή παρατίθενται στο «Παράρτημα Α».

Ως προς τη μέθοδο μορφοποίησης, τα επιθέματα κατασκευάστηκαν με την μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay Up), η διαδικασία της οποίας παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο εδάφιο. Η μέθοδος επιλέχθηκε διότι είναι απλή, παρέχει ευελιξία μορφοποίησης και παράγει προϊόντα καλών προδιαγραφών.

Καθορισμός γεωμετρίας Επιθεμάτων CFRP

Για τον καθορισμό του πάχους λήφθηκε υπόψη ο συντελεστής ακαμψίας (Stiffness Ratio) του επιθέματος, ο οποίος εκφράζεται από την εξίσωση:

$$SR = \frac{E_c \cdot t_c}{E_{st} \cdot t_{st}} \quad (2.1)$$

Από την οποία προκύπτει:

$$t_c = SR \frac{E_{st} \cdot t_{st}}{E_c} \quad (2.2)$$

Όπου:

- E_{st} , το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα που εκτιμήθηκε: $E_{st} = 207 \text{ GPa}$
- E_c , το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού που λήφθηκε ίσο με $65,78 \text{ GPa}$, από αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών που παρατίθενται στο «Παράρτημα Β.1»
- t_{st} , το πάχος του χάλυβα, για το οποίο λήφθηκε υπόψη το πάχος της κάτω φλάντζας του κάθε χαλύβδινου δοκιμίου
- t_c , το πάχος του επιθέματος

Από το πάχος του επιθέματος υπολογίζεται και ο αριθμός στρώσεων υφάσματος ινών άνθρακα που απαιτούνται για την επίτευξη του. Ο αριθμός στρώσεων προκύπτει από την εξίσωση:

$$\text{Αριθμός στρώσεων} = \frac{t_c}{t_{ply}} \quad (2.3)$$

Οπου:

- t_c , το πάχος του επιθέματος
- t_{ply} , το πάχος ανά στρώση υφάσματος το οποίο, σύμφωνα με την εμπειρία του Ε.Ν.Τ. από κατασκευή παλαιότερων δοκιμίων, λήφθηκε ίσο με 0,475mm/στρώση (Κροντηράς 2019)

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και θεωρώντας κάποιες τυπικές τιμές του Stiffness Ratio (S.R.), προέκυψαν τα αντίστοιχα πάχη του CFRP και ο απαιτούμενος αριθμός στρώσεων, για κάθε διατομή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2:

Πίνακας 2. 1: Υπολογισμός πάχους επιθεμάτων CFRP κοίλης τετραγωνικής διατομής

$t_{st}= 2,8\text{mm}$	Κοίλη τετραγωνική διατομή		
S.R.=	0,5	0,75	1
t_c (mm)=	4,4	6,6	8,8
Αριθμός στρώσεων	9	14	18

Πίνακας 2.2: Υπολογισμός πάχους επιθεμάτων CFRP για διατομή IPE

$t_{st}= 5,7\text{mm}$	Διατομή IPE		
S.R.=	0,5	0,75	1
t_c (mm)=	9,0	13,5	17,9
Αριθμός στρώσεων	18	28	37

Ως προς το μήκος του επιθέματος, στη βιβλιογραφία προτείνεται να είναι τουλάχιστον 80% του span (Omar 2018) προκειμένου να μην υπάρχουν σημαντικά προβλήματα αποκόλλησης του επιθέματος. Για το λόγο αυτό στα περισσότερα επιθέματα τοποθετήθηκε επίθεμα μήκους 1000mm (83% του ανυποστήριχτου μήκους). Σε ένα μόνο δοκίμιο τοποθετήθηκε επίθεμα μήκους 500mm προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση τόσο σε θέμα αποκόλλησης όσο και σε θέμα δυσκαμψίας και γενικότερης μηχανικής συμπεριφοράς.

Όσον αφορά στο πλάτος, το επίθεμα κάλυπτε σε όλες τις περιπτώσεις όλο το πλάτος της μεταλλικής δοκού.

Επιλογή είδους κολλητού συνδέσμου

Ως προς είδος του κολλητού συνδέσμου μεταξύ του επιθέματος CFRP και της επιφάνειας της χαλύβδινης δοκού, εφαρμόστηκαν οι παρακάτω δύο διαφορετικές μέθοδοι.

Στην πρώτη, η επίστρωση των Carbon Fibers υφασμάτων και επομένως η κατασκευή του CFRP πραγματοποιήθηκε απευθείας επάνω στη μεταλλική δοκό. Σε αυτήν την περίπτωση, το κολλητικό μέσο μεταξύ του μεταλλικού δοκιμίου και του επιθέματος ήταν η ίδια η ρητίνη του CFRP. Στη δεύτερη περίπτωση, τα επιθέματα CFRP κατασκευάστηκαν ξεχωριστά και έπειτα κολλήθηκαν επάνω στις μεταλλικές δοκούς. Στην περίπτωση αυτή το κολλητικό μέσο ήταν η ειδικών προδιαγραφών εποξική κόλλα δύο συστατικών **EC-9323 B/A**, της εταιρίας 3M Scotch Weld™, οι ιδιότητες της οποίας παρατίθενται αναλυτικά στο «Παράρτημα Α».

Ονοματολογία δοκιμίων

Σε κάθε δοκίμιο δόθηκε ένα κωδικό όνομα το οποίο αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο υποδηλώνει το είδος της διατομής της χαλύβδινης δοκού, ενώ το δεύτερο υποδηλώνει τον τρόπο ενίσχυσής του. Όσον αφορά το πρώτο μέρος, η διάκριση μεταξύ των δοκιμίων είναι αν η διατομή της χαλύβδινης δοκού είναι της μορφής «IPE 34,2» ή κοίλη τετραγωνική διατομή. Στο εξής λοιπόν, στα πρώτα θα αναφερόμαστε με το κωδικό όνομα «IPE» ενώ στα δεύτερα με το κωδικό όνομα «O». Το δεύτερο μέρος καθορίζει τον τρόπο ενίσχυσης του επιθέματος, σύμφωνα τους Πίνακες 2.3 και 2.4.

Πιο συγκεκριμένα, για να μελετηθεί η επίδραση του επιθέματος σε μία δοκό είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η συμπεριφορά της μη- ενισχυμένης δοκού. Επομένως, για κάθε είδος διατομής εκτελέστηκε μία πειραματική δοκιμή αναφοράς, όπου η δοκός δεν ήταν ενισχυμένη με επίθεμα. Στα δοκίμια αυτά θα αναφερόμαστε ως «δοκίμια αναφοράς της αντίστοιχης διατομής» ή με το κωδικό όνομα «Reference» ή «Ref.», για συντομία. Στα υπόλοιπα δοκίμια το δεύτερο μέρος αποτελείται από έναν αριθμό από 2 έως 4 που διακρίτοποιεί την περίπτωση ενίσχυσης. Οι ονομαστικές διαστάσεις του επιθέματος CFRP (γεωμετρία και αριθμός στρώσεων υφάσματος ιών άνθρακα), καθώς και το είδος του κολλητού συνδέσμου για κάθε δοκίμιο, φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 2.3: Ονοματολογία δοκιμίων διατομής IPE

Όνομα Δοκιμίου	Μήκος επιθέματος (mm)	Πάχος επιθέματος (mm)	S.R.	Αριθμός στρώσεων	Πλάτος επιθέματος (mm)	Είδος κολλητού συνδέσμου
IPE2	1000	9	0,5	18	55	Ρητίνη
IPE3	1000	9	0,5	18	55	Κόλλα
IPE4	500	9	0,5	18	55	Ρητίνη
IPE Reference	Μη- ενισχυμένο					

Πίνακας 2.4: Ονοματολογία δοκιμίων κοίλη τετραγωνικής διατομής

Όνομα Δοκιμίου	Μήκος επιθέματος (mm)	Πάχος επιθέματος (mm)	S.R.	Αριθμός στρώσεων	Πλάτος επιθέματος (mm)	Είδος κολλητού συνδέσμου
O2	1000	6,6	0,75	14	80	Ρητίνη
O3	1000	4,4	0,5	9	80	Κόλλα
O4	1000	4,4	0,5	9	80	Ρητίνη
O Reference	Μη- ενισχυμένο					

2.2.4 Μετρούμενα μεγέθη κατά την πειραματική διαδικασία

Τα μεγέθη στα οποία βασίστηκε η ανάλυσή μας είναι στην ουσία η δύναμη που πρέπει να ασκήσουμε για να καμφθεί το κάθε δοκίμιο, το βέλος κάμψης στο μέσον του δοκιμίου και οι παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος. Για κάθε ένα από τα δοκίμιά μας, λοιπόν, χρειαζόμαστε την καμπύλη «δύναμης- βέλους κάμψης» και τις καμπύλες «δύναμης- παραμόρφωσης». Πριν προχωρήσουμε, είναι απαραίτητο να οριστούν οι βασικές διευθύνσεις του χρησιμοποιούμενου συστήματος αξόνων, για τη μέτρηση των αποστάσεων στα δοκίμια. Από εδώ και στο εξής, λοιπόν, και για το σύνολο της εργασίας, ορίζεται η διεύθυνση του μήκους των δοκιμίων ως διεύθυνση «X», η διεύθυνση του πλάτους των δοκιμίων ως διεύθυνση «Y» και η διεύθυνση του ύψους των δοκιμίων ως διεύθυνση «Z».

Οι τιμές της ασκούμενης δύναμης λήφθηκαν απευθείας από την υδραυλική μηχανή δοκιμών με την οποία εκτελέστηκε η πειραματική δοκιμή. Για τη μέτρηση του βέλους κάμψης χρησιμοποιήθηκε ένας γραμμικά μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT), ο οποίος είναι μετρητικό όργανο που μετατρέπει γραμμική μετατόπιση σε ηλεκτρικό σήμα, μέσω του φαινομένου της αμοιβαίας επαγωγής και μετράει μετατόπιση με μεγάλη ακρίβεια. Το LVDT τοποθετήθηκε ακριβώς στο μέσον της κάτω

πλευράς κάθε δοκιμίου. Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων στα σημεία ενδιαφέροντος χρησιμοποιήθηκαν ειδικά αισθητήρια όργανα, τα ηλεκτρικά επιμηκυσσιόμετρα (Strain Gauges). Αυτά μετρούν παραμορφώσεις, εκμεταλλευόμενα την ιδιότητα των ηλεκτρικών αγωγών να μεταβάλλεται η ηλεκτρική τους αντίσταση όταν επιμηκύνονται και μεταβάλλεται η διατομή τους. Σε κάθε strain gauge (SG), εκτός από τη θέση, σημασία έχει και η γωνία με την οποία θα τοποθετηθεί πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου, προκειμένου να μετράει παραμορφώσεις στην αντίστοιχη διεύθυνση.

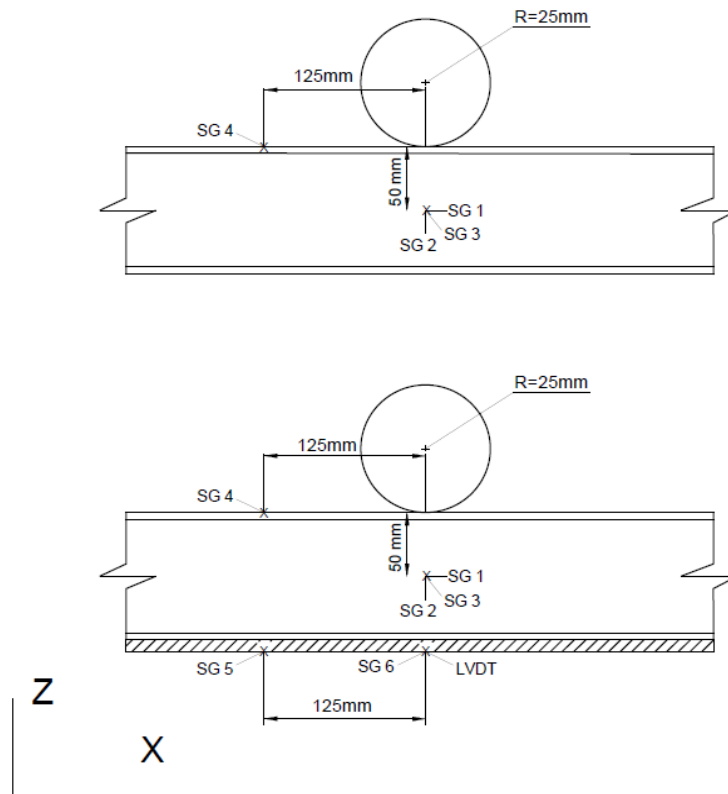
Στα δοκίμια «ΙΡΕ» τοποθετήθηκαν τρία strain gauges στο μέσον του κορμού της χαλύβδινης δοκού, ως προς το ύψος, και στο σημείο εφαρμογής της δύναμης, ως προς το μήκος. Από αυτά, το SG1 τοποθετήθηκε με γωνία 0° ως προς τη διεύθυνση του μήκους και μέτραγε παραμορφώσεις στη διεύθυνση X. Το SG2 τοποθετήθηκε με γωνία 90° ως προς τη διεύθυνση του μήκους και μέτραγε παραμορφώσεις στη διεύθυνση Z. Το SG3 τοποθετήθηκε με γωνία 45° ως προς τη διεύθυνση του μήκους και μέτραγε παραμορφώσεις στο επίπεδο XZ, στην διεύθυνση αυτή. Τα τρία αυτά strain gauges τοποθετήθηκαν ώστε να μελετήσουν την καταπόνηση του κορμού της ενισχυόμενης δοκού κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης. Στα δοκίμια «Ο», όμοια, τοποθετήθηκαν τα SG 1-3 σε μία εξωτερική πλευρά της χαλύβδινης δοκού, στο μέσον του ύψους και στο σημείο εφαρμογής της δύναμης ως προς το μήκος. Η γωνία τοποθέτησης, καθώς και τα μετρούμενα μεγέθη, των SG1-3, στα δοκίμια Ο, είναι αντίστοιχη με αυτήν των SG1-3 στα δοκίμια ΙΡΕ.

Το τέταρτο strain gauge (SG4) τοποθετήθηκε σε όλα τα δοκίμια στο μέσον του πλάτους της πάνω πλευράς της άνω φλάντζας κάθε χαλύβδινης δοκού, σε απόσταση 125mm από το σημείο εφαρμογής της δύναμης, και μέτραγε παραμορφώσεις στη διεύθυνση του μήκους, X. Το συγκεκριμένο S.G. τοποθετήθηκε διότι μας ενδιέφερε να μετρήσουμε τις παραμορφώσεις στη X διεύθυνση της θλιβόμενης πλευράς του δοκιμίου.

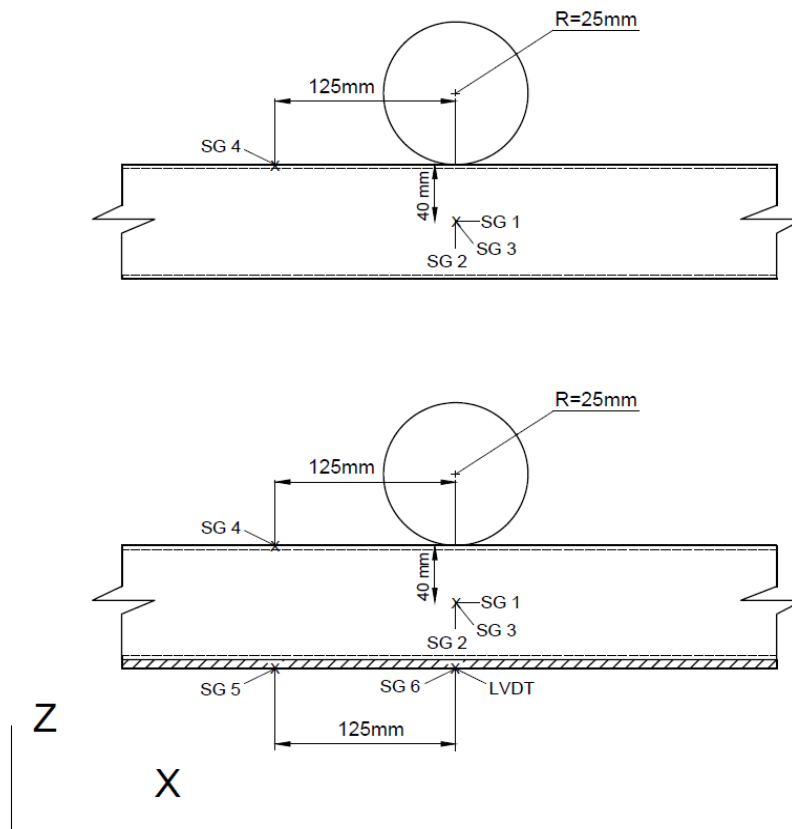
Το πέμπτο strain gauge (SG5) τοποθετήθηκε επάνω στο επίθεμα CFRP και μέτραγε επίσης παραμορφώσεις στη διεύθυνση του μήκους, X. Η θέση τοποθέτησης του ήταν στο μέσον της κάτω πλευράς του επιθέματος και σε απόσταση 125mm, ως προς το μήκος, από το σημείο εφαρμογής της δύναμης. Το SG5 μετράει παραμορφώσεις του επιθέματος, στη διεύθυνση X.

Το έκτο strain gauge (SG6) τοποθετήθηκε και αυτό επάνω στο επίθεμα CFRP και μέτραγε επίσης παραμορφώσεις στη διεύθυνση του μήκους, X. Η θέση τοποθέτησης του ήταν στο μέσον της κάτω πλευράς του επιθέματος και, ως προς το μήκος, στο σημείο εφαρμογής της δύναμης. Το SG6 τοποθετήθηκε για να μετρηθούν οι παραμορφώσεις του επιθέματος στη διεύθυνση X, στο σημείο μέγιστου βέλους κάμψης και να συγκριθούν με αυτές του SG5.

Η ονομαστική θέση των μετρητικών οργάνων παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.3 και 2.4:



Σχήμα 2.3: Θέση μετρητικών οργάνων δοκιμίων ΙΡΕ: μη- ενισχυμένο δοκίμιο (πάνω), ενισχυμένο δοκίμιο (κάτω)



Σχήμα 2.4: Θέση μετρητικών οργάνων δοκιμίων Ο: μη- ενισχυμένο δοκίμιο (πάνω), ενισχυμένο δοκίμιο (κάτω)

2.3 Κατασκευή δοκιμίων

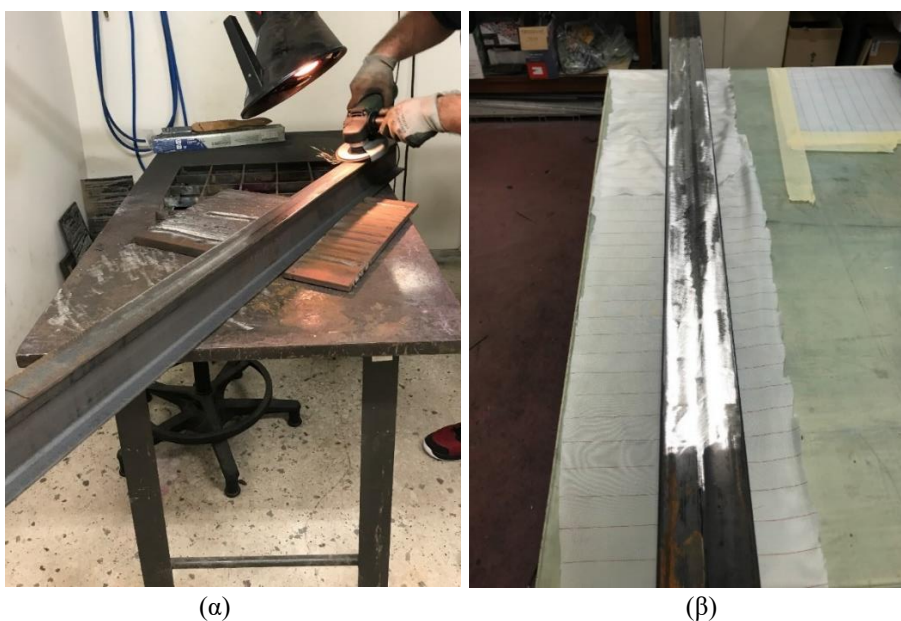
Στο εδάφιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής των ενισχυμένων δοκιμίων. Παρουσιάζονται οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την προετοιμασία των χαλύβδινων επιφανειών, την κατασκευή των επιθεμάτων CFRP και την κόλληση των επιθεμάτων επάνω στις δοκούς. Στο τέλος του εδαφίου παρουσιάζεται η γεωμετρία των επιθεμάτων όπως μετρήθηκε μετά την κατασκευή τους, και εξηγείται ο τρόπος τοποθέτησης των μετρητικών οργάνων, strain gauges, στα τελικά δοκίμια.

2.3.1 Προετοιμασία Επιφάνειας- Τραχύτητες

Για τη δημιουργία ενός ισχυρού δεσμού μεταξύ του επιθέματος και της χαλύβδινης δοκού απαιτείται προετοιμασία της επιφάνειας στην οποία πρόκειται να προσκολληθεί το επίθεμα. Η διεργασία αυτή ήταν απαραίτητη για την απομάκρυνση της σκουριάς και την δημιουργία τραχύτητας ώστε να εξασφαλιστεί συνάφεια μεταξύ μετάλλου και επιθέματος. Ως μέθοδος επιφανειακής κατεργασίας επελέγη το τρόχισμα. Το τρόχισμα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ηλεκτρικού λειαντήρα, παρόμοιου με αυτόν που φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Στον λειαντήρα τοποθετήθηκε φτερωτός δίσκος λείανσης **Bosch P60**, με διάμετρο 115mm. Σημειώνεται ότι λόγω του μεγάλου μήκους των χαλύβδινων δοκών ήταν αδύνατη η αμμοβολή τους. Οι δοκοί τροχίστηκαν τοπικά στην περιοχή την οποία εφαρμόστηκε το CFRP όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Μετά το τρόχισμα, καθαρίστηκε η επιφάνεια κάθε δοκού με ασετόν για την απομάκρυνση ρινισμάτων μετάλλου και σκόνης.



Σχήμα 2.5: Ηλεκτρικός λειαντήρας που χρησιμοποιήθηκε για τη μέθοδο επιφανειακής κατεργασίας (bosch.gr)



Σχήμα 2.6: (α) Τρόχισμα χαλύβδινης δοκού (β) Τελική επιφάνεια δοκού μετά από επιφανειακή κατεργασία

Η τραχύτητα της επιφάνειας των δοκιμίων μετρήθηκε με ειδικό φορητό εξοπλισμό του εργαστηρίου τύπου TIME TR100 Surface Roughness Tester. Με τη χρήση του μετρητή μετρήσαμε τη μέση τραχύτητα, Ra, στα δοκίμια για μήκος δειγματοληψίας $\lambda_3 = 2,5\text{mm}$. Για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις σε τυχαίες θέσεις στην επιφάνειά τους ώστε να ληφθεί αντιπροσωπευτικό δείγμα της μέσης τραχύτητας επιφάνειας. Στους Πίνακες 2.5 και 2.6 φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 2.5: Τραχύτητες δοκών IPE

Δοκίμια διατομής IPE								
Αρ. Δοκιμίου	Μέση τραχύτητα Ra					M.O.	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
IPE2	4,2	5,17	3,3	2,42	2,43	3,504	1,18	33,9%
IPE3	3,99	5,11	3,86	3,86	4,44	4,252	0,54	12,6%
IPE4	4,09	4,02	4,26	3,17	3,12	3,732	0,54	14,6%

Πίνακας 2.6: Τραχύτητες κοίλων τετραγωνικών δοκών

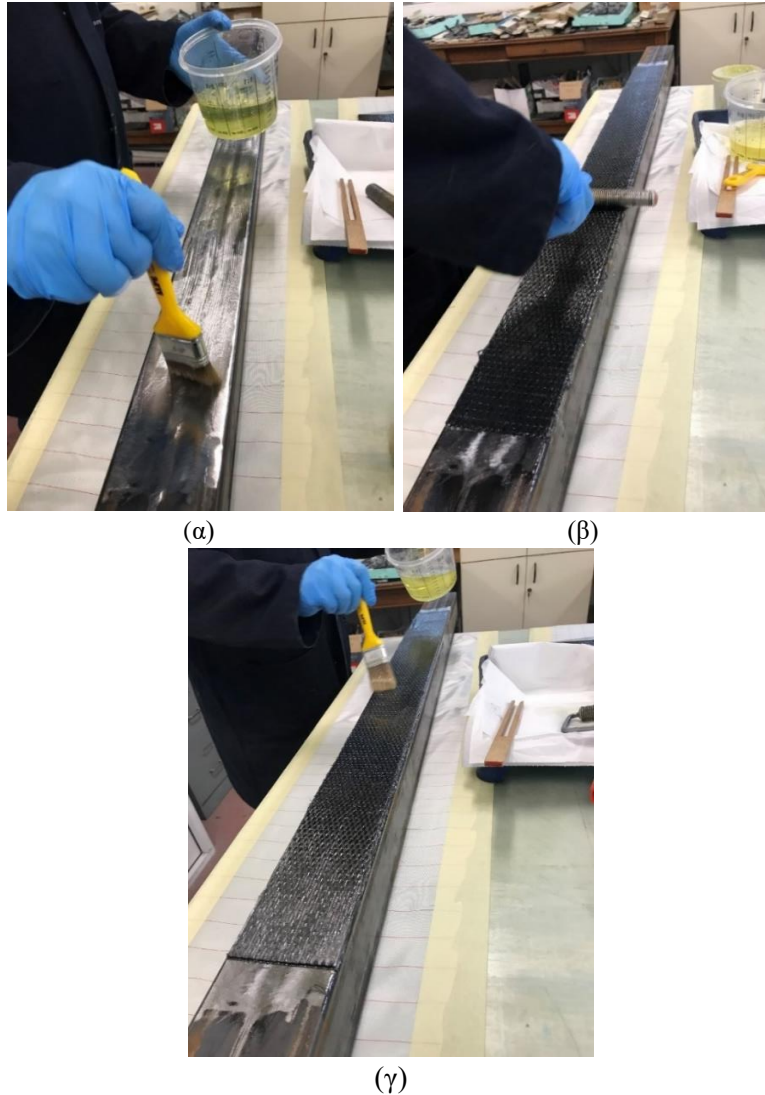
Δοκίμια κοίλης τετραγωνικής διατομής								
Αρ. Δοκιμίου	Μέση τραχύτητα Ra					M.O.	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
O2	3,41	3,68	3,18	3,52	3,95	3,548	0,29	8,1%
O3	6,03	4,34	4,66	3,83	5,03	4,778	0,83	17,3%
O4	4,64	3,29	4,55	5,27	2,6	4,07	1,09	26,8%

2.3.2 Κατασκευή επιθεμάτων CFRP

Το πρώτο στάδιο στην κατασκευή του CFRP ήταν η κοπή υφασμάτων από ίνες άνθρακα στις ονομαστικές διαστάσεις (μήκος, πλάτος) των επιθεμάτων του κάθε δοκιμίου.

Τα επιθέματα CFRP κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay Up), η διαδικασία της οποίας περιγράφεται παρακάτω. Βασική διάκριση των επιθεμάτων ως προς την κατασκευή τους ήταν το αν κατασκευάστηκαν απευθείας επάνω στην μεταλλική δοκό ή αν κατασκευάστηκαν ξεχωριστά και έπειτα κολλήθηκαν σε αυτήν.

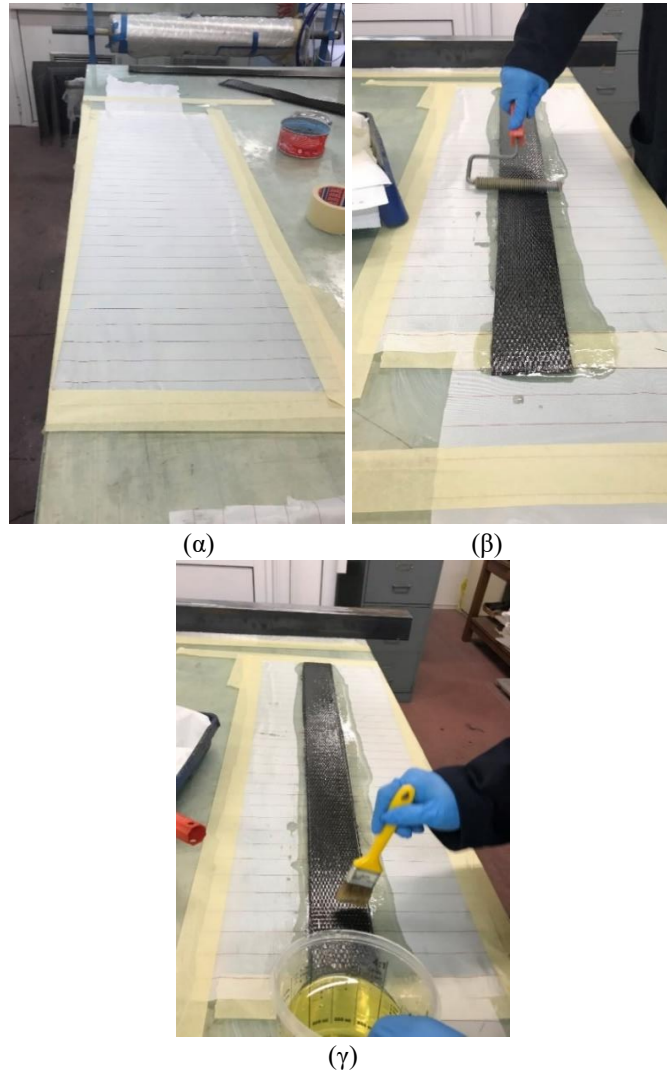
Για τα επιθέματα που κατασκευάστηκαν απευθείας επάνω στο δοκίμιο η διαδικασία κατασκευής τους ήταν η εξής. Αρχικά, επιστρώνεται ρητίνη με χρήση πινέλου επάνω στη μεταλλική επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 (α). Η πρώτη αυτή στρώση ρητίνης λειτουργεί σαν κόλλα μεταξύ συνθέτου υλικού και μετάλλου. Κατόπιν, τοποθετείται η πρώτη στρώση υφάσματος ινών άνθρακα. Η στρώση πιέζεται ομοιόμορφα με τη βοήθεια κυλίνδρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 (β), προκειμένου η ρητίνη να εμποτίσει τις ίνες άνθρακα. Έπειτα με τη χρήση πινέλου απλώνεται εκ νέου ρητίνη επάνω στην στρώση υφάσματος, όπως στο Σχήμα 2.7 (γ). Μία νέα στρώση υφάσματος τοποθετείται από πάνω και με τη χρήση κυλίνδρου η νέα στρώση πιέζεται ομαλά επάνω στην προηγούμενη, εμποτίζοντας την με ρητίνη και αφαιρώντας την περίσσεια ρητίνης. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου τοποθετηθούν όλες οι στρώσεις υφάσματος. Αφού τοποθετηθούν όλες οι στρώσεις, τα δοκίμια αφήνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος τουλάχιστον 50 ώρες προκειμένου να πολυμεριστεί πλήρως η ρητίνη.



Σχήμα 2.7: Κατασκευή CFRP επάνω στη χαλύβδινη δοκό: (α) άπλωμα ρητίνης με πινέλο στη χαλύβδινη δοκό (β) άσκηση πίεσης με κύλινδρο (γ) άπλωμα ρητίνης στη νέα στρώση υφάσματος

Για τα επιθέματα που δεν κατασκευάστηκαν επάνω στη μεταλλική δοκό ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά, οριοθετήθηκε η απαιτούμενη επιφάνεια στο τραπέζι του εργαστηρίου για την επίστρωση των υφασμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 (α). Στην επιφάνεια αυτή τοποθετήθηκε κερί προκειμένου να μην προσκολληθεί η ρητίνη επάνω στο γυάλινο τραπέζι κατά τον πολυμερισμό. Έπειτα τοποθετήθηκε μία στρώση «peel ply» πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκε η επίστρωση. Το peel ply είναι ένα ύφασμα, συνήθως νάιλον, που κολλάει επάνω στο πολύστρωτο και μπορεί να αφαιρεθεί χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Με τη χρήση του peel ply επιτυγχάνεται η πρόσδοση μιας τραχύτητας στην κάτω πλευρά του επιθέματος, μετά την απομάκρυνση της, αντί για τη λεία επιφάνεια που θα είχε αν η επίστρωση είχε πραγματοποιηθεί επάνω στο τραπέζι. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζονται καλύτερες συνθήκες για την μετέπειτα εφαρμογή και συνάφεια της κόλλας μεταξύ μετάλλου- επιθέματος.

Στη συνέχεια η διαδικασία για την παραγωγή του σύνθετου υλικού ήταν παρόμοια με αυτήν που ακολουθήθηκε προηγουμένως. Πρώτα απλώνεται ρητίνη με το πινέλο. Έπειτα τοποθετείται η πρώτη στρώση υφάσματος από ανθρακονήματα, στην οποία θα ασκηθεί πίεση με τη βοήθεια του κυλίνδρου όπως στο Σχήμα 2.8 (β). Αφότου η στρώση είχε εμβαπτιστεί στη ρητίνη και η περίσσεια ρητίνης είχε απομακρυνθεί, τοποθετείται εκ νέου ρητίνη με τη βοήθεια του πινέλου, όπως στο Σχήμα 2.8 (γ) προκειμένου να υποδεχθεί την επόμενη στρώση υφάσματος, και ούτω καθ' εξής.



Σχήμα 2.8: Κατασκευή CFRP στο τραπέζι: (α) το ύφασμα peel ply στο τραπέζι (β) άπλωμα ρητίνης με πινέλο (γ) άσκηση πίεσης με κύλινδρο

2.3.3 Εφαρμογή Κόλλας

Όπως προαναφέρθηκε, για την κόλληση επάνω στη μεταλλική δοκό των επιθεμάτων που είχαν κατασκευαστεί ξεχωριστά χρησιμοποιήθηκε η ειδικών προδιαγραφών εποξική κόλλα δύο συστατικών **EC-9323 B/A**, της εταιρίας 3M Scotch Weld™, οι ιδιότητες της οποίας παρατίθενται αναλυτικά στο «Παράρτημα Α». Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου όγκου κόλλας για κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ο εξής τύπος:

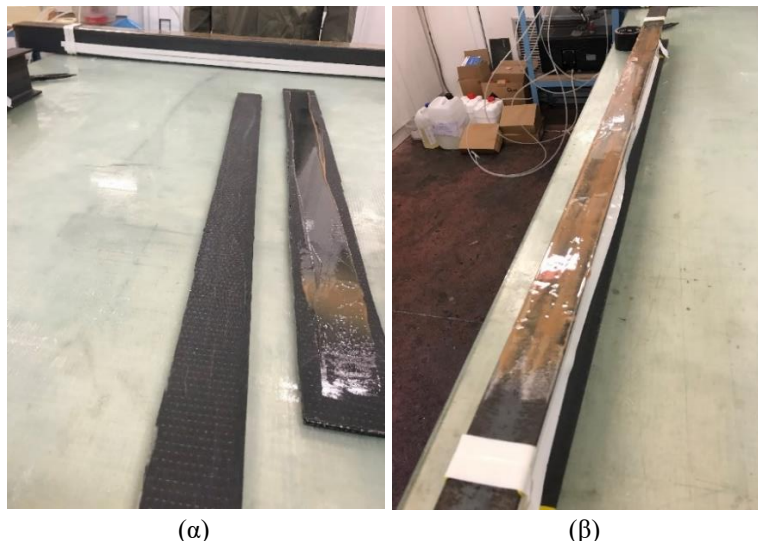
$$V_g = L \cdot B \cdot t \cdot S \quad (2.4)$$

Όπου:

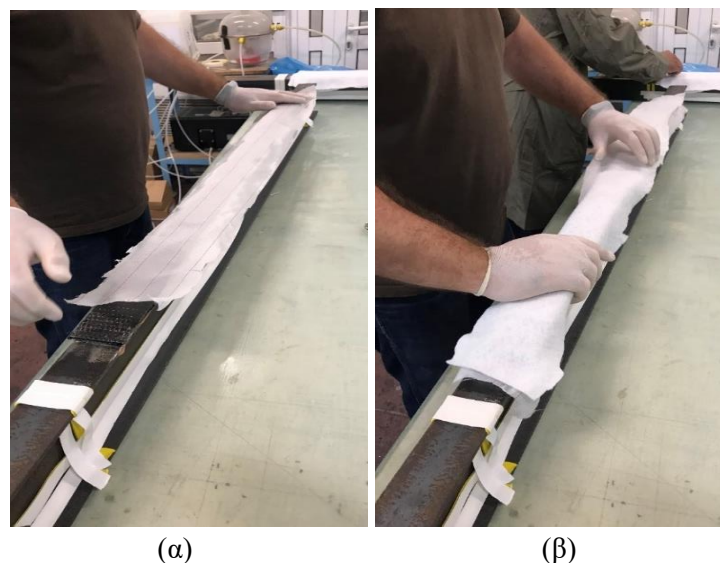
- L το ονομαστικό μήκος του επιθέματος
- B το ονομαστικό πλάτος του επιθέματος
- t το ονομαστικό πάχος στρώσης της κόλλας που θεωρήθηκε ίσο με 0,2mm
- S συντελεστής ασφαλείας που λήφθηκε ίσος με 1,5 για τυχόν απώλειες (π.χ. στο δοχείο ανάδευσης των συστατικών)

Τα συστατικά της κόλλας αναδεύτηκαν, τηρώντας με μεγάλη ακρίβεια την απαιτούμενη αναλογία. Η κόλλα απλώθηκε επάνω στο επίθεμα και στην μεταλλική επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9 (α) και (β), αντίστοιχα, και τα δύο μέρη ήρθαν σε επαφή μεταξύ τους.

Για την βέλτιστη εφαρμογή της κόλλας αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί μέθοδος άσκησης πίεσης με κενό (Vacuum Bag), η οποία εξηγείται παρακάτω. Με το που ήρθαν σε επαφή τα δύο μέρη, το πρώτο πράγμα που τοποθετήθηκε επάνω στο επίθεμα ήταν το peel ply, Σχήμα 2.10 (α). Αμέσως μετά το peel ply, τοποθετείται το breather, Σχήμα 2.10 (β), το οποίο είναι ένα ύφασμα, που έχει την ιδιότητα να επιτρέπει τη διέλευση αέρα. Αυτό επιτρέπει να φεύγουν τα κενά αέρα και να εφαρμόζεται μία ομοιόμορφη πίεση επάνω σε όλη την επιφάνειά. Το τελευταίο πράγμα που τοποθετείται πριν την εφαρμογή πίεσης είναι το vacuum bag. Συνήθως είναι νάιλον, το οποίο χρησιμοποιείται λόγω των ιδιοτήτων που απαιτούνται για τη διαδικασία, δηλαδή υψηλή ελαστικότητα και δυνατότητα παραμόρφωσης. Ο σκοπός του είναι η ομοιόμορφη εφαρμογή πίεσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, επομένως πρέπει να εξασφαλίζεται αεροστεγές κλείσιμο, προκειμένου να μην υπάρχουν διαρροές. Το κλείσιμο του vacuum bag γίνεται με tacky tape, το οποίο τοποθετείται πάνω στη μεταλλική δοκό περιβάλλοντας στην περιοχή που έχει τοποθετηθεί το επίθεμα. Το vacuum bag «κολλάει» επάνω στο tacky tape εμποδίζοντας τον αέρα να εισέλθει. Τέλος, με χρήση σπειροσωλήνα και αντλίας κενού αναρροφάται ο αέρας και δημιουργείται εξωτερική πίεση 0.8 bar.



Σχήμα 2.9: Απλωμένη κόλλα: (α) στο επίθεμα (β) στη χαλύβδινη δοκό



Σχήμα 2.10: (α) Τοποθέτηση υφάσματος peel ply (β) Τοποθέτηση υφάσματος breather

Η ολοκληρωμένη διάταξη άσκησης πίεσης με κενό φαίνεται στο Σχήμα 2.11 (α). Στο Σχήμα 2.11 (β) φαίνεται η αντλία κενού, ενώ στο Σχήμα 2.11 (γ) φαίνεται ο δείκτης πίεσης της αντλίας. Τα δοκίμια αφέθηκαν σε αυτήν την κατάσταση για 3 ώρες, που είναι το αναγραφόμενο “Working Time” της κόλλας. Έπειτα η κόλλα αφέθηκε να πολυμεριστεί σε θερμοκρασία δωματίου για 12 ημέρες προκειμένου να αποκτήσει την πλήρη αντοχή της.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2.11: (α) Ολοκληρωμένη διάταξη άσκησης πίεσης με κενό (β) αντλία κενού (γ) δείκτης πίεσης αντλίας

2.3.4 Τελικές διαστάσεις επιθεμάτων

Στην παράγραφο αυτή παρατίθεται η τελική γεωμετρία των επιθεμάτων όπως μετρήθηκε μετά από την κατασκευή τους. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε επίθεμα προσδιορίζονται το μήκος του, το πλάτος του και το πάχος του. Σημειώνεται ότι είναι δύσκολο να μετρηθούν με ακρίβεια χιλιοστού τα παραπάνω μεγέθη διότι κανένα από αυτά δεν είναι απόλυτα σταθερό για το σύνολο του επιθέματος. Παρουσιάζεται, λοιπόν, στους Πίνακες 2.7 και 2.8, μία μέση τιμή των μεγεθών όπως προέκυψε από πολλές μετρήσεις.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε αποκλίσεις της γεωμετρίας από τις ονομαστικές διαστάσεις. Για τις αποκλίσεις ως προς το πάχος των επιθεμάτων, ευθύνεται κυρίως η λανθασμένη εκτίμηση του πάχους της κάθε στρώσης. Το εν λόγω μέγεθος είναι πολύ δύσκολο να

εκτιμηθεί για τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι, καθώς η κατασκευαστής δεν παρέχει σχετικές πληροφορίες. Για τις αποκλίσεις ως προς το μήκος και το πλάτος των επιθεμάτων ευθύνεται κυρίως ο ανθρώπινος παράγοντας. Το λάθος μπορεί να εντοπιστεί είτε στην κοπή υφασμάτων που δεν ήταν ακριβώς στις ονομαστικές διαστάσεις, είτε στη διασπορά των υφασμάτων κατά τη διαδικασία επίστρωσης. Όσον αφορά τον τελευταίο παράγοντα, την πιθανότητα λάθους αυξάνει η ύπαρξη ανωμαλιών στην επιφάνεια των μεταλλικών δοκιμίων. Οι επιφάνειες των μεταλλικών δοκιμίων δεν ήταν τελείως επίπεδες, αλλά παρουσίαζαν είτε μικρές κλίσεις, είτε κάποιες τοπικές καμπυλότητες δυσχεραίνοντας, έτσι, την κατασκευή των επιθεμάτων που φτιάχτηκαν απευθείας επάνω στις μεταλλικές δοκούς.

Πίνακας 2.7: Διαστάσεις επιθεμάτων CFRP δοκιμίων IPE

Όνομα επιθέματος	Μήκος Επιθέματος (mm)	Πάχος Επιθέματος (mm)	S.R.	Πλάτος Επιθέματος (mm)
IPE2	1007	8,7	0,49	60
IPE3	1020	8,5	0,47	59
IPE4	505	9,4	0,52	61

Πίνακας 2.8: Διαστάσεις επιθεμάτων CFRP δοκιμίων O

Όνομα δοκιμίου	Μήκος Επιθέματος (mm)	Πάχος Επιθέματος (mm)	S.R.	Πλάτος Επιθέματος (mm)
O2	1005	6,1	0,69	81
O3	1005	4,2	0,48	81
O4	1004	4,2	0,48	81

2.3.5 Τοποθέτηση των Strain Gauges

Το τελικό στάδιο προετοιμασίας των δοκιμίων πριν την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών ήταν η τοποθέτηση των strain gauges (S.G.) στις επιθυμητές θέσεις που περιεγράφηκαν στο προηγούμενο εδάφιο. Για την τοποθέτηση κάθε strain gauge επάνω σε χαλύβδινη επιφάνεια, πρώτα τροχίστηκε η περιοχή γύρω από το σημείο τοποθέτησής του και σηματοδύθηκε με τον χαρακτή η ακριβής θέση τοποθέτησης. Έπειτα, η περιοχή λειάνθηκε με γυαλόχαρτο, καθαρίστηκε με ασετόν και το S.G. τοποθετήθηκε με χρήση κόλλας. Για την τοποθέτηση ενός S.G. σε επιφάνεια σύνθετου υλικού, δεν πραγματοποιήθηκε τρόχισμα και λείανση για να μην καταστραφεί το σύνθετο υλικό. Η επιθυμητή θέση σηματοδύθηκε με τον χαρακτή, καθαρίστηκε και τοποθετήθηκε το S.G., με χρήση κόλλας. Σημειώνεται πως τα S.G. τοποθετήθηκαν τουλάχιστον 24 ώρες πριν την εκτέλεση των πειραμάτων ώστε να εξασφαλιστεί καλή εφαρμογή της κόλλας.

2.4 Κατασκευή βάσης στήριξης της πειραματικής διάταξης

Το παρόν εδάφιο ασχολείται με το σχεδιασμό και την κατασκευή της βάσης πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκε η κάμψη τριών σημείων. Όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, για το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας, ήταν επιθυμητή η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών με ανυποστήρικτο μήκος 1200mm. Η βάση, όμως, που διέθετε η υδραυλική μηχανή MTS του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας παρέχει μέγιστο ανυποστήρικτο μήκος (span) 304,4mm. Προέκυψε, λοιπόν, η ανάγκη κατασκευής μιας κατάλληλης βάσης ώστε να εκτελεστούν οι πειραματικές δοκιμές στο επιθυμητό ανυποστήρικτο μήκος. Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής

Τεχνολογίας ειδική βάση, η οποία προσφέρει δυνατότητα εκτέλεσης πειραματικών δοκιμών με μέγιστο ανυποστήρικτο μήκος 1400mm.

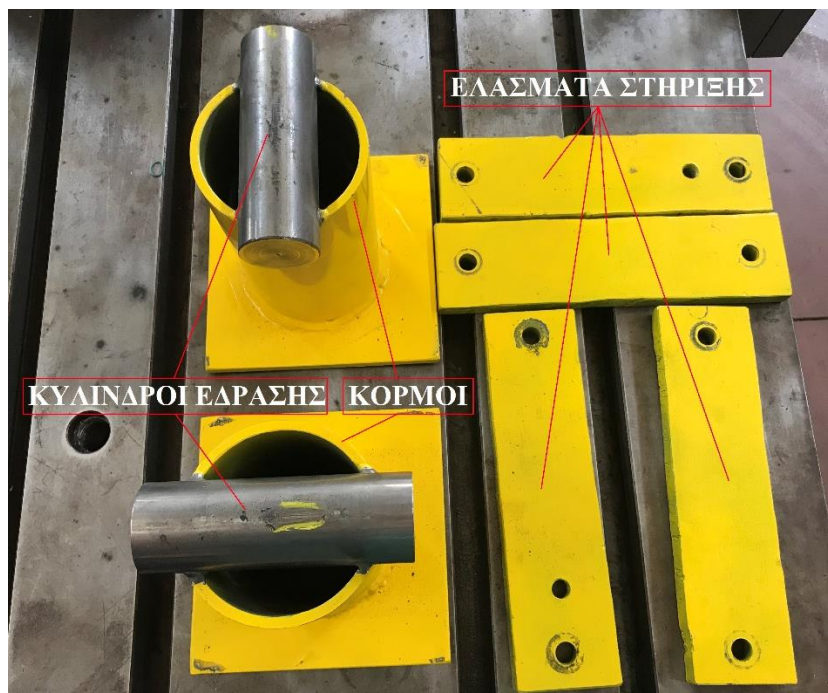
Η βάση αποτελείται από δύο όμοια στηρίγματα πάνω στα οποία εδράζονται τα δοκίμια κατά την εκτέλεση των πειραμάτων και από τέσσερα ελάσματα τα οποία με περαστούς κοχλίες συγκρατούν τα στηρίγματα στην τράπεζα της μηχανής. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται συναρμολογημένο το ένα σώμα της βάσης.



Σχήμα 2.12: Η βάση της πειραματικής διάταξης συναρμολογημένη στην τράπεζα της μηχανής

2.4.1 Καθορισμός στοιχείων βάσης

Η βάση αναλύεται στην επιμέρους σχεδίαση των τριών βασικών μερών της, τον κορμό, τους κυλίνδρους και τα ελάσματα που τη συγκρατούν, όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Τα μέρη της βάσης

Ο κορμός αποτελεί το κύριο σώμα της κατασκευής. Χαρακτηρίζεται ως το στοιχείο που στηρίζει τους κυλίνδρους, πάνω στους οποίους πραγματοποιείται η κάμψη τριών σημείων. Προκειμένου η βάση να είναι λειτουργική και αποτελεσματική, ο κορμός πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες προϋποθέσεις. Καταρχάς, να είναι φορητός ώστε να μπορεί να στερεωθεί σε διαφορετικά σημεία πάνω στην τράπεζα της μηχανής, προσφέροντας κάθε φορά το επιθυμητό ανυποστήριχτο μήκος. Έπειτα, απαραίτητο είναι να διαθέτει επαρκές ύψος (πάνω από 150mm), ούτως ώστε να υπάρχει περιθώριο ανάπτυξης μεγάλου βέλους κάμψης των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Επίσης, πρέπει να είναι αρκετά στιβαρός ώστε να αντέχει τα φορτία που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος, επιλέχθηκαν από την αποθήκη του Εργαστηρίου Ναυτικής Τεχνολογίας δύο όμοιες κατασκευές που θα μπορούσαν με κατάλληλη κατεργασία να αποτελέσουν τον κορμό της βάσης. Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζονται οι κορμοί της βάσης πριν διαμορφωθούν. Επρόκειτο για δύο κοίλους κυλίνδρους με εξωτερική διάμετρο 115mm και εσωτερική διάμετρο 103mm που ήταν συγκολλημένοι με μία τετραγωνική επίπεδη μεταλλική πλάκα, με μήκος πλευράς 202mm. Οι κοίλοι κύλινδροι, κατόπιν διαμόρφωσης, θα μπορούσαν να υποδεχθούν στην κορυφή τους κυλίνδρους έδρασης της κάμψης τριών σημείων, ενώ η μεταλλική πλάκα θα μπορούσε να εξυπηρετήσει στην στερέωση όλη της κατασκευής στην τράπεζα της μηχανής.



Σχήμα 2.14: Οι κορμοί της βάσης πριν διαμορφωθούν

Το δεύτερο βασικό μέρος της βάσης αποτελούν οι κύλινδροι. Στην κάμψη τριών σημείων απαιτούνται τρεις όμοιοι κύλινδροι. Στους δύο εδράζεται το δοκίμιο και ο τρίτος μεταφέρει τη δύναμη από την υδραυλική μηχανή στο δοκίμιο. Για τον σκοπό αυτό επελέγη συμπαγής μεταλλικός άξονας διαμέτρου 50mm. Η διάμετρος ήταν επιθυμητό να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να περιοριστούν κατά το δυνατόν τα τοπικά στοιχεία παραμόρφωσης.

Τρίτο στοιχείο της βάσης είναι τα ελάσματα με τα οποία στερεώνεται η βάση στην τράπεζα της μηχανής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, τα ελάσματα έχουν οπές από τις οποίες διέρχονται περαστοί κοχλίες. Οι κοχλίες συσφίγγονται σε οδηγούς σπειρώματος, οι οποίοι είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι, ώστε να εισέρχονται στις εγκοπές που διαθέτει η τράπεζα της μηχανής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Οι εγκοπές της τράπεζας της μηχανής και οι οδηγοί σπειρώματος

Τα ελάσματα επομένως, έπρεπε να έχουν πλάτος παραπλήσιο με αυτό της ελεύθερης επιφάνειας της πλάκας του κορμού, ώστε να γίνεται καλή επαφή μεταξύ τους, και μήκος μεγαλύτερο από την απόσταση των εγκοπών της τράπεζας της μηχανής που είναι 255 mm. Επιλέχθηκαν, από την αποθήκη του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, δύο επιμήκη ελάσματα πλάτους 82 mm τα οποία θα διαμορφώνονταν μηχανουργικά στα επιθυμητά στηρίγματα.

2.4.2 Κατασκευή

Για να αποκτήσει η βάση την τελική της μορφή και να πληροί όλα τα σχεδιαστικά κριτήρια που αναφέρθηκαν έγινε μια σειρά από μηχανουργικές εργασίες. Όλες οι εργασίες πραγματοποιήθηκαν εντός του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

Εργασίες κοπής:

Οι εργασίες κοπής έγιναν στο υδραυλικό σιδηροπρίονο **CARIF 200**.

- Ο κοίλος κύλινδρος του ενός κορμού κόπηκε όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16, ώστε οι δύο κορμοί να έχουν ίδιο ύψος. Το τελικό ύψος των κορμών ήταν 200 mm.
- Από τον άξονα κόπηκαν τρία ίσα τμήματα μήκους 150 mm, ώστε να αποτελέσουν τους τρεις κυλίνδρους που απαιτούνται στη δοκιμή κάμψης τριών σημείων.
- Από τα ελάσματα συγκράτησης κόπηκαν τμήματα μήκους 305 mm.

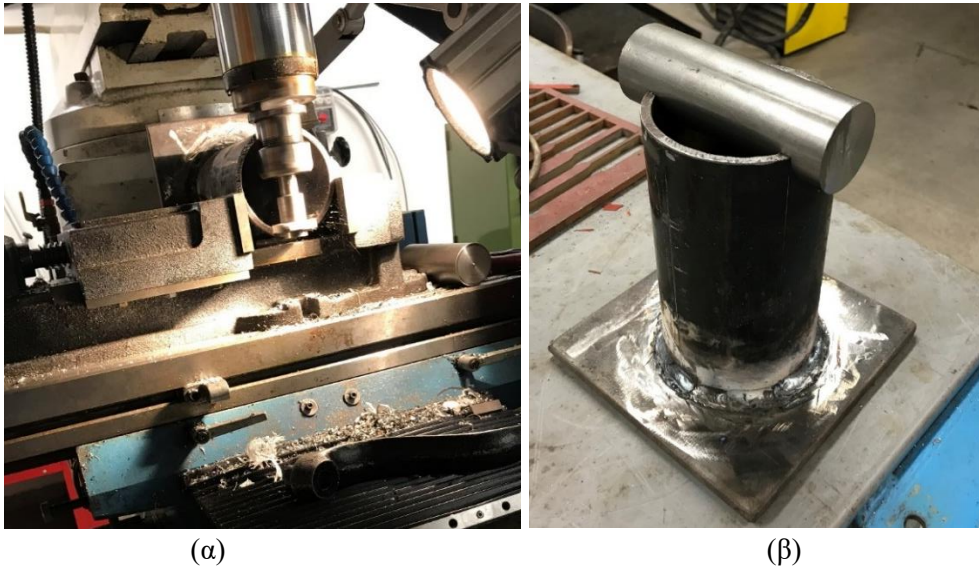


Σχήμα 2.16: Ο κορμός της βάσης στο υδραυλικό σιδηροπρίονο

Εργασίες διάνοιξης οπών

Οι εργασίες έγιναν στη φρέζα της μονάδας κοπής του Εργαστηρίου Ναυτικής Τεχνολογίας.

- Σε κάθε έλασμα ανοίχτηκαν δύο διαμετρείς οπές διαμέτρου 16mm, με απόσταση 255mm. Η απόσταση μεταξύ των οπών είναι ίδια με την απόσταση των δύο κεντρικών εγκοπών στην τράπεζα της μηχανής.
- Στην κορυφή των κορμών ανοίχτηκαν ημικυκλικές εγκοπές, διαμέτρου 50mm, ώστε να τοποθετηθούν οι κύλινδροι έδρασης. Στο Σχήμα 2.17 (α) παρουσιάζεται η διάνοιξη των εγκοπών, ενώ στο Σχήμα 2.17 (β) παρουσιάζεται η εφαρμογή του κυλίνδρου στις εγκοπές του κορμού.



Σχήμα 2.17: (α) Ο κορμός στη φρέζα (β) Εφαρμογή του κυλίνδρου μετά την δημιουργία εγκοπής

Εργασίες συγκόλλησης

Οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο τηκόμενου ηλεκτροδίου.

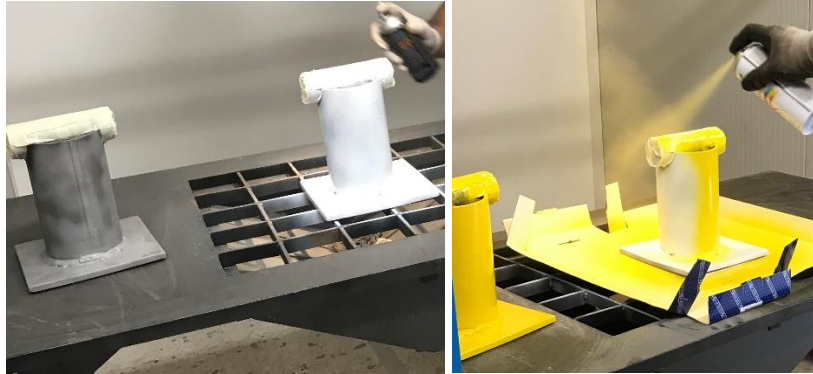
- Ενισχύθηκε η υπάρχουσα συγκόλληση των κοίλων κυλίνδρων των κορμών στην μεταλλική πλάκα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Στο Σχήμα 2.17 (β) διακρίνεται το τελικό αποτέλεσμα.
- Οι κύλινδροι έδρασης συγκολλήθηκαν πάνω στον κορμό, προκειμένου να μην υπάρχει δυνατότητα μετατόπισης τους υπό την επίδραση των φορτίων της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 2.18: Συγκόλληση του κορμού

Εργασίες Βαφής

Μετά το πέρας των μηχανουργικών εργασιών, ο κορμός και τα ελάσματα συγκράτησης βάφτηκαν προκειμένου να αποφευχθεί η σκουριά και για αισθητικούς λόγους. Στο Σχήμα 2.19 φαίνεται η διαδικασία βαφής της βάσης.



Σχήμα 2.19: Η βαφή της βάσης

2.4.3 Έλεγχος αντοχής

Στο υπό- εδάφιο αυτό, με αναλυτικές εξισώσεις εξετάζεται αν τα στοιχεία της βάσης μπορούν να υποστηρίξουν τα ασκούμενα φορτία κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Ως κριτήριο αντοχής ελέγχεται αν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε κρίσιμα στοιχεία της βάσης, κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, υπερβαίνουν το όριο διαρροής (σ_0) του χάλυβα, που εκτιμήθηκε ίσο με 235 MPa. Τα στοιχεία που θα ελεγχθούν σε αντοχή είναι:

- Ο κούλος κύλινδρος του κορμού της βάσης σε στατική καταπόνηση θλίψης
- Ο συμπαγής κύλινδρος έδρασης σε στατική καταπόνηση διάτμησης και κάμψης

Στον έλεγχο αντοχής εφαρμόζεται η εξής μεθοδολογία. Αρχικά υπολογίζονται τα φορτία που καταπονούν τη βάση κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Χρησιμοποιώντας το φορτίο αυτό, αυξημένο με έναν συντελεστή ασφαλείας, υπολογίζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται στα επιμέρους τμήματα της βάσης. Τέλος, οι τάσεις αυτές συγκρίνονται με το όριο διαρροής.

Για τους υπολογισμούς που ακολουθούν εφαρμόζεται το εξής σύστημα μονάδων μέτρησης:

- Μονάδα μέτρησης μήκους: 1 mm ($1 \text{ m} \cdot 10^{-3}$)
- Μονάδα μέτρησης επιφάνειας: 1 mm²
- Μονάδα μέτρησης δύναμης: 1 N
- Μονάδα μέτρησης τάσεων: 1 MPa

Εκτίμηση μέγιστου ασκούμενου φορτίου:

Για να γίνει ο έλεγχος αντοχής, πρέπει πρώτα να εκτιμηθούν οι δυνάμεις που ασκούνται κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Για τον σκοπό αυτό, θα υπολογιστεί το ελάχιστο φορτίο για το οποίο η ορθή τάσης λόγω κάμψης υπερβαίνει το όριο διαρροής της κάθε χαλύβδινης δοκού.

Η ορθή τάση που αναπτύσσεται λόγω κάμψης στη δοκό δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_M = M \cdot \frac{z}{I} \quad (2.5)$$

Όπου:

- M η ασκούμενη ροπή κάμψης
- I η ροπή αδράνειας της διατομής σε άξονα κάθετο στο επίπεδο της κάμψης (mm^4)
- z η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα της δοκού

Η ροπή κάμψης, M , συνδέεται από ισορροπία δυνάμεων με το ασκούμενο φορτίο από την υδραυλική μηχανή μέσω του τύπου:

$$P = M \cdot \frac{4}{L} \quad (2.6)$$

Όπου, L είναι το ανυποστήρικτο μήκος της δοκού.

Εκτελώντας τις πράξεις, προκύπτει ότι το ελάχιστο απαιτούμενο φορτίο για να υπερβούμε το όριο διαρροής λόγω ορθής τάσης είναι σε κάθε δοκό είναι:

$$\begin{aligned} P_{\min_IPE} &= 26.790 \text{ N, για τη δοκό διατομής IPE} \\ P_{\min_O} &= 16.900 \text{ N, για την δοκό κοίλης τετραγωνικής διατομής} \end{aligned}$$

Το φορτίο αυτό επαυξάνεται με συντελεστή ασφαλείας 2. Ο συντελεστής αυτός συνυπολογίστηκε για τους εξής λόγους. Πρώτον, λόγω ασφάλειας της κατασκευής. Δεύτερον, ώστε να υπάρχει περιθώριο να ασκηθούν μεγαλύτερα φορτία και να είναι πιο έντονα τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Τρίτον, διότι με την ενίσχυση δοκών με επιθέματα CFRP, πιθανόν να απαιτηθεί η άσκηση μεγαλύτερων φορτίων ώστε προκύψουν τα επιθυμητά πειραματικά αποτελέσματα

Υποθέτουμε, ακόμα, ότι το κατακόρυφο φορτίο που ασκεί η υδραυλική μηχανή κατανέμεται ίσα στα δύο μέρη της βάσης, επομένως, σε καθένα από αυτά ασκείται τελικώς, κατακόρυφη δύναμη $P=26.790\text{N}$.

Αντοχή κορμού

Ο κορμός θα ελεγχθεί σε αντοχή έναντι θλίψης. Θεωρούμε ότι το φορτίο παραλαμβάνεται από το σύνολο της επιφάνειας του κοίλου κυλίνδρου. Η τάση που αναπτύσσεται από το ασκούμενο φορτίο λόγω θλίψης δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_c = \frac{P}{A_{\kappa\kappa}} \quad (2.7)$$

Όπου $A_{\kappa\kappa}$, η επιφάνεια διατομής του κοίλου κυλίνδρου.

Προκύπτει $\sigma_c=13,05 \text{ MPa} < 235 \text{ MPa}$

Αντοχή κυλίνδρων έδρασης

Για τους κυλίνδρους έδρασης θεωρούμε τη χειρότερη περίπτωση όπου το φορτίο ασκείται συγκεντρωμένο στο μέσον του μήκους τους. Το ανυποστήρικτο μήκος των κυλίνδρων είναι όσο η εσωτερική διάμετρος του κοίλου κυλίνδρου του κορμού, δηλαδή 103mm

- Τάσεις λόγω διάτμησης:

Η τάση που αναπτύσσεται από το ασκούμενο φορτίο λόγω διάτμησης δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_\tau = \frac{P}{A_{\kappa\epsilon}} \quad (2.8)$$

Όπου, P το ασκούμενο φορτίο και $A_{κε}$ η επιφάνεια της διατομής του κυλίνδρου έδρασης. Προκύπτει $\sigma_r=13,64 \text{ MPa}$

➤ Ορθές τάσεις λόγω κάμψης

Για τον προσδιορισμό της ορθής τάσης λόγω κάμψης θα χρησιμοποιηθεί η εξ. (2.5) Η αναπτυσσόμενη ροπή κάμψης από το φορτίο δίνεται από την εξ. (2.6), όπου θεωρούμε ότι το ανυποστήρικτο μήκος είναι όσο η εσωτερική διάμετρος του κοίλου κυλίνδρου, δηλαδή, 103mm.

Από την εκτέλεση των πράξεων, προκύπτει $\sigma_M=17,89 \text{ MPa}$

➤ Σύνθεση τάσεων:

Για την εύρεση της συνολικής καταπόνησης που υφίσταται ο κύλινδρος, οι τάσεις που υπολογίστηκαν παραπάνω συντίθενται με το κριτήριο Von Misses. Αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_v^2} \quad (2.9)$$

Με εκτέλεση των πράξεων, προκύπτει τελικώς $\sigma_{total}= 22,51 \text{ MPa} < 235 \text{ MPa}$

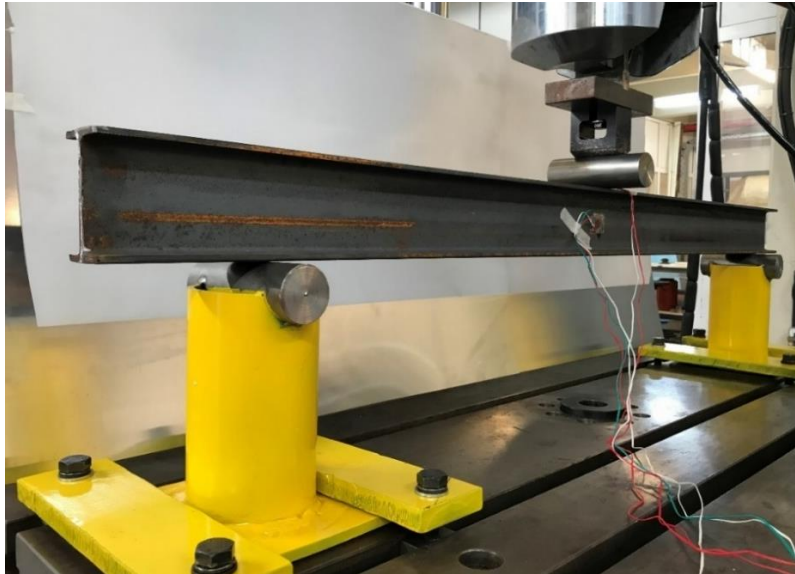
Από τα αριθμητικά αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι η βάση αντέχει με ασφάλεια τις αναπτυσσόμενες καταπονήσεις.

2.5 Παράμετροι δοκιμών και περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων στην υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS μέγιστου φορτίου 250kN. Η λειτουργία της μηχανής εκτελείται αυτοματοποιημένα μέσω ψηφιακών ελεγκτών, ενώ μέσω λογισμικού πραγματοποιείται η ρύθμιση, η καταγραφή και η παρακολούθηση των μετρήσεων. Μέσω του LVDT και των Strain Gauges λήφθηκαν μετρήσεις για το βέλος κάμψης και των εκάστοτε παραμορφώσεων συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης. Η υδραυλική μηχανή MTS καταγράφει, επίσης, την μετατόπιση του εμβόλου. Το αποτέλεσμα, όμως, αυτής της μέτρησης επηρεάζεται όχι μόνο από το βέλος κάμψης των δοκιμών, αλλά και από τις τοπικές παραμορφώσεις που εμφανίζονται στην περιοχή επιβολής του φορτίου. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης, που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3, πραγματοποιήθηκε με τις μετρήσεις του LVDT.

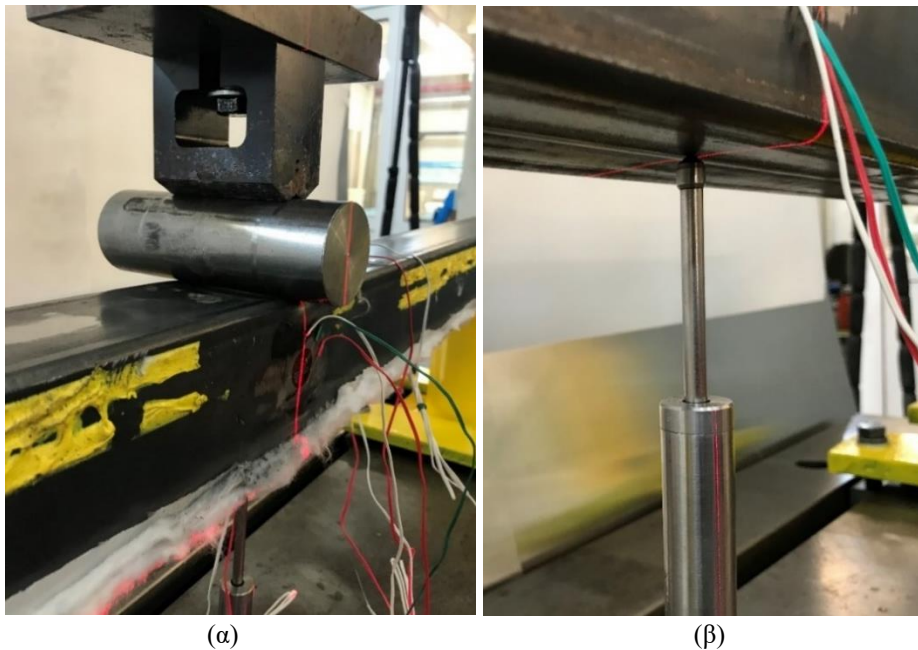
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το LVDT μετράει το αναπτυσσόμενο βέλος κάμψης στο μέσον της κάτω πλευράς του κάθε δοκιμίου. Ωστόσο, στα ενισχυμένα δοκίμια που πραγματοποιήθηκε αποκόλληση του επιθέματος, τα καταγραφόμενα αποτελέσματα δεν αναπαριστούν το βέλος κάμψης του δοκιμίου μετά από αυτήν, καθώς το αποκολλημένο επίθεμα μετακινεί το LVDT και επηρεάζει τις μετρήσεις. Για τον λόγο αυτό, στα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης των ενισχυμένων δοκιμών που συνέβη αποκόλληση του επιθέματος, παρατίθεται και η καμπύλη δύναμης- μετατόπισης του εμβόλου της μηχανής, για καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των δοκιμών μετά την αποκόλληση.

Τα συστήματα καταγραφής ήταν πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους. Η συχνότητα δειγματοληψίας ορίστηκε στα 5 Hz για τις δύο πειραματικές δοκιμές αναφοράς (IPE Reference, O Reference), αλλά θεωρήθηκε πολύ πυκνή, οπότε μεταβλήθηκε στα 2Hz για τις υπόλοιπες δοκιμές ώστε να ελαττωθεί ο όγκος των πειραματικών δεδομένων.



Σχήμα 2.20: Το δοκίμιο IPE Reference πριν την εκτέλεση της πειραματικής δοκιμής

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν προσεκτικά στη βάση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.20, και ευθυγραμμίστηκαν ώστε η διεύθυνση του πλάτους να είναι παράλληλη με τη διεύθυνση των κυλίνδρων στήριξης (rollers). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε τα Strain Gauge 1-3 να είναι ευθυγραμμισμένα με τον κύλινδρο άσκησης δύναμης (pusher). Η τελευταία διαδικασία έγινε με χρήση του αλαφριού λέιζερ **GLL 2-15** της εταιρίας BOSCH, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21 (α). Στη συνέχεια, για κάθε δοκίμιο μετρήθηκε η πραγματική θέση του LVDT, ως προς το μήκος, σε σχέση με το σημείο άσκησης δύναμης. Η μέτρηση αυτή έγινε μετρώντας την απόσταση του LVDT από την ακτίνα λέιζερ με την οποία είχε ευθυγραμμιστεί το δοκίμιο με τον pusher, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.21 (β). Ακόμα, πριν την εκτέλεση οποιασδήποτε δοκιμής, μετρήθηκε και καταγράφηκε το πραγματικό ανυποστήρικτο μήκος. Το εν λόγω μέγεθος ήταν πιθανό να παρουσιάσει μικρή απόκλιση από την ονομαστική του τιμή, λόγω των φορτίων που παραλαμβάνει η βάση κατά τη διαδικασία των δοκιμών. Οι πειραματικές δοκιμές εκτελέστηκαν με την επιβολή γραμμικά αυξανόμενης κατακόρυφης μετατόπισης του εμβόλου της μηχανής. Η ταχύτητα καθόδου του εμβόλου ορίστηκε για όλες τις δοκιμές ίση με 1.0 mm/min.



(α)

(β)

Σχήμα 2.21: (α) Ευθυγράμμιση δοκιμίου O3 με βοήθεια ακτίνας λέιζερ (β) Το LVDT σε σχέση με την ακτίνα λέιζερ ευθυγράμμισης

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται το ανυποστήρικτο μήκος και η απόσταση του LVDT από τον μέσον του δοκιμίου, όπως μετρήθηκαν για κάθε δοκίμιο πριν την έναρξη της πειραματικής δοκιμής

Πίνακας 2.9: Παράμετροι πειραματικών δοκιμών

Όνομα Δοκιμίου	Ανυποστήρικτο μήκος (mm)	Απόσταση LVDT από το κέντρο (mm)
IPE Reference	1202	8
IPE2	1204	6
IPE3	1204	0
IPE4	1204	4
O Reference	1202	4
O2	1204	3
O3	1204	2
O4	1204	2

Σημειώνεται ότι οι παράμετροι του Πίνακα 2.9 λαμβάνονται υπόψιν και στην μοντελοποίηση του προβλήματος με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

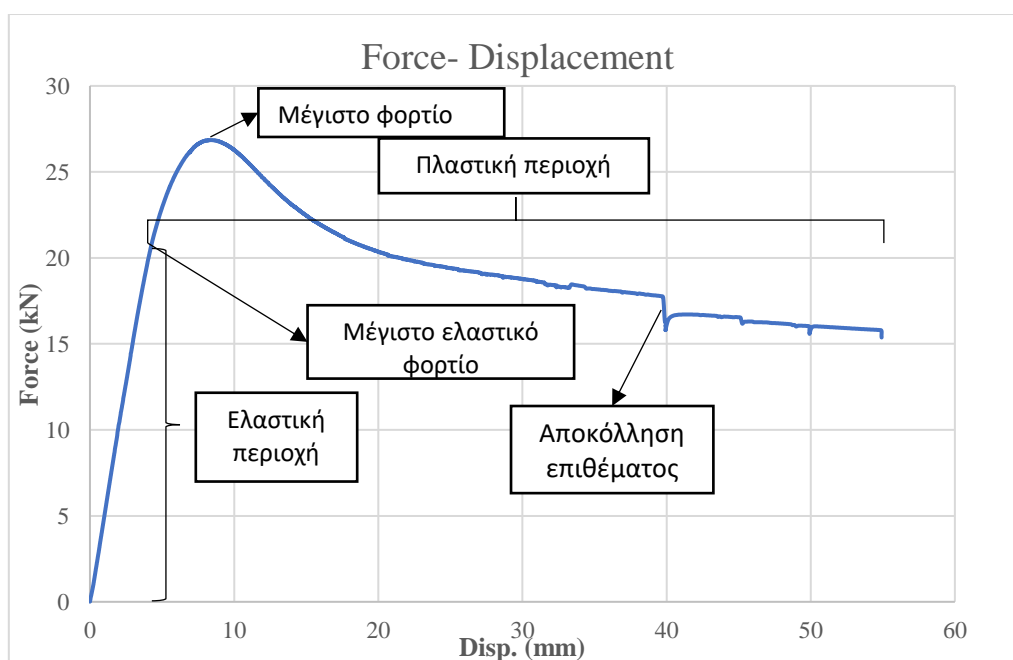
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών κάμψης τριών σημείων. Στο Εδάφιο 3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων βέλους κάμψης, ενώ στο Εδάφιο 3.2 τα αποτελέσματα των μετρήσεων παραμορφώσεων. Τέλος, στο Εδάφιο 3.3 πραγματοποιείται έλεγχος με υπερήχους στα δοκίμια που δεν αποκόλληθηκε το επίθεμα κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών ώστε να ελεγχθούν για αστοχίες του κολλητού συνδέσμου.

3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων βέλους κάμψης

Στο εδάφιο αυτό μελετώνται τα αποτελέσματα των μετρήσεων βέλους κάμψης όπως αυτά μετρήθηκαν από το LVDT κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρθηκε στο Εδάφιο 2.5, στα δοκίμια όπου πραγματοποιήθηκε αποκόλληση του επιθέματος, παρατίθεται και το διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης του εμβόλου της υδραυλικής μηχανής MTS. Για κάθε δοκίμιο παρουσιάζεται το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης, καθώς και μία εικόνα από το τελικό στάδιο της πειραματικής δοκιμής του. Στο τέλος του εδαφίου, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για όλα τα δοκίμια ίδιας διατομής, καθώς και σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμών.

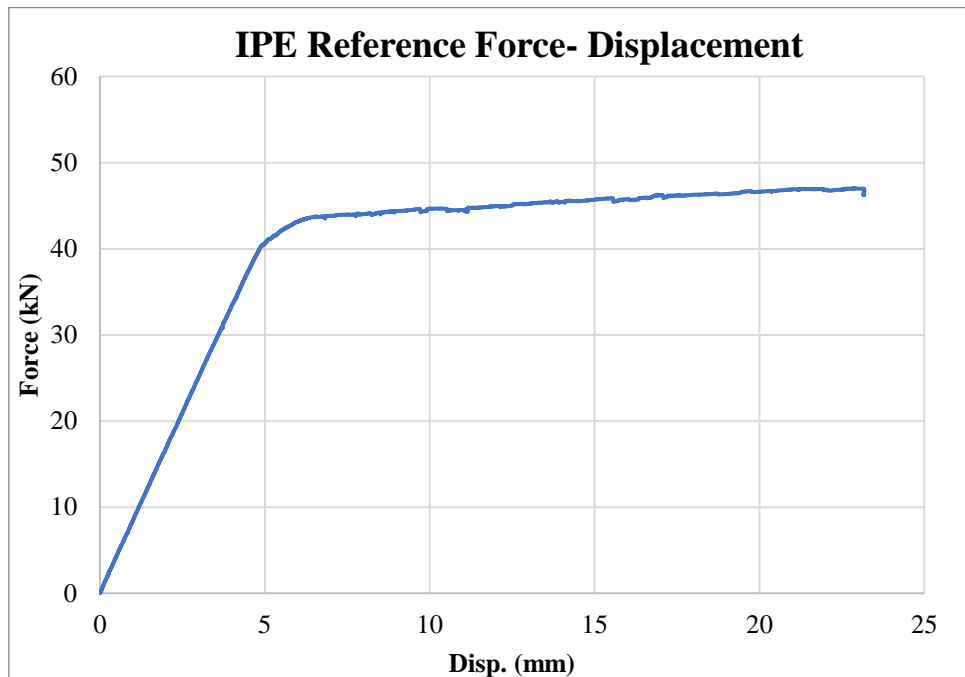
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, σε κάθε διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης παρατηρείται μια ελαστική και μία πλαστική περιοχή. Ως ελαστική ορίζουμε την περιοχή στην οποία η καμπύλη δύναμης μετατόπισης είναι ευθεία γραμμή, ενώ ως πλαστική την περιοχή όπου η συμπεριφορά της καμπύλης είναι μη- γραμμική. Το φορτίο στο οποίο το δοκίμιο μεταβαίνει από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, ονομάζεται μέγιστο ελαστικό φορτίο. Επίσης, σε κάθε διάγραμμα εμφανίζεται ένα μέγιστο φορτίο. Επιπρόσθετα, σε κάθε διάγραμμα, η δύναμη συνεχώς αυξάνεται συναρτήσει του βέλους κάμψης έως ότου συναντήσει το μέγιστο φορτίο. Μετά το μέγιστο φορτίο, το δοκίμιο «καταρρέει», δηλαδή η δύναμη συνεχώς μειώνεται με την αύξηση του βέλους κάμψης.



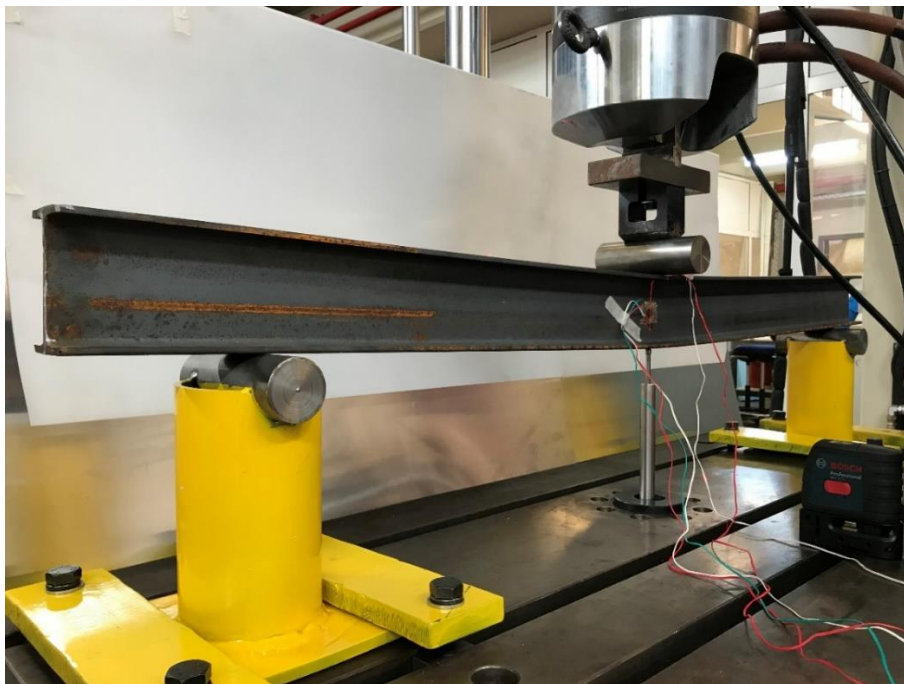
Σχήμα 3.1: Τυπική μορφή διαγράμματος δύναμης- βέλους κάμψης

3.1.1 Δοκίμια IPE

Στο υπό- εδάφιο αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης των δοκιμίων IPE, καθώς και εικόνες των δοκιμίων στο τέλος της πειραματικής δοκιμής.

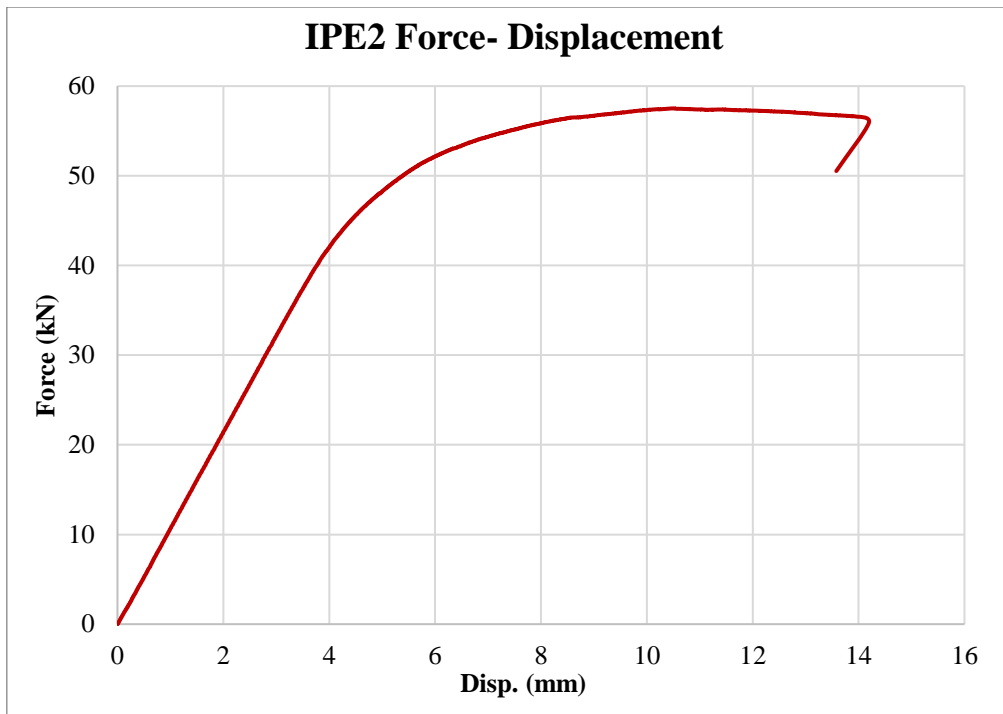


Σχήμα 3.2: Το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης του δοκιμίου IPE Reference

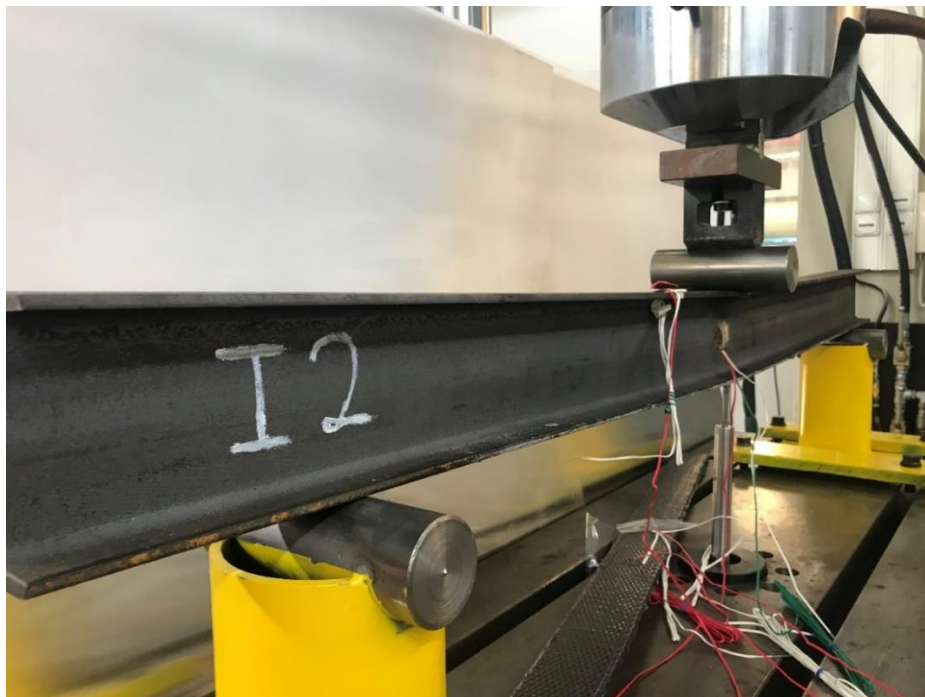


Σχήμα 3.3: Το δοκίμιο IPE Reference στο τέλος της πειραματικής δοκιμής

Παρατηρούμε στο Σχήμα 3.2 ότι το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης δεν παρουσιάζει πουθενά μέγιστο. Η δύναμη συνεχίζει διαρκώς να αυξάνεται συναρτήσει του βέλους κάμψης στην πλαστική περιοχή με μικρή κλίση. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται το δοκίμιο IPE Reference στο τέλος της πειραματικής δοκιμής.

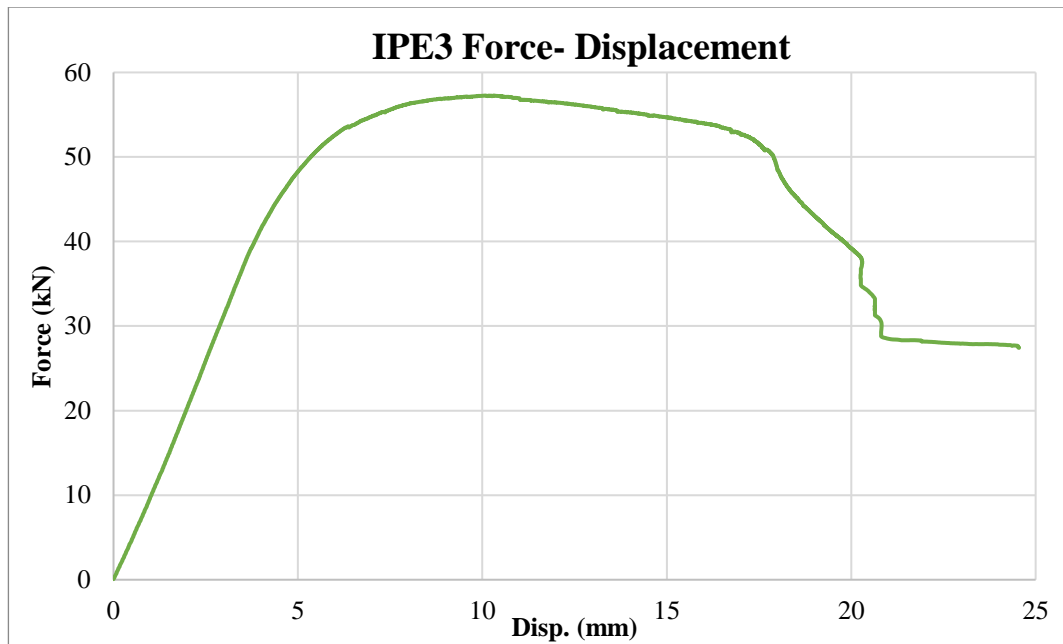


Σχήμα 3.4: Το διάγραμμα δύναμης - βέλους κάμψης για το δοκίμιο IPE2

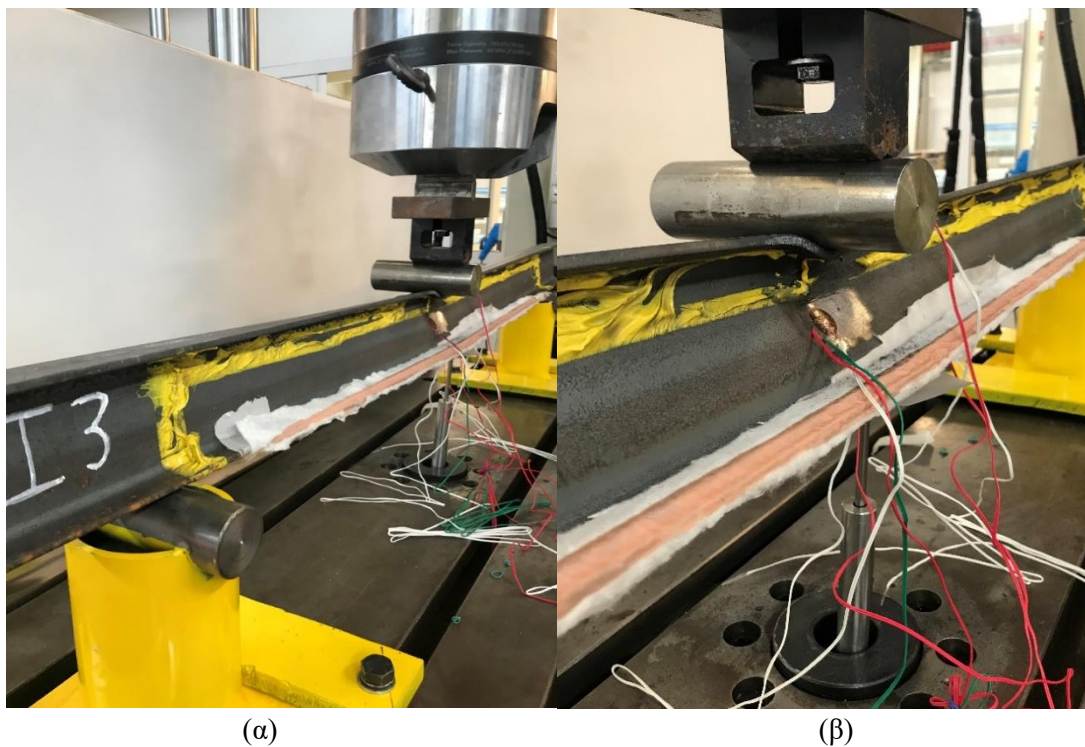


Σχήμα 3.5: Το δοκίμιο IPE2 στο τέλος της πειραματικής δοκιμής

Στο διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης του δοκιμίου IPE2 (Σχήμα 3.4) παρατηρείται μέγιστο φορτίο 57,52 kN, σε βέλος κάμψης 10,71 mm. Όταν το βέλος κάμψης πάρει την τιμή 14,19 mm, το επίθεμα αποκολλάται ολόκληρο και ακαριαία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Σύντομα μετά την αποκόλληση του επιθέματος, η δοκιμή ολοκληρώθηκε. Παρατηρείται επίσης πιο ομαλή μετάβαση στην πλαστική περιοχή από ότι στο δοκίμιο IPE Reference

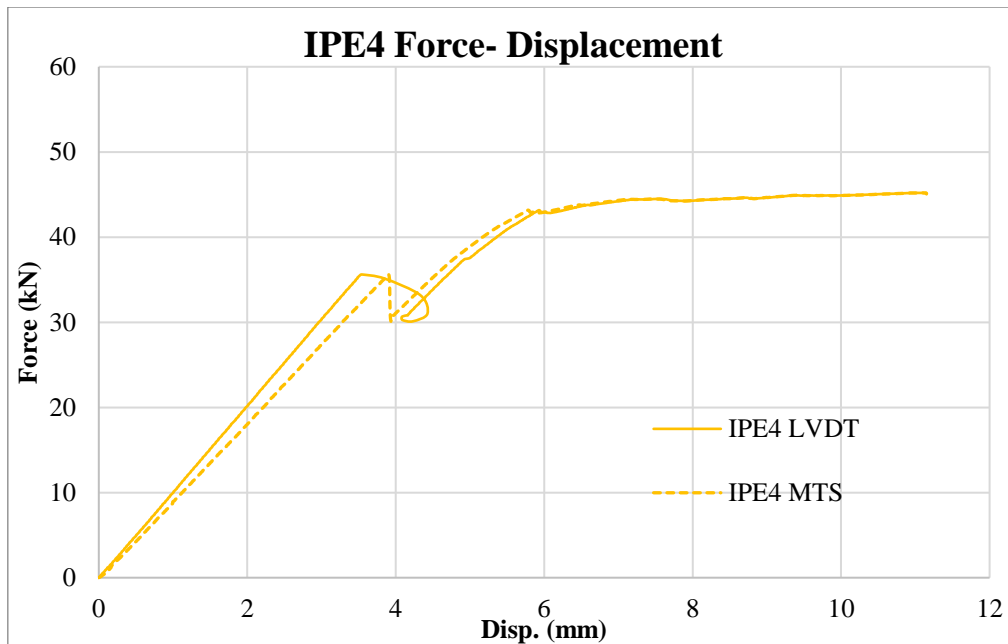


Σχήμα 3.6: Το διάγραμμα δύναμης - βέλους κάμψης για το δοκίμιο IPE 3

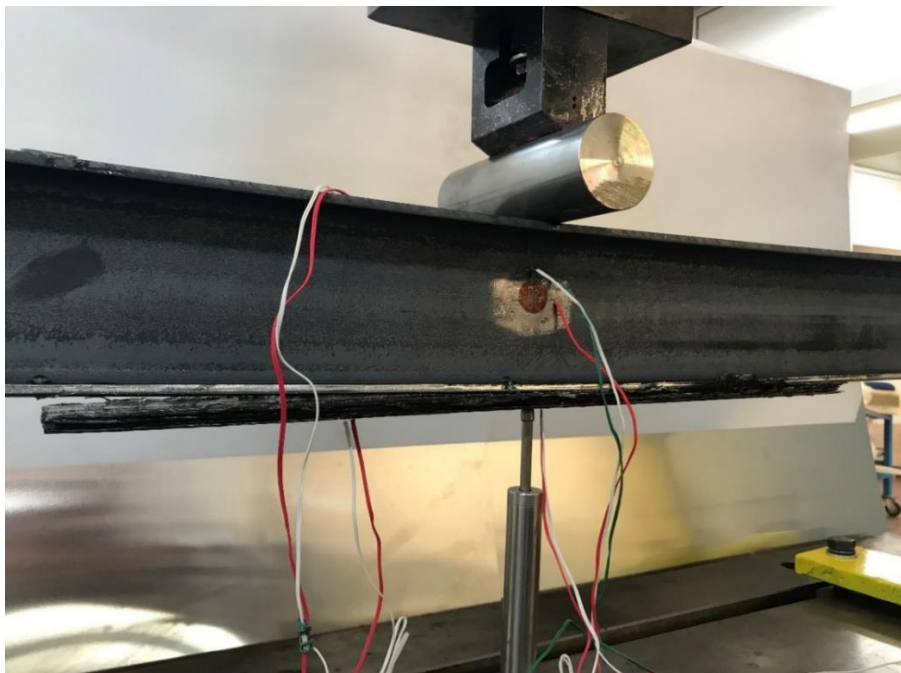


Σχήμα 3.7: (α) Το δοκίμιο IPE 3 στο τέλος της πειραματικής δοκιμής
(β) Η περιοχή κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης στο τέλος της πειραματικής δοκιμής του IPE3

Στο δοκίμιο IPE3 παρατηρείται μέγιστο φορτίο 57,25 kN σε βέλος κάμψης 10,66 mm. Το επίθεμα του συγκεκριμένου δοκιμίου δεν αποκολλήθηκε από τη χαλύβδινη δοκό. Για τον λόγο αυτό, η δοκιμή συνεχίστηκε για μεγάλες μετατοπίσεις του εμβόλου της μηχανής. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης, Σχήμα 3.6, μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, η καταγραφόμενη δύναμη συνεχώς μειώνεται, γεγονός που οφείλεται στην τοπική πλαστική διαρροή της χαλύβδινης δοκού. Στο Σχήμα 3.7 (α) φαίνεται το δοκίμιο IPE 3 στο τέλος της πειραματικής δοκιμής. Η μεγάλη τοπική πλαστική διαρροή της χαλύβδινης δοκού φαίνεται και οπτικά από την τελική κατάσταση του δοκιμίου στο Σχήμα 3.7 (β).



Σχήμα 3.8: Το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης για το δοκίμιο IPE4



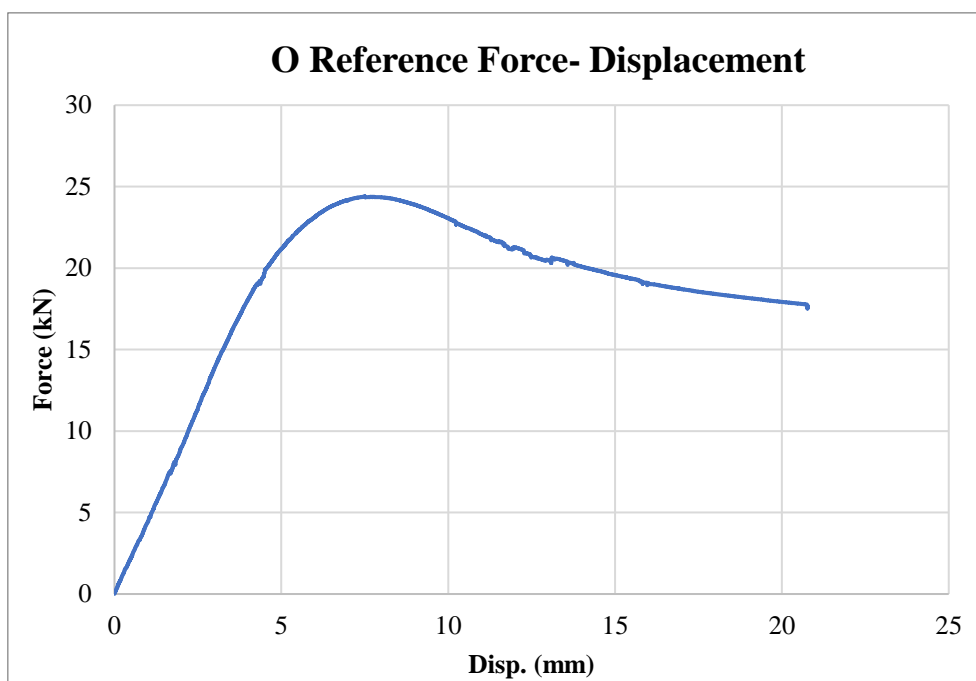
Σχήμα 3.9: Το δοκίμιο IPE4 μετά την αποκόλληση του επιθέματος

Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης στο Σχήμα 3.8, η αποκόλληση του επιθέματος στο δοκίμιο IPE 4 πραγματοποιήθηκε όσο αυτό βρισκόταν ακόμα στην ελαστική περιοχή, σε βέλος κάμψης 3,54 mm. Αμέσως μετά την αποκόλληση, η καμπύλη του LVDT καταγράφει μετρήσεις που δεν αντιπροσωπεύουν το βέλος κάμψης του δοκιμίου, διότι το LVDT μετακινείται από το αποκολλώμενο επίθεμα. Αυτό, φυσικά, δεν παρατηρείται στην καμπύλη MTS όπου καταγράφεται μόνο πτώση της δύναμης λόγω αποκόλλησης του επιθέματος. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, η καμπύλη MTS δίνει μεγαλύτερες μετατοπίσεις, τουλάχιστον μέχρι την αποκόλληση, διότι περιλαμβάνει καταγράφει και τοπικές παραμορφώσεις του δοκιμίου.

Το επίθεμα, σε πρώτο στάδιο, δεν αποκολλήθηκε ολόκληρο (Σχήμα 3.9) ενώ στη συνέχεια της πειραματικής δοκιμής αποκολλήθηκε πλήρως. Η πειραματική δοκιμή συνεχίστηκε και μετά την αποκόλληση του επιθέματος.

3.1.2 Δοκίμια Ο

Στο υπό- εδάφιο αυτό παρατίθενται τα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης των δοκιμίων Ο, καθώς και εικόνες των δοκιμίων στο τέλος της πειραματικής δοκιμής.

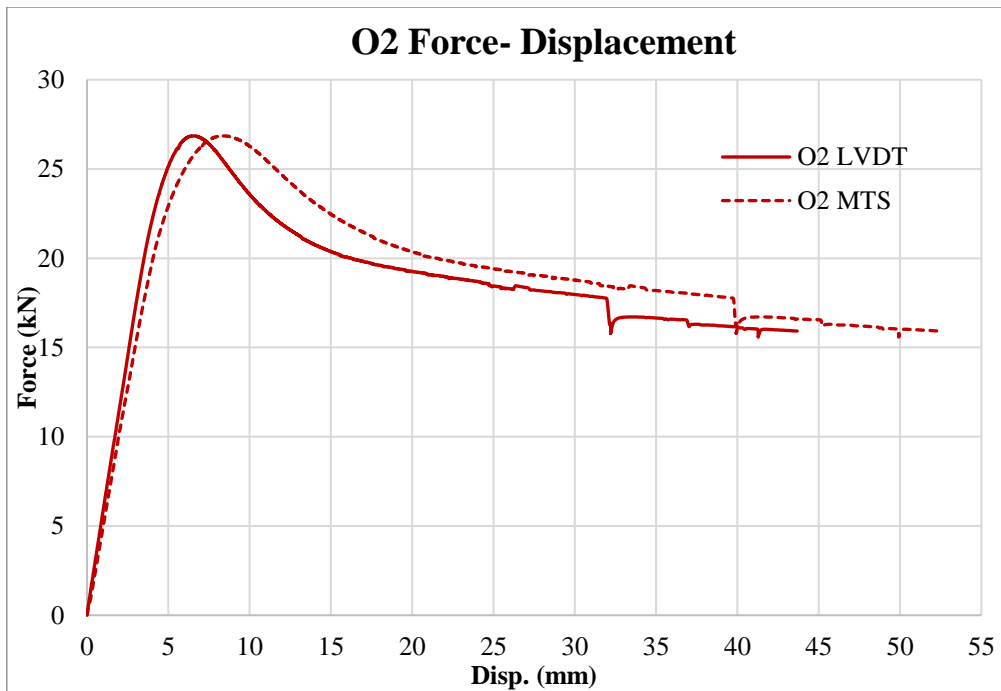


Σχήμα 3.10: Το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης για το δοκίμιο Ο Reference

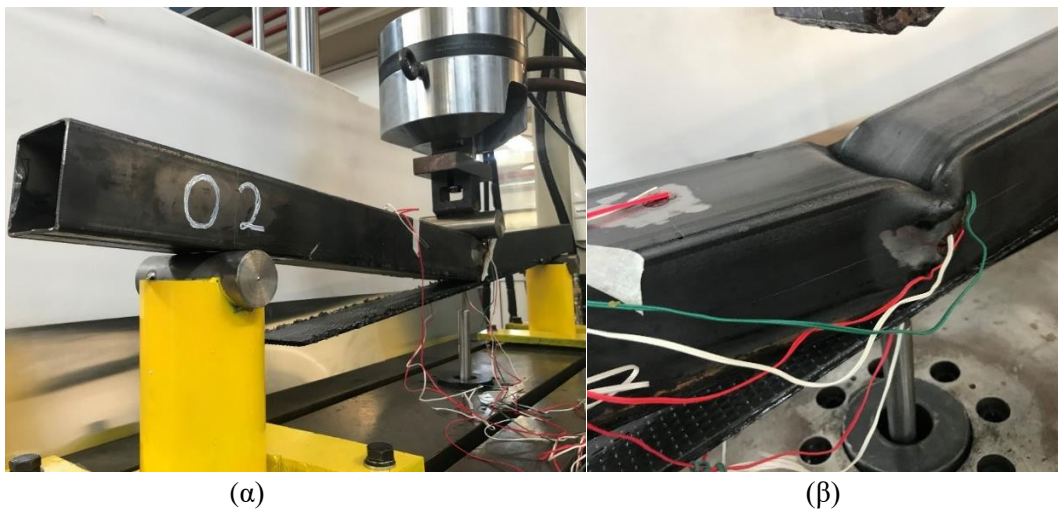


Σχήμα 3.11: Το δοκίμιο Ο Reference στο τέλος της πειραματικής δοκιμής

Το διάγραμμα δύναμης βέλους κάμψης (Σχήμα 3.10) παρουσιάζει μέγιστο φορτίο 24,41 kN σε βέλος κάμψης 10,51 mm. Μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, η δύναμη αντίστασης που προβάλλει η δοκός συνεχώς μειώνεται. Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται το δοκίμιο Ο Reference στο τέλος της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα 3.12: Το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης για το δοκίμιο O2



Σχήμα 3.13: (α) Το δοκίμιο O2 στο τέλος της πειραματικής δοκιμής (β) Τοπικές παραμορφώσεις στο δοκίμιο O2

Το διάγραμμα δύναμης βέλους κάμψης (Σχήμα 3.12) παρουσιάζει μέγιστο 26,85 kN σε βέλος κάμψης 6,48 mm. Η συμπεριφορά της καμπύλης είναι παρόμοια με αυτή του δοκιμίου O Reference. Το επίθεμα αποκολλήθηκε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13 (α), πολύ μετά την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, όταν το βέλος κάμψης πήρε την τιμή 15,89 mm. Στο Σχήμα 3.13 (β) φαίνονται οι τοπικές παραμορφώσεις του δοκιμίου O2 στην περιοχή κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης. Συγκρίνοντας τις καμπύλες LVDT και MTS του Σχήματος 3.12, παρατηρούμε πάλι πως στην καμπύλη MTS οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες λόγω των τοπικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο σημείο εφαρμογής της δύναμης.

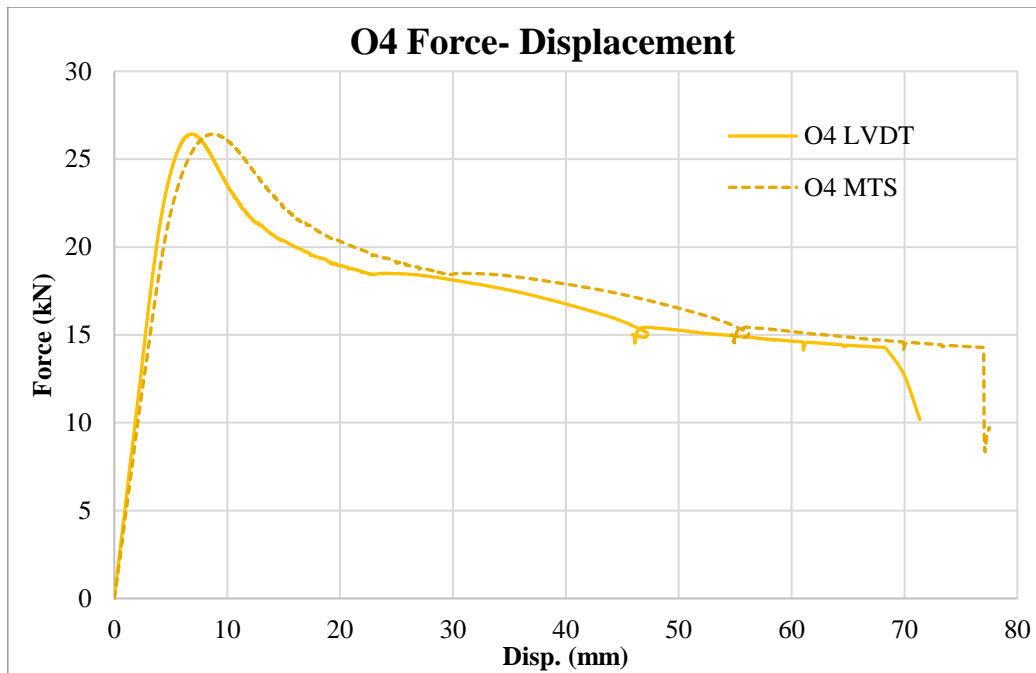


Σχήμα 3.14: Το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης για το δοκίμιο O3



Σχήμα 3.15: Το δοκίμιο O3 στο τέλος της πειραματικής δοκιμής

Το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης (Σχήμα 3.14) παρουσιάζει μέγιστο φορτίο 26,05 kN σε βέλος κάμψης 6,84 mm. Παρατηρείται επαναληψιμότητα ως προς τη μορφή του διαγράμματος και τη μηχανική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 3.15, παρατηρούμε πως το επίθεμα σε αυτό το δοκίμιο δεν αποκολλάται μέχρι την ολοκλήρωση της πειραματικής δοκιμής, η οποία συνεχίστηκε μέχρι αρκετά μεγάλες τιμές του βέλους κάμψης (74,7 mm).



Σχήμα 3.16: Το διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης για το δοκίμιο O4



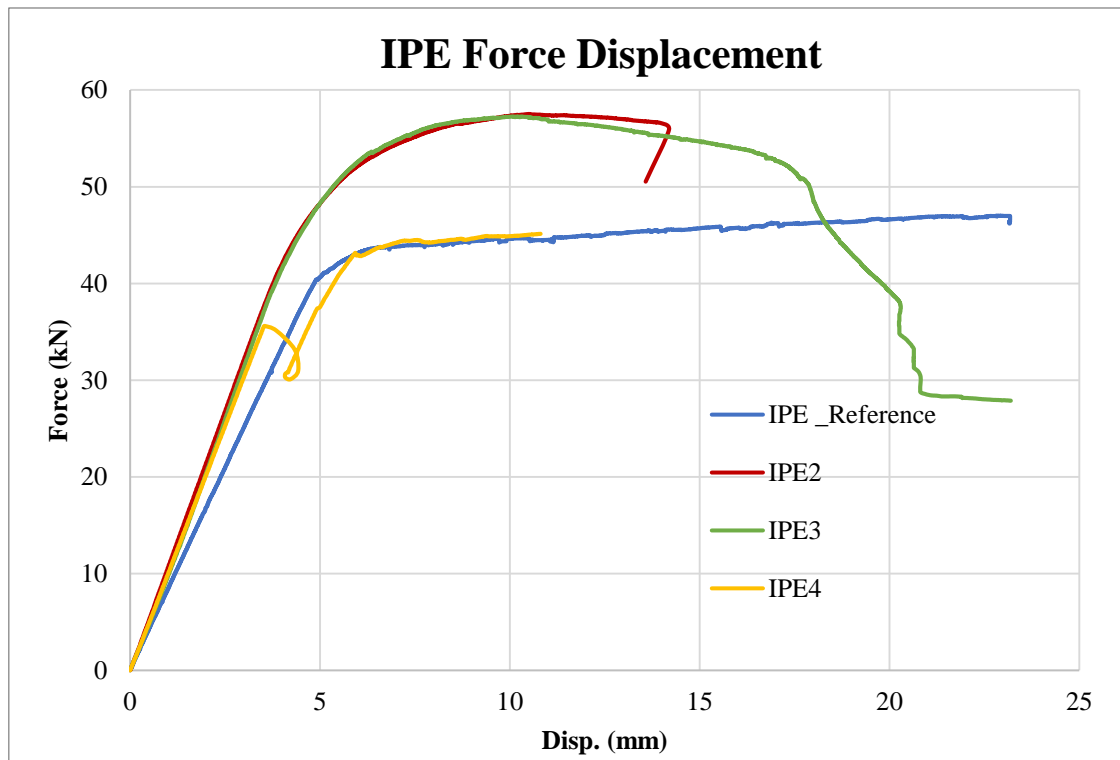
Σχήμα 3.17: Το δοκίμιο O4 μετά την αποκόλληση του επιθέματος

Στο Σχήμα 3.16 βλέπουμε πως και σε αυτό το δοκίμιο παρατηρείται πολύ καλή επαναληψιμότητα όσον αφορά τη μηχανική συμπεριφορά και τη μορφή του διαγράμματος δύναμης- βέλους κάμψης. Το μέγιστο φορτίο 25,42 kN εμφανίζεται σε βέλος κάμψης 6,74 mm. Το επίθεμα επικολλήθηκε αρχικά από τη μία πλευρά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, όταν το βέλος κάμψης ήταν 47,07 mm, και στη συνέχεια της πειραματικής δοκιμής αποκολλήθηκε ολόκληρο.

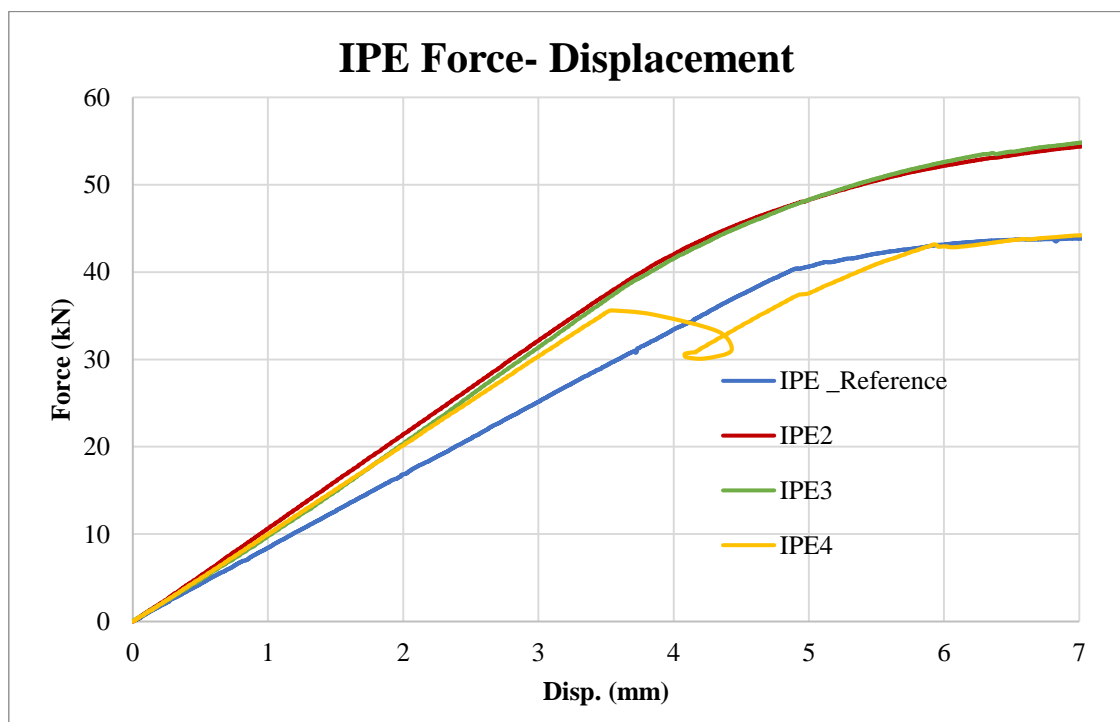
Από τη σύγκριση των δύο καμπυλών LVDT και MTS, παρατηρούμε πως και σε αυτήν την περίπτωση, η καμπύλη MTS και καταγράφει μεγαλύτερες μετατοπίσεις, λόγω των τοπικών παραμορφώσεων. Επίσης, η καμπύλη LVDT μετακινείται λόγω της αποκόλλησης, όπως φαίνεται στο σημείο με βέλος κάμψης 47,07 mm, επομένως, για την υπόλοιπη δοκιμή οι μετρήσεις δεν αντιπροσωπεύουν το βέλος κάμψης του δοκιμίου.

3.1.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

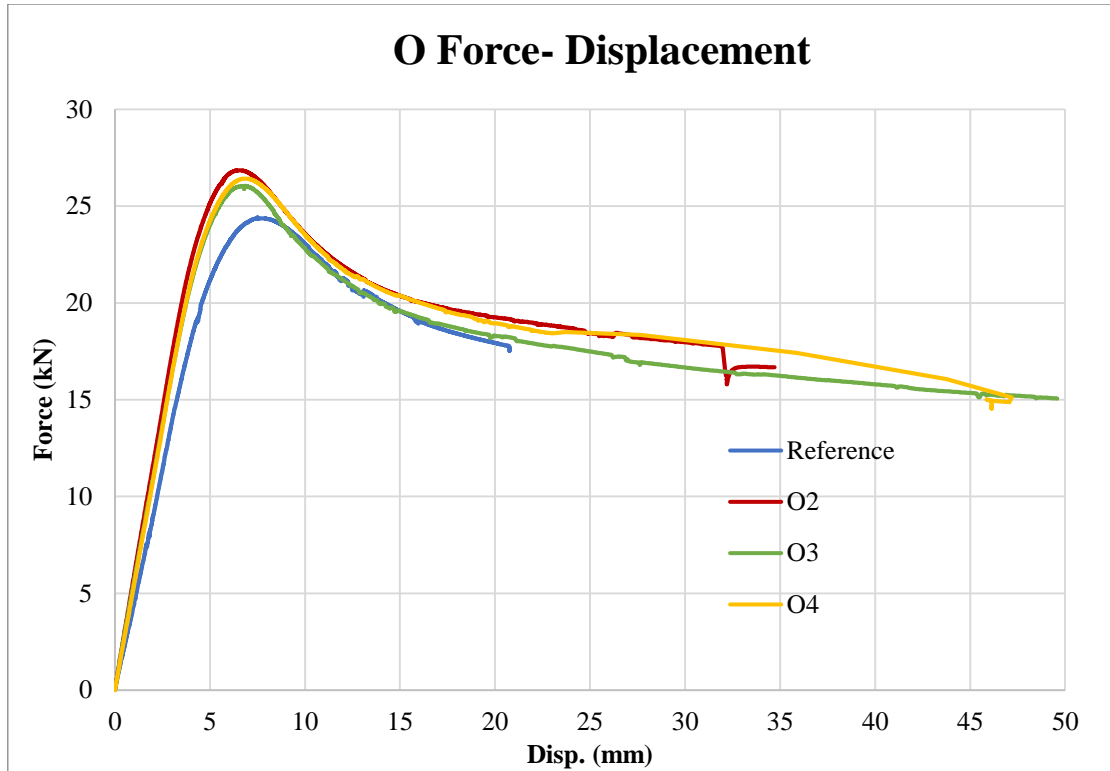
Στο Σχήμα 3.18 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες δύναμης- βέλους κάμψης, μετρούμενες από το LVDT, για όλα τα δοκίμια IPE, ενώ στο Σχήμα 3.19 φαίνεται μία λεπτομέρεια του προηγούμενου διαγράμματος. Στα Σχήματα 3.20 και 3.21 παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα δοκίμια O.



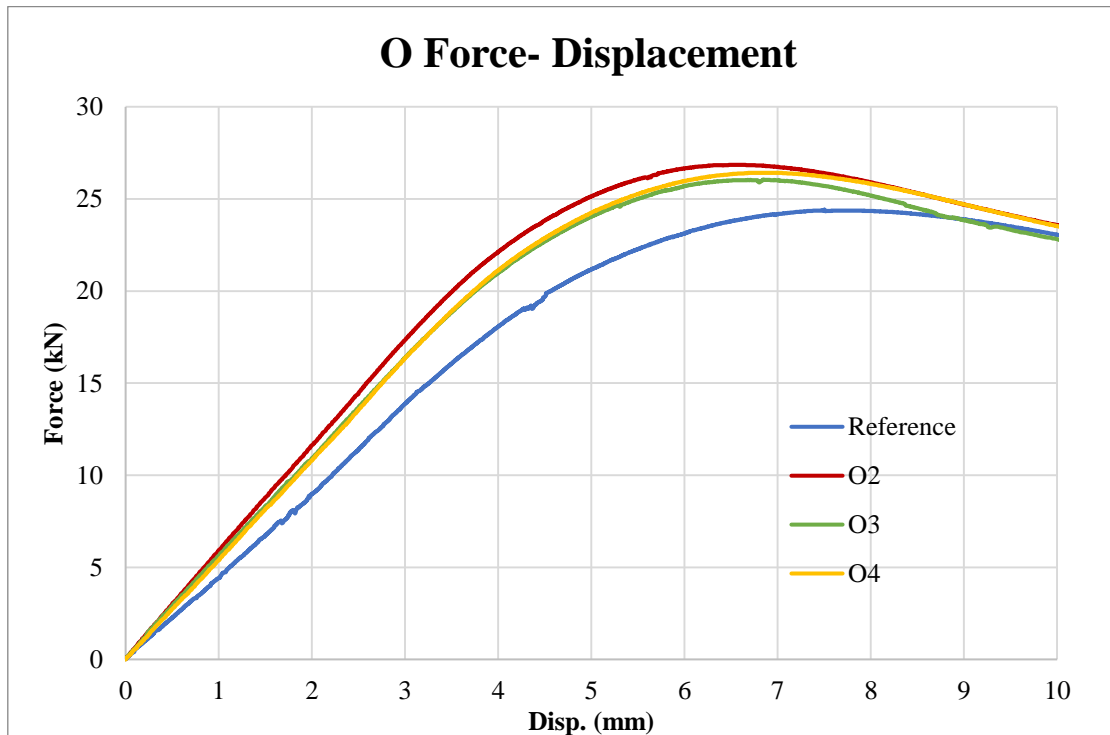
Σχήμα 3.18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης για τα δοκίμια IPE



Σχήμα 3.19: Λεπτομέρεια συγκεντρωτικού διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης των δοκιμίων IPE



Σχήμα 3.20: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης για τα δοκίμια O



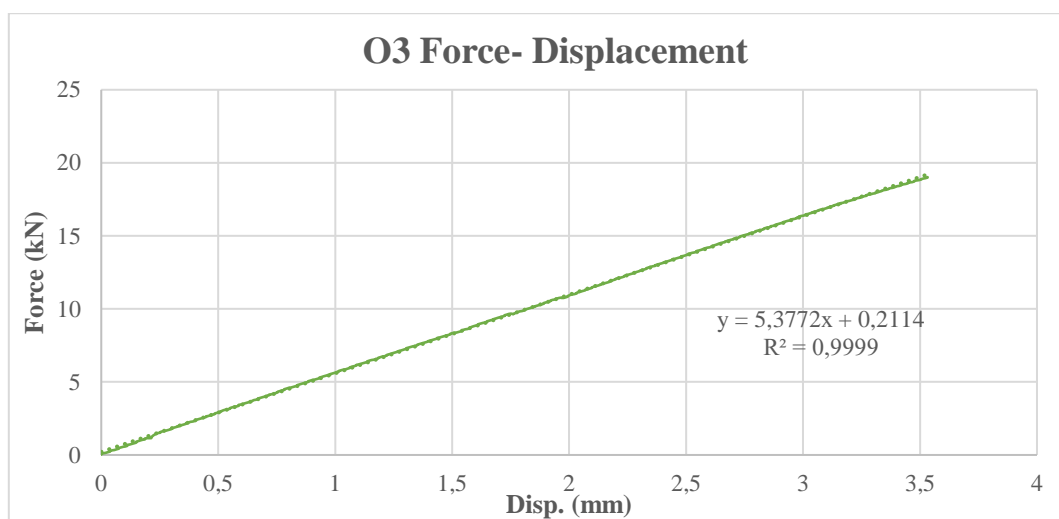
Σχήμα 3.21: Λεπτομέρεια συγκεντρωτικού διάγραμμα δύναμης- βέλους κάμψης των δοκιμίων O

Όσον αφορά στην σύγκριση των διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης, εξετάστηκαν τα παρακάτω μεγέθη:

- Η κλίση της ελαστικής περιοχής
- Το μέγιστο ελαστικό φορτίο
- Το βέλος κάμψης στο μέγιστο ελαστικό φορτίο
- Το μέγιστο φορτίο
- Το βέλος κάμψης στο οποίο εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο.

Η κλίση της ελαστικής περιοχής αποτελεί τη δυσκαμψία του δοκιμίου. Για την εύρεση της τιμής της κλίσης της ελαστικής περιοχής, πραγματοποιήθηκε γραμμική προσέγγιση της καμπύλης μέσω του προγράμματος Excel, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22. Η συνάρτηση που εξάγεται είναι της μορφής $y=a*x+b$, όπου σαν δυσκαμψία θεωρείται η τιμή του a . Σε κάθε διάγραμμα υπολογίστηκε επίσης ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination) R^2 έτσι ώστε να κριθεί η αξιοπιστία της γραμμικής προσέγγισης. Σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν μεγαλύτερος του 0,99 γεγονός που υποδηλώνει απόλυτη αξιοπιστία της προσέγγισης.

Το φορτίο στο οποίο το δοκίμιο μεταβαίνει από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, ονομάζεται μέγιστο ελαστικό φορτίο. Για τον υπολογισμό του μέγιστου ελαστικού φορτίου λήφθηκε υπόψη το ελάχιστο φορτίο για το οποίο ο συντελεστής προσδιορισμού, R^2 , της γραμμικής προσέγγισης της καμπύλης είχε τιμή μεγαλύτερη από 0,99. Η λογική αυτού του τρόπου υπολογισμού είναι πως όταν ο συντελεστής προσδιορισμού, πάρει τιμή μικρότερη από 0,99, τότε η καμπύλη έχει πάψει να είναι ευθεία, και επομένως το δοκίμιο έχει διέλθει στην πλαστική περιοχή.



Σχήμα 3.22: Τυπικό διάγραμμα εξαγωγής δυσκαμψίας

Σημειώνεται ότι η καμπύλη του δοκιμίου IPE Reference δεν παρουσιάζει πουθενά μέγιστο. Για τον λόγο αυτό, ως μέγιστο φορτίο του δοκιμίου αυτού ορίστηκε η μετρούμενη δύναμη στο ίδιο βέλος κάμψης όπου παρουσιάζεται το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου IPE2. Επίσης, η καμπύλη του δοκιμίου IPE4, μετά την αποκόλληση του επιθέματος, συμπεριφέρεται παρόμοια με την καμπύλη του δοκιμίου IPE Reference. Επομένως, για τον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου του εφαρμόζεται πάλι η ίδια μεθοδολογία. Ακόμα, μέγιστο ελαστικό φορτίο του IPE4 θεωρούμε από παραδοχή πως είναι αυτό στο οποίο συνέβη η αποκόλληση του επιθέματος.

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2:

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης δοκιμίων IPE

Μετρούμενο μέγεθος	Reference	IPE2	IPE3	IPE4
Δυσκαμψία (kN/mm)	8,3	10,7	10,7	10,2
<i>%Μεταβολή Δυσκαμψίας</i>	-	29%	28%	22%
Μέγιστο Ελαστικό Φορτίο (kN)	38,9	40,6	39,5	37,3
<i>%Μεταβολή μέγιστου ελαστικού φορτίου</i>	-	4%	2%	-4%
B. Κάμψης στο μέγιστο Ελ. Φορτίο (mm)	4,7	3,8	3,8	3,5
Μέγιστο φορτίο (kN)	44,7	57,5	57,3	45,0
<i>%Μεταβολή Μέγιστου Φορτίου</i>	-	29%	28%	1%
B. Κάμψης στο Μέγιστο Φορτίο (mm)	10,5	10,5	10,3	10,5

Πίνακας 3.2: Αριθμητικά αποτελέσματα διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης δοκιμίων IPE

Μετρούμενο μέγεθος	Reference	O2	O3	O4
Δυσκαμψία (kN/mm)	4,6	5,7	5,4	5,4
<i>%Μεταβολή Δυσκαμψίας</i>	-	24%	17%	18%
Μέγιστο Ελαστικό Φορτίο (kN)	18,0	20,4	19,0	20,2
<i>%Μεταβολή μέγιστου ελαστικού φορτίου</i>	-	13%	5 %	12%
B. Κάμψης στο μέγιστο Ελ. Φορτίο (mm)	4,0	3,6	3,5	3,8
Μέγιστο φορτίο (kN)	24,4	26,9	26,1	26,4
<i>%Μεταβολή Μέγιστου Φορτίου</i>	-	10%	7%	8%
B. Κάμψης στο Μέγιστο Φορτίο (mm)	7,5	6,5	6,8	6,7

3.1.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 3.1 και 3.2 και τις καμπύλες των συγκεντρωτικών διαγραμμάτων δύναμης βέλους κάμψης στα σχήματα 3.18 έως 3.21 γίνονται οι παρακάτω παρατηρήσεις.

Η δυσκαμψία όλων των ενισχυμένων δοκιμίων ήταν μεγαλύτερη από ότι των αντίστοιχων μη-ενισχυμένων. Η αύξηση της έφτασε την τιμή 29% (δοκίμιο IPE2), ενώ πουθενά δεν ήταν μικρότερη από 17% (δοκίμιο O3). Η αύξηση της δυσκαμψίας είναι ανάλογη του πάχους του επιθέματος, όπως φαίνεται από τη σύγκριση του δοκιμίου O2 με τα δοκίμια O3, O3. Το δοκίμιο O2, που έχει πάχος 6,1mm, παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκαμψία, από τα δοκίμια O3 και O4, που έχουν πάχος 4,2mm. Το μήκος παίζει και αυτό ρόλο στην δυσκαμψία, όπως δείχνουν τα αποτελέσματα του δοκιμίου IPE4, το οποίο παρουσιάζει 6-7% λιγότερη μεταβολή από ότι τα δοκίμια IPE2, IPE3, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς.

Το φορτίο που απαιτείται για να εισέλθει το δοκίμιο στη διαρροή αυξήθηκε επίσης με τη χρήση επιθεμάτων. Στα δοκίμια O το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η διατομή πριν να εισέλθει στην πλαστική περιοχή αυξήθηκε ως και 13% (δοκίμιο O2). Στις διατομές IPE η αντίστοιχη ποσοστιαία μεταβολή είναι μικρότερη. Ωστόσο, τα ενισχυμένα δοκίμια εισέρχονται στη διαρροή σε μικρότερο

βέλος κάμψης από ότι τα μη- ενισχυμένα. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται στο ότι έχει αυξηθεί η δυσκαμψία των δοκών με τη χρήση των επιθεμάτων.

Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η δοκός αυξήθηκε σημαντικά με τη χρήση επιθεμάτων, τόσο στα δοκίμια IPE όσο και στα δοκίμια O. Στα δοκίμια IPE η αύξηση του μέγιστου φορτίου έφτασε το 29% σε σχέση με το μη- ενισχυμένο δοκίμιο. Στα δοκίμια O, η αύξηση αυτή είναι μικρότερη, καθώς δεν υπερβαίνει το 10%. Συγκρίνοντας, πάλι, το δοκίμιο O2 με τα O3, O4 παρατηρούμε πως αύξηση του πάχους του επιθέματος επιδρά θετικά στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η διατομή. Παρατηρείται, ακόμα, ότι το βέλος κάμψης στο οποίο εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο ήταν μικρότερο στα ενισχυμένα δοκίμια.

Σε κανένα από τα ενισχυμένα δοκίμια, εκτός του IPE4, δεν παρουσιάστηκε αποκόλληση πριν την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου. Τα δοκίμια O2, O4 εμφάνισαν αποκόλληση σε τιμές βέλους κάμψης πολύ μεγαλύτερες από το βέλος κάμψης του μέγιστου φορτίου. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το μήκος του επιθέματος στην αντοχή του κολλητού συνδέσμου μεταξύ αυτού και της χαλύβδινης δοκού. Το δοκίμιο IPE 4, του οποίου το επίθεμα είχε το μισό μήκος από ότι όλα τα υπόλοιπα επιθέματα, ήταν το μόνο που αποκολλήθηκε στη ελαστική περιοχή. Το δοκίμιο IPE4 μετά την αποκόλληση του επιθέματος συμπεριφέρεται παρόμοια με το μη- ενισχυμένο δοκίμιο, IPE Reference, όπως αναμενόταν. Ως προς τον τρόπο αποκόλλησης είναι δύσκολο να αποφανθούμε για το αν συνέβη με αποκόλληση του επιθέματος στο μέσον του δοκιμίου (intermediate debonding) ή στην άκρη (plate end debonding) διότι η αποκόλληση των επιθεμάτων πραγματοποιήθηκε ακαριαία.

Στα δοκίμια IPE3, O3 όπου είχε χρησιμοποιηθεί κόλλα ως είδος κολλητού συνδέσμου δεν έγινε αποκόλληση. Η κόλλα ως κολλητός σύνδεσμος δεν φαίνεται να έχει κάποια σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες, καθώς, τα δοκίμια IPE3, O3 είχαν παρεμφερή συμπεριφορά με τα δοκίμια IPE2 και O4, αντίστοιχα. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται και από τα διαγράμματα δύναμης βέλους κάμψης, όπου οι καμπύλες των αντίστοιχων δοκιμίων σχεδόν συμπίπτουν.

Αξίζει ακόμα να τονιστεί επίσης, ότι σε κανένα από τα δοκίμια δεν παρουσιάστηκε αστοχία του επιθέματος CFRP.

Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα όσα αναφέρθηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση (Βλέπε Εδάφιο 1.2), μπορούμε να επιστημονούμε τα εξής.

Ο Lingoff (2010) εκτέλεσε πειραματικές δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκίμια που αποτελούνταν επίσης από χαλύβδινες δοκούς, διατομής I (HEA 180), που είχαν ενισχυθεί με CFRP στα πέλαμα τους. Στην παρούσα εργασία επετεύχθη μεγαλύτερη αύξηση του μέγιστου φορτίου 29%, έναντι του 20% που αναφέρεται στην δημοσίευση του Lingoff.

Τονίζεται, ακόμα, ότι το μέτρο ελαστικότητας του CFRP στην παρούσα εργασία ήταν πολύ μικρότερο από αυτό των δοκιμίων του Lingoff. Πιο συγκεκριμένα το CFRP στην παρούσα εργασία είχε μέτρο ελαστικότητας $E_c=65,8$ GPa (βλέπε Παράρτημα B.1), ενώ το μέτρο ελαστικότητας των επιθεμάτων CFRP στη δημοσίευση του Lingoff λαμβάνει τιμές 165 GPa, 200 GPa και 330 GPa. Έτσι, επαληθεύεται πειραματικά το συμπέρασμα της αριθμητικής μελέτης των Omar et al. (2018) πως το μέτρο ελαστικότητας του επιθέματος δεν επηρεάζει σημαντικά το συνολικό φορτίο που μπορεί να παραλάβει η δοκός.

Ως προς τον τρόπο αστοχίας των δοκιμίων, η παρούσα εργασία βρίσκεται σε συμφωνία με τις βιβλιογραφικές δημοσιεύσεις των Photiou (2006), Lingoff και Omar. Η κατάρρευση των δοκιμίων προκαλείται κυρίως από την πλαστική διαρροή της χαλύβδινης δοκού και όχι από την αστοχία ή την αποκόλληση του επιθέματος.

Τέλος, τα αποτελέσματα των πινάκων 3.1 και 3.2 συνάδουν με το συμπέρασμα της δημοσίευσης του Omar πως η ενίσχυση δοκών κοίλης διατομής είναι λιγότερο αποτελεσματική από ότι αυτών με συμπαγή κορμό. Οι ποσοστιαίες αυξήσεις, τόσο της δυσκαμψίας όσο και του μέγιστου φορτίου, ήταν σημαντικά μεγαλύτερες στα δοκίμια IPE σε σχέση με τα δοκίμια O. Αυτό ερμηνεύεται από το ότι οι υψηλές τοπικές παραμορφώσεις και ο τοπικός λυγισμός, που αποτελούν τον κύριο τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων, αναπτύσσονται πιο εύκολα στα πιο λεπτά ελάσματα των κοίλων διατομών.

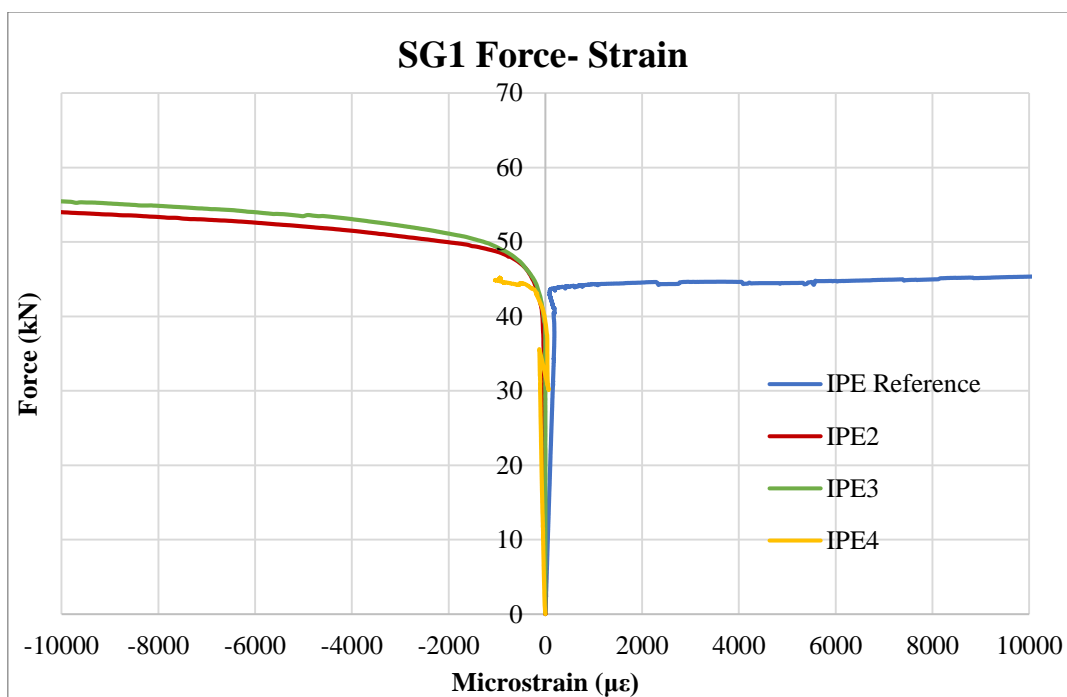
3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων παραμορφώσεων

Στο εδάφιο αυτό μελετώνται τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν από τα strain gauges κατά την πειραματική διαδικασία. Στα διαγράμματα που ακολουθούν συγκρίνονται τα καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης του ίδιου strain gauge μεταξύ των διαφορετικών δοκιμών ίδιας διατομής.

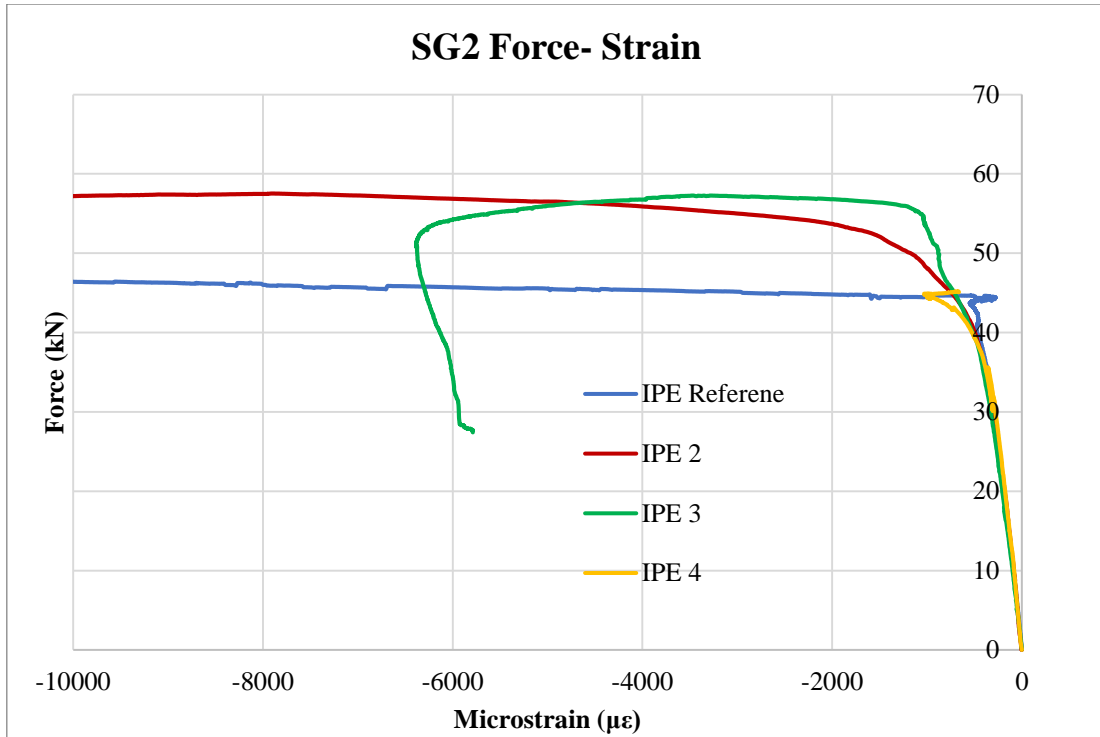
Σημειώνεται πως τα strain gauges 1 έως 3 τις περισσότερες φορές έσπαγαν λόγω πολύ μεγάλων παραμορφώσεων πριν την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και για τον λόγο αυτό σε ορισμένα διαγράμματα η καμπύλη τους διακόπτεται απότομα.

3.2.1 Διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης δοκιμών IPE

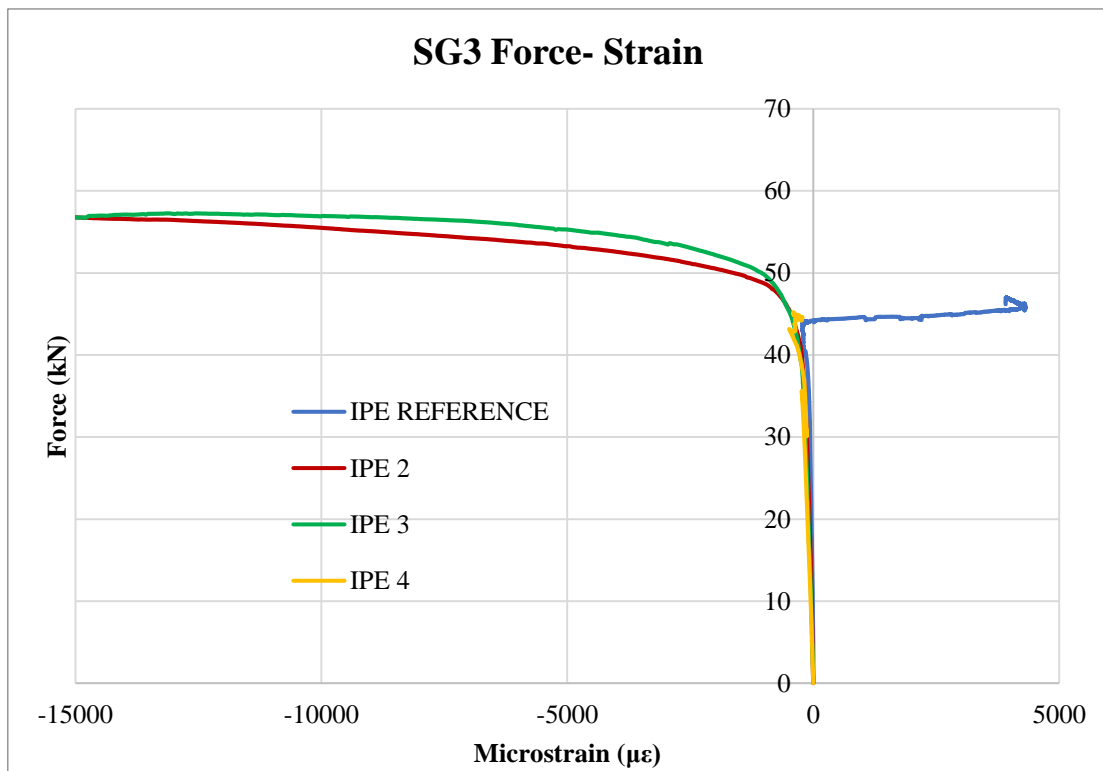
Στο υπό- εδάφιο αυτό παρατίθενται, στα Σχήματα 3.23 έως 3.28, τα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης των δοκιμών IPE.



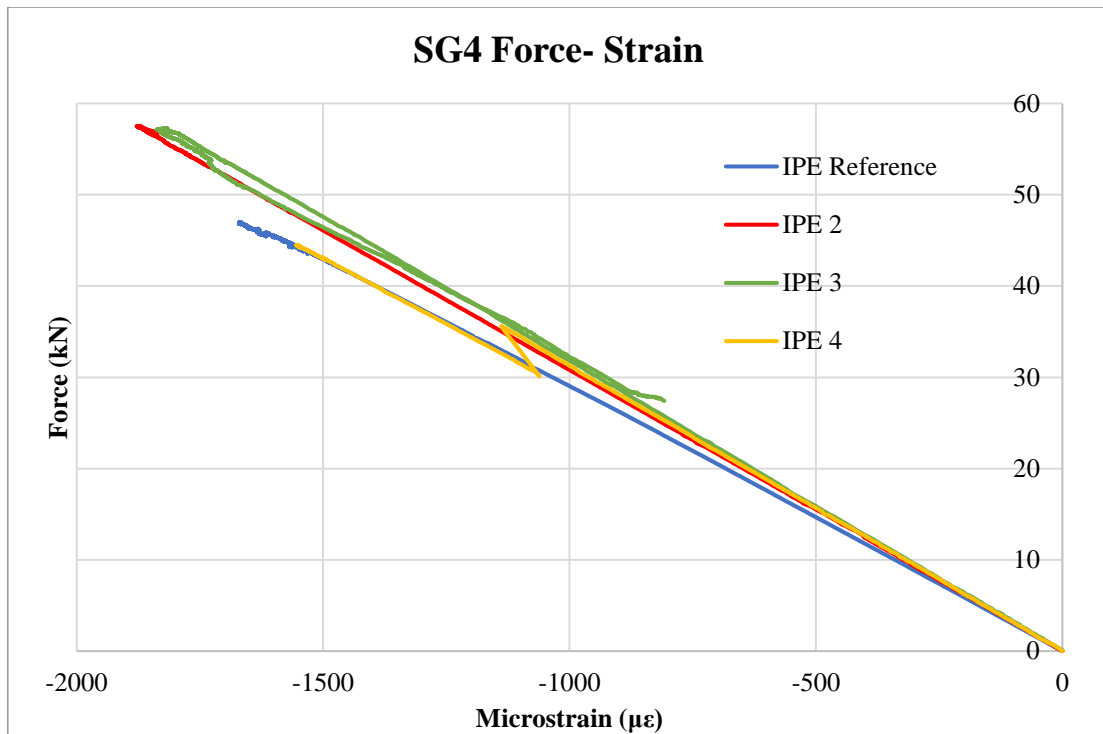
Σχήμα 3.23: Μετρήσεις SG-1 των δοκιμών IPE



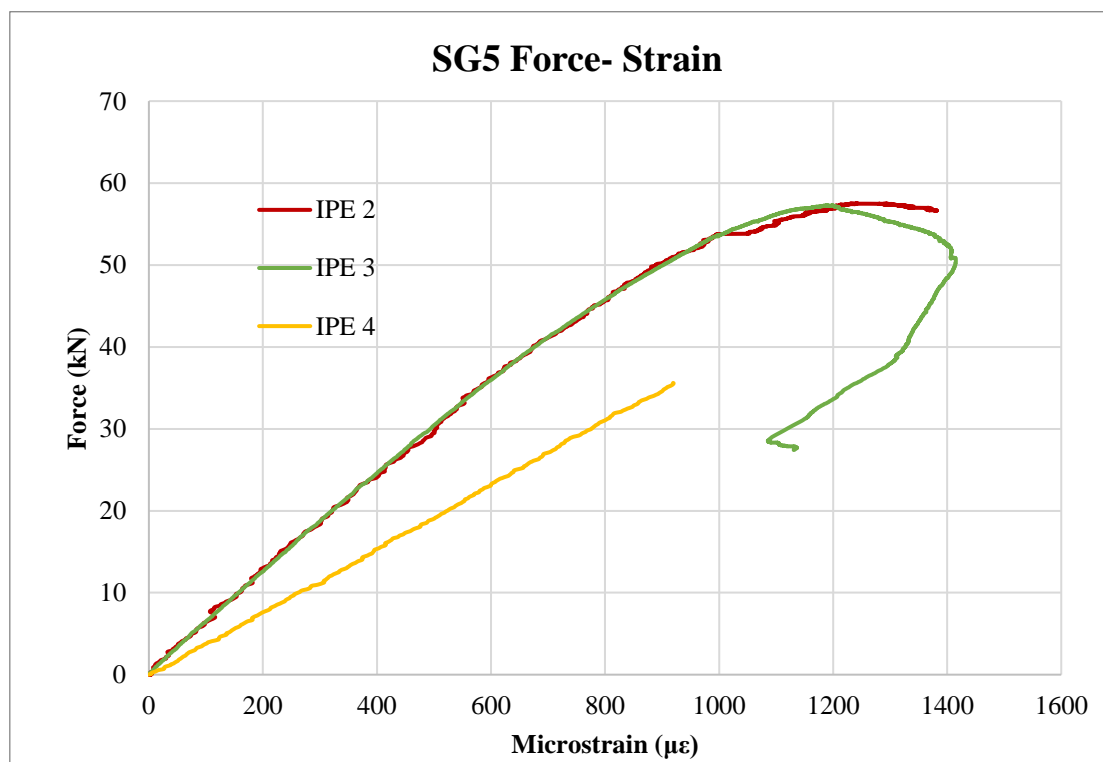
Σχήμα 3.24: Μετρήσεις SG-2 των δοκιμών IPE



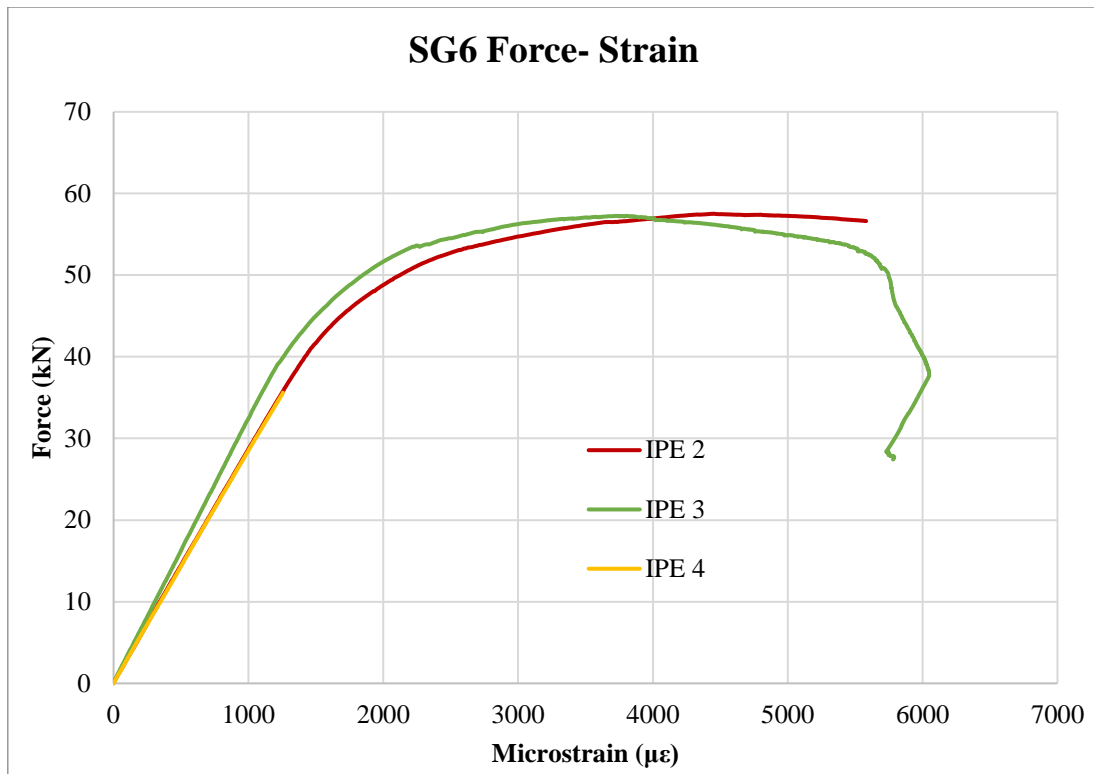
Σχήμα 3.25: Μετρήσεις SG-3 των δοκιμών IPE



Σχήμα 3.26: Μετρήσεις SG-4 των δοκιμών IPE



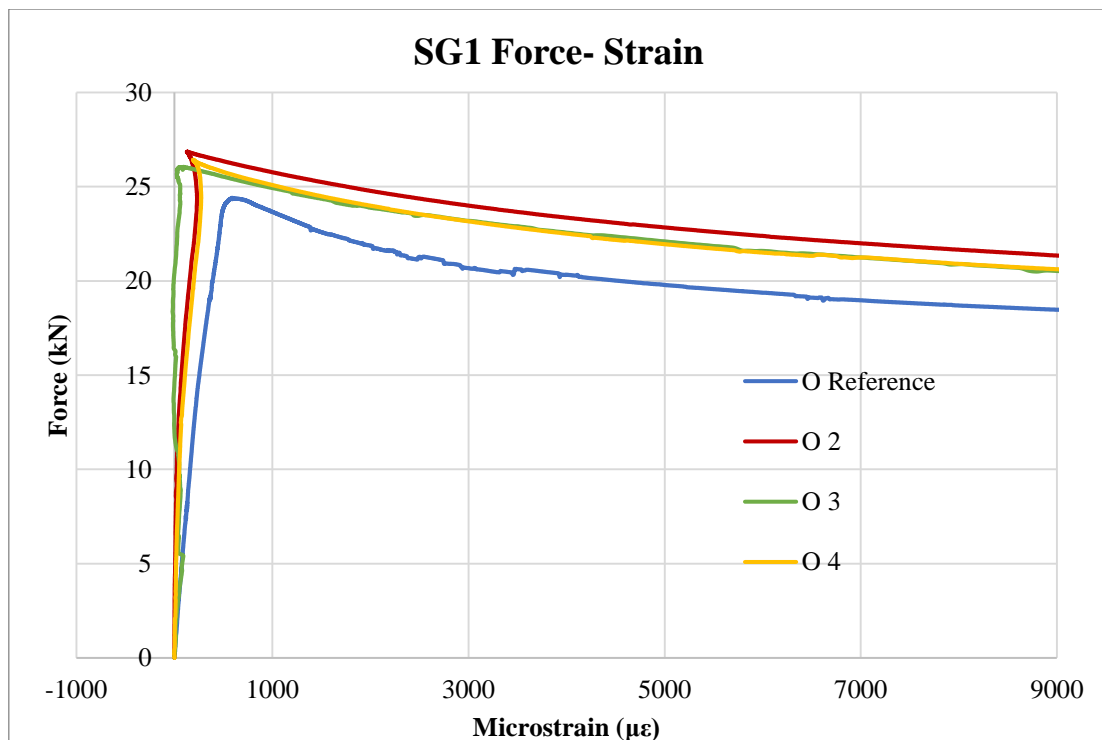
Σχήμα 3.27: Μετρήσεις SG-5 των δοκιμών IPE



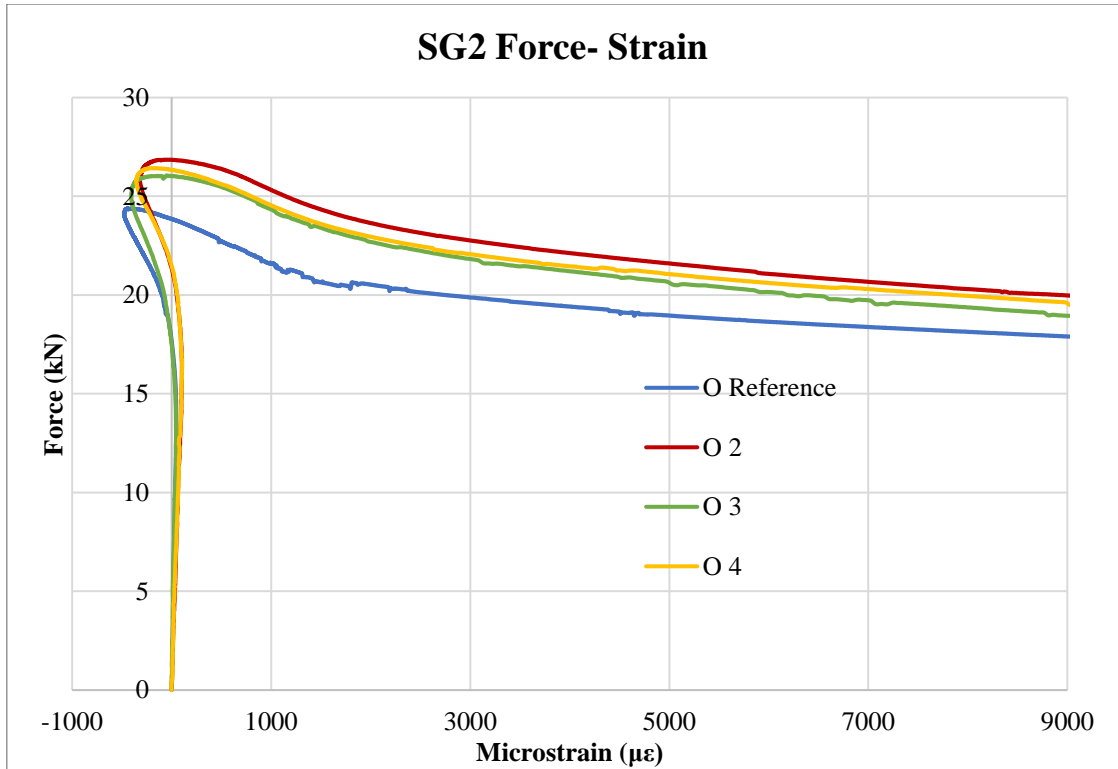
Σχήμα 3.28: Μετρήσεις SG-6 των δοκιμών IPE

3.2.2 Διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης δοκιμών O

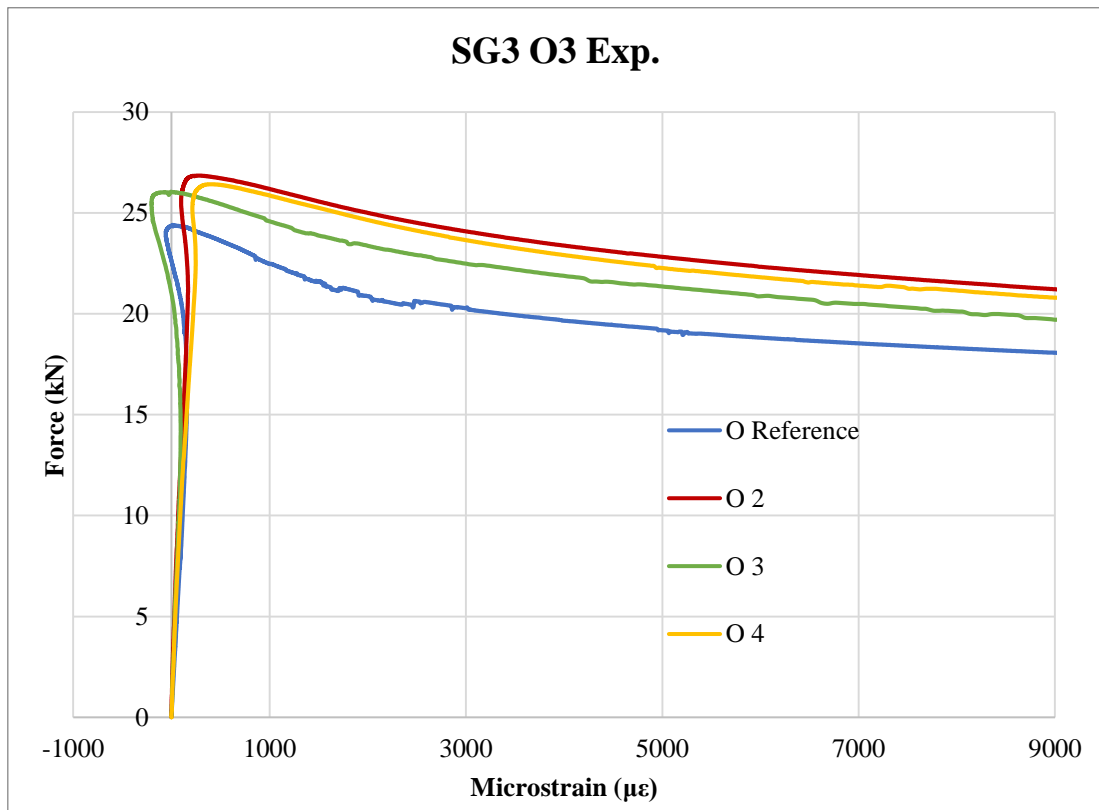
Στο υπό- εδάφιο αυτό παρατίθενται, στα Σχήματα 3.29 έως 3.34, τα διαγράμματα δύναμης παραμόρφωσης των δοκιμών O.



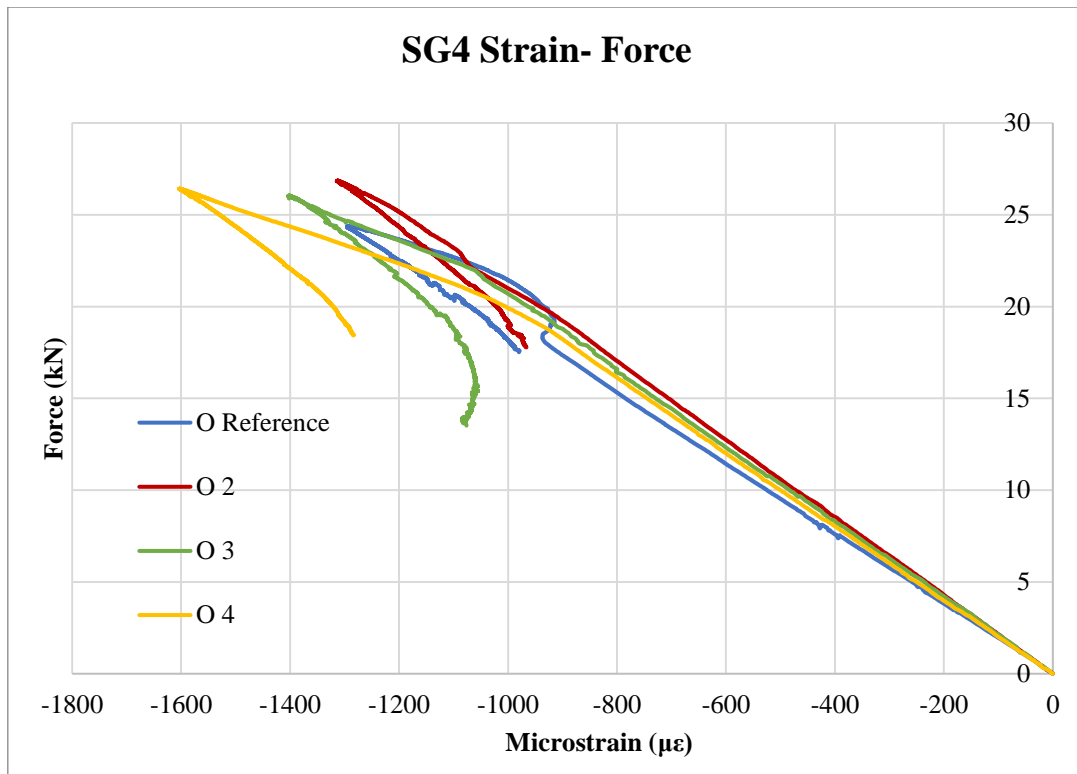
Σχήμα 3.29: Μετρήσεις SG-1 των δοκιμών O



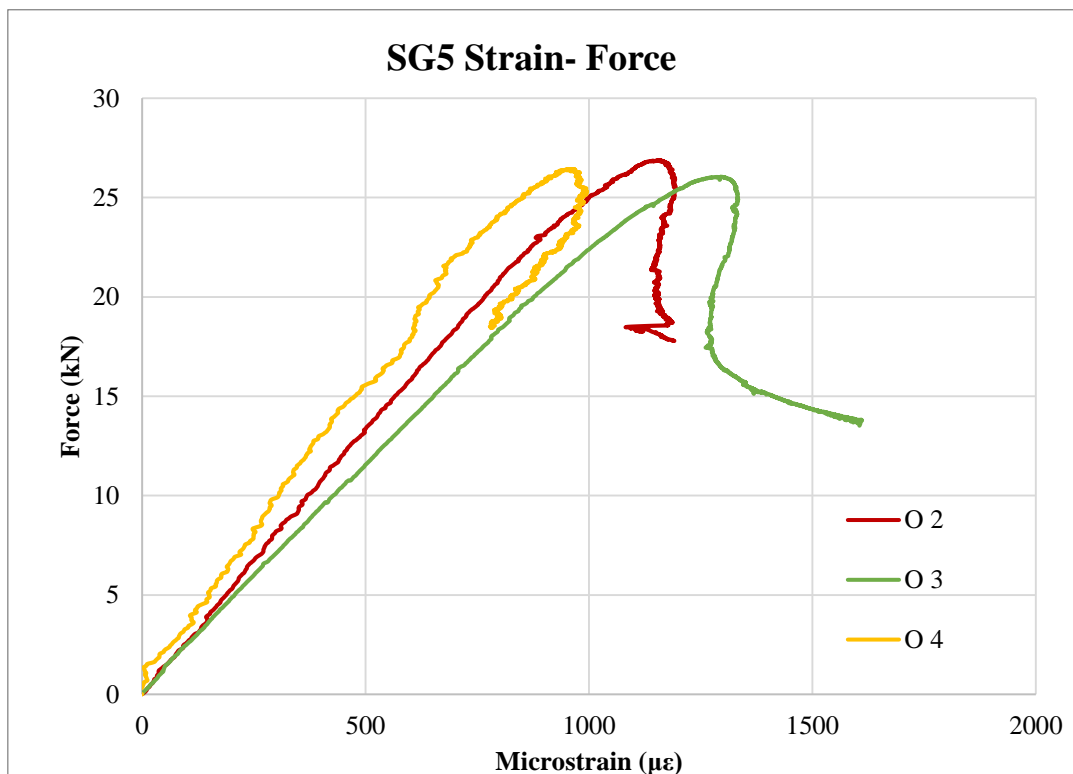
Σχήμα 3.30: Μετρήσεις SG-2 των δοκιμών O



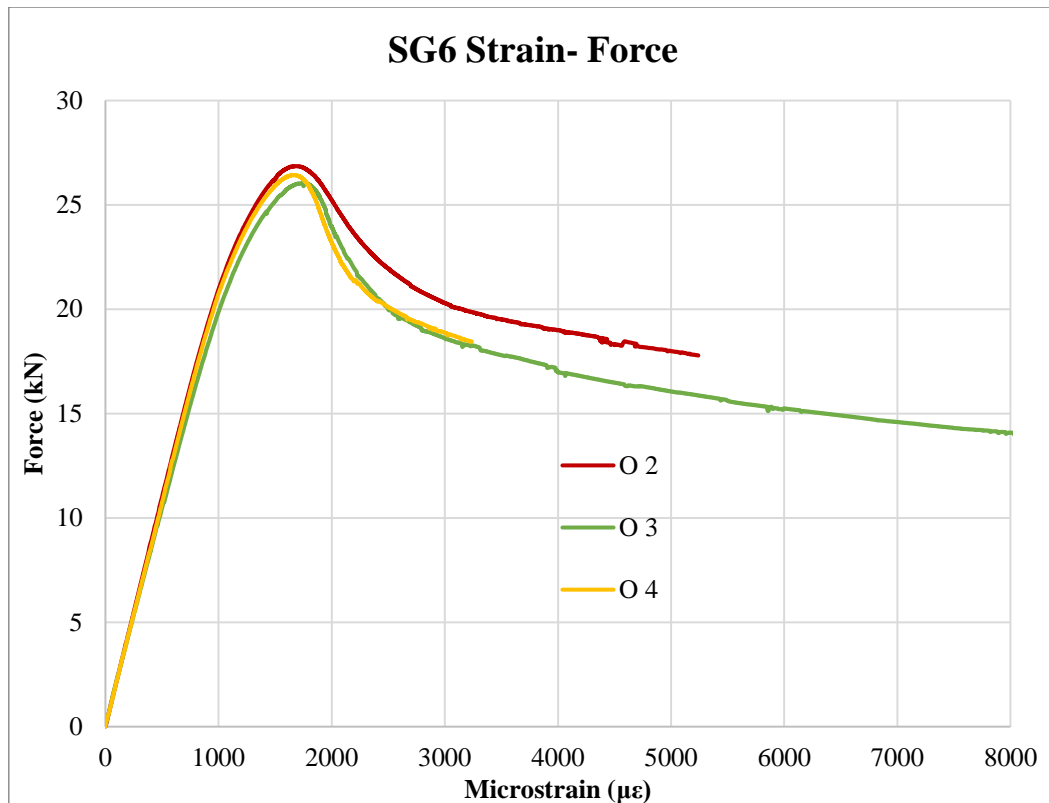
Σχήμα 3.31: Μετρήσεις SG-3 των δοκιμών O



Σχήμα 3.32: Μετρήσεις SG-4 των δοκιμίων O



Σχήμα 3.33: Μετρήσεις SG-5 των δοκιμίων O

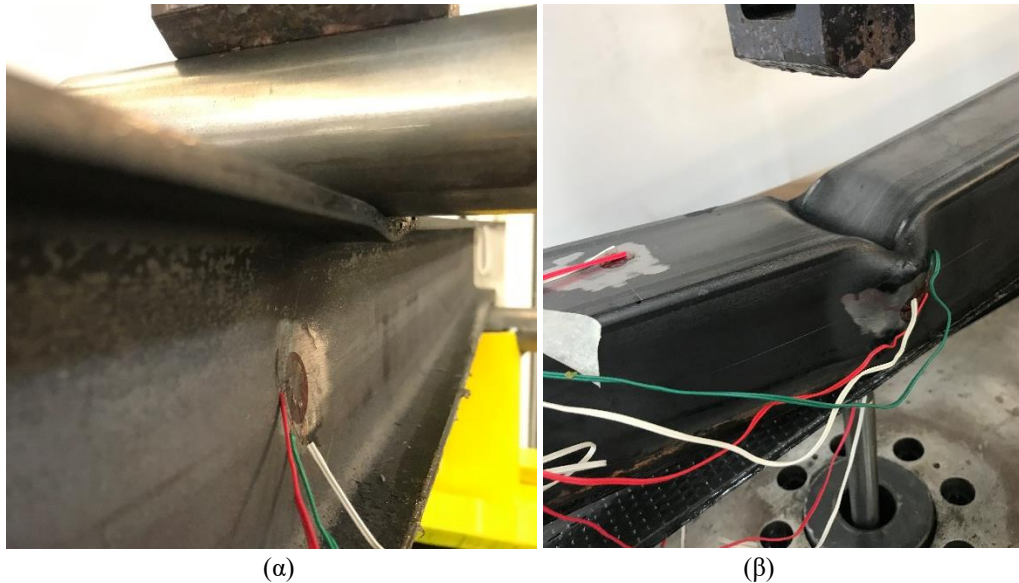


Σχήμα 3.34: Μετρήσεις SG-6 των δοκιμών O

3.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα των strain gauge 1-3, τόσο για τα δοκίμια IPE (Σχήματα 5.23 έως 5.25), όσο και για τα δοκίμια O (Σχήματα 5.29 έως 5.31), παρατηρείται αρχικά πως τα διαγράμματα έχουν καλή επαναληψιμότητα.

Ως προς γενική μορφή των καμπυλών δύναμης- παραμόρφωσης από τις μετρήσεις των strain gauge 1-3, παρατηρείται, αρχικά, πως οι τιμές των παραμορφώσεων παραμένουν πολύ μικρές μέχρι το σημείο όπου πρώτο- εμφανίζεται η διαρροή. Εκεί, σημειώνεται σταδιακή αύξηση τους μέχρι τη εμφάνιση του μέγιστου φορτίου. Μετά το μέγιστο φορτίο, οι τιμές των παραμορφώσεων αυξάνονται, με πολύ υψηλό ρυθμό. Αυτή η συμπεριφορά των διαγραμμάτων εξηγείται από την εμφάνιση πολύ μεγάλων παραμορφώσεων των δοκών κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.35, στη δοκό IPE εμφανίζεται τοπικά λυγισμός, ενώ στην κοίλη τετραγωνική δοκό τα πλευρικά ελάσματα μετατοπίζονται προς τα έξω δημιουργώντας ένα «φούσκωμα» τοπικά.



Σχήμα 3.35: Οι παραμορφώσεις στο σημείο εφαρμογής της δύναμης μετά στο τέλος των πειραματικών δοκιμών: (α) IPE2 (β) O4

Η παραπάνω παρατήρηση συνάδει με το συμπέρασμα του προηγούμενου εδαφίου, πως η κατάρρευση των δοκιμών προέρχεται από την πλαστική διαρροή της χαλύβδινης δοκού.

Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση που γίνεται στα διαγράμματα των SG1-3 είναι πως οι καμπύλες των ενισχυμένων δοκιμών συμπεριφέρονται παρόμοια με αυτές των μη ενισχυμένων, με τη διαφορά πως είναι «μετατοπισμένες προς τα πάνω». Δηλαδή, στα ενισχυμένα δοκίμια απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη για επίτευξη της ίδιας παραμόρφωσης. Από αυτό επαληθεύεται, πάλι, το συμπέρασμα του προηγούμενου εδαφίου, πως με την ενίσχυση των δοκών με επιθέματα CFRP αυξάνονται και το φορτίο που απαιτείται για να εισέλθει η δοκός στη διαρροή και το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει.

Για τις μετρήσεις των strain gauge 4-6 μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις. Αρχικά, υπάρχει μεγάλη επαναληψιμότητα στη μορφή των καμπυλών σε όλα τα δοκίμια. Όλες οι μετρούμενες παραμορφώσεις του SG4 είναι θλιπτικές, που είναι λογικό, αφού είναι τοποθετημένο στην θλιβόμενη επιφάνεια της δοκού. Αντίθετα, οι παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τα SG5, 6 είναι εφελκυστικές, καθώς το επίθεμα έχει προσκολληθεί στην εφελκυσόμενη πλευρά της δοκού. Στους Πίνακες 3.3 και 3.4 φαίνονται οι κλίσεις της ελαστικής περιοχής από τις καμπύλες στα διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης. Για τις μετρήσεις του SG4, που υπήρχε και στα ενισχυμένα και στα μη-ενισχυμένα δοκίμια, παρατίθενται και οι μεταβολές στην κλίση των ενισχυμένων δοκιμών σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο αναφοράς, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η επίδραση της ενίσχυσης στο εν λόγω μέγεθος.

Πίνακας 3.3: Κλίση (kN/με) της ελαστικής περιοχής διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης για τα δοκίμια IPE

Όνομα δοκιμίου	SG4	%μεταβολή κλίσης SG4 από IPE Reference	SG5	SG6
IPE Reference	-0,0282	-		
IPE2	-0,0306	9%	0,0598	0,0286
IPE3	-0,0315	12%	0,0594	0,0324
IPE4	-0,0303	8%	0,0390	0,0284

Πίνακας 3.4: Κλίση (kN/με) της ελαστικής περιοχής διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης για τα δοκίμια O

Όνομα δοκιμίου	SG4	%μεταβολή κλίσης SG4 από O Reference	SG5	SG6
O reference	-0,019	-		
O2	-0,0212	12%	0,0265	0,0217
O3	-0,0205	8%	0,0226	0,0204
O4	-0,0202	6%	0,0295	0,0213

Η κλίση της καμπύλης δύναμης- παραμόρφωσης από τα αποτελέσματα του SG-4 αυξάνεται στα ενισχυμένα δοκίμια σε σχέση με τα μη ενισχυμένα, δηλαδή απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη για επίτευξη της ίδιας παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι τα ενισχυμένα δοκίμια παραμορφώνονται με μικρότερο ρυθμό από ότι τα μη- ενισχυμένα και σε περιοχές μακριά από το σημείο εφαρμογής της δύναμης. Σημαντική επίδραση στην μεταβολή αυτή φαίνεται να έχει το πάχος του επιθέματος, διότι στα δοκίμια O3, O4 η μεταβολή αυτή είναι μικρότερη από ότι στο δοκίμιο O2. Για το δοκίμιο IPE4, οι μετρούμενες παραμορφώσεις από το SG-4 μετά την αποκόλληση του επιθέματος σχεδόν ταυτίζονται με αυτές του μη- ενισχυμένου δοκιμίου.

Από τα αποτελέσματα του strain gauge- 5 παρατηρούμε πως το δοκίμιο IPE4 έχει πολύ μεγάλη διαφορά στην κλίση (περίπου 35%) από τα δοκίμια IPE2, IPE3. Αυτό αποδίδεται στην επίδραση που έχει το μικρότερο μήκος επιθέματος και πιθανώς συνδέεται με την πρόωρη αποκόλληση του επιθέματος λόγω γρήγορης ανάπτυξης παραμορφώσεων σε όλο το μήκος του επιθέματος.

Όσον αφορά στο SG-6, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια μεταξύ των δοκιμίων ίδιας διατομής. Οι καμπύλες των διαγραμμάτων συμπίπτουν μεταξύ τους στο μεγαλύτερο μέρος του διαγράμματος. Ακόμα, οι κλίσεις των καμπυλών, σε όλα τα δοκίμια ίδιας διατομής έχουν πολύ παραπλήσιες τιμές. Επομένως, οι παραμορφώσεις των επιθεμάτων στο μέσο του δοκιμίου δεν επηρεάζονται από κάποια από τις παραμέτρους που εξετάζονται στα δοκίμια.

Μία αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι πως μετά το μέγιστο φορτίο, οι μετρούμενες παραμορφώσεις του SG4 μικραίνουν. Οι μετρούμενες παραμορφώσεις του SG-5, επίσης, μικραίνουν που σημαίνει πως το επίθεμα αποφορτίζεται στα άκρα του όσο μειώνεται η δύναμη. Αντίθετα, οι μετρούμενες παραμορφώσεις του SG-6 συνεχίζουν να αυξάνονται. Η αύξηση των παραμορφώσεων στο μέσον του δοκιμίου, μετά το μέγιστο φορτίο, θα μπορούσε να συνδέεται με τον τρόπο αποκόλλησης των επιθεμάτων. Αν ισχύει αυτό, τότε η αποκόλληση θα πρέπει να συνέβη με αποκόλληση στο μέσον (intermediate debonding).

3.3 Έλεγχος ποιότητας κολλητών συνδέσμων

Στα δοκίμια που δεν αποκολλήθηκαν από τη χαλύβδινη επιφάνεια πραγματοποιήθηκε μέθοδος ελέγχου της ποιότητάς του κολλητού συνδέσμου. Η μέθοδος ελέγχου πραγματοποιήθηκε από την κ. Χαρά Σαράφογλου, μέλος Ε.Δ.Ι.Π. Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η επιθεώρηση με υπερήχους και είχε σκοπό να ανιχνεύσει αστοχίες πρόσφυσης και συνάφειας στη σύνδεση μεταξύ επιθέματος και χαλύβδινης δοκού. Στο εδάφιο αυτό γίνεται μια σύντομη περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των δοχείων με υπερήχους και περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

3.3.1 Συσκευές ελέγχου

Η συσκευή BondMaster (Σχήμα 3.36) έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει δύο τύπους σφαλμάτων σε σύνθετα υλικά και σε κολλητές συνδέσεις (adhesively bonded joints), αστοχίες συνάφειας (delamination) και αστοχίες πρόσφυσης (debonding). Η συσκευή αυτή, εκμεταλλευόμενη προηγμένες κεφαλές παραγωγής υπερήχων και ειδικό λογισμικό απόκτησης δεδομένων, παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής διαφόρων μεθόδων ελέγχου «ακουστουπερήχων» (Resonance, Mechanical Impedance Analysis – MIA, Pitch - Catch).

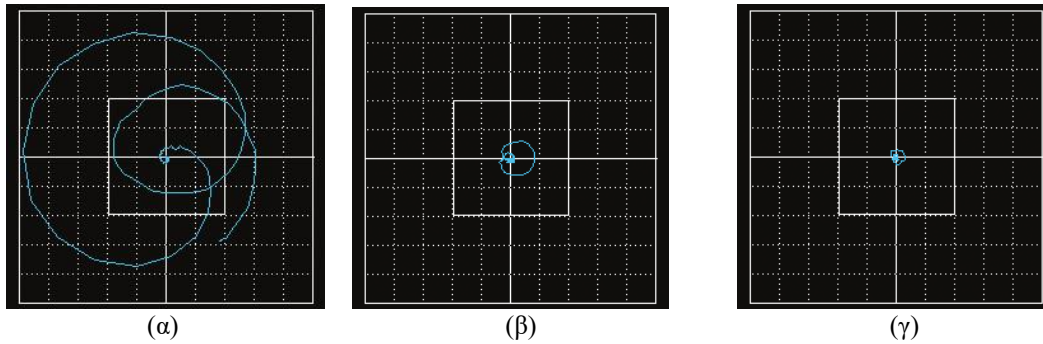
Για τον έλεγχο των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η κεφαλή SPO-5629PLHV (Σχήμα 3.36), η οποία προσφέρει τη μέθοδο ελέγχου Pitch – Catch. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί συχνότητες μεταξύ 5 kHz – 100 kHz για την ενεργοποίηση του στοιχείου εκπομπής. Η ενέργεια μεταφέρεται στο υπό έλεγχο δοκίμιο με τη μορφή ακουστικών κυμάτων, ανάμεσα στα δύο άκρα του αισθητήρα. Οι ανακλάσεις του σήματος που επιστρέφουν ανιχνεύονται και παράγουν στην οθόνη της συσκευής διάγραμμα φάσης – πλάτους (Σχήμα 3.37) που ερμηνεύεται ανάλογα με την ποιότητα του υλικού στο σημείο ελέγχου (υγιές ή ελαττωματικό).



Σχήμα 3.36: Συσκευή BondMaster 1000e+ και κεφαλή Pitch - Catch.

Η κεφαλή τοποθετείται στην επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου χωρίς τη χρήση υλικού σύζευξης. Ρυθμίζοντας κατάλληλα το ύψος έντασης της ανάκλασης, σε περίπτωση περιοχής με ατέλεια παρέχεται σήμα στην οθόνη της συσκευής το οποίο εμφανίζεται έξω από το παράθυρο συναγερμού (Σχήμα 3.37 α). Σε υγιή περιοχή το σήμα εμφανίζεται πολύ μικρότερο και εντός του παραθύρου συναγερμού (Σχήμα 3.37 β). Κακή επαφή μεταξύ της κεφαλής και του δοκιμίου οδηγεί σε μείωση του πλάτους του σήματος ή του μεγέθους του κυκλικού προτύπου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.37 (γ). Λόγω των χαμηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται, η μέθοδος εφαρμόζεται στην ανίχνευση αστοχιών πρόσφυσης τόσο κοντά στην επιφάνεια όσο και σε μεγαλύτερα βάθη.

Η σάρωση της επιφάνειας πραγματοποιείται πάντα σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.



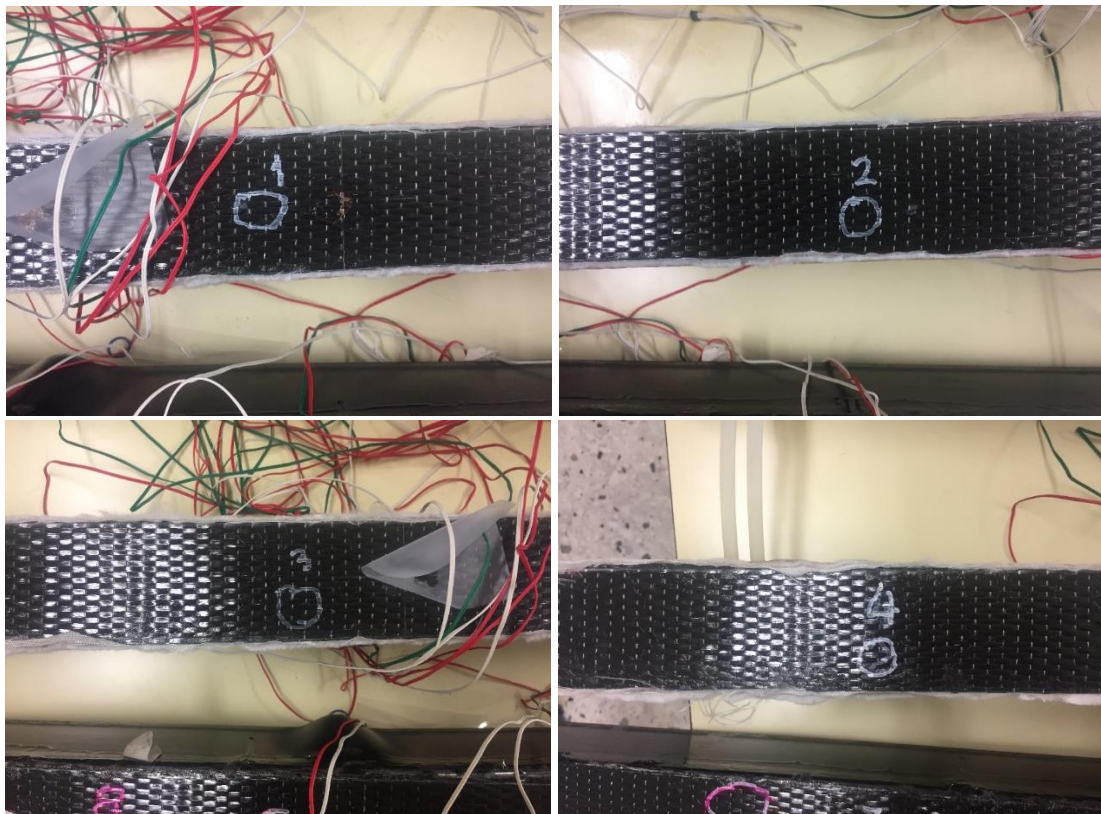
Σχήμα 3.37: Μορφή σήματος α) από περιοχή με αστοχία πρόσφυσης, β) υγιούς περιοχής, γ) κακής επαφής κεφαλής – δοκιμίου.

3.3.2 Διαδικασία ελέγχου- Δειγματοληψία

Τα δοκίμια που ελέγχθηκαν ήταν τα δοκίμια IPE3, O2, O3. Τα δοκίμια IP3, O3 δεν είχαν παρουσιάσει καθόλου αποκόλληση και ελέγχθηκαν σε ολόκληρο το μήκος τους. Το δοκίμιο O2 είχε αποκολληθεί εν μέρει κατά την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών, αλλά μία περιοχή του παρέμενε κολλημένη στη μεταλλική δοκό και ελέγχθηκε.

Στην επιφάνεια των επιθεμάτων σηματοδεύτηκαν κατά το μήκος σημεία δειγματοληψίας. Η απόσταση μεταξύ των σημείων ήταν τυχαία, καθώς τυχαία ήταν και η θέση τους κατά το πλάτος. Στα Σχήματα 3.38, 3.39 και 3.40 παρουσιάζονται τα σημεία σε κάθε δοκό καθώς και η αρίθμηση των σημείων.

Δοκίμιο IPE3



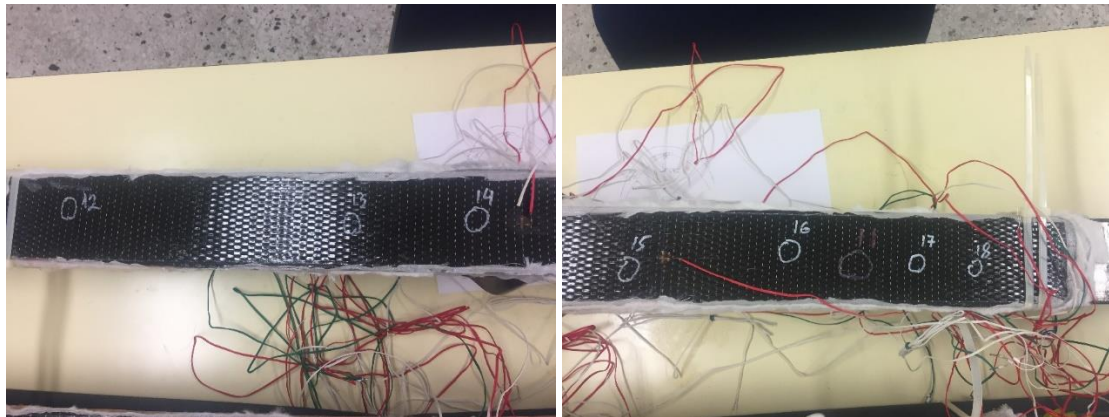
Σχήμα 3.38: Τα σημεία δειγματοληψίας 1 έως 4 του δοκιμίου IPE3

Δοκίμιο O2



Σχήμα 3.39: Τα σημεία δειγματοληψίας 5 έως 10 στο δοκίμιο O2

Δοκίμιο O3



Σχήμα 3.40: Τα σημεία δειγματοληψίας 12 έως 16 του δοκιμίου O3

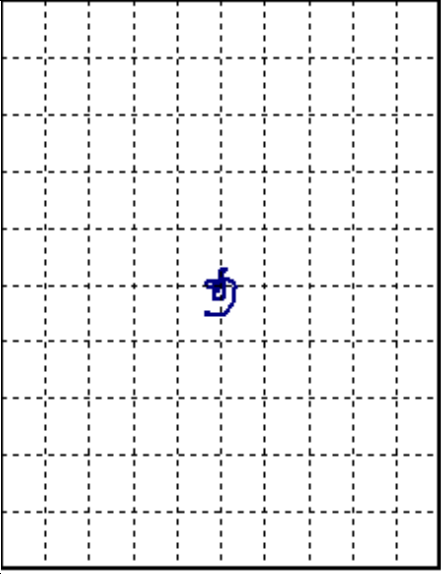
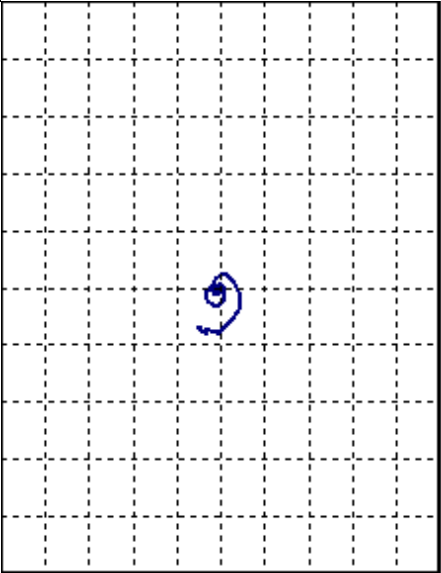
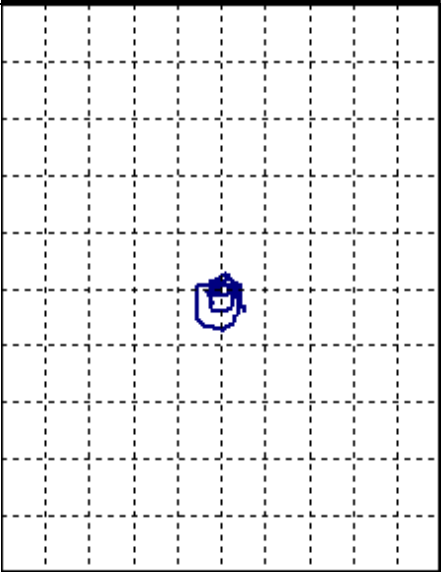
3.3.3 Αποτελέσματα

Στους Πίνακες 3.5 έως 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ελέγχου πρόσφυσης και συνάφειας στα διάφορα σημεία δειγματοληψίας, όπως ελήφθησαν από τη συσκευή ελέγχου BondMaster.

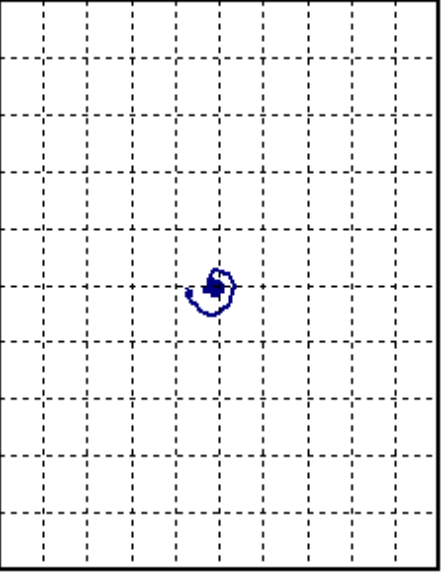
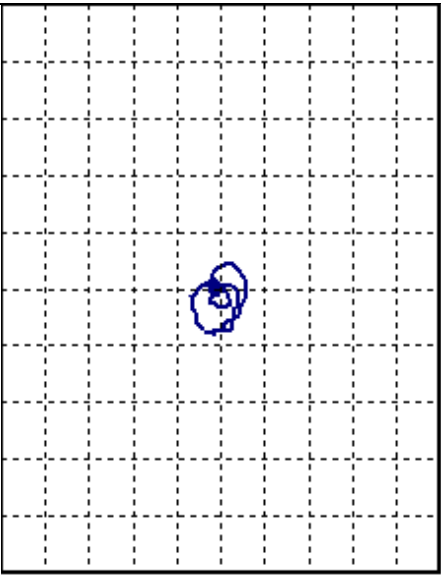
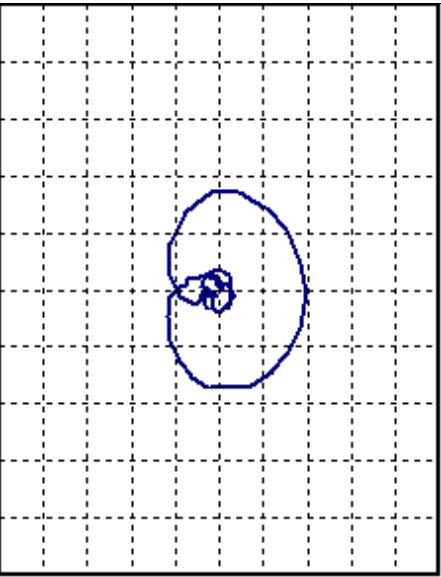
Τα Σημεία 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13, 15, 16, 17 και 18 αντιστοιχούν σε υγιείς (HEALTHY) περιοχές. Τα Σημεία 6, 7, 8, 9, 10 και 11 αντιστοιχούν σε περιοχές που εμφανίζονται πιθανά σφάλματα (DEFECTED) στην πρόσφυση των επιθεμάτων με τη μεταλλική δοκό. Παρατηρούμε ότι τα υγιή σημεία αντιστοιχούν στα δοκίμια IPE3, O3 ενώ τα πιθανά σφάλματα εμφανίζονται στο δοκίμιο O2.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι τα δοκίμια στα οποία το επίθεμα συνδέθηκε με τη χρήση κόλλας δεν εμφάνισαν καμία αστοχία στην συνάφεια μετάλλου επιθέματος. Αντίθετα, το επίθεμα που κολλήθηκε με ρητίνη ακόμα και αν δεν αποκολλήθηκε πλήρως, είχε εμφανίσει μικροαστοχίες στην σύνδεση με τη μεταλλική δοκό που πιθανώς θα οδηγούσαν στην πλήρη αποκόλληση του.

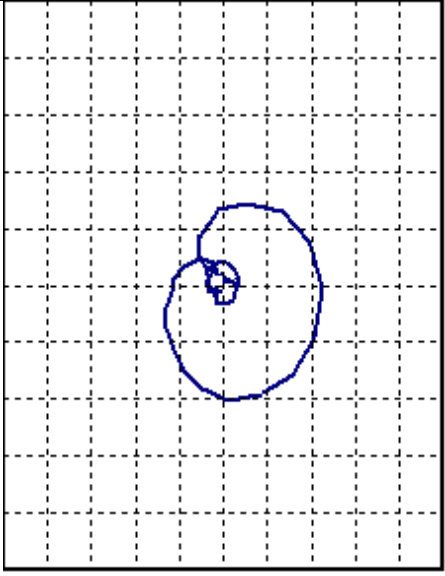
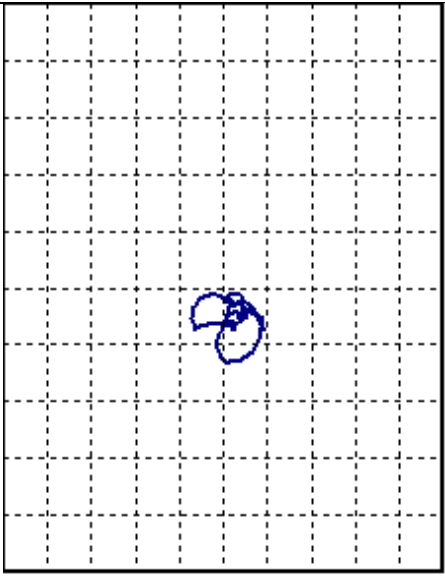
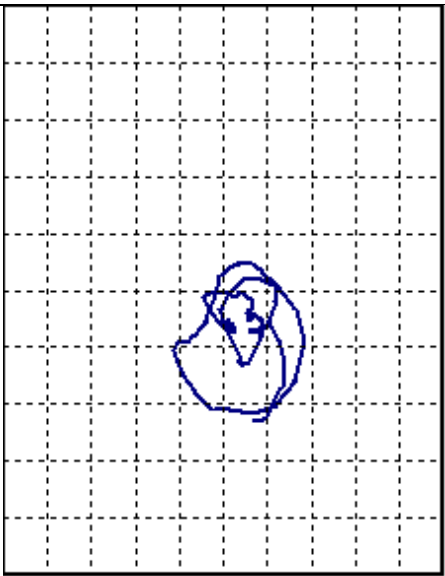
Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα σημείων 1 έως 3

1		HEALTHY
2		HEALTHY
3		HEALTHY

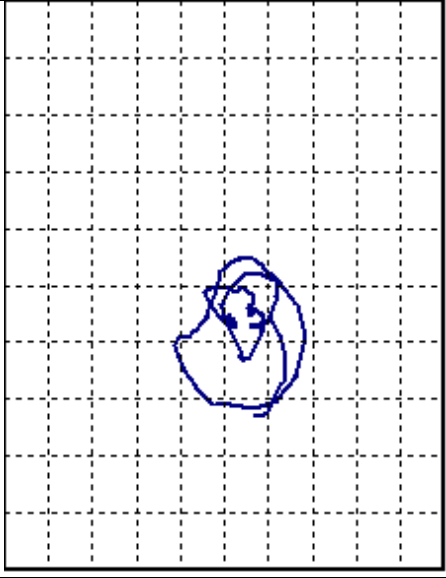
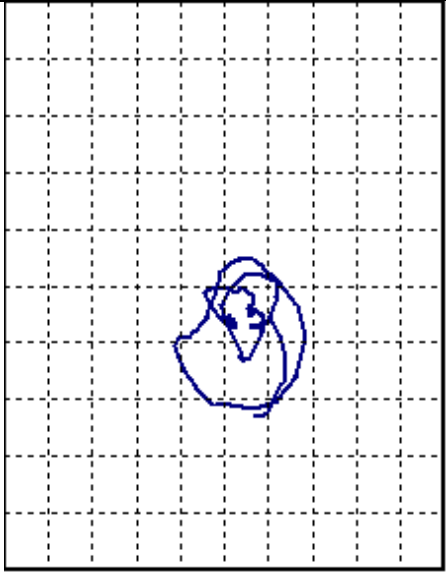
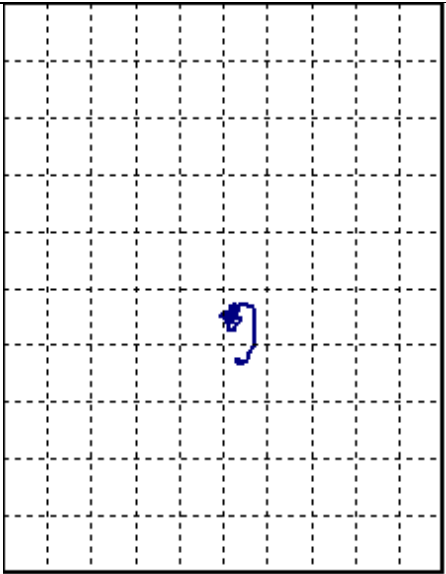
Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα σημείων 4 έως 6

4		HEALTHY
5		HEALTHY
6		DEFECTED

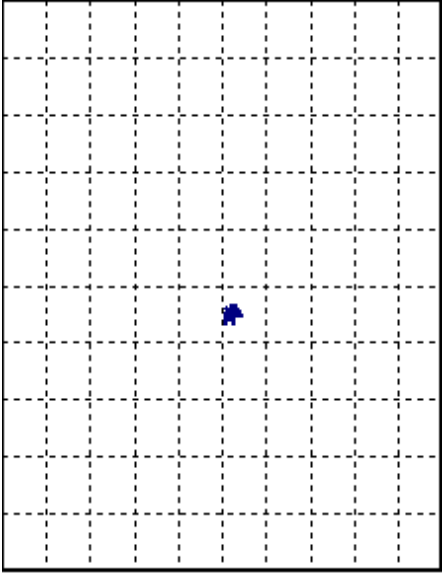
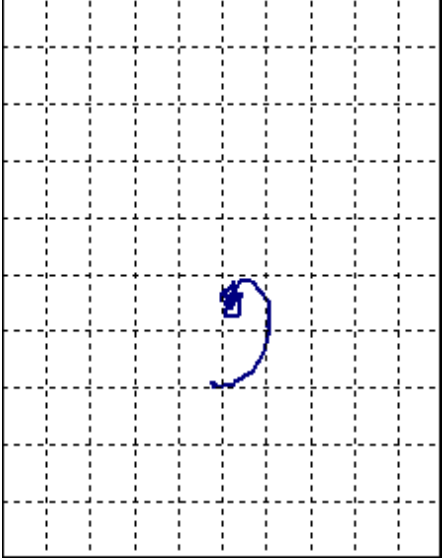
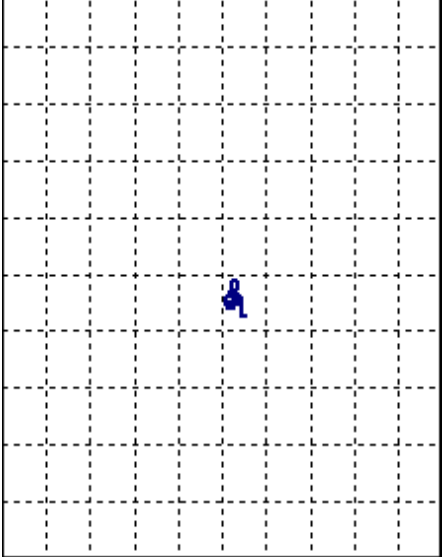
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα σημείων 7 έως 9

7	 A hand-drawn diagram on a 10x10 grid. It shows a spiral starting from a central point and winding outwards in a clockwise direction. The spiral is drawn with blue ink and is roughly circular in shape, occupying about 4x4 grid units.	DEFECTED
8	 A hand-drawn diagram on a 10x10 grid. It shows a small, tight spiral starting from a central point and winding outwards in a clockwise direction. The spiral is drawn with blue ink and is roughly circular in shape, occupying about 2x2 grid units.	DEFECTED
9	 A hand-drawn diagram on a 10x10 grid. It shows a complex spiral starting from a central point and winding outwards in a clockwise direction. The spiral is drawn with blue ink and is roughly circular in shape, occupying about 4x4 grid units. It appears to have some internal structure or a specific pattern.	DEFECTED

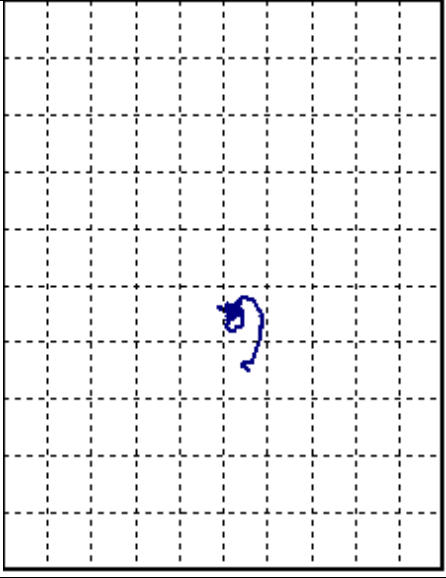
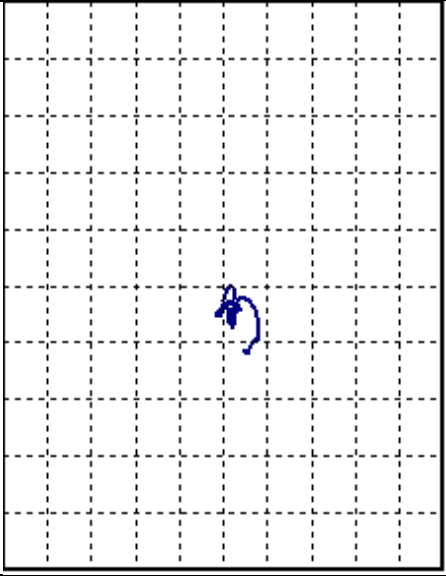
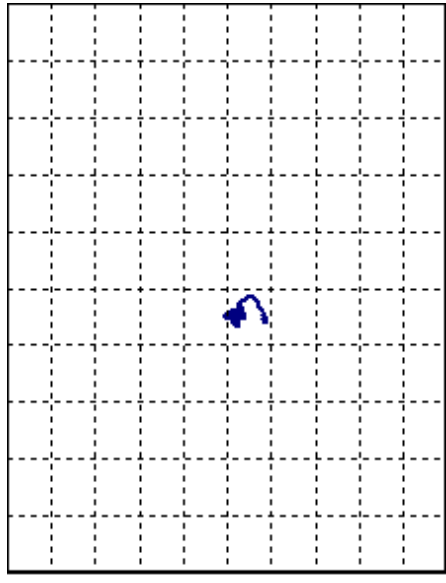
Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα σημείων 10 έως 12

10		DEFECTED
11		DEFECTED
12		HEALTHY

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα σημείων 13 έως 15

13		HEALTHY
14		HEALTHY
15		HEALTHY

Πίνακας 3.10 : Αποτελέσματα σημείων 16 έως 18

16		HEALTHY
17		HEALTHY
18		HEALTHY

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Οι αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα πρόβλημα μηχανικής είναι επιλύσιμες μόνο σε ειδικές περιπτώσεις όπου η γεωμετρία και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι πάρα πολύ απλές. Για να ικανοποιηθεί η ανάγκη επίλυσης πιο σύνθετων προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί προσεγγιστικές μέθοδοι υπολογισμού, που όμως δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.), η οποία είναι μια αριθμητική μέθοδος προσεγγιστικής λύσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Σύμφωνα με τη Μ.Π.Σ., η δομή του προβλήματος αναλύεται σε μεμονωμένα στοιχεία που αλληλοσυνδέονται με εξισώσεις συνέχειας. Η λύση των εξισώσεων αυτών σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου και τις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλουμε στο σύστημα δίνει τα επιθυμητά μεγέθη (π.χ. μετατοπίσεις, παραμορφώσεις, τάσεις κλπ.). Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης όλης της κατασκευής και όχι μόνο ενός μεμονωμένου τμήματος. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων καθορίζεται από τις παραμέτρους που ορίζει ο χρήστης ο οποίος καλείται να κάνει όσο το δυνατόν πιστότερη προσομοίωση της πραγματικής κατασκευής και σωστές παραδοχές ώστε τα αποτελέσματα να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Υπάρχει πληθώρα προγραμματιστικών πακέτων πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS, ABAQUS, ALGOR, κ.ά.), τα οποία δίνουν πολλές επιλογές στο χρήστη ως προς τον τρόπο μοντελοποίησης, την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο, τη μέθοδο επίλυσης, κτλ. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε το πρόγραμμα ANSYS® 18.2 καθώς προσφέρει υψηλές δυνατότητες προσομοίωσης και ευκολία χειρισμού από την πλευρά του χρήστη.

Η επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση της ΜΠΣ χωρίζεται σε τρία στάδια: την προ-επεξεργασία, την επίλυση και την μετ-επεξεργασία. Στο στάδιο της προ-επεξεργασίας κατασκευάζεται το μοντέλο ορίζοντας τη γεωμετρία, τις ιδιότητες των υλικών, τον τύπο των στοιχείων και τον αριθμό τους. Στο στάδιο της επίλυσης εισάγονται οι φορτίσεις και οι συνοριακές συνθήκες, καθώς και ο τύπος ανάλυσης (π.χ. γραμμική, μη-γραμμική). Τέλος, το στάδιο της μετ-επεξεργασίας περιλαμβάνει την εξαγωγή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

4.2 Προ-επεξεργασία

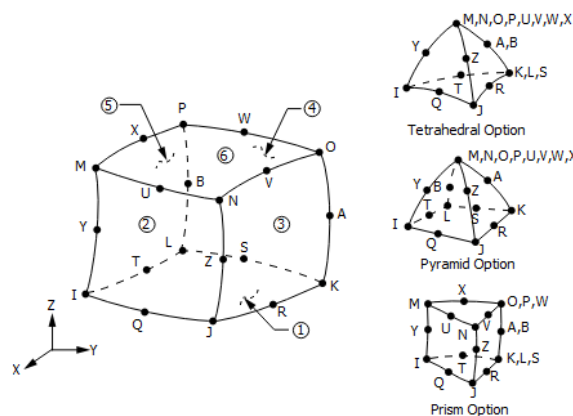
Όπως προαναφέρθηκε, η προ-επεξεργασία είναι το πρώτο στάδιο στην ανάπτυξη ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, όπου καθορίζονται οι βασικές παράμετροι του μοντέλου. Στις παρακάτω παραγράφους, περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης της δοκιμής κάμψης τριών σημείων στο περιβάλλον του ANSYS® 18.2. Τονίζεται πως στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων τηρείται η ίδια ονοματολογία με αυτή των δοκιμίων.

4.2.1 Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων

Το πρώτο βήμα που καλείται να εκτελέσει ο χρήστης είναι η επιλογή ενός κατάλληλου τύπου στοιχείων για το πρόβλημα που μοντελοποιεί. Γενικά, η μοντελοποίηση μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση δισδιάστατων στοιχείων (2D Plane Elements) είτε με τη χρήση τρισδιάστατων στοιχείων (3D Solid Elements). Τα τρισδιάστατα στοιχεία παρέχουν μεγαλύτερη υπολογιστική ακρίβεια και για το λόγο αυτό επιλέγονται σε αυτήν την εργασία.

Από τις βιβλιοθήκες του ANSYS επιλέχθηκε το στοιχείο SOLID186. Το στοιχείο SOLID186 είναι ένα στερεό τρισδιάστατο στοιχείο και ορίζεται από 20 κόμβους που ο κάθε κόμβος διαθέτει 3 βαθμούς

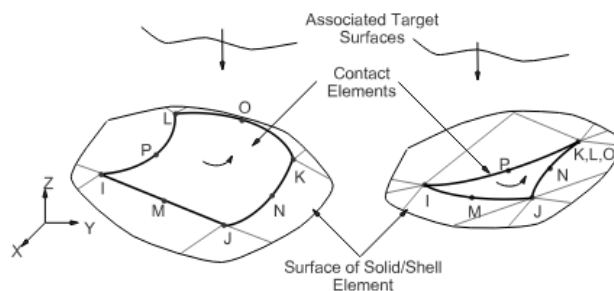
ελευθερίας, δηλαδή μετακίνηση κατά τη διεύθυνση x , y και z σε κάθε περίπτωση. Το στοιχείο SOLID186 υποστηρίζει πολυάριθμες μηχανικές ιδιότητες, όπως πλαστικότητα υπερελαστικότητα, ερπυσμό και μεγάλες εκτροπές και παραμορφώσεις. Από αυτές μας ενδιαφέρει κυρίως η δυνατότητα μεγάλων παραμορφώσεων (large deflection) που χρησιμοποιείται σε μη-γραμμικές αναλύσεις. Ακόμα, το στοιχείο SOLID186 μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως ομογενές στερεό (Homogenous Solid Element) είτε ως στρωσιγενές στερεό (Layered Solid Element). Επιλέχθηκε η χρήση ως ομογενούς στερεού για όλα τα σώματα. Πιο συγκεκριμένα οι χαλύβδινες δοκοί και οι κύλινδροι στήριξης και επιβολής του φορτίου εξετάστηκαν μακροσκοπικά ως ομογενή ιστροπικά υλικά, ενώ τα επιθέματα από CFRP εξετάστηκαν ως ομογενή ορθοτροπικά υλικά. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το στοιχείο SOLID186, ως ομογενές στερεό, στην κανονική μορφή εξαέδρου και με τις παραλλαγές τετραέδρου, πυραμίδας και πρίσματος.



Σχήμα 4.1: Το στοιχείο SOLID186

Επίσης, πρέπει να επισημανθεί και η χρήση δύο δισδιάστατων βοηθητικών στοιχείων, των στοιχείων CONTA174 και TARGE170. Τα στοιχεία αυτά εξυπηρετούν στη μοντελοποίηση των επιφανειών επαφής μεταξύ δύο σωμάτων. Για την αλληλοεπίδραση διαφορετικών σωμάτων σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητη η δημιουργία μίας «Επαφής» (Contact) μεταξύ τους. Η διαδικασία δημιουργίας «Επαφής» και ο προσδιορισμός των παραμέτρων της («επιφάνεια στόχος», «επιφάνεια επαφής» κλπ.) παρουσιάζονται αναλυτικά στο υπό-εδάφιο (4.2.5).

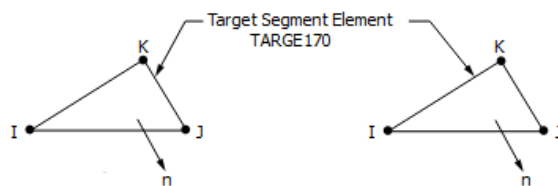
Το στοιχείο CONTA174 είναι ένα δισδιάστατο, 8-κόμβο στοιχείο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση επαφής και ολίσθησης μεταξύ τρισδιάστατων σωμάτων. Με τη βοήθεια του στοιχείου CONTA174, ορίζονται «στοιχεία επαφής» (contact elements) τα οποία επικαλύπτουν στερεά στοιχεία που περιγράφουν το όριο ενός παραμορφώσιμου σώματος και βρίσκονται ενδεχομένως σε επαφή με μία συσχετισμένη «επιφάνεια στόχο» (target surface), όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Το στοιχείο CONTA174

Το στοιχείο TARGE170 είναι δισδιάστατο στοιχείο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση «επιφανειών στόχο» σε τρισδιάστατες αναλύσεις. Το συγκεκριμένο στοιχείο συνθέτει την «επιφάνεια

στόχο» που συνεργάζεται βέλτιστα με το στοιχείο CONTA174, σε περίπτωση επαφής μεταξύ στερεών, τρισδιάστατων σωμάτων. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται το στοιχείο TARGE170.



Σχήμα 4.3: Το στοιχείο TARGE170

4.2.2 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

Επόμενο βήμα στην ανάπτυξη του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών. Μοντελοποιούνται τέσσερα βασικά υλικά: ο χάλυβας των δοκών διατομής IPE, ο χάλυβας των δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής, το σύνθετο υλικό CFRP των επιθεμάτων και ο «άκαμπτος» χάλυβας των κυλίνδρων.

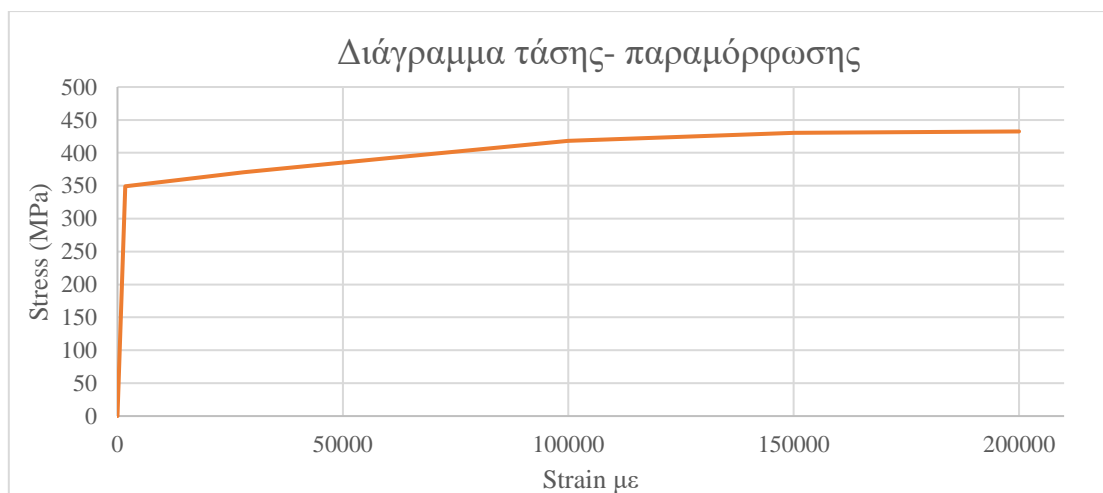
Χάλυβας δοκών διατομής IPE

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των μεταλλικών διατομών IPE εξετάζεται ως ισότροπικό γραμμικά ελαστικό- πολύ- γραμμικά ανελαστικό υλικό. Για να οριστεί ένα τέτοιο υλικό χρειάζεται ένα μέτρο ελαστικότητας (E), ένα λόγο Poisson (ν), ένα όριο διαρροής (σ_0) και ένα διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης (σ - ϵ).

Το μέτρο ελαστικότητας, το όριο διαρροής καθώς και οι τιμές του διαγράμματος (σ - ϵ) λήφθηκαν από εκτέλεση πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού που παρατίθενται στο «Παράρτημα Β.2». Ο λόγος Poisson (ν) λήφθηκε ίσος με 0,3 για κοινό χάλυβα (Omar 2018). Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι χρησιμοποιούμενες μηχανικές ιδιότητες καθώς και στο Σχήμα 4.4 παρατίθεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που εισήχθη στο πρόγραμμα.

Πίνακας 4.1: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβας δοκών διατομής IPE

Χάλυβας δοκών IPE	
E (GPa)	200,97
σ_0 (MPa)	349,03
ν	0,3



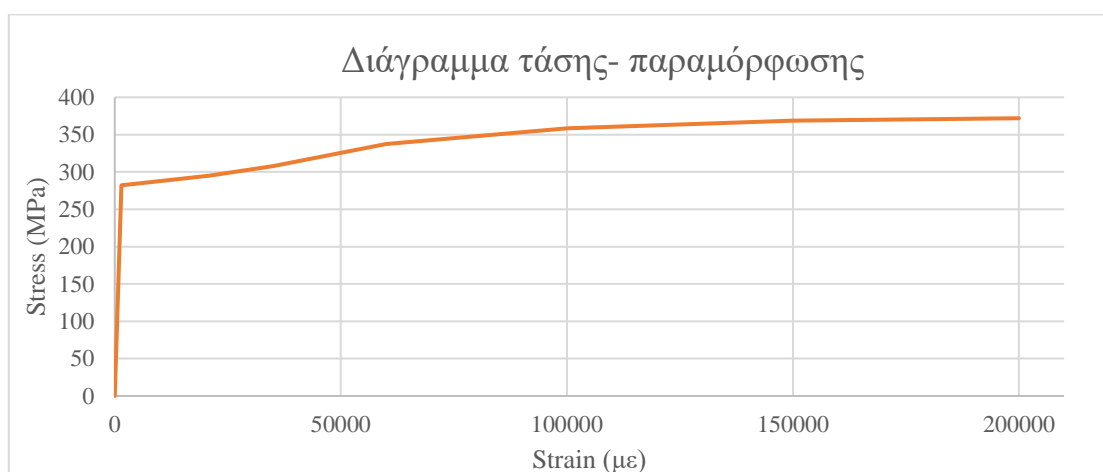
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης χάλυβα δοκών διατομής IPE

Χάλυβας δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής

Στην περίπτωση αυτή, ο χάλυβας εξετάζεται και πάλι ως ισοτροπικό γραμμικά ελαστικό-πολυγραμμικά ανελαστικό υλικό. Ωστόσο, οι πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι ο χάλυβας των δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής είχε διαφορετικές ιδιότητες από ότι ο χάλυβας των δοκών με διατομή IPE (Παράρτημα Β.2). Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται οι χρησιμοποιούμενες μηχανικές ιδιότητες, ενώ στο Σχήμα 4.5 παρατίθεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που εισήχθη στο πρόγραμμα:

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβας δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής

Χάλυβας δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής	
E (GPa)	199,45
σ_0 (MPa)	279,13
ν	0,3



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης χάλυβα δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής

CFRP

Το σύνθετο υλικό ινών άνθρακα/εποξικής ρητίνης (CFRP) εξετάζεται ως ορθοτροπικό γραμμικά ελαστικό υλικός με ίνες άνθρακα σε μία διεύθυνση (Unidirectional- UD). Για να μοντελοποιηθεί ένα τέτοιο υλικό πρέπει να προσδιοριστούν τα μέτρα ελαστικότητας (E_x , E_y , E_z) στις διευθύνσεις των γεωμετρικών αξόνων, τα μέτρα διάτμησης (G_{xy} , G_{yz} , G_{xz}) στα επίπεδα που ορίζονται από τους παραπάνω άξονες, και οι αντίστοιχοι λόγοι Poisson (ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz}). Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας E_x παράλληλα στη διεύθυνση των ινών πραγματοποιήθηκαν πειράματα εφελκυσμού (βλέπε «Παράρτημα Β.1»). Οι υπόλοιπες ιδιότητες λήφθηκαν ίδιες με αυτές του υλικού «Carbon Epoxy UD» που βρίσκεται τις βιβλιοθήκες του ANSYS Workbench. Στον Πίνακα 4.3 παρατίθενται οι μηχανικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση των επιθεμάτων CFRP.

Πίνακας 4.3: Μηχανικές ιδιότητες επιθεμάτων CFRP

CFRP	
E_X	65788 MPa
E_Y	8600 MPa
E_Z	8600 MPa
G_{XY}	4700 MPa
G_{YZ}	3100 MPa
G_{XZ}	4700 MPa
ν_{XY}	0,27
ν_{YZ}	0,4
ν_{XZ}	0,27

Άκαμπτος χάλυβας κυλίνδρων

Οι κύλινδροι έδρασης και επιβολής δύναμης ήταν επιθυμητό να μοντελοποιηθούν ως πλήρως άκαμπτα υλικά. Για τη μοντελοποίηση τους χρησιμοποιήθηκε ιστροπικό γραμμικό ελαστικό υλικό με «τεχνητό», πολύ ψηλό μέτρο ελαστικότητας και δείκτη Poisson ίδιο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του χάλυβα. Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται οι χρησιμοποιούμενες μηχανικές ιδιότητες.

Πίνακας 4.4: Μηχανικές ιδιότητες άκαμπτου χάλυβα

Άκαμπτος χάλυβας	
E (GPa)	19300000
ν	0,3

4.2.3 Γεωμετρία μοντέλου

Το επόμενο στάδιο στην ανάπτυξη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι η σχεδίαση μιας γεωμετρικής διάταξης. Η διάταξη αυτή αναπαριστά μορφολογικά τα σώματα που μοντελοποιούνται, καθώς και τη σχετική τους θέση στο χώρο.

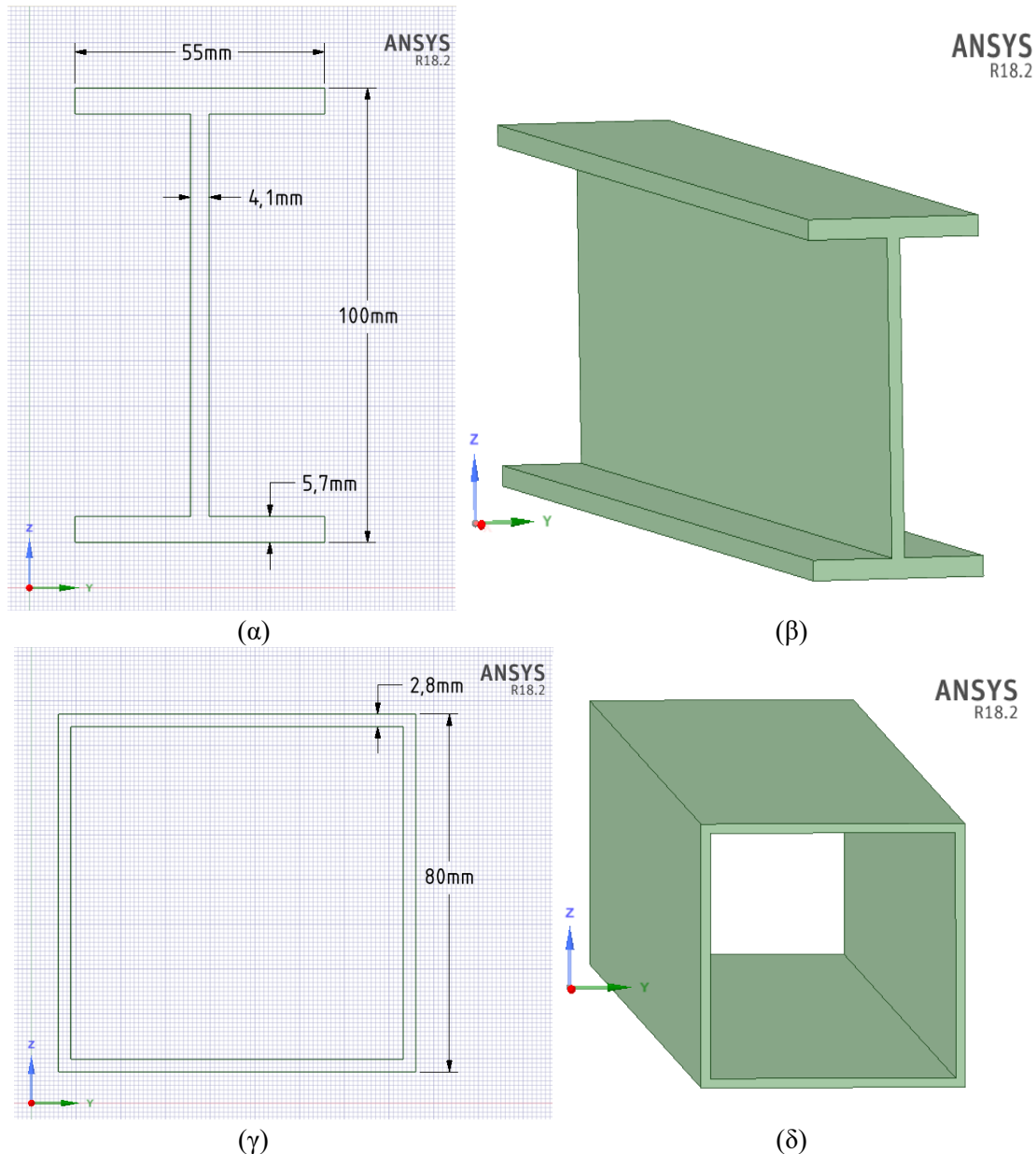
Παρατηρούμε, αρχικά, ότι το μοντέλο παρουσιάζει συμμετρία ως προς άξονα κάθετο στο μήκος της δοκού που διέρχεται από το μέσον της. Καθώς το πρόγραμμα προσφέρει τη δυνατότητα της συμμετρίας, αποφασίζουμε να μοντελοποιήσουμε μονάχα τη μισή δοκό, μειώνοντας, έτσι, την απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο.

Η σχεδίαση και παραγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου γίνεται στο πρόγραμμα SpaceClaim. Το SpaceClaim είναι ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα ενταγμένο στις βιβλιοθήκες του ANSYS 18.2. Είναι ιδιαίτερα εύχρηστο και παρέχει υψηλές δυνατότητες στο χρήστη για διαμόρφωση οιασδήποτε γεωμετρίας για δισδιάστατο η τρισδιάστατο μοντέλο.

Πρώτο βήμα στην παραγωγή του μοντέλου, είναι η δημιουργία δισδιάστατης επιφάνειας της διατομής του εκάστοτε γεωμετρικού σώματος. Στη συνέχεια, με την εντολή «Pull» το δισδιάστατο σκίτσο μετατρέπεται σε γεωμετρικό όγκο με μήκος προεκβολής όσο ορίζει ο χρήστης. Με την παραπάνω διαδικασία παρήχθησαν όλοι οι γεωμετρικοί όγκοι που συνιστούν τη γεωμετρική διάταξη στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Πιο αναλυτικά στα μοντέλα συναντώνται τα εξής τρία σώματα, των οποίων επεξηγείται η δημιουργία της γεωμετρίας τους: οι χαλύβδινες δοκοί, τα επιθέματα CFRP και οι κύλινδροι έδρασης και άσκησης δύναμης.

Χαλύβδινες δοκοί:

Οι διατομές των χαλύβδινων δοκών σχεδιάστηκαν με τις ονομαστικές τους διαστάσεις, όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.6. Το μήκος προεκβολής ήταν 750mm προκειμένου να μοντελοποιηθεί η μισή δοκός. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκών και κατόπιν οι προβλεπόμενοι όγκοι, στο περιβάλλον του SpaceClaim.



Σχήμα: 4.6: Ανάπτυξη γεωμετρίας στο περιβάλλον SpaceClaim (α) Διατομή IPE (β) Δοκός διατομής IPE (γ) Κοίλη τετραγωνική διατομή (δ) Δοκός κοίλης τετραγωνική διατομή

Κύλινδροι έδρασης- άσκησης δύναμης:

Για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου μοντελοποιήθηκε μόνο ο μισός κύλινδρος καθ' ύψος (διεύθυνση Z), διότι μας ενδιαφέρει μόνο η πλευρά του κυλίνδρου που έρχεται σε επαφή με τη μεταλλική δοκό. Επιπρόσθετα, λόγω ύπαρξης συμμετρίας, μοντελοποιείται μονάχα ο ένας από τους

κύλινδρους έδρασης. Στο εξής, ο κύλινδρος επιβολής φορτίου θα ονομάζεται «pusher» και ο κύλινδρος έδρασης της δοκού θα ονομάζεται «roller».

Η διατομή που σχεδιάστηκε ήταν ένας ημικυκλικός τομέας διαμέτρου 50mm. Το πλάτος προεκβολής (διεύθυνση Y) επιλέχθηκε στα 100mm για τα μοντέλα των δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής και 75mm για τα μοντέλα των δοκών διατομής IPE. Η επιλογή ήταν τέτοια, ώστε να υπερκαλύπτονται οι ακμές των χαλύβδινων δοκών κατά το πλάτος. Σημειώνεται, επίσης, ότι παρά την επιβολή συμμετρίας, ο pusher μοντελοποιείται ολόκληρος ως προς το μήκος (διεύθυνση X). Διερευνήθηκε η περίπτωση μοντελοποίησης του μισού pusher, και η επίδραση στα αποτελέσματα ήταν αμελητέα. Εν τέλει, επιλέχθηκε η μοντελοποίηση ολόκληρου του pusher, ως προς το μήκος, προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση «τεχνητών» υψηλών τάσεων στην περιοχή επαφής του pusher με το δοκίμιο. Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται σε πλάγια όψη η μοντελοποίηση των roller και pusher.

Η απόσταση του roller από το επίπεδο επιβολής συμμετρίας, στη διεύθυνση του μήκους (X), μοντελοποιεί το ανυποστήρικτο μήκος του δοκίμιου. Η θέση αυτή προσαρμόστηκε σε κάθε μοντέλο έτσι ώστε το ανυποστήρικτο μήκος να είναι ίδιο με αυτό που μετρήθηκε πριν την έναρξη της εκάστοτε πειραματικής δοκιμής. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζεται η απόσταση του roller από το επίπεδο συμμετρίας για κάθε μοντέλο.



Σχήμα 4.7: Πλάγια όψη των roller και pusher σε σχέση με τη δοκό διατομής IPE

Πίνακας 4.5: Θέση roller

Όνομα μοντέλου	Απόσταση roller από επίπεδο συμμετρίας (mm)
IPE Reference	601
IPE2	602
IPE3	602
IPE4	602
O Reference	601
O2	602
O3	602
O4	602

Επιθέματα CFRP:

Τα επιθέματα, όσον αφορά στη γεωμετρία τους, αναπαραστάθηκαν ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Για το πλάτος και το μήκος προεκβολής επιλέχθηκαν οι ονομαστικές τους διαστάσεις. Ως προς το πάχος μοντελοποιήθηκε το τελικό πάχος του επιθέματος CFRP, όπως μετρήθηκε μετά την κατασκευή των δοκιμίων. Εξαίρεση αποτέλεσαν τα δοκίμια O3 και IPE3 στα οποία το πάχος του επιθέματος λήφθηκε ίσο με των δοκιμίων O4 και IPE2 αντίστοιχα, διότι έχουν τον ίδιο αριθμό στρώσεων υφασμάτων ινών άνθρακα. Στον Πίνακα 4.6 παρατίθενται οι διαστάσεις των επιθεμάτων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων:

Πίνακας 4.6: Διαστάσεις επιθέματων αριθμητικής ανάλυσης

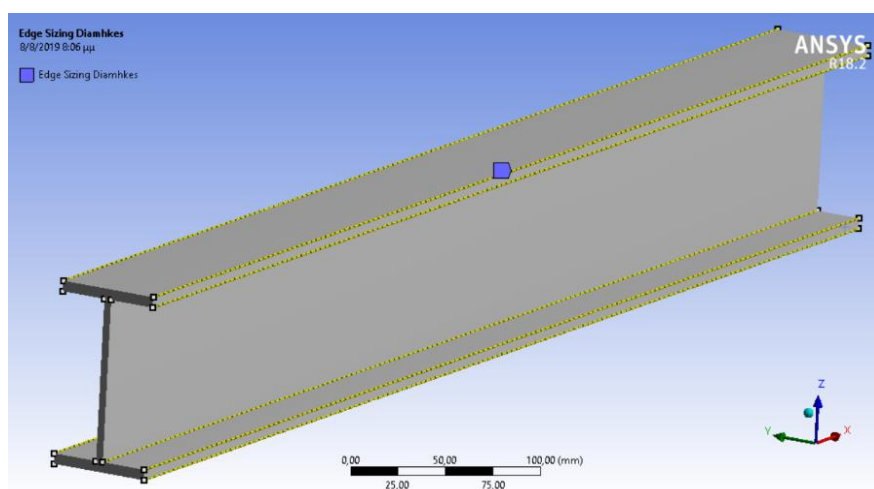
Όνομα μοντέλου	Μήκος επιθέματος (mm)	Πλάτος επιθέματος (mm)	Πάχος επιθέματος (mm)
O2	1000	80	6,1
O3	1000	80	4,2
O4	1000	80	4,2
IPE2	1000	55	8,7
IPE3	1000	55	8,7
IPE4	500	55	9,4

4.2.4 Δημιουργία Πλέγματος

Ένα από τα πιο σημαντικά στάδια της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων είναι η δημιουργία του κατάλληλου πλέγματος (mesh). Η διαδικασία αυτή αποτελεί ουσιαστικά τον κατακερματισμό της γεωμετρίας του μοντέλου σε επιμέρους μικρά στοιχεία.

Το mesh μπορεί να είναι δομημένο ή αδόμητο. Δομημένο θεωρείται το mesh που ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο και υπάρχει συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων διαδοχικών στοιχείων. Το δομημένο mesh υπερτερεί σε σχέση με το αδόμητο ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Για το λόγο αυτό στην συγκεκριμένη επιλέγεται η ανάπτυξη δομημένου mesh.

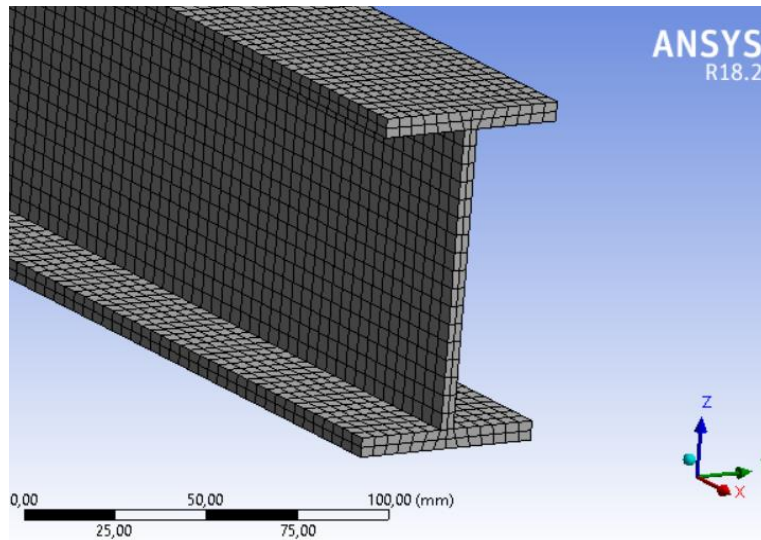
Το mesh μπορεί να παραχθεί αυτόματα από το πρόγραμμα ή να το διαμορφώσει ο χρήστης. Το αυτόματα παραγόμενο mesh προκύπτει συνήθως αδόμητο, σε σύνθετες γεωμετρίες, και δεν επιλέγεται. Για τη διαμόρφωση του πλέγματος από τον χρήστη, το πρόγραμμα προσφέρει εντολές ελέγχου. Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η εντολή «Edge Sizing» σύμφωνα με την οποία επιλέγεται μία ή περισσότερες ακμές της γεωμετρίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, και ο χρήστης καθορίζει τον αριθμό των στοιχείων στον οποίο θα διαμεριστεί.



Σχήμα 4.8: Παράδειγμα χρήσης της εντολής edge sizing

Περιγραφή χρησιμοποιούμενου πλέγματος

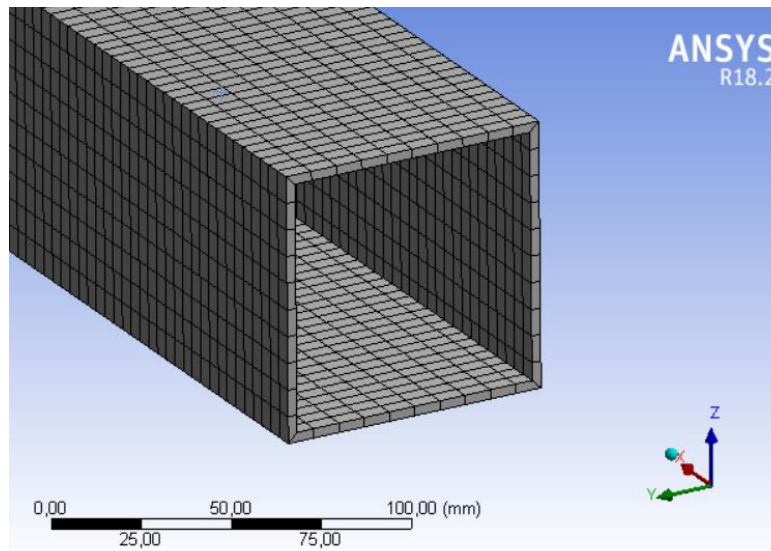
➤ Διατομή IPE



Σχήμα 4.9: Πλέγμα δοκού διατομής IPE

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, τα πέλματα της διατομής έχουν 14 στοιχεία κατά το πλάτος (διεύθυνση Y) και 2 στοιχεία κατά το ύψος (διεύθυνση Z). Ο κορμός έχει 17 στοιχεία κατά το ύψος (διεύθυνση Z) και 2 στοιχεία κατά το πάχος (διεύθυνση Y). Τέλος, για όλη τη δοκό, κατά το μήκος (διεύθυνση X) έχει οριστεί σταθερό μήκος στοιχείων ίσο με 5mm, διαιρώντας την κάθε διαμήκη ακμή σε 150 στοιχεία.

➤ Κοίλη τετραγωνική Διατομή

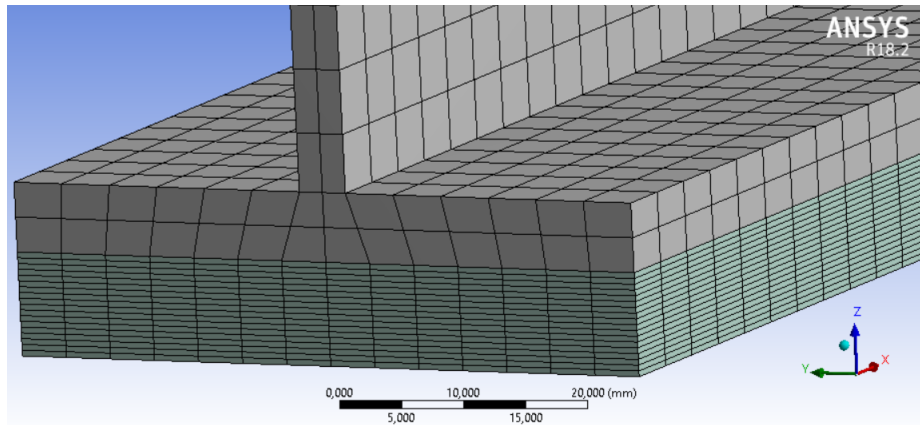


Σχήμα 4.10: Πλέγμα δοκού κοίλης τετραγωνικής διατομής

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10, κάθε πλευρά της διατομής έχει διαιρεθεί σε 10 στοιχεία κατά το πλάτος της και σε 1 στοιχείο κατά το πάχος. Επίσης, για όλη τη δοκό, κατά το μήκος (διεύθυνση X) έχει οριστεί σταθερό μήκος στοιχείων ίσο με 5mm, διαιρώντας την κάθε διαμήκη ακμή σε 150 στοιχεία.

➤ Πλέγμα Επιθεμάτων

Τη διακριτοποίηση των επιθεμάτων από CFRP διέπει η εξής λογική. Ως προς το πλάτος και το μήκος (διευθύνσεις Y, X αντίστοιχα) ακολουθείται το μοτίβο πλέγματος της δοκού στην οποία είναι κολλημένο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Αυτό γίνεται προκειμένου να προκύψει δομημένο πλέγμα, και να υπάρχει συνέχεια μεταξύ των κόμβων. Ως προς το πάχος (διεύθυνση Z), το επίθεμα χωρίζεται σε τόσα στοιχεία, όσες ήταν και οι στρώσεις υφάσματος από ανθρακόνημα με τις οποίες κατασκευάστηκε το αντίστοιχο πειραματικό επίθεμα.

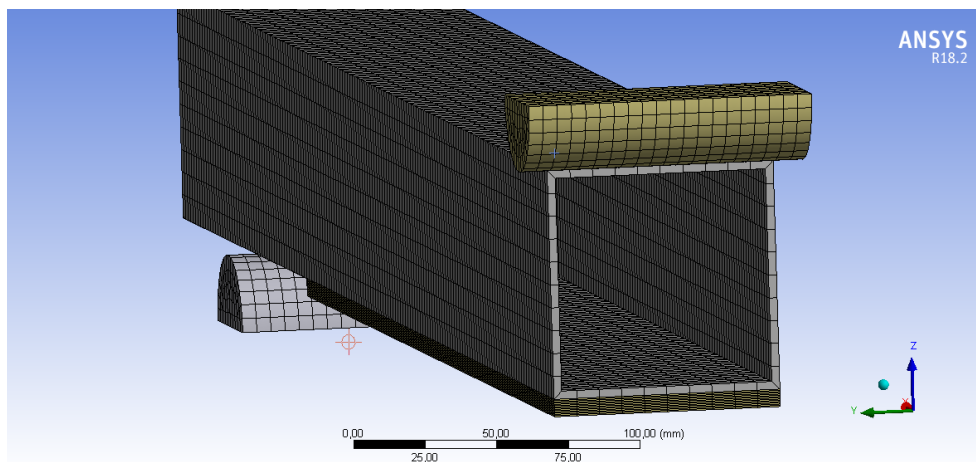


Σχήμα 4.11: Παράδειγμα διακριτοποίησης επιθέματος CFRP με 18 στοιχεία κατά το πάχος

➤ Pusher- Roller

Στους roller και pusher ορίστηκε στις ακμές τους σταθερό μήκος στοιχείων ίσο με 5mm.

Στο Σχήμα 4.12 παρατίθεται ένα παράδειγμα συνολικής διακριτοποίησης ενός μοντέλου.



Σχήμα 4.12: Παράδειγμα συνολικού πλέγματος (μοντέλο O2)

Διερεύνηση Πλέγματος

Πριν επιλέξουμε το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην αριθμητική μας ανάλυση, ήταν απαραίτητο να εκτελεστεί μία διαδικασία που ονομάζεται διαδικασία σύγκλισης πλέγματος (mesh convergence). Γενικά όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα ενός μοντέλου, τόσο πιο ακριβή και αξιόπιστα είναι και τα αποτελέσματά του, συγκλίνοντας σε μία συγκεκριμένη τιμή. Ωστόσο, η αύξηση του αριθμού των κόμβων του συστήματος αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο. Επομένως, όσο πυκνώνει η διαμέριση του πλέγματος, αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος, χωρίς να έχουμε σημαντικά καλύτερα αριθμητικά αποτελέσματα. Με τη διαδικασία σύγκλισης πλέγματος, επιθυμούμε να προσδιορίσουμε

εκείνη την πυκνότητα πλέγματος που μας παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

Η διαδικασία σύγκλισης πλέγματος πραγματοποιήθηκε για τις δύο χαλύβδινες δοκούς διαφορετικής διατομής που μοντελοποιούνται. Για κάθε δοκό, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος, ένα «αραιό» πλέγμα, ένα «μεσαίο» πλέγμα και ένα «πυκνό» πλέγμα. Για τη σύγκριση των διαφορετικών πλεγμάτων, ασκήθηκε μία σταθερή δύναμη, «Force», από τον pusher στη δοκό και συγκρίθηκαν τα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης στο μέσον της κάτω πλευράς, στο επίπεδο συμμετρίας του κάθε δοκιμίου (δηλαδή στο μέσον του ολόκληρου δοκιμίου). Συγκρίθηκε, επίσης, το «μέγιστο βέλος κάμψης», δηλαδή η τιμή του βέλους κάμψης που είχε αναπτυχθεί στο τέλος επιβολής της δύναμης.

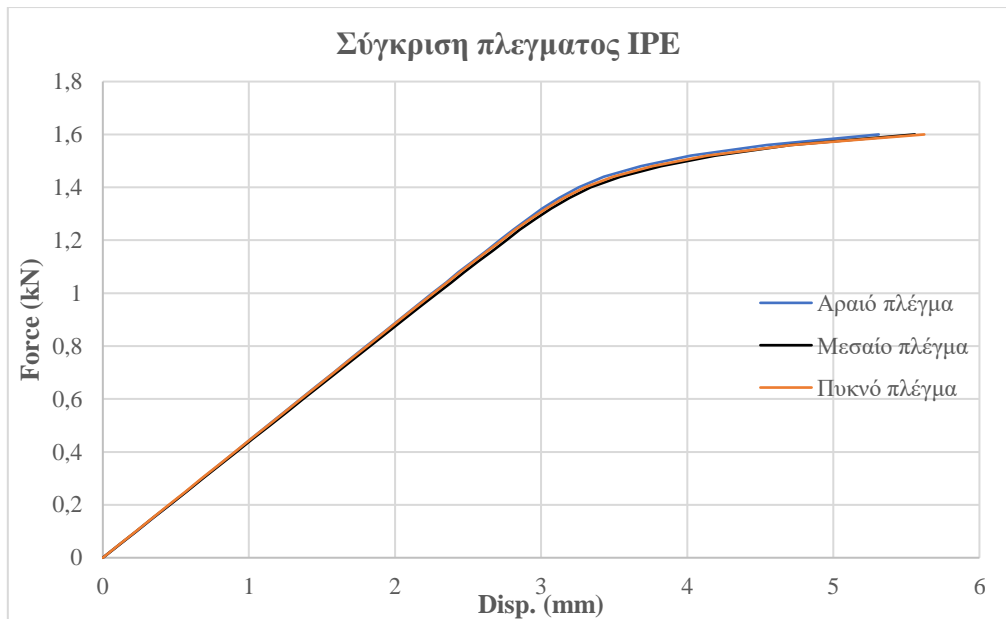
Για τα μοντέλα IPE έχουμε:

- Στο αραιό πλέγμα, τα πέλματα της διατομής έχουν 11 στοιχεία κατά το πλάτος (διεύθυνση Y) και 1 στοιχείο κατά το ύψος (διεύθυνση Z). Ο κορμός έχει 10 στοιχεία κατά το ύψος (διεύθυνση Z) και 1 στοιχείο κατά το πάχος (διεύθυνση Y). Τέλος, για όλη τη δοκό, κατά το μήκος (διεύθυνση X) έχει οριστεί σταθερό μήκος στοιχείων ίσο με 10mm, διαιρώντας την κάθε διαμήκη ακμή σε 75 στοιχεία.
- Το μεσαίο πλέγμα είναι το χρησιμοποιούμενο πλέγμα που περιγράφεται από το Σχήμα 4.9.
- Στο πυκνό πλέγμα, τα πέλματα της διατομής έχουν 20 στοιχεία κατά το πλάτος (διεύθυνση Y) και 2 στοιχείο κατά το πάχος (διεύθυνση Z). Ο κορμός έχει 32 στοιχεία κατά το ύψος (διεύθυνση Z) και 4 στοιχείο κατά το πάχος (διεύθυνση Y). Τέλος, για όλη τη δοκό, κατά το μήκος (διεύθυνση X) έχει οριστεί σταθερό μήκος στοιχείων ίσο με 5mm, διαιρώντας την κάθε διαμήκη ακμή σε 150 στοιχεία.

Αντίστοιχα, για τα μοντέλα O, έχουμε:

- Στο αραιό πλέγμα, κάθε πλευρά της διατομής έχει διαιρεθεί σε 6 στοιχεία κατά το πλάτος και σε 1 στοιχείο κατά το πάχος. Επίσης, για όλη τη δοκό, κατά το μήκος (διεύθυνση X) έχει οριστεί σταθερό μήκος στοιχείων ίσο με 10mm, διαιρώντας την κάθε διαμήκη ακμή σε 75 στοιχεία.
- Το μεσαίο πλέγμα είναι το χρησιμοποιούμενο πλέγμα που περιγράφεται από το Σχήμα 4.10.
- Στο πυκνό πλέγμα, κάθε πλευρά της διατομής έχει διαιρεθεί σε 6 στοιχεία κατά το πλάτος και σε 2 στοιχεία κατά το πάχος. Επίσης, για όλη τη δοκό, κατά το μήκος (διεύθυνση X) έχει οριστεί σταθερό μήκος στοιχείων ίσο με 5mm, διαιρώντας την κάθε διαμήκη ακμή σε 150 στοιχεία.

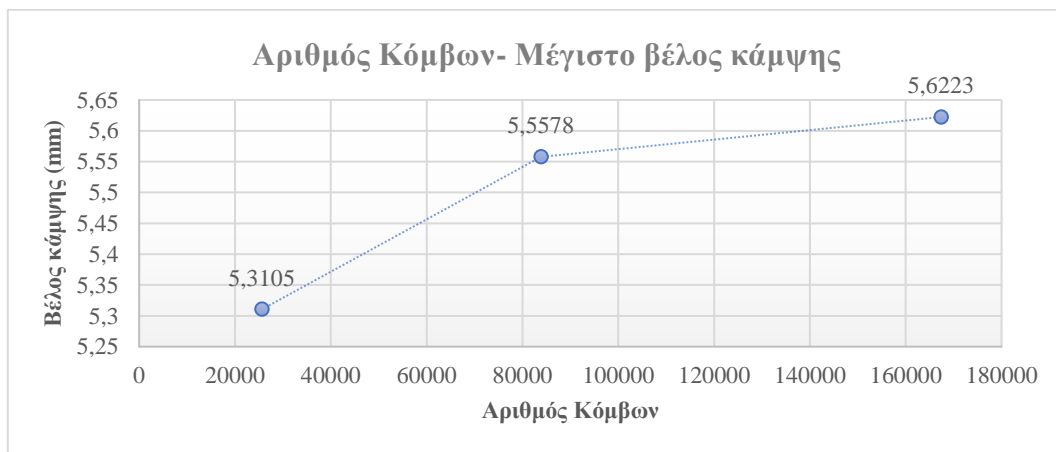
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης των διαφορετικών πλεγμάτων για κάθε είδος μοντέλων. Στο Σχήμα 4.13 παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης για τα τρία διαφορετικά πλέγματα των δοκιμίων IPE. Στον Πίνακα 4.7 και στο Σχήμα 4.14 παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των δοκιμίων IPE σχετικά με το μέγιστο βέλος κάμψης.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα βέλους κάμψης σύγκρισης πλεγμάτων IPE

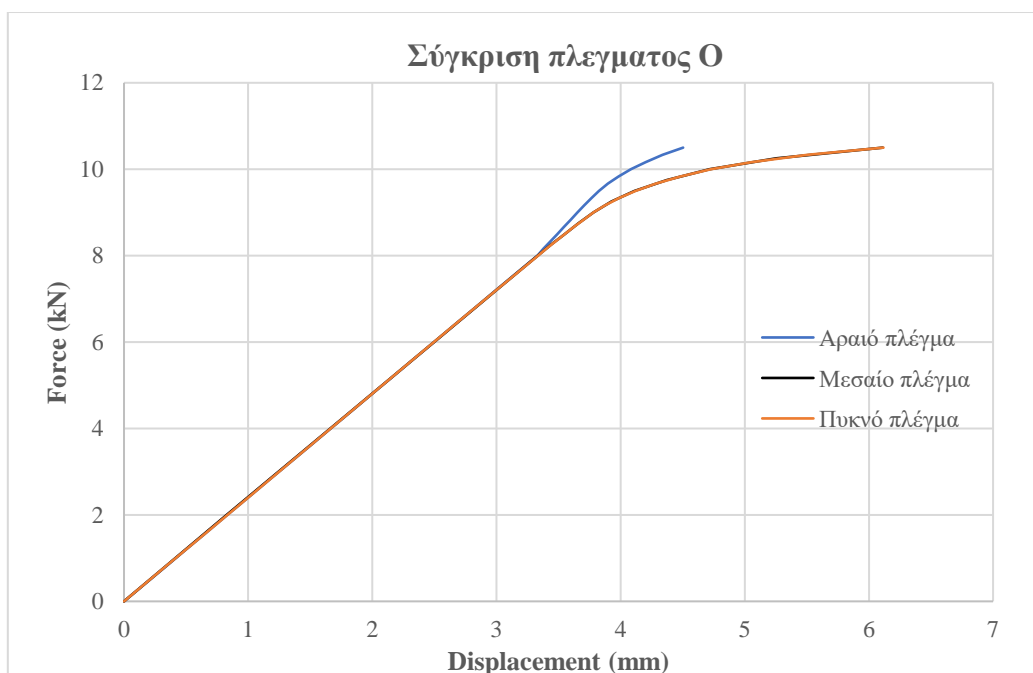
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα σύγκλισης πλεγματος IPE

Διατομή IPE			
Force= -16 KN	Αραιό πλέγμα	Μεσαίο Πλέγμα	Πυκνό Πλέγμα
Αριθμός κόμβων	25608	83856	167360
Μέγιστο βέλος κάμψης (mm):	5,31	5,55	5,62
%Μεταβολή μέγιστου β.κ.	-	4,66%	1,16%



Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα σύγκλισης πλεγματος IPE

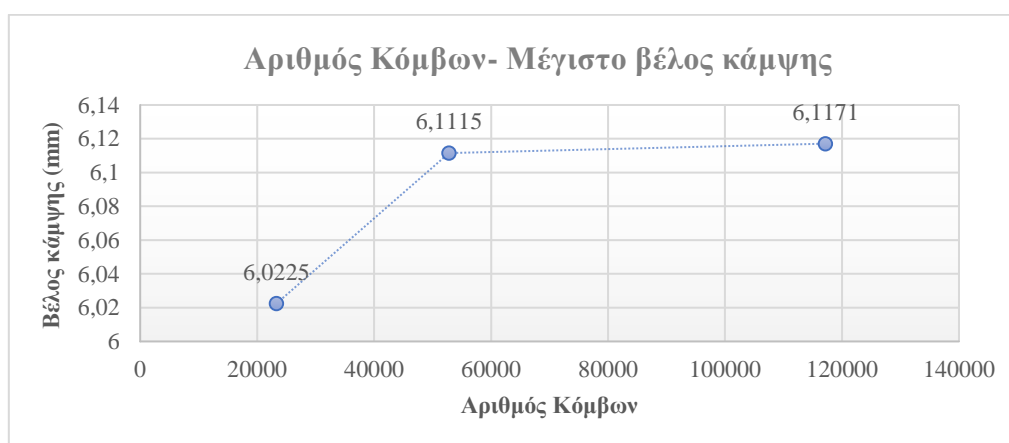
Στα Σχήματα 4.15 και 4.16 καθώς και στον Πίνακα 4.8 παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα δοκίμια Ο.



Σχήμα 4.15: Αποτελέσματα σύγκλισης πλεγματος Ο

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα σύγκλισης πλεγματος Ο

Κοίλη τετραγωνική Διατομή			
Force= -10,5 kN	Αραιό Πλέγμα	Μεσαίο Πλέγμα	Πυκνό Πλέγμα
Αριθμός κόμβων	23316	52796	117185
Μέγιστο βέλος κάμψης (mm):	6,02	6,11	6,12
%Μεταβολή μέγιστου β.κ.	-	1,48%	0,09%



Σχήμα 4.16: Αποτελέσματα σύγκλισης πλεγματος Ο

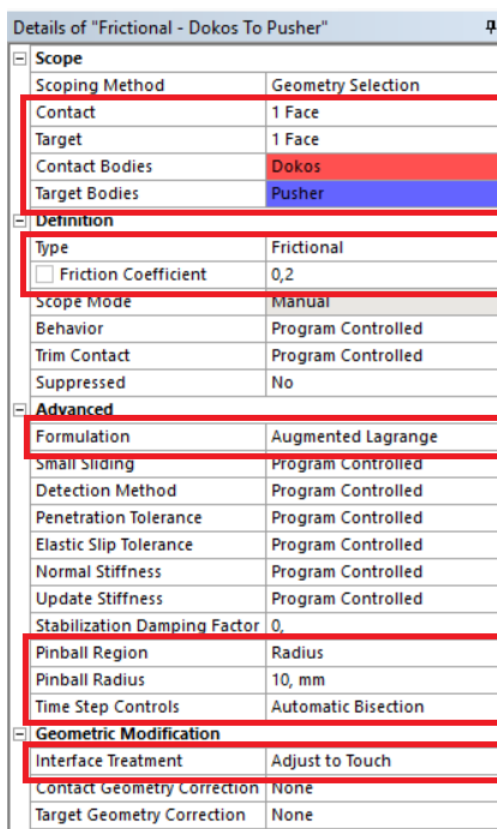
Παρατηρούμε ότι και για τις δύο περιπτώσεις, το μεσαίο πλέγμα δίνει πολύ παραπλήσιο αποτέλεσμα με το πυκνό (απόκλιση <2%). Επομένως, για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου, το συγκεκριμένο πλέγμα επιλέγεται και θα χρησιμοποιηθεί για τη διακριτοποίηση των χαλύβδινων δοκών σε όλα τα μοντέλα.

4.2.5 Δημιουργία Επαφών

Για να αλληλοεπιδράσουν δύο διαφορετικά σώματα και να μεταφερθούν δυνάμεις και μετατοπίσεις από τους κόμβους του ενός στο άλλο, πρέπει να δημιουργηθεί μία επαφή μεταξύ των επιφανειών τους. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη επαφών που πρέπει να μοντελοποιηθούν στη διάταξή μας. Η πρώτη αφορά την επαφή μεταξύ των κυλίνδρων (pusher- roller) και της χαλύβδινης δοκού, προκειμένου να μοντελοποιηθεί η στήριξη της δοκού και η επιβολή φορτίου σε αυτήν. Η δεύτερη αφορά τη μοντελοποίηση του κολλητού συνδέσμου μεταξύ του επιθέματος CFRP και της χαλύβδινης δοκού.

Επαφή Κυλίνδρων- Δοκού

Η συγκεκριμένη επαφή θα μοντελοποιηθεί ως επαφή με τριβή (Frictional Contact). Σε αυτού του είδους την επαφή τα δύο σώματα μπορούν να φέρουν τάσεις διατμήσεως στη διεπιφάνειά τους, μέχρι μία ορισμένη τιμή, προτού αρχίσουν να ολισθαίνουν μεταξύ τους. Στο Σχήμα 4.17 φαίνονται οι παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν προκειμένου να οριστεί επαρκώς η επιθυμητή επαφή.



Details of "Frictional - Dokos To Pusher"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	Dokos
Target Bodies	Pusher
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0,2
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	10, mm
Time Step Controls	Automatic Bisection
Geometric Modification	
Interface Treatment	Adjust to Touch
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Σχήμα 4.17: Παράμετροι ορισμού Frictional contact

Αρχικά, ορίζονται οι επιφάνειες μεταξύ των οποίων πραγματοποιείται η επαφή. Απαιτείται η επιλογή ενός «Contact Body» (σώμα επαφής) και ενός «Target Body» (σώμα στόχος). Ως σώμα επαφής ορίζεται το παραμορφούμενο σώμα και ως σώμα στόχος το άκαμπτο σώμα. Επομένως, ως σώμα επαφής τίθεται η δοκός ενώ ως σώμα επαφής ορίζεται ο pusher (ή ο roller).

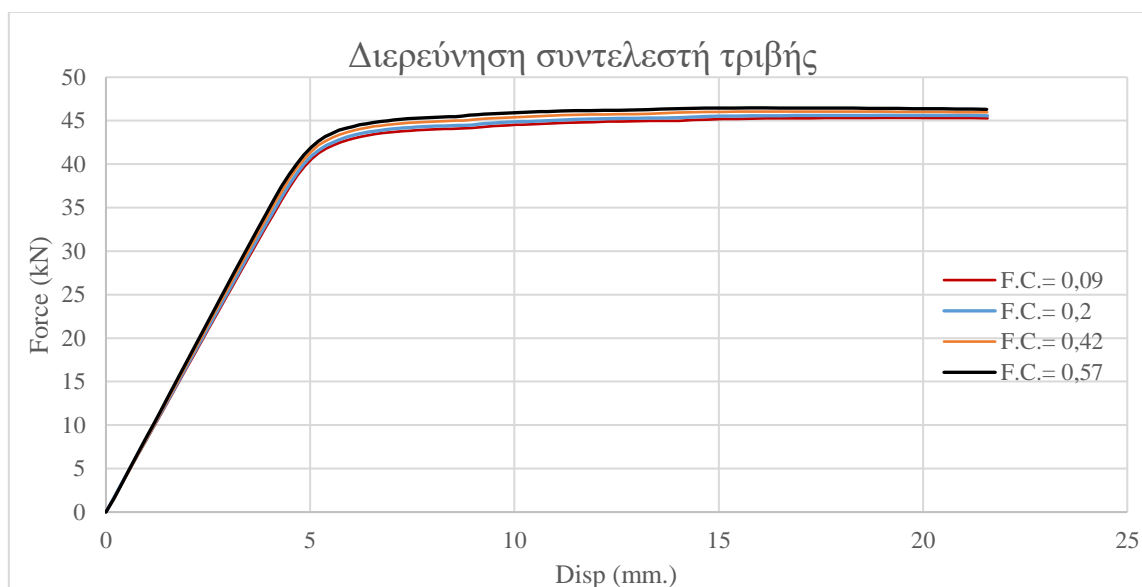
Αφότου οριστεί το είδος της επαφής ως «Frictional», το πρόγραμμα ζητάει ως είσοδο μία τιμή για το συντελεστή τριβής. Η τιμή αυτή λήφθηκε 0,2 (Mohammad 2014) ως τυπική τιμή συντελεστή τριβής μεταξύ χαλύβδινων επιφανειών. Έπειτα, επιλέγεται ως αλγόριθμος ανάλυσης των επαφών η επιλογή Augmented Lagrange που είναι κατάλληλος για όλες τις επαφές (ANSYS Help 18.2). Ρυθμίζεται, επίσης, η επιλογή «Pinball Region» σε ακτίνα (Radius) 10mm. Η ρύθμιση αυτή ορίζει μία σφαιρική περιοχή δυνατής αλληλοεπίδρασης των επιφανειών. Ο ακριβής προσδιορισμός της τιμής της έχει νόημα

μόνο σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες. Στη ρύθμιση «Time step Controls» τίθεται η επιλογή «Automatic Bisection» δίνοντας τη δυνατότητα στο πρόγραμμα να υποδιπλασιάσει το βήμα επίλυσης, αν «δυσκολεύεται» να υπολογίσει τη λύση. Η σημασία των βημάτων επίλυσης εξηγείται στο επόμενο εδάφιο. Τέλος, στην επιλογή «Interface Treatment» επιλέγεται η παράμετρος «Adjust to Touch». Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο ώστε το πρόγραμμα να αφαιρέσει πιθανά κενά μεταξύ των σωμάτων, που προκύπτουν από τη διακριτοποίηση του πλέγματος, και να θεωρήσει ότι τα σώματα είναι σε επαφή. Όλες οι υπόλοιπες επιλογές αφήνονται να ρυθμιστούν από το πρόγραμμα (Program Controlled)

Διερεύνηση συντελεστή τριβής

Η τιμή του συντελεστή τριβής λήφθηκε 0,2 (Mohammad 2014) ως η τυπική τιμή συντελεστή τριβής ολίσθησης μεταξύ χαλύβδινων επιφανειών που δεν έχουν λιπανθεί. Ο ακριβής προσδιορισμός του συντελεστή τριβής είναι αδύνατος χωρίς την εκτέλεση πειραματικών δοκιμών. Είναι, επίσης, δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια από τιμές της βιβλιογραφίας καθώς δεν είναι γνωστό το είδος του χάλυβα από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα δοκίμια και ο κύλινδρος άσκησης δύναμης.

Είναι, ωστόσο, απαραίτητο να διερευνηθεί η ευαισθησία του μοντέλου στην τιμή αυτή, δηλαδή, να ελεγχθεί τι επίδραση θα έχει στα αποτελέσματα η μεταβολή του εν λόγω μεγέθους. Για το λόγο αυτό συγκρίθηκαν τα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης από όμοια μοντέλα μεταξύ των οποίων η μόνη διαφορά ήταν η συγκεκριμένη τιμή. Η σύγκριση έγινε μεταξύ διαφόρων τιμών που συναντήθηκαν στη βιβλιογραφία. Οι πιθανές τιμές του συντελεστή τριβής (F.C.) που εξετάστηκαν ήταν οι 0,09 (Weber 1965), 0,2 (Mohammad 2014), 0,42 (Kurtus 2019) και 0,57 (Raton 1997). Στο Σχήμα 4.18 φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης.



Σχήμα 4.18: Συγκριτικό διάγραμμα διερεύνησης συντελεστή τριβής

Όπως παρατηρούμε, η επίδραση της τιμής του συντελεστή τριβής δεν έχει ιδιαίτερη σημασία στη συμπεριφορά της δοκού, ακόμα και για μεγάλες μεταβολές του. Επομένως, ελλείψει περισσότερων στοιχείων για τις ιδιότητες των υλικών μας, επιλέγεται η τιμή που είχε ληφθεί αρχικά, δηλαδή, F.C.= 0,2.

Επαφή Επιθέματος- Χαλύβδινης Δοκού

Στην περίπτωση αυτή, το επίθεμα είναι κολλημένο επάνω στη χαλύβδινη δοκό επομένως τα δύο σώματα δεν μπορούν να μετατοπιστούν το ένα σε σχέση με το άλλο. Η επαφή αυτή μοντελοποιείται

μέσω της χρήσης της επαφής «Bonded Contact». Σε αυτό το είδος επαφής δεν επιτρέπεται η απομάκρυνση και η ολίσθηση μεταξύ των επιφανειών που είναι σε επαφή, σαν να είναι «κολλημένες» η μία με την άλλη. Σημειώνεται, ότι στη μοντελοποίηση δεν έχουν συμπεριληφθεί ιδιότητες αποκόλλησης μεταξύ της χαλύβδινης δοκού και του επιθέματος. Αυτό συνεπάγεται πως τα αριθμητικά αποτελέσματα των ενισχυμένων δοκιμών μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα πειραματικά μόνον όσο τα επιθέματα των πειραματικών δοκιμών είναι κολλημένα επάνω στη χαλύβδινη δοκό και όχι αφότου επέλθει αποκόλληση. Στο Σχήμα 4.19 φαίνονται οι παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να οριστεί επαρκώς η επιθυμητή επαφή.

Details of "Bonded - Dokos To CFRP"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	Dokos
Target Bodies	CFRP
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	MPC
Detection Method	Program Controlled
Constraint Type	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Σχήμα 4.19: Παράμετροι ορισμού Bonded contact

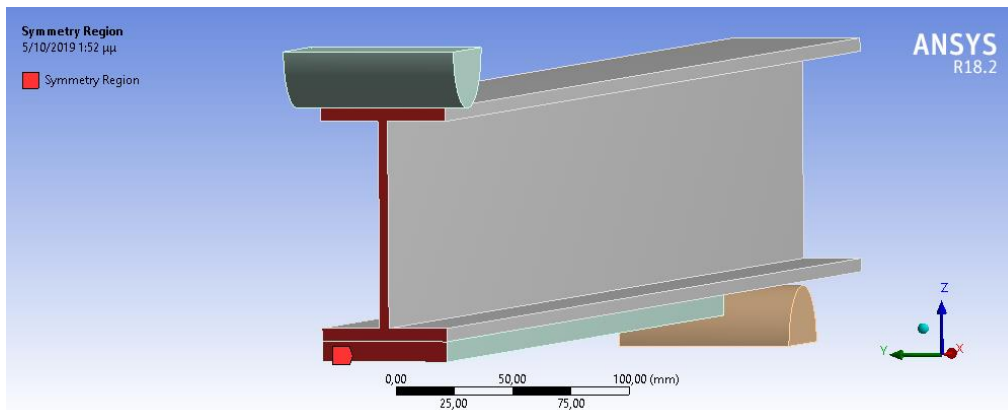
Ως «Contact Body» επιλέχθηκε η δοκός και ως «Target Body» επιλέχθηκε το επίθεμα. Ως αλγόριθμος ανάλυσης των επαφών τίθεται η επιλογή “MPC” (Multi- Point Constraint). Η επιλογή αυτή θεωρείται η βέλτιστη για μοντελοποίηση Bonded επαφών και προτείνεται από το πρόγραμμα.

4.3 Επίλυση

Η επίλυση (solution) αποτελεί το δεύτερο στάδιο της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Στο στάδιο αυτό, ορίζονται και οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος (στηρίξεις, πακτώσεις, δυνάμεις κλπ.). Επίσης, στο στάδιο αυτό ορίζεται το είδος της ανάλυσης καθώς και κάποιες βασικές παράμετροι αυτής όπως ο ρυθμός επιβολής φορτίου (time step).

4.3.1 Συνοριακές Συνθήκες

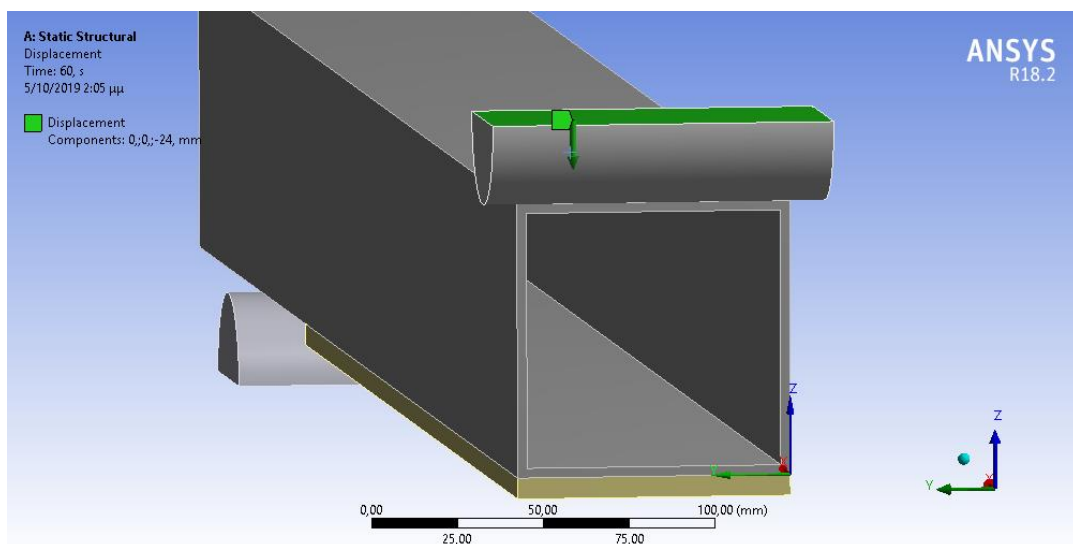
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο μοντέλο αξιοποιούμε την ύπαρξη συμμετρίας στο πρόβλημα μας, μοντελοποιώντας μόνον το μισό. Η πρώτη, επομένως, συνοριακή συνθήκη είναι η επιβολή συμμετρίας. Η ιδιότητα αυτή, εισάγεται με την εντολή “Symmetry”. Σε αυτήν, διαλέγουμε την επιλογή “Symmetry Region”, που για οριστεί απαιτεί τον καθορισμό ενός επιπέδου συμμετρίας για κάθε συμμετρικό σώμα και του άξονα στον οποίο «εκτείνεται» αυτό. Επιλέγουμε, λοιπόν, την επιφάνεια στην αρχή του σχεδιασμένου δοκιμίου και ως άξονα επιλέγουμε αυτόν του μήκους, δηλαδή τον άξονα X. Στο Σχήμα 4.20 φαίνεται με κόκκινο χρώμα η επιβολή της συμμετρίας, σε ένα μοντέλο, στο περιβάλλον του ANSYS:



Σχήμα 4.20: Επιλογή επιφανειών για επιβολή συμμετρίας

Δεύτερη συνοριακή συνθήκη αφορά την πάκτωση του roller. Επιλέγουμε την κάτω επιφάνεια του ημί- κυλίνδρου και επιβάλλουμε τη συνοριακή συνθήκη «Fixed Support». Με αυτόν τον τρόπο περιορίζονται όλες οι κινήσεις και οι στροφές των κόμβων του σώματος στην επιλεγμένη επιφάνεια, ώστε να δράσει σαν ακλόνητο στήριγμα όταν έρθει σε επαφή με το δοκίμιο.

Η τρίτη συνοριακή συνθήκη αφορά την επιβολή φορτίου μέσω του pusher. Όπως και στις πειραματικές δοκιμές, το φορτίο θα ασκηθεί με την επιβολή γραμμικά αυξανόμενης κατακόρυφης μετατόπισης του pusher προς την δοκό. Επιλέγουμε λοιπόν την «πάνω» επιφάνεια του pusher, όπως φαίνεται με πράσινο χρώμα στο Σχήμα 4.21, και της επιβάλλουμε τη συνοριακή συνθήκη «Displacement». Στις επιλογές ρύθμισης του «Displacement» περιορίζουμε τις κινήσεις στις διευθύνσεις X και Y θέτοντας την τιμή «0, ramped» και επιβάλλουμε μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση -24 mm στη διεύθυνση Z. Εξάιρεση αποτελεί το μοντέλο IPE4 στο οποίο επιβλήθηκε μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση -4 mm, διότι στο αντίστοιχο πειραματικό δοκίμιο το επίθεμα αποκολλήθηκε σε βέλος κάμψης 3,54 mm και δεν είχε νόημα η σύγκριση πέρα από αυτό το σημείο.



Σχήμα 4.21: Επιβολή Displacement

4.3.2 Τύπος ανάλυσης

Στο στάδιο της επίλυσης ορίζεται ο τύπος ανάλυσης με βάση τον οποίο γίνεται η επίλυση του προβλήματος. Αρχικά, επιλέγεται στατική ανάλυση διότι τα επιβαλλόμενα φορτία και η ανταπόκριση των δοκιμίων σε αυτά μεταβάλλονται αργά σε σχέση με το χρόνο. Έπειτα, μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε μη- γραμμική. Η μη- γραμμική ανάλυση λαμβάνει υπόψιν

μη- γραμμικά φαινόμενα που σχετίζονται με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και είναι πιο ακριβής στα αποτελέσματα της, απαιτώντας όμως περισσότερο υπολογιστικό χρόνο. Στα μοντέλα μας, επιλέγουμε την εκτέλεση μη- γραμμικής ανάλυσης για δύο λόγους. Ο πρώτος συνδέεται με την ύπαρξη μεγάλων παραμορφώσεων. Για να εκτελέσει το πρόγραμμα μη- γραμμική ανάλυση που συμπεριλαμβάνει την ύπαρξη μεγάλων παραμορφώσεων, απαιτείται να ενεργοποιηθεί η επιλογή «Large Deflection», από τη σειρά παραμέτρων «Analysis Settings». Ο δεύτερος λόγος που επιλέγεται μη- γραμμική ανάλυση σχετίζεται με τη μοντελοποίηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα. Η ρύθμιση του μοντέλου, ώστε να πραγματοποιηθεί αυτού του είδους η μη- γραμμική ανάλυση, υλοποιήθηκε στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων (υπό- εδάφιο 4.2.2), όπου ο χάλυβας μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό- πολύ γραμμικά ανελαστικό υλικό.

Μια προσέγγιση για την επίλυση τέτοιων μη γραμμικών προβλημάτων περιλαμβάνει τον κατακερματισμό του συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου σε μια σειρά από βήματα, τα οποία εφαρμόζονται σταδιακά στην κατασκευή. Μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής προσαρμόζεται στη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση, πριν επιβληθεί το επόμενο τμήμα του φορτίου. Η βηματική προσέγγιση του προβλήματος γίνεται με τη αριθμητική μέθοδο Newton- Raphson μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν τεθεί από το χρήστη. Αυστηρότερα κριτήρια σύγκλισης αυξάνουν τον υπολογιστικό χρόνο. Στο μοντέλο μας η συνολική μετατόπιση των 24 χιλιοστών χωρίστηκε σε δύο βήματα των 12 χιλιοστών. Το πρώτο βήμα, δηλαδή από 0 έως 12 χιλιοστά επιβαλλόμενης μετατόπισης του κυλίνδρου, χωρίστηκε σε 60 υπό- βήματα (substeps). Το δεύτερο βήμα, από 12 έως 24 χιλιοστά, χωρίστηκε σε 30 υπό- βήματα. Εξαιρέση αποτελεί, πάλι, το δοκίμιο IPE4 του οποίου η ανάλυση χωρίστηκε σε 30 υπό- βήματα. Σημειώνεται ότι ο χωρισμός του βήματος σε υπό- βήματα έγινε με μεταβαλλόμενο (μη σταθερό) βήμα. Η ρύθμιση αυτή πραγματοποιείται ενεργοποιώντας την επιλογή «Auto Time Stepping», από τη σειρά παραμέτρων «Analysis Settings». Η χρήση μεταβαλλόμενου βήματος σημαίνει πως είναι στην ευχέρεια του προγράμματος να διαιρέσει ένα βήμα σε περισσότερα υπό- βήματα, από αυτά που έχει ορίσει ο χρήστης, αν η αριθμητική σύγκλιση απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και χρόνο. Επειδή, όπως αναφέρθηκε, ο αριθμός των υποβημάτων μπορεί να επηρεάσει την λύση του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πύκνωσης του αριθμού των υποβημάτων, οι οποίες όμως δεν επέφεραν καμία μεταβολή στο αποτέλεσμα.

4.4 Μετ- επεξεργασία

Η μετ- επεξεργασία αποτελεί το τελευταίο στάδιο της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων. Στο στάδιο αυτό, το μοντέλο έχει πλέον επιλυθεί σύμφωνα με τις παραμέτρους που ορίσαμε σε όλα τα προηγούμενα στάδια, και εμείς αντλούμε και επεξεργαζόμαστε τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν.

Το ANSYS παρουσιάζει τα αποτελέσματα σε κόμβους ή σε ομάδες κόμβων που έχει ζητήσει ο χρήστης. Επομένως, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το φυσικό μέγεθος του οποίου τα αποτελέσματα χρειάζεται (π.χ. μετατόπιση στη διεύθυνση X, ολικές παραμορφώσεις κ.λπ.) και τον κόμβο (ή του κόμβους) στους οποίους τον ενδιαφέρει το σχετικό αποτέλεσμα. Το πρόγραμμα εμφανίζει μία λίστα με το ζητούμενο αποτέλεσμα στον επιλεγμένο κόμβο ανά υπό- βήμα φόρτισης (Substep). Το πρόγραμμα μπορεί, ακόμα, να εμφανίσει στην οθόνη χρωματική διαστρωμάτωση των αποτελεσμάτων ενός φυσικού μεγέθους, σε όλον τον όγκο της κατασκευής που μοντελοποιήθηκε. Αυτός ο τρόπος δίνει μία γενικότερη άποψη για τη συμπεριφορά του μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

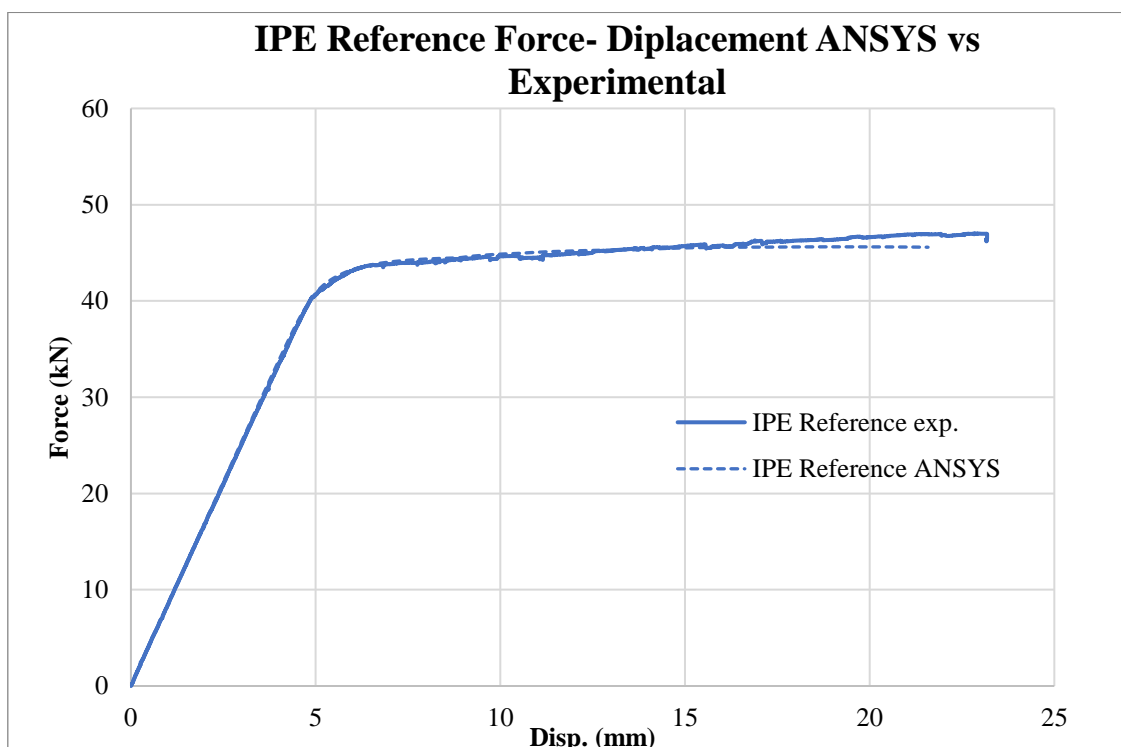
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με τα αντίστοιχα πειραματικά, ώστε να αξιολογηθεί η ποιότητα της μοντελοποίησης. Στο Εδάφιο 5.1 συγκρίνονται τα αποτελέσματα βέλους κάμψης, ενώ στο Εδάφιο 5.2 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων. Σημειώνεται πως η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα ενισχυμένα δοκίμια δεν έχει νόημα αφού επέλθει η αποκόλληση των επιθεμάτων. Για τον λόγο αυτό, στα διαγράμματα που ακολουθούν, τόσο οι πειραματικές όσο και οι αριθμητικές καμπύλες των δοκιμίων που παρουσίασαν αποκόλληση, παρατίθενται ως το σημείο που συνέβη αυτή.

5.1 Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης βέλους κάμψης

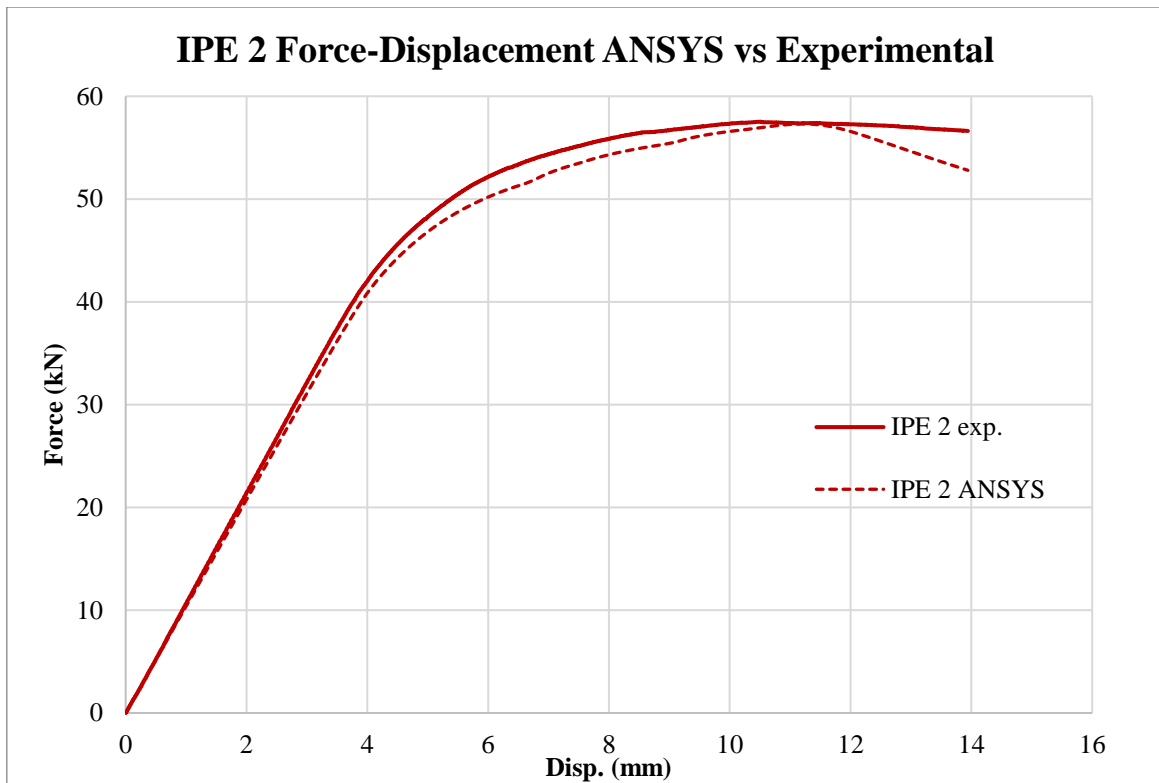
Στο εδάφιο αυτό παρατίθεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων βέλους κάμψης της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με τα αντίστοιχα πειραματικά. Για κάθε δοκίμιο, αντιπαραβάλλονται σε κοινό διάγραμμα η αριθμητική με την πειραματική καμπύλη δύναμης- βέλους κάμψης, και στο τέλος του εδαφίου συγκρίνονται αριθμητικά τα διαγράμματα.

5.1.1 Διαγράμματα δοκιμίων IPE

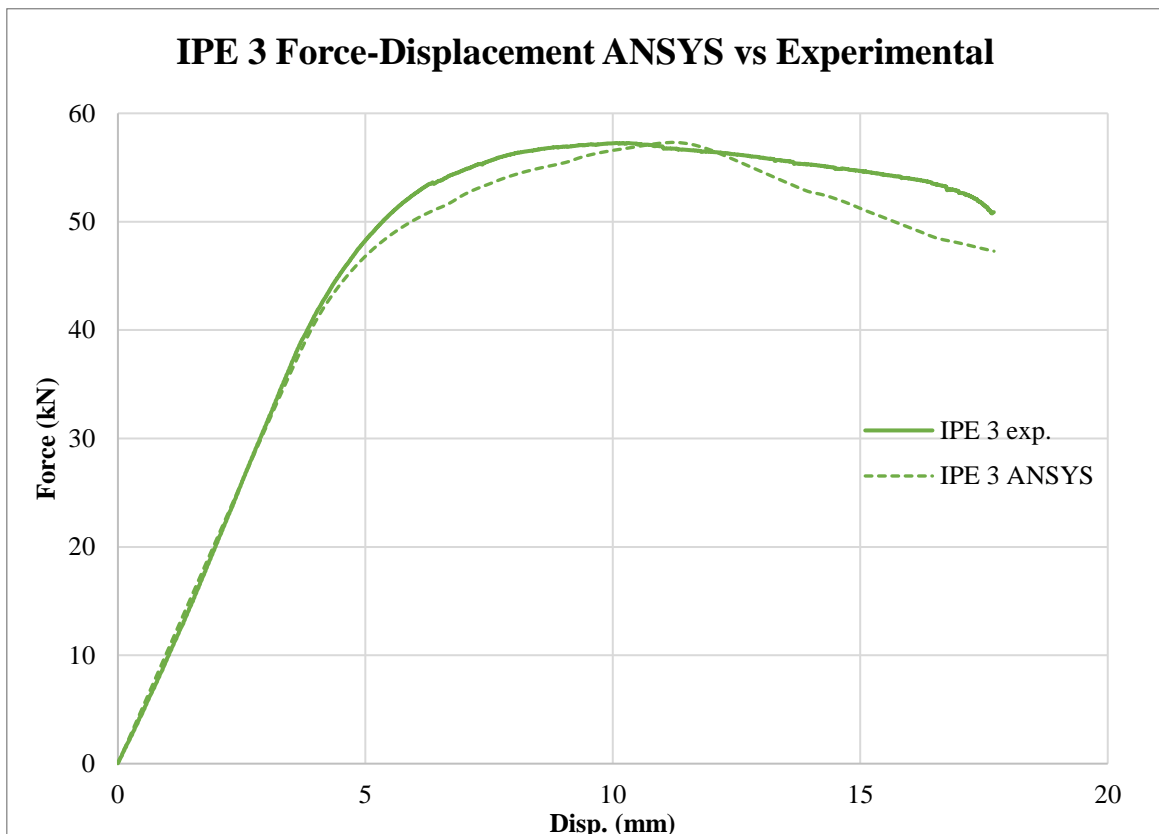
Στα Σχήματα 5.1 έως 5.4 φαίνονται τα διαγράμματα σύγκρισής αριθμητικών- πειραματικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια IPE.



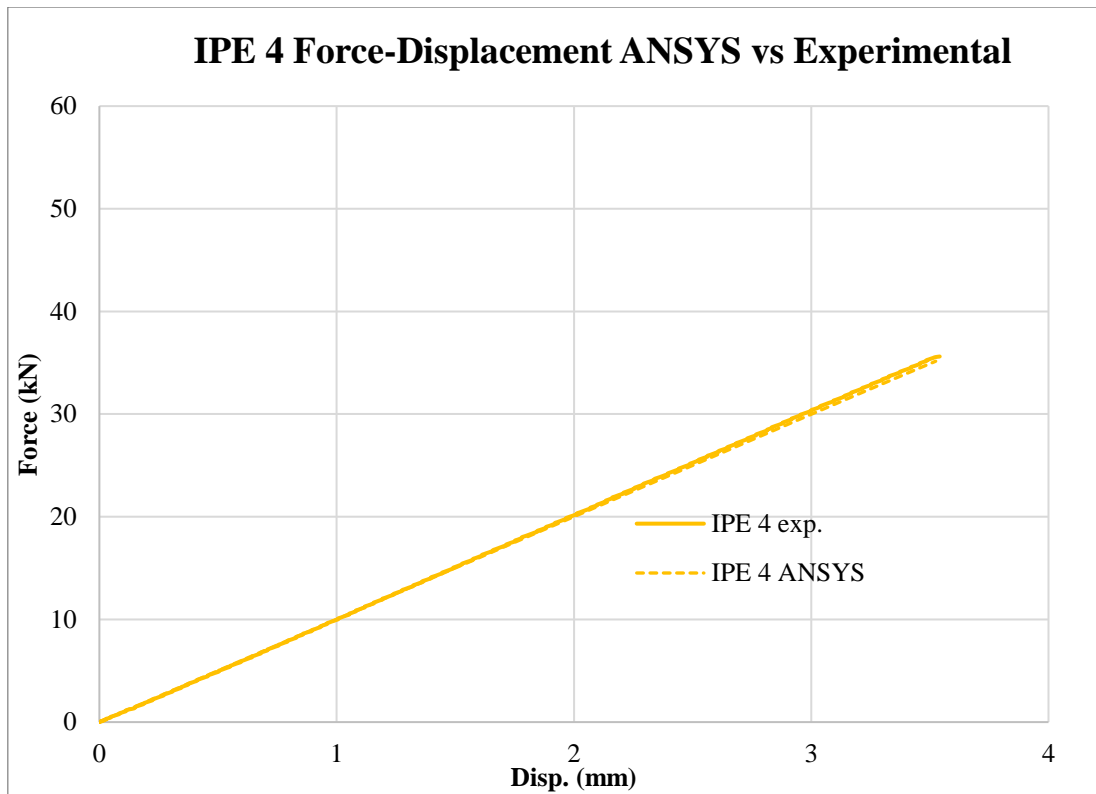
Σχήμα 5.1: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης IPE Reference



Σχήμα 5.2: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης IPE 2



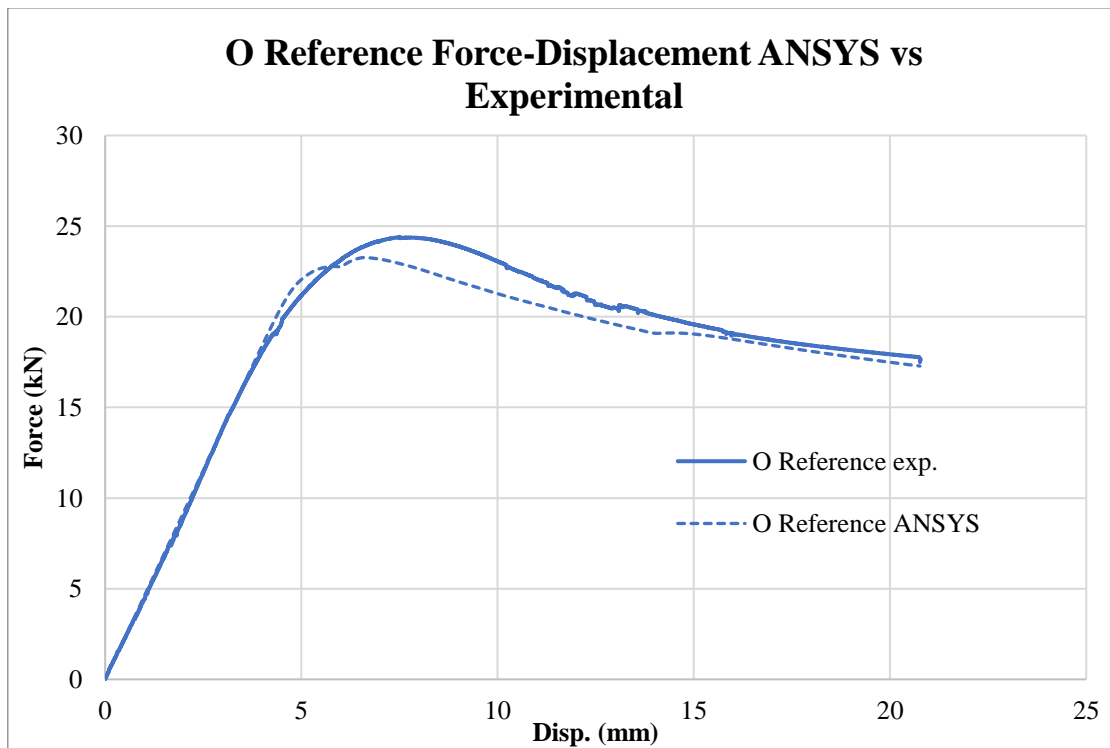
Σχήμα 5.3: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης IPE 3



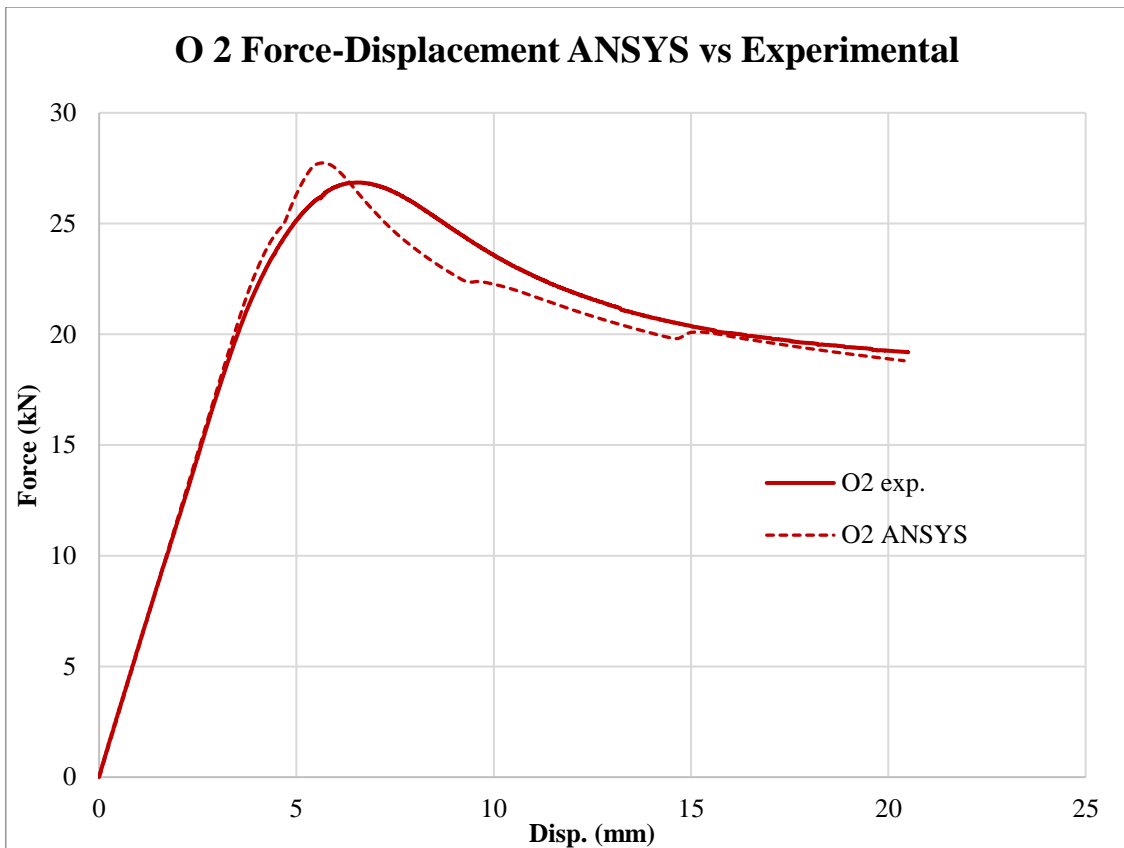
Σχήμα 5.4: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης IPE 4

5.1.2 Διαγράμματα δοκιμίων O

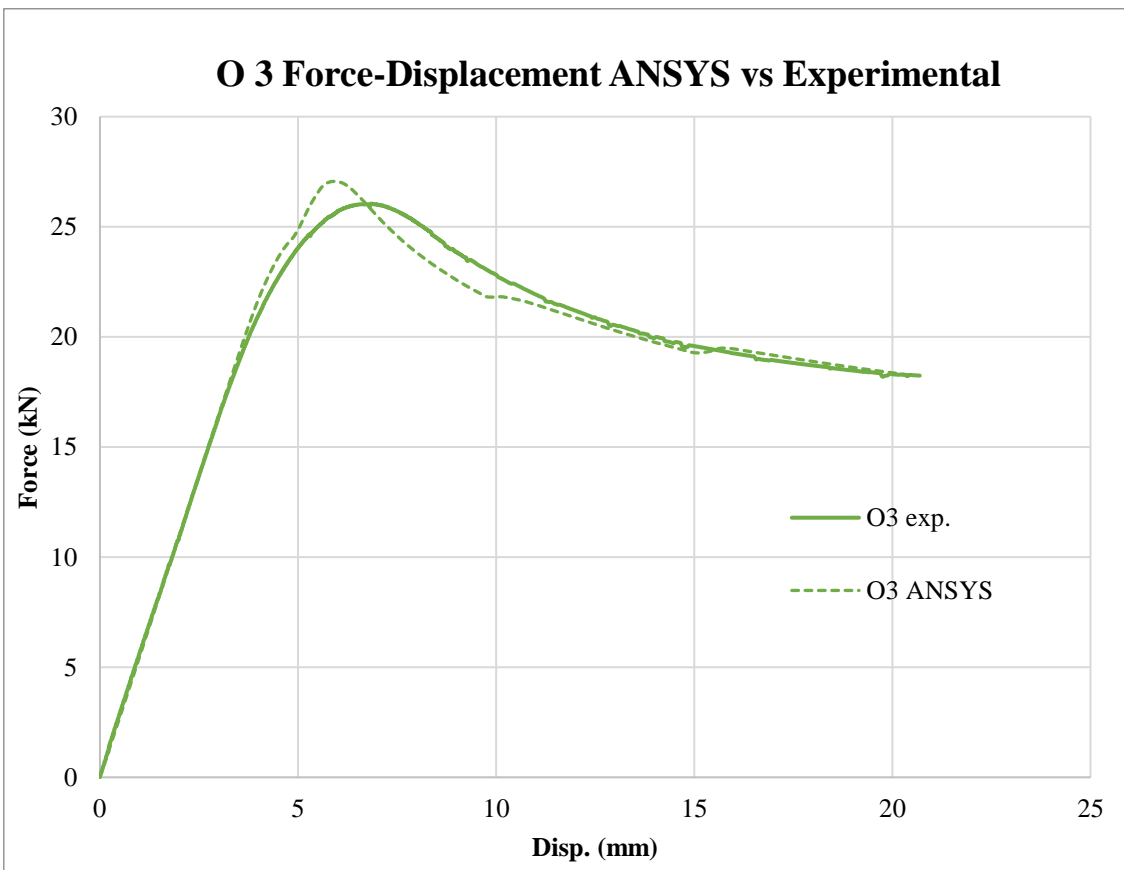
Στα Σχήματα 5.5 έως 5.8 φαίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης αριθμητικών- πειραματικών αποτελεσμάτων για τα δοκίμια O.



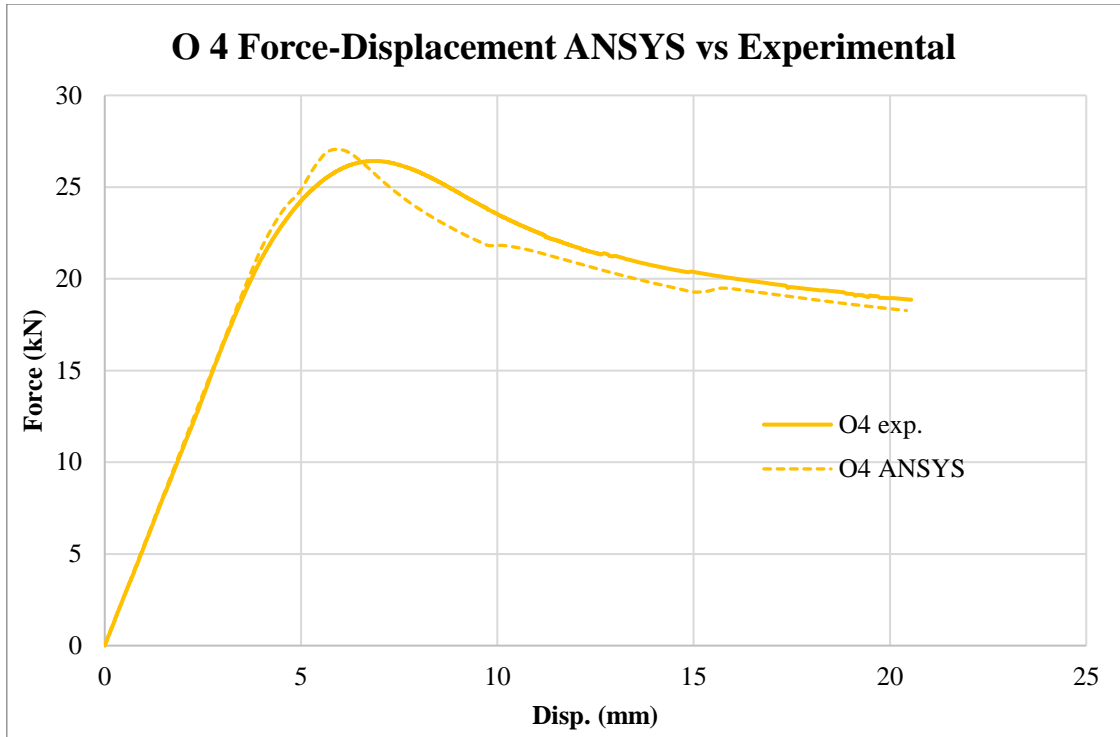
Σχήμα 5.5: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης O Reference



Σχήμα 5.6: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης O2



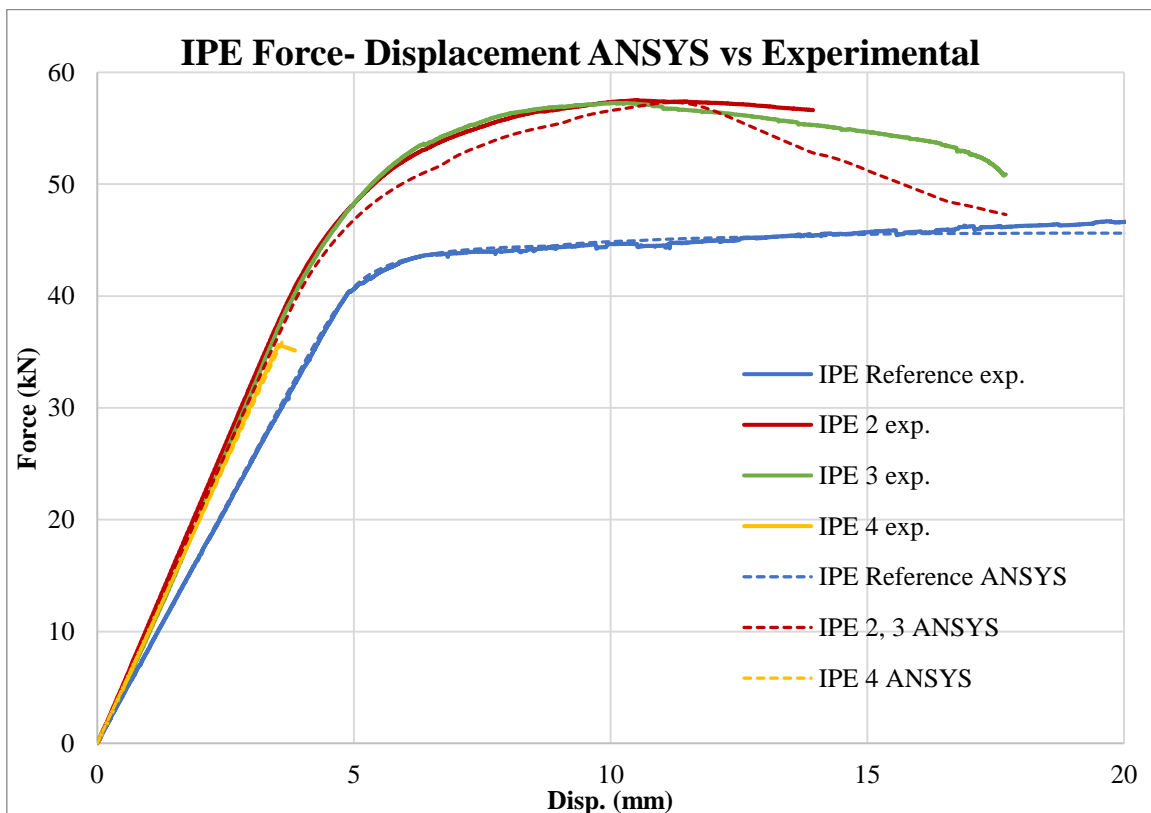
Σχήμα 5.7: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης O3



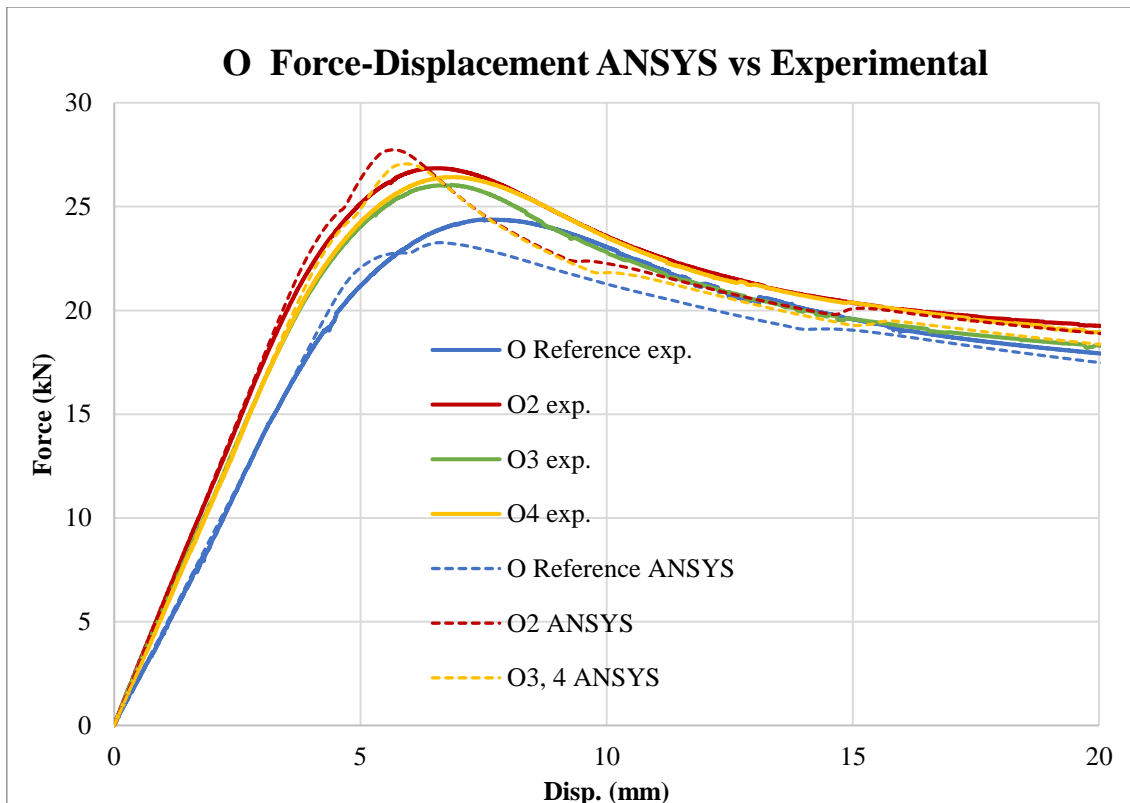
Σχήμα 5.8: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- βέλους κάμψης O4

5.1.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα

Στα Σχήμα 5.9 και 5.10 βλέπουμε τα συγκεντρωτικά διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης για τα δοκίμια IPE και O αντίστοιχα.



Σχήμα 5.9: Συγκεντρωτικά συγκριτικά διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης IPE



Σχήμα 5.10: Συγκεντρωτικά συγκριτικά διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης O

5.1.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αριθμητικά αποτελέσματα

Οι τιμές που μετρήθηκαν από τα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης των πειραματικών δοκιμίων μετρήθηκαν και στα αντίστοιχα αριθμητικά διαγράμματα. Στους Πίνακες 5.1 και 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα και οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τα πειραματικά.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση αριθμητικών- πειραματικών αποτελεσμάτων δοκιμίων IPE

Μετρούμενο μέγεθος	Reference	IPE2	IPE3	IPE4
Δυσκαμψία (kN/mm)	8,40	10,32	10,32	9,96
%Απόκλιση ANSYS- Exp.	1,19%	-3,85%	-3,34%	-1,84%
Μέγιστο Ελαστικό Φορτίο (kN)	39,00	39,93	39,93	-
%Απόκλιση ANSYS- Exp.	0,39%	-1,66%	1,19%	
Β. κάμψης στο μέγιστο Ελ. Φορτίο (mm)	4,68	3,89	3,89	
%Απόκλιση ANSYS- Exp.	-0,15%	1,57%	3,25%	
Μέγιστο Φορτίο (kN)	45,10	57,31	57,31	
%Απόκλιση ANSYS- Exp.	1,00%	-0,36%	0,09%	
Β. κάμψης στο μέγιστο φορτίο (mm)	11,27	11,27	11,27	
%Απόκλιση ANSYS- Exp.	6,68%	6,68%	8,33%	

Πίνακας 5.2: Σύγκριση αριθμητικών- πειραματικών αποτελεσμάτων δοκιμίων O

Μετρούμενο μέγεθος	Reference	O2	O3	O4
Δυσκαμψία (kN/mm)	4,60	5,85	5,46	5,46
<i>%Απόκλιση ANSYS- Expr.</i>	0,04%	2,30%	1,54%	0,94%
Μέγιστο Ελαστικό Φορτίο (kN)	20,39	21,32	21,03	21,03
<i>%Απόκλιση ANSYS- Expr.</i>	11,58%	4,49%	9,57%	4,20%
B. κάμψης στο μέγιστο Ελ. Φορτίο (mm)	4,45	3,49	3,86	3,86
<i>%Απόκλιση ANSYS- Expr.</i>	10,44%	-2,58%	-4,59%	2,41%
Μέγιστο Φορτίο (kN)	23,26	27,72	27,06	27,06
<i>%Απόκλιση ANSYS- Expr.</i>	-4,93%	3,15%	3,73%	2,36%
B. κάμψης στο μέγιστο φορτίο (mm)	6,57	5,60	5,96	5,96
<i>%Απόκλιση ANSYS- Expr.</i>	-14,17%	-15,75%	-14,71%	-12,99%

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας τα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης παρατηρούμε κατ' αρχάς πολύ καλή σύμπτωση μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών καμπυλών τόσο για τα δοκίμια IPE όσο και για τα δοκίμια O.

Όσον αφορά στην δυσκαμψία, τα αριθμητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με πολύ μικρές αποκλίσεις, που δεν ξεπερνούν το 4%, ενώ σε ορισμένα δοκίμια είναι κάτω από 1% (O Reference, O4). Το μοντέλο, επομένως, είναι αξιόπιστο στον υπολογισμό της δυσκαμψίας για όλα τα δοκίμια.

Στον προσδιορισμό του μέγιστου ελαστικού φορτίου, τα αποτελέσματα, επίσης, συμφωνούν, τόσο στην τιμή του, όσο και στο βέλος κάμψης στο οποίο εμφανίζεται. Στα δοκίμια IPE τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι πολύ κοντά στα πειραματικά με αποκλίσεις κάτω από 2% στα περισσότερα μοντέλα. Στα δοκίμια O, οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες, αλλά μόνο στο δοκίμιο O Reference ξεπερνούν το 10%. Άρα, η αριθμητική μοντελοποίηση μπορεί να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια και το φορτίο και το βέλος κάμψης που απαιτούνται ώστε να εμφανιστεί η διαρροή σε μία δοκό ενισχυμένη με CFRP.

Πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων υπάρχει και στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η δοκός. Στις διατομές IPE, τα πειραματικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκλίνουν μόλις 1%. Μάλιστα, στο δοκίμιο IPE 3 τα δύο αποτελέσματα συμφωνούν με ακρίβεια 0,09%. Στα δοκίμια O δεν παρατηρείται τόσο καλή σύγκλιση, αλλά οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν το 5%. Μία αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι πως στα δοκίμια O η αριθμητική μοντελοποίηση υπό- εκτιμά το μέγιστο φορτίο του μη- ενισχυμένου δοκιμίου, και υπερεκτιμά το μέγιστο φορτίο των ενισχυμένων. Καταλήγοντας, τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν το μέγιστο φορτίο είναι πιο ακριβή για τα δοκίμια IPE, και λιγότερο ακριβή για τα δοκίμια O, με λογικές, ωστόσο αποκλίσεις.

Μεγαλύτερες αποκλίσεις από ότι στα προηγούμενα μεγέθη παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του βέλους κάμψης στο οποίο εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο. Στα αριθμητικά αποτελέσματα των δοκιμίων IPE, το μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται σε βέλος κάμψης μεγαλύτερο από ότι στα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ στα αριθμητικά αποτελέσματα των δοκιμίων O, το αριθμητικό βέλος κάμψης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο πειραματικό.

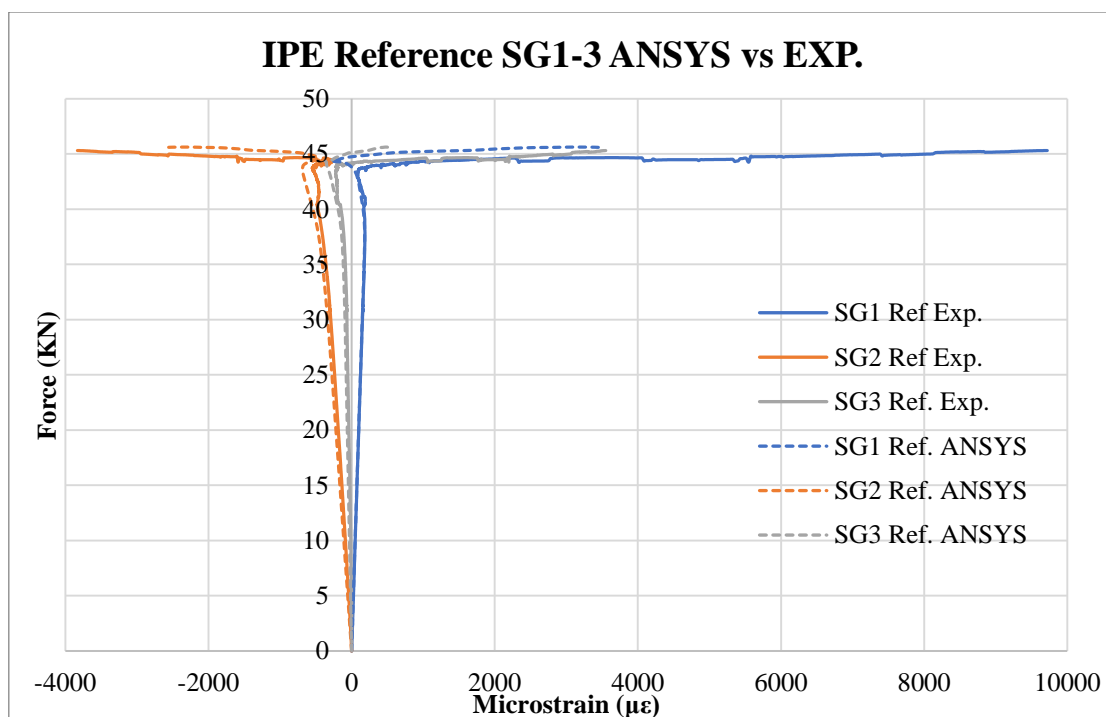
5.2 Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης

Στο εδάφιο αυτό συγκρίνονται τα αριθμητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα των παραμορφώσεων. Στα σχήματα 5.11 έως 5.26 παρατίθενται σε κοινό διάγραμμα οι πειραματικές και οι αριθμητικές καμπύλες δύναμης- παραμόρφωσης, διαφορετικών strain gauge του ίδιου δοκιμίου. Για κάθε δοκίμιο, σε ένα διάγραμμα παρατίθενται τα αποτελέσματα των strain gauges 1 έως 3 και σε δεύτερο τα αποτελέσματα των strain gauges 4 έως 6.

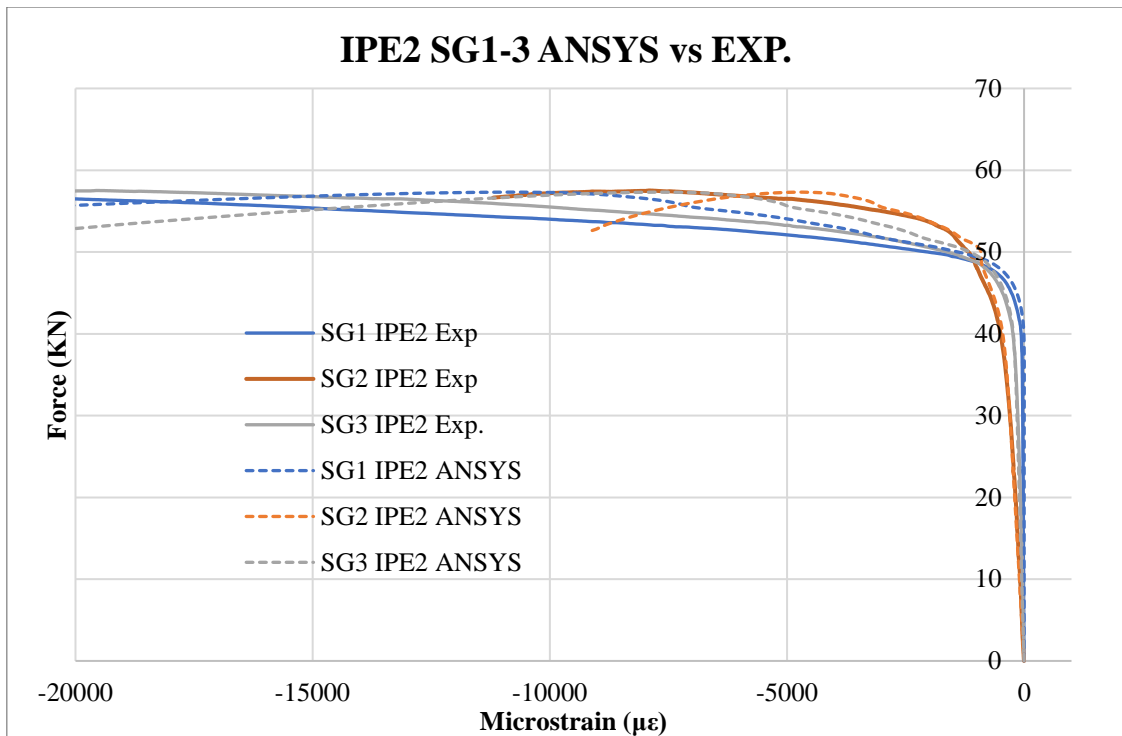
5.2.1 Δοκίμια IPE

SG 1-3 IPE

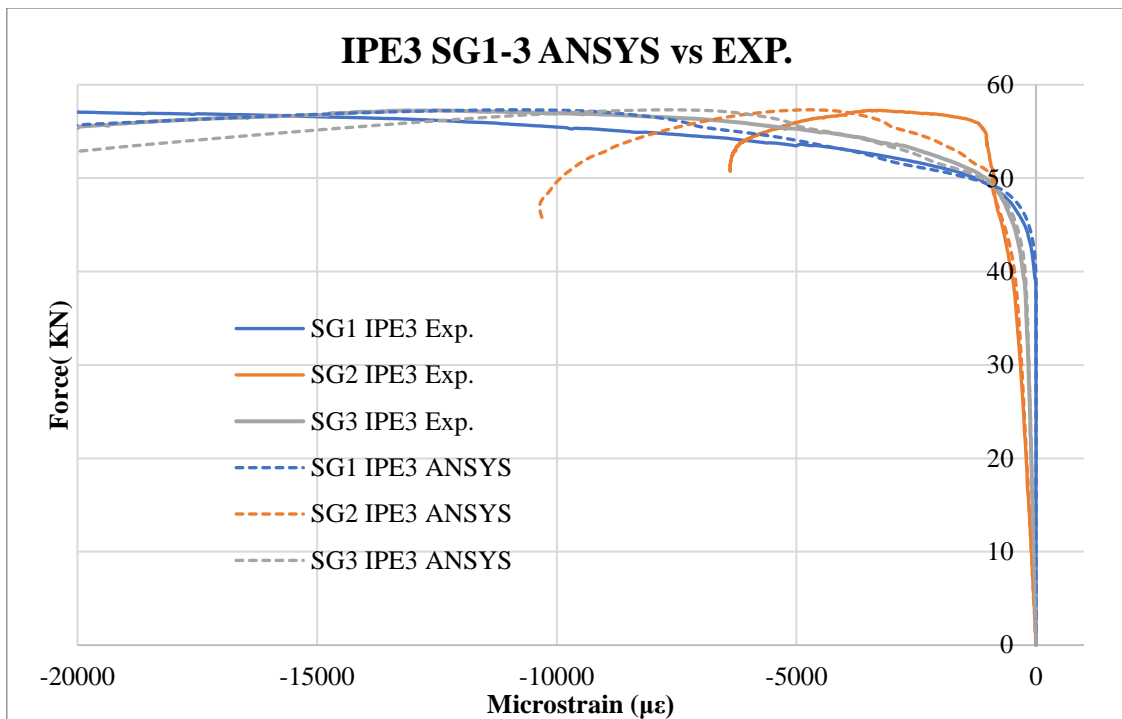
Στα Σχήματα 5.11 έως 5.14 παρατίθενται, για κάθε ένα από τα δοκίμια IPE, τα συγκριτικά διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης των strain gauges 1 έως 3.



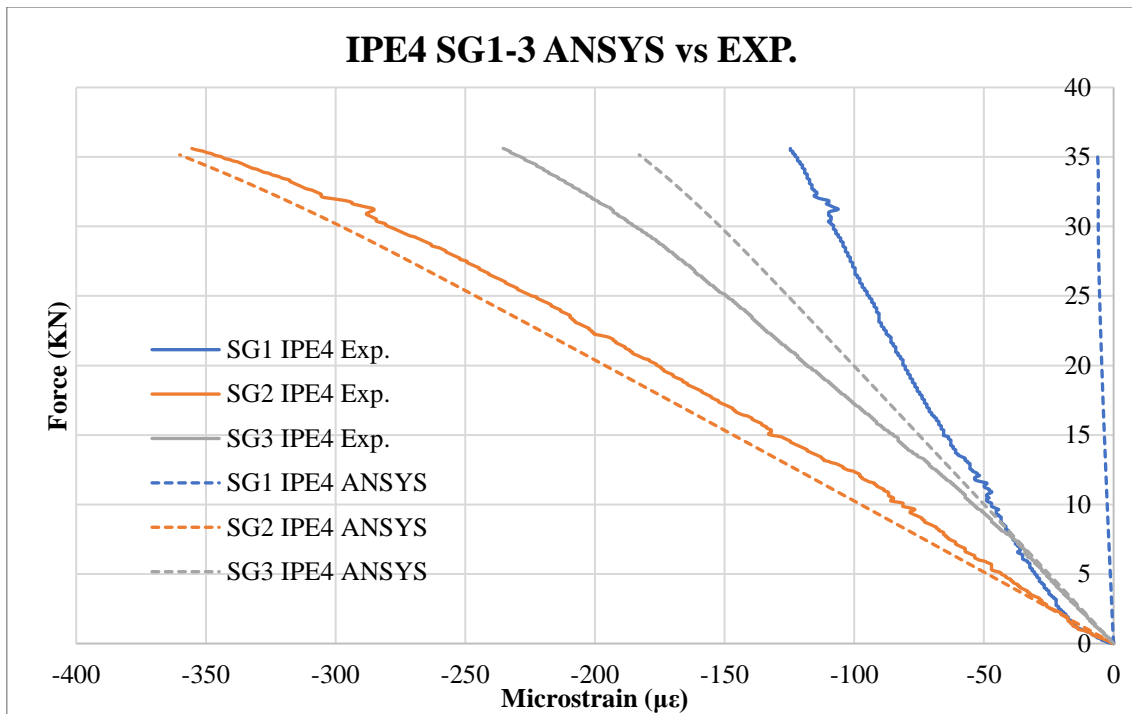
Σχήμα 5.11: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG1-3, IPE Reference



Σχήμα 5.12: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG 1-3, IPE 2



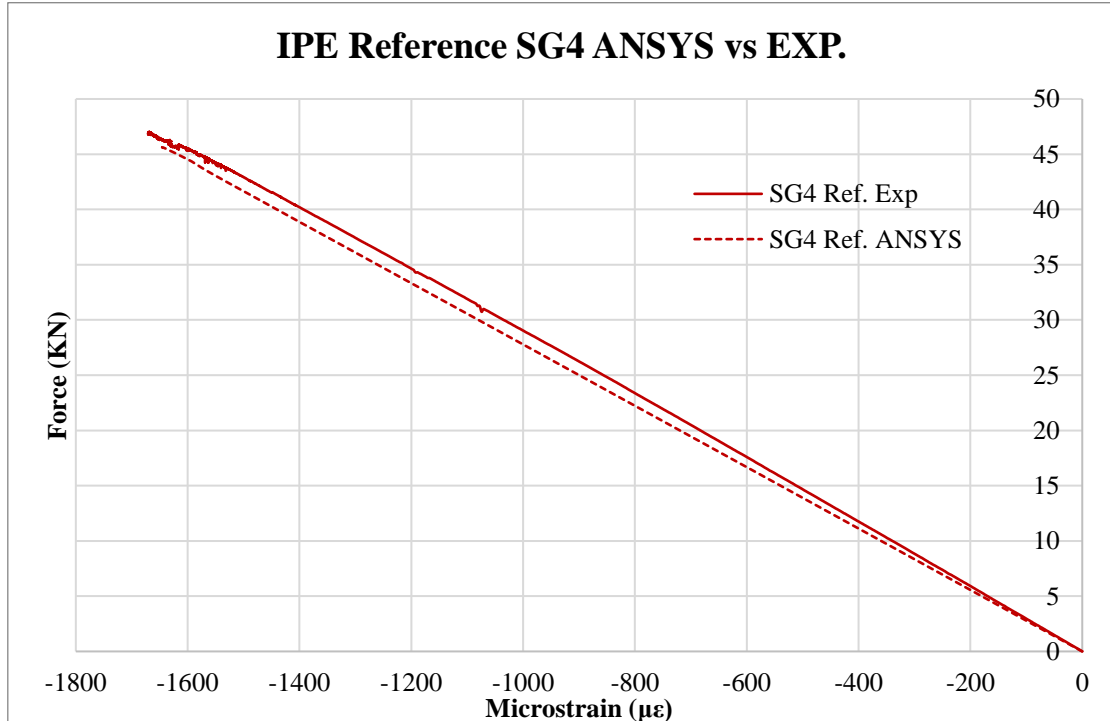
Σχήμα 5.13: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG 1-3, IPE 3



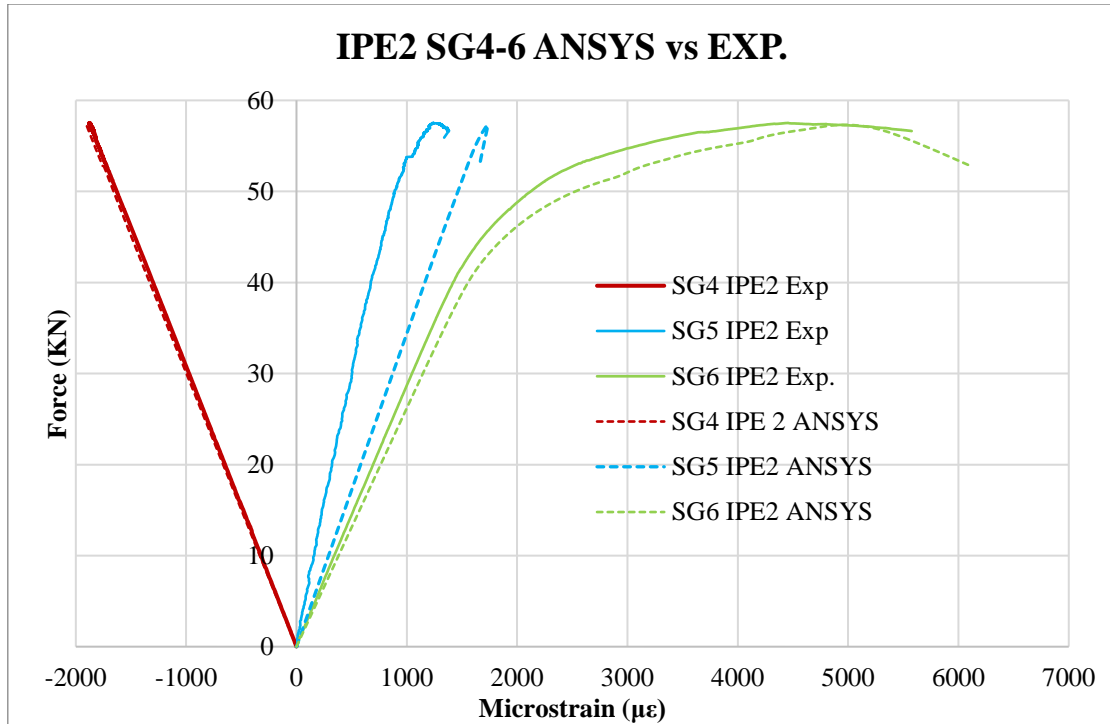
Σχήμα 5.14: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG 1-3, IPE 4

SG 4-6 IPE

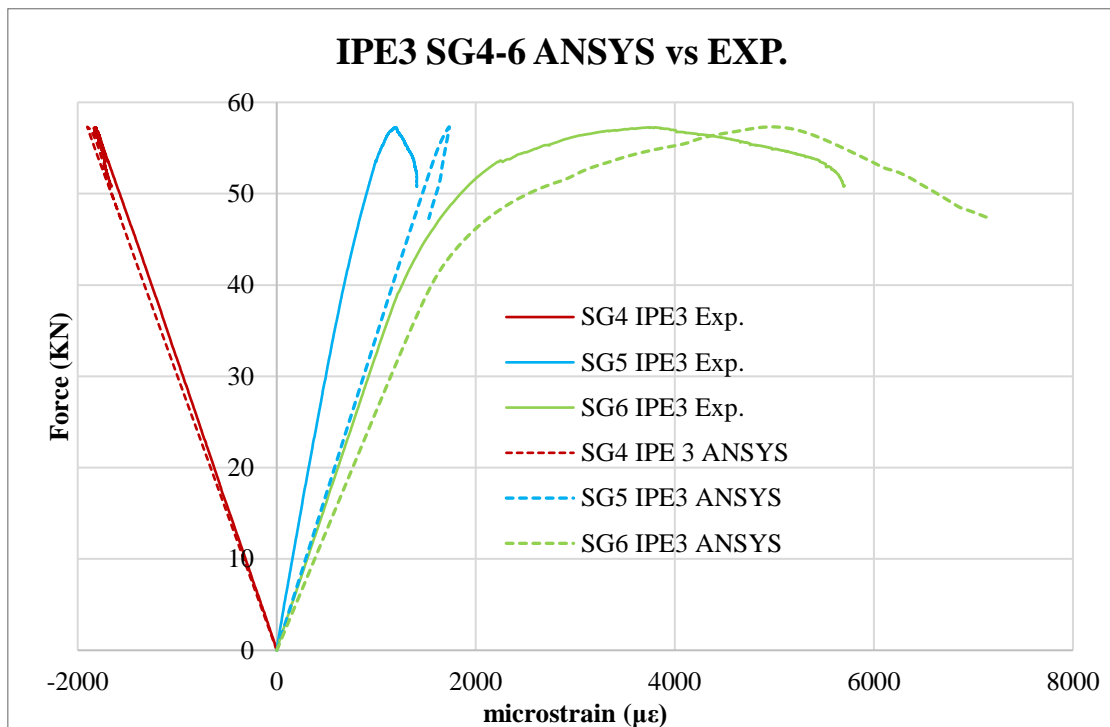
Στα Σχήματα 5.15 έως 5.18 παρατίθενται, για κάθε ένα από τα δοκίμια IPE, τα συγκριτικά διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης των strain gauges 4 έως 6.



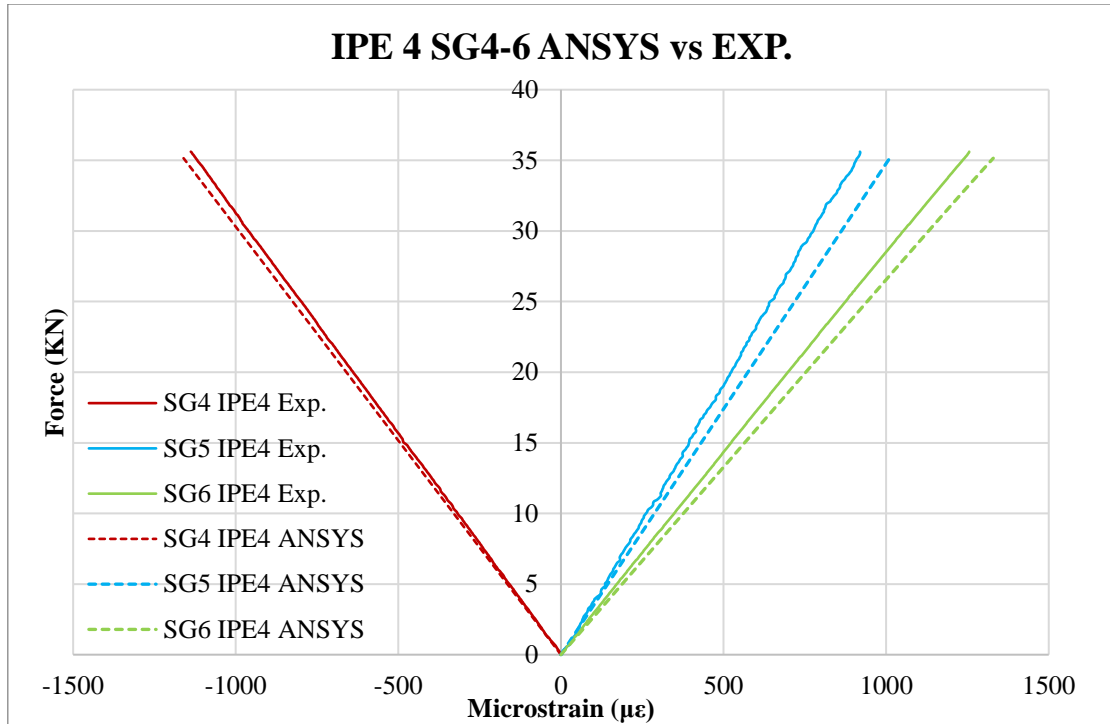
Σχήμα 5.15: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG 4, IPE Reference



Σχήμα 5.16: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG 4-6, IPE 2



Σχήμα 5.17: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG 4-6, IPE 3

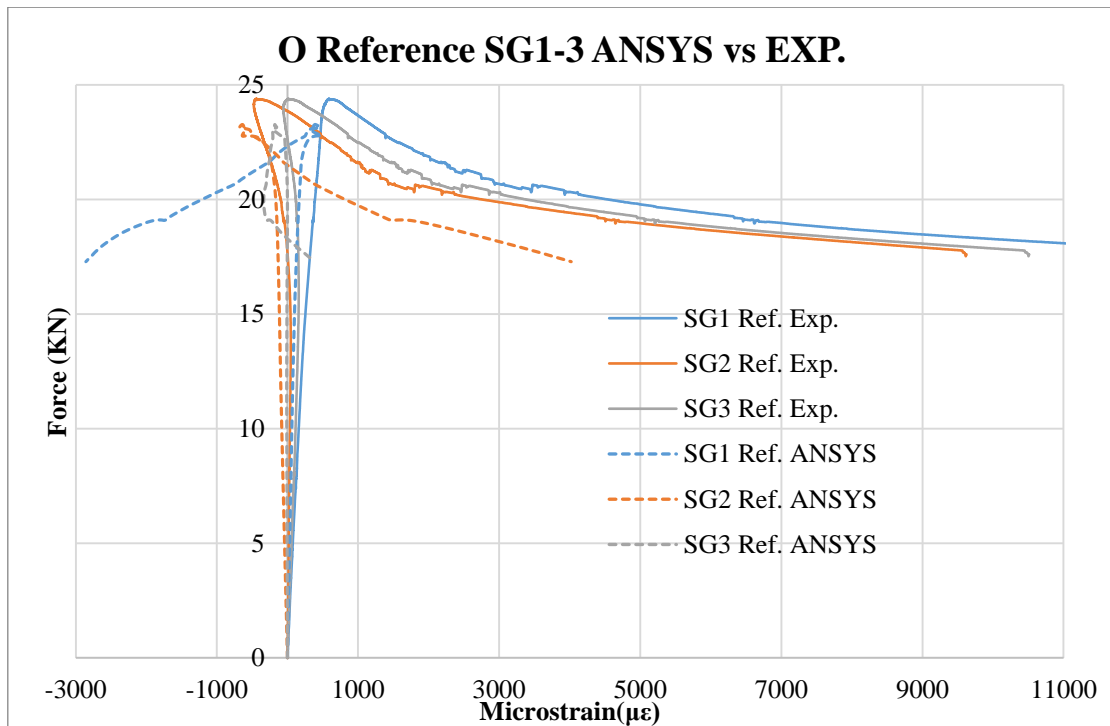


Σχήμα 5.18: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG 4-6, IPE 4

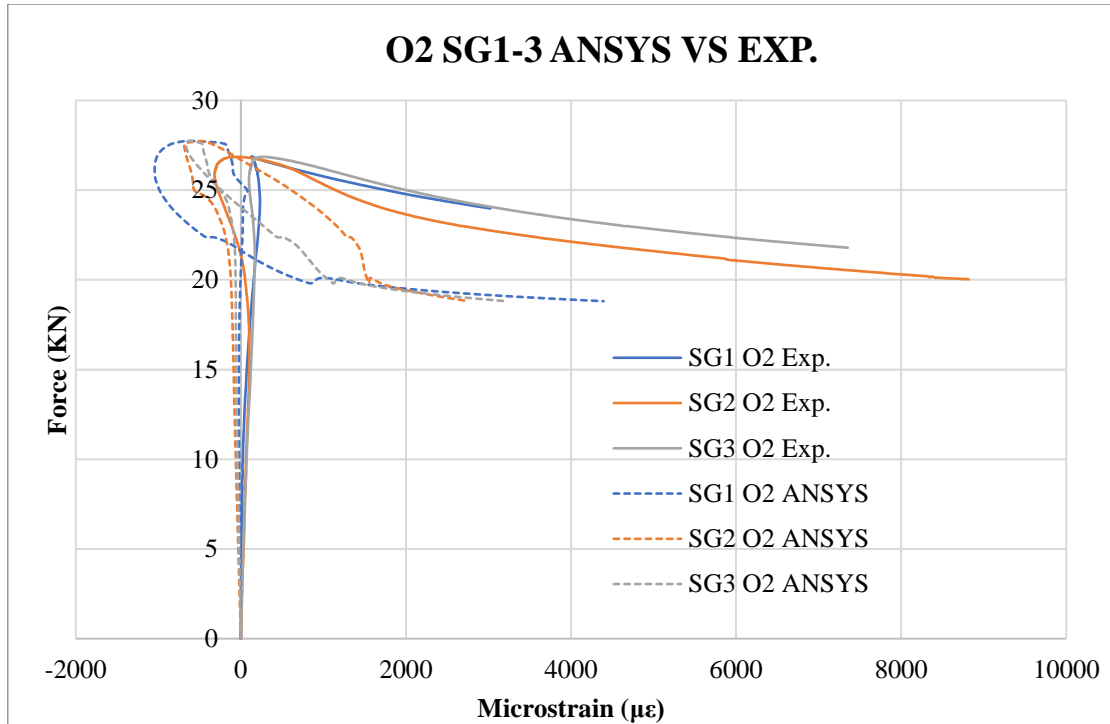
5.2.2 Δοκίμια Ο

SG 1-3 Ο

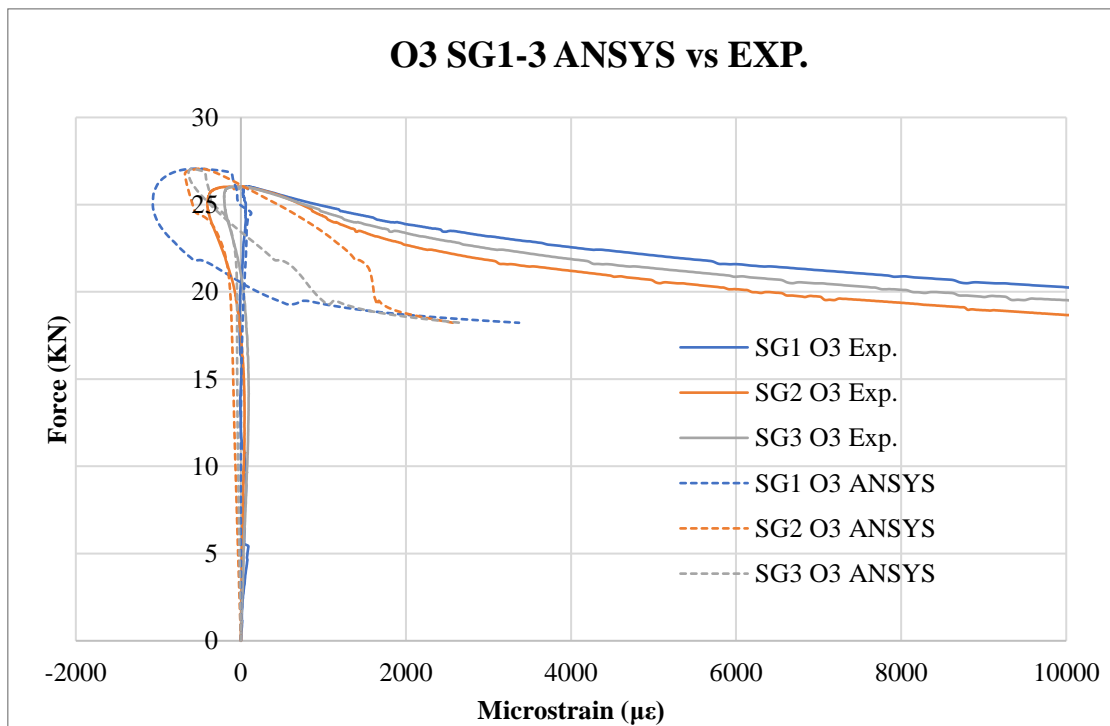
Στα Σχήματα 5.19 έως 5.22 παρατίθενται, για κάθε ένα από τα δοκίμια Ο, τα συγκριτικά διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης των strain gauges 1 έως 3.



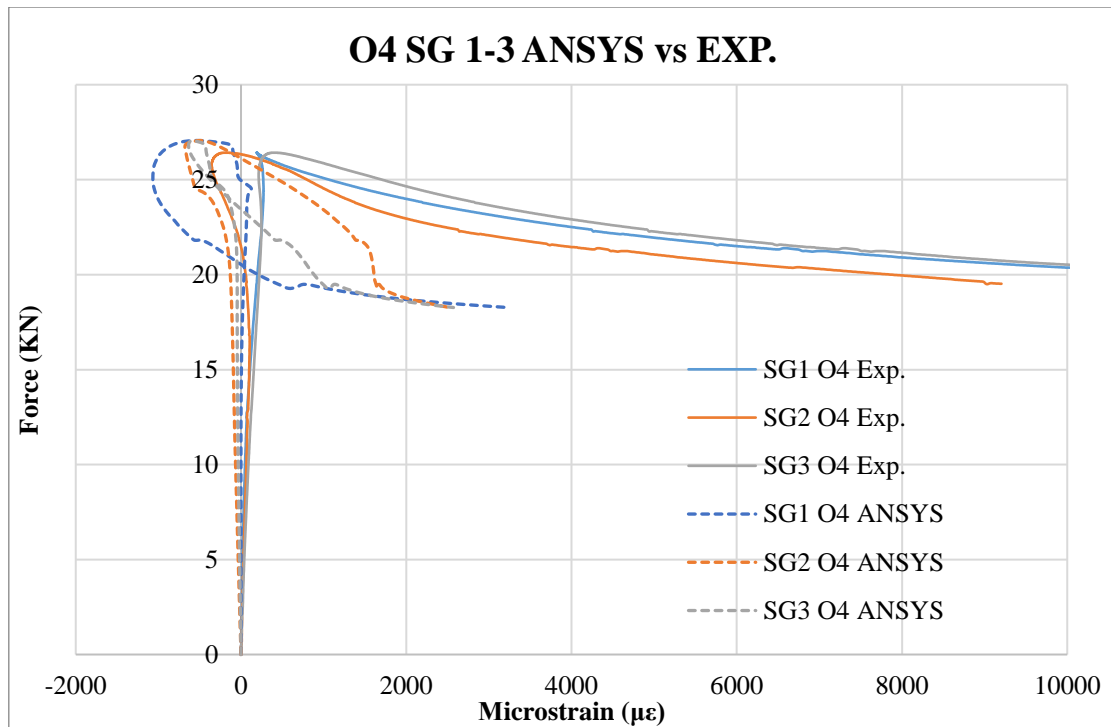
Σχήμα 5.19: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG1-3, O Reference



Σχήμα 5.20: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG1-3, O2



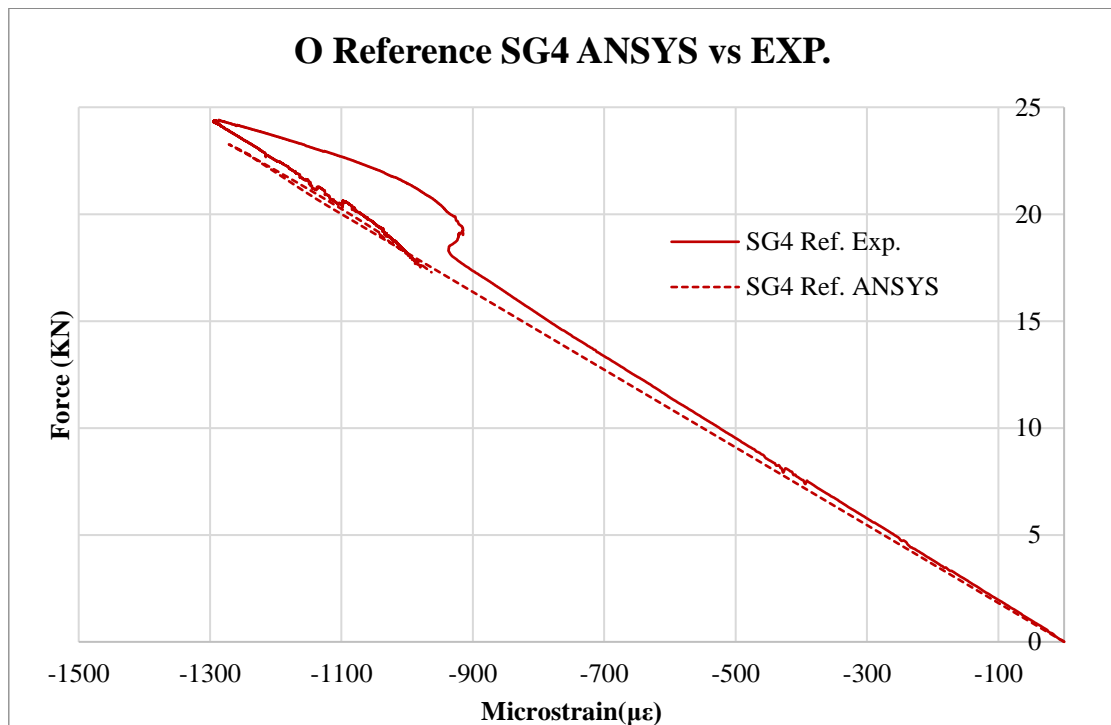
Σχήμα 5.21: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG1-3, O3



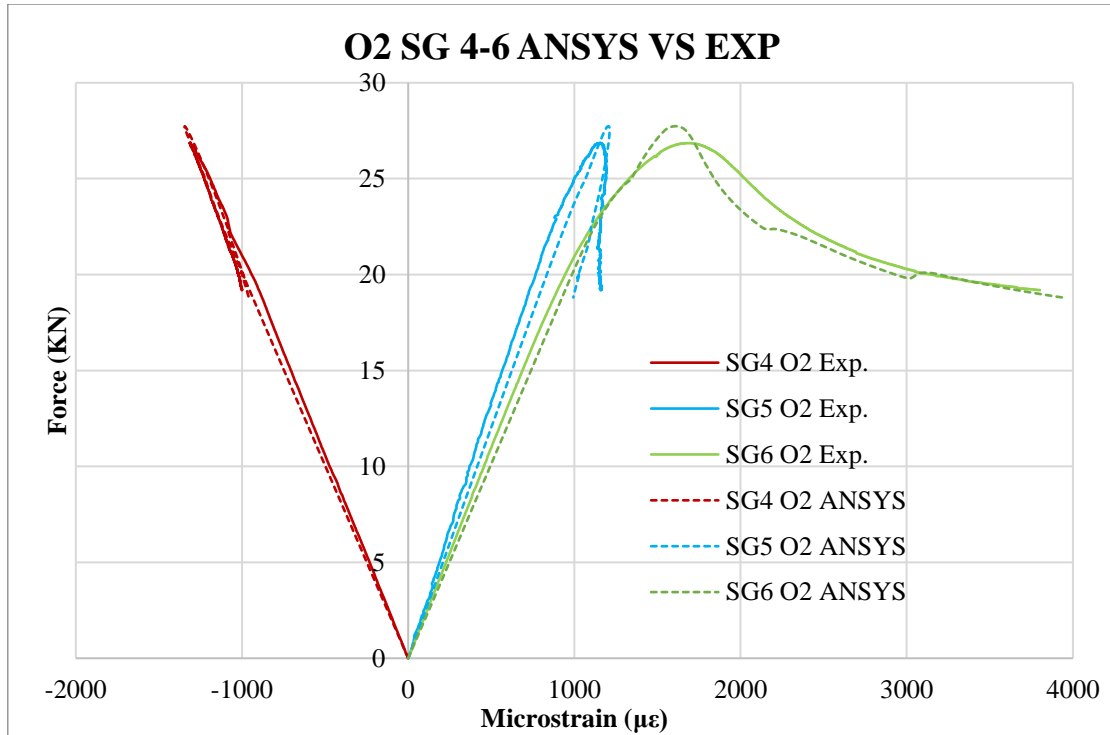
Σχήμα 5.22: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG1-3, O4

SG 4-6 O

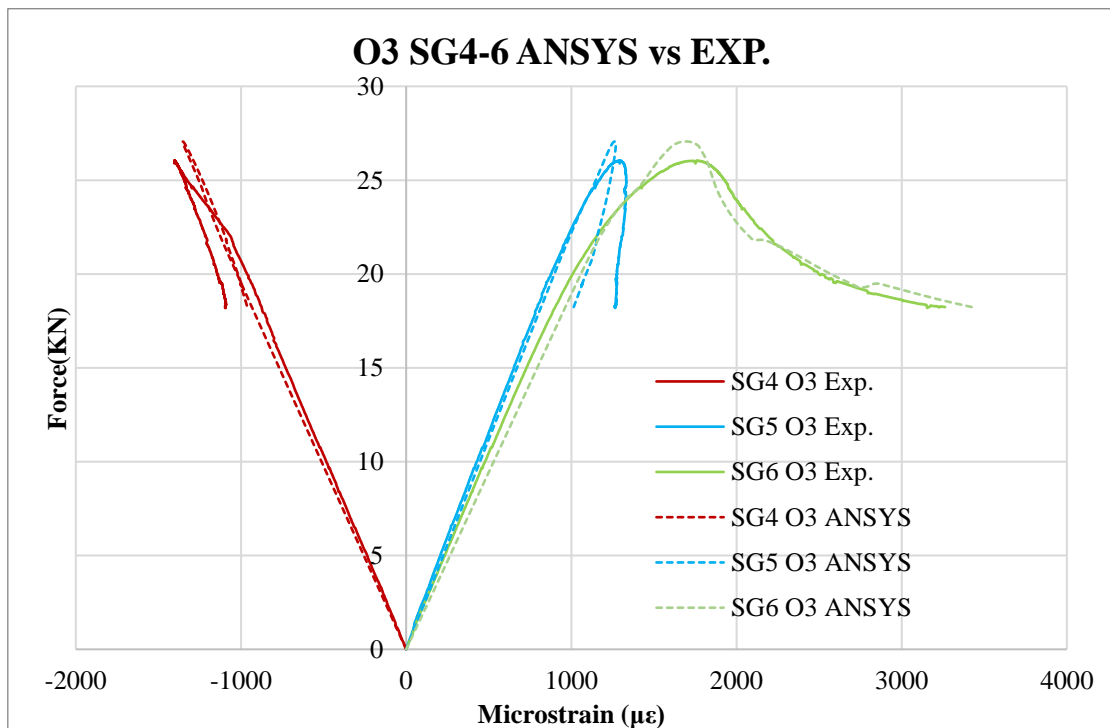
Στα Σχήματα 5.23 έως 5.26 παρατίθενται, για κάθε ένα από τα δοκίμια O, τα συγκριτικά διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης των strain gauges 4 έως 6.



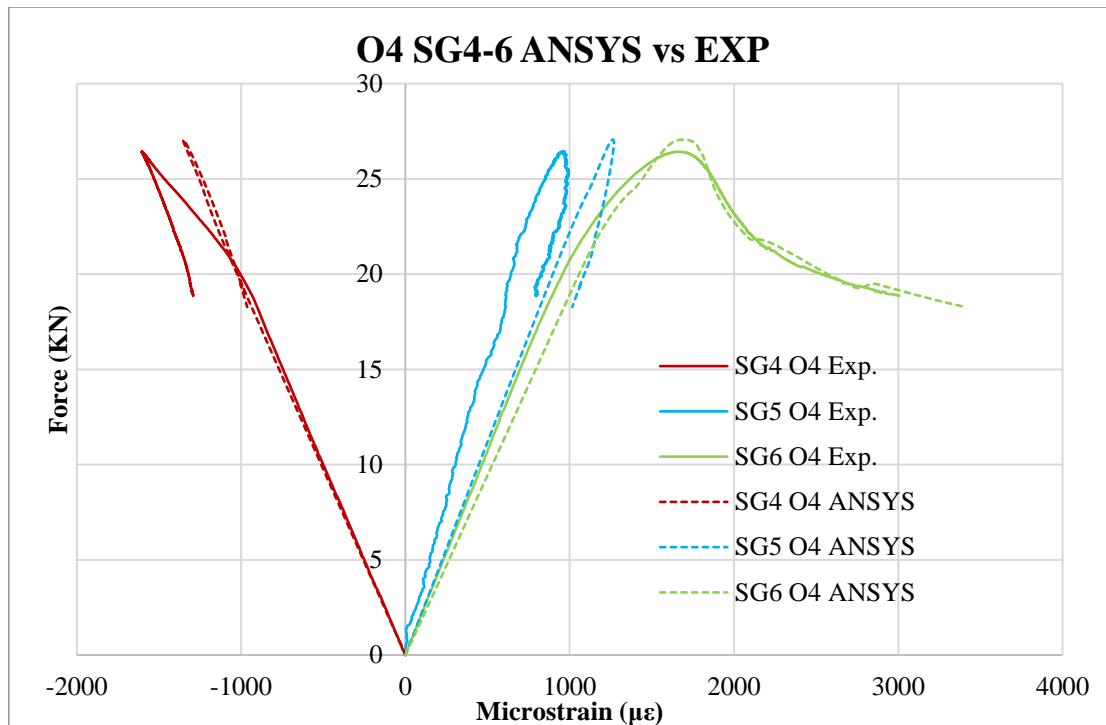
Σχήμα 5.23: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG4, O Reference



Σχήμα 5.24: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG4-6, O2



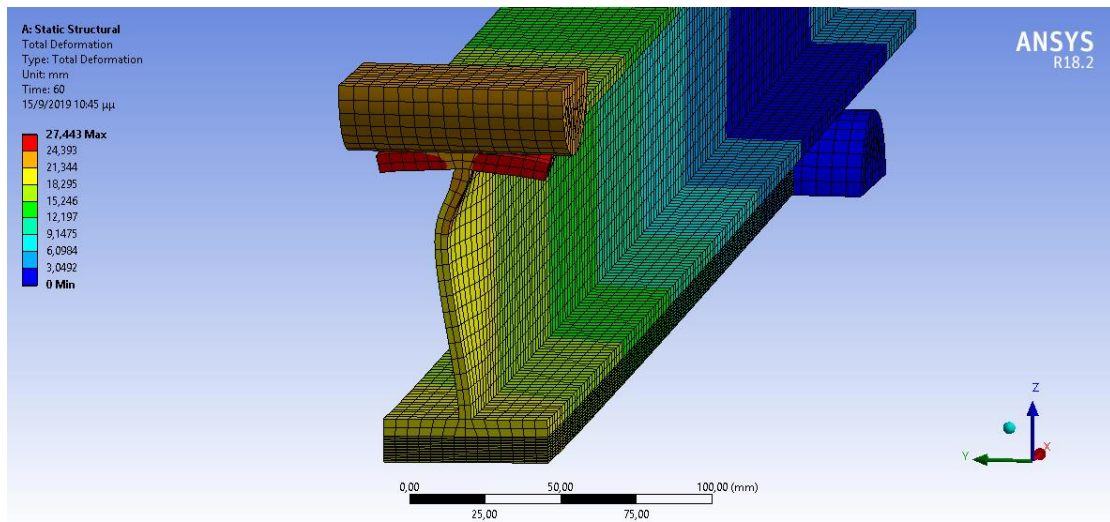
Σχήμα 5.25: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG4-6, O3



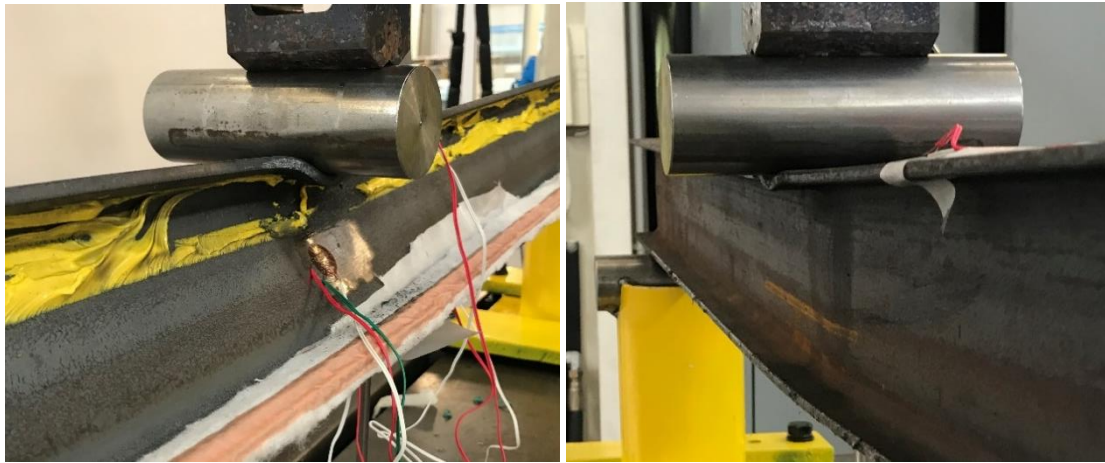
Σχήμα 5.26: Σύγκριση διαγραμμάτων δύναμης- παραμόρφωσης SG4-6, O4

5.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα διαγράμματα των SG1-3 (Σχήματα 5.11- 5.14, 5.19- 5.22), παρατηρούμε ότι η ανάπτυξη των παραμορφώσεων στην αριθμητική μοντελοποίηση είναι αντίστοιχη με αυτή των πειραματικών δεδομένων. Παρατηρούνται, δηλαδή, πολύ μικρές τιμές παραμορφώσεων μέχρι το μέγιστο ελαστικό φορτίο, μικρή αύξηση τους μέχρι το μέγιστο φορτίο, και ραγδαία αύξηση τους μετά το μέγιστο φορτίο. Επίσης, στα μοντέλα σχηματίστηκαν οι αντίστοιχες παραμορφώσεις της χαλύβδινης δοκού που εμφανίστηκαν και στα πειραματικά δοκίμια, κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης. Στα μοντέλα IPE παρατηρήθηκε ο τοπικός λυγισμός, και στα μοντέλα O τα «φουσκώματα» των πλευρικών ελασμάτων. Στα Σχήματα 5.27 και 5.28 φαίνονται οι παραμορφώσεις των μοντέλων IPE και O, αντίστοιχα, σε διαγράμματα χρωματικής διαστρωμάτωσης συνολικών μετατοπίσεων, μαζί με τις παραμορφώσεις που παρουσίασαν αντίστοιχα δοκίμια στις πειραματικές δοκιμές.

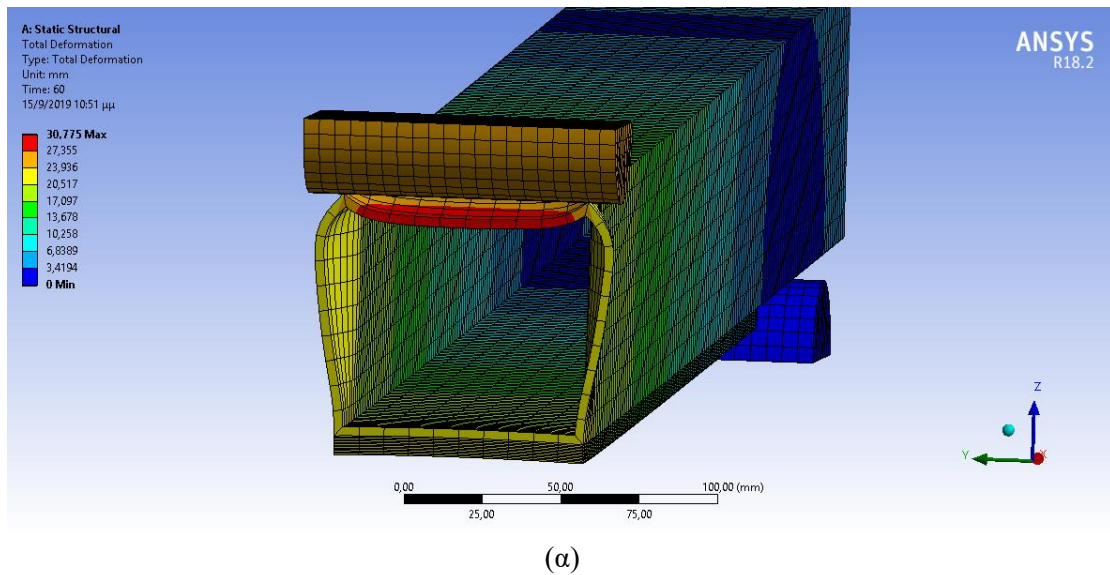


(α)



(β)

Σχήμα 5.27: Τοπικές παραμορφώσεις δοκίμων IPE (α) αριθμητικά μοντέλα (β) πειραματικές δοκιμές



(α)



(β)

Σχήμα 5.28: Τοπικές παραμορφώσεις δοκιμίων Ο (α) αριθμητικά μοντέλα (β) πειραματικές δοκιμές

Εξετάζοντας τα διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης των strain gauges 4-6 (Σχήματα 5.15- 5.18, 5.23- 5.26), παρατηρούμε κατ' αρχάς ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Οι κλίσεις που μετρήθηκαν από τα διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης των πειραματικών δοκιμίων μετρήθηκαν και στα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Στους παρακάτω Πίνακες 5.3 έως 5.5 φαίνονται τα αποτελέσματα και οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των αριθμητικών αποτελεσμάτων από τα πειραματικά.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση αριθμητικών- πειραματικών αποτελεσμάτων SG-4

Όνομα δοκιμίου	Κλίση exp. (kN/με)	Κλίση ANSYS (kN/με)	Απόκλιση %
IPE Reference	-0,0282	-0,0278	1,42%
IPE2	-0,0306	-0,0302	1,31%
IPE3	-0,0315	-0,0302	4,13%
IPE4	-0,0303	-0,0312	-2,97%
O Reference	-0,0190	-0,0183	3,68%
O2	-0,0212	-0,0201	5,19%
O3	-0,0205	-0,0195	4,88%
O4	-0,0202	-0,0195	3,47%

Πίνακας 5.4: Σύγκριση αριθμητικών- πειραματικών αποτελεσμάτων SG-5

Όνομα δοκιμίου	Κλίση exp. (kN/με)	Κλίση ANSYS (kN/με)	Απόκλιση %
IPE2	0,0598	0,0344	42,47%
IPE3	0,0594	0,0344	42,09%
IPE4	0,0390	0,0348	10,77%
O2	0,0265	0,024	9,43%
O3	0,0226	0,0223	1,33%
O4	0,0295	0,0223	24,41%

Πίνακας 5.5: Σύγκριση αριθμητικών- πειραματικών αποτελεσμάτων SG-6

Όνομα δοκιμίου	Κλίση exp. (kN/με)	Κλίση ANSYS (kN/με)	Απόκλιση %
IPE2	0,0286	0,026	9,09%
IPE3	0,0324	0,026	19,75%
IPE4	0,0284	0,0264	7,04%
O2	0,0217	0,0203	6,45%
O3	0,0204	0,0189	7,35%
O4	0,0213	0,0189	11,27%

Όσον αφορά το SG- 4 τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης συμφωνούν με καλή ακρίβεια. Οι πειραματικές και οι αριθμητικές καμπύλες συμπίπτουν στα περισσότερα διαγράμματα και οι αποκλίσεις στην τιμή της κλίσης δεν ξεπερνούν το 5,19%. Οπότε τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν τις παραμορφώσεις στις χαλύβδινες δοκούς σε σημεία που δεν παρουσιάζουν πολύ υψηλές παραμορφώσεις είναι αξιόπιστα.

Σχετικά με αποτελέσματα του SG-5, οι αριθμητικές καμπύλες ακολουθούν την πορεία των πειραματικών στα περισσότερα διαγράμματα. Ωστόσο, τα αριθμητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα δεν συμφωνούν αριθμητικά σε αρκετά μοντέλα. Οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες στα δοκίμια IPE2, IPE3 όπου φτάνουν ως και το 42,09%. Επίσης, σε όλα τα δοκίμια η αριθμητική ανάλυση δίνει μεγαλύτερες παραμορφώσεις από τις πειραματικά μετρούμενες.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν το strain gauge 6 είναι παραπλήσια με τα πειραματικά στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Οι αριθμητικές με τις πειραματικές καμπύλες συγκλίνουν στα περισσότερα διαγράμματα τόσο στην ελαστική, όσο και στην πλαστική περιοχή. Από τον Πίνακα 5.5 φαίνεται πως και οι αποκλίσεις στην κλίση της ελαστικής περιοχής είναι κάτω από 10% στα περισσότερα δοκίμια, με εξαίρεση τα IPE3, O4. Τονίζεται πως και στο συγκεκριμένο strain gauge, η αριθμητική μοντελοποίηση υπερεκτιμά τις τάσεις σε όλες τις περιπτώσεις.

Μία πιθανή ερμηνεία των αποκλίσεων είναι πως στην αριθμητική ανάλυση δεν μοντελοποιήθηκε ο κολλητός σύνδεσμος. Ο κολλητός σύνδεσμος είναι μία πολύ λεπτή στρώση κόλλας ή ρητίνης μεταξύ χάλυβα και επιθέματος που έχει πολύ μικρό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τον χάλυβα ή το CFRP. Λόγω του πολύ μικρού μέτρου ελαστικότητας, λειτουργεί σαν «αποσβέστης» στη μεταφορά των μετατοπίσεων από τον χάλυβα στο επίθεμα και δημιουργεί ένα πιο ομοιόμορφα κατανεμημένο πεδίο παραμορφώσεων κατά μήκος του επιθέματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας ενίσχυσης, με τη χρήση επιθεμάτων CFRP, χαλύβδινων δοκών σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων.

Από την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών κάμψης τριών σημείων και συγκρίνοντας τα ενισχυμένα με τα μη- ενισχυμένα δοκίμια καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Ενισχύοντας μία καμπτώμενη δοκό στην εφελκυσόμενη πλευρά της με επιθέματα CFRP μπορεί να αυξηθεί και η δυσκαμψία της και το μέγιστο φορτίο που μπορεί αυτή να παραλάβει πριν καταρρεύσει. Η αύξηση της δυσκαμψίας έφτασε την τιμή 29% στις δοκούς διατομής IPE και 24% στις δοκούς κοίλης τετραγωνικής διατομής. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει η δοκός αυξήθηκε ως και 29% στις δοκούς IPE και 10% στις δοκούς κοίλης τετραγωνικής διατομής αντίστοιχα. Επίσης, με την ενίσχυση αυξάνεται και το φορτίο που απαιτείται για να εισέλθει η δοκός στη διαρροή.
- Από τις εξεταζόμενες παραμέτρους ενίσχυσης, μπορούν να συνοψιστούν τα εξής συμπεράσματα. Η αύξηση του πάχους του επιθέματος οδηγεί σε αύξηση και της δυσκαμψίας και του μέγιστου φορτίου. Το μήκος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αντοχή του κολλητού συνδέσμου μεταξύ χάλυβα και CFRP, καθώς το δοκίμιο IPE4 ήταν το μόνο που αποκολλήθηκε στην ελαστική περιοχή. Τα επιθέματα που κολλήθηκαν με τη χρήση κόλλας δεν αποκολλήθηκαν και δεν εμφάνισαν και καμία αστοχία του κολλητού συνδέσμου όπως φάνηκε από τον έλεγχο υπερήχων. Η χρήση κόλλας, αντί για τη ρητίνη του επιθέματος, για τη σύνδεση των δύο υλικών, δεν φαίνεται να επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκιμίων στην ελαστική περιοχή και στην αρχή της πλαστικής περιοχής. Ωστόσο, αυξάνει την «έκταση» της πλαστικής περιοχής, αποτρέποντας την αποκόλληση του επιθέματος, και με αυτόν τον τρόπο παρέχει αυξημένα αποθέματα ασφαλείας.
- Κανένα από τα δοκίμια, εκτός του IPE4, δεν αποκολλήθηκε πριν το μέγιστο φορτίο που μπορούσε να παραλάβει η δοκός, δείχνοντας έτσι ότι ο κολλητός σύνδεσμος από τη ρητίνη του ίδιου του CFRP διαθέτει επαρκή αντοχή. Τα δοκίμια O μάλιστα αποκολλήθηκαν σε πολύ μεγάλες τιμές του βέλους κάμψης.
- Η κατάρρευση των ενισχυμένων δοκιμίων προέρχεται από την πλαστική διαρροή της χαλύβδινης δοκού. Σε αυτό οδηγούμαστε από το γεγονός ότι κανένα από τα επιθέματα CFRP δεν αστόχησε και σε κανένα δοκίμιο (πλην του IPE4) δεν παρουσιάστηκε αποκόλληση πριν το μέγιστο φορτίο. Από τα παραπάνω, φαίνεται πως το μέγιστο φορτίο που μπόρεσαν να παραλάβουν οι δοκοί δεν καθορίστηκε ούτε από την αντοχή του επιθέματος, ούτε από την αντοχή του κολλητού συνδέσμου. Η παραπάνω παρατήρηση σε συνδυασμό με τις πολύ μεγάλες παραμορφώσεις που παρατηρούνται στην περιοχή κοντά στο σημείο εφαρμογής της δύναμης, οδηγεί αβίαστα στο εν λόγω συμπέρασμα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με τα αντίστοιχα πειραματικά, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται καλή σύγκλιση των αριθμητικών καμπυλών με τις πειραματικές, τόσο στα διαγράμματα δύναμης- βέλους κάμψης, όσο και στα διαγράμματα δύναμης- παραμόρφωσης.
- Τα αριθμητικά αποτελέσματα των δοκιμών IPE είναι πιο ακριβή από αυτά των δοκιμών O.
- Το αριθμητικό μοντέλο θα μπορούσε να χαρακτηριστεί αξιόπιστο στην εκτίμηση των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την ελαστική συμπεριφορά των δοκών. Σε αυτά περιλαμβάνονται η δυσκαμψία, το μέγιστο ελαστικό φορτίο, και το βέλος κάμψης όπου εμφανίζεται το μέγιστο ελαστικό φορτίο.

- Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι αξιόπιστο στην εκτίμηση του μέγιστου φορτίου που μπορεί να παραλάβει η δοκός.
- Αφού, η σύγκλιση των αποτελεσμάτων είναι ικανοποιητική για το σύνολο των δοκιμών, συμπεραίνουμε, πως η αριθμητική μοντελοποίηση ανταποκρίνεται στη μεταβολή των παραμέτρων μήκος, πάχος επιθέματος, όπως και οι πειραματικές δοκιμές.
- Η εκτέλεση πειραματικών δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων συνέβαλε σημαντικά στην ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων.
- Η αριθμητική ανάλυση υπερεκτιμά τις παραμορφώσεις των επιθεμάτων CFRP. Οι αποκλίσεις του εν λόγω μεγέθους είναι μικρές στο μέσον της δοκού, αλλά αυξάνονται όταν απομακρυνόμαστε από αυτό.

Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

- Πειραματική και αριθμητική μελέτη δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων σε χαλύβδινες δοκούς ενισχυμένες με CFRP.
- Αναβάθμιση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων:
 - Τοπική πύκνωση πλέγματος για μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων
 - Cohesive Zone Modelling για μελέτη αποκόλλησης επιθεμάτων.
- Διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών για τον προσδιορισμό ιδιοτήτων ρητίνης και κόλλας.
- Πειραματική μελέτη δυναμικής καμπτικής καταπόνησης δοκών ενισχυμένων με CFRP.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κροντηράς Π. (2019), 'Διεξαγωγή Πειραματικών Δοκιμών Μέτρησης Αντοχής σε Διαστρωματική Διάτμηση σε Σύνθετα Υλικά' Διπλωματική εργασία, Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Λιβερέτος Ι. (2016), 'Μελέτη αντικατάστασης χαλύβδινων διατομών με υβριδικές διατομές χάλυβα FRP' Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Παππά Ε. Ποτάμου Α., 'Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες από Ο.Σ. και FRP. Σύγκριση μεθόδων και εύρεση της πιο συμφέρουσας λύσης.'

Τσούβαλης, Ν.Γ. (1998). 'Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά' Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Cadei JMC, Stratford TJ, Hollaway LC, Duckett WG. (2004) 'C595 — Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced composites.' CIRIA, London, U.K.

CIRIA (2002). 'CIRIA C564 Fibre-Reinforced Polymer Composites in Construction', London, U.K., ISBN 0-86017-564-2. pp. 168

Colombi P., Poggi C. (2006), 'An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips.' Compos B;7(1): pp. 64–73.

Danilov A.I. (2016), 'Some aspects of CFRP steel structures reinforcement in civil Engineering' XXV Polish – Russian – Slovak Seminar "Theoretical Foundation of Civil Engineering, pp. 124 – 130

Fawzia S., Zhao XL, Al-Mahaidi R, Rizkalla S. (2005), 'Bond characteristics between CFRP and steel plates in double strap joints' Advances in Steel Construction – An International Journal; 1(2): pp. 17–28.

Gustavo Tumialan, Timothy Ibell, Hiroshi Fukuyama and Antonio Nanni 'FRP Composites for strengthening of the civil infrastructure around the world'

Haider Al-Zubaidy , Riadh Al-Mahaidi , Xiao-Ling Zhao (2012), 'Experimental investigation of bond characteristics between CFRP and steel plate joints under impact tensile loads', Composite Structures 94, pp. 510–518

Jiao H, Zhao XL. (2004), 'CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes', Thin-Walled Structures; 42(7): pp.963–78.

Jones SC, Civjan SA. (2003), 'Application of fibre reinforced polymer overlays to extend steel fatigue life.', Journal of Composites for Construction, ASCE 7(4): pp. 331–8.

Kurtus R. (2019), 'Coefficient of Sliding Friction', School of Champions. https://www.school-for-champions.com/science/friction_sliding_coefficient.htm#.XZDHUWa_xPY

Linghoff D., Al-Emrani M., Kliger R. (2010), 'Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate - part 1: laboratory tests', Compos. Part B 41 (7): pp. 509–515.

Lu XZ, Teng JG, Ye LP, Jiang JJ. (2005), 'Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete' Engineering Structures;27(6): pp.920–37.

Mohammad A. Chowdhury, Dewan M. Nuruzzaman, Mohammad L. Rahaman (2014) 'Frictional Characteristics of Steel Materials Sliding against Mild Steel' The Open Mechanical Engineering Journal; 8: pp. 364-369

Nanni, A., (2001). "Relevant Field Applications of FRP Composites in Concrete Structures," Proceedings of the International Conference Composites in Construction Conference CC2001, Porto, Portugal, October 10-12, 2001, pp. 661-670.

Omar H. Elkhabeery, Sherif S. Safar, Sherif A. Mourad. (2018) 'Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets at tension flange' Journal of Constructional Steel Research 148 pp. 572–588

Photiou NK, Hollaway LC, Chryssanthopoulos MK. (2006), 'Strengthening of an artificially degraded steel beam utilizing a carbon/glass composite system.' Construction and Building Materials;20(1–2): pp. 11–21.

Raton B., (1997). 'CRC Handbook of Physical Quantities.' CRC Press: pp. 145-156

Seica MV, Packer JA, Ramirez PG, Bell S, Zhao XL. (2006), 'Rehabilitation of tubular members with carbon reinforced polymer.' In: 11th international symposium on tubular structures.

Shaat A, Fam A. (2006) "Axial loading tests on CFRP-retrofitted short and long HSS steel columns." Canadian Journal of Civil Engineering,33(4): pp. 458–70.

Shaat A, Schnerch D, Fam A, Rizkalla S. (2004), 'Retrofit of steel structures using Fiber-Reinforced Polymers (FRP): State-of-the-art.' In: Transportation research board (TRB) annual meeting. CD-ROM (04-4063).

Suzuki H. (2004.), 'Experimental study on repair of cracked steel member by CFRP strip and stop hole.' In: 11th European conf. on composite materials.

Tao Z, Han LH, Zhuang JP. Experimental behavior of CFRP strengthened concrete-filled steel tubular stub columns. Advances in Structural Engineering – An International Journal 2006 [in press].

Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. (2003), 'Strengthening of steel–concrete composite girders using carbon fibre reinforced polymer sheets.' Journal of Structural Engineering. ASCE;129(1): pp. 30–40.

Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. (2002). 'FRP—strengthened RC structures.' West Sussex (UK): John Wiley and Sons Ltd

Teng J.G., T. Yu, Fernando D. (2012) 'Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites' Journal of Constructional Steel Research 78 pp. 131–143

Weber, Robert L.; Manning, Kenneth V.; White, Marsh W. (1965) ‘College Physics-4th Edition’. USA: McGraw-Hill: pp. 66

Xia SH, Teng JG. (2005) “Behaviour of FRP-to-steel bonded joints” Proceedings of the international symposium on bond behaviour of FRP in structures, Hong Kong: International Institute for FRP in Construction; pp. 419–26.

Xiao Y. (2004) ‘Applications of FRP composites in concrete columns’ Adv. Struct. Eng., 7(4): pp. 335–43

Zhao Xiao-Ling, Lei Zhang, (2007) ‘State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures’ Engineering Structures 29, pp. 1808–1823

Zhao YH, Gu W, Xu J, Zhang HT. (2005) ‘The strength of concrete-filled CFRP steel tubes under axial compression.’ In: ISOPE conference. Paper no. JSC-313.

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ Περιοδικό Έγλη και Κτίριο. Τεύχος 57 Αύγουστος-Σεπτέμβριος 2002

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tickford_Bridge.jpg

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τεχνικό φυλλάδιο C322U Carbon Fiber Fabric



Unidirectional fabric data sheet

Code # C322U

Characteristics			
		Nominal	Tolerance
Mass per unit of area	(g/m ²)	322	± 5%
Weave		Unidirectional, woven	
Laminate thickness	(mm)	0,35*	n/a

Warp – Weft ratio		
	Warp	Weft
Fiber description	12K carbon fiber	Glass thermoplastic
Thread count (ends/cm)	3,8	1,6
Weight distribution (g/mq)	302,68	19,32
Weight distribution (%)	94	6

(*) Theoretical thickness of compressed epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

FIBREMAX LTD
35 GRAFTON WAY, W1T 5DB LONDON, UNITED KINGDOM
TEL ++30 24280 92210, FAX ++30 24280 92270, info@fibermaxcomposites.com



PYROFIL™ TR50S 12K

Typical Fiber Properties

Tow Tensile	Strength	710 4,900	ksi MPa	JISR 7601
	Modulus	35 240	msi GPa	
Typical Density		0.066 1.82	lb.in ³ g/cm ³	JISR 7601
Typical Yield	12K	620 800	yds/lb mg/m	JISR 7601

Typical Mechanical Properties

Tensile Properties	0°	Strength*	430 2950	ksi MPa	ASTM D3039 / Vf=60.0%
		Modulus*	20.6 142	msi GPa	ASTM D3039 / Vf=60.0%
	90°	Strength	11 79	ksi MPa	ASTM D3039 / Vf=56.0%
		Modulus	1.3 9	msi GPa	ASTM D3039 / Vf=56.0%
Compressive Properties	0°	Strength*	230 1600	ksi MPa	SRM 1-88 / Vf=60.0%
		Modulus*	18.7 130	msi GPa	SRM 1-88 / Vf=60.0%
Flexural Properties	0°	Strength	430 3000	ksi MPa	ASTM D790 / L/d=40 / Vf=60.0%
		Modulus	19 130	msi GPa	ASTM D790 / L/d=40 / Vf=60.0%
	90°	Strength	20 140	ksi MPa	ASTM D790 / L/d=16 / Vf=56.0%
		Modulus	1.3 9	msi GPa	ASTM D790 / L/d=16 / Vf=56.0%
Short-Beam Shear	Strength		13 90	ksi MPa	ASTM D2344 / L/d=4 / Vf=56.0%

- 250F Epoxy Prepregs
- Resin: Mitsubishi Rayon #340 resin system
- Tensile and compressive properties are normalized to 60% fiber volume

5900 88th Street
Sacramento, CA
95828, USA
Tel: 916.386.1733
Fax: 916.383.7668
Web: www.grafil.com



ISO 9001:2008
FM 56416

03/2010

6, Orchard Court
Binley Business Park
Harry Weston Road
Binley, Coventry CV3 2TQ UK
Tel: +44 (0) 2476 447272
Fax: +44 (0) 2476 449565

Important: The technical information contained herein is not to be construed as warranties and no patent liability can be assumed. This information can be used for material selection purposes only.

Ιδιότητες εποξικού συστήματος Ρητίνης- Σκληρυντή: R9330 / H9054 Epoxy system

Πίνακας Α.1: Μηχανικές ιδιότητες εποξικής ρητίνης

Tensile Strength (MPa)	60
Tensile Modulus (GPa)	2.7
Elongation at Break (tension) (%)	3.8
Flexural Strength (MPa)	108
Flexural Modulus (GPa)	2.97
Elongation at Break (flexion) (%)	11.8

Πίνακας Α.2: Χημικές- φυσικές ιδιότητες ρητίνης R9330 και σκληρυντή H9054

Epoxy resin R9330	
Aspect / Color	Yellow liquid
Viscosity (mPa.s at 25°C)	785 ± 100
Density (g/cm ³)	1.16
Hardener H9054	
Aspect / Color	Light yellow liquid
Viscosity (mPa.s at 25°C)	5 ± 2
Density (g/cm ³)	0.94
R9330 / H9054 mix.	
Mix. viscosity (mPa.s at 25°C)	285 ± 100
Mixing ratio by weight	100 g / 22 g
Mixing ratio by volume	100 ml / 27 ml

Πίνακας Α.3: Διάρκεια πολυμερισμού συναρτήσει θερμοκρασίας

Temperature	Duration
40° C	1h 7m
60° C	26 m
80° C	10 m

Τεχνικό διάγραμμα κόλλας EC-9323 B/A



3M™ Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

Two Part Structural Adhesive

Product Description

3M™ Scotch-Weld™ Structural Epoxy Adhesive EC-9323 B/A is a two component epoxy paste adhesive which cures at room temperature or with mild heat to form a tough, impact resistant structural bond. It has an excellent adhesion to a wide variety of substrates such as metals, glass, ceramics and plastics, incl. GFRP and CFRP. Once cured it provides extremely high shear and peel strength over a wide temperature range, with outstanding resistance to harsh environments and chemicals commonly encountered in aerospace applications.

Key Features

- Toughened system providing extremely high shear and peel strength
- Wide service temperature range
- Outstanding environmental resistance
- Full room temperature processing



Product Characterization

The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purpose

General Properties	Part B	Part A
Colour	Off-white	Red-orange
Base	Modified epoxy	Modified amine
Consistency	Thixotropic paste	Slight gel
Density	1.18 g / cm ³	1.06 g / cm ³
Solids	100 %	100 %
Viscosity ^(a)	700 Pas	18 Pas
Mix ratio by weight (by volume)	100 : 27 wt. (100 : 30 vol.)	
Work life ^(b) / Open Time at 23 ± 2 °C	150 minutes / 20 minutes	
Strength build-up at 23 ± 2 °C		
Handling strength ^(c)	4-5 hours	
Full cure cycle	14 days at room temperature	
Packaging	Cans and pails	

^(a) Brookfield RVF Spindle 7, 2 rpm

^(b) 50 g of mixed adhesive

^(c) Time to reach 1 MPa Overlap Shear Strength

Two Part Structural Adhesive Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

Attachment of LabWI-00002



Product Performance

The following data show typical values obtained with Scotch-Weld™ EC-9323 B/A on unprimed, sulfochromic etched, 2024 T3 aluminium. The samples have been cured for 15 days at room temperature, if not stated otherwise. To control the bond line thickness, approximately 1 wt. % of glass beads, 90 – 150 µm diameter were added to the adhesive.

Mechanical Properties		Test Temperature	Cured for 15 days at 23 °C	Cured for 2 hours at 65 °C
Overlap Shear Strength EN 2243-1		-55 °C	38 MPa	42 MPa
		23 °C	36 MPa	40 MPa
		80 °C	22 MPa	22 MPa
		120 °C	4 MPa	4 MPa
		150 °C	2 MPa	-
Overlap Shear Strength EN 2243-1	Stainless steel	23 °C	-	27 MPa
	CFRP, GFRP epoxy matrix resin	23 °C	-	28 MPa ^(d)
	PMMA	23 °C	-	3 MPa ^(d)
Floating Roller Peel Strength EN 2243-2		-55 °C	120 N / 25 mm	90 N / 25 mm
		23 °C	170 N / 25 mm	190 N / 25 mm
		80 °C	145 N / 25 mm	145 N / 25 mm
Impact Resistance ANFOR NF 76-115		23 °C	17,4 kJ / m ²	32,2 kJ / m ²

^(d) Substrate Failure

Environmental Ageing

The following data show typical values obtained with Scotch-Weld™ EC-9323 B/A after 750 hours exposure to different media and environments to determine the aging resistance. The samples have been cured for 15 days at room temperature.

Mechanical Properties	Environment	Test Temperature	Results
Overlap Shear Strength EN 2243-1	Demineralized water at 23 ± 2 °C	23 °C	34 MPa
	Gasoline super at 23 ± 2 °C	23 °C	36 MPa
	Engine oil (20W40) 23 ± 2 °C	23 °C	36 MPa
	Hydraulic fluid skydrol 500B at 23 ± 2 °C	23 °C	37 MPa
	JP4 fluid at 23 ± 2 °C	23 °C	36 MPa
	5 % Salt spray at 23 ± 2 °C	23 °C	34 MPa
	Hot / Wet 70 °C, ≥ 95% R.H.	23 °C	33 MPa
	Dry heat at 120 ± 2 °C	23 °C	35 MPa

3M™ Scotch-Weld™ Structural Epoxy Adhesive EC-9323-150 B/A

Scotch-Weld™ EC-9323-150 B/A is a product modification of Scotch-Weld™ EC-9323 B/A. There are no significant differences in terms of performance. It contains 1 wt % of glass beads 90 – 150 µm diameter for bond line thickness control. Slight differences can be observed in density and viscosity.

Handling, Application, Storage

Precautionary Information

Refer to product label and Material Safety Data Sheet (MSDS) for health and safety information before using this product. For MSDS visit our website www.3M.com/msds.

Instructions for use

While this information is provided as general application guideline based upon typical conditions, it is recognized that no two applications are identical due to, among other things, differing assemblies, methods of heat and pressure application, production equipment and other limitations. It is therefore suggested that experiments be run, within the actual constraints imposed to determine optimum conditions for your specific application and to determine suitability of product for particular intended use.

Process step	Instruction
Surface preparation	<p>The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surface to be bonded. An acclimated, thoroughly cleaned, dry, grease-free surface is essential for maximum performance. Cleaning methods which will produce a break free water film on metal surfaces are generally satisfactory.</p> <p>At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good proprietary degreasing agent and mechanically abraded, e.g. with 3M Scotch-Brite™ 7447. Abrading should be followed by a second degreasing treatment, e.g. with 3M 08984 Adhesive Cleaner.</p> <p>Optimum processing temperature for substrates and adhesive is around room temperature of 23 °C.</p>
Application	<p>This product consists of two parts. Combine Part B and Part A in a separate container just prior to application in the proportions specified. Note: Mix ratio deviations above +/- 5 % have significant influence on material performance. Mix both components thoroughly until a uniform colour is obtained. Important: Be careful when mixing quantities larger than 100 grams, because exothermic reaction may occur. Apply adhesive to parts to be bonded before the work life expires, e.g. by spatula. Note: Work life depends to some extent on mixed quantity and the shape of the container. Use of a shallow container will minimize the quantity impact. In order to obtain optimum mechanical performance, the joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied and before end of the open time. A fixation of the joint and an even contact pressure throughout the joint area during cure will ensure optimum performance. Maximum shear strength is obtained with 0.10 – 0.20 mm bond line thickness. Close the containers after use to protect the material against humidity.</p>
Curing	<p>Once mixed, Scotch-Weld™ EC-9323 B/A will gel in 3 hours, build up handling strength in 4-5 hours and fully cure within 14 days at room temperature. Note: Lower temperature will slow down the reaction times. Curing time can be accelerated by mild heat. Following times and temperatures will result in a full cure:</p> <ul style="list-style-type: none">14 days at 23 ± 2 °C2 hours at 65 ± 2 °C15 minutes at 100 ± 2 °C <p>Note: The curing temperature may have influence on the final product performance.</p>
Cleaning	<p>Excess uncured adhesive can be cleaned with ketone type solvents. After cure the adhesive can be removed mechanically. Note: When using solvents, extinguish all ignition sources, including pilot lights, and follow the manufacturer's precautions and instructions for use.</p>
Storage and Handling	<p>Store the product at room temperature. Shelf life is minimum 12 months from date of shipment in the original unopened containers. The specific expiry date is mentioned on the product label.</p>

Important notice: All statements, technical information and recommendations in this data sheet are based on tests 3M believes to be reliable, but the accuracy or completeness of those tests is not guaranteed. All technical data and information should be considered typical or representative only and should not be used for specification purposes. Given the variety of factors that affect the use and performance of a 3M product, some of which are uniquely within the user's knowledge and control, it is essential that the user evaluate the 3M product before use to determine the suitability of the 3M product for the intended use and method of application. All questions of liability relating to the 3M product are governed by the terms of the sale subject to, where applicable, the prevailing law.



Automotive and Aerospace Solutions Division
European Aerospace Laboratory
www.3m.eu/aerospace © 3M 2017. All rights reserved.
Reference: 222

Two Part Structural Adhesive Scotch-Weld™ EC-9323 B/A

Page 3 of 3

Attachment of LabWI-00002

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Β.1 Πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας CFRP

Όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας του χρησιμοποιούμενου CFRP, ο κατασκευαστής δίνει τεχνικές πληροφορίες του τελικού υλικού μόνο για την περίπτωση που κατασκευαστεί με κάποια μέθοδο πίεσης με κενό. Επομένως, το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού δεν ήταν γνωστό και έπρεπε να μετρηθεί.

Για να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας εκτελέστηκαν πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια που κόπηκαν από πλάκες CFRP που είχαν κατασκευαστεί όμοια με τα χρησιμοποιούμενα επιθέματα (ίδια κατασκευαστική μέθοδος, ίδιες ίνες άνθρακα, ίδιο σύστημα ρητίνης σκληρυντή). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου με τη βοήθεια την υδραυλικής μηχανής MTS μέγιστου φορτίου 100 kN. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 3039.

Γεωμετρία Δοκιμών

Στον Πίνακα Π.1 φαίνονται οι μετρούμενες διαστάσεις των δοκιμών:

Πίνακας Π. 1: Διαστάσεις δοκιμών CFRP

Όνομα δοκιμίου	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Μήκος (mm)
Δοκίμιο 1	16,4	8,33	130
Δοκίμιο 2	16,5	8,33	130
Δοκίμιο 3	14,9	8,33	130
Δοκίμιο 4	15	8,33	130

Στο παρακάτω Σχήμα Π.1 φαίνονται τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού.



Σχήμα Π.1: Δοκίμια CFRP που υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού

Πειραματική Διαδικασία

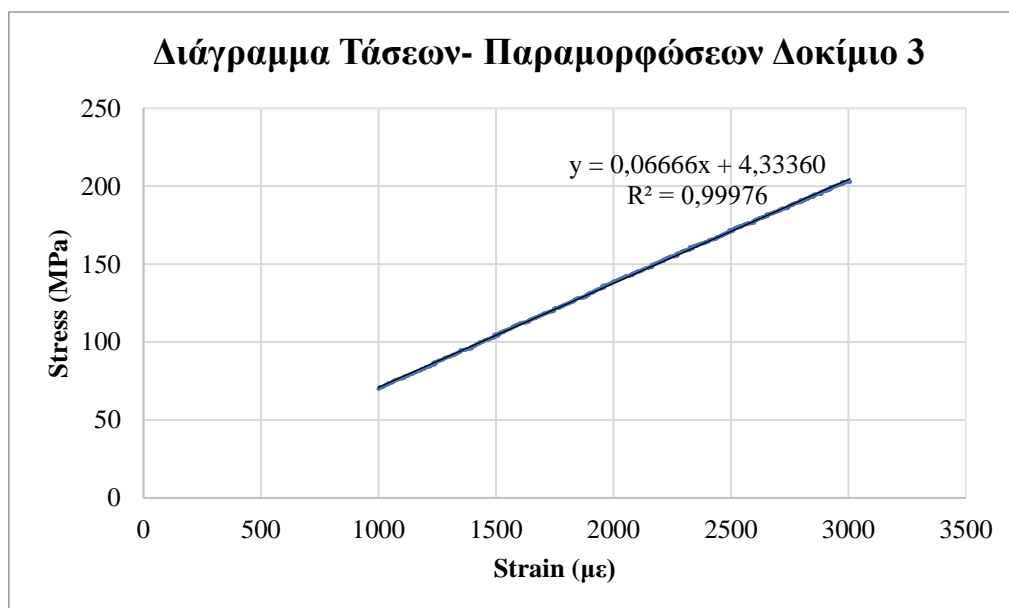
Τα δοκίμια εφελκύνονται από την υδραυλική μηχανή εφελκυσμού, καταγραφόμενου φορτίου. Σύμφωνα με το πρότυπο, η τάση στο δοκίμιο σε κάθε στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (\text{εξ. Π.1})$$

Όπου:

- P_i το φορτίο τη στιγμή i , σε N
- A η επιφάνεια διατομής του δοκίμιου σε mm^2

Στο μέσον του δοκίμιου τοποθετήθηκε εξτενσιόμετρο (extensometer) της εταιρίας MTS με το οποίο μετρούνται παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Μπορούμε επομένως να σχεδιάσουμε το διάγραμμα Τάσης- Παραμόρφωσης για κάθε ένα από τα δοκίμια. Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από την κλίση την γραμμικής περιοχής του διαγράμματος Τάσης- Παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το πρότυπο θα ληφθεί υπόψιν η κλίση της περιοχής από 1000 microstrain έως 3000 microstrain. Για την εύρεση της τιμής της κλίσης της ευθείας, πραγματοποιήθηκε γραμμική προσέγγιση της καμπύλης μέσω του προγράμματος Excel, η συνάρτηση που εξάγεται είναι της μορφής $y=a*x+b$ όπου σαν μέτρο ελαστικότητας θεωρείται η τιμή του a . Στη συνέχεια η τιμή πολλαπλασιάζεται επί 10^3 , ώστε το αποτέλεσμα να προκύψει σε GPa. Σε κάθε διάγραμμα υπολογίστηκε, επίσης, ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination) R^2 έτσι ώστε να κριθεί η αξιοπιστία της γραμμικής προσέγγισης. Σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν μεγαλύτερος του 0,99 γεγονός που υποδηλώνει απόλυτη αξιοπιστία της προσέγγισης. Στο Σχήμα Π.2 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα εξαγωγής του μέτρου ελαστικότητας.

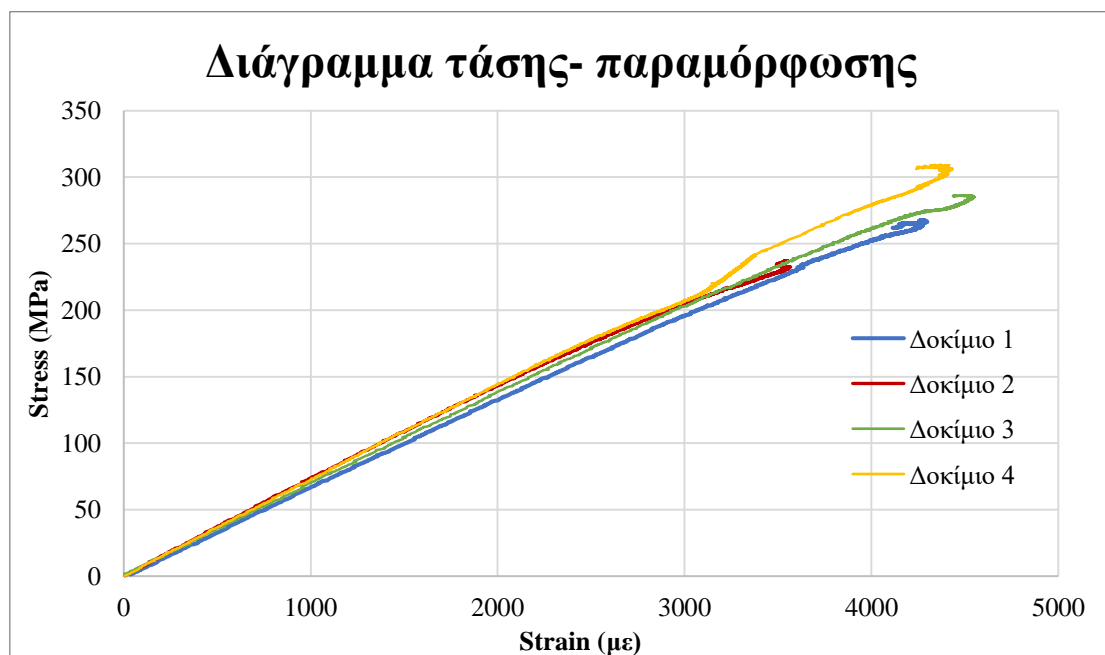


Σχήμα Π.2: Τυπικό διάγραμμα εξαγωγής μέτρου ελαστικότητας

Στο Σχήμα Π.3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού, ενώ στο Σχήμα Π.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης για όλα τα δοκίμια, για το σύνολο της πειραματικής δοκιμής.



Σχήμα Π.3: Πειραματική διάταξη πειράματος εφελκυσμού



Σχήμα Π.4: Συνολικά διαγράμματα τάσης- παραμόρφωσης

Αποτελέσματα

Στον Πίνακα Π.2 φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών για όλα τα δοκίμια.

Πίνακας Π.2: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού CFRP

Αποτελέσματα		
Δοκίμιο 1	64,79	GPa
Δοκίμιο 2	64,98	GPa
Δοκίμιο 3	66,67	GPa
Δοκίμιο 4	66,71	GPa
No. Of Specimens	4	
Mean Value	65,7875	GPa
St. Deviation	1,045128	
Coefficient of Variation	0,015886	

Η μέση τιμή (mean value) από τον πίνακα Π.2 αποτελεί το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη πεπερασμένων στοιχείων στην μοντελοποίηση των επιθεμάτων CFRP.

B.2 Πειραματικές δοκιμές προσδιορισμού ιδιοτήτων χάλυβα

Για τη βέλτιστη μοντελοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των χάλυβδινων δοκών στη μελέτη πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού.

Στο πειραματικό μέρος και στη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, υπάρχουν δύο ήδη χάλυβδινων δοκών, οι δοκοί διατομής IPE και οι δοκοί κοίλης τετραγωνικής διατομής. Για κάθε μία από τις δύο δοκούς, κόπηκαν δοκίμια και εκτελέστηκαν πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού προκειμένου να εξάγουμε ορισμένες μηχανικές τους ιδιότητες, όπως το μέτρο ελαστικότητας, το όριο διαρροής και το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης. Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου με τη βοήθεια την υδραυλικής μηχανής MTS μέγιστου φορτίου 100 kN.

Ονοματολογία και Γεωμετρία Δοκιμίων

Τα δοκίμια 1, 2 κόπηκαν από δοκό διατομής IPE, ενώ τα δοκίμια 3, 4 κόπηκαν από την δοκό κοίλης τετραγωνικής διατομής. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι διαστάσεις των δοκιμίων που εφελκύστηκαν.

Πίνακας Π.3: Διαστάσεις χάλυβδινων δοκιμίων

Όνομα δοκιμίου	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Μήκος (mm)
Δοκίμιο 1	24,7	4,1	251
Δοκίμιο 2	24,3	4,1	248
Δοκίμιο 3	25,2	2,7	252
Δοκίμιο 4	24,7	2,7	251

Πειραματική Διαδικασία

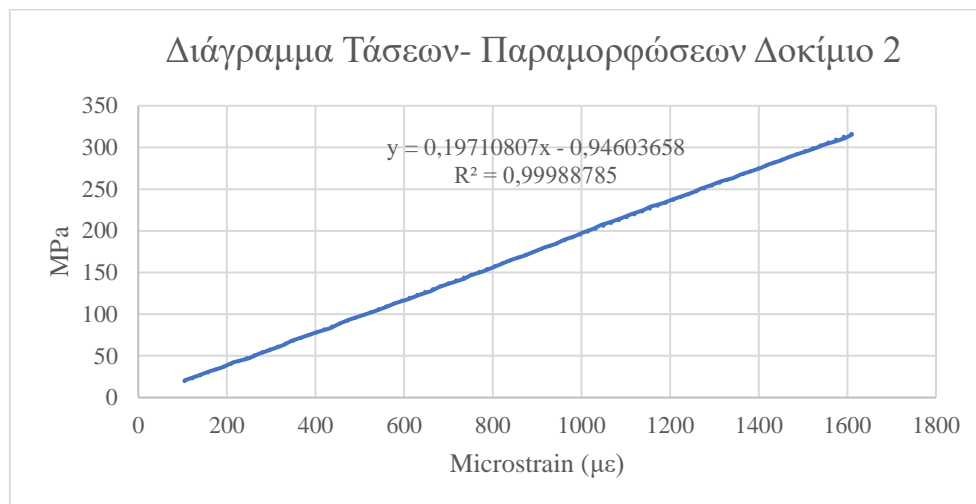
Τα δοκίμια εφελκύνονται από την υδραυλική μηχανή εφελκυσμού, καταγραφόμενου φορτίου μέχρι να επέλθει η αστοχία τους. Η τάση στο δοκίμιο σε κάθε στιγμή υπολογίστηκε από τη εξίσωση (Π.1).

Στο μέσον του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π.5, τοποθετήθηκε εξτενσιόμετρο (extensometer) της εταιρίας MTS με το οποίο μετρούνται παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Μπορούμε επομένως να σχεδιάσουμε το διάγραμμα Τάσης- Παραμόρφωσης για κάθε ένα από τα δοκίμια.

Το μέτρο ελαστικότητας λήφθηκε ως η κλίση της γραμμικής περιοχής κάθε διαγράμματος. Για την εύρεση της τιμής της κλίσης της ευθείας, πραγματοποιήθηκε γραμμική προσέγγιση της καμπύλης μέσω του προγράμματος Excel, η συνάρτηση που εξάγεται είναι της μορφής $y=a*x+b$ όπου σαν μέτρο ελαστικότητας θεωρείται η τιμή του a . Στη συνέχεια η τιμή πολλαπλασιάζεται επί 10^3 , ώστε το αποτέλεσμα να προκύψει σε GPa. Σε κάθε διάγραμμα υπολογίστηκε επίσης ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination) R^2 έτσι ώστε να κριθεί η αξιοπιστία της γραμμικής προσέγγισης. Σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν μεγαλύτερος του 0,99, γεγονός που υποδηλώνει απόλυτη αξιοπιστία της προσέγγισης. Τέλος, το όριο διαρροής λήφθηκε ως η υψηλότερη τάση στην περιοχή της ελαστικής περιοχής. Στο Σχήμα Π.6 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα εξαγωγής του μέτρου ελαστικότητας. Στο Σχήμα Π.7 αντιπαραβάλλονται ένα δοκίμιο που έχει υποβληθεί σε δοκιμή εφελκυσμού με ένα δοκίμιο που δεν έχει υποβληθεί ακόμα.



Σχήμα Π.5: Πειραματική διάταξη



Σχήμα Π.6: Τυπικό διάγραμμα εξαγωγής μέτρου ελαστικότητας



Σχήμα Π.7: Άθικτο δοκίμιο (αριστερά)- Δοκίμιο που έχει υποβληθεί σε πειραματική δοκιμή(δεξιά)

Αποτελέσματα

Στους δύο παρακάτω πίνακες φαίνονται τα αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια κάθε διατομής όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας και το όριο διαρροής. Επειδή είχαμε στη διάθεσή μας μόνον δύο δοκίμια από κάθε διατομή, για κάθε μέγεθος λήφθηκε ο μέσος όρος των τιμών τους.

Πίνακας Π.4: Αποτελέσματα χάλυβα IPE

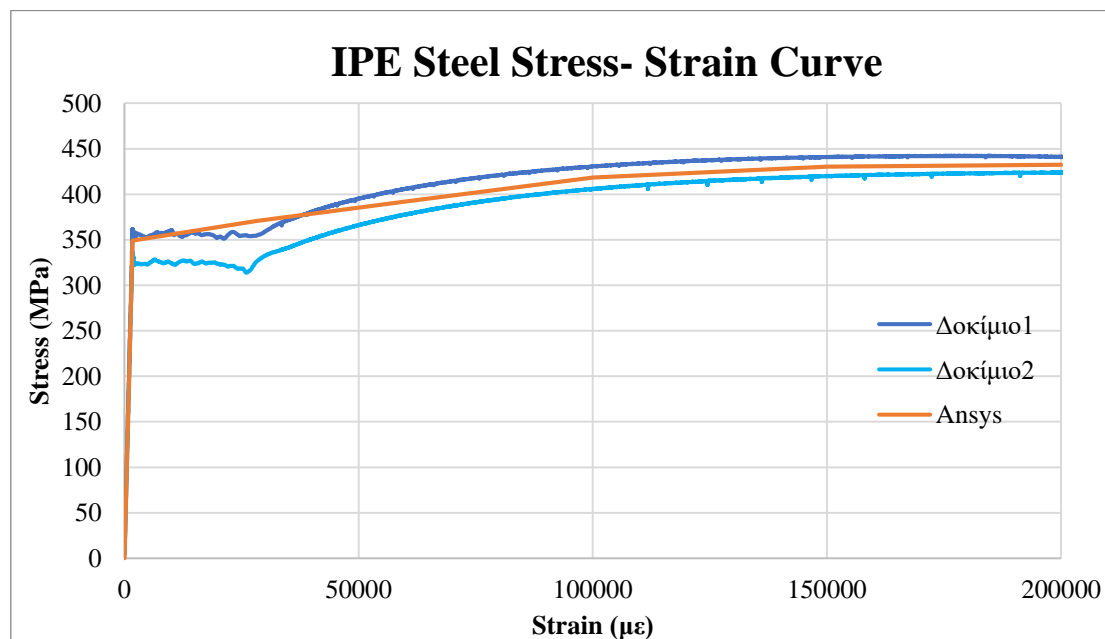
Χάλυβας διατομής IPE		
	E_1 (GPa)	σ_0 (MPa)
Δοκίμιο 1	204,83	361,73
Δοκίμιο 2	197,11	336,32
M.O.	200,97	349,03

Πίνακας Π.5: Αποτελέσματα χάλυβα κοίλης τετ. διατομής.

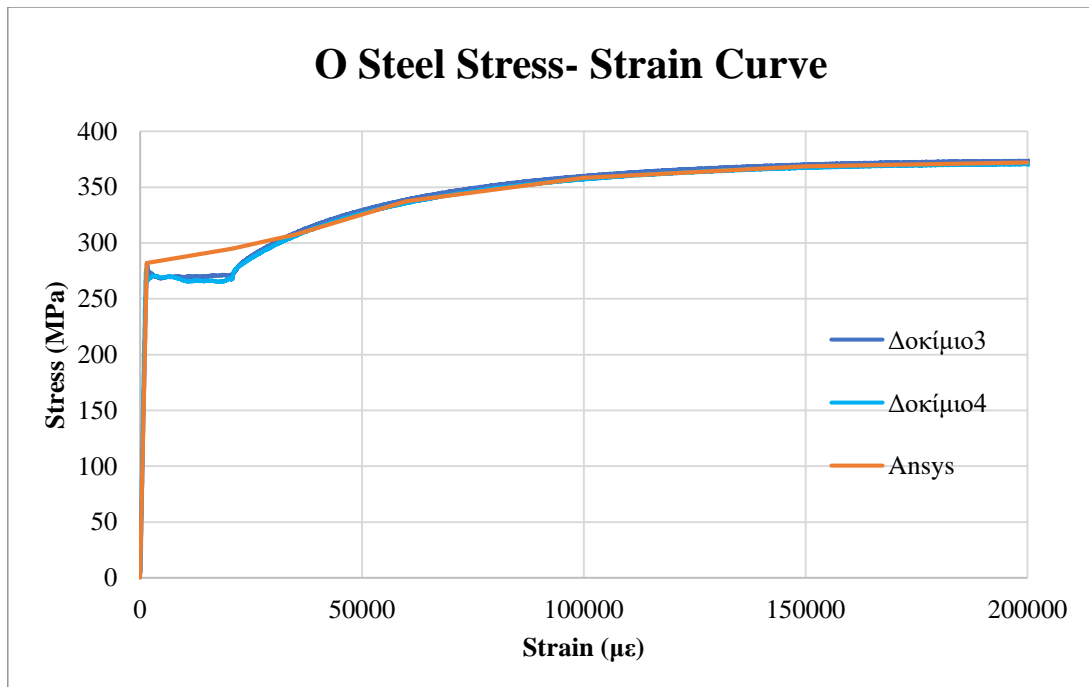
Χάλυβας κοίλης τετραγωνικής διατομής		
	E_1 (GPa)	σ_0 (MPa)
Δοκίμιο 3	193,31	282,16
Δοκίμιο 4	205,58	276,11
M.O.	199,45	279,13

Οι μέσοι όροι των πινάκων Π.4 και Π.5 χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της αντίστοιχης μηχανικής ιδιότητας του χάλυβα στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Επίσης για τη δημιουργία των διαγραμμάτων τάσης παραμόρφωσης στη μη-ελαστική περιοχή που χρησιμοποιήθηκαν από το ANSYS, αντλήθηκαν τιμές από τις πειραματικές καμπύλες. Πιο συγκεκριμένα, για δεδομένες τιμές παραμορφώσεων, λήφθηκε ο μέσος όρος των τάσεων από τα δύο δοκίμια. Οι χρησιμοποιούμενες καμπύλες φαίνονται στα Σχήματα Π.8 και Π.9.



Σχήμα Π.8: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης χάλυβα δοκών διατομής IPE



Σχήμα Π.9: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης χάλυβα δοκών κοίλης τετραγωνικής διατομής