



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΧΡΗΣΗ ΔΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ
ΜΕ ΚΟΛΛΗΤΙΚΑ ΜΕΣΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΛΙΑ Α. ΚΩΤΣΙΔΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Αεροναυπηγού Μηχανικού

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΧΡΗΣΗ ΔΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ
ΜΕ ΚΟΛΛΗΤΙΚΑ ΜΕΣΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΛΙΑ Α. ΚΩΤΣΙΑΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Αεροναυπηγού Μηχανικού

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ν. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2012

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία θα ήταν αδύνατον να πραγματοποιηθεί χωρίς την επίβλεψη, την οργάνωση και τη μεθοδικότητα του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαου Τσούβαλη. Τον ευχαριστώ θερμά όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Βασίλειο Καρατζά για την καθοδήγηση του και την υπομονή που επέδειξε στην επίλυση των αποριών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Σύνθετων Υλικών που συνέφεραν το μέγιστο δυνατό για την ομαλή διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή – Αισθητήρες οπτικών ινών και Εφαρμογές τους	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Γενικά για Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Αρχές λειτουργίας.....	2
1.3 Εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών στις κατασκευές (μετρήσεις παραμορφώσεων).....	12
1.4 Σκοπός της εργασίας.....	23
Κεφάλαιο 2 Εξοπλισμός αισθητήρων οπτικών ινών	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Εξοπλισμός.....	24
Κεφάλαιο 3 1^η Εφαρμογή: Δοκίμιο χάλυβα σε κάμψη, εφελκυσμό και θλίψη	28
3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Σχεδιασμός Εφαρμογής	28
3.2.1 Υλικά.....	28
3.2.2 Γεωμετρία Δοκιμίου.....	29
3.2.3 Σχεδιασμός και Τοποθέτηση Αισθητήρων.....	29
3.2.4 Δοκιμή Κάμψης.....	34
3.3 Παράμετροι Δοκιμής Εφελκυσμού και Θλίψης.....	38
3.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων	39
3.5 Αριθμητική Προσομοίωση.....	42
3.5.1 Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων.....	42
3.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης – Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα	46
Κεφάλαιο 4 2^η εφαρμογή: Κολλητός σύνδεσμος μετάλλου με μέταλλο (Single Lap Joint) σε εφελκυσμό	52
4.1 Εισαγωγή.....	52
4.2 Σχεδιασμός Εφαρμογής	52
4.2.1 Υλικά.....	52
4.2.2 Γεωμετρία	53
4.2.3 Σχεδιασμός Δοκιμής και Κατασκευή Δοκιμίου	54
4.3 Παράμετροι Δοκιμής.....	60
4.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων	61
4.5 Αριθμητική Προσομοίωση.....	67
4.5.1 Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων.....	67
4.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης – Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα	72

Κεφάλαιο 5 3^η Εφαρμογή: Ρωγματομένη πλάκα από χάλυβα ενισχυμένη με επίθεμα από σύνθετα υλικά	81
5.1 Εισαγωγή.....	81
5.2 Σχεδιασμός Εφαρμογής	81
5.2.1 Υλικά.....	81
5.2.2 Γεωμετρία	82
5.2.3 Σχεδιασμός της Δοκιμής και Κατασκευή Δοκιμίου.....	83
5.3 Παράμετροι Δοκιμής.....	96
5.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	97
5.5 Αριθμητική Προσομοίωση.....	105
5.5.1 Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων.....	105
5.6 Σύγκριση με Προηγούμενα Αποτελέσματα	120
Κεφάλαιο 6 Ανακεφαλαίωση	124
6.1 Ανακεφαλαίωση.....	124
6.2 Συμπεράσματα.....	125
Βιβλιογραφία	127

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή Αισθητήρες οπτικών ινών και εφαρμογές τους

1.1 Εισαγωγή

Οι αισθητήρες οπτικών ινών που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, διαθέτουν ελκυστικά χαρακτηριστικά που τους κάνουν πολύ χρήσιμους σε πολλές περιπτώσεις, ενώ σε μερικές άλλες αποτελούν τη μοναδική λύση. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών (κτίρια, πλοία, αεροσκάφη κ.α.) και τείνουν να υποσκελίσουν τους παραδοσιακούς αισθητήρες.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η διαδικασία και αναλύονται τα αποτελέσματα μιας σειράς στατικών πειραμάτων που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, με την χρήση αισθητήρων οπτικών ινών. Οι πειραματικές δοκιμές αφορούν τρία διαφορετικά είδη δοκιμών τα οποία φορτίστηκαν κυρίως από στατικό εφελκυστικό φορτίο και υπολογίστηκαν σε αυτά οι παραμορφώσεις με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για ένα χαλύβδινο έλασμα, έναν κολλητό σύνδεσμο μετάλλου με μέταλλο και ένα μεγάλο μεγέθους δοκίμιο από χάλυβα με κεντρική διαμερή εγκοπή ενισχυμένο με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Οι αισθητήρες οπτικών ινών τοποθετήθηκαν στο πρώτο πείραμα στην επιφάνεια του δοκίμιου, ενώ στα άλλα δυο ενσωματώθηκαν στο κολλητικό μέσο και στο επίθεμα, αντίστοιχα. Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη χρήση και τοποθέτηση των οπτικών ινών που ήταν άλλωστε και το κύριο θέμα της εργασίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε πείραμα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα από αριθμητικές αναλύσεις ούτως ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της χρήσης των αισθητήρων οπτικών ινών ως μετρητικά μέσα παραμορφώσεων.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών και της σημασίας που έχουν αυτοί στη ζωή μας. Αναλύονται μερικές από τις βασικές εφαρμογές αυτών και πιο συγκεκριμένα αυτές που αφορούν τον υπολογισμό παραμορφώσεων στις κατασκευές. Έπειτα παρουσιάζεται ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων όσον αφορά τη λειτουργία των αισθητήρων οπτικών ινών και στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος τοποθέτησης των αισθητήρων οπτικών ινών πάνω σε επίπεδες επιφάνειες. Ακολουθεί αναλυτικά ο σχεδιασμός, η εκτέλεση και η αριθμητική προσομοίωση των τριών εφαρμογών ξεχωριστά, ενώ στο τέλος κάθε κεφαλαίου συγκρίνονται τα πειραματικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα και εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα.

1.2 Γενικά για Αισθητήρες Οπτικών Ινών – Αρχές λειτουργίας

Τα τελευταία 30 χρόνια δυο μεγάλες επαναστάσεις προϊόντων έχουν πραγματοποιηθεί εξαιτίας της ανάπτυξης της οπτικό-ηλεκτρονικής και των βιομηχανιών οπτικών ινών. Η βιομηχανία της οπτικό-ηλεκτρονικής έφερε προϊόντα όπως τα compact disc players, τα laser pointers, τα bar code scanners και τους laser printers. Η βιομηχανία οπτικών ινών, ξεσήκωσε κυριολεκτικά τις βιομηχανίες των τηλεπικοινωνιών προσφέροντας μεγαλύτερης απόδοσης και αξιοπιστίας δίκτυα τηλεπικοινωνιών με ολοένα και μικρότερο κόστος. Αυτή η επανάσταση προσέφερε στους χρήστες τα οφέλη του μεγάλου όγκου παραγωγής αλλά και της ταχύτατης μετάδοσης πληροφοριών [1].

Η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών συνδέθηκε άμεσα με τις εξελίξεις στις βιομηχανίες της οπτικό-ηλεκτρονικής και των επικοινωνιών με οπτικές ίνες. Πολλά από τα εξαρτήματα που σχετίζονται με αυτές τις βιομηχανίες συχνά αναπτύσσονταν για εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών. Από την άλλη μεριά η τεχνολογία οπτικών αισθητήρων προωθούνταν συχνά από την ανάπτυξη και την μετέπειτα μαζική παραγωγή εξαρτημάτων, για την υποστήριξη αυτών των βιομηχανιών. Καθώς οι τιμές των εξαρτημάτων έπεφταν και γίνονταν βελτιώσεις στην ποιότητα, η ικανότητα των αισθητήρων οπτικών ινών να αντικαταστήσουν τους παραδοσιακούς αισθητήρες για μέτρηση θερμοκρασίας, πίεσης, παραμόρφωσης, υγρασίας, περιστροφής, επιτάχυνσης, ακουστικής, δόνησης, ιξώδους αλλά και άλλων παραμέτρων, γινόταν ολοένα και πιο αισθητή. Κατά τις πρώτες ημέρες της τεχνολογίας των οπτικών ινών, οι πιο εμπορικά επιτυχημένοι αισθητήρες οπτικών ινών ήταν αυτοί που στόχευαν σε αγορές που η τεχνολογία οπτικών αισθητήρων ήταν ελάχιστα ανεπτυγμένη έως ανύπαρκτη. Τα εγγενή πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών, όπως το μικρό βάρος και μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση, η αντίσταση στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η μεγάλη ευαισθησία τους και η ανθεκτικότητά τους στο περιβάλλον αντιστάθμιζαν κατά πολύ τα βασικά μειονεκτήματα του υψηλού κόστους και της μη εξοικείωσης του χρήστη.

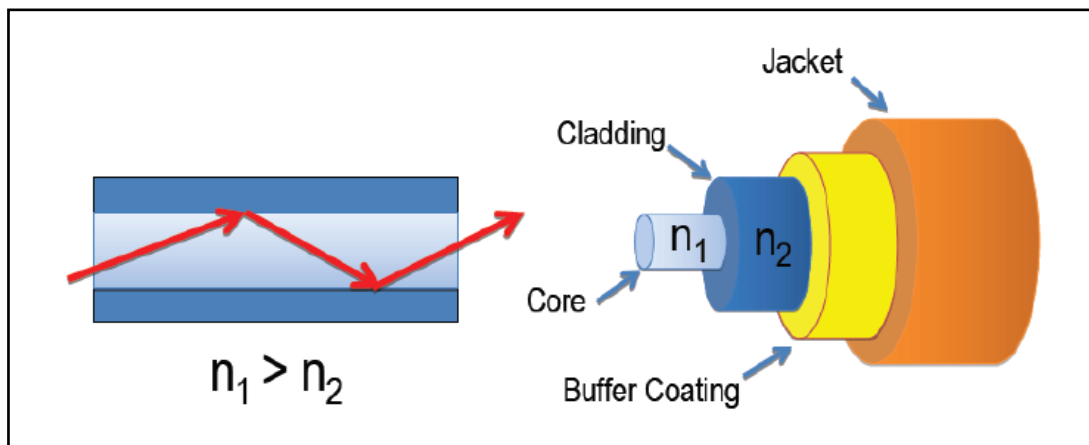
Η κατάσταση όμως αλλάζει. Οι οπτικές ίνες που κόστιζαν το 1979 \$20/m τώρα κοστίζουν \$0.10/m και με πολύ καλύτερες οπτικές και μηχανικές ιδιότητες. Ολοκληρωμένες οπτικές συσκευές που δεν ήταν διαθέσιμες για χρήση τότε, τώρα χρησιμοποιούνται ευρέως σε μοντέλα παραγωγής. Στο μέλλον οι τιμές μπορεί να πέσουν ακόμα περισσότερο, προσφέροντας ταυτόχρονα πιο εξελιγμένα οπτικά κυκλώματα. Όσο αυτές οι τάσεις συνεχίζονται, οι σχεδιαστές θα κατασκευάζουν πιο ανταγωνιστικά προϊόντα με αποτέλεσμα οι οπτικοί αισθητήρες να λαμβάνουν ολοένα και υψηλότερη θέση στην αγορά των αισθητήρων.

Σήμερα οι αισθητήρες οπτικών ινών χαίρουν μεγάλης αποδοχής στην παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM). Χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στα κτίρια, τις γέφυρες, τα αεροσκάφη, τα πλοία κ.α. για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της ακεραιότητάς τους. Η χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών είναι τεράστιας σημασίας αν αναλογιστούμε την ασφάλεια που μπορούν να προσφέρουν σε ακριβές και κρίσιμες κατασκευές. Πόσο μάλλον όταν αυτές οι κατασκευές χρησιμοποιούνται καθημερινά από τον άνθρωπο και οποιαδήποτε καταστροφή τους μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια ζωών.

Βασικά Χαρακτηριστικά

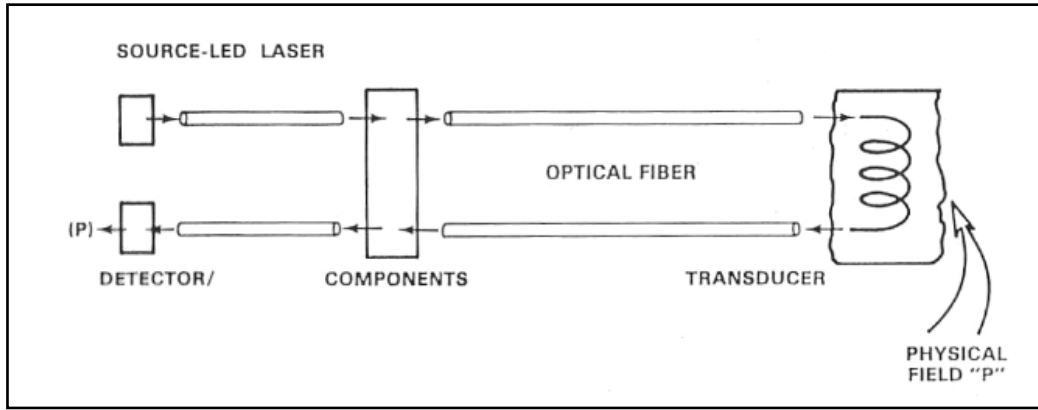
Παρόλο που χρειάζεται η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για να μελετηθεί η διάδοση του φωτός μέσα στις οπτικές ίνες, στην πράξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοί νόμοι της οπτικής για να γίνει αυτή κατανοητή. Μπορούμε να θεωρήσουμε το φως ως ακτίνες που ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές και μεταδίδονται μέσα στις οπτικές ίνες εξαιτίας του φαινομένου της εσωτερικής ανάκλασης. Οι οπτικές ίνες διαθέτουν έναν πυρήνα με μεγάλο δείκτη διάθλασης, ο οποίος περιβάλλεται από μια επικάλυψη μικρότερου δείκτη διάθλασης (βλ. σχήμα 1.1). Το φως ανακλάται στα όρια μεταξύ του πυρήνα της ίνας και της επικάλυψής του. Όσο ο πυρήνας περιβάλλεται από την επικάλυψή του, τόσο το φως που βρίσκεται μέσα σε αυτόν ανακλάται ξανά και ξανά και έτσι καθοδηγείται μέσα στην οπτική ίνα [2].

Ο πυρήνας (core) και η επικάλυψη (cladding) μιας τυπικής οπτικής ίνας κατασκευάζονται από γυαλί (πυριτία). Ο πυρήνας κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από την επικάλυψή του. Συνήθως η διαφορά του δείκτη διάθλασης είναι μικρότερη του 1%. Ο αυστηρός ποιοτικός έλεγχος κατά την διάρκεια της κατασκευής μιας οπτικής ίνας, εξασφαλίζει την σταθερότητα των ιδιοτήτων της καθ' όλο το μήκος της. Οι ίνες έχουν μεγάλη αντοχή αλλά είναι ταυτόχρονα και εύκαμπτες. Στο τέλος μια εξωτερική επένδυση (jacket), συνήθως ακρυλική ή πολυαμιδική (σε σπάνιες περιπτώσεις μεταλλική) εφαρμόζεται στις ίνες για προστασία από το περιβάλλον. Η εξωτερική επένδυση μπορεί να αποτελείται από πολλά στρώματα ανάλογα με την προστασία που χρειάζεται.



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση οπτικής ίνας.

Ουσιαστικά, ένας αισθητήρας οπτικής ίνας λειτουργεί με την αυξομείωση μίας ή περισσότερων ιδιοτήτων του φωτός που διαδίδεται μέσα στην ίνα. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι η ένταση, η φάση, η συχνότητα, ή η πόλωση και μεταβάλλονται ανάλογα με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που μετριοούνται σε κάθε περίπτωση [3]. Στην απλούστερη μορφή του, ένας αισθητήρας οπτικών ινών αποτελείται από μια πηγή φωτός, μια οπτική ίνα, ένα αισθητήριο στοιχείο (το οποίο μετατρέπει την μέτρηση σε ένα οπτικό σήμα) και έναν οπτικό ανιχνευτή (ο οποίος μπορεί να είναι ένας παλμογράφος ή ένας οπτικός αναλυτής φάσματος) (βλ. σχήμα 1.2).

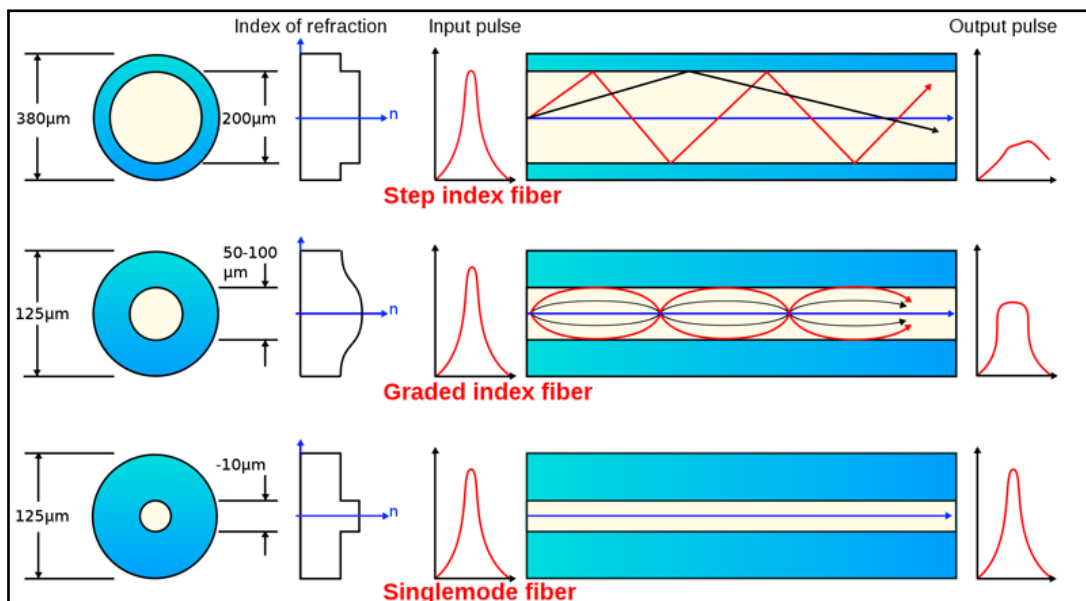


Σχήμα 1.2: Τυπική διάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών.

Ταξινόμηση αισθητήρων οπτικών ινών

Υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων οπτικών ινών για την παρακολούθηση των κατασκευών που χρησιμοποιούνται τόσο στην ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και στις βιομηχανίες. Πανεπιστημιακά και βιομηχανικά ερευνητικά κέντρα αναπτύσσουν και παράγουν μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων για τους περισσότερους τύπους μετρήσεων και εφαρμογών. Στο εδάφιο αυτό θα γίνει μια ταξινόμηση των κυριότερων αισθητήρων και κυρίως αυτών που έχουν φτάσει σε ένα «ώριμο» επίπεδο και που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές. Οι αισθητήρες οπτικών ινών χωρίζονται σε πολλές υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που αυτοί λειτουργούν, με βάση την θέση τους ως προς την οπτική ίνα, ανάλογα με την χρήση τους κ.α. [4].

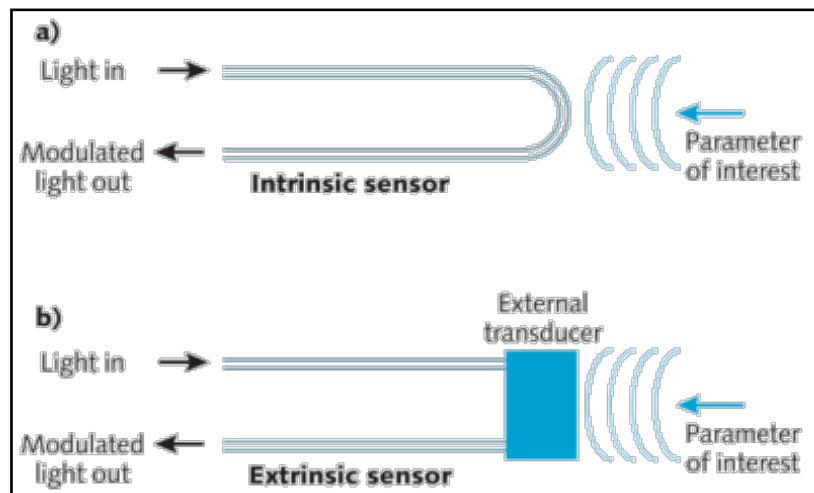
Ένας από τους βασικότερους διαχωρισμούς είναι ο αριθμός των καταστάσεων που μπορεί να υποστηρίξει μια οπτική ίνα. Διαχωρίζονται σε δύο ομάδες, τις μονότροπες ή μονής κατάστασης (single mode) και τις πολύτροπες ή πολλών καταστάσεων (multimode), (βλ. σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3 : Είδη οπτικών ινών, ανάλογα με την κατάσταση τους (mode).

Οι ίνες με πολύ μικρό πάχος πυρήνα επιτρέπουν να μεταδίδεται το φως μόνο σε μια κατάσταση (single mode). Το φως μέσα σε αυτές διαδίδεται ομοιόμορφα. Αντίθετα οι ίνες με μεγαλύτερο πάχος μπορούν να διαδίδουν το φως σε παραπάνω από μία καταστάσεις (multimode) και πιο συγκεκριμένα με δυο διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το προφίλ του δείκτη διάθλασης. Όταν ο δείκτης διάθλασης διατηρεί σταθερό προφίλ σε όλη την διατομή της ίνας τότε η ίνα ονομάζεται σταθερού βήματος (step index). Ενώ όταν το προφίλ του δείκτη διάθλασης είναι μη γραμμικό, περιστροφικό και συμμετρικό τότε η ίνα ονομάζεται κεκλιμένου βήματος (gradient index).

Γενικά οι αισθητήρες οπτικών ινών διαχωρίζονται αναλόγως με το αν είναι εσωτερικοί (intrinsic) ή εξωτερικοί (extrinsic) [5]. Οι εσωτερικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα μέρος της ίδιας της οπτικής ίνας σαν αισθητήριο στοιχείο. Οποιαδήποτε περιβαλλοντική μεταβολή μπορεί να διαφοροποιήσει τις ιδιότητες της φωτεινής δέσμης που περνάει μέσα από την ίνα. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μπορεί να είναι στην ένταση, στην φάση ή στην πόλωση. Ουσιαστικά, κάθε περιβαλλοντική επίδραση μπορεί να μετατρέπεται σε ένα οπτικό σήμα που μπορεί να ερμηνευθεί. Η ερμηνεία αυτή μπορεί να γίνει από πολλά διαφορετικά είδη εσωτερικών αισθητήρων οπτικών ινών. Το κλειδί όμως είναι ο σχεδιασμός κάθε φορά του κατάλληλου αισθητήρα για την μέτρηση της επιθυμητής παραμέτρου. Αντίθετα οι εξωτερικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν την οπτική ίνα απλά σαν μέσο μεταφοράς του φωτός η οποία το διανέμει από και προς μια αισθητήριο κεφαλή στο τέλος της ίνας (βλ. σχήμα 1.4). Η αισθητήρια κεφαλή μπορεί να περιέχει καθρέπτες, κάποιο αέριο ή υγρό αλλά και πολλούς άλλους μηχανισμούς που μπορούν να δημιουργήσουν, να διαμορφώσουν ή να διαφοροποιήσουν μια ακτίνα φωτός.

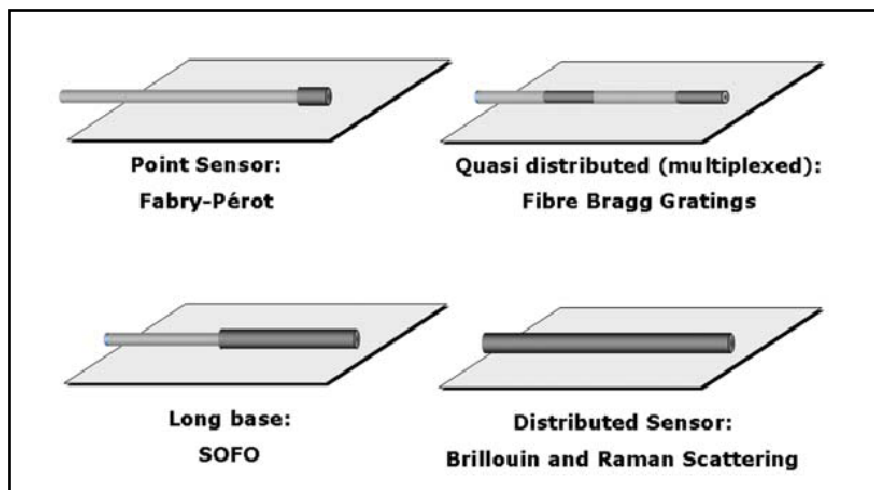


Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση λειτουργίας εσωτερικού και εξωτερικού αισθητήρα.

Ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος του αισθητήριο στοιχείου, οι αισθητήρες οπτικών ινών ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες όπως φαίνεται παρακάτω (βλ. σχήμα 1.5) [6]:

- Σημειακοί αισθητήρες (point sensors): Έχουν ένα σημειακό αισθητήριο στοιχείο στο τέλος του καλωδίου της οπτικής ίνας και μοιάζουν με τους περισσότερους ηλεκτρικούς αισθητήρες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου *Fabry-Perot*.
- Αισθητήρες πολυπλεξίας (multiplexed sensors): Διαθέτουν αρκετά αισθητήρια σημεία και έτσι επιτρέπουν τις μετρήσεις σε πολλά σημεία κατά το μήκος μίας οπτικής ίνας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου *Fiber Bragg Grating (FBG)*

- Αισθητήρες μεγάλου μήκους (long-based sensors): Εντάσσουν τις μετρήσεις σε αισθητήρες μεγαλύτερου μήκους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου SOFO (*Surveillance d'ouvrages par fibres optiques*).
- Καταναμημένοι αισθητήρες (distributed sensors): Είναι ικανοί να «νοιώθουν» σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος μιας οπτικής ίνας. Τυπικά κάθε ένα μέτρο σε οπτικές ίνες μήκους πολλών χιλιομέτρων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου Brillouin και Raman Scattering.



Σχήμα 1.5: Τύποι αισθητήρων ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος του αισθητήριου στοιχείου.

Ο επόμενος διαχωρισμός εξαρτάται από την ιδιότητα του φωτός που χρησιμοποιείται από τους αισθητήρες οπτικών ινών για τον υπολογισμό ενός φυσικού φαινομένου. Η κατηγοριοποίηση φαίνεται παρακάτω:

- Ανάλογα με την ένταση του φωτός (intensity).
- Ανάλογα με τη διαφορά φάσης μεταξύ δυο μηκών κύματος (interferometric).
- Ανάλογα με τον συντονισμό της συχνότητας σε μια οπτική κοιλότητα (Fabry-Pérot).
- Με βάση την σκέδαση του φωτός. Οπισθοσκεδαζόμενοι καταναμημένοι αισθητήρες (Rayleigh, Raman, Brillouin).
- Με βάση την πόλωση του φωτός (polarimetric) και
- Με βάση τις φασματικές παρεμβολές (spectral interference). Η συχνότητα του φωτός παρεμβάλλεται από μια περιοδική κατασκευή (FBGs).

Τέλος οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται [7]. Φυσικοί αισθητήρες είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση φυσικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η παραμόρφωση κ.α. Χημικοί αισθητήρες είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του pH, την ανάλυση αερίων κ.α. Τέλος βιοϊατρικοί αισθητήρες είναι αυτοί που εφαρμόζονται στην βιολογία και την ιατρική για μέτρηση της ροής του αίματος, της σύστασης της γλυκόζης κ.α. Εννοείται βέβαια, πως όλοι οι προηγούμενοι τύποι αισθητήρων ανήκουν και στις κατηγορίες αισθητήρων που αναφέρθηκαν σε αυτή την παράγραφο.

Στον παρακάτω Πίνακα βλέπουμε συνοπτικά τα είδη των αισθητήρων καθώς και μερικά από τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους [8].

Πίνακας 1.1: Σύνοψη των αισθητήρων οπτικών ινών με βάση τις ιδιότητες τους.

	SOFO interferometric	Fabry-Perot Interferometric	Fiber Bragg Gratings	Raman scattering	Brillouin scattering
Sensor type	Long-gauge (integral strain)	Point	Point	Distributed	Distributed
Main measurable parameters	Deformation Strain Tilt Force	Strain Temperature Pressure	Strain Temperature Acceleration Water level	Temperature	Strain Temperature
Multiplexing	Parallel	Parallel	In-line and parallel	Distributed	Distributed
Measurement points in one line	1	1	10-50	10000	30000
Typical accuracy					
Strain(με)	1	1	1		20
Deformation (μm)	1	100	1		
Temperature (°C)		0.1	0.1	0.1	0.2
Tilt (μrad)	30				
Pressure (% full scale)		0.25			
Range	20 m gauge			8 km	30 km, 150 km with range extenders
Fiber Type	Single mode	Multimode	Single mode	Multimode	Single mode

Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Έχοντας παρουσιάσει την φύση των υλικών που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες οπτικών ινών (γενικά διηλεκτρικά) καθώς και τις μεθόδους που χρησιμοποιούν αυτοί για την καταγραφή των φαινομένων, αναλύονται παρακάτω τα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών συγκριτικά με τους παραδοσιακούς, μη-οπτικούς αισθητήρες [9].

Πλεονεκτήματα:

- 1) Γενικά οι οπτικοί αισθητήρες κατασκευάζονται εξολοκλήρου από διηλεκτρικά υλικά τα οποία είναι χημικά αδρανή. Αυτό μεταφράζεται σε ηλεκτρική και χημική παθητικότητα και σε συνδυασμό με την φύση του φωτός που χρησιμοποιείται για την λειτουργία τους, οι αισθητήρες είναι τεχνικώς ιδανικοί για εφαρμογές σε εχθρικά ή διαβρωτικά περιβάλλοντα, ή όπου υπάρχει κίνδυνος έκρηξης.
- 2) Εφόσον η οπτική ίνα είναι ένα διηλεκτρικό μέσο, οι αισθητήρες οπτικών μέσων είναι τελείως απρόσβλητοι από οποιονδήποτε τύπο ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέσα με υψηλές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι παραδοσιακοί ηλεκτρικοί αισθητήρες (πχ. strain gages) είναι ιδιαίτερα ακατάλληλοι σε τέτοια περιβάλλοντα, καθώς είναι πολύ ευαίσθητοι στις παρεμβολές.
- 3) Η βιοσυμβατότητα, η αξιοπιστία και η μη-διεσδυτική φύση των οπτικών ινών, συνδυασμένα με την μικρή τους κατασκευή και την απλή διεπαφή μεταξύ του

αισθητήριου στοιχείου και της περιοχής μέτρησης, κάνουν τους αισθητήρες οπτικών ινών κατάλληλους για τον εντοπισμό και την καταγραφή μεταβλητών της βιοϊατρικής.

- 4) Μπορούν να αντέξουν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες χάριν στο υψηλό σημείο τήξης της οπτικής ίνας. Χρησιμοποιώντας ειδικά προστατευτικά περιβλήματα με ακόμα μεγαλύτερο σημείο τήξης, είναι δυνατόν να δουλέψουν σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες. Έχουν έτσι ένα μεγάλο εύρος μέτρησης θερμοκρασιών αρκετά μεγαλύτερο από πολλές ηλεκτρικές συσκευές.
- 5) Το μικρό τους μέγεθος σημαίνει ότι μπορούν να ενσωματωθούν μέσα σε μια σύνθετη κατασκευή χωρίς να μειώσουν σημαντικά την αντοχή της. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις σε περιορισμένους χώρους. Η μικρή τους μάζα σημαίνει ότι μπορούν να ανταποκρίνονται γρήγορα και να παίρνουν μετρήσεις σε μικρά δοκίμια.
- 6) Η απόσταση από το σημείο μέτρησης μπορεί να είναι μεγάλη, ακόμα και χιλιόμετρα. Αυτό σημαίνει ότι η πηγή και ο οπτικός αναλυτής μπορούν να βρίσκονται μακριά από το αισθητήριο στοιχείο και εν συνεχεία από ένα εχθρικό περιβάλλον.
- 7) Η ευαισθησία, το δυναμικό εύρος και η ευκρίνεια ενδεχομένως να είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα των παραδοσιακών αισθητήρων. Χρησιμοποιώντας τεχνικές συμβολομετρίας (interferometric) μπορούν να επιτευχθούν οι καλύτερες δυνατές μετρήσεις από άποψη ευαισθησίας. Αυτή η μεγάλη ευαισθησία πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε εφαρμογές αιχμής.
- 8) Ένας τεράστιος αριθμός αισθητήρων μπορεί να τοποθετηθεί σε μια οπτική ίνα κάνοντας χρήση τεχνικών πολυπλεξίας (multiplexing).
- 9) Η ικανότητα της κατανομής των αισθητήρων σε ένα μόνο καλώδιο οπτικής ίνας έχει μεγάλη δυναμική σε εφαρμογές παρακολούθησης οποιασδήποτε κατασκευής, έξυπνης ή μη. Αυτό έχει τεράστια επίδραση στις αγορές, της κατασκευής κτιρίων, σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας, της αεροναυτικής κ.α.

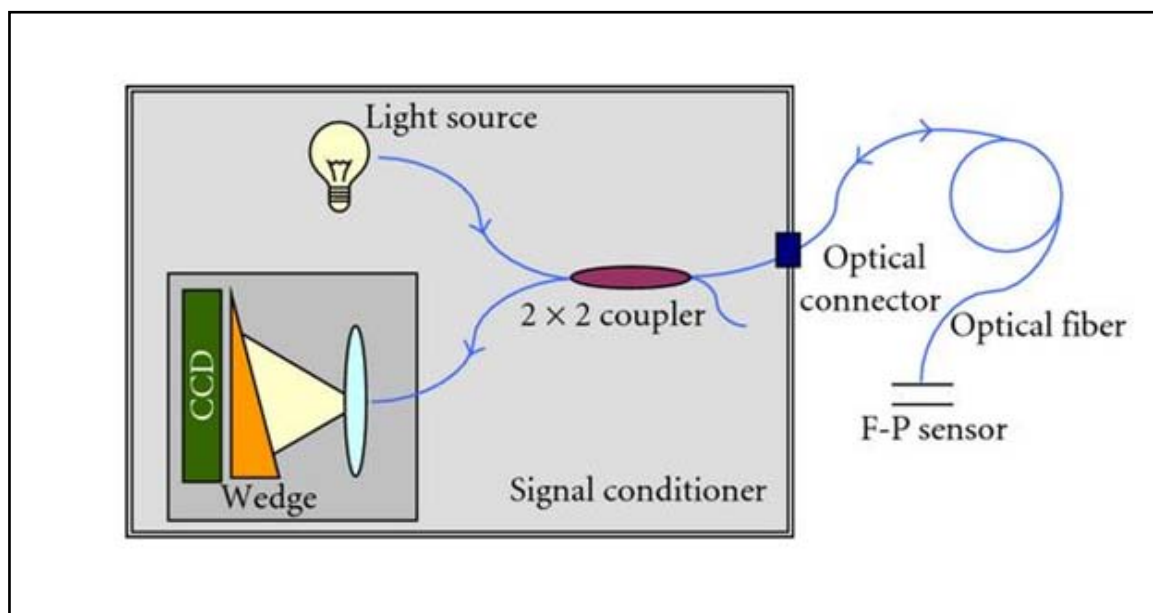
Μειονεκτήματα:

- 1) Η ευαισθησία του αισθητήριου στοιχείου και κατ' επέκταση ολόκληρου του συστήματος ενός αισθητήρα επηρεάζεται και από άλλες μεταβλητές πέρα από την επιθυμητή μεταβλητή που μετριέται κάθε φορά. Για να αποκτήσουν «αναισθησία» στις άλλες μεταβλητές έχουν γίνει πολλές μελέτες με πολύ καλά αποτελέσματα. Ένα παράδειγμα αυτής της προσπάθειας είναι η έρευνα για να διαχωριστεί η ευαισθησία στην θερμοκρασία και την παραμόρφωση στους αισθητήρες FBG. Η διασταύρωση της ευαισθησίας είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα διότι είναι η αιτία σφαλμάτων στο οπτικό σήμα που φτάνει στην έξοδο. Ωστόσο το πρόβλημα αυτό υπάρχει και στους συμβατικούς αισθητήρες.
- 2) Το κόστος των οπτικών αισθητήρων είναι προς το παρόν, στις περισσότερες των περιπτώσεων, μεγαλύτερο από αυτών που κατασκευάζονται με την παραδοσιακή τεχνολογία. Αυτό συμβαίνει ουσιαστικά λόγω του υψηλού κόστους των εξαρτημάτων και κυρίως των αισθητήριων οργάνων. Αυτό έγκειται στα χαρακτηριστικά των νέων τεχνολογιών, αλλά και μιας αγοράς που βρίσκεται στα αρχικά της στάδια.

Οπτικοί αισθητήρες Fabry-Perot

Ανάμεσα στους εμπορικά διαθέσιμους οπτικούς αισθητήρες, η τεχνολογία συμβολομετρίας λευκού φωτός Fabry P erot   είναι πιθανώς η πιο ενδιαφέρουσα και ελκυστική. Μπορούν με  ναν σχετικά φθινό εξοπλισμό μεταβαλλόμενου σήματος (signal conditioner) να χρησιμοποιηθούν στην μέτρηση διαφορετικών φυσικών παραμέτρων,  πως η παραμόρφωση, η θερμοκρασία, η πίεση, η μετατόπιση κ.α. Σε σχέση με  λλες τεχνολογίες αισθητήρων οπτικών ινών που απαιτούν ακριβότερο εξοπλισμό (οπτική πηγή, αναλυτή φάσματος),  πως οι αισθητήρες FBG, η τεχνολογία Fabry-Perot χρειάζεται φθινό και  πλό εξοπλισμό, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω [10].

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας  γκειται στο  τι η μετρήσιμη τιμή είναι  πόλυτη. Αυτό σημαίνει  τι ο αισθητήρας μπορεί να αποσυνδεθεί και να ξανασυνδεθεί χωρίς να αλλάζει η αρχική μέτρηση. Λόγω περιορισμών της φωτεινής πηγής και του ανιχνευτή σήματος στην τεχνολογία αυτή περιορίζεται ο ρυθμός δειγματοληψίας στην τάξη των kHz,  ρος που θεωρείται  μως κατάλληλο για τις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές. Η αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας αυτής φαίνεται στο σχήμα 1.6.

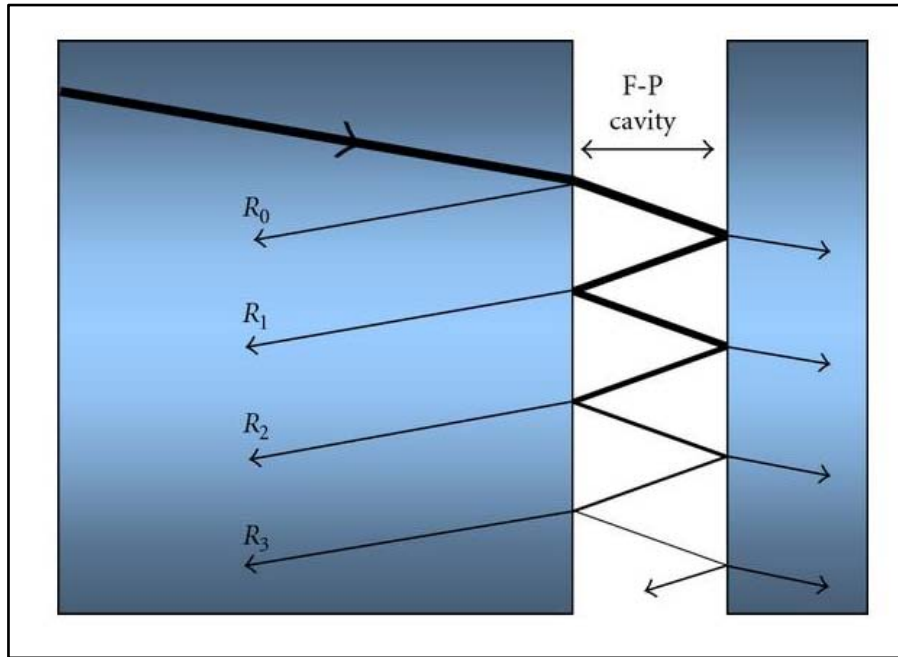


Σχήμα 1.6 : Περιγραφή της διάταξης ενός αισθητήρα τύπου F-P που χρησιμοποιεί την συμβολομετρία λευκού φωτός.

Μια πηγή φωτός και συγκεκριμένα μια φωτεινή, λευκή πηγή οδηγείται αρχικά σε μια πολύτροπη (multimode) οπτική ίνα και  πειτα στην είσοδο ενός συζευκτή 2x2, ο οποίος δρα ως διαχωριστής ισχύος (50/50). Η μια  ξοδος συνδέεται με τον αισθητήρα οπτικής ίνας διαμέσου μιας οπτικής υποδοχής στο μπροστινό πάνελ του ενισχυτή σήματος, ενώ η δεύτερη  ξοδος δεν χρησιμοποιείται, εκτός μερικών περιπτώσεων που συνδέεται με κάποιον ανιχνευτή φωτός για την παρακολούθηση της πηγής. Έτσι το φως ταξιδεύει διαμέσου της κύριας οπτικής ίνας μέχρι να φτάσει στο  κρο της, όπου είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας.

Ο πυρήνας του οπτικού αισθητήρα είναι  να συμβολόμετρο Fabry-Perot, που είναι πολύ γνωστό στην επιστημονική κοινότητα της οπτικής για περισσότερο  πό  ναν αιώνα. Έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές ερευνητικές εφαρμογές  πως η φυσική και η αστροφυσική. Αποτελείται  πό δυο  πολύτως παράλληλους,  πίπεδους και ημιανακλόμενους καθρέπτες που χωρίζονται  πό  να συγκεκριμένο κενό ή  λλιώς κοιλότητα (F-P cavity). Το φως

διέρχεται μέσα από τον πρώτο καθρέπτη και αντανακλάται πάρα πολλές φορές μεταξύ των δύο καθρεπτών, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Σχηματική αναπαράσταση της ανάκλασης του φωτός μέσα σε ένα συμβολόμετρο Fabry-Perot.

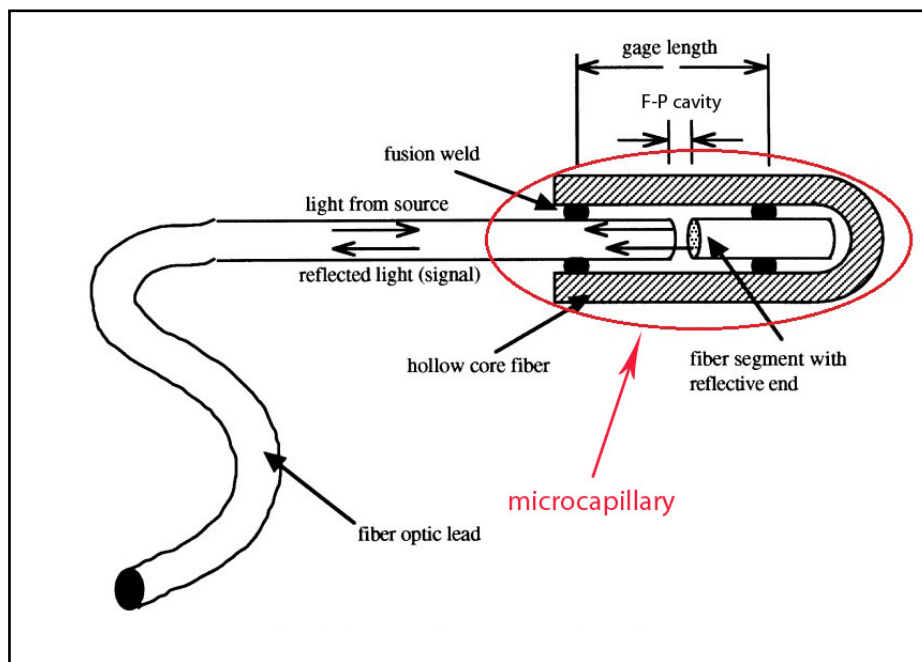
Ωστόσο σε κάθε ανάκλαση, ένα μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας δέσμης, διαφεύγει του συμβολόμετρου δημιουργώντας ένα μεγάλο αριθμό παράλληλων δεσμών φωτός (R_0, R_1, \dots, R_n) που έχουν την ίδια γωνία με αυτήν που μπήκε αρχικά στο συμβολόμετρο (στο κενό οι δέσμες που εξέρχονται θα μπορούσαν εάν εστιάζοντουσαν από ένα συγκλίνοντα φακό να δημιουργήσουν κροσσούς παρεμβολής). Η απόσταση μεταξύ τους εξαρτάται από την οπτική διαδρομή (που έχει σχέση με την απόσταση που χωρίζει τα παράλληλα επίπεδα καθώς και με τον δείκτη διάθλασης μεταξύ των δύο επιπέδων), αλλά φυσικά και από το μήκος κύματος του φωτός. Έτσι, εάν μια φυσική παράμετρος που θα μετρηθεί από τον αισθητήρα αλλάζει την απόσταση της οπτικής διαδρομής του συμβολόμετρου Fabry-Perot, το φως που ξεφεύγει από την κοιλότητα κωδικοποιείται σύμφωνα με αυτήν την παραλλαγή.

Όλα τα παραπάνω συμβαίνουν μέσα στον αισθητήρα. Στην οπτική ίνα, οι ακτίνες που εξέρχονται από το συμβολόμετρο Fabry-Perot δεν εστιάζονται αμέσως σε ένα επίπεδο ούτως ώστε να δώσουν μια παρεμβολή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά επανέρχονται πάλι μέσα στην οπτική ίνα και ταξιδεύουν πίσω από όπου προήλθαν. Έπειτα εισέρχονται στον ενισχυτή σήματος από την οπτική υποδοχή και τότε το φως χωρίζεται από τον συζευκτή σε δυο οπτικές ίνες. Το φως που κατευθύνεται πίσω στην πηγή φωτός χάνεται, ενώ το άλλο κατευθύνεται σε ένα οπτικό κουτί. Εκεί, με την χρήση μιας σφήνας Fizeau, αναπαριστάται η μορφή της παρεμβολής και καταγράφεται από έναν αισθητήρα (CCD). Για να υπολογιστεί η οπτική απόσταση των ακτίνων, που συνδέεται με την φυσική παράμετρο που μετρήθηκε, αρκεί η εύρεση της μέγιστης κορυφής στον αισθητήρα CCD.

Η συμβολομετρική αυτή μέθοδος επιτρέπει ακριβείς μετρήσεις του μήκους της κοιλότητας (F-P cavity), με ακρίβεια δεκάτων του νανομέτρου και προσφέρει ένα μεγάλο δυναμικό εύρος.

Αισθητήρες παραμόρφωσης Fabry-Perot

Η αισθητήριος κεφαλή ενός αισθητήρα παραμόρφωσης τύπου Fabry-Perot αποτελείται από δυο γυάλινες ίνες που βρίσκονται η μια απέναντι από την άλλη, με τα άκρα τους να είναι τέλειες επίπεδες επιφάνειες. Η απόσταση μεταξύ τους αποτελεί την κοιλότητα F-P και διατηρείται σταθερή χάρη σε ένα γυάλινο σωλήνα (microcapillary) πάνω στον οποίο είναι στερεωμένες σε συγκεκριμένα σημεία οι δυο ίνες (βλ. Σχήμα 1.8). Η μεταβολή του μήκους της κοιλότητας F-P είναι απλά η παραμόρφωση που μετριέται από τον αισθητήρα σε μονάδες με. Για να μετρηθεί η παραμόρφωση ενός υλικού, η αισθητήριος κεφαλή πρέπει να κολληθεί ή να ενσωματωθεί πάνω ή μέσα στο υλικό που πρέπει να μελετηθεί. Μόλις το υλικό παραμορφώνεται από ένα φορτίο ή απο θερμική διαστολή, αυτή η παραμόρφωση διαβιβάζεται στην αισθητήριο κεφαλή και συνεπώς στην κοιλότητα F-P, της οποίας το μήκος αλλάζει ανάλογα και μετριέται με ακρίβεια από τον ενισχυτή σήματος.



Σχήμα 1.8: Διάταξη ενός αισθητήρα παραμόρφωσης οπτικής ίνας τύπου Fabry-Perot.

Λόγω της γεωμετρίας του ο αισθητήρας είναι πρακτικά αναισθητος σε εγκάρσια παραμόρφωση ανιχνεύοντας μόνο την αξονική παραμόρφωση. Αυτό είναι ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των παραδοσιακών ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων.

Εξαιτίας της κατασκευής των δυο οπτικών ινών και του σωλήνα που περικλείονται αυτές (microcapillary) από γυαλί, ο αισθητήρας δεν επηρεάζεται από το φαινόμενο της θερμικής διαστολής. Η θερμική διαστολή των ινών αντισταθμίζεται πάντα από την θερμική διαστολή του σωλήνα. Το μόνο μέρος που δεν υπάρχει αντιστάθμιση της θερμικής διαστολής είναι η κοιλότητα F-P, που σημαίνει ότι μόνο λίγα μικρόμετρα δεν αντισταθμίζονται θερμικά. Σε σύγκριση με άλλους εμπορικούς αισθητήρες παραμορφώσεων όπως οι FBGs (Fiber Bragg Grating) που χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία, οι αισθητήρες παραμορφώσεων Fabry-Perot είναι τουλάχιστον μιας τάξης μεγέθους λιγότερο ευαίσθητοι στην θερμότητα.

1.3 Εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών στις κατασκευές (μετρήσεις παραμορφώσεων)

Στόχος της παρακολούθησης της ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM), είναι να εξασφαλίσει μεγαλύτερη ασφάλεια στην κατασκευή με το μικρότερο δυνατό κόστος. Τα συστήματα SHM είναι ικανά να αποτιμούν την δομική ακεραιότητα κατά την κατασκευή, αλλά και κατά τη διάρκεια λειτουργίας, επιτρέποντας έτσι τις έγκαιρες ενέργειες συντήρησης για την αύξηση της ασφάλειας και της ζωής των κατασκευών. Στα συστήματα αυτά είναι πολύ σημαντικό να αξιολογείται η πραγματική κατάσταση μιας κατασκευής. Με την ανάπτυξη των αισθητήρων οπτικών ινών τα τελευταία χρόνια μπορούν να μετρηθούν πολλά φυσικά μεγέθη. Τα εξαιρετικά τους χαρακτηριστικά, όπως η αντίσταση στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η ανθεκτικότητα αλλά και η ικανότητα να κατανέμονται πολλοί αισθητήρες σε μια οπτική ίνα, τους κάνουν ιδανικούς για τα SHM συστήματα[11].

Στο εδάφιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης σημαντικών και πρόσφατων εφαρμογών αισθητήρων οπτικών ινών για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται εφαρμογές οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό παραμορφώσεων (optical fiber strain sensors) και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τομέα που εφαρμόζονται.

Συστήματα Παρακολούθησης Γεφυρών

Οι γέφυρες είναι πολύπλοκες κατασκευές που αποτελούνται από πολλά στοιχεία και εξαρτήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καταπονούνται όταν εκτίθενται σε εξωτερικά φαινόμενα. Ένα επιτυχημένο πρόγραμμα παρακολούθησης μιας γέφυρας απαιτεί σωστό προγραμματισμό, σχεδιασμό και εκτέλεση. Για την πλήρη επίτευξη των στόχων ενός τέτοιου προγράμματος, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις ιδιαιτερότητες της κάθε γέφυρας. Τα συστήματα SHM επιτρέπουν την ταχύτατη αξιολόγηση της ακεραιότητας μιας γέφυρας και για την προσέγγιση αυτή έχουν αναγνωριστεί ως ένα από τα καλύτερα μέσα που υπάρχουν για την αύξηση της ασφάλειας και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας και της συντήρησης γεφυρών.

Οι κύριες λειτουργίες της παρακολούθησης είναι να εξασφαλιστεί η μακροζωία και η ασφάλεια των γεφυρών, καθώς και να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση τους. Στην πραγματικότητα η κακή λειτουργία των γεφυρών μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες και σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλέσει την απώλεια ανθρώπινων ζωών. Ακόμα όμως και αν δεν υπάρχει η απώλεια ζωής, υπάρχει μεγάλος αντίκτυπος στον πληθυσμό όταν η κατασκευή βρίσκεται εν μέρει ή πλήρως εκτός λειτουργίας. Ο οικονομικός αντίκτυπος της ανεπαρκούς κατασκευής δεν ερμηνεύεται μόνο σε κόστη ανοικοδόμησης, αλλά και σε απώλειες σε άλλους κλάδους της οικονομίας.

Το πρόγραμμα παρακολούθησης διαδραματίζει τεράστιο ρόλο κατά την φάση της κατασκευής, επιτρέποντας την επαλήθευση των σχεδιαστικών υποθέσεων και της πορείας της κατασκευής. Αυτή η έγκαιρη ενημέρωση, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επιταχύνει τους ρυθμούς κατασκευής, καθώς επίσης και να αυξήσει την συνολική ποιότητα μιας γέφυρας. Μαθαίνοντας πώς συμπεριφέρεται μια γέφυρα κάτω από πραγματικές συνθήκες στο φυσικό της περιβάλλον, μπορεί να βοηθήσει τους σχεδιαστές να δημιουργήσουν καλύτερες δομές στο μέλλον. Τα περισσότερα ελαττώματα ξεκινούν κατά την διάρκεια της κατασκευής και η ανίχνευση των συνεχιζόμενων ατελειών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αποκλίσεων από τον αρχικό σχεδιασμό. Η παρακολούθηση δίνει επίσης μια ακριβή αξιολόγηση των επιδόσεων των νέων υλικών και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται

στην κατασκευή της γέφυρας αλλά και στην επιδιόρθωσή της. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται εύκολα με τους αισθητήρες οπτικών ινών καθώς αυτοί ενσωματώνονται αποτελεσματικά σε νέα υλικά όπως τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες. Επιπλέον, προσαρμόζονται τέλεια για την μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της συμπεριφοράς των γεφυρών αλλά και για μικρής διάρκειας παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεφυρών κάτω από κυκλοφοριακή φόρτιση.

Η εταιρία SMARTEC SA τα τελευταία χρόνια έχει χρησιμοποιήσει τους αισθητήρες οπτικών ινών για την παρακολούθηση της ακεραιότητας περισσότερων από 40 γεφυρών σε όλο τον πλανήτη [12]. Περίπου οι μισές είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς είναι και το πιο διαδεδομένο είδος γεφυρών, ενώ οι υπόλοιπες είναι με δοκούς, τοξοειδείς, κρεμαστές κ.α. Αυτό αποδεικνύει, ότι η παρακολούθηση μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε οποιοδήποτε είδος γέφυρας. Οι περισσότερες εφαρμογές έγιναν σε γέφυρες που ήταν υπό κατασκευή, ενώ οι υπόλοιπες σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές ή κατασκευές που επιδιορθώνονταν. Ο σκοπός των παρακολουθήσεων ήταν ο έλεγχος της κατάστασης γεφυρών με γνωστά προβλήματα για την αύξηση της διάρκειας ζωής τους, να παρέχουν πληροφορίες σε πρώτο χρόνο για την πορεία της κατασκευής, αλλά κυρίως να αντλούν πληροφορίες για την δομική συμπεριφορά για επιβεβαίωση των σχεδιαστικών υποθέσεων. Οι περισσότερες εφαρμογές αφορούσαν την τοποθέτηση μικρού αριθμού αισθητήρων (20 ή και λιγότεροι), ενώ μερικές χρησιμοποίησαν περισσότερους από 100. Οι θέσεις που τοποθετήθηκαν ήταν κυρίως στα στοιχεία της κατασκευής που παραλάμβαναν φορτία, όπως τα τόξα, τα δοκάρια και τα καλώδια. Το κόστος τοποθέτησης και παρακολούθησης κυμαινόταν από \$50k έως \$500k ή και παραπάνω, ανάλογα με τον αριθμό των αισθητήρων αλλά και τη διάρκεια παρακολούθησης (μικρή, μεγάλη ή μόνιμη).

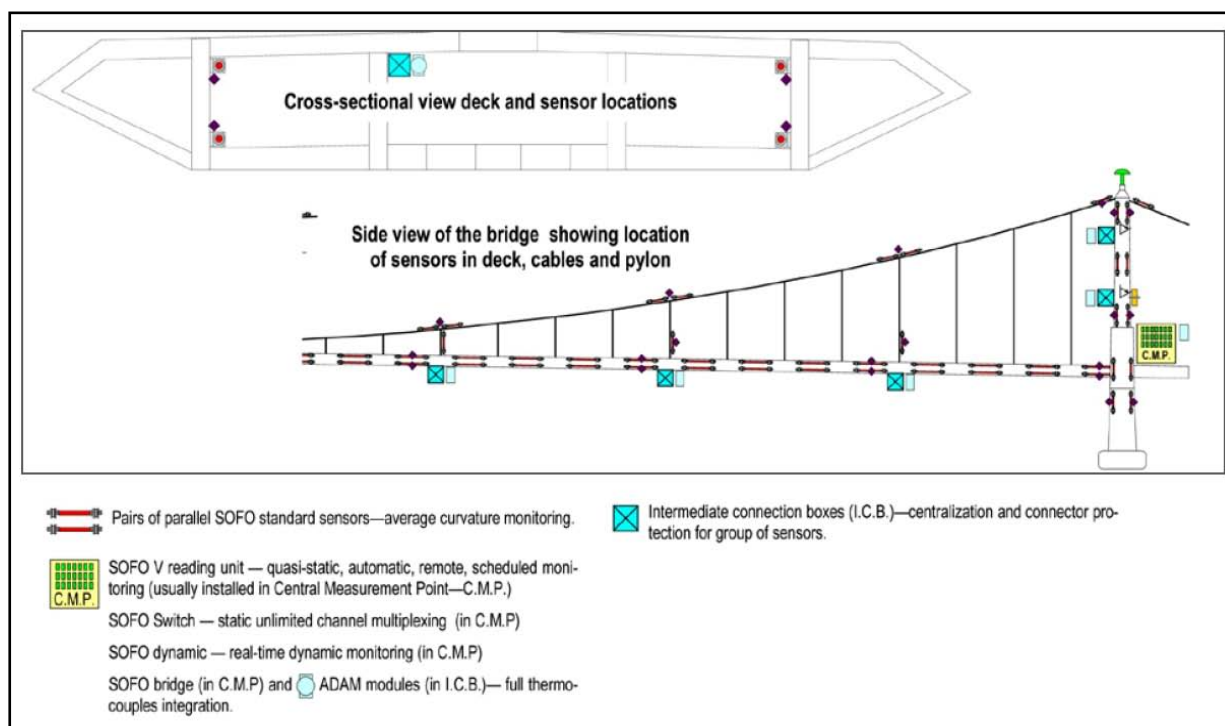
Τα παραδείγματα εφαρμογών αισθητήρων οπτικών ινών σε γέφυρες είναι πάρα πολλά. Μερικά από αυτά είναι η καλωδιωτή γέφυρα στο λιμάνι της Βενετίας [13], η γέφυρα Île-d'Orléans στο Κεμπέκ [14], η γέφυρα Versoix κοντά στην Γενεύη [15] και η κρεμαστή γέφυρα του Μανχάταν στην Νέα Υόρκη (βλ. Εικόνα 1.1) [11].



Εικόνα 1.1: Η γέφυρα του Μανχάταν στην Νέα Υόρκη.

Η τελευταία δόθηκε στην κυκλοφορία πριν από 102 χρόνια, στις 31 Δεκεμβρίου του 1909, έχει μήκος 2.089m και συνδέει την περιοχή του Μπρούκλιν με το Μανχάταν. Στόχος ήταν η παρακολούθηση της, εξέλιξης της διάβρωσής της και γι' αυτό έπρεπε να αποκτηθούν δεδομένα για τις παραμορφώσεις, τις μετατοπίσεις και τις θερμοκρασίες του κύριου καλωδίου της γέφυρας. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιούνταν για να εκτιμηθεί η πιθανότητα αστοχίας του καλωδίου. Έτσι, εγκαταστάθηκαν 4 αισθητήρες τύπου SOFO μήκους 6 μέτρων στο κύριο καλώδιο και στον σκελετό του οδοστρώματος και άλλοι 2 αισθητήρες παραμορφώσεων τύπου FBG, που είχαν ευαισθησία και στην θερμοκρασία, στον πυλώνα και σε ένα δευτερεύον καλώδιο. Με τους αισθητήρες αυτούς ήταν δυνατή η

καταγραφή των παραμορφώσεων στα σημεία που αναφέρθηκαν, ανάλογα με τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, την ώρα της ημέρας, τις εποχές του χρόνου και τις κυκλοφοριακές συνθήκες.



Σχήμα 1.9: Θέσεις αισθητήρων οπτικών ινών στη γέφυρα του Μανχάταν,[16].

Συστήματα Παρακολούθησης Κτιρίων

Τα πολυώροφα κτίρια, τα στάδια και τα ιστορικά μνημεία είναι πολύπλοκες κατασκευές που καταπονούνται από τα εξωτερικά φαινόμενα στα οποία εκτίθενται. Τα κτίρια ποικίλουν στο μέγεθος, την γεωμετρία, τα δομικά στοιχεία, τα υλικά κατασκευής και τον τρόπο θεμελίωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζουν την συμπεριφορά ενός κτιρίου, όταν αυτό υπερφορτώνεται ή όταν καταπονείται από φυσικά φαινόμενα.

Τα ιστορικά μνημεία χτίστηκαν πολλά χρόνια πριν, χρησιμοποιώντας παλιές τεχνικές και εκτέθηκαν για αρκετό διάστημα σε περιβαλλοντικές συνθήκες με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται διαφορετικά στις καταπονήσεις. Χωρίς την κατάλληλη διαχείριση, ένα ιστορικό μνημείο μπορεί εν μέρει ή εξ ολοκλήρου να καταρρεύσει και να προκύψουν όχι μόνο θέματα ασφάλειας και οικονομίας, αλλά και μια μη αναστρέψιμη πολιτιστική απώλεια.

Η παρακολούθηση της ακεραιότητας ενός κτιρίου επιτρέπει την γρήγορη αξιολόγηση της αρτιότητας της κατασκευής. Η προσέγγιση αυτή έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα καλύτερα μέσα που υπάρχουν για την αύξηση της ασφάλειας και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός κτιρίου. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τα προγράμματα παρακολούθησης επιτρέπουν στους ιδιοκτήτες να βελτιώσουν τη λειτουργία, τη συντήρηση, την επισκευή και την αντικατάσταση των δομών, βασιζόμενοι σε αξιόπιστα και αντικειμενικά δεδομένα.

Η παρακολούθηση της ακεραιότητας παρέχει αξιόπιστα στοιχεία για την πραγματική κατάσταση μιας δομής, παρατηρεί την εξέλιξη της και ανιχνεύει την εμφάνιση νέων ατελειών. Το σκυρόδεμα μπορεί να ραγίσει, ενώ ο χάλυβας μπορεί να οξειδωθεί και να σπάσει λόγω κόπωσης. Η υποβάθμιση των υλικών μπορεί να οφείλεται σε μηχανικούς

παράγοντες (υψηλότερη φόρτιση από την θεωρητικά υπολογισμένη) ή σε φυσικοχημικούς παράγοντες (διάβρωση του χάλυβα, διείσδυση των αλάτων και των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, πάγωμα του σκυροδέματος, κ.λπ.). Η εικόνα της τρέχουσας κατάστασης και της εξέλιξης ενός κτιρίου σε πραγματικό χρόνο μπορεί να επιτευχθεί με την μόνιμη εγκατάσταση αισθητήρων και τη συνεχή μέτρηση των σχετικών παραμέτρων.

Τον Σεπτέμβριο του 2000 στην Σιγκαπούρη, κατασκευάστηκε ίσως το μεγαλύτερο σύστημα παρακολούθησης της ακεραιότητας ενός συγκροτήματος πολυώροφων κτιρίων [17]. Τοποθετήθηκαν συνολικά πάνω από 2000 αισθητήρες οπτικών ινών στους σκελετούς των κτιρίων κατά την διάρκεια της κατασκευής τους. Το πρότζεκτ αυτό είχε σαν στόχο την διεύρυνση της γνώσης σχετικά με την πραγματική δομική συμπεριφορά, τον έλεγχο της διαδικασίας κατασκευής, την αύξηση της ασφάλειας κατά την διάρκεια ζωής των κατασκευών, την ενίσχυση των δραστηριοτήτων συντήρησης, καθώς και την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης μετά από διάφορα γεγονότα, όπως οι σεισμοί, οι απρόσμενες καιρικές συνθήκες κ.α.



Εικόνα 1.2: Συγκρότημα κτιρίων στην Σιγκαπούρη με εγκατεστημένο σύστημα SHM.

Το Εθνικό Κέντρο Υγρού Στίβου στην Κίνα, γνωστό και ως «Water Cube», κατασκευάστηκε για τους Θερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες του 2008. Στην κατασκευή ενσωματώθηκε ένα σύστημα SHM που περιελάμβανε μεταξύ άλλων, 230 αισθητήρες παραμορφώσεων και 30 αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου FBG [18]. Μεταξύ των παραμορφώσεων που καταγράφηκαν, ήταν και παραμορφώσεις που είχαν άμεση σχέση με την θερμοκρασία και το χιόνι (temperature-induced, snow-induced strains). Τα δεδομένα έδειξαν ότι οι παραμορφώσεις που προκαλούνταν από την θερμοκρασία ήταν αρκετά μεγάλες, ενώ οι παραμορφώσεις της κατασκευής που προκαλούνταν από πολύ βαρύ χιόνι, ήταν σχετικά μικρές.



Εικόνα 1.3: Το Εθνικό Κέντρο Υγρού Στίβου στην Κίνα με ενσωματωμένο σύστημα SHM.

Ένα παράδειγμα ιστορικού μνημείου στο οποίο εγκαταστάθηκε σύστημα παρακολούθησης της ακεραιότητας του, είναι ο καθεδρικός ναός Riga's Dome στην Λετονία. Χτίστηκε το 1211 και θεωρείται η μεγαλύτερη μεσαιωνική εκκλησία στα κράτη της Βαλτικής. Κατά την διάρκεια του 2005 και του 2006 πραγματοποιήθηκαν έργα αποκατάστασης στον ναό. Για να καταστεί δυνατή η αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς του ναού κατά την διάρκεια των διαφόρων φάσεων της αποκατάστασης, καθώς και η πρόγνωση πιθανής διάδοσης ρωγμών στην αρχική δομή, εγκαταστάθηκε ένα μόνιμο σύστημα 24 αισθητήρων οπτικών ινών τύπου SOFO[19]. Παράλληλα εγκαταστάθηκαν και αισθητήρες θερμότητας για τον εσωτερικό και εξωτερικό έλεγχο της θερμοκρασίας. Οι παρακολουθήσεις από το 2005 έδειξαν αυξομειώσεις στο πάχος ήδη υπάρχουσών ρωγμών στο εσωτερικό του ναού, της τάξης των 1-2 mm τον χρόνο, ανάλογα την εποχή.



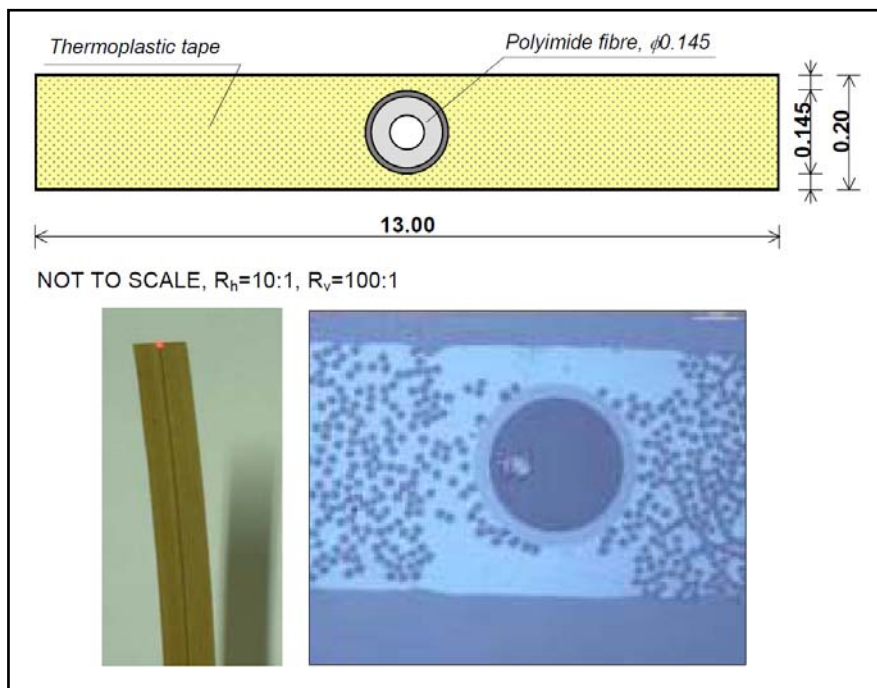
Εικόνα 1.4: Η εκκλησία *Riga's Dome* στην Λετονία όπου εγκαταστάθηκε το σύστημα SHM.

Συστήματα Παρακολούθησης Αγωγών

Η διαχείριση των αγωγών παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις που είναι μοναδικές. Το μεγάλο μήκος τους, η μεγάλη τους αξία, ο υψηλός κίνδυνος και συχνά οι δύσκολες συνθήκες πρόσβασης, απαιτούν συνεχή παρακολούθηση καθώς και βελτιστοποίηση των παρεμβάσεων

συντήρησης. Η κύρια ανησυχία για τους ιδιοκτήτες αγωγών προέρχεται από πιθανές διαρροές, που μπορεί να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και να θέσουν τον αγωγό εκτός λειτουργίας για επισκευή. Οι διαρροές μπορεί να έχουν διάφορες αιτίες, όπως οι υπερβολικές παραμορφώσεις που προκαλούνται από κατολισθήσεις, σεισμούς ή συγκρούσεις κινητών αντικειμένων, από διάβρωση, φθορά, ρωγμές του υλικού ή από την εισχώρηση ξένων σωμάτων.

Στην Ιταλία σε έναν θαμμένο αγωγό φυσικού αερίου 35 ετών και μήκους 500 μέτρων, τοποθετήθηκε ένα καταμετρημένο σύστημα παρακολούθησης για τον υπολογισμό παραμορφώσεων [20]. Παλαιότερα είχαν εγκατασταθεί 3 συμμετρικά καλώδια για την καταγραφή δονήσεων σε κάποια τμήματα του αγωγού μήκους 50 και 100 m που θεωρούνταν τα περισσότερο καταπονημένα σύμφωνα με μια τεχνική μελέτη. Οι αισθητήρες αυτοί ήταν αρκετά βοηθητικοί, αλλά δεν μπορούσαν να καλύψουν όλο το μήκος του αγωγού, παρέχοντας μόνο τοπικές μετρήσεις. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά είδη καταμετρημένων αισθητήρων τύπου SMARTape που είναι ουσιαστικά μια θερμοπλαστική ταινία μέσα στην οποία βρίσκεται ενσωματωμένη μια οπτική ίνα (βλ. Σχήμα 1.10). Ο τύπος αυτών των αισθητήρων έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και χημικές αντοχές, προσφέροντας τέλεια συγκόλληση μεταξύ της οπτικής ίνας και του αγωγού. Έτσι, εγκαταστάθηκαν τρεις παράλληλες γραμμές αποτελούμενες από 5 τμήματα αισθητήρων SMARTape σε όλο το μήκος του αγωγού. Τα μήκη των τμημάτων κυμαίνονταν από 71 m έως 132 m, και οι αισθητήρες ήταν τοποθετημένοι σε διεύθυνση 0° , 120° και -120° ως προς τον άξονα του αγωγού.



Σχήμα 1.10: Τομή και μικρογραφία της αισθητήριας ταινίας (SMARTape).

Οι αισθητήρες της ταινίας SMARTape παρέχουν δεδομένα για τις μέσες παραμορφώσεις, τις μέσες καμπυλότητες και για την μετατόπιση της θέσης του αγωγού, ανά 0.25 m.



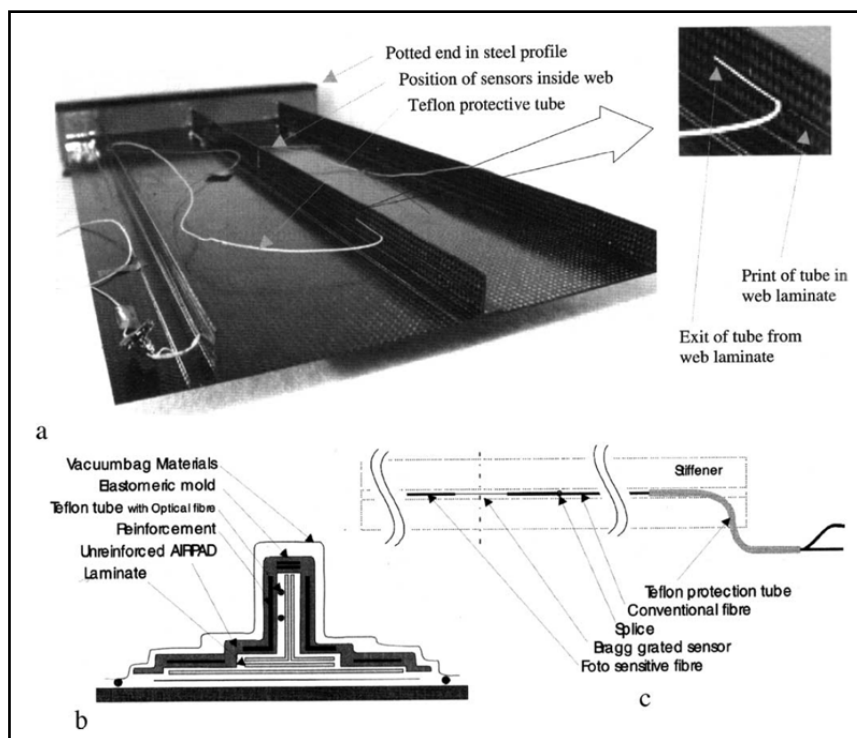
Εικόνα 1.5: Τοποθέτηση SMARTape στον αγωγό φυσικού αερίου.

Συστήματα Παρακολούθησης στην Αεροδιαστημική και στην Άμυνα

Αυτό το τμήμα της αγοράς περιλαμβάνει τόσο τους στρατιωτικούς, όσο και τους αεροδιαστημικούς τομείς. Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάπτυξη, τον έλεγχο και την δοκιμή συστημάτων πρόωσης και συσκευών ανίχνευσης, καθώς και στον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας αεροσκαφών σε κρίσιμα σημεία, όπως είναι οι πτέρυγες, η άτρακτος το κάθετο ουραίο, κ.α.

Τα μέλη της Ένωσης Ευρωπαϊκών Ερευνητικών Ιδρυμάτων στην Αεροναυπηγική (EREA, European Research Establishments in Aeronautics) ασχολούνται από τις αρχές του 90' με την έρευνα και την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης της ακεραιότητας των κατασκευών με την χρήση οπτικών ινών [21]. Πέρα από τα προγράμματα που απασχολούν κάθε μέλος ξεχωριστά, υπήρχε και ένα πρόγραμμα με την ονομασία AHMOS (Active Health Monitoring Systems) στο οποίο συνεργάστηκαν τα περισσότερα μέλη. Το πρότζεκτ αυτό επιδίωκε την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης της ακεραιότητας μεγάλης κλίμακας δομών, με στόχο την μείωση του κόστους ιδιοκτησίας στρατιωτικών αεροσκαφών, ελατώνοντας το κόστος επιθεώρησης και συντήρησης τους και αυξάνοντας την διάρκεια ζωής τους. Το πρόγραμμα αυτό ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2000 και διήρκησε 3 χρόνια με συνολικό προϋπολογισμό 9.5 εκατ. Ευρώ.

Το ίδρυμα INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) στην Ισπανία και μέλος της EREA ασχολείται από το 1999 με την ενσωμάτωση αισθητήρων οπτικών ινών σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Τα κύρια ενδιαφέροντα του ήταν, η ανάπτυξη αξιόπιστων τεχνολογιών για την ενσωμάτωση οπτικών ινών σε κατασκευές από σύνθετα υλικά χωρίς να καταστρέφονται οι αισθητήρες, η αξιολόγηση του συστήματος παρακολούθησης και η μηχανική του συμπεριφορά σε υπηρεσιακές συνθήκες, καθώς και η επικύρωση του συστήματος αισθητήρων οπτικών ινών ως εναλλακτικό σύστημα παρακολούθησης από εκείνο των συμβατικών ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων. Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται ένα πάνελ κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά με ενσωματωμένους αισθητήρες οπτικών ινών τύπου FBG, το οποίο κατασκευάστηκε από το INTA.



Σχήμα 1.11: a) Πάνελ CFRP με ενσωματωμένους 2 αισθητήρες FBG σε κάθε stiffener, b) λεπτομέρειες από την ενσωμάτωση των ινών και, c) οι θέσεις τους μέσα στο καλούπι.

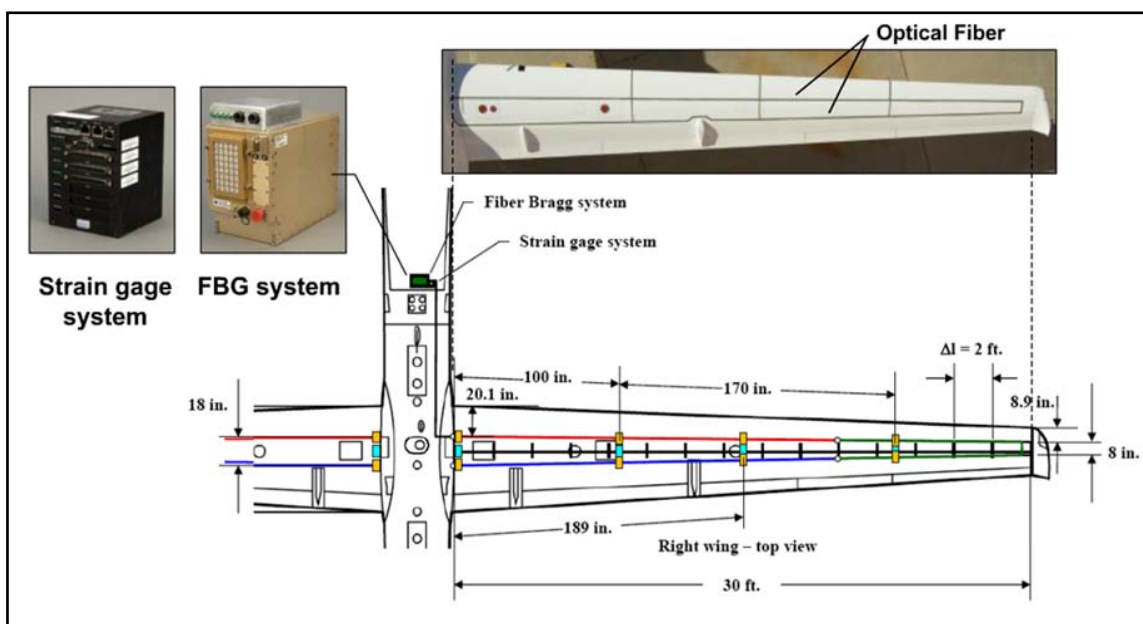
Μια άλλη σπουδαία εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε το 2008, είναι η εγκατάσταση αισθητήρων οπτικών ινών στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος με την ονομασία *Ikhana*. Το αεροσκάφος αυτό κατασκευάστηκε από την NASA και χρησιμοποιείται στην καταπολέμηση πυρκαγιών, στέλνοντας φωτογραφικό υλικό από τα μέτωπα πυρκαγιών στις αρμόδιες υπηρεσίες. Εκτός αυτού, το *Ikhana* χρησιμοποιείται και για την αξιολόγηση της προηγμένης τεχνολογίας ανίχνευσης που έχει εγκατασταθεί στα φτερά του[22].



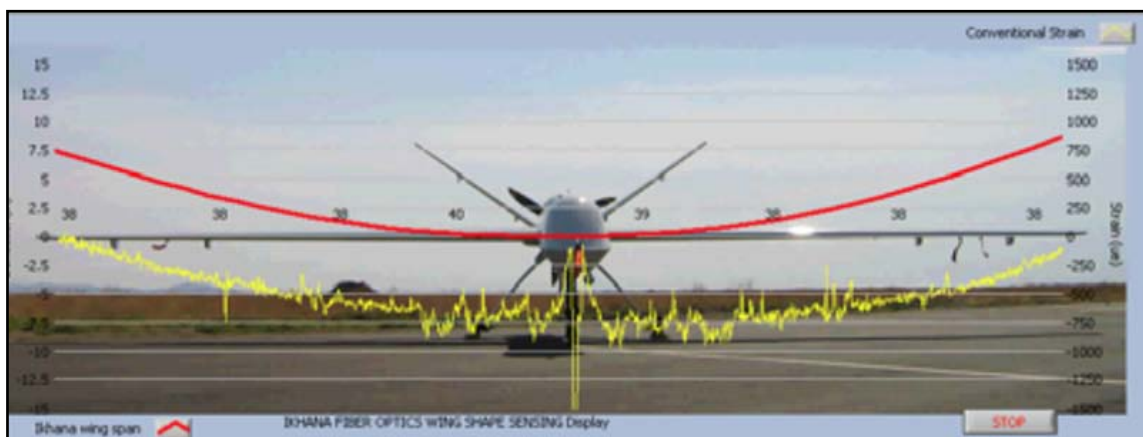
Εικόνα 1.6: Φωτογραφία του μη επανδρωμένου αεροσκάφους *Ikhana*.

Σε κάθε πτέρυγα του αεροσκάφους τοποθετήθηκαν 1440 αισθητήρες παραμορφώσεων, τύπου FBG. Στόχος της τοποθέτησης τους ήταν η αξιολόγηση των πραγματικών φορτίων που παραλαμβάνουν οι πτέρυγες κατά την πτήση, η επαλήθευση των μαθηματικών μοντέλων και των σχεδιαστικών εργαλείων των οπτικών ινών, καθώς και αξιολόγηση προσαρμογής του σχήματος της πτέρυγας. Εάν το σχήμα της πτέρυγας μπορούσε να αλλάξει κατά την πτήση, τότε η αποτελεσματικότητα και η απόδοση του αεροσκάφους θα μπορούσε να βελτιωθεί, από την απογείωση και την προσγείωση μέχρι την κανονική πτήση και τους ελιγμούς.

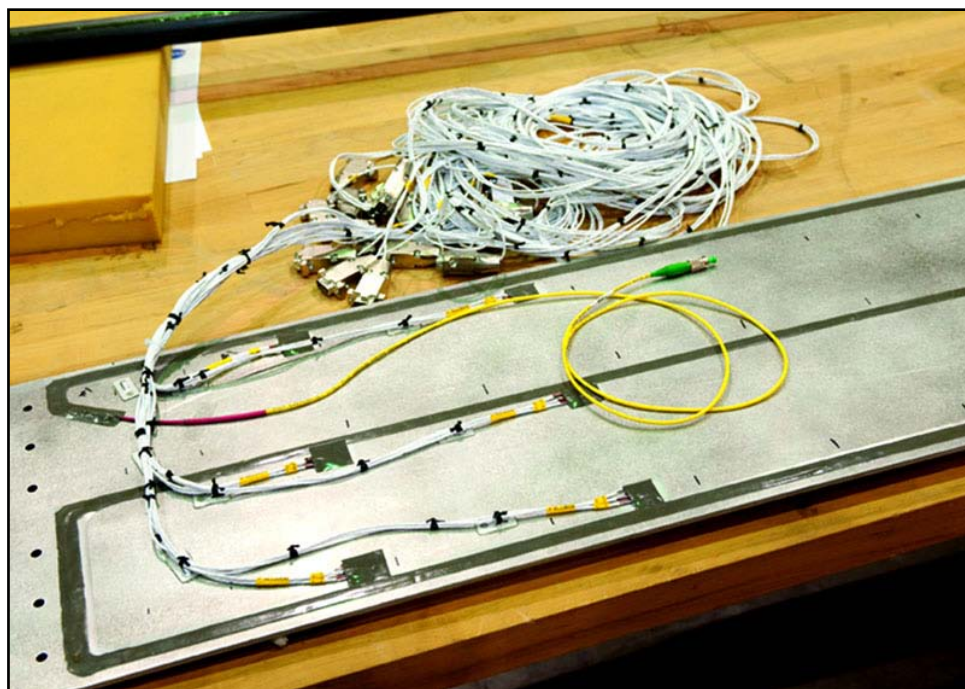
Εγκαταστάθηκαν πάνω στις πτέρυγες 6 οπτικές ίνες με συνολικό αριθμό 2880 αισθητήρων, καθώς και 16 ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα για την επαλήθευση των μετρήσεων (βλ. Σχήμα 1.12). Το βάρος του συστήματος παρακολούθησης των αισθητήρων οπτικών ινών δεν ξεπερνούσε το 1 Kg και ήταν κατά πολύ μικρότερο από ένα σύστημα που είχε εγκατασταθεί παλαιότερα με συμβατικά ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα. Έτσι επήλθε μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων αλλά και αύξηση της εμβέλειας του αεροσκάφους.



Σχήμα 1.12: Θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων στις πτέρυγες του αεροσκάφους *Ikhana*.



Σχήμα 1.13: Καταγραφή παραμορφώσεων κατά το μήκος των πτερύγων.



Εικόνα 1.7: Η οπτική ίνα (κίτρινου χρώματος) αντικατέστησε όλα τα υπόλοιπα καλώδια (άσπρου χρώματος).

Συστήματα Παρακολούθησης στην Ναυπηγική

Τα συστήματα παρακολούθησης στα πλοία επιτρέπουν την γρήγορη εκτίμηση της κατάστασης τους. Τα δεδομένα που προκύπτουν από το πρόγραμμα παρακολούθησης, χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της φόρτωσης και εκφόρτωσης, της συντήρησης, της επισκευής και της αντικατάστασης της κατασκευής. Η ανίχνευση ελαττωμάτων στο σκαρί ενός πλοίου ή σε άλλα κρίσιμα σημεία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διακρίνει τυχόν αποκλίσεις από τον αρχικό σχεδιασμό. Η διάγνωση του σκάφους σε πραγματικό χρόνο σημαίνει αύξηση της ασφάλειας για τους επιβάτες και τα φορτία.

Ένα παράδειγμα πλοίου με εγκατεστημένο σύστημα παρακολούθησης είναι το πετρελαιοφόρο Four Island (περίπου 100.000 DWT), στο οποίο έχουν τοποθετηθεί 48 οπτικές ίνες τύπου SmartProfile Must [23]. Πρόκειται για αισθητήρες που κατασκευάστηκαν ειδικά για την εφαρμογή αυτή, η οποία αποτελεί και το πρώτο σύστημα παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκε σε ένα λειτουργικό πλοίο αυτού του μεγέθους. Κύριος στόχος της παρακολούθησης ήταν η διάγνωση σε πραγματικό χρόνο της συμπεριφοράς του πλοίου, με ιδιαίτερη έμφαση σε κρίσιμα σημεία και τομείς του σκελετού. Γι' αυτό, τοποθετήθηκαν κατώτατα όρια προειδοποίησης και συναγερμού σύμφωνα με τις κρίσιμες τιμές παραμόρφωσης.

Τα στοιχεία που εξήχθησαν από το σύστημα παρακολούθησης, χρησιμοποιήθηκαν για την διασταύρωση του κατασκευαστικού μοντέλου του πλοίου (FEM, Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων), καθώς και για την αξιολόγηση των κύκλων κόπωσης που προκαλούνται από τα κύματα και τις ταλαντώσεις. Τέλος, με το σύστημα οπτικών ινών αποφεύχθηκε και ο κίνδυνος έκρηξης λόγω βραχυκυκλώματος, αφού αυτό λειτουργεί με οπτικό σήμα και όχι με ηλεκτρικό.



Εικόνα 1.8: Το πετρελαιοφόρο *Four Island* στο οποίο εγκαταστάθηκε το σύστημα παρακολούθησης.

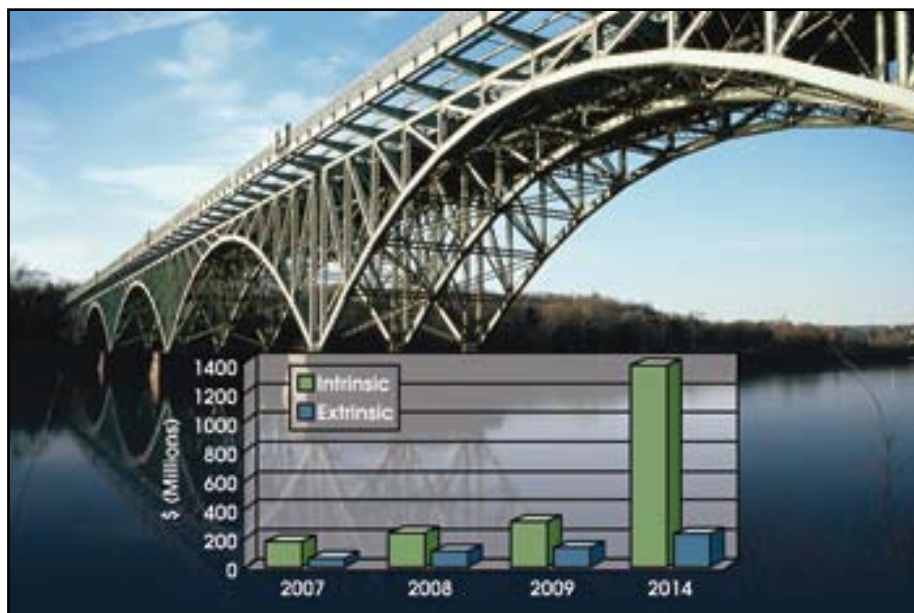
Συστήματα Παρακολούθησης σε άλλους τομείς

Οι εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών είναι πραγματικά αμέτρητες αν αναλογιστούμε τον αριθμό των τομέων που αυτοί χρησιμοποιούνται. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά μερικοί από αυτούς τους τομείς:

- Εξόρυξη (πχ. παραμόρφωση εδάφους)
- Ενέργεια (πχ. παραμορφώσεις πτερύγων ανεμογεννητριών [24])
- Κατασκευή τούνελ
- Φράγματα – αναχώματα
- Πυρηνικοί Σταθμοί
- Χημικά Εργοστάσια
- Έρευνα
- Ύδρευση

Η αγορά των οπτικών αισθητήρων

Το 2007 η αγορά των εσωτερικών οπτικών αισθητήρων (intrinsic) είχε αξία \$170 εκατ. και ήταν μεγαλύτερη από αυτή των εξωτερικών αισθητήρων (extrinsic) [25]. Με ετήσια αύξηση της τάξης του 35%, η αξία της αγοράς των εσωτερικών αισθητήρων αναμένεται να σημειώσει αύξηση που θα αγγίξει τα \$1.4 δις, μέχρι το 2014. Το κομμάτι των εξωτερικών αισθητήρων προβλέπεται ότι θα αυξηθεί σε αξία από \$65 εκατ. το 2007, σε \$219 εκατ. το 2014 με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 12% (βλ. Σχήμα 1.14) και όλα αυτά μόνο για την αγορά των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.



Σχήμα 1.14: Η αξία της αγοράς αισθητήρων οπτικών ινών, ανάλογα με τον τύπο, στις ΗΠΑ.

1.4 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η εξοικείωση με την χρήση αισθητήρων οπτικών ινών, μέσω τριών πειραματικών εφαρμογών. Ο τρόπος χρήσης, καθώς και ο τρόπος τοποθέτησης του συγκεκριμένου τύπου αισθητήρων ήταν μέχρι πρότινος άγνωστος, καθότι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε μια απλή εφαρμογή εφελκυσμού ενός δοκιμίου χάλυβα, ούτως ώστε να αναπτυχθεί η τεχνογνωσία γύρω από την τοποθέτηση και την χρήση τους και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σε δυο πιο πολύπλοκες εφαρμογές. Πέρα όμως από την ορθή χρήση των αισθητήρων, κύριος στόχος ήταν και η αξιολόγηση της ορθότητας των μετρήσεων τους. Γι' αυτό τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές εφαρμογές επαληθεύτηκαν και με την βοήθεια μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών των αισθητήρων οπτικών ινών καθώς και μια παρουσίαση πρόσφατων εφαρμογών με στόχο την ενημέρωση του αναγνώστη για την αρχή λειτουργίας τους και τη σημασία της χρήσης τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των παραμορφώσεων από τις οπτικές ίνες. Τέλος, στα επόμενα τρία κεφάλαια αναλύεται κάθε μια εφαρμογή χωριστά, και παρουσιάζονται με τον ίδιο τρόπο, ούτως ώστε να κατανοούνται χωρίς δυσκολία από τον αναγνώστη όλα τα στάδια σχεδιασμού, κατασκευής και μελέτης κάθε πειράματος.

Κεφάλαιο 2

Εξοπλισμός Αισθητήρων Οπτικών Ινών

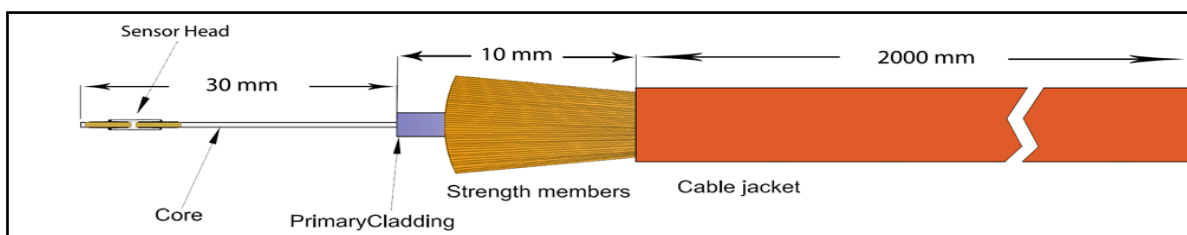
2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των παραμορφώσεων από τους αισθητήρες οπτικών ινών, για τις τρεις εφαρμογές που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Αρχικά, αναλύονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αισθητήρων οπτικών ινών και έπειτα γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των συσκευών πρόσκτησης δεδομένων καθώς και του λογισμικού προγράμματος απεικόνισης και αποθήκευσης των μετρήσεων.

2.2 Εξοπλισμός

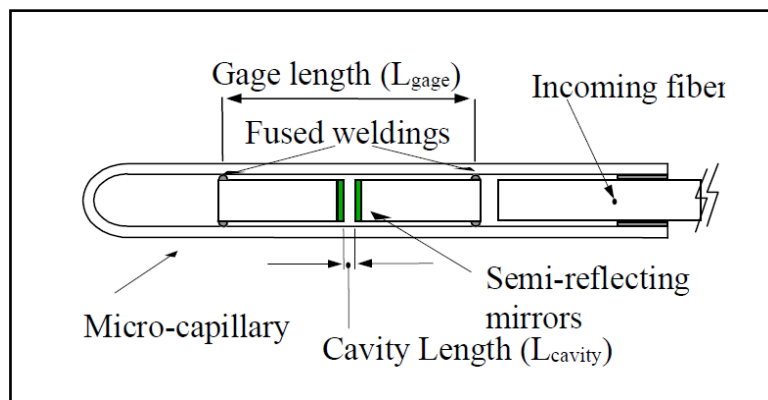
Αισθητήρες οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκαν και στις τρεις πειραματικές εφαρμογές ήταν εξωτερικοί αισθητήρες (extrinsic) τύπου Fabry-Perot (EFPI). Πρόκειται για σημειακούς αισθητήρες υπολογισμού παραμορφώσεων τύπου FOS-N (Fiber Optic Sensor – Non Temperature compensated) της εταιρίας FISO Technologies. Το εύρος καταγραφής τους είναι τα $\pm 5000\mu\epsilon$ και αντέχουν σε θερμοκρασίες από -40°C έως 250°C . Το καλώδιο της οπτικής ίνας (πορτοκαλί επένδυση) έχει μήκος 2 m, πάχος 3 ± 0.2 mm και είναι κατασκευασμένο από πολυουρεθάνη. Εσωτερικά του καλωδίου, υπάρχουν ενισχυτικές ίνες από Kevlar και η επικάλυψη του πυρήνα (μπλε επικάλυψη), πάχους 0.88mm. Η οπτική ίνα (πυρήνας) είναι πολύτροπη (multimode), με πάχος $230\mu\text{m}$ (± 10). Η επικάλυψη του πυρήνα εξέρχεται 10mm εξωτερικά του καλωδίου, ενώ ο πυρήνας της οπτικής ίνας εξέρχεται από την επικάλυψη 30mm, μαζί με το μήκος της αισθητήριας κεφαλής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



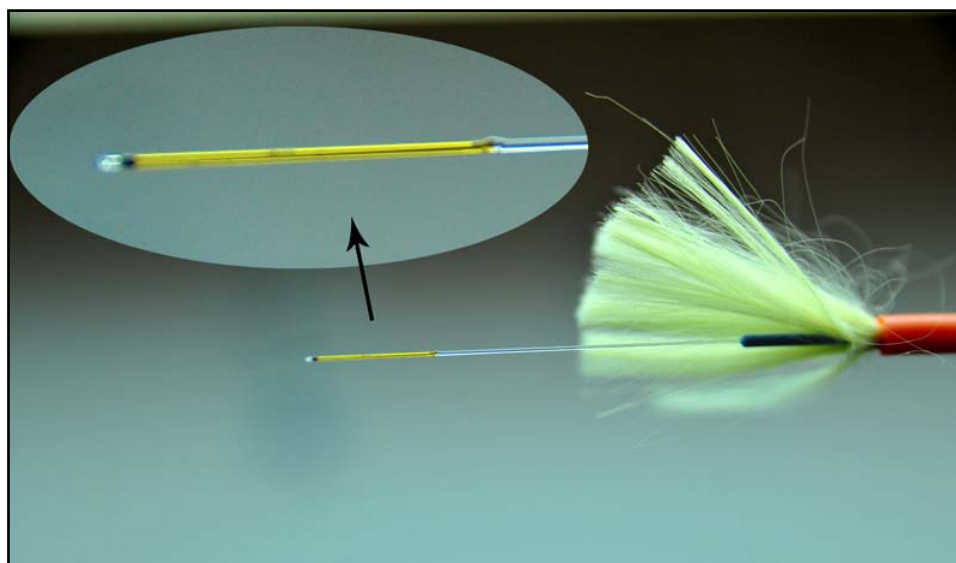
Σχήμα 2.1: Εξωτερικός αισθητήρας οπτικής ίνας τύπου Fabry-Perot.

Η αισθητήριος κεφαλή του είναι κατασκευασμένη από γυαλί και έχει πάχος 310 μ m. Το μήκος αναφοράς της (gage length) είναι περίπου 1 mm και είναι διαφορετικό για κάθε αισθητήρα. Στο μήκος αυτό υπάρχει μια κοιλότητα αέρα (F-P cavity), που ορίζει την απόσταση μεταξύ δυο επιπέδων και ημιανακλώμενων καθρεπτών (βλ. Σχήμα 2.2). Η απόσταση αυτή μεταβάλλεται ανάλογα τις συνθήκες, στέλνοντας μετρήσεις στην συσκευή ανάγνωσης, όπου και μεταφράζονται σε τιμές παραμόρφωσης. Κάθε οπτική ίνα αναγράφει στην συσκευασία της το ακριβές μήκος αναφοράς του αισθητήρα της, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αναλυτικούς υπολογισμούς των παραμορφώσεων με την χρήση τύπων που προτείνει ο κατασκευαστής.



Σχήμα 2.2: Η αισθητήριος κεφαλή F-P της οπτικής ίνας.

Ο αισθητήρας μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στις επιφάνειες διάφορων υλικών, όπως είναι ο χάλυβας, το τσιμέντο και τα σύνθετα υλικά, χρησιμοποιώντας κατάλληλο κολλητικό μέσο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλης ακριβείας και διάρκειας μετρήσεις παραμορφώσεων, αλλά και να συνδεθεί με οποιαδήποτε συσκευή καταγραφής που μπορεί να κάνει μετατροπή των μετρούμενων μονάδων σε με (microstrains). Οι αισθητήρες οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 2.1.

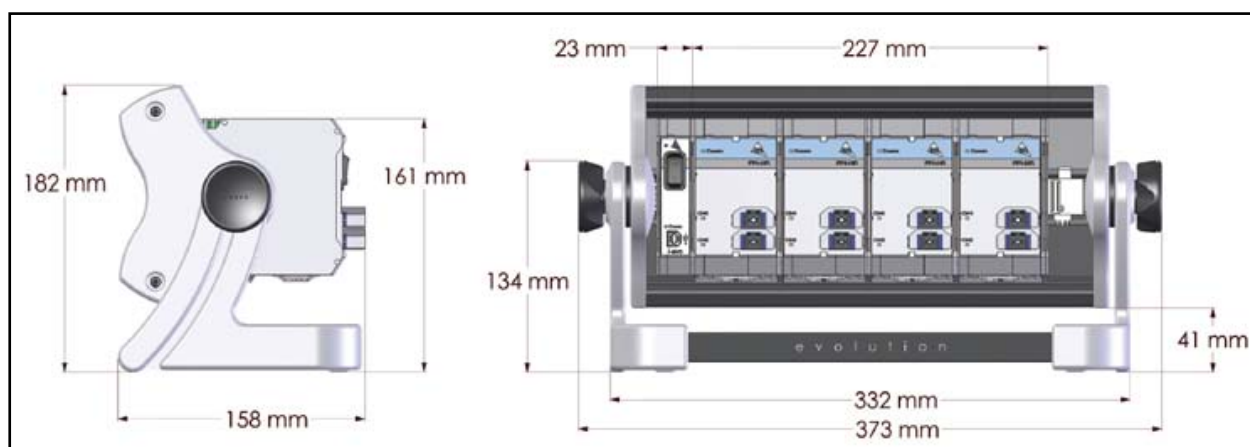


Εικόνα 2.1: Η οπτική ίνα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα με λεπτομέρεια στην αισθητήριο κεφαλή της.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι ο χειρισμός των αισθητήρων οπτικών ινών πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή λόγω της μεγάλης ευαισθησίας τους. Πρέπει να αποφεύγεται η απότομη κάμψη της ίνας ή το τρίψιμο πάνω σε σκληρές επιφάνειες και πρέπει να χρησιμοποιείται πάντα το προστατευτικό καπάκι της, όταν αυτή δεν είναι συνδεδεμένη με τον ενισχυτή σήματος.

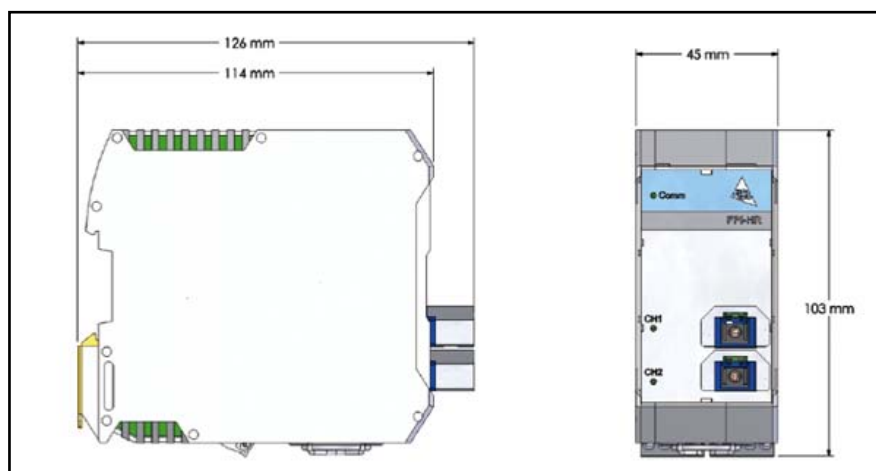
Evolution Chassis

Η συσκευή πρόσκτησης δεδομένων (data acquisition system) που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Evolution Chassis SD-5 της εταιρίας FISO Technologies (βλ. Σχήμα 2.3)[26]. Πρόκειται ουσιαστικά για μια βάση στην οποία τοποθετούνται εξαρτήματα (modules) που έχουν τον ρόλο του ενισχυτή σήματος αλλά και του οπτικού αναλυτή φάσματος των οπτικών ινών. Η βάση μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 5 modules (η συγκεκριμένη είχε τέσσερα) και συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω θύρας usb τροφοδοτούμενης με συνεχές ρεύμα 24V / 70W.



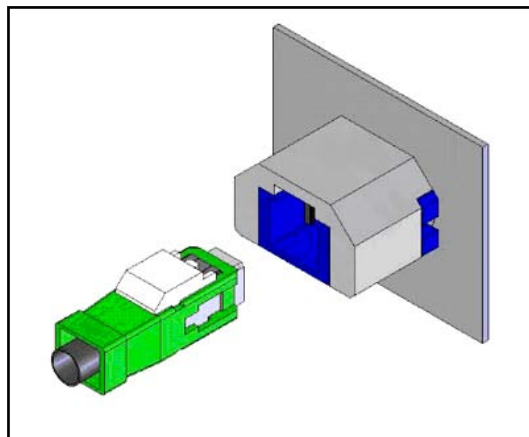
Σχήμα 2.3: Evolution Chassis SD-5 με τέσσερα modules.

Τα modules που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου FPI-HR (βλ. Σχήμα 2.4). Τα εξαρτήματα αυτά είναι αποσπώμενα και προσφέρονται σε διάφορα είδη ανάλογα με την παράμετρο μέτρησης και τον τύπο υποδοχής.



Σχήμα 2.4: Module FPI-HR

Κάθε ενισχυτής σήματος διαθέτει δυο κανάλια για ισάριθμη υποδοχή οπτικών ινών και έχει δυνατότητα δειγματοληψίας μέχρι 125Hz. Οι οπτικές ίνες συνδέονται με αυτόν μέσω μιας υποδοχής τύπου SCAI (βλ. Σχήμα 2.5). Επίσης, διαθέτει δυο αναλογικές εξόδους για κάθε κανάλι (Ch^+ και Ch^-) με εύρος τιμών από 0 έως 5V και μια θύρα RS-232 για έλεγχο της μονάδας με την χρήση εντολών μέσω υπολογιστή.



Σχήμα 2.5: Υποδοχή τύπου SCAI για την σύνδεση της οπτικής ίνας με τον ενισχυτή σήματος.

Λογισμικό

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το πρόγραμμα Evolution της εταιρίας Fiso Technologies[26]. Ήταν σε πλήρη συμβατότητα με το Chassis SD-5 και κατ' επέκταση με τα FPI-HR modules. Πρόκειται για ένα ελαφρύ και απλό πρόγραμμα το οποίο καταγράφει και αποθηκεύει τις μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες οπτικών ινών, μέσω των ενισχυτών σήματος. Η καταγραφή μπορεί να παρουσιάζεται και σε μορφή διαγραμμάτων σε πραγματικό χρόνο. Οι μετρήσεις των αισθητήρων καθώς και σημαντικές παράμετροι αυτών (όπως το μοντέλο του αισθητήρα, η ταχύτητα δειγματοληψίας κ.α.) αποθηκεύονται σε μορφή txt για κάθε ένα κανάλι ξεχωριστά.

Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Catman Professional σαν δεύτερο πρόγραμμα για την καταγραφή των μετρήσεων των οπτικών ινών. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται ευρέως κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων στο ENT, σε συνδυασμό με το εξωτερικό σύστημα Spider-8 της εταιρείας HBM για την καταγραφή των παραμορφώσεων από τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα. Η χρήση αυτού είναι ουσιαστικά μια πρώτη προσπάθεια για την καταγραφή των μετρήσεων όλων των αισθητήρων (οπτικές ίνες και strain gages) από ένα μόνο πρόγραμμα. Για την σωστή καταγραφή των μετρήσεων των οπτικών ινών από το πρόγραμμα αυτό χρειάζονται κάποιες τροποποιήσεις, οι οποίες περιπλέκουν τη διαδικασία καταγραφής, σε αντίθεση με το πρόγραμμα Evolution που μεταφράζει τις μετρήσεις των οπτικών ινών χωρίς καμία τροποποίηση από τον χρήστη. Παρόλο που το λογισμικό πρόγραμμα Catman Professional χρησιμοποιήθηκε και στις τρεις πειραματικές εφαρμογές για τις καταγραφές των αισθητήρων οπτικών ινών, κάποιοι περιορισμοί που θα αναφερθούν στο Κεφάλαιο 3, ήταν ο λόγος να μην παρουσιαστούν οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από αυτό στη δεύτερη και τρίτη εφαρμογή.

Κεφάλαιο 3

1^η Εφαρμογή Δοκίμιο Χάλυβα σε Κάμψη, Εφελκυσμό και Θλίψη

3.1 Εισαγωγή

Στην πρώτη εφαρμογή διερευνήθηκε η στατική συμπεριφορά σε κάμψη, εφελκυσμό και θλίψη ενός δοκιμίου χάλυβα. Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων στο δοκίμιο αυτό χρησιμοποιήθηκε μεταξύ άλλων και ένας αισθητήρας οπτικής ίνας. Καθώς ήταν η πρώτη εφαρμογή μέτρησης παραμορφώσεων της παρούσας εργασίας, διερευνήθηκε αρχικά ο τρόπος τοποθέτησης των αισθητήρων οπτικών ινών. Στην πορεία τέθηκε το δοκίμιο σε δοκιμές κάμψης με σκοπό να ρυθμιστεί η συνδεσμολογία των μετρητικών διατάξεων και να βαθμονομηθούν οι μετρήσεις μεταξύ των συστημάτων καταγραφής. Αφού έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις για τη σωστή καταγραφή των αισθητήρων, τοποθετήθηκε το χαλύβδινο δοκίμιο στην υδραυλική μηχανή δοκιμών και καταπονήθηκε σε εφελκυσμό και θλίψη στην ελαστική του περιοχή.

Γίνεται πλήρης ανάλυση του σχεδιασμού και της συνολικής πορείας του πειράματος και έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις. Στο τέλος παρουσιάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε για την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αριθμητικά. Στόχος του πειράματος αυτού ήταν, η εξοικείωση με την τοποθέτηση των αισθητήρων οπτικών ινών και ο έλεγχος της αξιοπιστίας των μετρήσεων τους.

3.2 Σχεδιασμός Εφαρμογής

3.2.1 Υλικά

Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από μια λεπτή χαλύβδινη δοκό ορθογωνικής διατομής μεγάλου μήκους, η οποία κόπηκε σε τρία μέρη. Το μέτρο ελαστικότητας του E_{st} , ήταν ίσο με 203 GPa και το όριο διαρροής του σ_0 , ίσο με 348 MPa.

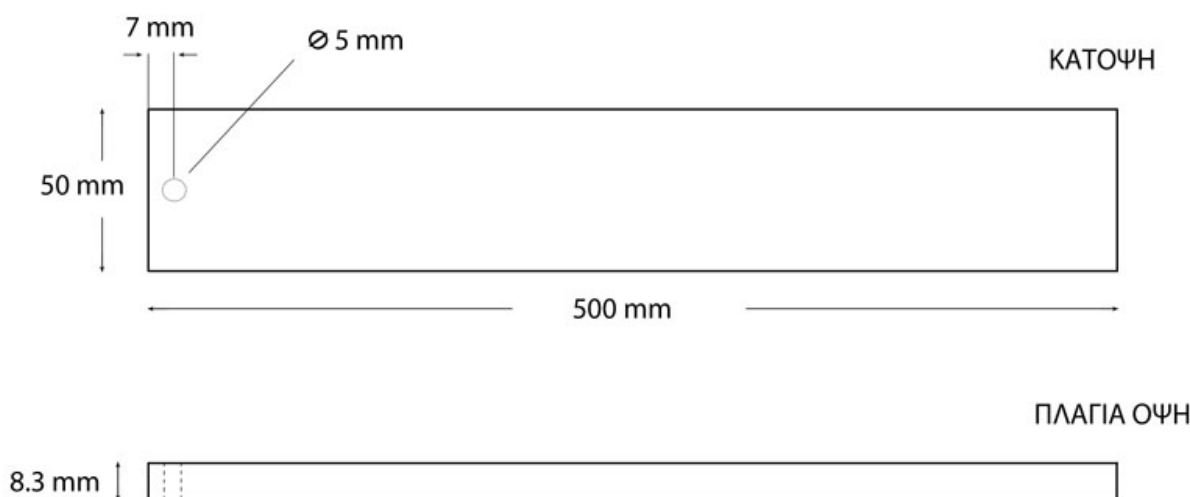
Για τον υπολογισμό των διαμηκών παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας οπτικών ινών και δυο ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα. Ο αισθητήρας οπτικών ινών ήταν τύπου

Fabry-Perot και συγκεκριμένα το μοντέλο FOS-N-NS-654D της εταιρίας FISO Technologies (με σειριακό αριθμό SF 10217), με εύρος καταγραφής τα $\pm 5000\mu\epsilon$. Τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (strain gage) ήταν τύπου KFG-5-120-C1-11L1M2R της εταιρίας KYOWA, με μήκη αναφοράς (gage length) 5 και 2 mm.

Για την κόλληση της οπτικής ίνας στο χαλύβδινο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε αρχικά η εποξική κολλά δυο συστατικών ταχείας πήξεως βιομηχανικού βαθμού, Loctite 3430, η οποία ενεργοποιείται σε 5 λεπτά. Στην πορεία, καθώς αυτή κρίθηκε ακατάλληλη, χρησιμοποιήθηκε η κυανοακρυλική κόλλα στιγμής τύπου Loctite.

3.2.2 Γεωμετρία Δοκιμίου

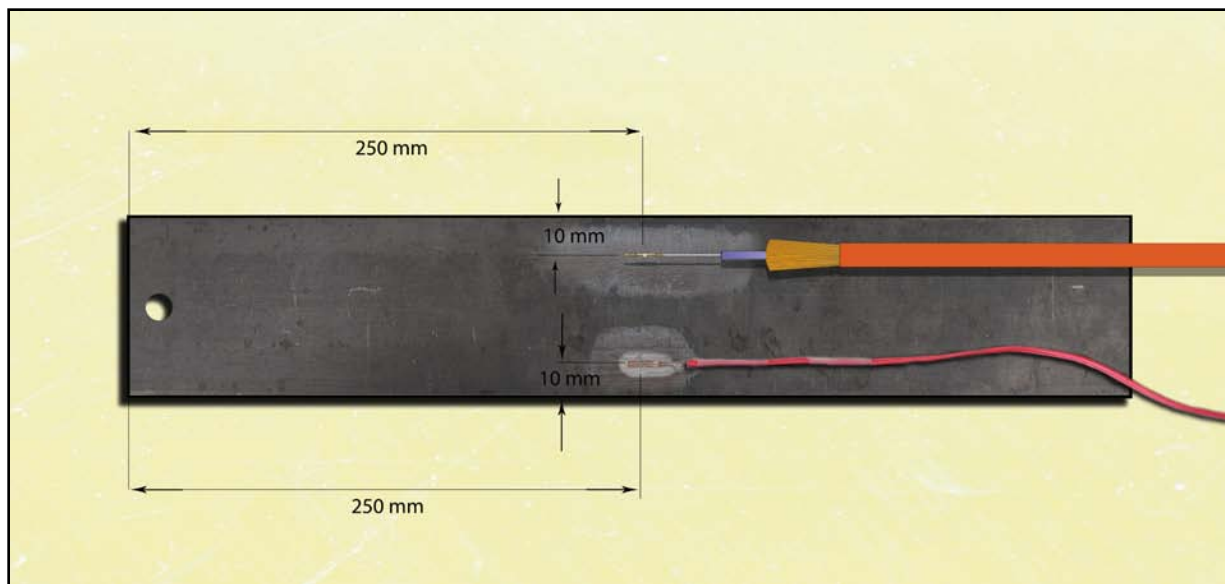
Η γεωμετρία του δοκιμίου φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Το ονομαστικό του μήκος ήταν 500 mm και το πλάτος του 50 mm. Είχε πάχος 8.3 mm, ενώ στο ένα άκρο του είχε μια οπή διαμέτρου 5 mm που χρησιμοποιήθηκε για το κρέμασμα βαρών στο πείραμα κάμψης. Το ελεύθερο μήκος του όταν τοποθετήθηκε στην υδραυλική μηχανή δοκιμών, ήταν 400 mm.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία δοκιμίου.

3.2.3 Σχεδιασμός και Τοποθέτηση Αισθητήρων

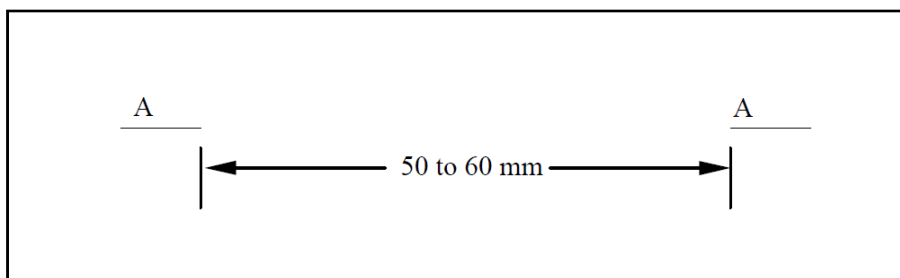
Αρχικά έγινε ο σχεδιασμός για τις θέσεις που θα τοποθετούνταν ο αισθητήρας οπτικής ίνας (OF-1) και το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο (SG-1). Αποφασίστηκε αυτά να μπουν σε τέτοια θέση, ούτως ώστε να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των μετρήσεων τους και να αξιολογηθεί έτσι η αξιοπιστία των μετρήσεων της οπτικής ίνας σε σχέση με το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο, που θεωρείται αξιόπιστη μετρητική διάταξη, λόγω της ευρείας χρήσης του στο εργαστήριο. Έτσι λοιπόν, οι δυο αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο μέσο του μήκους του δοκιμίου, σε ίση απόσταση από τα άκρα του πλάτους του και σε εύλογη απόσταση μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



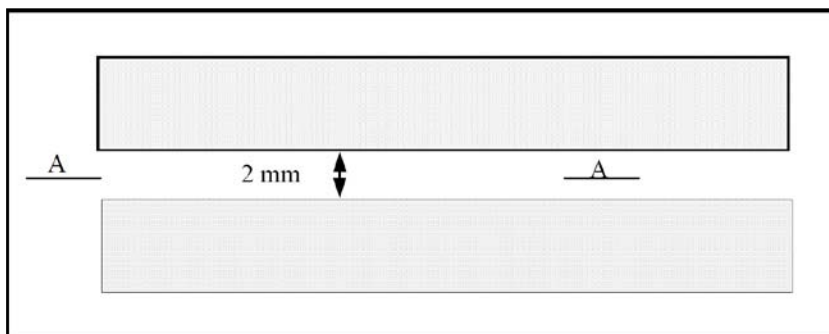
Σχήμα 3.2: Οι θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων OF-1 και SG-1.

Στην πορεία, έγινε διερεύνηση του τρόπου τοποθέτησης των αισθητήρων οπτικών ινών πάνω σε μια επιφάνεια. Τα βήματα που έπρεπε να ακολουθηθούν σύμφωνα με τον κατασκευαστή, παρουσιάζονται παρακάτω [27]:

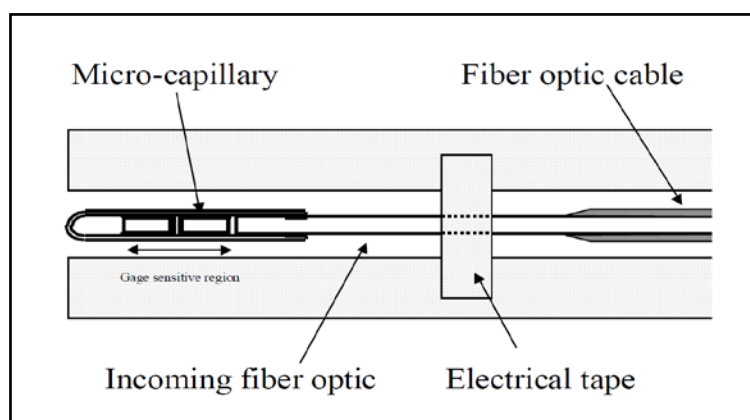
- Προετοιμασία της μεταλλικής επιφάνειας.
Η τεχνική προετοιμασίας είναι ίδια με αυτή που ακολουθείται για τα συμβατικά ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα. Αρχικά λειαίνεται το σημείο τοποθέτησης και έπειτα καθαρίζεται η επιφάνεια για να αφαιρεθούν τυχόν οργανικά ή χημικά υπολείμματα, σκόνη, λάδι κ.α. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ισοπροπυλικής αλκοόλης ή κάποιου εξουδετερωτή (neutralizer). Κρατώντας με τα προηγούμενα υλικά την επιφάνεια υγρή, στην συνέχεια πρέπει να τριφτεί με την άκρη ενός βαμβακερού υφάσματος η επιφάνεια (όχι με κινήσεις μπρός πίσω καθώς αυτό θα μπορούσε να αφήσει υπολείμματα στην καθαρή επιφάνεια) μέχρι να αφαιρεθεί όλο το υγρό. Δεν πρέπει το υγρό να αφεθεί να εξατμιστεί, διότι αυτό μπορεί να δημιουργήσει μια ανεπιθύμητη επιφάνεια φιλμ μεταξύ της κόλλας και της επιφάνειας του μετάλλου.
- Διαδικασία κόλλησης της ίνας.
Α) Με ένα μολύβι χαράσσονται δυο σημεία (A), στην διεύθυνση που θα κολληθεί η ίνα σε απόσταση 50 – 60 mm μεταξύ τους.



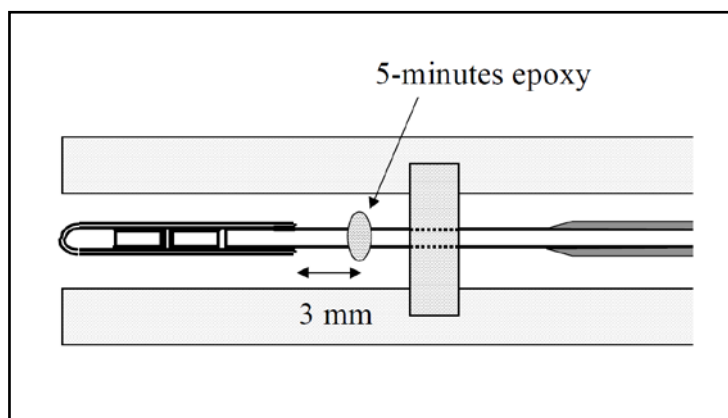
- Β) Με δυο κομμάτια μονωτικής ταινίας δημιουργείται ένα κανάλι μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί η οπτική ίνα. Το πλάτος αυτού του καναλιού πρέπει είναι περίπου 2 mm.



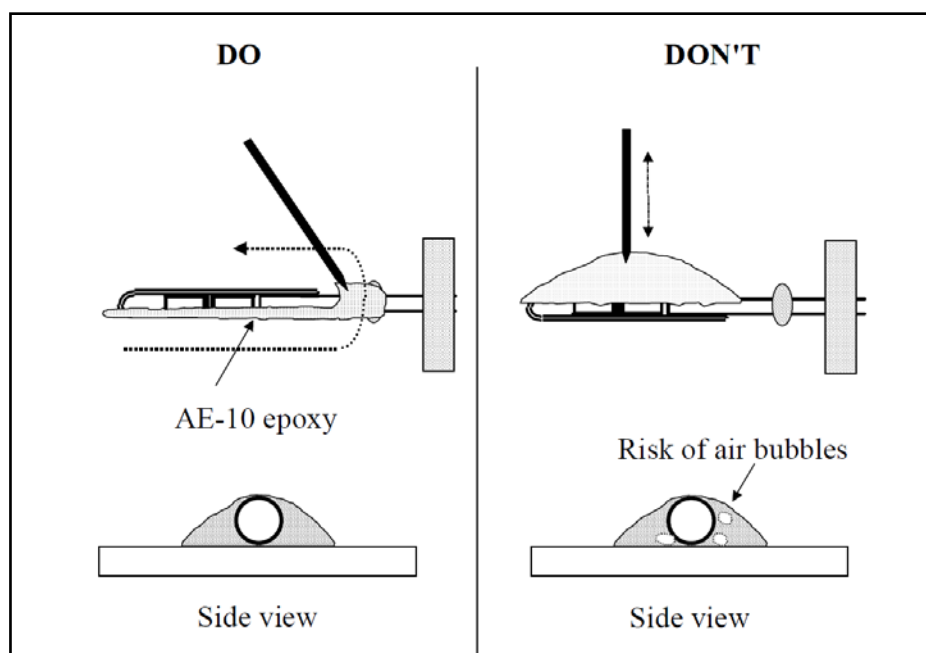
- Γ) Τοποθετείται στη συνέχεια ο αισθητήρας μέσα στο κανάλι που δημιουργήθηκε από την ταινία και σταθεροποιείται εκεί με άλλη ταινία, που κολλιέται σε απόσταση 25 mm από την αισθητήριο κεφαλή. Η αισθητήριο κεφαλή πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένη πλήρως με τον άξονα της ίνας.



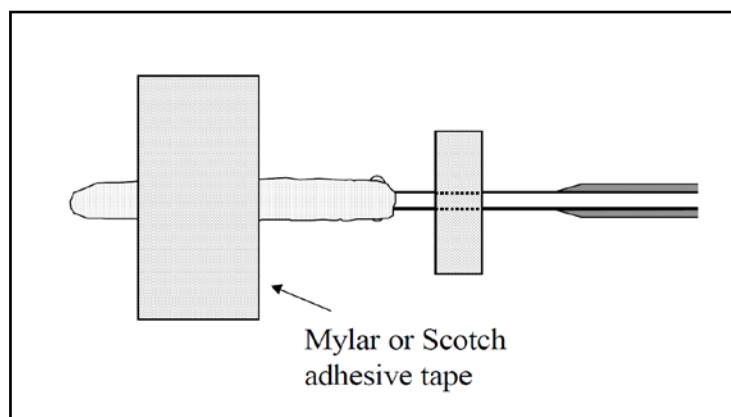
- Δ) Στο σημείο αυτό, για να συγκρατηθεί πλήρως η ίνα, τοποθετείται μια σταγόνα εποξικής κόλλας (δυο συστατικών, ταχείας πήξεως), 3 mm μακριά από την αισθητήριο κεφαλή. Για να είναι σίγουρο ότι η κόλλα δεν θα ρεύσει προς την κεφαλή, προτείνεται αυτή να πήξει λίγο πριν την τοποθέτησή της.



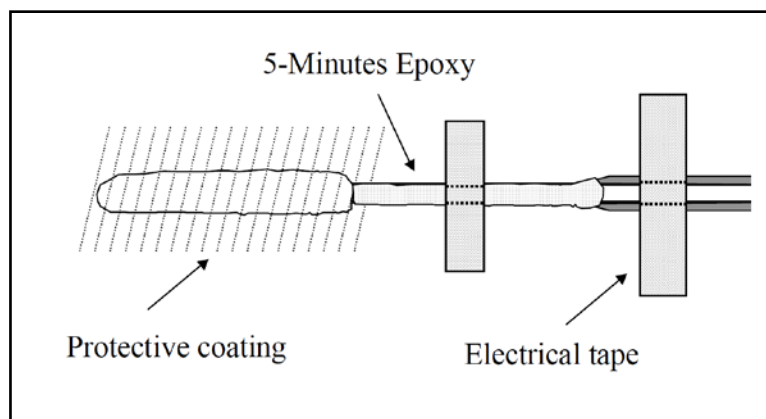
- Ε) Μόλις σκληρυνθεί η πρώτη σταγόνα, προετοιμάζεται μεγαλύτερη ποσότητα κόλλας (με αργή ανάμειξη των δύο συστατικών για να αποφευχθεί η δημιουργία φυσαλίδων) για να τοποθετηθεί πάνω σε όλη την αισθητήριο κεφαλή. Η τοποθέτηση γίνεται με γραμμικές κινήσεις, παράλληλα στην κατεύθυνση του αισθητήρα.



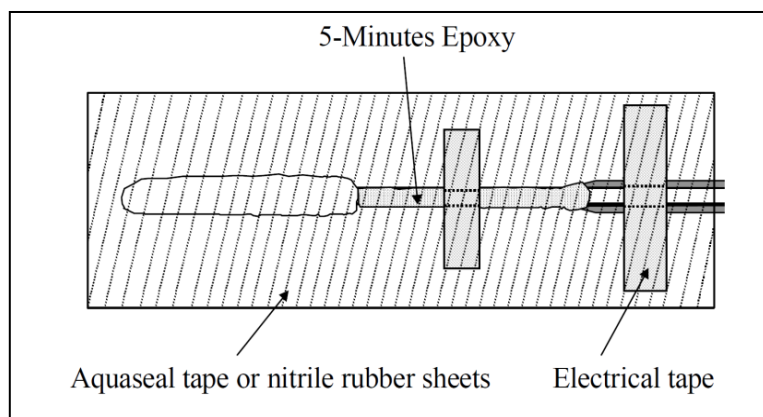
ΣΤ) Αμέσως τοποθετείται από πάνω μια μονωτική ταινία στην περιοχή του μήκους αναφοράς του αισθητήρα (gage length), για να βρίσκεται σε καλύτερη επαφή με το δοκίμιο. Δεν χρειάζεται να ασκηθεί μεγάλη πίεση πάνω στον αισθητήρα κατά την τοποθέτησή της (η μονωτική ταινία αφαιρείται μετά την στερεοποίηση της κόλλας). Ακολουθούνται έπειτα οι προτεινόμενοι χρόνοι του κατασκευαστή για την σκλήρυνση της κόλλας.



Ζ) Μετά τη σκλήρυνση της κόλλας, τοποθετείται και άλλη στα σημεία της οπτικής ίνας που είναι «γυμνά» μέχρι την μπλε επικάλυψη. Έπειτα τοποθετείται και άλλη μονωτική ταινία για την συγκράτηση του καλωδίου της οπτικής ίνας πάνω στο δοκίμιο.



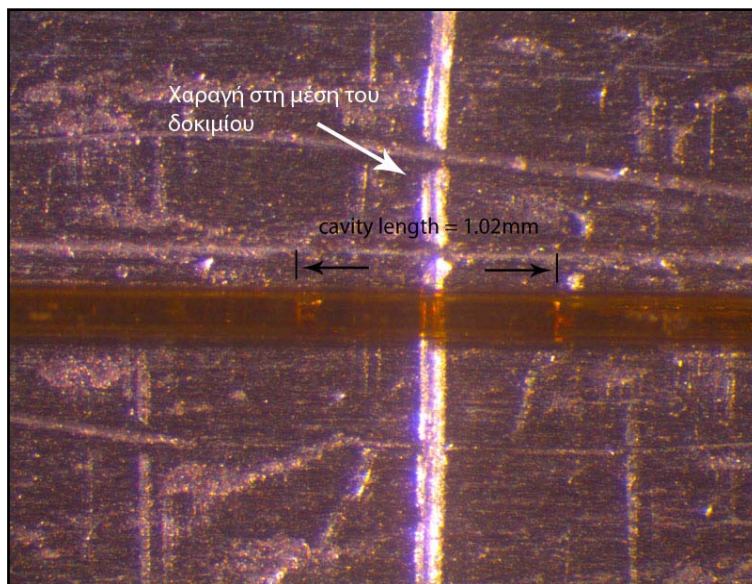
- Η) Τέλος, μπορεί να τοποθετηθεί προληπτικά κάποια προστατευτική ταινία για μόνωση όλης της περιοχής του αισθητήρα από το νερό, ασκώντας λίγη πίεση στα άκρα της ταινίας και όχι στην περιοχή πάνω από τον αισθητήρα.



Επιπροσθέτως, για μια επιτυχημένη συγκόλληση ενός αισθητήρα πρέπει να τηρούνται τα παρακάτω:

1. Η αισθητήριος κεφαλή (gage micro-capillary) πρέπει να εφάπτεται πολύ καλά με το δοκίμιο.
2. Η αισθητήριος κεφαλή είναι κατασκευασμένη από γυαλί και δεν προστατεύεται από κάποια επικάλυψη. Ως εκ τούτου η διαδικασία της κόλλησης πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή. Οποιαδήποτε γρατζουνιά ή χτύπημα μπορεί να επηρεάσει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του αισθητήρα.
3. Η αισθητήριος κεφαλή της οπτικής ίνας δεν πρέπει να έρχεται σε επαφή με τα χέρια. Πρέπει να είναι καθαρή από λιπαρές ουσίες, σκόνη κ.α. Αν χρειαστεί καθάρισμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος φυσητήρας στεγνού αέρα.

Γνωρίζοντας τα βήματα για την τοποθέτηση του αισθητήρα, ξεκίνησαν οι διεργασίες για την κατασκευή της διάταξης. Στην αρχή λειάνθηκαν τα σημεία που θα τοποθετούνταν ο αισθητήρας της οπτικής ίνας και το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο και έπειτα χαράχτηκε μια γραμμή στην μέση του δοκιμίου για να χρησιμοποιηθεί σαν οδηγός για την τοποθέτησή τους. Έπειτα το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε ένα στερεοσκόπιο για να βρεθεί η ακριβής θέση του διακένου (cavity length) και άρα το μέσο του οπτικού αισθητήρα (βλ. Εικόνα 3.1), καθώς δεν ήταν ορατό με γυμνό μάτι. Μόλις αυτό εντοπίστηκε, τοποθετήθηκε ακριβώς πάνω από την χαραγμένη γραμμή και συγκρατήθηκε στην θέση αυτή με μονωτική ταινία για να μην μετακινηθεί.



Εικόνα 3.1: Λήψη από στερεοσκόπιο του μήκους αναφοράς του αισθητήρα της οπτικής ίνας.

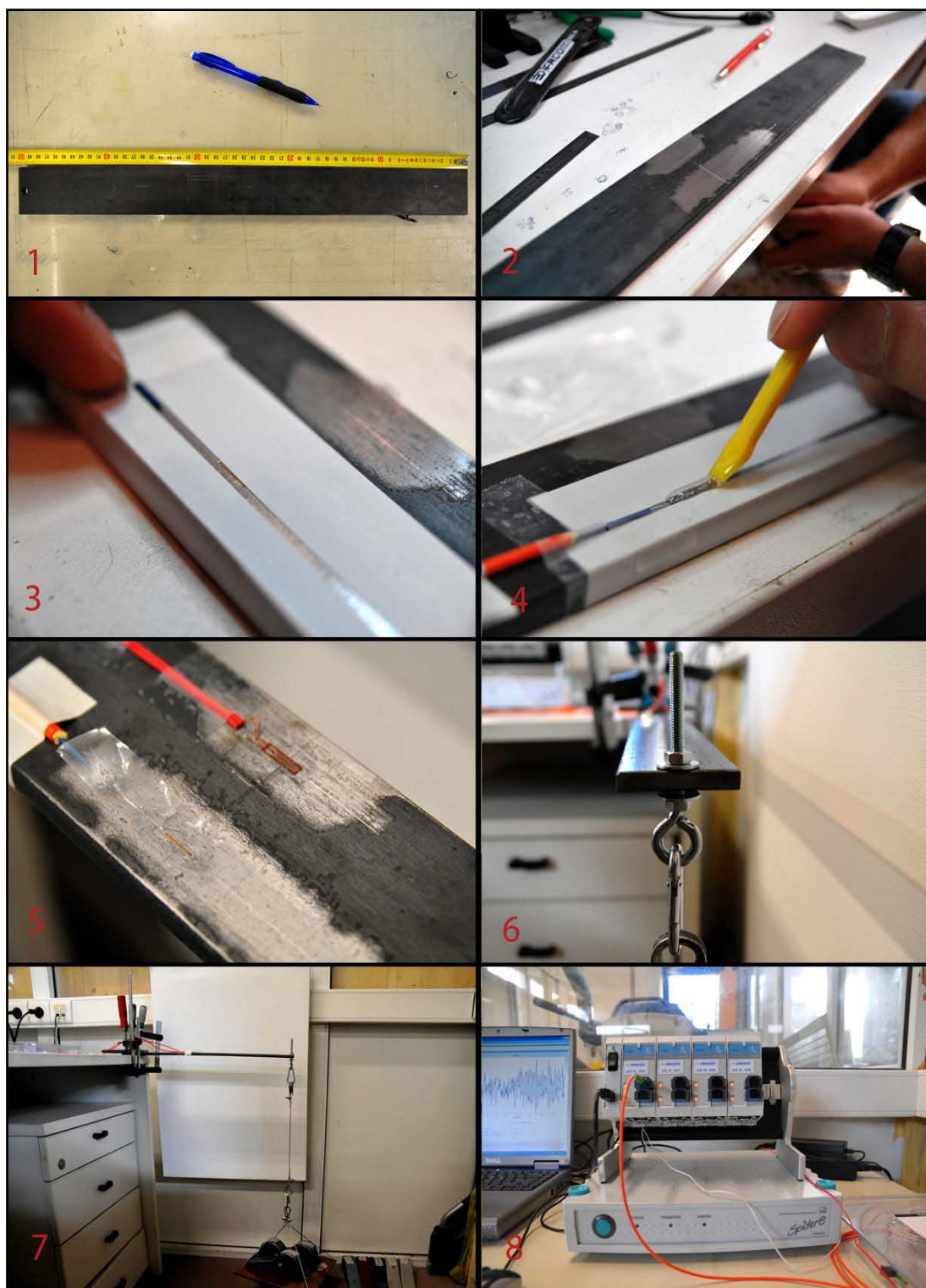
Στη συνέχεια η ίνα μεταφέρθηκε στο εργαστήριο για να ξεκινήσει η διαδικασία κόλλησης του αισθητήρα. Ακολουθήθηκαν για την κόλληση του όλα τα στάδια όπως αυτά παρουσιάστηκαν παραπάνω, με τη διαφορά ότι τα βήματα Δ έως Ζ πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα. Τοποθετήθηκε δηλαδή εποξική κόλλα ταχείας πήξεως σε όλη την οπτική ίνα που βρίσκεται εξωτερικά της μπλε επικάλυψης συμπεριλαμβανομένης και της αισθητήριας κεφαλής και συγκρατήθηκε με μονωτική ταινία στην περιοχή του αισθητήρα. Ακολούθως, εγκαταστάθηκε και το ηλεκτρικό επιμηκυσμόμετρο στην προσχεδιασμένη θέση δίπλα από τον αισθητήρα της οπτικής ίνας, ολοκληρώνοντας έτσι την τοποθέτηση των αισθητήρων.

3.2.4 Δοκιμή Κάμψης

Για την εφαρμογή του πειράματος κάμψης, τοποθετήθηκε το δοκίμιο πάνω σε ένα γραφείο και πιάστηκε με σφιγκτήρες στο ένα άκρο του (σε μήκος 50 mm), μετατρέποντας το έτσι σε μια πακτωμένη δοκό. Στο άλλο άκρο, όπου υπήρχε και η οπή, προσδέθηκε μια βίδα με ενσωματωμένο κρίκο (τύπου eyebolt). Στον κρίκο αυτό τοποθετήθηκε ένας άλλος σπαστός κρίκος που ήταν προσδεμένος σε μια κρεμαστή βάση όπου μπορούσαν να τοποθετούνται βάρη.

Παράλληλα συνδέθηκε ο αισθητήρας της οπτικής ίνας με το Chassis SD-5 και αυτό με την σειρά του με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την καταγραφή των μετρήσεων του ηλεκτρικού επιμηκυσμόμετρου συνδέθηκε με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή το εξωτερικό σύστημα Spider-8 της εταιρείας HBM. Στο σύστημα αυτό συνδέθηκε και ο αισθητήρας της οπτικής ίνας με καλώδια, από την αναλογική έξοδο του chassis (module Ch⁺ και Ch⁻), ούτως ώστε να καταγράφονται οι μετρήσεις της οπτικής ίνας από δύο συσκευές. Η καταγραφή των μετρήσεων από το chassis γινόταν με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος Evolution, ενώ η καταγραφή από το Spider-8 με το λογισμικό πρόγραμμα Catman.

Μόλις ταχτοποιηθήκαν όλες οι συνδεσμολογίες, ξεκίνησε η πειραματική διαδικασία τοποθετώντας βάρος 10 kg στην αυτοσχέδια βάση. Βαθμονομήθηκαν αρχικά οι μετρήσεις του προγράμματος Catman ούτως ώστε να καταγράφει τις ίδιες τιμές με αυτές του προγράμματος Evolution.



Εικόνα 3.2: Σταγμιότυπα από την προετοιμασία του δοκιμίου, την τοποθέτηση του αισθητήρα οπτικής ίνας και του πειράματος κάμψης.

Στην πορεία, ενώ οι τιμές των παραμορφώσεων που καταγράφονταν από τον αισθητήρα και το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο ήταν κοντά στις θεωρητικές (που είχαν υπολογιστεί αναλυτικά) παρατηρήθηκε ότι οι τιμές των μετρήσεων της οπτικής ίνας άρχιζαν να μειώνονται, ενώ το φορτίο παρέμενε ίδιο. Αυτό το φαινόμενο οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η κόλληση του αισθητήρα της οπτικής ίνας πάνω στο δοκίμιο δεν ήταν σωστή. Η κόλλα

ενδέχεται να είχε τέτοια ελαστικότητα, που επέτρεπε στον αισθητήρα να «ολισθαίνει» μέσα σε αυτήν και κατ' επέκταση να καταγράφει ολοένα και μειούμενες παραμορφώσεις με την πάροδο του χρόνου. Για τον λόγο αυτό η οπτική ίνα αφαιρέθηκε και τοποθετήθηκε στην θέση της άλλης, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία από την αρχή, αλλά χρησιμοποιώντας κυανοακρυλική κόλλα ταχείας πήξεως τύπου Loctite, αντί για εποξική δυο συστατικών.

Η επιλογή της κυανοακρυλικής κόλλας για την κόλληση της οπτικής ίνας αποδείχθηκε πιο αξιόπιστη, καθώς από ότι φάνηκε η καταγραφή των παραμορφώσεων ήταν φυσιολογική. Γενικά οι μετρήσεις του ηλεκτρικού επιμηκνσιομέτρου και της οπτικής ίνας είχαν μια απόκλιση μεταξύ τους της τάξης του 11% για την δεδομένη φόρτιση των 10 kg, με την μέτρηση του ηλεκτρικού επιμηκνσιομέτρου να βρίσκεται πιο κοντά στις θεωρητικές τιμές. Η απόκλιση αυτή πιθανόν να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, από τον τρόπο τοποθέτησης των αισθητήρων, την θέση τους ως προς το σημείο άσκησης του φορτίου μέχρι και από τις τροποποιήσεις στον τρόπο καταγραφής των μετρήσεων από τα λογισμικά προγράμματα. Για να κατανοηθεί καλύτερα το μέγεθος των αποκλίσεων σε μεταβαλλόμενη φόρτιση, τοποθετήθηκαν στην αυτοσχέδια βάση σταδιακά αυξανόμενα βάρη και καταγράφηκαν οι μετρήσεις της οπτικής ίνας από τα δυο προγράμματα (Catman και Evolution) και του ηλεκτρικού επιμηκνσιομέτρου από το πρόγραμμα Catman. Τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 3.1: Καταγραφή μετρήσεων και αποκλίσεις από την θεωρητική τιμή, στο πείραμα κάμψης.

Βάρος (Kg)	Θεωρητική τιμή (με)	Strain-gage (Catman) (με)	Διαφορά (%) ²	Optical Fiber (Catman) (με)	Διαφορά (%) ³	Optical Fiber (Evolution) (με)	Διαφορά (%) ⁴
0	0	0	-	3 ¹	-	0.3	-
3.061	62.5	65	4	49	21	57	8.8
7.589	155	162	4.5	136	12	142	8.3
12.104	247	259	4.8	223	10	225	8.9
14.637	299	312	4.3	271	9.7	271	9.3
17.156	350	366	4.5	317	9.4	318	9.1
19.683	403	419	3.9	367	9	365	9.4
21.803	446	463	3.8	407	9.6	403	10
24.144	494	513	3.8	450	8.9	446	9.7
26.341	539	560	3.9	493	8.5	487	9.6
28.556	584	606	3.8	533	8.7	527	9.7
30.835	630	650	3.2	574	8.8	566	10.1

¹ Το λογισμικό Catman μετατρέπει το voltage που παίρνει από το module της οπτικής ίνας μέσω του Spider σε με. Οι τιμές όμως του voltage δεν μηδενίζονται ποτέ, με αποτέλεσμα να μην μηδενίζεται και η καταγραφή σε με.

² Από την θεωρητική τιμή για το Strain-gage Catman.

³ Από την θεωρητική τιμή για την Optical Fiber Catman.

⁴ Από την θεωρητική τιμή για την Optical Fiber Evolution.

Από τον παραπάνω Πίνακα φαίνεται ότι η μέση απόκλιση των παραμορφώσεων, μεταξύ του ηλεκτρικού επιμηκνσιομέτρου (Catman) και της θεωρίας είναι της τάξης του 4 %. Αντίστοιχα η μέση απόκλιση των παραμορφώσεων μεταξύ της οπτικής ίνας (Catman) και της θεωρίας είναι της τάξης του 10.5% ενώ για την περίπτωση της οπτικής ίνας (Evolution) 9.3%. Γίνεται έτσι εμφανές ότι οι μετρήσεις του ηλεκτρικού επιμηκνσιομέτρου είναι πιο κοντά στις θεωρητικές τιμές. Παράλληλα φαίνεται πως οι τιμές των παραμορφώσεων που

καταγράφηκαν από την οπτική ίνα μέσω των δυο προγραμμάτων (Catman και Evolution), συνέκλιναν.

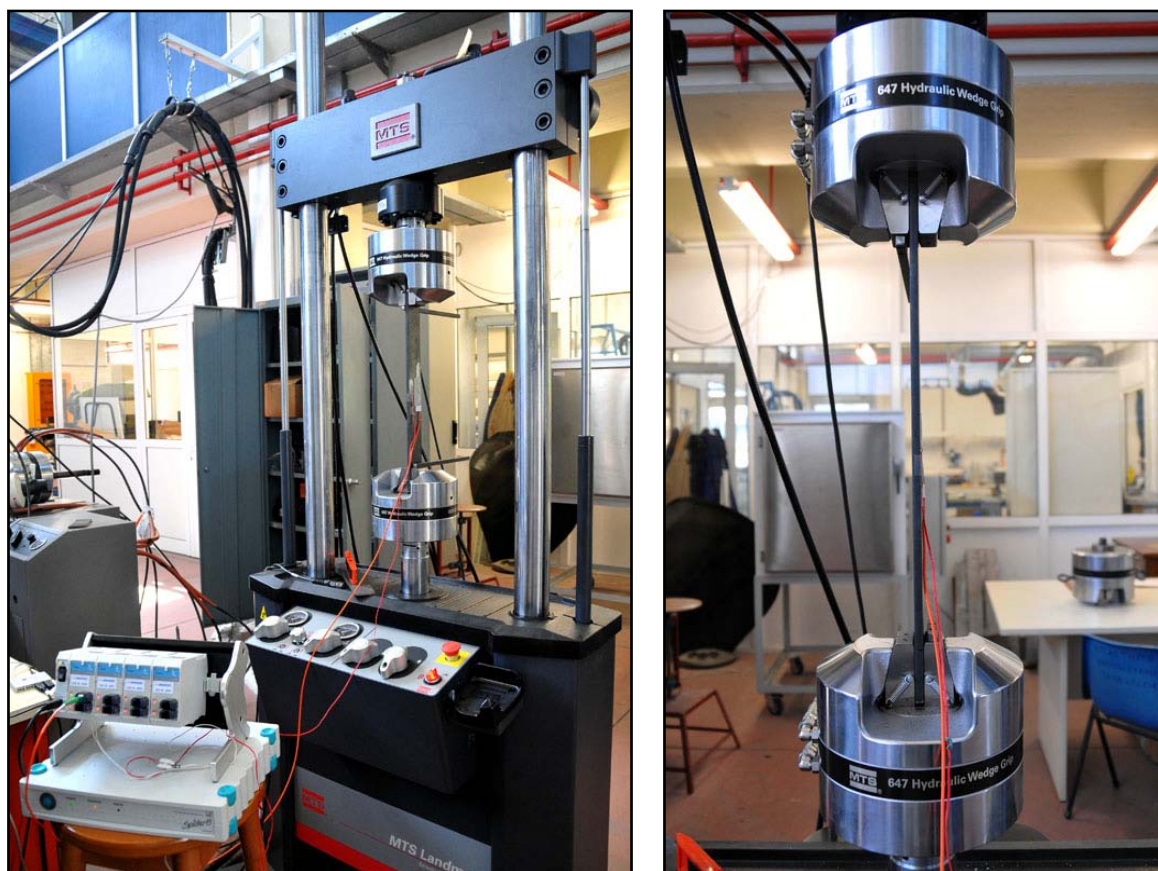
Στο σημείο αυτό και πριν τοποθετηθεί το δοκίμιο στην υδραυλική μηχανή, αποφασίστηκε να τοποθετηθεί και ένα δεύτερο ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο πίσω ακριβώς από τον αισθητήρα της οπτικής ίνας (στην κάτω πλευρά του δοκιμίου). Στόχος της απόφασης αυτής ήταν να τοποθετηθεί το επιμηκυνσιόμετρο όσο το δυνατόν πιο κοντά στην θέση του αισθητήρα της οπτικής ίνας και κατ' επέκταση να είναι πιο ακριβής η σύγκριση των μετρήσεων τους. Το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε (SG-2), είχε μήκος αναφοράς 2 mm και τοποθετήθηκε στο δοκίμιο αφού πρώτα είχε λειανθεί το συγκεκριμένο σημείο.

3.3 Παράμετροι Δοκιμής Εφελκυσμού και Θλίψης

Η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε στην υδραυλική μηχανή MTS του ENT (βλ. Εικόνα 3.3) η οποία είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002. Οι αρπάγες συγκράτησης του δοκιμίου είναι υδραυλικές.

Πριν από την πειραματική δοκιμή εφαρμόστηκαν στο δοκίμιο τρεις προφορτίσεις ίσες με 10, 20 και 50 kN, για να ρυθμιστούν πλήρως όλες οι συσκευές καταμέτρησης. Κάθε προφόρτιση έγινε με διαφορετικό ρυθμό δειγματοληψίας και με την μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής δύναμης. Στην συνέχεια το δοκίμιο αποφορτίστηκε τελείως με κλιμακούμενη μείωση της εφελκυστικής φόρτισης. Έπειτα επιβλήθηκαν οι κύριες φορτίσεις της δοκιμής στο δοκίμιο. Αρχικά μια εφελκυστική φόρτιση ίση με 80 kN με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής δύναμης και ρυθμό 0.2 kN/s και μετά την πλήρη αποφόρτιση του, μια θλιπτική φόρτιση ίση με -40 kN με τον ίδιο ρυθμό. Όλες οι φορτίσεις έγιναν στην ελαστική περιοχή του χαλύβδινου δοκιμίου.

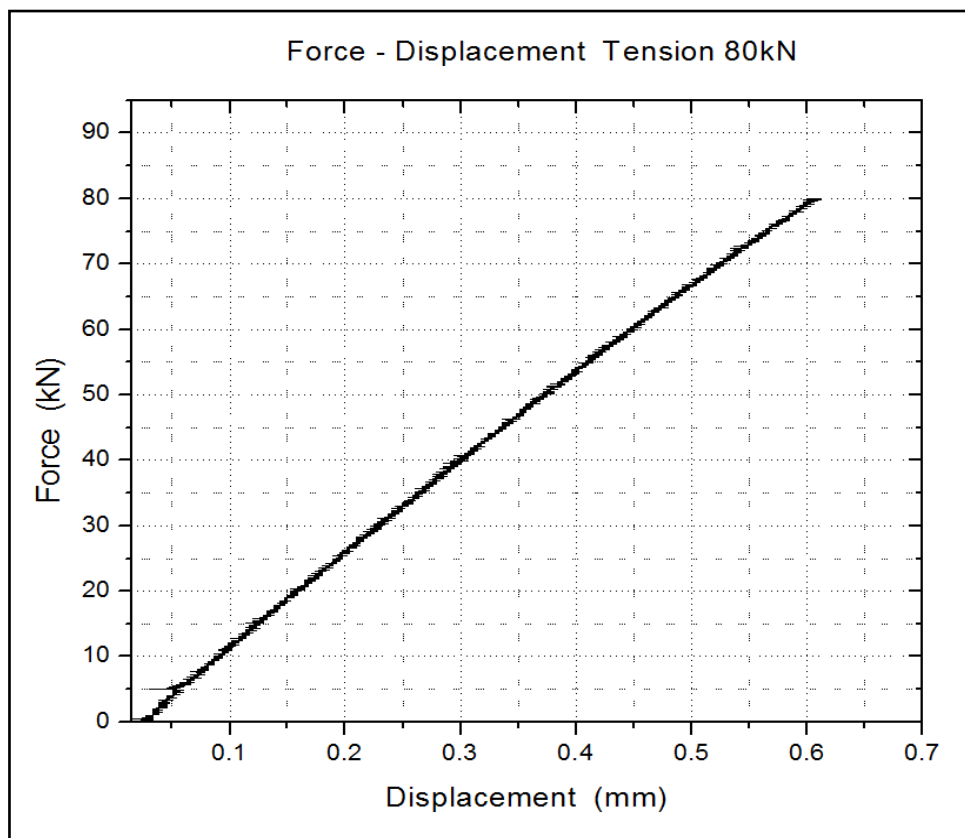
Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μετρήθηκαν και καταγράφηκαν η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου, καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις στα σημεία του δοκιμίου που έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της υδραυλικής μηχανής δοκιμών, ένα πρόσθετο εξωτερικό σύστημα Spider-8 της εταιρείας HBM, πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους, για την καταγραφή των δεδομένων από τα ηλεκτρικά επιμηκυσσιόμετρα, καθώς και το λογισμικό πρόγραμμα Evolution της εταιρείας FISO για την καταγραφή των μετρήσεων της οπτικής ίνας.



Εικόνα 3.3: Το δοκίμιο τοποθετημένο στην υδραυλική μηχανή.

3.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων

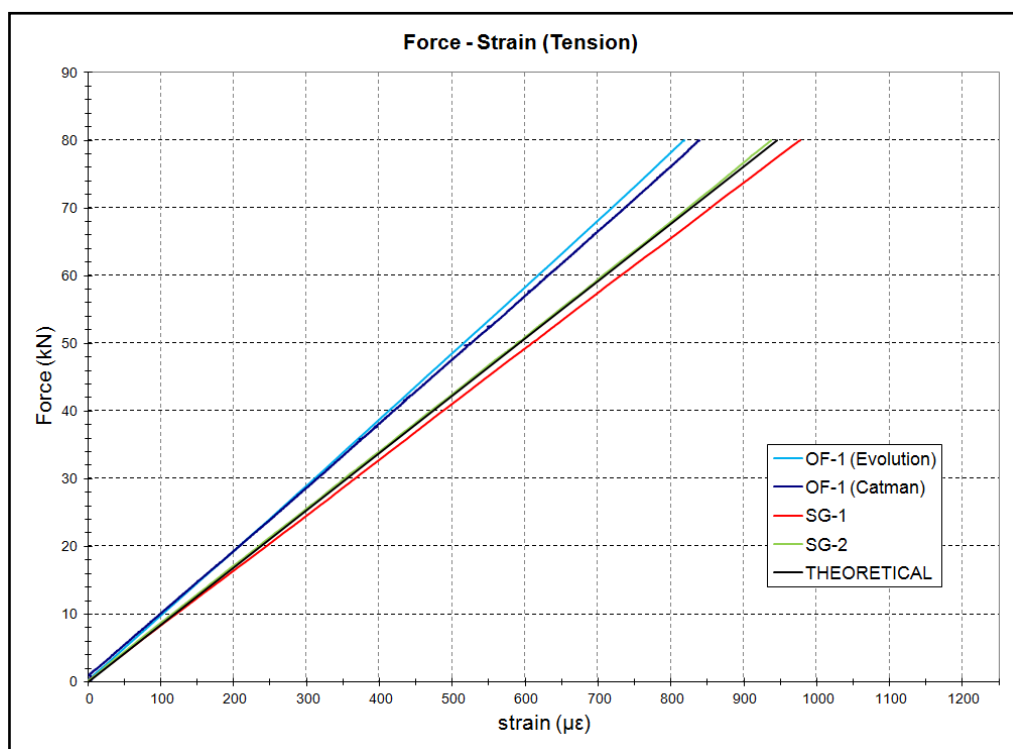
Όλες οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η συνολική απόκριση του δοκιμίου με τη μορφή της μεταβολής της συνολικής επιμήκυνσής του (απόσταση μεταξύ των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού) συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης. Παρατηρούμε την αναμενόμενη ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου μέχρι τα 80 kN.



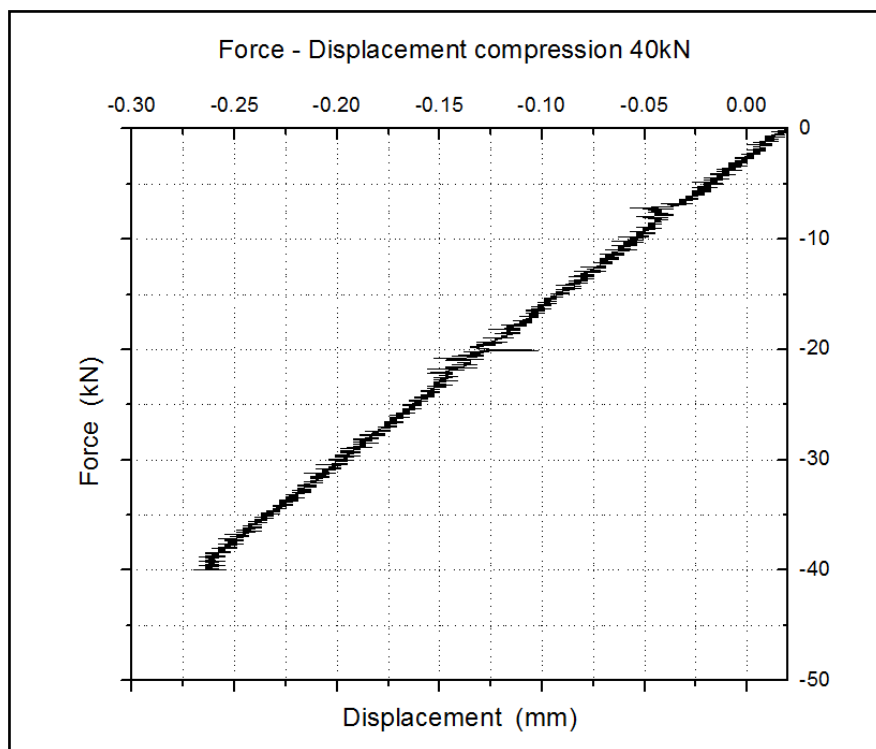
Σχήμα 3.3: Μεταβολή της επιμήκυνσης του δοκιμίου συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης.

Στο Σχήμα 3.4 που ακολουθεί παρατηρούμε την μεταβολή των διαμηκών παραμορφώσεων, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου στις θέσεις του αισθητήρα της οπτικής ίνας (OF-1) και των δυο ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (SG-1 και SG-2). Για τον αισθητήρα της οπτικής ίνας παρουσιάζονται οι μετρήσεις όπως αυτές καταγράφηκαν και από τα δυο προγράμματα καταγραφής (Evolution, Catman). Γενικά διακρίνεται η απόκλιση των μετρήσεων από τους τρεις αισθητήρες. Όσο αυξάνεται το φορτίο και οι διαμήκεις παραμορφώσεις, αυξάνεται και η απόκλιση των τριών αισθητήρων. Για το μέγιστο φορτίο των 80 kN η απόκλιση που σημειώνεται από την οπτική ίνα (μετρήσεις Evolution) ως προς το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο SG-1 είναι της τάξης του 16% ενώ ως προς το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο SG-2, 12.5%. Οι αποκλίσεις αυτές ενδεχομένως να οφείλονται στην διαφορετική θέση των αισθητήρων ή και στην μη ακριβή τοποθέτησή τους, ως προς τον αρχικό σχεδιασμό. Από την άλλη μεριά οι μετρήσεις της οπτικής ίνας μεταξύ των δυο προγραμμάτων καταγραφής, φαίνεται να έχουν καλή σύγκλιση σε χαμηλά φορτία, ενώ όσο αυτά αυξάνονται αυτές αρχίζουν να αποκλίνουν. Αυτό φανερώνει, ότι ο συγχρονισμός των δυο προγραμμάτων επιδέχεται διορθώσεων.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής φόρτισης (βλ. Σχήμα 3.5).



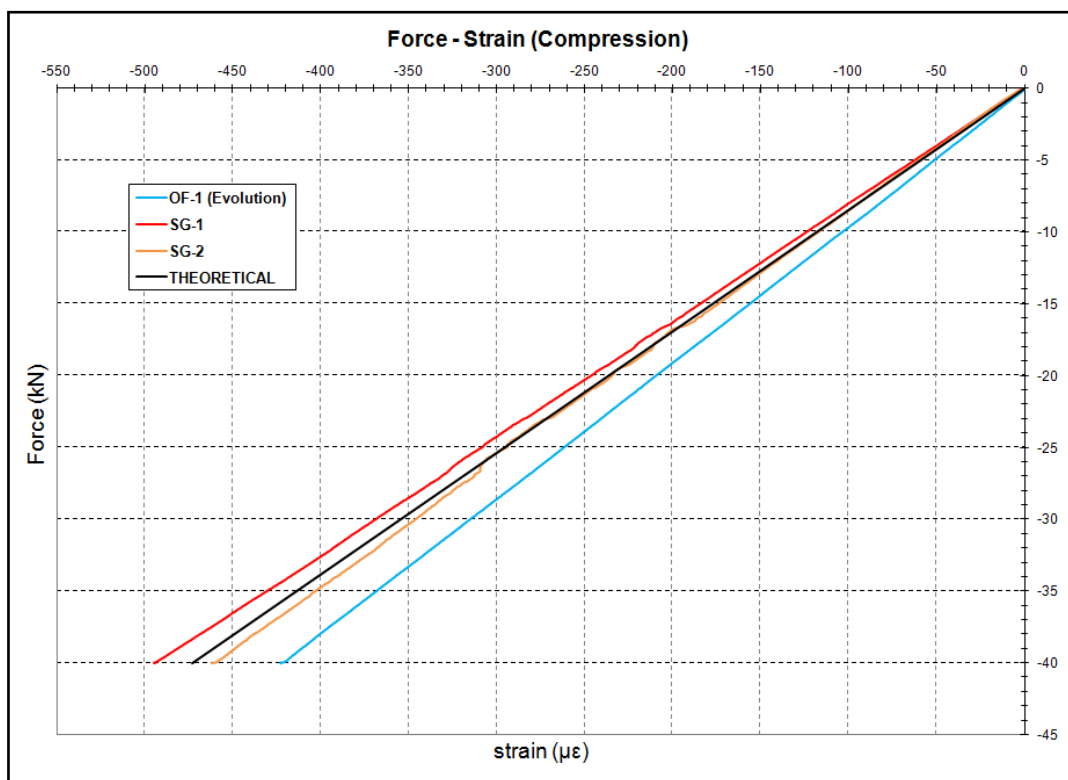
Σχήμα 3.4 : Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στις θέσεις των αισθητήρων.



Σχήμα 3.5: Μεταβολή της μείωσης του μήκους του δοκιμίου συναρτήσει της επιβαλλόμενης θλιπτικής δύναμης.

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η συνολική απόκριση του δοκιμίου, με την μορφή της μεταβολής της συνολικής μείωσης του μήκους του (απόσταση μεταξύ των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού) συναρτήσει της επιβαλλόμενης θλιπτικής δύναμης. Παρατηρούμε την αναμενόμενη ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου μέχρι τα -40 kN, αλλά και την καταγραφή κάποιων διακυμάνσεων οι οποίες οφείλονται σε μικροσφάλματα από τις διατάξεις της μηχανής MTS.

Στο Σχήμα 3.6 παρατηρούμε την μεταβολή των διαμηκών παραμορφώσεων, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου στις θέσεις του αισθητήρα της οπτικής ίνας (OF-1) και των δυο ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (SG-1 και SG-2). Για τον αισθητήρα της οπτικής ίνας παρουσιάζονται οι μετρήσεις όπως αυτές καταγράφηκαν από το πρόγραμμα Evolution. Η καταγραφή με το πρόγραμμα Catman δεν ήταν εφικτή καθώς για την καταγραφή των θλιπτικών φορτίων απαιτείται αρνητικό voltage, το οποίο όμως δεν υποστηρίζεται από τα modules του Chassis SD-5 (analog output 0-5V). Η περαιτέρω διερεύνηση για την διευθέτηση του θέματος αυτού, με πιθανή τροποποίηση του προγράμματος Catman κρίνεται απαραίτητη. Γενικά παρατηρούνται και εδώ αποκλίσεις στις καταγραφές των τριών αισθητήρων, οι οποίες αυξάνονται όσο το φορτίο και οι παραμορφώσεις αυξάνονται. Η οπτική ίνα φαίνεται ότι υποεκτιμά λίγο τις παραμορφώσεις. Η απόκλιση των μετρήσεων της οπτικής ίνας (OF-1) από αυτές του ηλεκτρικού επιμηκυνσιόμετρου SG-1 είναι της τάξης του 14.5% και 9% από αυτές του ηλεκτρικού επιμηκυνσιόμετρου SG-2, για την τιμή του μέγιστου θλιπτικού φορτίου. Οι αποκλίσεις αυτές πιθανόν να οφείλονται στους λόγους που αναφέρθηκαν και παραπάνω.



Σχήμα 3.6 : Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στις θέσεις των αισθητήρων.

3.5 Αριθμητική Προσομοίωση

3.5.1 Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

Στο εδάφιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε με σκοπό την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της αριθμητικής μεθόδου. Για τον καθορισμό του αριθμητικού μοντέλου, την διαδικασία επίλυσης του και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS 12.0. Παρουσιάζονται με σειρά οι μηχανικές ιδιότητες και η μοντελοποίηση των υλικών, η γεωμετρία του μοντέλου, η επιλογή των στοιχείων, η διακριτοποίηση, οι συνοριακές συνθήκες, το είδος φόρτισης και τέλος το είδος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Μηχανικές ιδιότητες και μοντελοποίηση υλικού

Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αποτελούνταν από κοινό χάλυβα, μέτρου ελαστικότητας E , λόγου Poisson ν και ορίου διαρροής σ_0 . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση αναγράφονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 : Αριθμητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα.

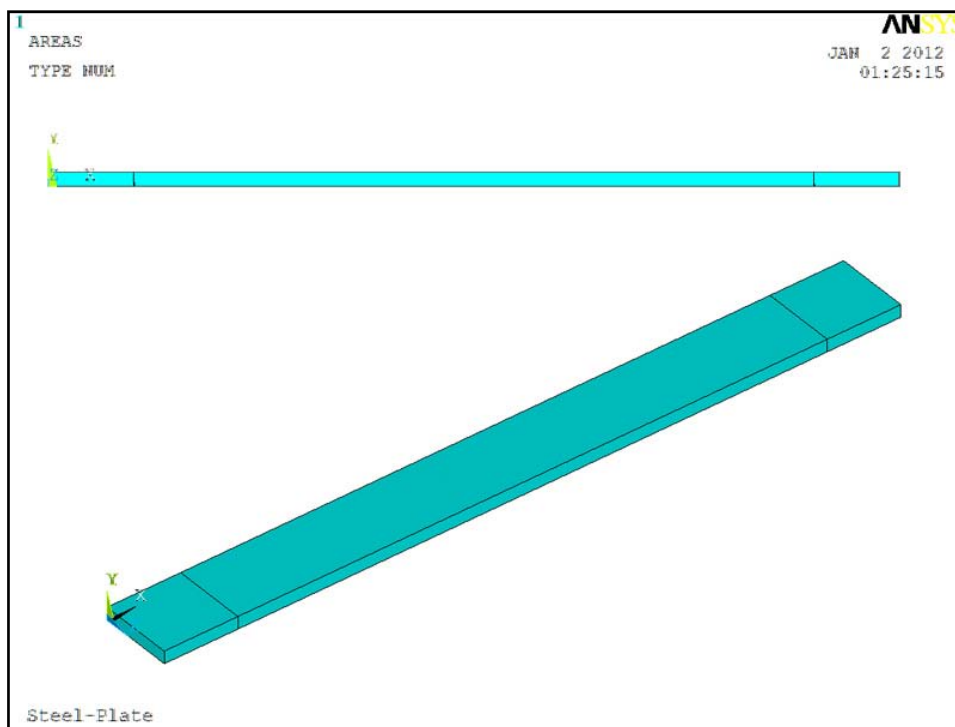
Υλικό	E (MPa)	ν	σ_0 (MPa)
Χάλυβας	203000	0.30	348

Γεωμετρία μοντέλου

Η γεωμετρία του μοντέλου είναι ίδια με αυτή που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 3.2.2. Οι διαστάσεις του μοντέλου είχαν τις ακόλουθες τιμές:

- $l=500$ μήκος δοκιμίου [mm]
- $w=50$ πλάτος δοκιμίου [mm]
- $t=8.3$ πάχος δοκιμίου [mm]

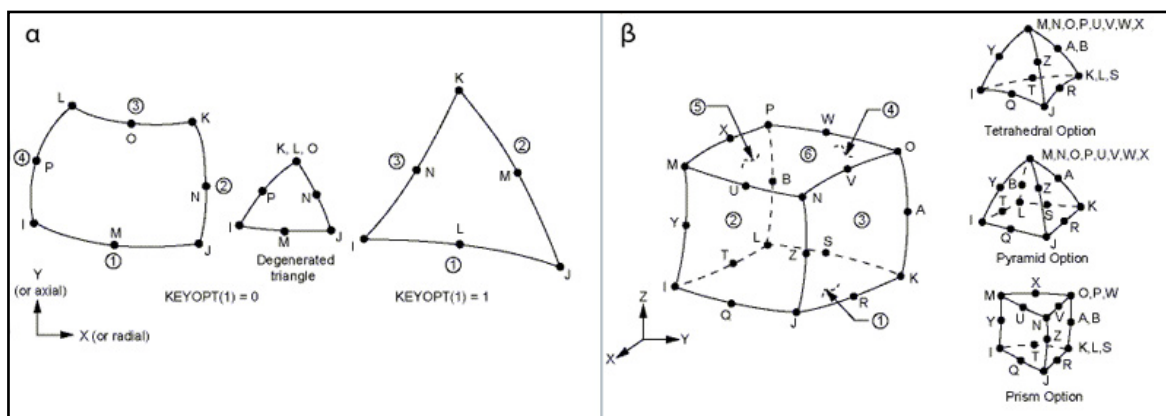
Αρχικά κατασκευάστηκε ένα δισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο από το οποίο δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο του, με προεκβολή κατά την διεύθυνση του πλάτους (διεύθυνση z) όλων των επιφανειών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Το τρισδιάστατο μοντέλο δημιουργήθηκε με προεκβολή όγκων (volume extrusion) από όλες τις επιφάνειες (areas) του δισδιάστατου μοντέλου.



Σχήμα 3.7: Αρχική και τελική γεωμετρία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

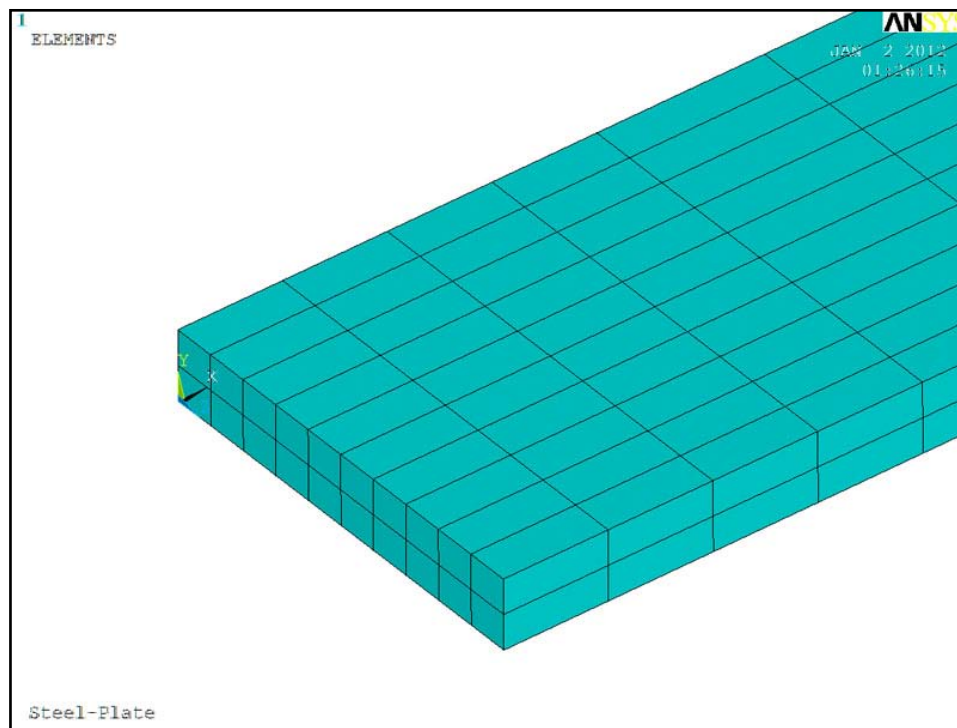
Επιλογή στοιχείων – Διακριτοποίηση

Αρχικά για το δισδιάστατο μοντέλο έγινε χρήση του δισδιάστατου στοιχείου PLANE183 (βλ. Σχήμα 3.8α). Το στοιχείο αυτό αποτελείται από οχτώ ή έξι κόμβους (8-node or 6-node) και έχει δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (δυο μετατοπίσεις). Η χρήση του χαρακτηρίζεται ως βοηθητική καθώς, όπως εξελίσσεται η πορεία δημιουργίας του μοντέλου, η επιφάνεια μετατρέπεται σε όγκο, μέσω της διαδικασίας της προεκβολής, με αποτέλεσμα η επιφάνεια και τα δισδιάστατα στοιχεία να παύουν να υπάρχουν και να μην παίζουν κανένα ρόλο στη διαδικασία της κυρίως επίλυσης. Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο στοιχείο είκοσι κόμβων (20-node) SOLID186 (βλ. Σχήμα 3.8β), που έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις x, y και z).

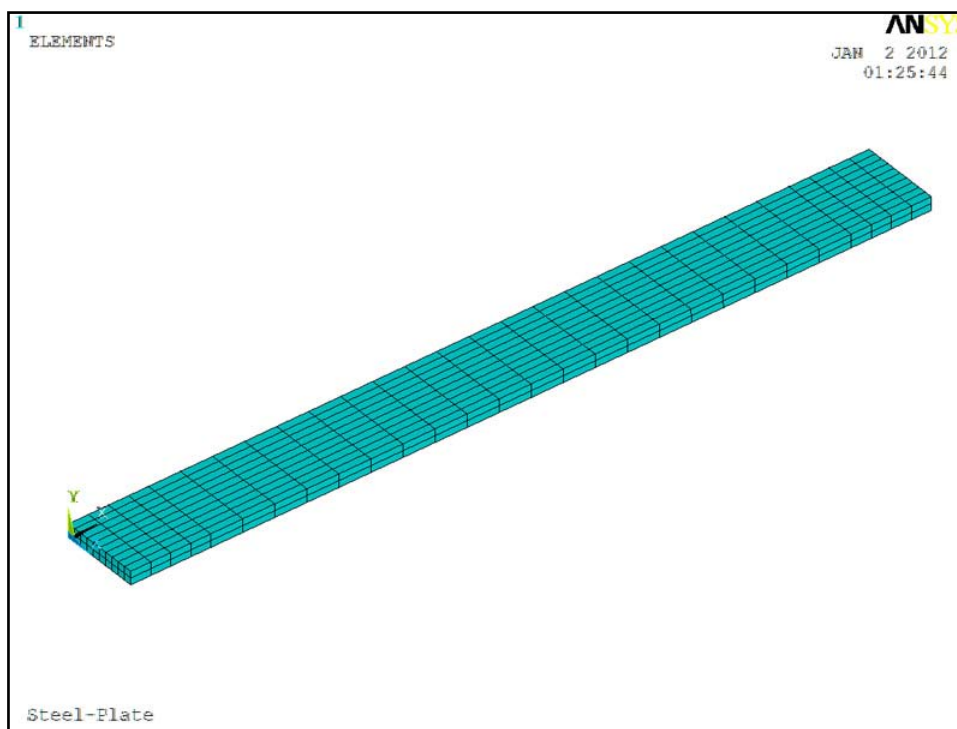


Σχήμα 3.8:α) Γεωμετρία στοιχείου PLANE183, β) γεωμετρία στοιχείου SOLID186.

Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεύθυνση του πάχους (διεύθυνση y) ήταν ίσος με 2, ενώ για τη διεύθυνση του πλάτους (διεύθυνση z) ίσος με 10 (βλ. Σχήμα 3.9). Για την διεύθυνση του μήκους χρησιμοποιήθηκαν 28 στοιχεία, από τα οποία 4 για κάθε περιοχή που εφαρμόζονταν οι αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού (βλ. Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.9: Αριθμός στοιχείων κατά την διεύθυνση του πάχους και του πλάτους.

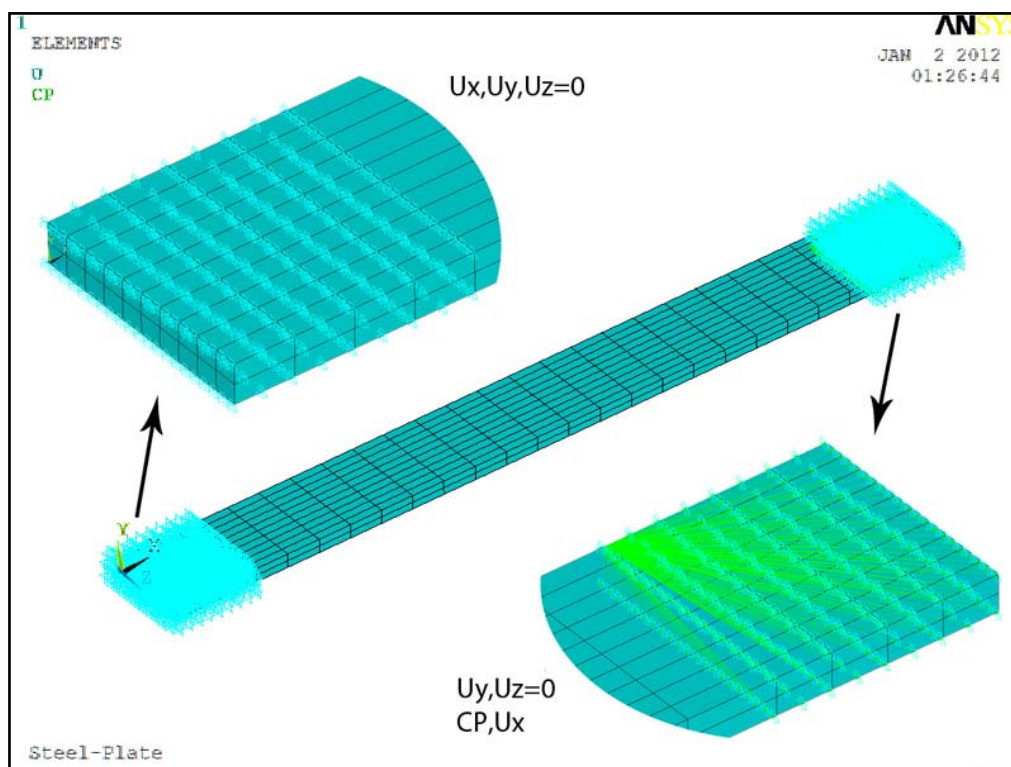


Σχήμα 3.10: Διακριτοποίηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Συνοριακές συνθήκες – Είδος Φόρτισης

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καθορίζουν εξίσου την πιστή προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται. Έτσι επιβλήθηκαν περιορισμοί ως προς την μετατόπιση στον x, y και z άξονα στους κόμβους της περιοχής του δοκιμίου που προσδένεται στην μια αρπάγη της μηχανής εφελκυσμού και περιορισμοί ως προς την μετατόπιση στον y και z άξονα στους κόμβους της περιοχής του δοκιμίου που προσδένεται στη δεύτερη αρπάγη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11.

Η φόρτιση επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης στα στοιχεία της περιοχής της δεύτερης αρπάγης με τη βοήθεια ενός τρίτου περιορισμού. Όλοι οι κόμβοι της περιοχής αυτής συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά την διάρκεια της φόρτισης να μετατοπίζονται ταυτόχρονα, μόνο ευθύγραμμα και παράλληλα ως προς τον άξονα x (Coupling, CP,Ux). Η τιμή της μετατόπισης στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε ίση με 0.4 mm για τη δοκιμή του εφελκυσμού και 0.2 mm για τη δοκιμή της θλίψης.



Σχήμα 3.11: Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Είδος Ανάλυσης

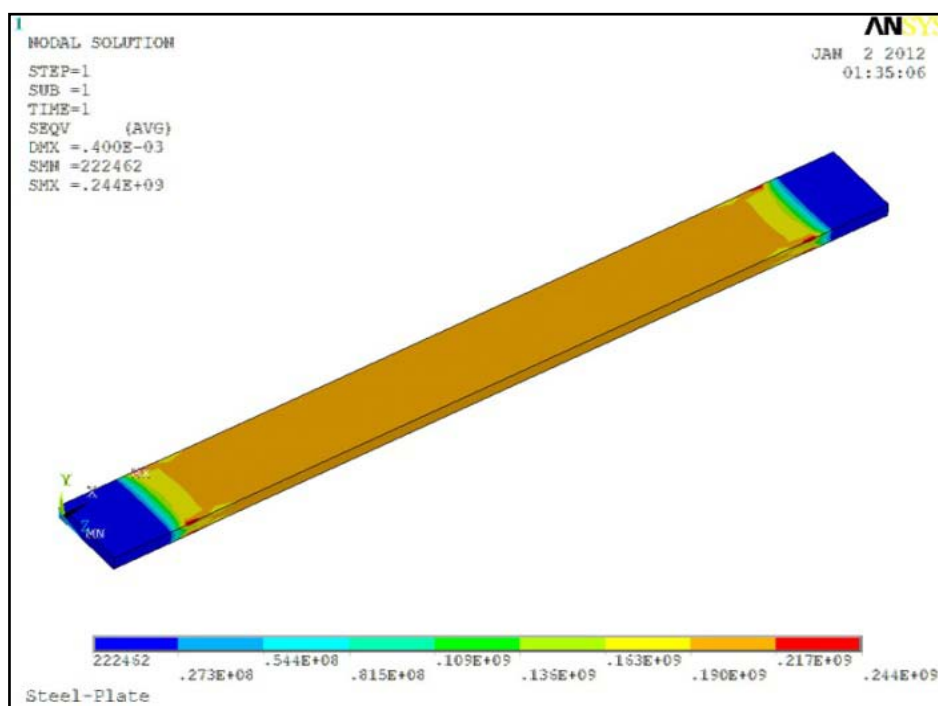
Για την προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται επιλέχθηκε η γραμμική ανάλυση, καθώς το δοκίμιο φορτίστηκε και στις δυο δοκιμές μόνο στην ελαστική του περιοχή. Η συνολική επιβαλλόμενη φόρτιση επιβάλλεται σε ένα βήμα, ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση στη δοκιμή εφελκυσμού και ως σταθερού ρυθμού θλιπτική μετατόπιση στη δοκιμή θλίψης.

3.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης – Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα

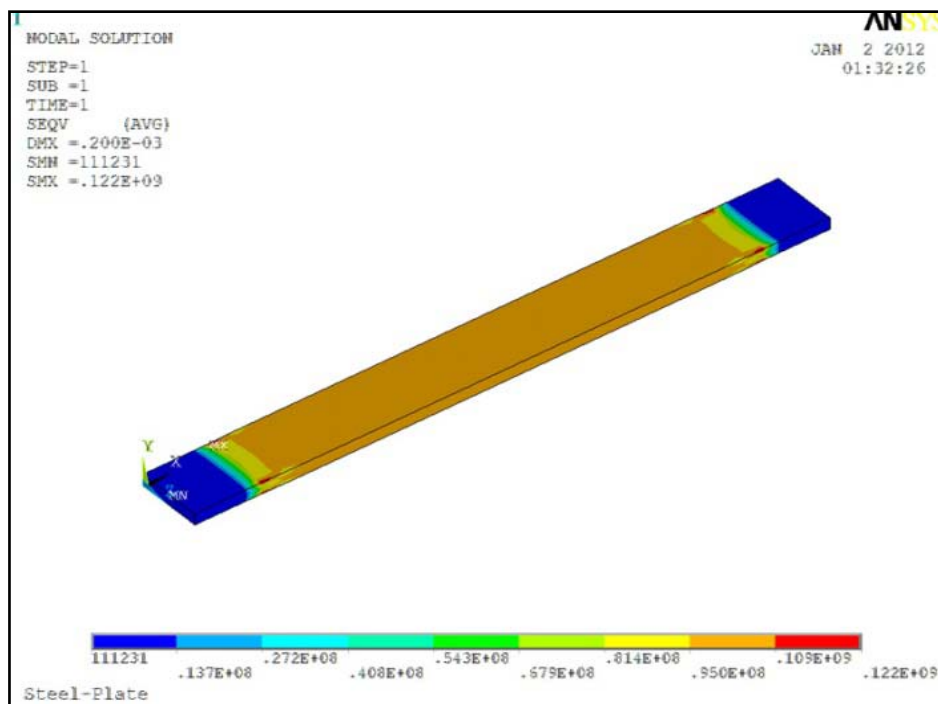
Τα μεγέθη που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν στην πειραματική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις με τη βοήθεια των τριών αισθητήρων (OF-1, SG-1 και SG-2). Κατά συνέπεια, για να γίνει η απαιτούμενη σύγκριση είναι αναγκαίο να εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Δημιουργείται όμως μια διαφορά στην απεικόνιση της επιμήκυνσης του δοκιμίου μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Οι πειραματικές μετρήσεις καταγράφουν την επιμήκυνση του δοκιμίου μαζί με το μήκος των εξαρτημάτων συγκράτησης και τις μικρές μετακινήσεις αυτών κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Από την άλλη μεριά, μοντελοποιώντας το δοκίμιο με τις συνοριακές συνθήκες που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι επόμενο στα εξαγόμενα αποτελέσματα να παρουσιάζεται μικρότερη επιμήκυνση από την πραγματική. Η διαφορά αυτή εξαλείφεται και οι καμπύλες μπορούν να συγκριθούν σε μεγάλο βαθμό αν πολλαπλασιαστεί η επιμήκυνση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με ένα διορθωτικό συντελεστή της τάξης του 1.8. Κατά συνέπεια, οι αντίστοιχες καμπύλες που θα παρουσιαστούν μετά, έχουν υποστεί την παραπάνω διόρθωση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με την μορφή σχημάτων. Στα Σχήματα 3.12α και 3.12β φαίνεται η κατανομή των τάσεων κατά von Mises του δοκιμίου για επιβαλλόμενο εφελκυστικό φορτίο της τάξης των 84 kN και για επιβαλλόμενο θλιπτικό φορτίο της τάξης των 42 kN αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση αναπτύσσονται τάσεις στο μέσο του δοκιμίου της τάξης των 190-217 MPa. Στην δεύτερη περίπτωση οι τάσεις που εμφανίζονται στο μέσο του δοκιμίου είναι της τάξης των 95-109 MPa. Και στις δυο περιπτώσεις οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται στα άκρα του δοκιμίου, έξω από τις περιοχές συγκράτησης της μηχανής εφελκυσμού. Ενώ σε όλο το ελεύθερο μήκος του δοκιμίου φαίνεται να αναπτύσσονται τάσεις ίδιας τάξης μεγέθους.

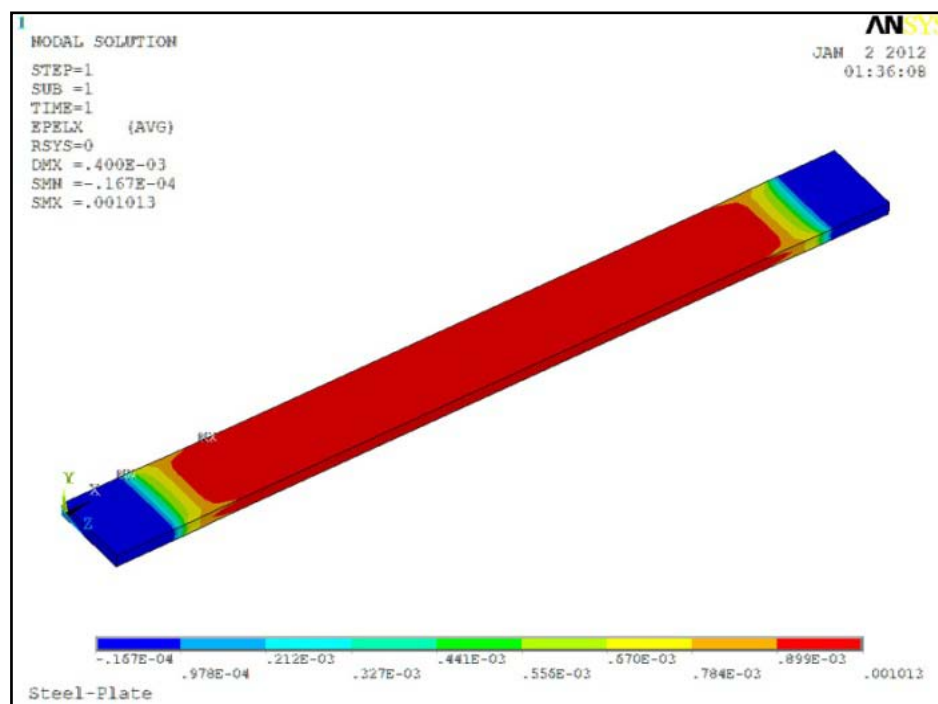


Σχήμα 3.12α: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises για εφελκυστικό φορτίο 84kN.

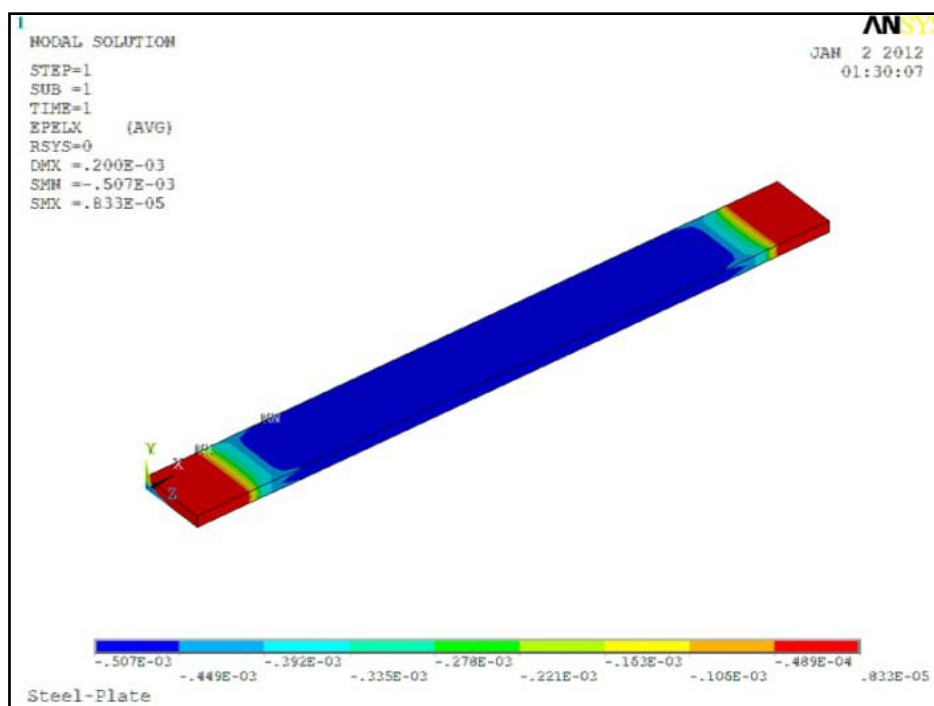


Σχήμα 3.12β: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises για θλιπτικό φορτίο 42 kN.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές των διαμήκων ελαστικών παραμορφώσεων για τις περιπτώσεις της εφελκυστικής και της θλιπτικής φόρτισης (βλ. Σχήματα 3.13α και β). Στην πρώτη περίπτωση αναπτύσσονται στο ελεύθερο μήκος του δοκιμίου ελαστικές παραμορφώσεις της τάξης των 900 έως 1000 $\mu\epsilon$, ενώ στην δεύτερη περίπτωση παραμορφώσεις της τάξης των -450 έως -500 $\mu\epsilon$.

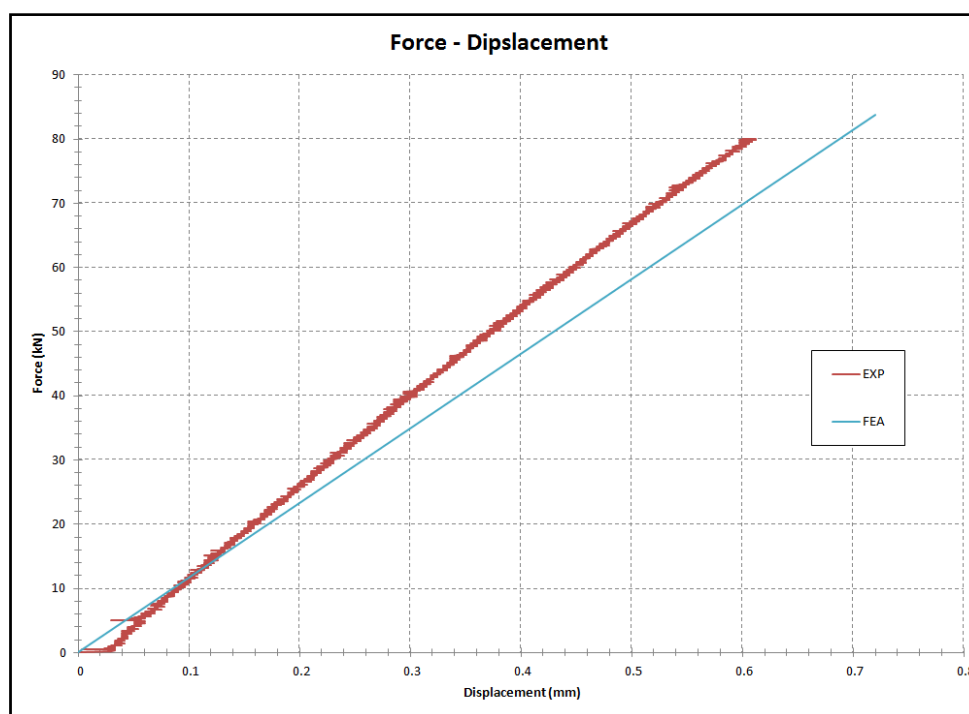


Σχήμα 3.13α: Κατανομή των ελαστικών διαμήκων παραμορφώσεων για εφελκυστικό φορτίο 84 kN.



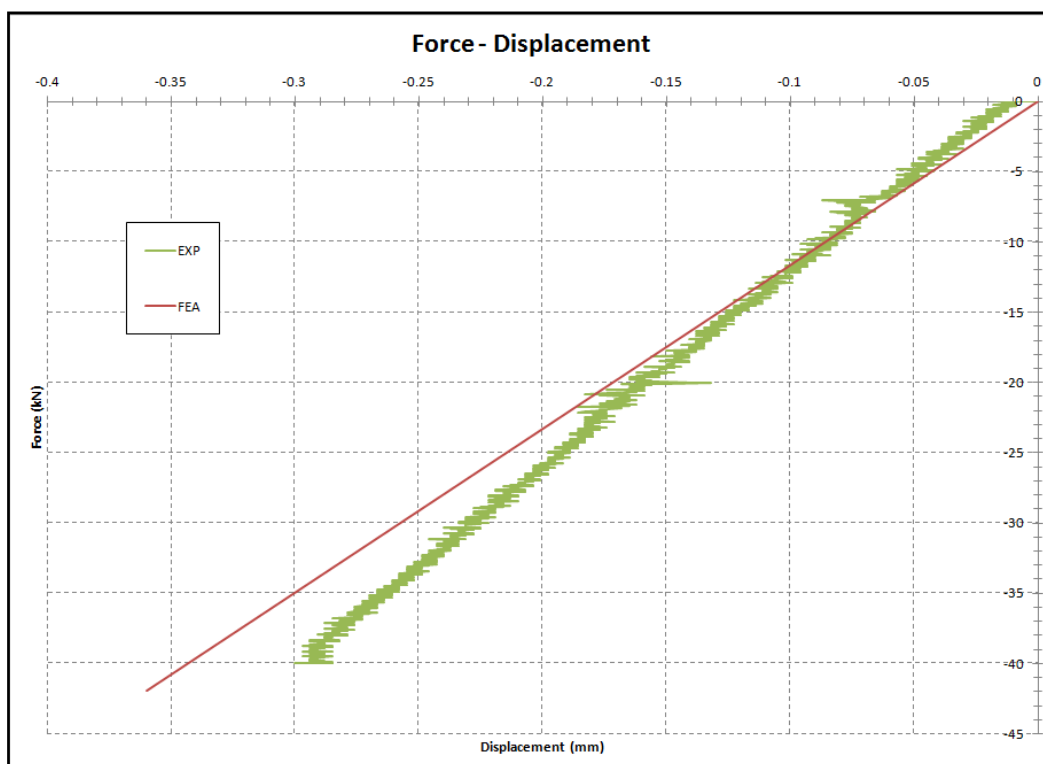
Σχήμα 3.13β: Κατανομή των ελαστικών διαμηκών παραμορφώσεων για θλιπτικό φορτίο 42 kN.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) παρατίθενται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων, συγκρίνοντάς τα ταυτόχρονα με τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών μετρήσεων (EXP). Η μεταβολή της επιμήκυνσης συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14, όπου γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 3.14: Καμπύλες φορτίου – Επιμήκυνσης.

Φαίνεται ότι υπάρχει μια απόκλιση μεταξύ των δυο μετρήσεων η οποία όμως δεν θεωρείται σημαντική. Τα ίδια ισχύουν και για την περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15.

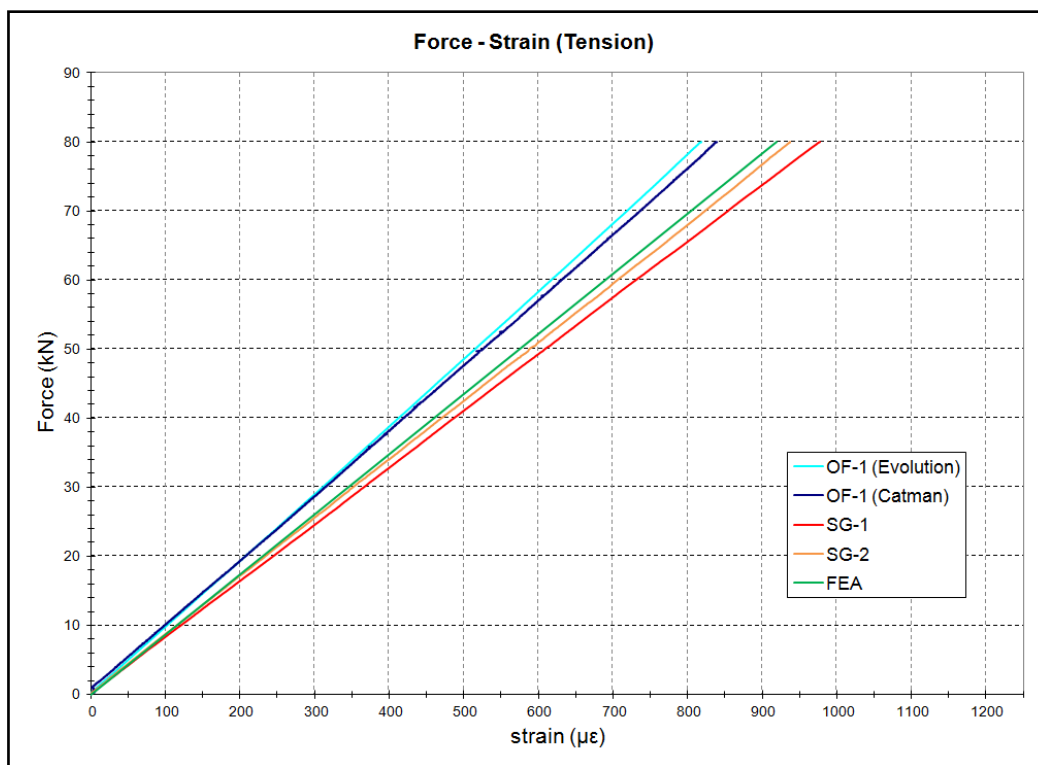


Σχήμα 3.15: Καμπύλες φορτίου – Μείωσης του μήκους του δοκιμίου.

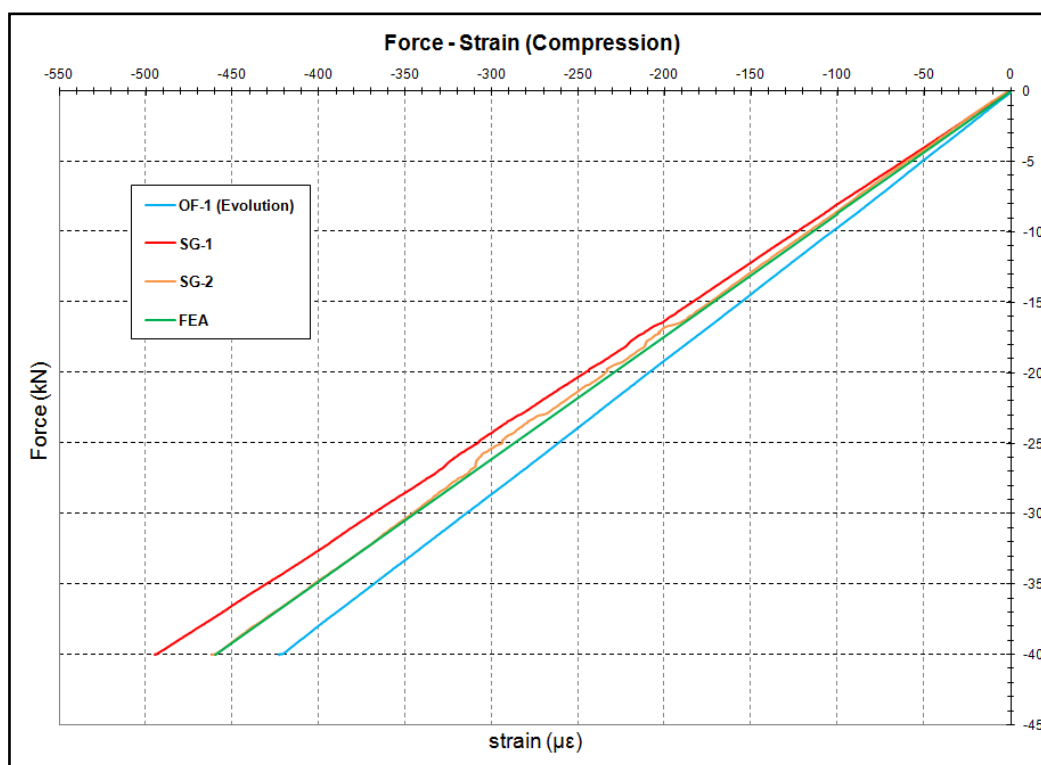
Γνωρίζοντας τις ακριβείς θέσεις των τριών αισθητήρων (OF-1, SG-1 και SG-2) που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των ζητούμενων μεγεθών κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής, επόμενο είναι να αναζητηθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα και στο αριθμητικό μοντέλο. Επομένως, οι τιμές αυτές εξήχθησαν από τους κόμβους που περικλείονται στις θέσεις των αισθητήρων. Λόγω όμως της ίδιας θέσης των αισθητήρων κατά το μήκος του δοκιμίου και επειδή δεν υπάρχει ιδιαίτερη διακύμανση των διαμηκών παραμορφώσεων στο σημείο αυτό, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών αυτών. Έτσι στα διαγράμματα που ακολουθούν, οι μετρήσεις από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων θα απεικονίζονται με μια καμπύλη.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 3.16 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για την εφελκυστική φόρτιση, βρίσκονται πολύ κοντά στις μετρήσεις του ηλεκτρικού επιμηκυνσιόμετρου SG-2, ενώ έχουν την ίδια περίπου απόκλιση από τις μετρήσεις του αισθητήρα της οπτικής ίνας OF-1 και του ηλεκτρικού επιμηκυνσιόμετρου SG-1.

Για την περίπτωση της θλιπτικής φόρτισης (βλ. Σχήμα 3.17), προκύπτουν παρόμοια συμπεράσματα. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης ταυτίζονται με τις μετρήσεις του ηλεκτρικού επιμηκυνσιόμετρου SG-2, ενώ έχουν πάλι την ίδια περίπου απόκλιση από τις μετρήσεις του αισθητήρα της οπτικής ίνας OF-1 και του ηλεκτρικού επιμηκυνσιόμετρου SG-1.



Σχήμα 3.16: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στις θέσεις των αισθητήρων για την εφελκυστική φόρτιση.



Σχήμα 3.17: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στις θέσεις των αισθητήρων για την θλιπτική φόρτιση.

Οι αποκλίσεις που προκύπτουν μεταξύ των μετρήσεων των αισθητήρων οπτικών ινών και των μετρήσεων των ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων μπορεί να οφείλονται στη λάθος τοποθέτηση τους. Υπάρχει η πιθανότητα ο αισθητήρας της οπτικής ίνας να μην τοποθετήθηκε παράλληλα στον διαμήκη άξονα του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να καταγράφει μόνο μια συνιστώσα της συνολικής παραμόρφωσης.

Υπάρχει όμως και η πιθανότητα οι αποκλίσεις αυτές να μην οφείλονται μόνο στην μη ορθή τοποθέτηση του εξωτερικού αισθητήρα τύπου Fabry-Perot. Η ποιότητα κατασκευής των οπτικών ινών αλλά και των αισθητήρων που τοποθετούνται σε αυτές έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην ορθότητα των μετρήσεων τους. Κατασκευαστικές βελτιώσεις μπορούν να επιφέρουν μείωση των αποκλίσεων μεταξύ των μετρήσεων των οπτικών ινών και των συμβατικών ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων. Είναι μεγάλης σημασίας, για την συνολική απόδοση του κάθε αισθητήρα οπτικής ίνας και ο καθορισμός του σωστού μήκους αναφοράς του (gage factor). Κάθε αισθητήρας έχει έναν συγκεκριμένο μήκος αναφοράς που θα μπορούσε να βαθμονομηθεί και να επηρεάσει θετικά την ευαισθησία του αισθητήρα [28]. Θα ήταν θεμιτό δηλαδή, να πραγματοποιείται μια βαθμονόμηση του μήκους αναφοράς του αισθητήρα για την ευαισθησία του στις παραμορφώσεις, πριν από κάθε χρήση. Το λογισμικό πρόγραμμα Evolution, διαθέτει την δυνατότητα αυτή, η οποία όμως χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

Κεφάλαιο 4

2^η Εφαρμογή Κολητός Σύνδεσμος Μετάλλου με Μέταλλο (Single Lap Joint), σε Εφελκυσμό

4.1 Εισαγωγή

Οι κολητοί σύνδεσμοι προσφέρουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μηχανικές ενώσεις (βίδες, ήλους, κτλ). Αυτά τα πλεονεκτήματα οφείλονται στο γεγονός ότι το κολητικό μέσο είναι ένα είδος πολυμερούς που συνδέει δύο μεταλλικές επιφάνειες (και όχι μόνο), σχηματίζοντας μια σύνδεση με ιξώδο-ελαστικές ιδιότητες. Η σύνδεση είναι συνεχής, που σημαίνει ότι κατά την φόρτιση υπάρχει πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στην περιοχή της σύνδεσης σε σχέση με τις μηχανικές ενώσεις. Στις μηχανικές ενώσεις εμφανίζονται συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από οπές ή συγκολλημένα σημεία. Ως εκ τούτου οι χημικά συνδεδεμένες κατασκευές μπορεί να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής υπό φόρτιση.

Στην εφαρμογή αυτή μελετήθηκε η στατική συμπεριφορά ενός κολητού συνδέσμου μετάλλου με μέταλλο σε εφελκυσμό. Χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες οπτικών ινών για την καταγραφή των διαμήκων παραμορφώσεων στην περιοχή του κολητικού μέσου μεταξύ των δυο μετάλλων. Στην αρχή γίνεται αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και στην γεωμετρία του δοκιμίου. Έπειτα αναλύεται ο τρόπος κατασκευής του δοκιμίου αλλά και ο τρόπος τοποθέτησης των αισθητήρων. Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα της πειραματικής δοκιμής και τέλος αναπτύσσεται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αυτά του πειράματος.

4.2 Σχεδιασμός Εφαρμογής

4.2.1 Υλικά

Για την κατασκευή του τελικού δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε κοινός χάλυβας με μέτρο ελαστικότητας E_{st} , ίσο με 203 GPa και με όριο διαρροής σ_o , ίσο με 348 MPa.

Το κολητικό μέσο (adhesive) που χρησιμοποιήθηκε για την κόλληση των δύο χαλύβδινων δοκιμίων αλλά και των tabs, ήταν η εποξική κόλλα δύο συστατικών Araldite 2030. Πρόκειται για κόλλα πολλαπλών χρήσεων υψηλής αντοχής και σκληρότητας, με χρόνο

κατεργασίας (pot life) 100 min (100g) σε θερμοκρασία δωματίου και χρόνο πολυμερισμού (curing time) 16 h στους 40°C. Έχει μέτρο ελαστικότητας (E_{adh}) ίσο με 1 GPa και όριο διαρροής σ_0 , ίσο με 16 MPa.

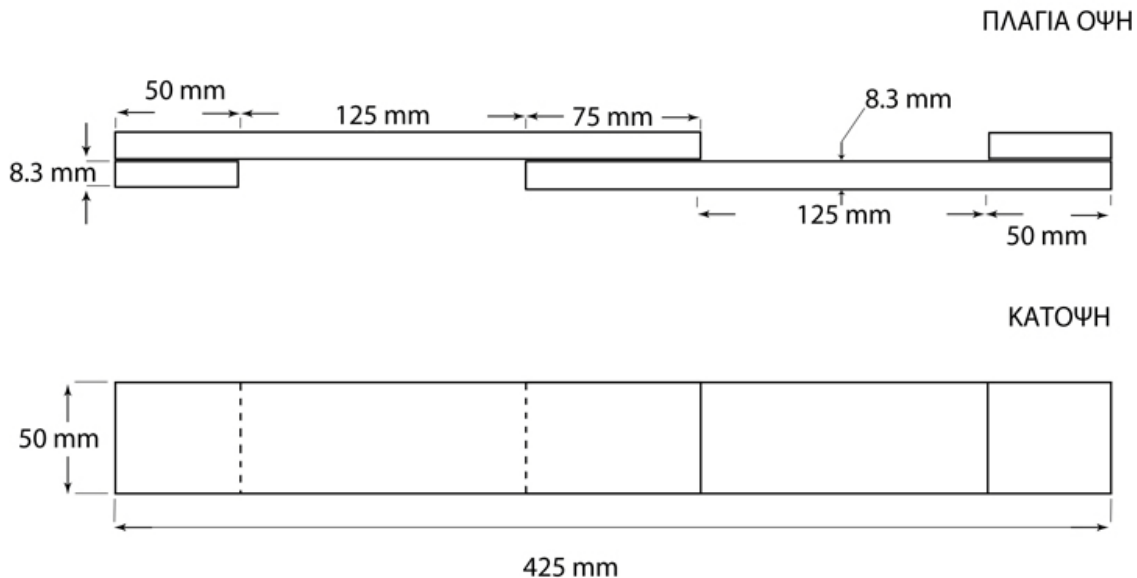
Για να υπάρχει ισοκατανεμημένη ποσότητα κόλλας όταν ενώθηκαν τα δύο μέταλλα στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης (overlap) αλλά και στα σημεία που τοποθετήθηκαν τα tabs, χρησιμοποιήθηκαν μικρά κομμάτια σύρματος (spacers) διαμέτρου 1 mm.

Κατά τη διαδικασία της κόλλησης των δύο μετάλλων χρησιμοποιήθηκαν αυτοσχέδιοι αποστάτες από πεπισμένο αφρώδες υλικό (karapount), ούτως ώστε να επιτευχτεί με ακρίβεια το επιθυμητό μήκος αλληλοεπικάλυψης.

Τέλος για τον υπολογισμό των διαμήκων παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν δυο αισθητήρες οπτικών ινών, οι οποίοι τοποθετήθηκαν μέσα στο κολλητικό μέσο και ένα ηλεκτρικό επιμηκυσιόμετρο που τοποθετήθηκε στο ένα εκ των δυο χαλύβδινων σκελών. Οι αισθητήρες οπτικών ινών ήταν εξωτερικοί, τύπου Fabry-Perot και συγκεκριμένα το μοντέλο FOS-N-NS-654D της εταιρίας FISO Technologies (με σειριακούς αριθμούς SF 10216, SF 10247), με εύρος καταγραφής τα ± 5000 με. Το ηλεκτρικό επιμηκυσιόμετρο (strain gage) ήταν τύπου KFG-5-120-C1-11L1M2R της εταιρίας KYOWA, με μήκος αναφοράς (gage length) 2 mm.

4.2.2 Γεωμετρία

Η γεωμετρία του τελικού δοκιμίου, καθώς και οι κύριες διαστάσεις αυτού φαίνονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία δοκιμίου.

Το ονομαστικό πάχος όλων των χαλύβδινων μερών (μεγάλα σκέλη, tabs) είναι 8.3 mm. Το συνολικό μήκος του δοκιμίου είναι 425 mm. Τα μεγαλύτερα σκέλη είναι ίδιων διαστάσεων και έχουν μήκος 250 mm. Τα tabs είναι τετράγωνα κομμάτια με μήκος πλευράς

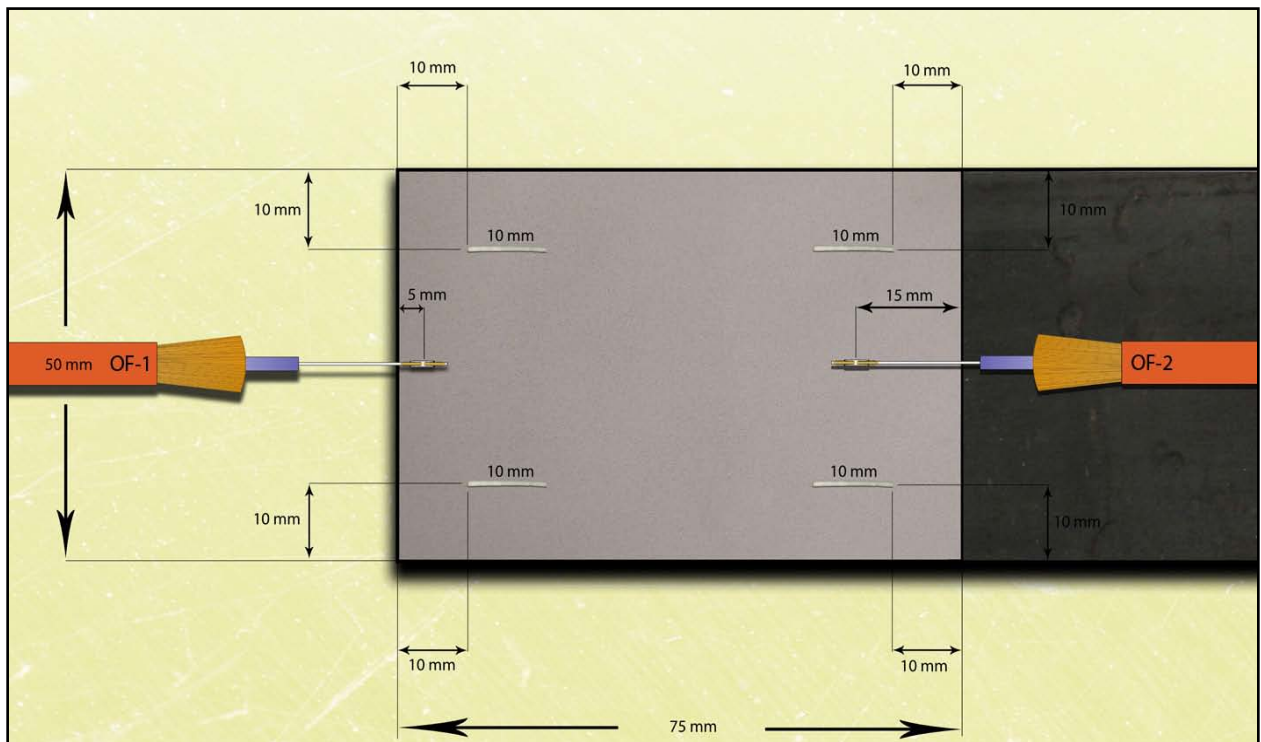
50 mm. Το μήκος της αλληλοεπικάλυψης (overlap) των δυο μετάλλων είναι 75 mm. Η απόσταση των tabs από την αλληλοεπικάλυψη είναι 125 mm. Τέλος το πάχος του κολλητικού μέσου καθορίστηκε στο 1 mm με την βοήθεια των spacers.

4.2.3 Σχεδιασμός Δοκιμής και Κατασκευή Δοκιμίου

Αρχικά έγινε ο σχεδιασμός για τις θέσεις που θα τοποθετούνταν οι οπτικές ίνες και το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο. Η περιοχή ενδιαφέροντος ήταν η αλληλοεπικάλυψη των δυο μετάλλων και συγκεκριμένα η περιοχή του κολλητικού μέσου. Χρησιμοποιήθηκαν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δυο οπτικές ίνες (optical fibers, OF) και ένα επιμηκυνσιόμετρο (strain gage, SG).

Σύμφωνα με το σχεδιασμό του πειράματος, οι οπτικές ίνες τοποθετήθηκαν ως εξής (βλ. Σχήμα 4.2):

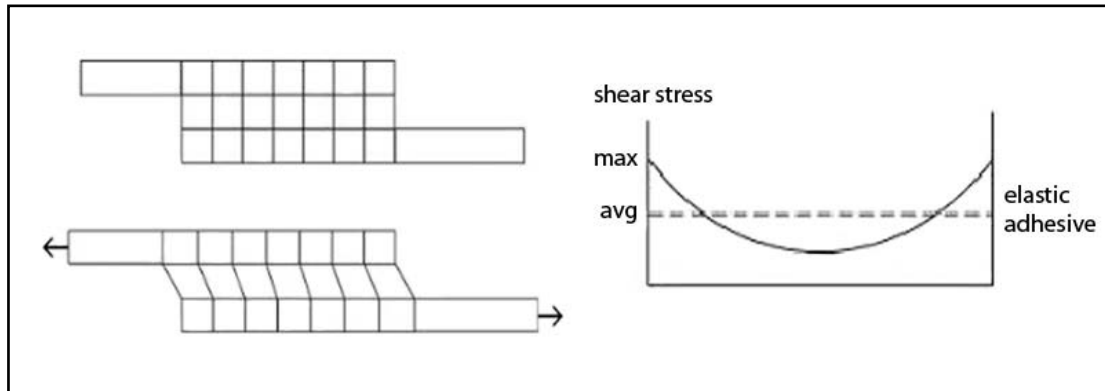
- Η οπτική ίνα 1 (OF-1), μέσα στην κόλλα και συγκεκριμένα 5 mm εσωτερικά της αλληλοεπικάλυψης και στο μέσο του πλάτους του δοκιμίου.
- Η οπτική ίνα 2 (OF-2), μέσα στην κόλλα και συγκεκριμένα 15 mm εσωτερικά της αλληλοεπικάλυψης και στο μέσο του πλάτους του δοκιμίου, αντίθετα από την οπτική ίνα 1.



Σχήμα 4.2 : Σχεδιασμός θέσεων αισθητήρων οπτικών ίνων στο δοκίμιο (κάτοψη overlap).

Οι θέσεις των οπτικών αισθητήρων επιλέχθηκαν υπολογίζοντας τον τρόπο που κατανέμονται οι τάσεις στην περιοχή της κόλλας κατά την φόρτιση του δοκιμίου. Οι διατμητικές τάσεις στην περιοχή της σύνδεσης, δεν κατανέμονται ομοιόμορφα αλλά παρατηρείται το φαινόμενο υστέρησης της διάτμησης (shear lag effect). Η ασκούμενη δύναμη μεταφέρεται αρχικά μέσω των τμημάτων (adherends) που έχουν συγκεκριμένη διατομή. Στην συνέχεια όμως καθώς η δύναμη μεταφέρεται στη ένωση περνάει σε περιοχή με μεγαλύτερη διατομή, με αποτέλεσμα οι τάσεις όσο και οι παραμορφώσεις να γίνονται

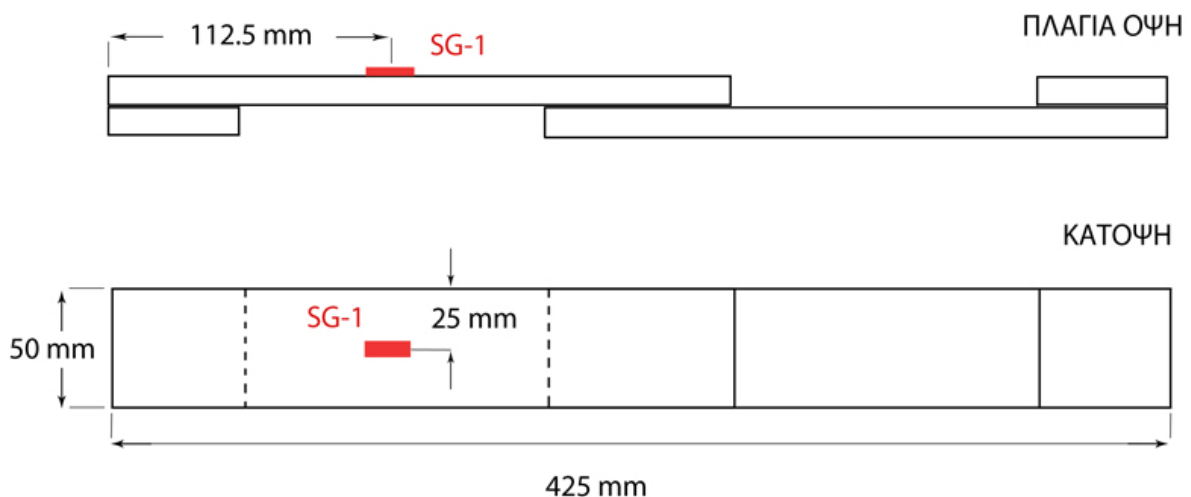
μικρότερες. Αυτή η μεταβολή προκαλεί μέγιστες τιμές διατμητικής τάσης στα άκρα της ένωσης, μέσα στην κόλλα και συνεπώς μέγιστες παραμορφώσεις στα σημεία αυτά (βλ. Σχήμα 4.3)[29].



Σχήμα 4.3: Φαινόμενο Shear lag και κατανομή διατμητικών τάσεων στο κολλητικό μέσο κατά το μήκος της αλληλοεπικάλυψης.

Έτσι λοιπόν ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 1 τοποθετήθηκε όσο το δυνατόν πιο κοντά στο άκρο της αλληλοεπικάλυψης (5 mm), όπου αναμένονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 2 πιο εσωτερικά (15 mm), όπου αναμένονται χαμηλότερες τιμές παραμορφώσεων.

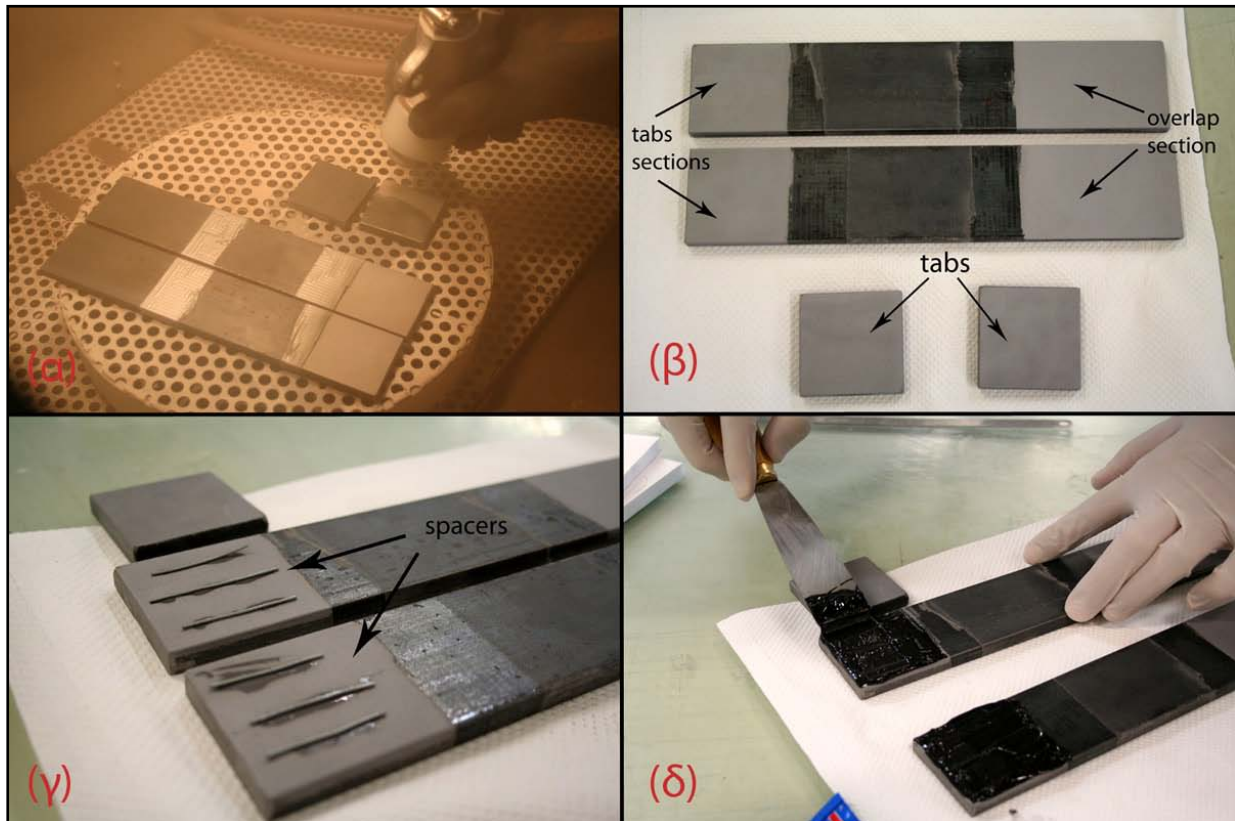
Το ηλεκτρικό επιμηκυσσιόμετρο (SG-1) τοποθετήθηκε στο σημείο που φαίνεται στο σχήμα 4.4, ούτως ώστε να καταγράφει τα φορτία που παραλαμβάνονται από το δοκίμιο, να δώσει μια εικόνα του τρόπου μεταφοράς του φορτίου από το χαλύβδινο σκέλος προς την σύνδεση, καθώς και για την επαλήθευση των μετρήσεων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 4.4 : Θέση ηλεκτρικού επιμηκυσσιόμετρου SG-1.

Έπειτα ξεκίνησαν οι απαραίτητες διεργασίες για την κατασκευή του δοκιμίου και την τοποθέτηση των αισθητήρων. Στο πρώτο στάδιο έγινε αμμοβολή στα δύο χαλύβδινα σκέλη του δοκιμίου και στα tabs ούτως ώστε να αυξηθεί η τραχύτητα στις περιοχές όπου θα γινόταν η κόλληση και συνεπώς η αντοχή της σύνδεσης. Από ένα σύρμα διαμέτρου 1 mm κόπηκαν τέσσερα μέρη μήκους 10 mm και έξι μέρη μήκους 30 mm (spacers), για να χρησιμοποιηθούν

στις περιοχές κόλλησης και να οριοθετήσουν την απόσταση μεταξύ των κολλημένων επιφανειών. Τα μεγαλύτερα κομμάτια σύρματος τοποθετήθηκαν στις περιοχές που θα κολληθούν τα tabs και κολλήθηκαν με κυανοακρυλική κόλλα ταχείας πήξεως. Έπειτα τοποθετήθηκε η κόλλα Araldite 2030 με την χρήση σπάτουλας και έγινε η συγκόλληση των tabs με τα χαλύβδινα σκέλη (βλ. Εικόνα 4.1). Τοποθετήθηκαν σφιγκτήρες στα κολλημένα σκέλη και μπήκαν στον φούρνο για 16 ώρες στους 40°C.

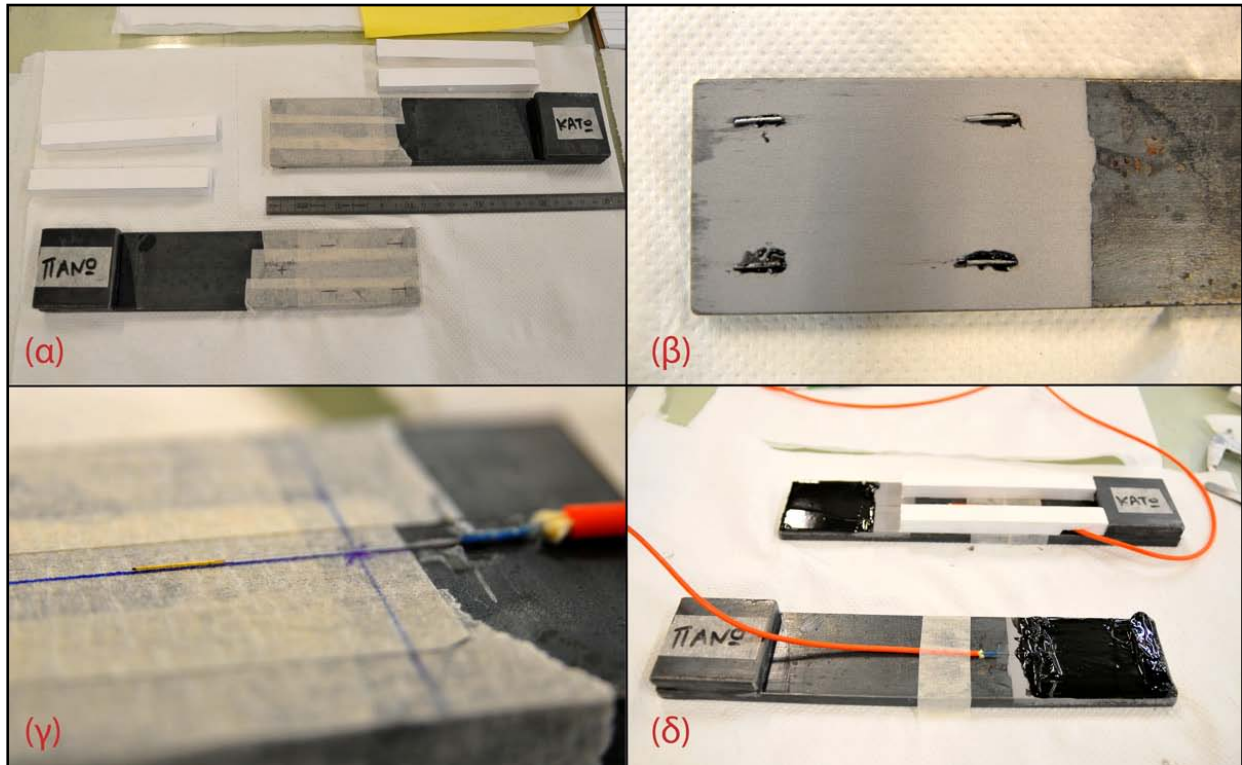


Εικόνα 4.1: Πρώτο στάδιο εργασιών στο δοκίμιο.

Όταν βγήκαν τα σκέλη από τον φούρνο καλύφθηκαν οι αμμοβολημένες επιφάνειες της αλληλοεπικάλυψης με χαρτοταινία, ούτως ώστε να μην έρχονται σε επαφή με τον αέρα και οξειδωθούν μέχρι να γίνουν οι επόμενες εργασίες. Παράλληλα, συνδέθηκαν στον βασικό εξοπλισμό καταγραφής οι οπτικές ίνες για να επιβεβαιωθεί η ορθή λειτουργία τους πριν την τελική τους τοποθέτηση στο δοκίμιο. Κόπηκαν τέσσερα κομμάτια αφρώδους υλικού karomunt που θα χρησιμοποιούνταν ως αποστάτες, με διαστάσεις 125 mm x 15 mm (125 mm είναι η απόσταση των tabs από το overlap) για να εξασφαλίσουν ότι το μήκος του overlap θα είναι ακριβώς 75 mm. Χαράχτηκαν έπειτα πάνω στα σκέλη και στην χαρτοταινία οι θέσεις των αισθητήρων και των spacers σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό (βλ. Σχήμα 4.2).

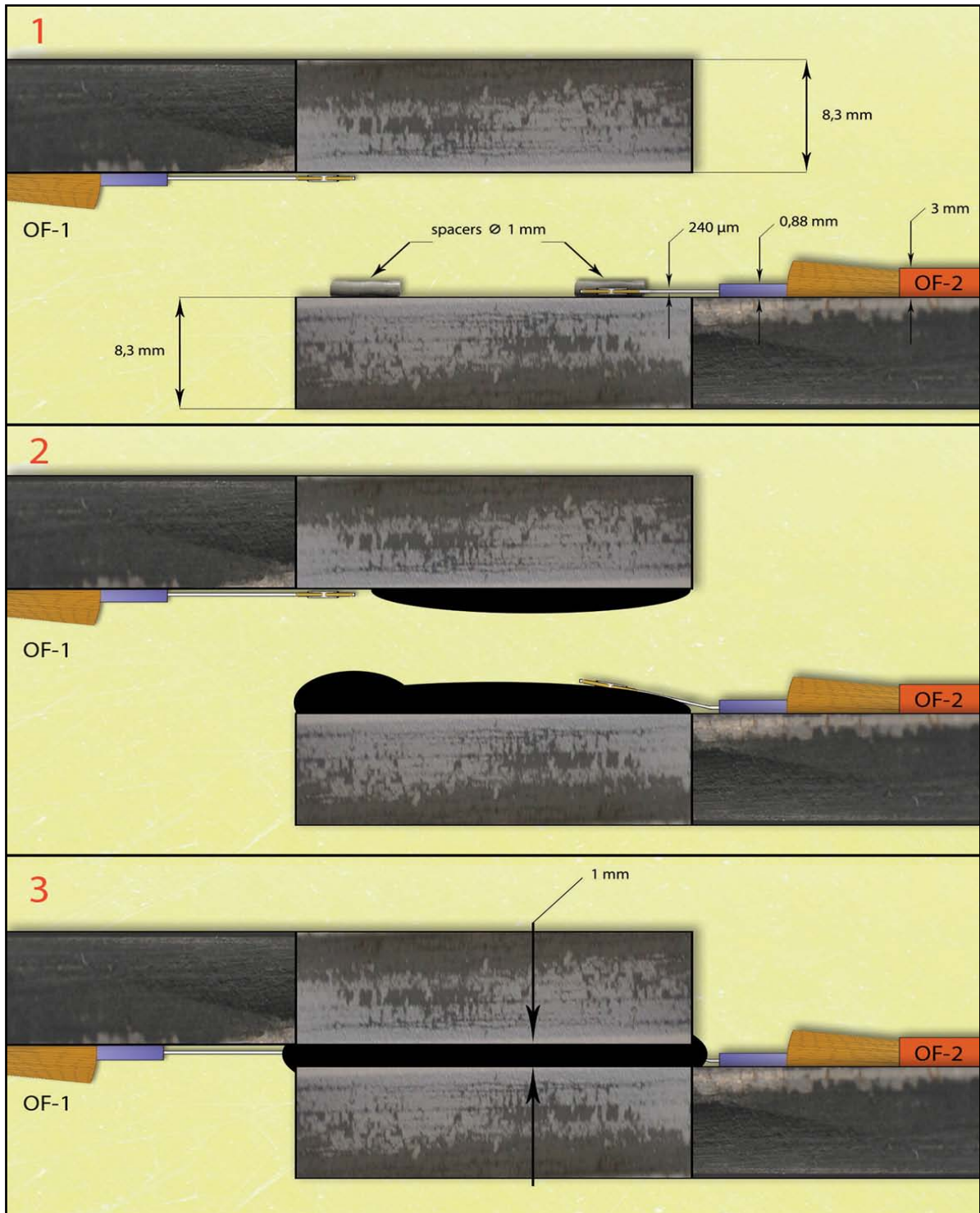
Στο δεύτερο στάδιο έγινε η τοποθέτηση των οπτικών αισθητήρων. Στο πρώτο χαλύβδινο σκέλος κολλήθηκε η πρώτη ίνα στην προβλεπόμενη θέση με κυανοακρυλική κόλλα (η κόλλα τοποθετήθηκε κάτω από την μπλε επικάλυψη) και χαρτοταινία και στο δεύτερο τοποθετήθηκαν τα μικρότερα spacers που είχαν κοπεί νωρίτερα. Αυτά κολλήθηκαν με την κόλλα Araldite 2030 και όχι με την κυανοακρυλική όπως έγινε στα tabs για να μην υπάρχουν δυο διαφορετικές φάσεις από δύο διαφορετικά κολλητικά μέσα στην περιοχή του overlap. Μετά, το σκέλος με τα spacers τοποθετήθηκε για μια ώρα στον φούρνο στους 70°C για να πολυμεριστεί η κόλλα. Παράλληλα φτιάχτηκε μια αυτοσχέδια ορθογωνική βάση, όπου

θα τοποθετούνταν το τελικό δοκίμιο και θα εξασφαλιζόταν η σταθερή και παράλληλη θέση των κολλημένων σκελών (adherends), μέχρι το τέλος της διάρκειας πολυμερισμού της κόλλας. Όταν βγήκε το σκέλος με τα spacers από τον φούρνο τοποθετήθηκε και σε αυτό ο οπτικός αισθητήρας με την χρήση κολλητικής ταινίας, καθώς και οι δύο αποστάτες από karatount. Αφαιρέθηκαν οι χαρτοταινίες και καθαρίστηκαν οι επιφάνειες συγκόλλησης με καθαριστικό σπρέι επιφανειών τύπου Loctite 7063 έτσι ώστε να τοποθετηθεί το κολλητικό μέσο (Araldite 2030) και στις δυο επιφάνειες (βλ. Εικόνα 4.2).



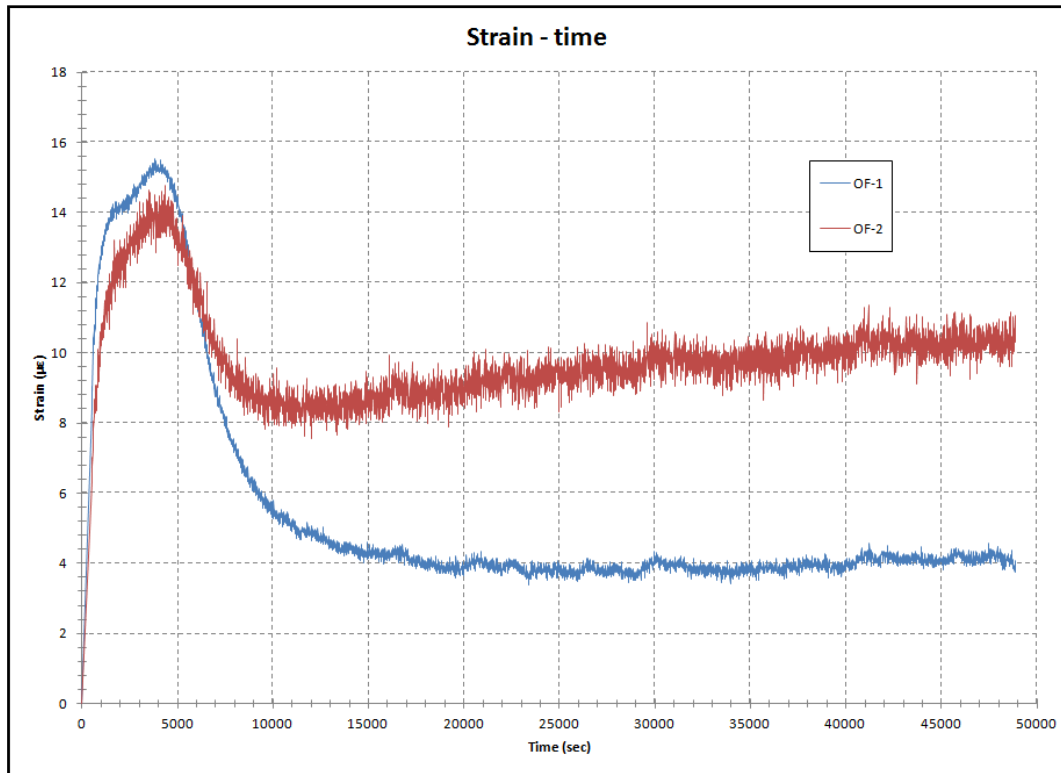
Εικόνα 4.2: Δεύτερο στάδιο εργασιών στο δοκίμιο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναλυθεί λίγο περισσότερο ο τρόπος με τον οποίο τοποθετήθηκε το κολλητικό μέσο (adhesive) πάνω στα δυο δοκίμια. Για να γνωρίζουμε τις τελικές θέσεις των οπτικών ινών κατά το πάχος του κολλητικού μέσου (καθότι το τελικό επιθυμητό πάχος του κολλητικού μέσου θα ήταν 1 mm και το πάχος του πυρήνα των οπτικών ινών είναι 240 μm) ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Ο αισθητήρας OF-2 τοποθετήθηκε πάνω από την κόλλα που είχε τοποθετηθεί στο πρώτο δοκίμιο ενώ ο αισθητήρας OF-1 εφαπτόταν πάνω στο δεύτερο δοκίμιο. Με τις θέσεις αυτές, όταν κολλήθηκαν τα δυο δοκίμια, ο αισθητήρας OF-2 θα βρισκόταν στην μέση της κόλλας και ο αισθητήρας OF-1 στο κάτω μέρος της κόλλας σε σχέση με την επιφάνεια κόλλησης της κάθε μιας. Βέβαια, ακόμα και με τον τρόπο αυτό οι τελικές θέσεις των αισθητήρων δεν ήταν δεδομένες. Για το λόγο αυτό έγινε σχετική ανάλυση με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάζεται στο εδάφιο 4.5.2. Η παραπάνω διαδικασία γίνεται πιο κατανοητή με την βοήθεια του Σχήματος 4.5.



Σχήμα 4.5: Βήματα τοποθέτησης των αισθητήρων μέσα στην κόλλα (πλάγια όψη).

Υστερα, τοποθετήθηκαν και οι άλλοι δύο αποστάτες, κολλήθηκαν τα δύο σκέλη και τοποθετήθηκε όλο το δοκίμιο στην βάση του, όπου στερεώθηκε με δυο σφιγκτήρες. Μετά από 2h (χρόνος αναμονής για το αρχικό πήξιμο της κόλλας), μεταφέρθηκε το δοκίμιο μαζί με την βάση του στον φούρνο, όπου και παρέμεινε για 16h στους 40°C. Καθ' όλη την διάρκεια του πολυμερισμού της κόλλας στον φούρνο, οι οπτικές ίνες είχαν συνδεθεί με το σύστημα καταγραφής και κατέγραφαν τις παραμορφώσεις με ρυθμό δειγματοληψίας 0,1 Hz. Τα αποτελέσματα όλης της διαδικασίας φαίνονται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Καταγραφή των παραμορφώσεων κατά την διάρκεια πολυμερισμού της κόλλας μέσα στον φούρνο.

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του Σχήματος 4.6, η οπτική ίνα OF-1 (μπλε γραμμή) που βρίσκεται πιο κοντά στο άκρο της κόλλας, καταγράφει ελάχιστα μεγαλύτερες μέγιστες παραμορφώσεις σε σχέση με την οπτική ίνα OF-2 και έπειτα, μειούμενες, σταθεροποιούνται στα 4 με. Οι μετρήσεις της οπτικής ίνας 2 που βρίσκεται πιο εσωτερικά της κόλλας σταθεροποιούνται περίπου στα 10μμε. Οι παραμορφώσεις αυτές θεωρούνται αρκετά μικρές και δεν επιτρέπουν να διεξαχθεί κάποιο γενικό συμπέρασμα όσον αφορά τις παραμένουσες παραμορφώσεις μέσα στην κόλλα. Παρόλα αυτά θα μπορούσαμε να πούμε βλέποντας τις μετρήσεις ότι εξωτερικά η κόλλα πολυμερίζεται πιο γρήγορα σε αντίθεση με το πιο εσωτερικό τμήμα, όπου και εμφανίζονται μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις.

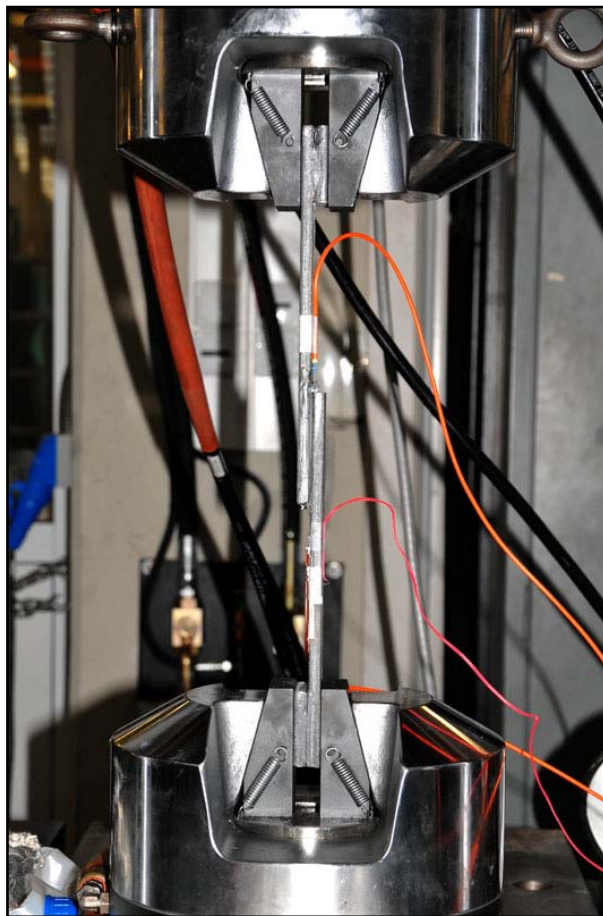
Αφού βγήκε το δοκίμιο από τον φούρνο αφαιρέθηκαν οι αποστάτες και λειάνθηκε με λειαντικό τροχό η περιοχή που θα τοποθετούνταν το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο (SG-1). Τέλος χαράχτηκε η θέση του και τοποθετήθηκε, ολοκληρώνοντας έτσι την διαδικασία κατασκευής και τοποθέτησης των αισθητήρων του δοκίμιου.

4.3 Παράμετροι Δοκιμής

Η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε στην υδραυλική μηχανή MTS του ENT η οποία είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002. Οι αρπάγες συγκράτησης του δοκιμίου είναι υδραυλικές.

Πριν από την πειραματική δοκιμή εφαρμόστηκε στο δοκίμιο μια προφόρτιση ίση με 14 kN, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά του δοκιμίου ως προς τον ρυθμό φόρτισης του. Η προφόρτιση αυτή επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης με ρυθμό 0,01 mm/min. Στην συνέχεια το δοκίμιο αποφορτίστηκε τελείως με κλιμακούμενη μείωση της εφελκυστικής φόρτισης. Η τελική φόρτιση επιβλήθηκε με τον ίδιο ρυθμό με την προφόρτιση. Η δοκιμή τελείωσε όταν ο σύνδεσμος αστόχησε και το κολλητικό μέσο σταμάτησε να συμβάλλει στην αντοχή του δοκιμίου.

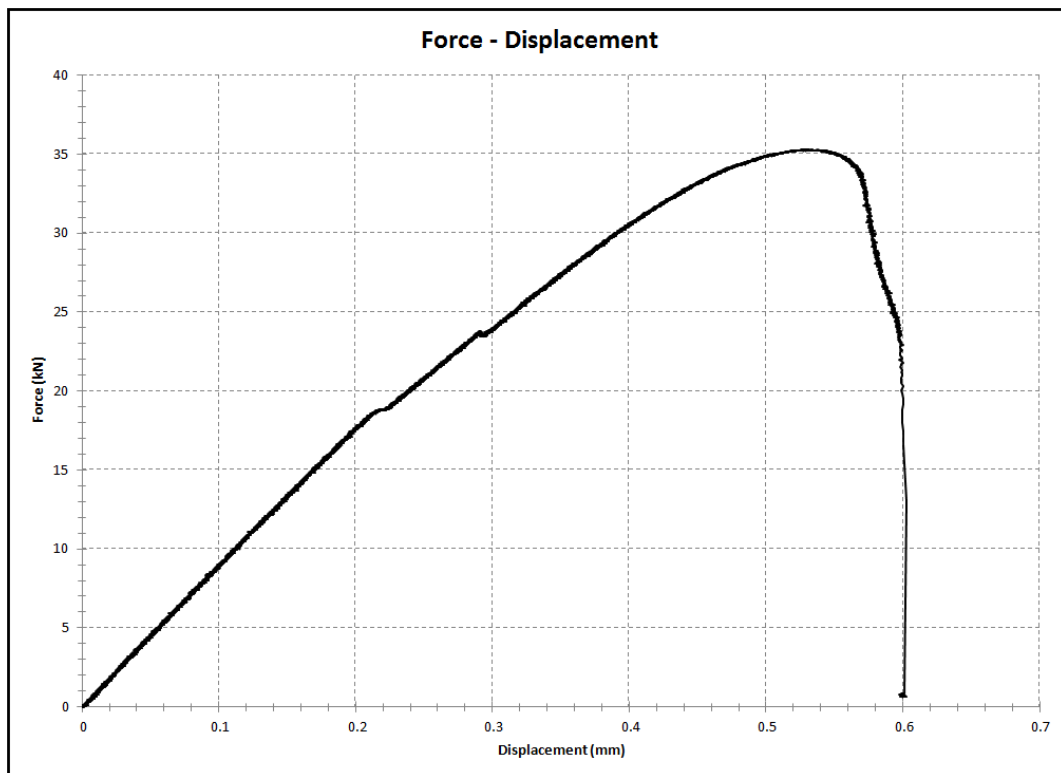
Στη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε μετρήθηκαν και καταγράφηκαν η εφαρμοζόμενη δύναμη, η επιμήκυνση του δοκιμίου, καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις στα σημεία της κόλλας και του χάλυβα, που έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της υδραυλικής μηχανής δοκιμών, ένα πρόσθετο εξωτερικό σύστημα Spider-8 της εταιρείας HBM, πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους, για την καταγραφή των δεδομένων από τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα, καθώς και το λογισμικό πρόγραμμα Evolution της εταιρείας FISO για την καταγραφή των μετρήσεων των οπτικών ινών.



Εικόνα 4.3: Το δοκίμιο τοποθετημένο στην υδραυλική μηχανή.

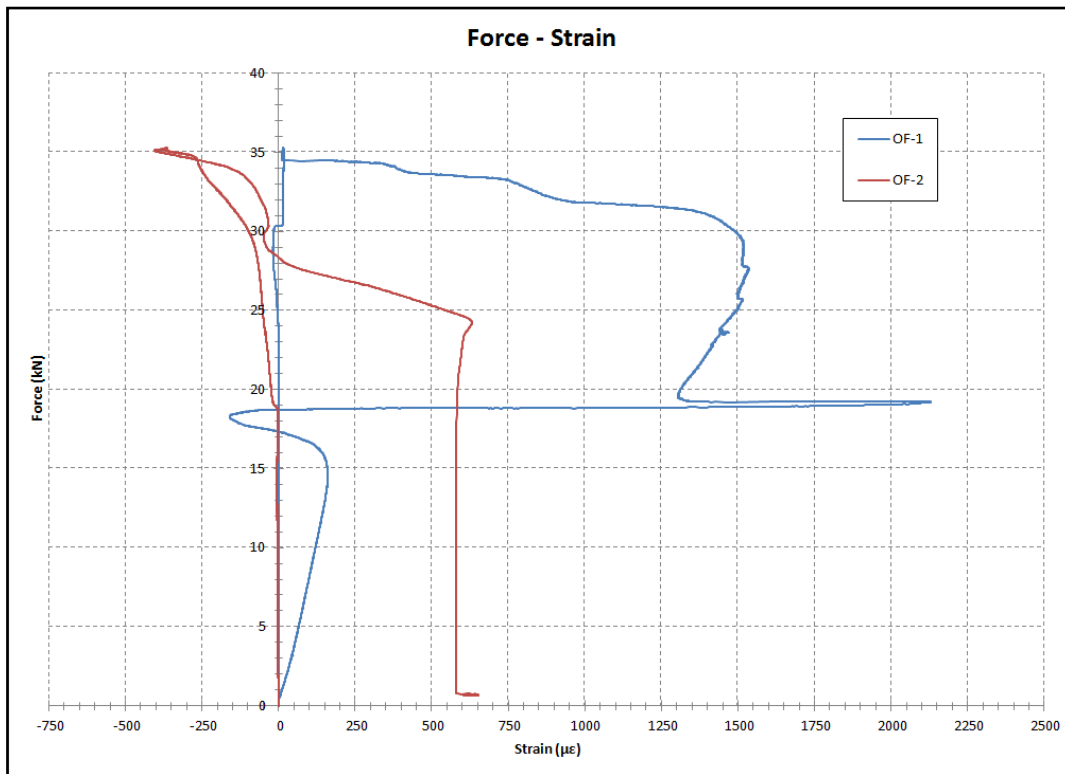
4.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Όλες οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται η συνολική απόκριση του δοκιμίου, με την μορφή της μεταβολής της συνολικής επιμήκυνσης του, (όπως αυτή μετρείται από το LVDT της μηχανής εφελκυσμού) συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης. Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι από το LVDT της μηχανής εφελκυσμού υπολογίζεται μεγαλύτερη μετατόπιση από αυτή που παραλαμβάνει πραγματικά το δοκίμιο και αυτό διότι προστίθενται στην μετατόπιση μεταξύ των αρπάγων και πολύ μικρές μετατοπίσεις των κοχλιών συγκράτησης της μηχανής. Παρατηρούμε την ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου μέχρι τα 18.5 kN περίπου, όπου αρχίζει και η είσοδος του στην πλαστική περιοχή. Στο σημείο αυτό παρατηρείται ένα μικρό «γόνατο» κατά το οποίο φαίνεται ότι το δοκίμιο επιμηκύνεται για την ίδια τιμή επιβαλλόμενης δύναμης. Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο ότι η φόρτιση επιβλήθηκε με την μορφή αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης που σημαίνει ότι το δοκίμιο επιμηκύνεται με έναν συγκεκριμένο ρυθμό, ανεξάρτητα από το πώς μεταβάλλεται η ασκούμενη δύναμη. Αυτό πιθανόν να συμβαίνει λόγω κάποιας τοπικής αστοχίας στην περιοχή της κόλλας (overlap). Έπειτα η επιμήκυνση μεταβάλλεται γραμμικά μέχρι τα 23.5 kN, όπου παρατηρείται και πάλι το ίδιο φαινόμενο. Η παρουσία και δεύτερου «γόνατου» υποδηλώνει και δεύτερη τοπική αστοχία στην περιοχή της κόλλας. Η πιθανότητα η αστοχία να συμβαίνει σε κάποιο από τα χαλύβδινα σκέλη απορρίπτεται, λόγω της σχετικά χαμηλής φόρτισης για τον χάλυβα (ελαστική περιοχή). Στην συνέχεια η επιμήκυνση αυξάνεται, αυξανόμενης της επιβαλλόμενης φόρτισης μέχρι τα 35 kN περίπου, όπου καταγράφεται το μέγιστο φορτίο. Η επιβαλλόμενη δύναμη αρχίζει έπειτα και ελαττώνεται μέχρι την τιμή των 23 kN, όπου το δοκίμιο τελικά αστοχεί έχοντας επιμηκυνθεί συνολικά 0.6 mm.



Σχήμα 4.7: Μεταβολή της επιμήκυνσης του δοκιμίου συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης.

Οι παραμορφώσεις, στις θέσεις που τοποθετήθηκαν οι δύο αισθητήρες οπτικών ινών, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.



Σχήμα 4.8 : Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στις θέσεις των OF-1 και OF-2.

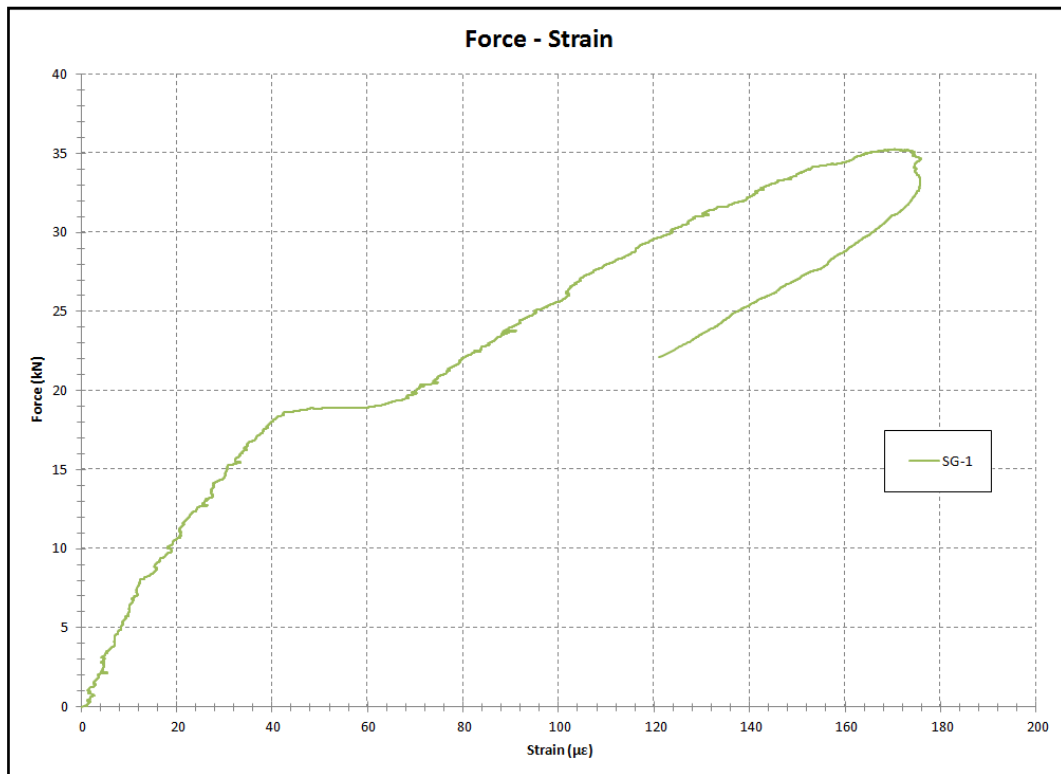
Παρατηρείται ότι η οπτική ίνα 1 (OF-1) καταγράφει αρχικά εφελκυστικές παραμορφώσεις, μετατρέπόμενες σε θλιπτικές, μετά τα 15 kN. Έπειτα, περίπου στα 18.5 kN, διακρίνεται μια δεύτερη αλλαγή που εκφράζεται με μια δραματική αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων η οποία μάλλον δικαιολογείται από κάποια τοπική αστοχία στην περιοχή της κόλλας. Αμέσως, φαίνεται μια απότομη μείωση και στην συνέχεια κάποιες αυξομειώσεις των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Από τα 30 kN και μέχρι τα 35 kN παρατηρείται σταδιακή μείωση και μηδενισμός των καταγραφέντων τιμών μέχρι την αστοχία του δοκιμίου.

Η οπτική ίνα 2 (OF-2) από την άλλη, καταγράφει σχεδόν μηδενικές τιμές μέχρι τα 18.5 kN, από όπου ξεκινά και καταγράφει θλιπτικές παραμορφώσεις συνεχώς αυξανόμενες μέχρι τα 35 kN. Στο σημείο αυτό παρατηρείται μείωση των θλιπτικών παραμορφώσεων και η αλλαγή τους σε εφελκυστικές από τα 28 kN και μετά. Η καταγραφή συνεχίζεται με αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων μέχρι την αστοχία του δοκιμίου.

Γενικά παρατηρείται μια ανομοιόμορφη καταγραφή παραμορφώσεων καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος με πιο αξιοσημείωτη στιγμή όταν το επιβαλλόμενο φορτίο λαμβάνει την τιμή των 18.5 kN, όπου ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 1 καταγράφει μια απότομη αύξηση και ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 2 ξεκινάει να καταγράφει.

Η μεταβολή των παραμορφώσεων στην θέση του SG-1 συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9. Αρχικά παρατηρείται μια γραμμική συμπεριφορά μέχρι τα 18.5 kN. Στο σημείο αυτό διακρίνεται μια αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων για την ίδια τιμή επιβαλλόμενου φορτίου. Έπειτα καταγράφονται γραμμικά αυξανόμενες παραμορφώσεις μέχρι το μέγιστο φορτίο και μετά ελάττωση αυτών μέχρι την

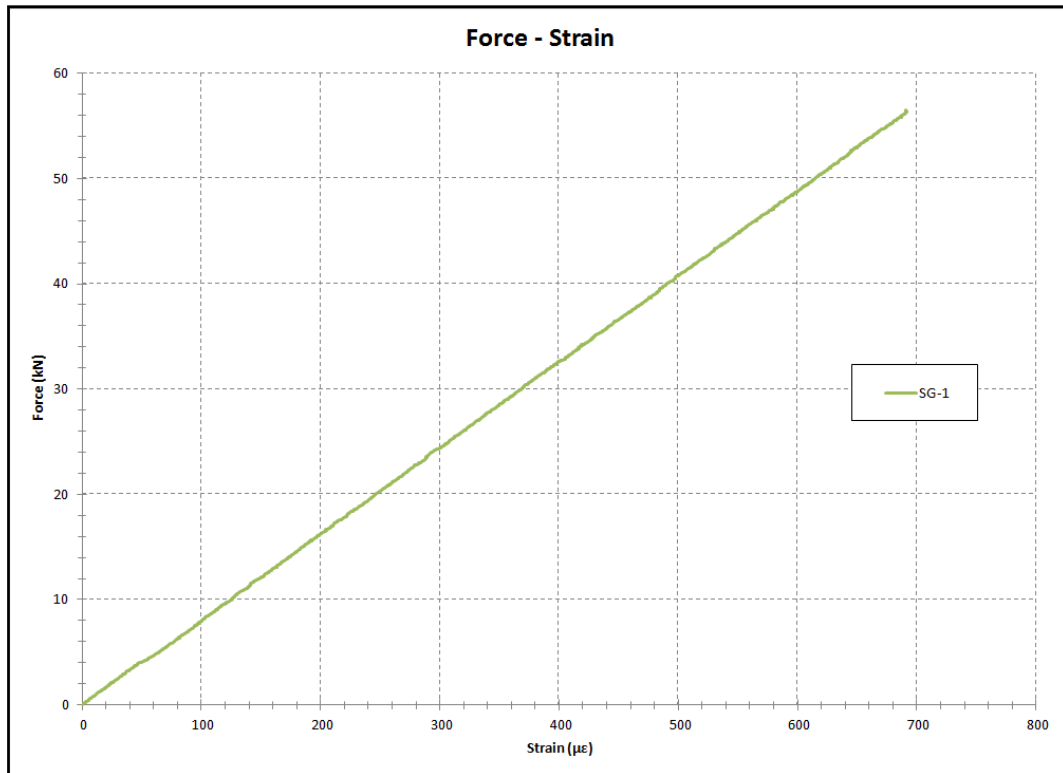
αστοχία του δοκιμίου. Οι καταγεγραμμένες παραμορφώσεις είναι αρκετά μικρότερες από αυτές των αισθητήρων οπτικών ινών.



Σχήμα 4.9: Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στην θέση του SG-1.

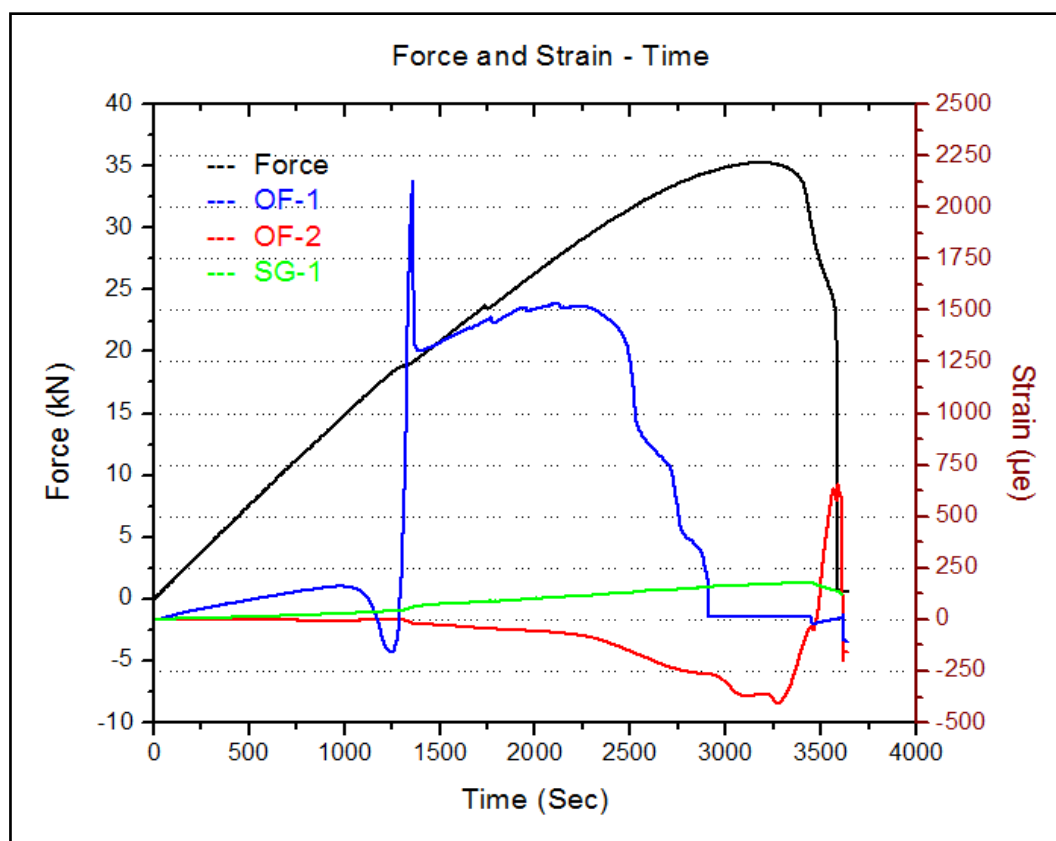
Γενικά, αυτή η συμπεριφορά μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη αναμενόμενη, αναλογιζόμενοι την θέση του ηλεκτρικού επιμηκυνσιομέτρου (πάνω στο χαλύβδινο σκέλος) και το μέγεθος του φορτίου. Θεωρητικά το χαλύβδινο σκέλος σε τέτοιες τιμές φόρτισης θα έπρεπε να συμπεριφέρεται ελαστικά και εν συνεχεία οι παραμορφώσεις σε αυτό να ακολουθούν μια γραμμική συμπεριφορά καθ' όλη την φόρτιση. Αυτό μπορεί να συνδέεται με κάποιο τρόπο με την συμπεριφορά της κόλλας στο συγκεκριμένο φορτίο ή να οφείλεται σε κάποιο σφάλμα στην καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων.

Για να διασταυρωθεί ότι οι πειραματικές μετρήσεις δεν εμπεριέχουν κάποιο σφάλμα, μετά το πέρας του πειράματος, το χαλύβδινο σκέλος τέθηκε σε εφελκυστική φόρτιση, αφού αφαιρέθηκε πρώτα από αυτό η κόλλα και το tab. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες ακριβώς ρυθμίσεις καταγραφής εφελκυστήκε το σκέλος (adherend) μέχρι τα 56 kN. Τα αποτελέσματα της φόρτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10. Φαίνεται από το διάγραμμα της μεταβολής των παραμορφώσεων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου, ότι το χαλύβδινο δοκίμιο συμπεριφέρεται φυσιολογικά. Παρατηρείται γραμμική συμπεριφορά καθ' όλη την φόρτιση, καθώς φορτίζεται στην ελαστική του περιοχή. Παρόλα αυτά δεν αποκλείεται η πιθανότητα κάποιου σφάλματος κατά την καταγραφή των μετρήσεων του προηγούμενου πειράματος.



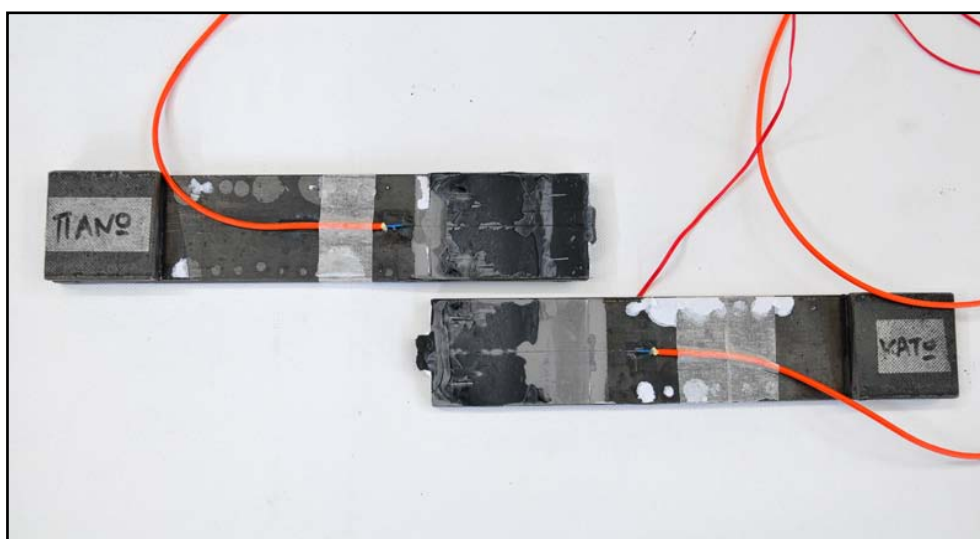
Σχήμα 4.10: Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στην θέση του SG-1 μετά το πέρας του κύριου πειράματος.

Τέλος, παρατηρούμε τα αποτελέσματα της μεταβολής της φόρτισης αλλά και των παραμορφώσεων του δοκιμίου, συναρτήσει του χρόνου στο διάγραμμα του Σχήματος 4.11. Πρόκειται για ένα διάγραμμα με διπλό άξονα y, όπου στον αριστερό άξονα αναγράφονται οι τιμές της φόρτισης και στον δεξιό οι τιμές των παραμορφώσεων. Έτσι καταλαβαίνουμε καλύτερα τις επιδράσεις που έχει η φόρτιση στις θέσεις και των τριών αισθητήρων, συναρτήσει του χρόνου. Φαίνεται ξεκάθαρα, όπως διατυπώθηκε και νωρίτερα, ότι κατά την εμφάνιση του πρώτου γονάτου στην καμπύλη του φορτίου (18.5 kN), υπάρχει αντίδραση και από τους τρεις αισθητήρες. Η οπτική ίνα 1 (μπλε γραμμή) καταγράφει μια έντονη μεταβολή των παραμορφώσεων ακριβώς την ίδια στιγμή που η οπτική ίνα 2 (κόκκινη γραμμή) καταγράφει θλιπτικές παραμορφώσεις (ενώ πριν δεν κατέγραφε τίποτα) και που το ηλεκτρικό επιμηκυνσιόμετρο καταγράφει μια μικρή αύξηση των παραμορφώσεων.



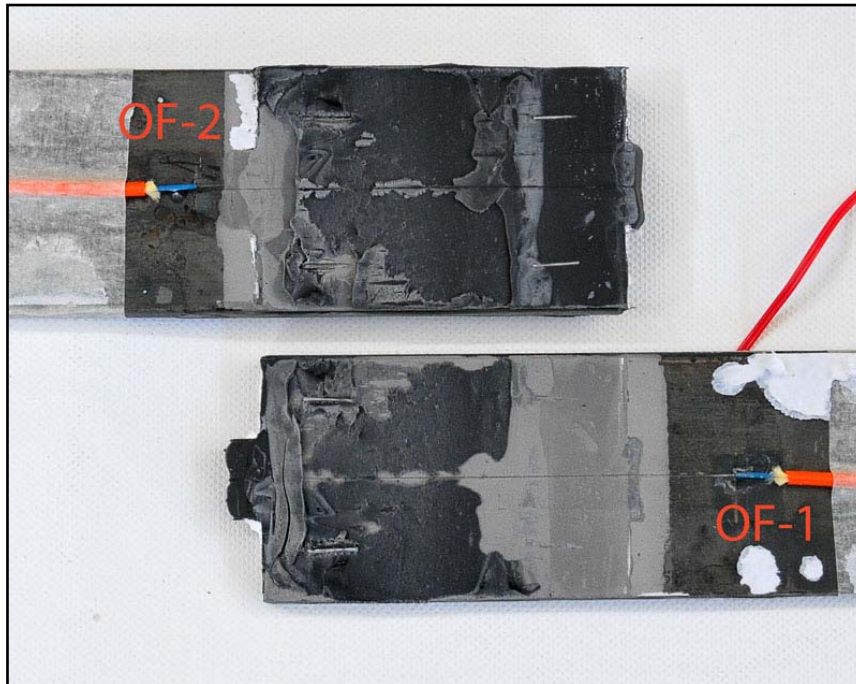
Σχήμα 4.11: Μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου και των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου.

Μετά το πείραμα, το δοκίμιο βγήκε από τη μηχανή εφελκυσμού και φωτογραφήθηκε. Στην Εικόνα 4.4 βλέπουμε τα δύο χαλύβδινα σκέλη και την περιοχή της αλληλοεπικάλυψης σε γενική άποψη, ενώ στην Εικόνα 4.5 παρατηρούμε μόνο την περιοχή της αλληλοεπικάλυψης σε μεγέθυνση.

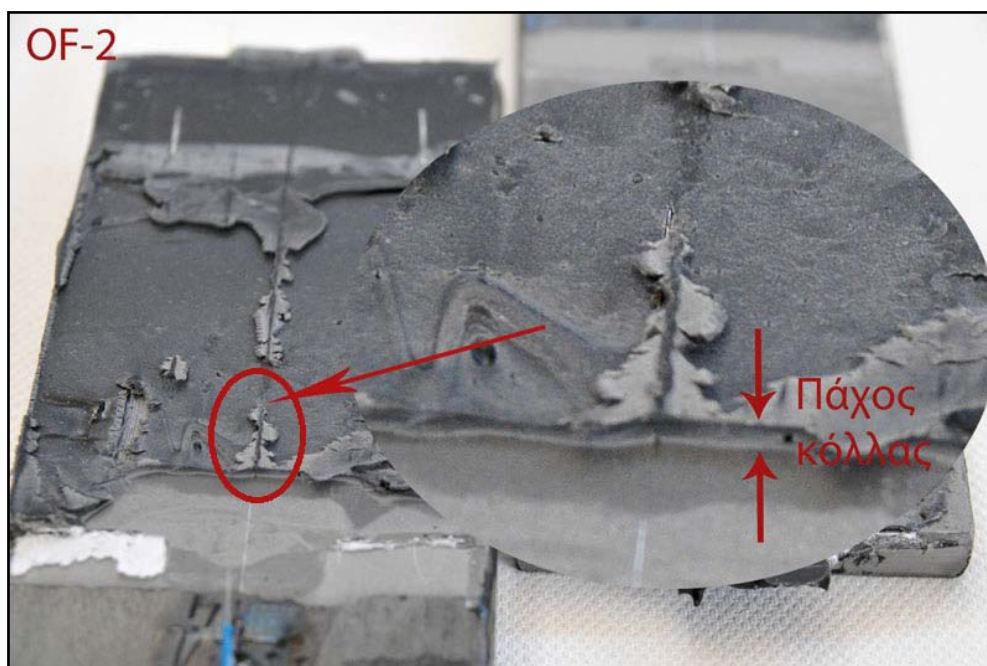


Εικόνα 4.4: Το δοκίμιο μετά το τέλος του πειράματος.

Οι οπτικές ίνες κόπηκαν, όταν το δοκίμιο αποκολλήθηκε τελείως, κατά την απομάκρυνση του από την μηχανή εφελκυσμού. Ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 2 ήταν ορατός δια γυμνού οφθαλμού (βλ. Εικόνα 4.6), ενώ ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 1 βρισκόταν εσωτερικά της κόλλας και δεν ήταν εμφανής η θέση του. Οι θέσεις και των δύο ινών κατά το πάχος της κόλλας φαίνονταν, αλλά δεν μπορούσαν να μετρηθούν με ακρίβεια, λόγω του πολύ μικρού πάχους της. Τέλος στα άκρα κάθε χαλύβδινου δοκιμίου παρατηρείται πιο συσσωρευμένη ποσότητα κόλλας αντίθετα με το υπόλοιπο μήκος στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης.



Εικόνα 4.5: Λεπτομέρεια της περιοχής αλληλοεπικάλυψης (overlap) μετά το πείραμα.



Εικόνα 4.6: Λεπτομέρεια από την θέση του αισθητήρα της οπτικής ίνας 2.

4.5 Αριθμητική Προσομοίωση

4.5.1 Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

Στο εδάφιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε, με σκοπό την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της αριθμητικής μεθόδου. Για τον καθορισμό του αριθμητικού μοντέλου, τη διαδικασία επίλυσης του και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS 12.0. Παρουσιάζονται με σειρά οι μηχανικές ιδιότητες και η μοντελοποίηση των υλικών, η γεωμετρία του μοντέλου, η επιλογή των στοιχείων, η διακριτοποίηση, οι συνοριακές συνθήκες, το είδος φόρτισης και τέλος το είδος της ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Μηχανικές ιδιότητες και μοντελοποίηση υλικών

Τα μεταλλικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα αποτελούνταν από κοινό χάλυβα, μέτρου ελαστικότητας E , λόγου Poisson ν και ορίου διαρροής σ_0 . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση αναγράφονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 : Αριθμητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα.

Υλικό	E (MPa)	ν	σ_0 (MPa)
Χάλυβας	203000	0.30	348

Τα δύο χαλύβδινα σκέλη (adherends) και τα tabs μοντελοποιήθηκαν ως ελαστοπλαστικά υλικά γραμμικά κρατυνόμενα. Για να προσεγγιστεί καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά του υλικού και να υπερπηδηθούν αριθμητικά προβλήματα, δόθηκε μια τιμή για το μέτρο κράτυνσης. Η τιμή αυτή αποδίδεται γραφικά ως η κλίση της ευθείας μετά το σημείο διαρροής και προκύπτει ως ποσοστό του αρχικού μέτρου ελαστικότητας. Το μέτρο κράτυνσης είχε τιμή, $0.02 E$ δηλαδή 4060 MPa .

Το κολλητικό μέσο (adhesive) μοντελοποιήθηκε και αυτό ως ελαστοπλαστικό γραμμικά κρατυνόμενο υλικό με μέτρο ελαστικότητας E_a , λόγο Poisson ν_a και όριο διαρροής σ_a . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Το μέτρο κράτυνσης είχε τιμή $0.01 E_a$.

Πίνακας 4.2 : Αριθμητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων κολλητικού μέσου.

Υλικό	E_a (MPa)	ν_a	σ_a (MPa)
Κολλητικό μέσο	1000	0.30	16

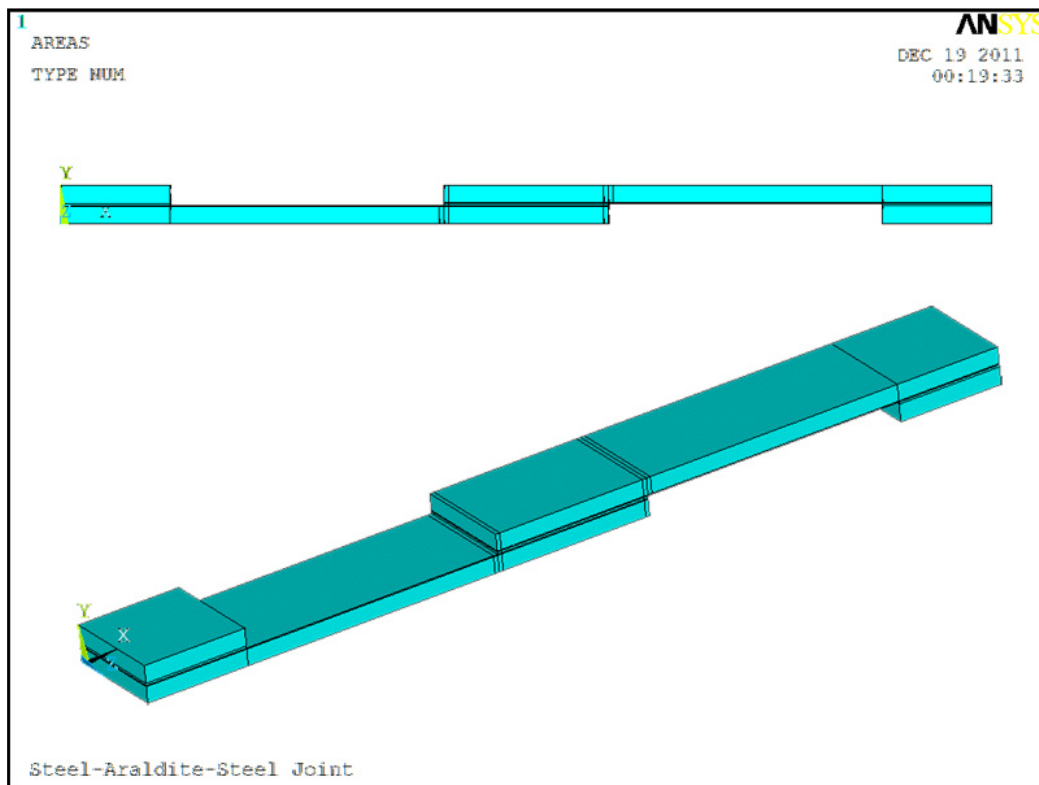
*Araldite 2030 Datasheet

Γεωμετρία μοντέλου

Η γεωμετρία του μοντέλου είναι ίδια με αυτή που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 4.2.2. Οι διαστάσεις του μοντέλου είχαν τις ακόλουθες τιμές:

- $l_{ov}=75\text{ mm}$ μήκος αλληλοεπικάλυψης (overlap length)
- $l_{st}=125\text{ mm}$ μήκος ελεύθερων χαλύβδινων σκελών (steel length)
- $l_{tst}=50\text{ mm}$ μήκος του χαλύβδινου tab (tab steel length)
- $t_{st}=8.3\text{ mm}$ πάχος των χαλύβδινων σκελών (steel thickness)
- $t_{tst}=8.3\text{ mm}$ πάχος των χαλύβδινων tab (tabs thickness)
- $t_a=1\text{ mm}$ πάχος κόλλας στην αλληλοεπικάλυψη (adhesive overlap thickness)
- $t_{sta}=1\text{ mm}$ πάχος κόλλας μεταξύ tabs και χαλύβδινων σκελών
- $w=50\text{ mm}$ πλάτος δοκιμίου (width of single lap joint)

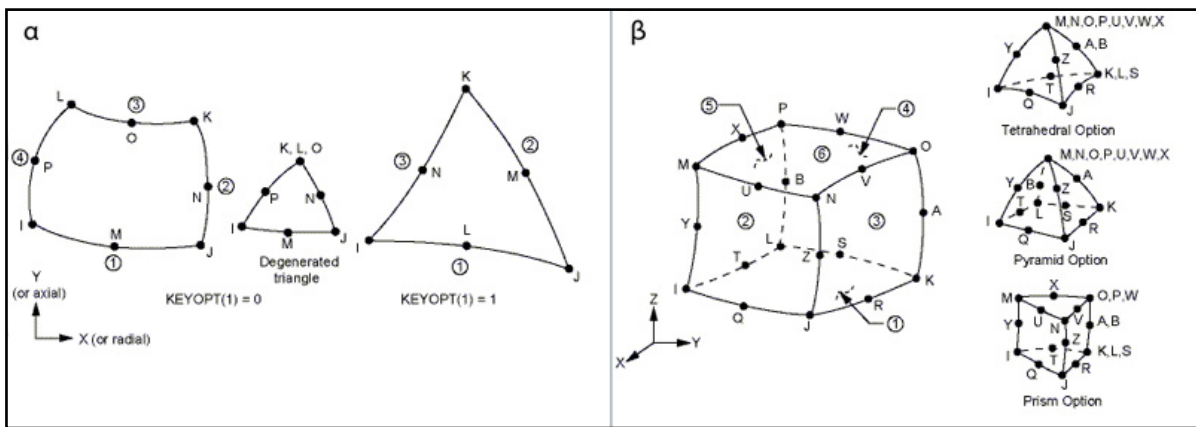
Αρχικά κατασκευάστηκε ένα δισδιάστατο μοντέλο από το οποίο δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο του με προεκβολή κατά τη διεύθυνση του πλάτους (διεύθυνση z) όλων των επιφανειών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Ουσιαστικά το τρισδιάστατο μοντέλο δημιουργήθηκε με προεκβολή όγκων (volume extrusion) από όλες τις επιφάνειες (areas) του δισδιάστατου μοντέλου.



Σχήμα 4.12: Αρχική και τελική γεωμετρία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Επιλογή στοιχείων – Διακριτοποίηση

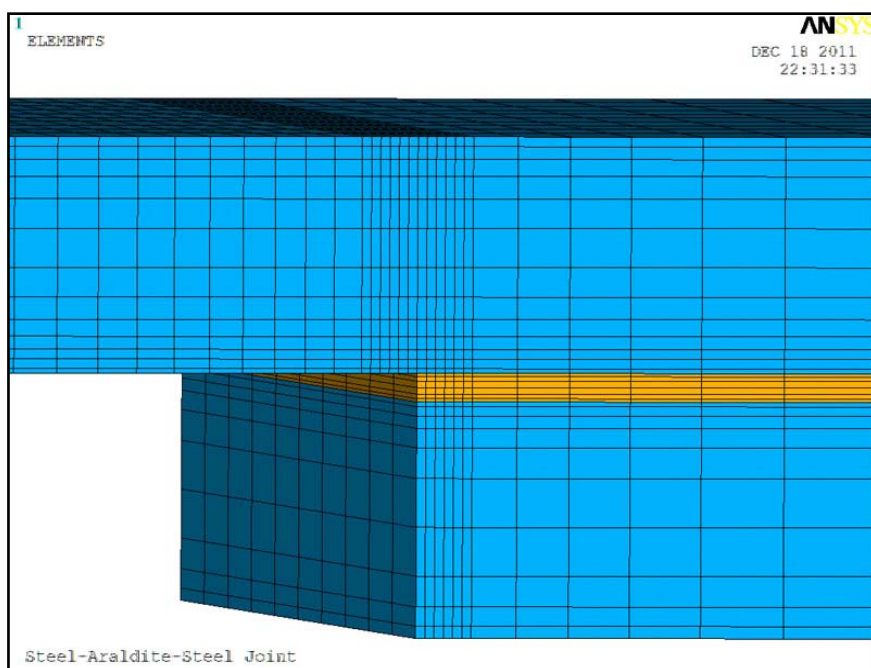
Αρχικά για το δισδιάστατο μοντέλο έγινε χρήση του δισδιάστατου στοιχείου PLANE183 (βλ. Σχήμα 4.13α). Το στοιχείο αυτό αποτελείται από οχτώ ή έξι κόμβους (8-node or 6-node) και έχει δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (δύο μετατοπίσεις). Η χρήση του χαρακτηρίζεται ως βοηθητική καθώς, όπως εξελίσσεται η πορεία δημιουργίας του μοντέλου, η επιφάνεια μετατρέπεται σε όγκο, μέσω της διαδικασίας της προεκβολής, με αποτέλεσμα η επιφάνεια και τα δισδιάστατα στοιχεία να παύουν να υπάρχουν και να μην παίζουν κανένα ρόλο στη διαδικασία της κυρίως επίλυσης. Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο στοιχείο είκοσι κόμβων (20-node) SOLID186 (βλ. Σχήμα 4.13β). Αυτό έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις x, y και z) και έχει επιπλέον χαρακτηριστικά, μεταξύ άλλων, πλαστικότητα, μεγάλων τροπών και μεγάλων παραμορφώσεων που είναι στοιχεία κατάλληλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του κολλητικού μέσου.



Σχήμα 4.13:α) Γεωμετρία στοιχείου PLANE183, **β)** γεωμετρία στοιχείου SOLID186.

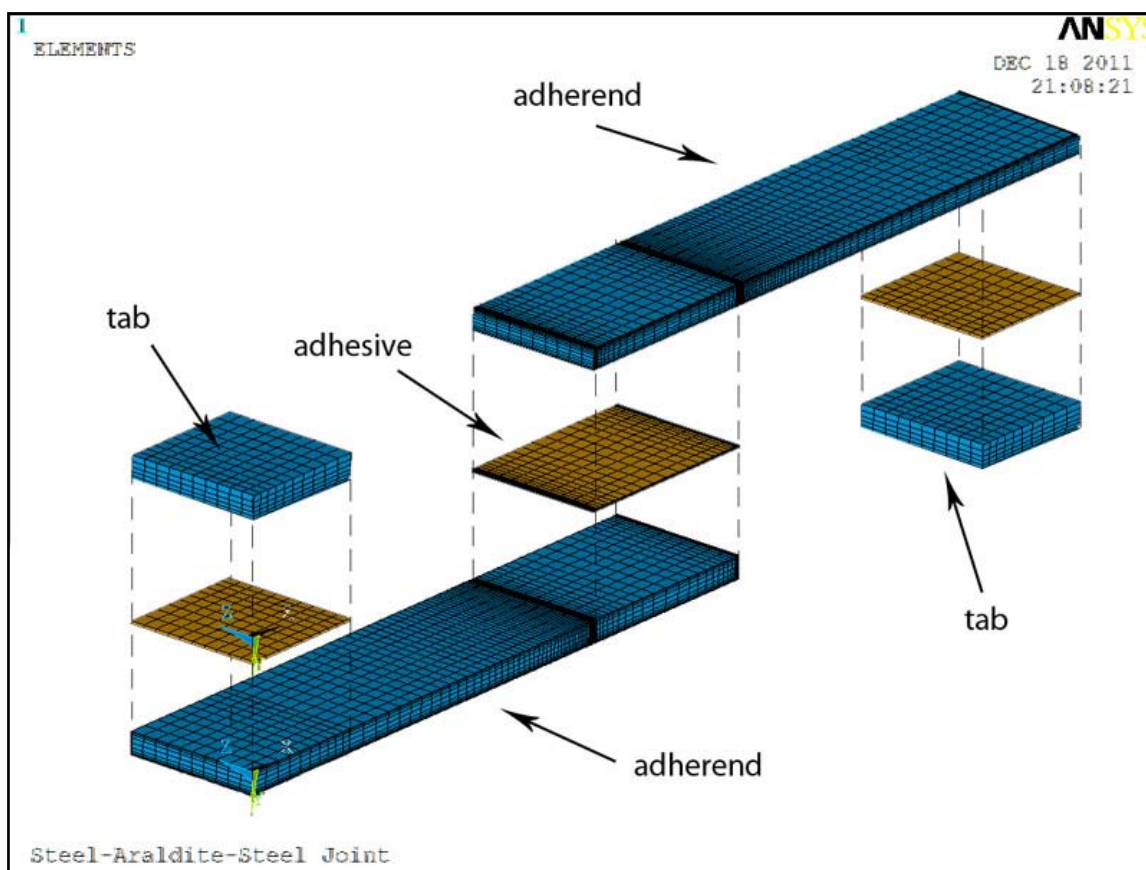
Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεύθυνση του πάχους (διεύθυνση y) για τα χαλύβδινα σκέλη ήταν ίσος με 13 και για τα tabs ίσος με 5. Για την προσομοίωση του κολλητικού μέσου χρησιμοποιήθηκαν κατά το πάχος 6 στοιχεία. Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή της αλληλοεπικάλυψης, όπου με πορτοκαλί χρώμα διακρίνεται το κολλητικό μέσο και με μπλε τα χαλύβδινα σκέλη.

Η διακριτοποίηση κατά τις διευθύνσεις x και z ποικίλει ανάλογα με την περιοχή που εξετάζεται, διότι σε περιοχές που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι προτιμητέα η αύξηση του αριθμού των στοιχείων. Μια τέτοια περιοχή είναι αυτή του κολλητικού μέσου όπου είναι και η περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας εφαρμογής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν 6 στοιχεία κατά το πάχος που θεωρούνται αρκετά, δεδομένου του μικρού πάχους του κολλητικού μέσου. Έτσι κατά το πάχος της κόλλας το μέγεθος των στοιχείων είναι 0.16 mm, κατά το πλάτος 5 mm και κατά το μήκος κυμαίνονται από 0.3 mm έως 6.5 mm. Στα χαλύβδινα σκέλη χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία με μήκος που κυμαίνεται από 0.3 mm έως 7 mm, με τα μικρότερα στοιχεία να χρησιμοποιούνται στα άκρα της αλληλοεπικάλυψης.



Σχήμα 4.14: Αριθμός στοιχείων κατά την διεύθυνση του πάχους.

Τέλος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15 μια γενική άποψη της διακριτοποίησης σε όλα τα μέρη του μοντέλου.

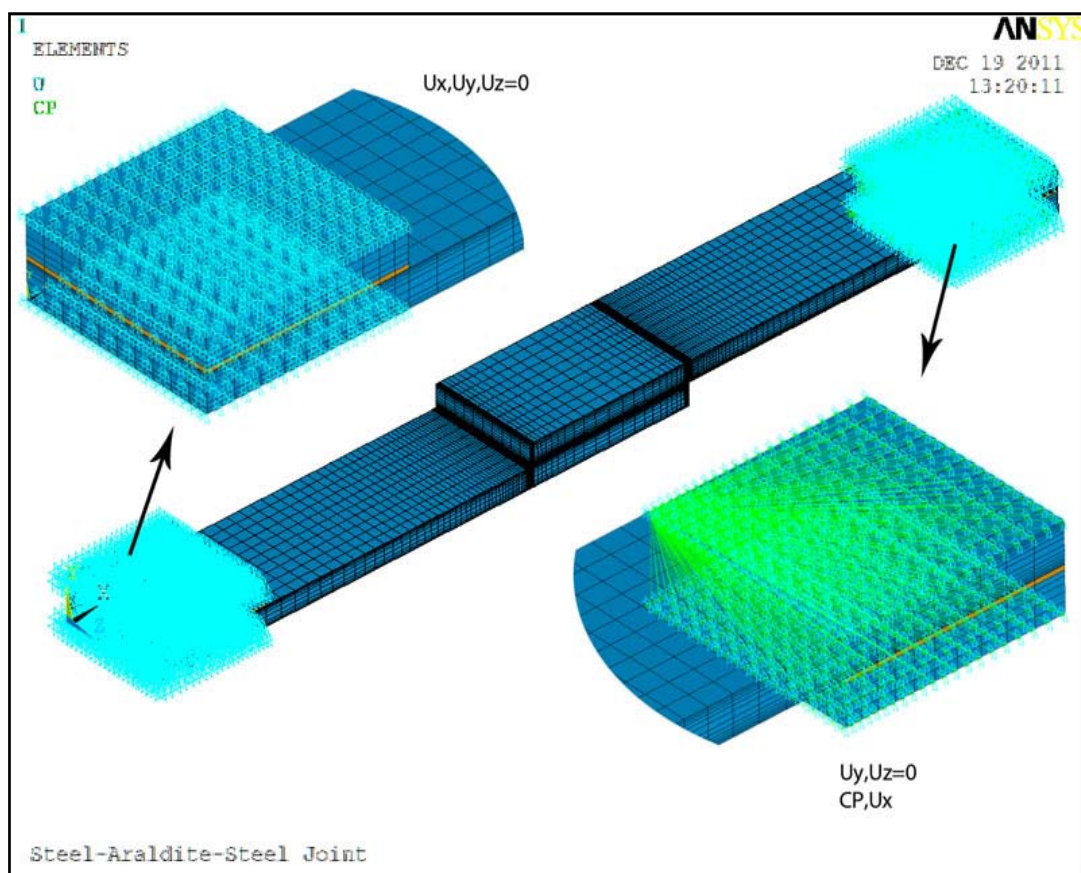


Σχήμα 4.15: Διακριτοποίηση των τμημάτων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Συνοριακές συνθήκες – Είδος Φόρτισης

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καθορίζουν εξίσου την πιστή προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται. Έτσι επιβλήθηκαν περιορισμοί ως προς την μετατόπιση στον x, y και z άξονα στους κόμβους της περιοχής του δοκιμίου που προσδένεται στην μια αρπάγη της μηχανής εφελκυσμού και περιορισμοί ως προς την μετατόπιση στον y και z άξονα στους κόμβους της περιοχής του δοκιμίου που προσδένεται στην δεύτερη αρπάγη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16.

Η φόρτιση επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης στα στοιχεία της περιοχής της δεύτερης αρπάγης με την βοήθεια ενός τρίτου περιορισμού. Όλοι οι κόμβοι της περιοχής αυτής συνδέονται με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά τη διάρκεια της φόρτισης να μετατοπίζονται ταυτόχρονα, μόνο ευθύγραμμα και παράλληλα ως προς τον άξονα x (Coupling, CP,Ux). Η τιμή της μετατόπισης στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε ίση με 1 mm.



Σχήμα 4.16: Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Είδος Ανάλυσης

Για την πιστότερη προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται, επιλέχθηκε η μη γραμμική ανάλυση. Αρχικά επιλέχθηκαν 20 βήματα για την συνολική επιβαλλόμενη φόρτιση, αλλά αποδείχθηκε πως δεν ήταν αρκετά για την ορθή εξαγωγή των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης και φορτίου-παραμορφώσεων. Έτσι η συνολική επιβαλλόμενη φόρτιση χωρίστηκε σε 60 βήματα και επιβλήθηκε ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση, με αποτέλεσμα η φόρτιση να έχει κάθε φορά βήμα 0.016 mm (συνολική μετατόπιση 1 mm).

4.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης – Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν στην πειραματική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε δυο σημεία του κολλητικού μέσου (OF-1 και OF-2) και σε ένα του μετάλλου (SG-1). Κατά συνέπεια, για να γίνει η απαιτούμενη σύγκριση είναι αναγκαίο να εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Όμως, οι επιλογές που έγιναν κατά τη δημιουργία του μοντέλου έχουν άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα αυτά με επιτακτική την ανάγκη κατάλληλων προσαρμογών και θεωρήσεων ώστε οι διαφορές που προκύπτουν είτε να εξαλειφθούν, είτε να ληφθούν υπ' όψη.

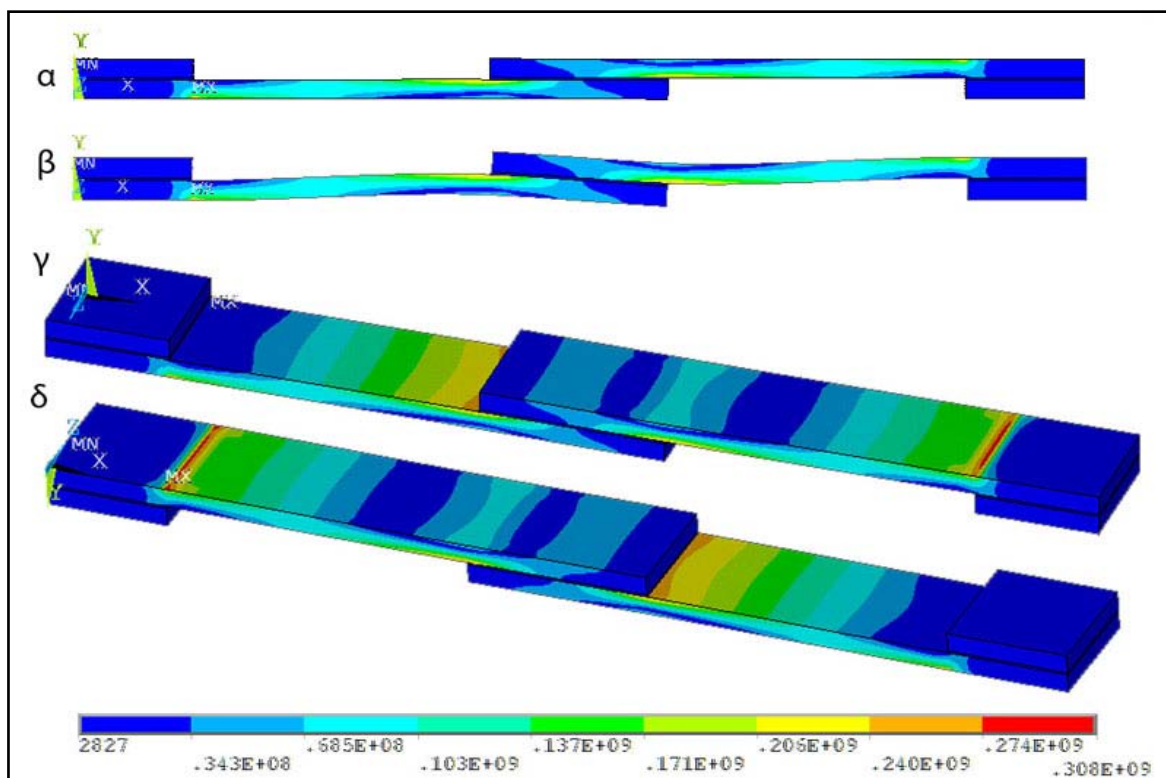
Ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση, είναι ότι το μοντέλο δεν περιέχει κανενός είδους κριτήριο αστοχίας, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την πραγματική εξέλιξη του φαινομένου. Επομένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι συγκρίσιμα με τις πειραματικές μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια που η κόλλα δεν έχει υποστεί κάποιου είδους αστοχία.

Επίσης δημιουργείται μια επιπλέον διαφορά στην απεικόνιση της συνολικής επιμήκυνσης μεταξύ της πειραματικής μέτρησης και του αριθμητικού αποτελέσματος. Οι πειραματικές μετρήσεις καταγράφουν την επιμήκυνση του δοκιμίου μαζί με το μήκος των εξαρτημάτων συγκράτησης και τις μικρές μετακινήσεις αυτών κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Από την άλλη μεριά, μοντελοποιώντας το δοκίμιο με τις συνοριακές συνθήκες που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι επόμενο στα εξαγόμενα αποτελέσματα να παρουσιάζεται μικρότερη επιμήκυνση από την πραγματική. Η διαφορά αυτή εξαλείφεται και οι καμπύλες μπορούν να συγκριθούν σε μεγάλο βαθμό αν πολλαπλασιαστεί η επιμήκυνση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με ένα διορθωτικό συντελεστή της τάξης του 1.8. Κατά συνέπεια, η αντίστοιχη καμπύλη που θα παρουσιαστεί μετά, έχει υποστεί την παραπάνω διόρθωση.

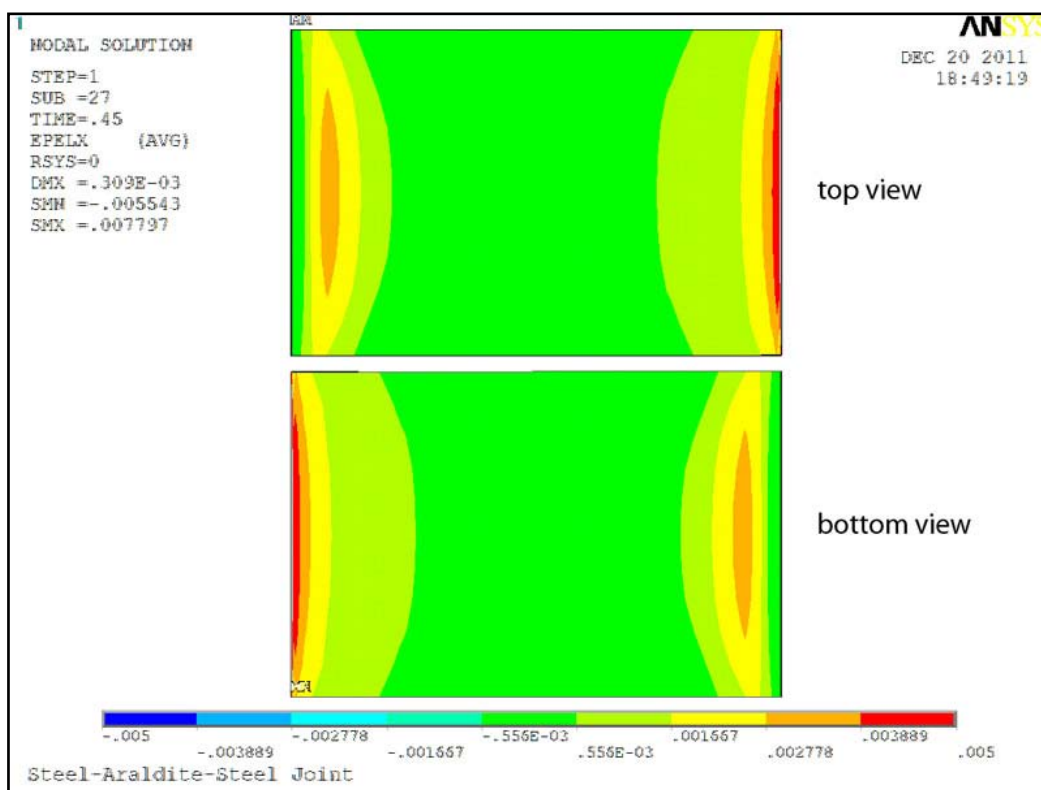
Παρουσιάζονται στην συνέχεια τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με την μορφή σχημάτων. Στο Σχήμα 4.17 φαίνεται η κατανομή των τάσεων von Mises του δοκιμίου για επιβαλλόμενο φορτίο της τάξης των 35 kN σε πλάγια όψη, άνοψη και κάτοψη (α , γ , δ αντίστοιχα) αλλά και η κατανομή των τάσεων με μεγεθυμένες σε κλίμακα μετατοπίσεις (β), για την καλύτερη κατανόηση της εξέλιξης του φαινομένου. Φαίνεται ότι για το δεδομένο φορτίο (που είναι και το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου, πειραματικά) εμφανίζονται σημαντικές τάσεις στα μεταλλικά σκέλη κοντά στις ενώσεις με τα tabs αλλά και κοντά στις ενώσεις των δύο σκελών. Οι τάσεις αυτές όμως είναι χαμηλότερες από το όριο διαρροής των χαλύβδινων σκελών και έτσι διαπιστώνεται ότι βρίσκονται στην ελαστική τους περιοχή.

Στο Σχήμα 4.18 φαίνεται η κατανομή των διαμήκων παραμορφώσεων στην περιοχή του κολλητικού μέσου για την ίδια τιμή φόρτισης σε άνοψη και κάτοψη. Στα άκρα του κολλητικού μέσου παρουσιάζονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις, ενώ μειώνονται σταδιακά προς το κέντρο του. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με το σκεπτικό του αρχικού σχεδιασμού για την τοποθέτηση των αισθητήρων οπτικών ινών στις θέσεις που θα υπήρχαν οι μεγαλύτερες διαμήκεις παραμορφώσεις κοντά στα άκρα του κολλητικού μέσου.

Παρατηρείται στα δύο σχήματα μια συμμετρία στην φόρτιση στα χαλύβδινα σκέλη του δοκιμίου αλλά και στις παραμορφώσεις του κολλητικού μέσου. Αυτό, οφείλεται προφανώς στην συμμετρία της κατασκευής αλλά και στο ότι τα δυο σκέλη είναι από το ίδιο υλικό.



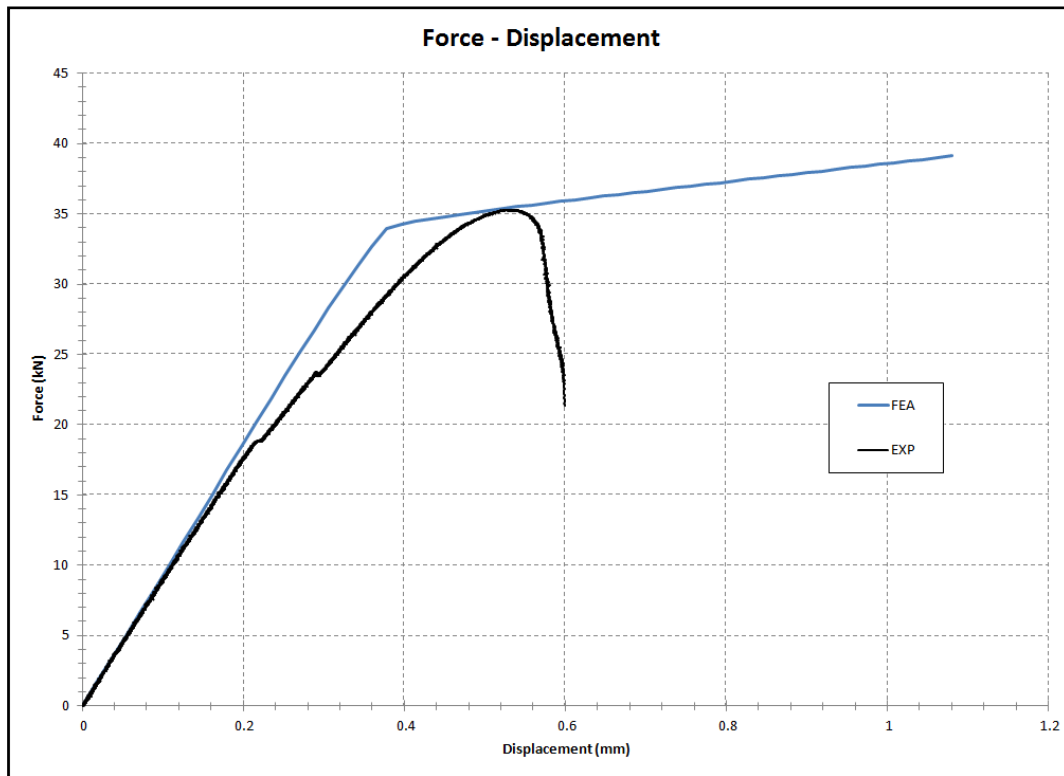
Σχήμα 4.17: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises για φορτίο 35kN.



Σχήμα 4.18: Κατανομή των διαμηκών παραμορφώσεων στο κολητικό μέσο για φορτίο 35 kN.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) παρατίθενται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων, συγκρίνοντάς τα με τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών μετρήσεων (EXP). Επιπροσθέτως, εξετάζεται το κατά πόσο αυτά ταυτίζονται με την πραγματικότητα, όπως αυτή εκφράζεται από τα πειραματικά δεδομένα, ενώ γίνεται προσπάθεια να δοθούν τα αίτια για τις τυχόν αποκλίσεις.

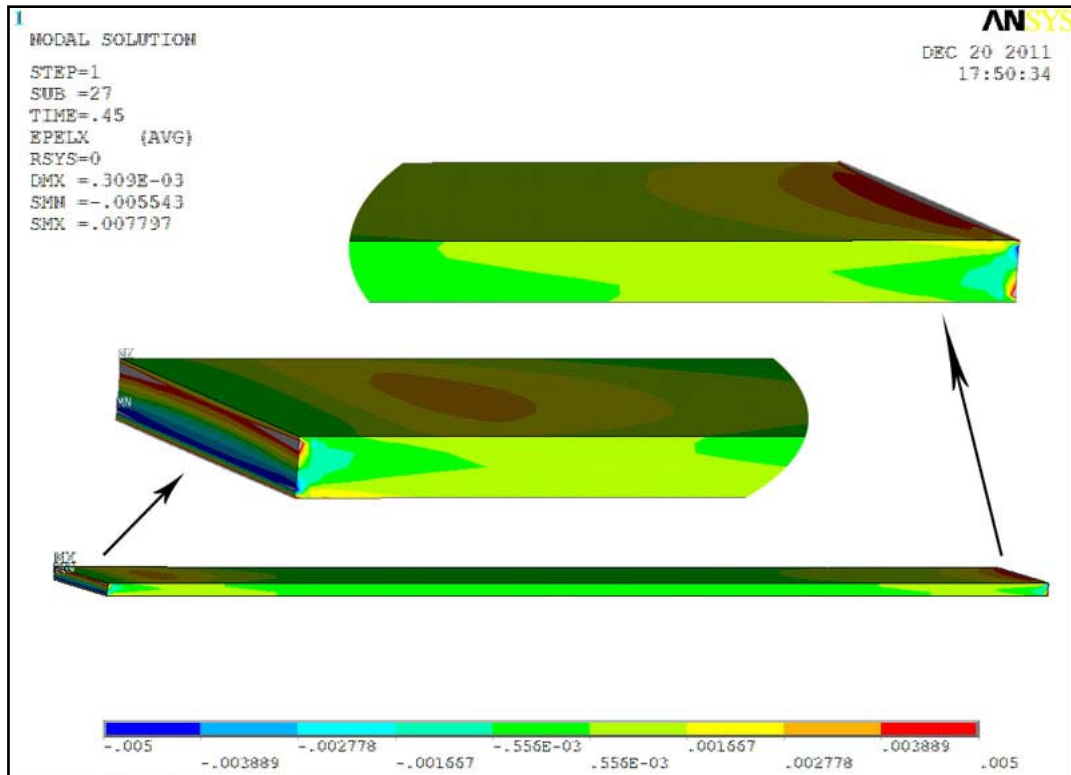
Η μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.19, όπου γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.19: Καμπύλες φορτίου – Επιμήκυνσης.

Οι δυο καμπύλες φαίνεται να συγκλίνουν για τιμές φορτίου μέχρι τα 14 kN. Έπειτα, λόγω των τοπικών αστοχιών και κατ' επέκταση των δυο μικρών γονάτων που παρουσιάζονται στην πειραματική καμπύλη (EXP), εμφανίζεται μια απόκλιση που συνεχώς αυξάνεται. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο γεγονός ότι στην αριθμητική λύση απουσιάζουν κριτήρια αστοχίας του κολλητικού μέσου. Γενικά όμως, φαίνεται πως το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προσομοιάζει αρκετά καλά την πραγματική έκβαση του πειράματος, ακόμα και στο μέγιστο φορτίο του δοκιμίου.

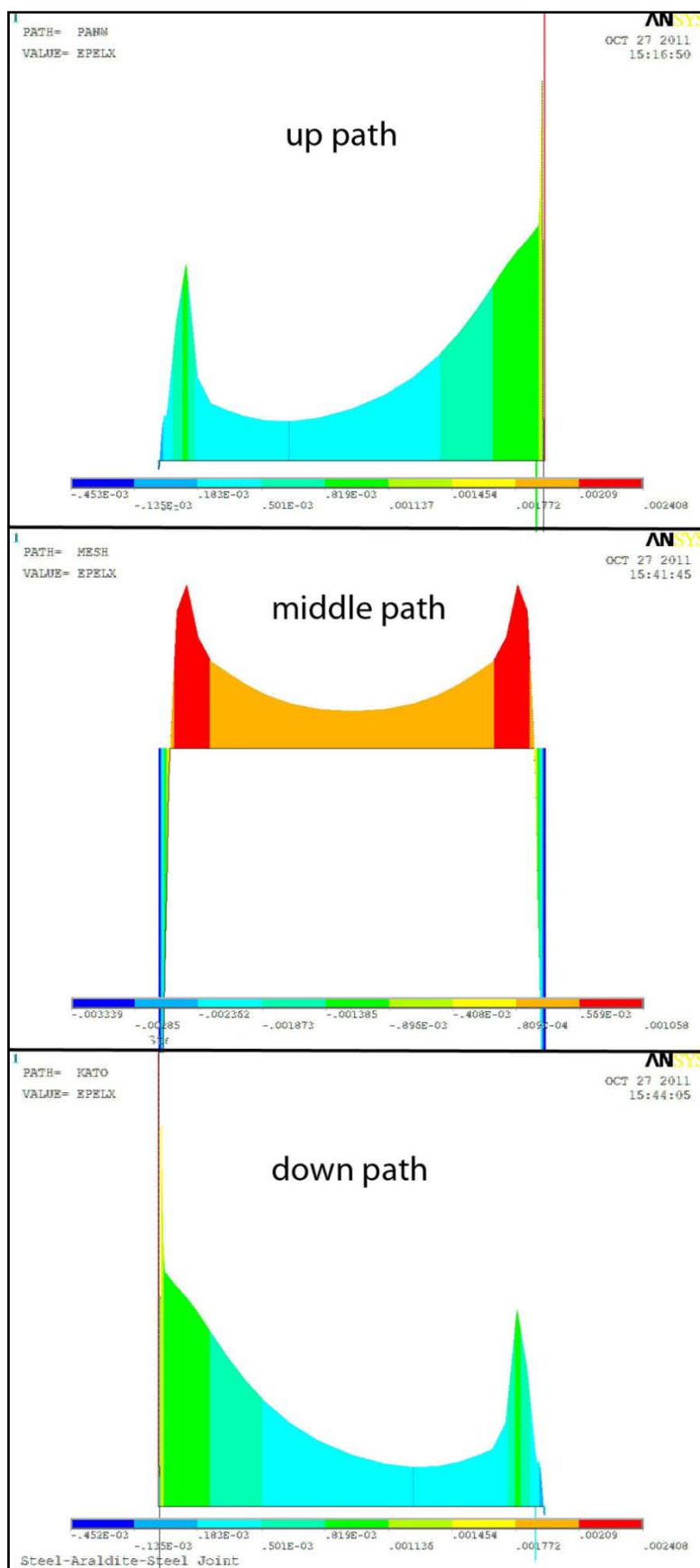
Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τις ακριβείς θέσεις των αισθητήρων οπτικών ινών (OF) και του ηλεκτρικού επιμηκυνσιομέτρου (SG) που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των ζητούμενων μεγεθών κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής, επόμενο είναι να αναζητηθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα και στο αριθμητικό μοντέλο. Στο σημείο αυτό όμως, έπρεπε να γίνει μια ανάλυση για την ακριβή θέση των αισθητήρων οπτικών ινών, καθώς αυτή δεν ήταν δεδομένη κατά την τοποθέτησή τους μέσα στο κολλητικό μέσο. Φαίνεται από την αριθμητική ανάλυση, ότι κατά το πάχος του κολλητικού μέσου υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων (βλ. Σχήμα 4.20).



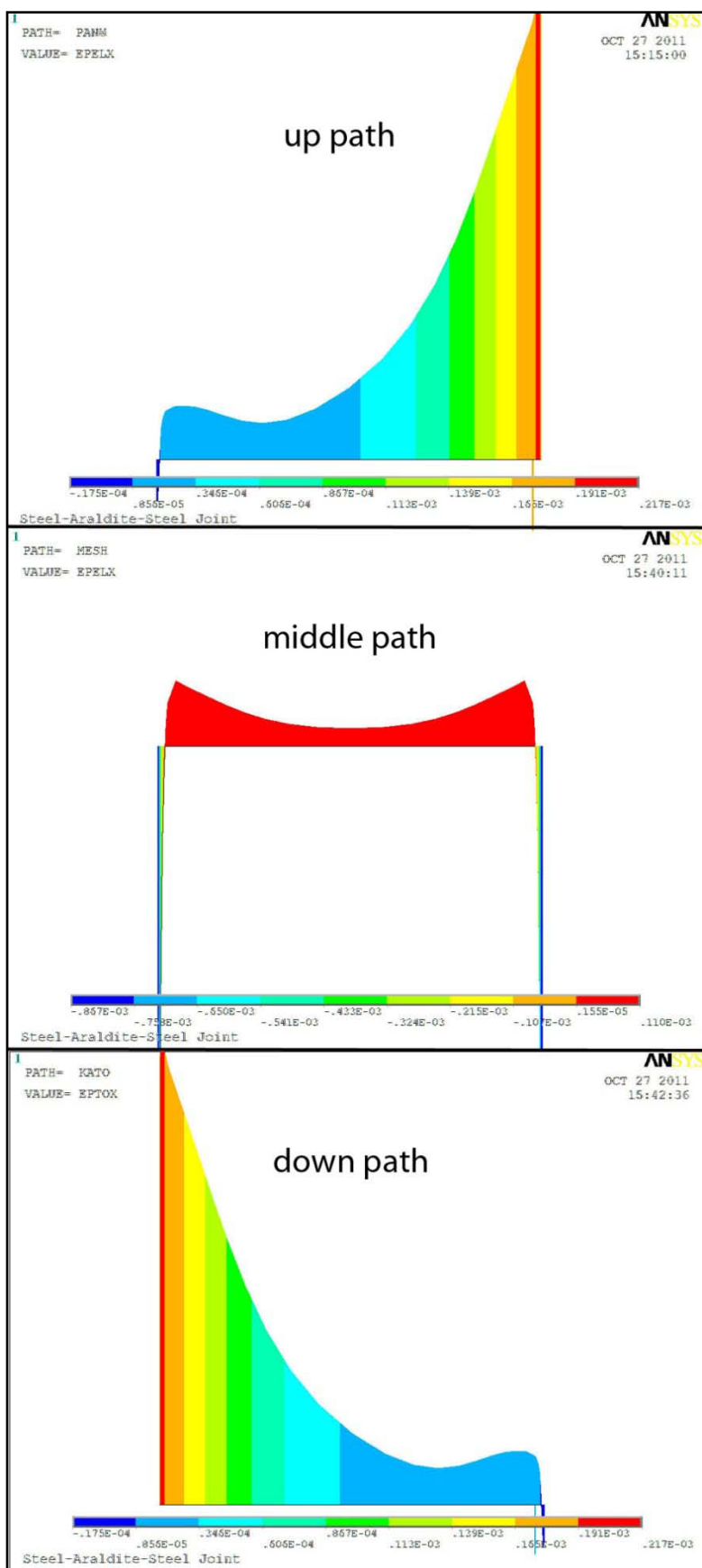
Σχήμα 4.20: Κατανομή διαμήκων παραμορφώσεων κατά το πάχος της κόλλας.

Υπολογίζοντας τις διαμήκεις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία κατά το πάχος της κόλλας, θα μπορούσε να γίνει σύγκριση με αυτές του πειράματος, και συνεπώς να εκτιμηθεί η ακριβής θέση τους. Έτσι, υπολογίστηκε αρχικά η κατανομή των παραμορφώσεων σε τρεις διαδρομές (paths) κατά μήκος της επικάλυψης για δυο τιμές φορτίου (5 kN, 25 kN) και έπειτα σε συγκεκριμένα σημεία των μονοπατιών που αντιστοιχούν στις θέσεις των αισθητήρων για ολόκληρη την φόρτιση. Οι διαδρομές που υπολογίστηκαν ήταν, η πρώτη στο κάτω (down path), η δεύτερη στο μέσο (middle path) και η τρίτη στο πάνω μέρος (up path) του πάχους του κολλητικού μέσου. Οι κατανομές των παραμορφώσεων για την φόρτιση των 5 kN φαίνονται στο Σχήμα 4.21, ενώ οι κατανομές των παραμορφώσεων για την φόρτιση των 25 kN φαίνονται στο Σχήμα 4.22.

Παρατηρείται και στα δύο σχήματα ότι οι κατανομές των παραμορφώσεων στις πάνω και κάτω διαδρομές είναι αντισυμμετρικές, κάτι που ήταν αναμενόμενο λόγω της συμμετρίας του δοκιμίου. Φαίνεται επίσης, όπως υπόθηκε και παραπάνω, ότι οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίζονται στα άκρα του μήκους επικάλυψης και στις τρεις περιπτώσεις διαδρομών (paths).

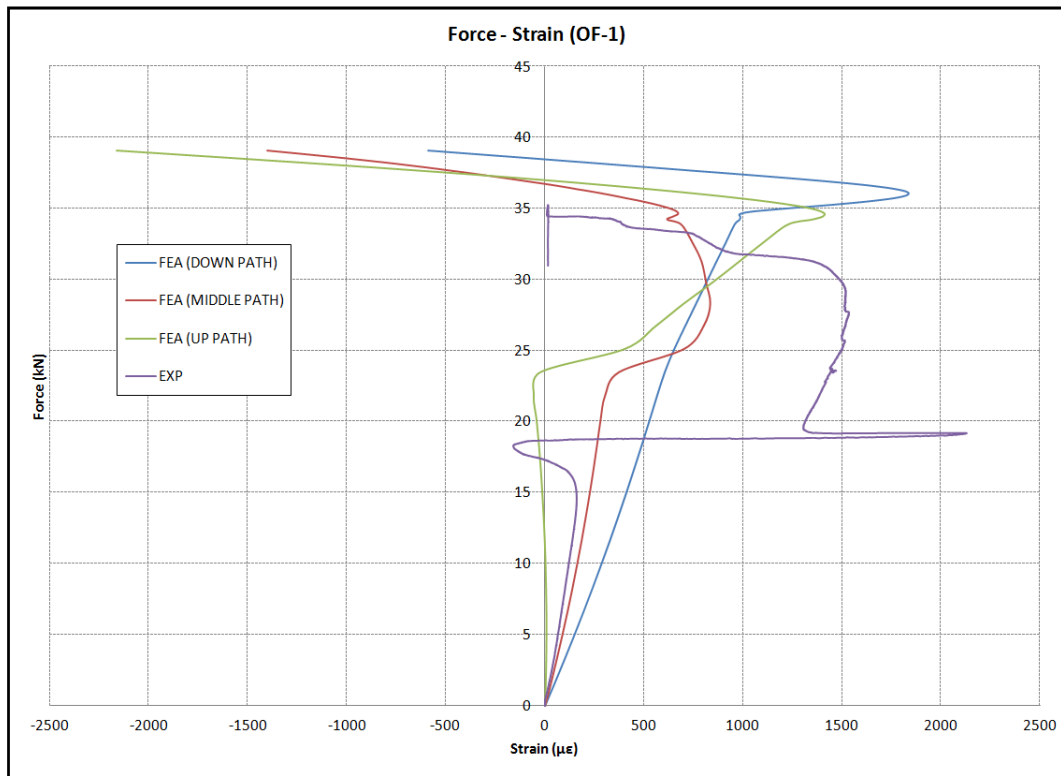


Σχήμα 4.21: Κατανομή διαμήκων παραμορφώσεων κατά το μήκος του κολλητικού μέσου σε τρία διαφορετικά ύψη, για φορτίο 5 kN.



Σχήμα 4.22: Κατανομή διαμήκων παραμορφώσεων κατά το μήκος του κολλητικού μέσου σε τρία διαφορετικά ύψη, για φορτίο 25 kN.

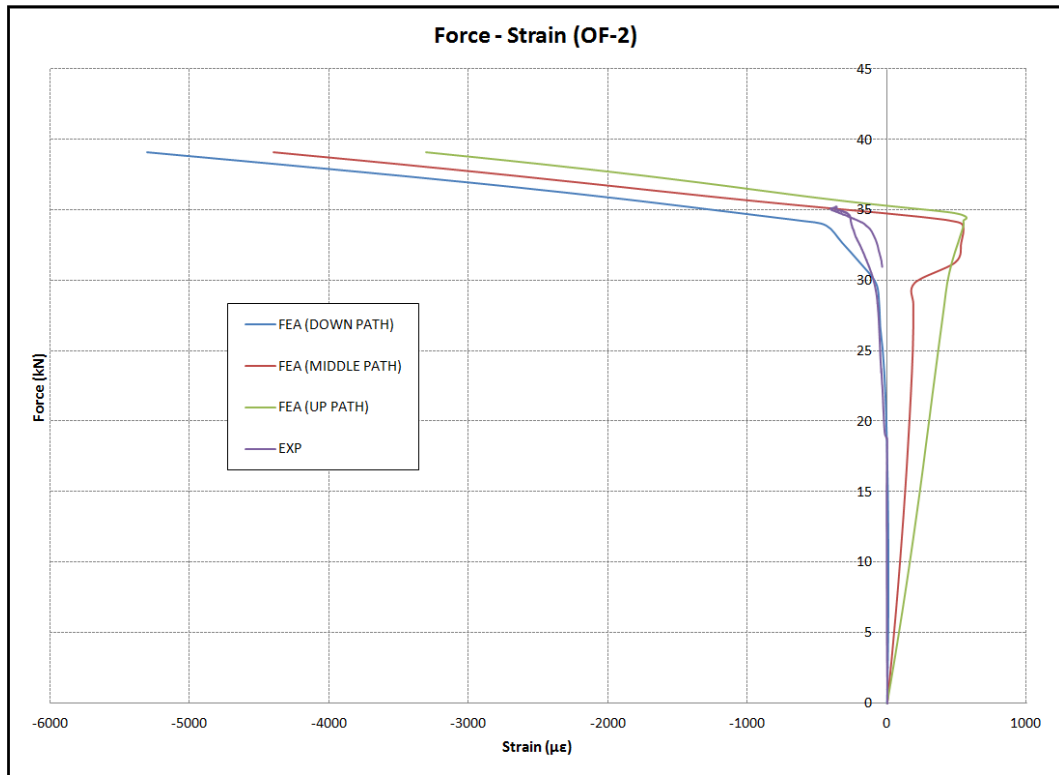
Η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για την θέση του αισθητήρα οπτικών ινών 1 (OF-1), παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.23. Η πειραματική καμπύλη (μωβ γραμμή), συγκρίνεται με τις αριθμητικές καμπύλες που προέκυψαν από τα μονοπάτια που αναφέρθηκαν. Ουσιαστικά η σύγκριση γίνεται με τους κόμβους των μονοπατιών, που αντιστοιχούν στο μήκος που είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας μέσα στο κολλητικό μέσο (5 mm). Έτσι, η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στον κόμβο που βρίσκεται στο κάτω μέρος του κολλητικού μέσου και 5 mm από το άκρο της αλληλοεπικάλυψης, η κόκκινη γραμμή αντίστοιχα στη μέση του πάχους και η πράσινη στο πάνω μέρος του.



Σχήμα 4.23: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στην θέση OF-1.

Παρατηρούμε, ότι η πειραματική καμπύλη συγκλίνει περισσότερο με την αριθμητική καμπύλη της μέσης του κολλητικού μέσου. Αυτό βέβαια συμβαίνει στα σημεία που δεν καταγράφεται πειραματικά η τοπική αστοχία από τον αισθητήρα. Έτσι, μπορεί να υποτεθεί, ότι η θέση του αισθητήρα της οπτικής ίνας 1 βρίσκεται στο μέσο του πάχους του κολλητικού μέσου.

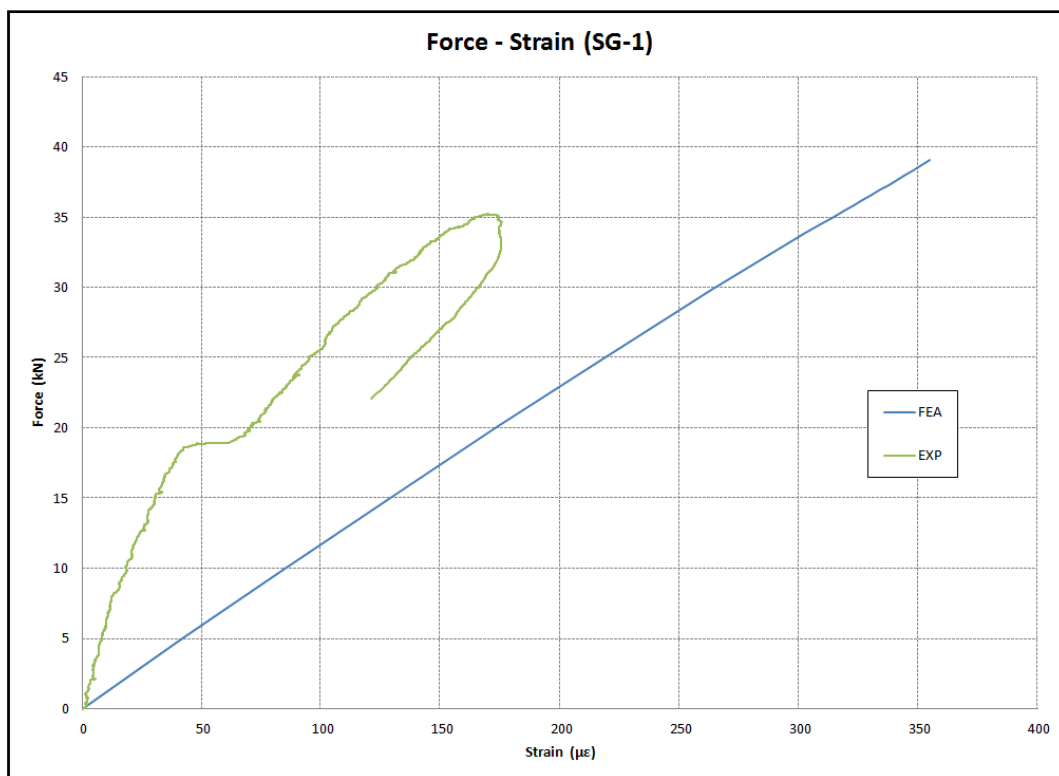
Με τον ίδιο τρόπο γίνεται και η σύγκριση των παραμορφώσεων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου στην θέση του αισθητήρα της οπτικής ίνας 2 (βλ. Σχήμα 4.24). Βλέπουμε ότι η πειραματική καμπύλη συμπίπτει πλήρως (μέχρι τα 30 kN) με την αριθμητική καμπύλη του κάτω μέρους του κολλητικού μέσου. Αυτό αποδεικνύει ότι η θέση του αισθητήρα της οπτικής ίνας 2 βρίσκεται πιο κοντά στο κάτω μέρος της κόλλας. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, πως συγκρίνοντας τα αριθμητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρείται η ίδια ποιοτική συμπεριφορά.



Σχήμα 4.24: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στην θέση OF-2.

Απο τα δύο παραπάνω διαγράμματα καταλαβαίνουμε ότι οι τελικές θέσεις των αισθητήρων πρέπει να είναι στο μέσο του κολλητικού μέσου για την οπτική ίνα 1 και στο κάτω μέρος του κολλητικού μέσου για την οπτική ίνα 2. Η διαπίστωση αυτή, έρχεται σε αντίθεση με την διαδικασία της αρχικής τοποθέτησης των αισθητήρων, όπως αυτή απεικονίστηκε στο Σχήμα 4.5. Επαληθεύεται όμως, για την περίπτωση του αισθητήρα της οπτικής ίνας 2 από την Εικόνα 4.6, όπου φαίνεται η τελική του θέση περίπου στο μέσο του πάχους της κόλλας. Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι δεν είναι δυνατή η ακριβής τοποθέτηση των αισθητήρων μέσα σε ένα ρευστό μέσο (με ακρίβεια δεκάτων του χιλιοστού), όπως ήταν το κολλητικό μέσο στην προκειμένη περίπτωση.

Τέλος γίνεται η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της αριθμητικής ανάλυσης για την μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου στην θέση του ηλεκτρικού επιμηκυνσιομέτρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.25. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δυο αποτελεσμάτων, η οποία πιθανόν να οφείλεται σε κάποιο σφάλμα κατά την καταγραφή των μετρήσεων.



Σχήμα 4.25: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων για την θέση SG-1.

Κεφάλαιο 5

3^η Εφαρμογή Ρωγματωμένη Πλάκα από Χάλυβα Ενισχυμένη με Επίθεμα από Σύνθετα Υλικά

5.1 Εισαγωγή

Στην εφαρμογή αυτή διερευνήθηκε η στατική συμπεριφορά σε εφελκυσμό ρωγματωμένης (notched) πλάκας χάλυβα, που ήταν ενισχυμένη με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Το πείραμα αυτό αποτελεί μια επέκταση προηγούμενης σειράς πειραμάτων που είχαν διεξαχθεί στο ίδιο εργαστήριο[30],[31], με τη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών σαν βασικές μετρητικές διατάξεις των παραμορφώσεων. Έτσι λοιπόν, ο σχεδιασμός αυτής της εφαρμογής βασίστηκε σε ήδη υπάρχοντα σχέδια και υλικά. Στόχος του πειράματος ήταν αφενός η ενσωμάτωση των αισθητήρων οπτικών ινών στο επίθεμα και ο έλεγχος αξιοπιστίας των μετρήσεών τους και αφετέρου η σύγκριση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων πειραμάτων.

Στην αρχή γίνεται αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και στη γεωμετρία του δοκιμίου. Στην πορεία περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος κατασκευής του δοκιμίου, περιλαμβάνοντας τις διάφορες κατεργασίες του μετάλλου και τον τρόπο που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες των οπτικών ινών πάνω σε αυτό. Σε δεύτερη φάση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις του πειράματος και μετά γίνεται μια παρουσίαση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων αυτού του πειράματος, με αυτά προηγούμενης σειράς όμοιων πειραματικών δοκιμών.

5.2 Σχεδιασμός Εφαρμογής

5.2.1 Υλικά

Η χαλύβδινη πλάκα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή και την τελική διαμόρφωση του δοκιμίου παραχωρήθηκε στο ENT από τα Ναυπηγεία Ελευσίνας Α.Ε. ως κοινός ναυπηγικός χάλυβας Grade A. Δοκιμές εφελκυσμού δοκιμίων από τον χάλυβα αυτόν, που πραγματοποιήθηκαν στο ENT, είχαν ως αποτέλεσμα τον καθορισμό ενός μέτρου ελαστικότητας του Young, E_{st} , ίσου με 183750 MPa και ενός ορίου διαρροής, σ_o , ίσου με 348 MPa.

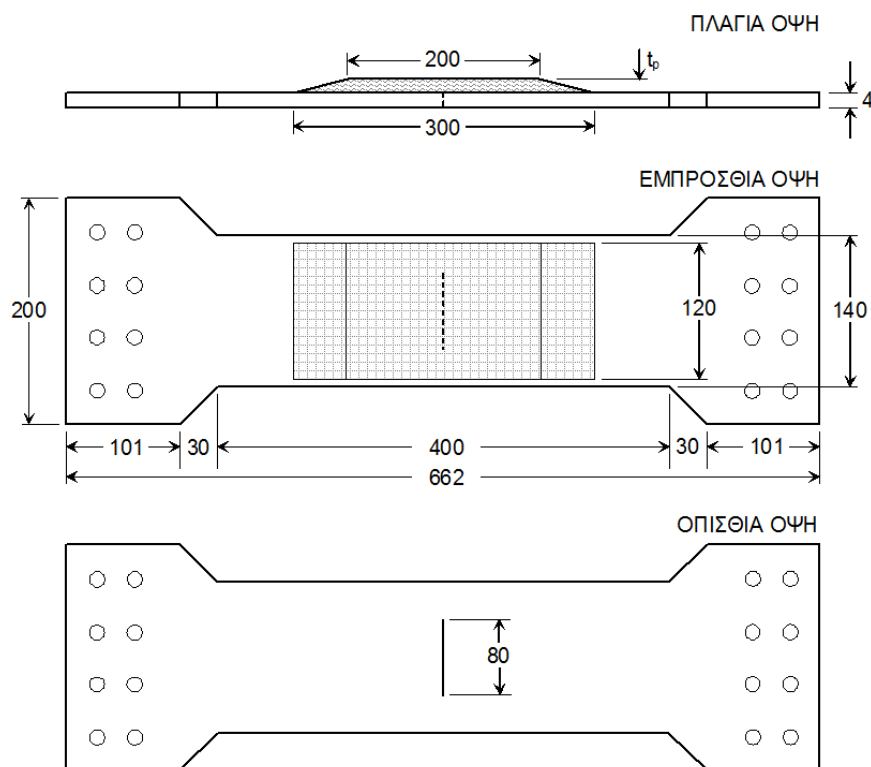
Το επίθεμα κατασκευάστηκε από έναν τύπο υφάσματος ινών άνθρακα με προσανατολισμό ινών $0^{\circ}/90^{\circ}$, πλέξη Plain Weave και επιφανειακό βάρος 240 g/m^2 της εταιρείας R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH (No. 43244).

Για την κατασκευή του πολύστρωτου επιθέματος από σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μορφοποίησης με το χέρι (Hand Lay-Up, HLU). Χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη Epoxydharz L 385 σε συνδυασμό με τον σκληρυντή Harter 386 (pot time 120 min και curing time 24 h).

Τέλος για τη μέτρηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αισθητήρες οπτικών ινών τύπου Fabry-Perot και συγκεκριμένα το μοντέλο FOS-N-NS-654D της εταιρείας FISO Technologies (με σειριακούς αριθμούς SF 10220, SF 10244, SF 10255 και SF 10246) με εύρος καταγραφής τα ± 5000 με και δύο ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (strain gages) με μήκος αναφοράς (gage length) 5mm, τύπου KFG-5-120-C1-11L1M2R της εταιρείας KYOWA.

5.2.2 Γεωμετρία

Η γεωμετρία του χαλύβδινου δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι κύριες διαστάσεις αυτού φαίνονται στο Σχήμα 5.1. Το ονομαστικό πάχος του χάλυβα, t_s , είναι 4 mm. Το κεντρικό ορθογώνιο τμήμα αναφοράς του δοκιμίου έχει μήκος, $L_s = 400$ mm και πλάτος $W_s = 140$ mm. Στο κέντρο του έχει διαμετρική εγκοπή (notch) μήκους $2a = 80$ mm, η οποία δημιουργήθηκε με τη μέθοδο κοπής με τόξο πλάσματος (plasma cutting) και δεν ξεπερνάει σε πάχος τα 0.5 mm. Στην εμπρόσθια όψη του, το δοκίμιο έχει κεντρικό επίθεμα από σύνθετα υλικά πάχους t_p , ενεργού μήκους $L_p = 200$ mm και πλάτους $W_p = 120$ mm. Το συνολικό μήκος του επιθέματος είναι 300 mm, αφού κατασκευάζεται έτσι ώστε τα άκρα του να είναι επικλινή. Η διαμόρφωση αυτή του επιθέματος επελέγη, για την αποφυγή υψηλών αποκολλητικών τάσεων στα άκρα του.



Σχήμα 5.1: Γεωμετρία δοκιμίου

Ο αριθμός των στρώσεων (layers) και άρα το πάχος του επιθέματος, t_p , καθορίστηκε με βάση μια επιθυμητή τιμή του λόγου ακαμψίας επιθέματος-πλάκας (Stiffness Ratio, SR) σύμφωνα με την σχέση $t_p = SR \cdot t_s \cdot E_s / E_p$ [30]. Η τιμή που επιλέχτηκε για την κατασκευή λογικού πάχους επιθέματος ήταν $SR=0.3$. Για την τιμή αυτή του λόγου ακαμψίας χρησιμοποιήθηκαν 16 στρώσεις οι οποίες χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες των τεσσάρων στρώσεων οι οποίες έχουν το ίδιο πλάτος αλλά διαφορετικό μήκος. Η σειρά με την οποία επιστρώθηκαν επάνω στο χαλύβδινο δοκίμιο για την κατασκευή του επιθέματος αλλά και οι διαστάσεις τους έχουν ως εξής:

- 1^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 200 mm
- 2^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 232 mm
- 3^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 264 mm
- 4^η Ομάδα – 4 στρώσεις μήκους 300 mm

Επομένως, κάθε επόμενη ομάδα στρώσεων κάλυπτε την προηγούμενη. Το τελικό πάχος του επιθέματος ήταν $t_p = 5.3$ mm και εν συνεχεία το πάχος κάθε στρώσης $t_{ply} = 0.33$ mm.

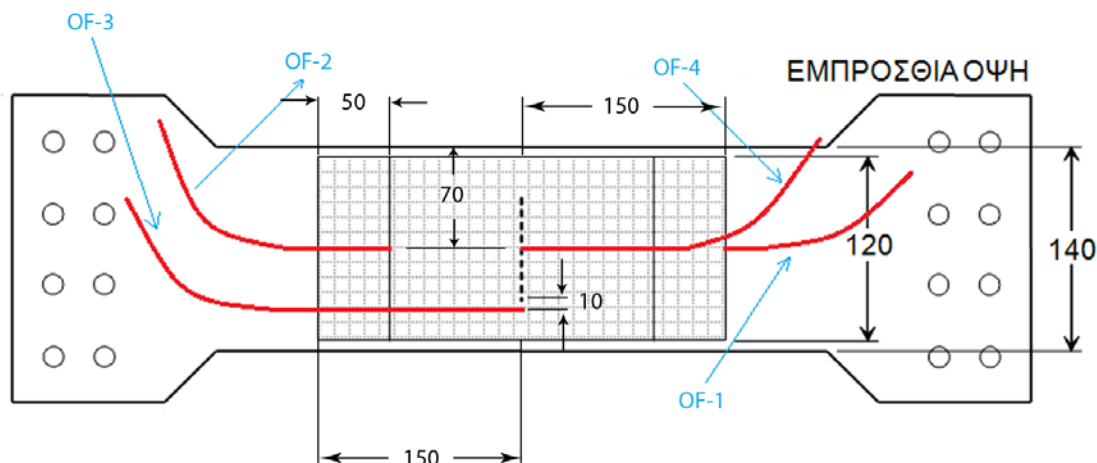
Λόγω των μεγάλων διαστάσεών του, το δοκίμιο δεν μπορούσε να προσαρμοστεί κατευθείαν στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής δοκιμών του ENT. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν ειδικοί χαλύβδινοι προσαρμογείς, προκειμένου να προσδεθεί το δοκίμιο στην υδραυλική μηχανή δοκιμών. Το δοκίμιο συνδέεται με τους προσαρμογείς με τη βοήθεια 16 κοχλιών διάστασης M16, μέσα από τρύπες που έχουν ανοιχτεί για το σκοπό αυτό στο δοκίμιο.

5.2.3 Σχεδιασμός της Δοκιμής και Κατασκευή Δοκιμίου

Αρχικά έγινε σχεδιασμός για τις θέσεις που θα τοποθετηθούν οι οπτικές ίνες και τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις οπτικές ίνες (optical fibers, OF) και δυο επιμηκυνσιόμετρα (strain gages, SG) όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

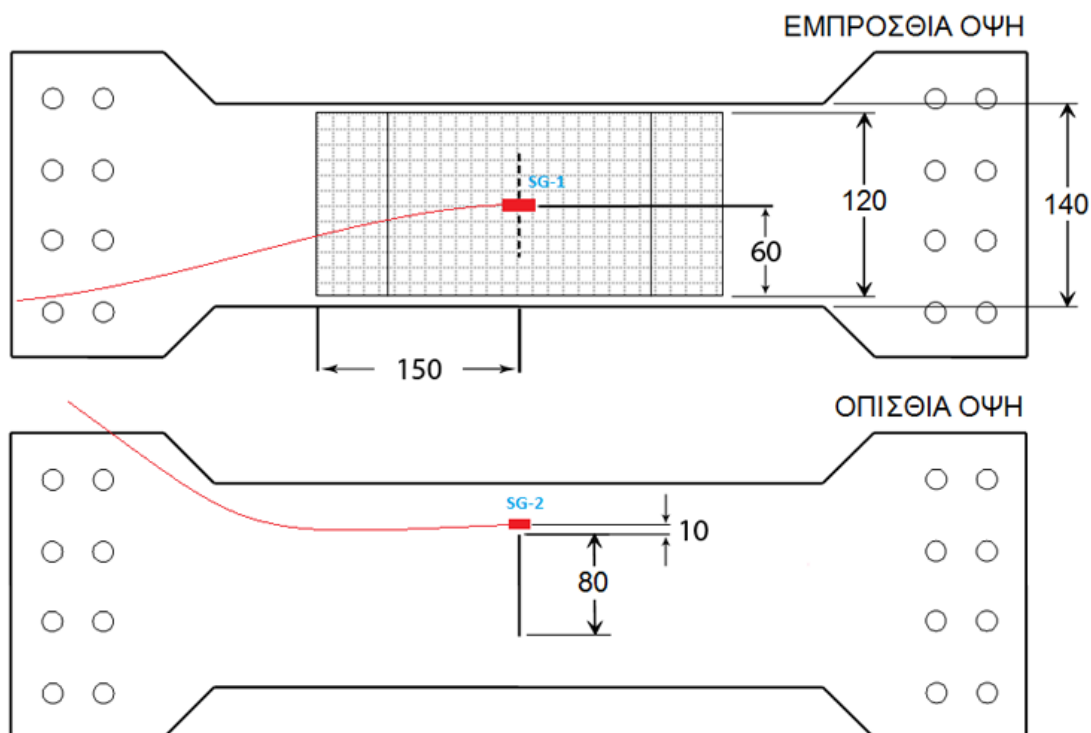
Σύμφωνα με τον σχεδιασμό του πειράματος οι οπτικές ίνες και τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν ως εξής (βλ. Σχήμα 5.2 και 5.3):

- Η οπτική ίνα 1 (OF-1) στη διεπιφάνεια μεταξύ του χαλύβδινου δοκιμίου και του επιθέματος, στο μέσο του πλάτους του επιθέματος και συγκεκριμένα στην άκρη του, τοποθετημένη 5 mm μέσα σε αυτό (patch edge). Η επιλογή αυτής της θέσης έγινε για να καταγραφεί το μέγεθος των παραμορφώσεων στο άκρο του επιθέματος και να συσχετιστεί με το φορτίο αποκόλλησης του.
- Η οπτική ίνα 2 (OF-2) στη διεπιφάνεια μεταξύ του χαλύβδινου δοκιμίου και του επιθέματος, στο μέσο του πλάτους του επιθέματος και συγκεκριμένα 50 mm εσωτερικά αυτού. Η θέση αυτή επιλέχτηκε για να καταγραφεί το μέγεθος των παραμορφώσεων στο σημείο που θα βρίσκεται το άκρο της πρώτης στρώσης.
- Η οπτική ίνα 3 (OF-3) εσωτερικά του επιθέματος, μεταξύ τέταρτης και πέμπτης στρώσης, 10 mm από το άκρο της εγκοπής (notch tip). Σκοπός της τοποθέτησης αυτής είναι να καταγραφούν τα φορτία που παραλαμβάνονται από το επίθεμα, καθώς και να δωθεί μια εικόνα του τρόπου μεταφοράς των φορτίων από το χαλύβδινο υπόστρωμα προς το επίθεμα στην θέση που αναμένονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις.
- Η οπτική ίνα 4 (OF-4) εσωτερικά του επιθέματος, μεταξύ τέταρτης και πέμπτης στρώσης πάνω από το μέσο της εγκοπής. Σκοπός της τοποθέτησης αυτής είναι παρόμοιος με αυτόν της οπτικής ίνας 3.



Σχήμα 5.2 : Θέσεις οπτικών ίνων στο δοκίμιο.

- Το επιμηκυσσιόμετρο 1 (SG-1) στο κέντρο του επιθέματος, πάνω από την εγκοπή με σκοπό να καταγραφούν τα φορτία που παραλαμβάνει το επίθεμα και
- Το επιμηκυσσιόμετρο 2 (SG-2) στην πίσω πλευρά του δοκιμίου, 10 mm από το άκρο της εγκοπής που έχει σκοπό να καταγράψει την έναρξη της διαρροής στην περιοχή αυτή, έτσι ώστε αυτή να μπορεί να συσχετιστεί με το φορτίο αστοχίας ή το φορτίο αποκόλλησης του επιθέματος.

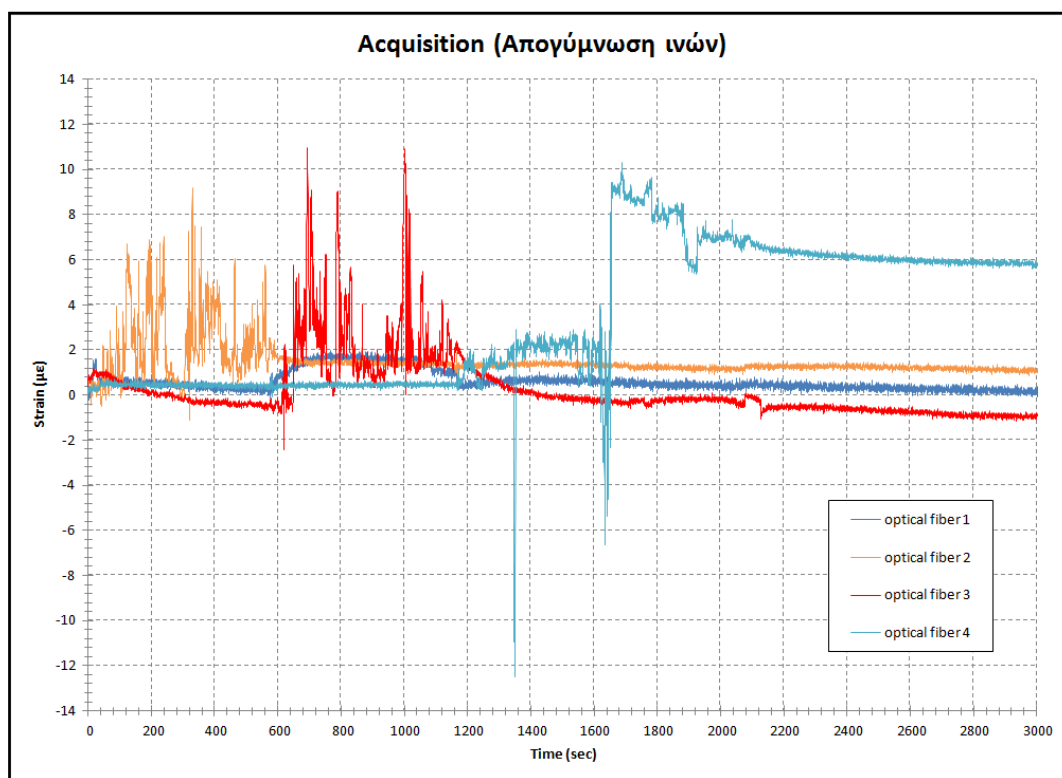


Σχήμα 5.3: Θέσεις επιμηκυσσιομέτρων στο δοκίμιο.

Έπειτα έγιναν οι απαραίτητες διεργασίες για την προετοιμασία του δοκιμίου και την κατασκευή του επιθέματος. Αρχικά έπρεπε να διασφαλιστεί ότι το δοκίμιο μπορούσε να τοποθετηθεί στους ειδικούς χάλυβδινους προσαρμογείς. Χρειάστηκε να διανοιχτούν περισσότερο κάποιες από τις οπές για να βιδωθούν συνολικά και οι 16 βίδες.

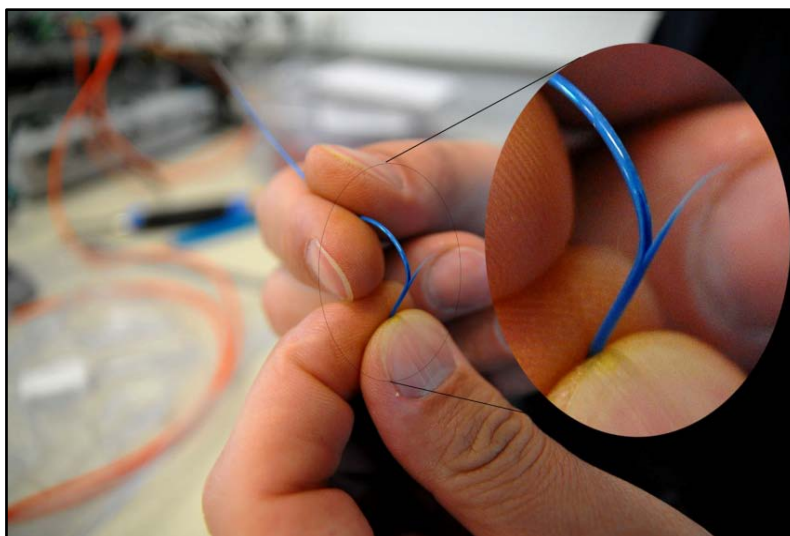
Λειάνθηκε στη συνέχεια η θέση που θα τοποθετούνταν το ηλεκτρικό επιμηκυσιόμετρο 2 (SG-2) από την κάτω μεριά του δοκιμίου, με λειαντικό τροχό και έγινε αμμοβολή στο τμήμα του δοκιμίου που θα τοποθετούνταν το επίθεμα (300 mm x 140 mm στο κέντρο του δοκιμίου). Τοποθετήθηκε το δοκίμιο σε σακούλα ούτως ώστε να προστατευθεί η αμμοβολημένη περιοχή από τον αέρα και την υγρασία, μέχρι να γίνουν οι επόμενες διεργασίες στο δοκίμιο.

Επιλέχθηκαν οι τέσσερις ίνες που θα χρησιμοποιούνταν και επιβεβαιώθηκε η λειτουργία τους ύστερα από τη σύνδεσή τους στον βασικό εξοπλισμό καταμέτρησης. Απογυμνώθηκαν από την εξωτερική τους επένδυση οι τρεις από τις τέσσερις ίνες (αυτές που θα εισχωρούσαν βαθύτερα μέσα στο επίθεμα), έτσι ώστε να έχουν το μικρότερο δυνατό πάχος κατά την τοποθέτησή τους στο επίθεμα. Ταυτόχρονα καταγράφονταν οι μετρήσεις των ινών κατά την απογύμνωση (βλ. Σχήμα 5.4). Η καταγραφή πραγματοποιήθηκε για να γίνει αντιληπτός ο βαθμός καταπόνησης των ινών αλλά και ενδεχόμενη αστοχία αυτών. Κατά τη διάρκεια της απογύμνωσης υπήρχαν πολύ μικρές μεταβολές στις παραμορφώσεις της τάξης των $\pm 1 \mu\epsilon$ και αυτό λόγω της επαφής των αισθητήρων σε διάφορες επιφάνειες. Η απογύμνωση έγινε πολύ προσεχτικά με ένα κοπίδι και διήρκησε περίπου 30 λεπτά.



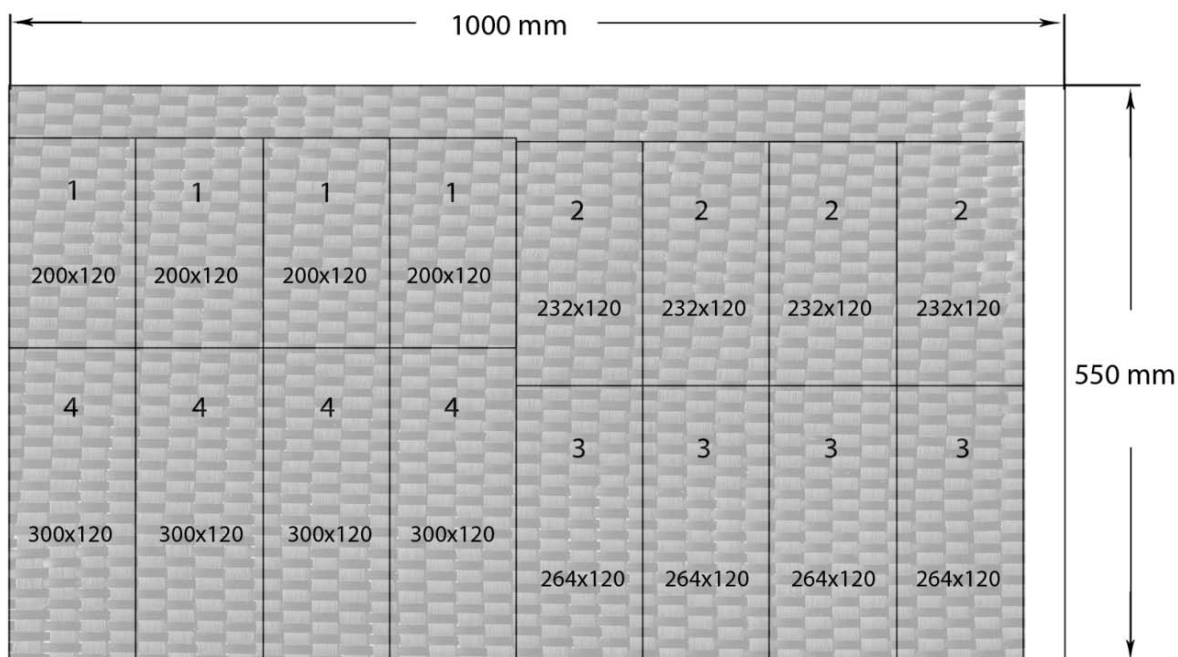
Σχήμα 5.4: Καταγραφή παραμορφώσεων κατά την απογύμνωση των ινών συναρτήσει του χρόνου.

Κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης της εξωτερικής επένδυσης σε μιας εξ αυτών, το κοπτικό εργαλείο εισχώρησε στην επικάλυψη του πυρήνα με αποτέλεσμα να την κόψει τοπικά και να φτάσει οριακά στον πυρήνα, χωρίς όμως απ' ό,τι φάνηκε από τις μετρήσεις να καταστραφεί (βλ. Εικόνα 5.1). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε κανονικά στο πείραμα. Αφαιρέθηκε στις δύο από τις τρεις οπτικές ίνες, εξωτερική επένδυση (πορτοκαλί περίβλημα) και ενισχυτικές ίνες συνολικού μήκους 120 mm έκαστος, ενώ στην τρίτη αφαιρέθηκαν 30 mm.



Εικόνα 5.1: Κόψιμο της μπλε επικάλυψης της οπτικής ίνας.

Υπολογίστηκε στη συνέχεια η συνολική επιφάνεια του υφάσματος που χρειάζεται για την κατασκευή του επιθέματος (0.478m^2) και έπειτα κόπηκαν με τη χρήση ηλεκτρικού ψαλιδιού (από ένα κομμάτι υφάσματος 0.55m^2) 16 κομμάτια σε 4 ομάδες στις διαστάσεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα (βλ. Σχήμα 5.5)



Σχήμα 5.5: Διαστασιολόγηση των στρώσεων πάνω στο ύφασμα.

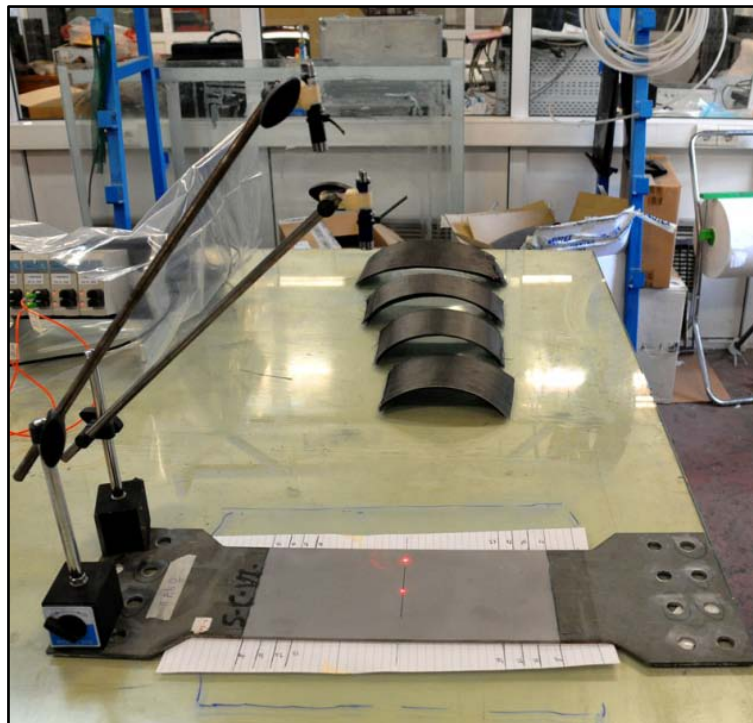
Βγήκε το δοκίμιο από τον σάκο και μετρήθηκε η τραχύτητα της αμμοβολημένης περιοχής με φορητό ηλεκτρονικό τραχύμετρο τύπου TIME TR200, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 4287-97 «Geometrical Product Specifications (GPS) - surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface parameters». Έγιναν ξεχωριστά μετρήσεις στις περιοχές δεξιά και αριστερά της εγκοπής, τρεις για κάθε μια εκ των διευθύνσεων 0° , 90° , και $\pm 45^\circ$, ως προς την διαμήκη διάσταση του δοκιμίου. Σε κάθε περίπτωση το μήκος δειγματοληψίας ήταν ίσο με 4 mm. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις τραχύτητας επιφάνειας χάλυβα.

Μέση τραχύτητα – R_a (μm)				
0°	90°	$+45^\circ$	-45°	Μέση τιμή
4.57	4.49	4.31	4.61	4.49
Μέση τραχύτητα – R_z (μm)				
0°	90°	$+45^\circ$	-45°	Μέση τιμή
30.79	29.9	29.72	30.73	30.28

Στην οπίσθια όψη του δοκιμίου τοποθετήθηκε κερί για να προστατευτεί η επιφάνεια από την πλεονάζουσα ρητίνη κατά τη διαδικασία τοποθέτησης του επιθέματος. Για τον ίδιο λόγο τοποθετήθηκε στην ίδια πλευρά του δοκιμίου ταινία, στα σημεία της εγκοπής και της θέσης που θα τοποθετούνταν το δεύτερο επιμηκυνσιόμετρο (SG-2). Κάτω από το δοκίμιο τοποθετήθηκε βαθμονομημένο χαρτί με τις θέσεις της κάθε στρώσης ούτως ώστε να τοποθετηθούν με ακρίβεια πάνω στο δοκίμιο.

Έπειτα έγινε χάραξη των θέσεων που θα τοποθετούνταν οι οπτικές ίνες 1 και 2. Για τις ίνες 3 και 4 επειδή θα βρίσκονταν μέσα στο επίθεμα και η θέση τους θα είχε άμεση σχέση με την θέση της εγκοπής, η οποία όμως δεν θα ήταν ορατή λόγω των τεσσάρων πρώτων στρώσεων, έγινε χρήση 2 laser pointer. Σε δυο μαγνητικές βάσεις που τοποθετήθηκαν στο άκρο του μεταλλικού δοκιμίου με τέτοιο τρόπο που να μην ενοχλούν την διαδικασία επίστρωσης του επιθέματος, τοποθετήθηκαν κάθετα δύο laser pointer (βλ Εικόνα 5.2). Αυτά, πριν την επίστρωση του επιθέματος προσαρμόστηκαν να κατευθύνουν τις δέσμες τους στις θέσεις που θα τοποθετούνταν οι οπτικές ίνες OF-3 και OF-4.



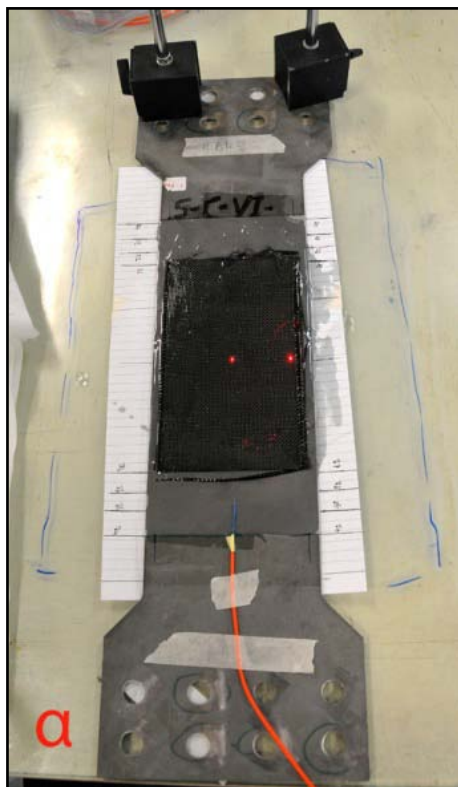
Εικόνα 5.2 : Τοποθέτηση των laser pointer στην σωστή θέση.

Προετοιμάστηκε η ρητίνη με τις προβλεπόμενες αναλογίες ρητίνης – σκληρυντή, 100:35 κ.β., 100:43 κ.ο. με χρόνο επεξεργασίας (potting time) 120 λεπτά και χρόνο σκλήρυνσης (curing time) 24 ώρες.

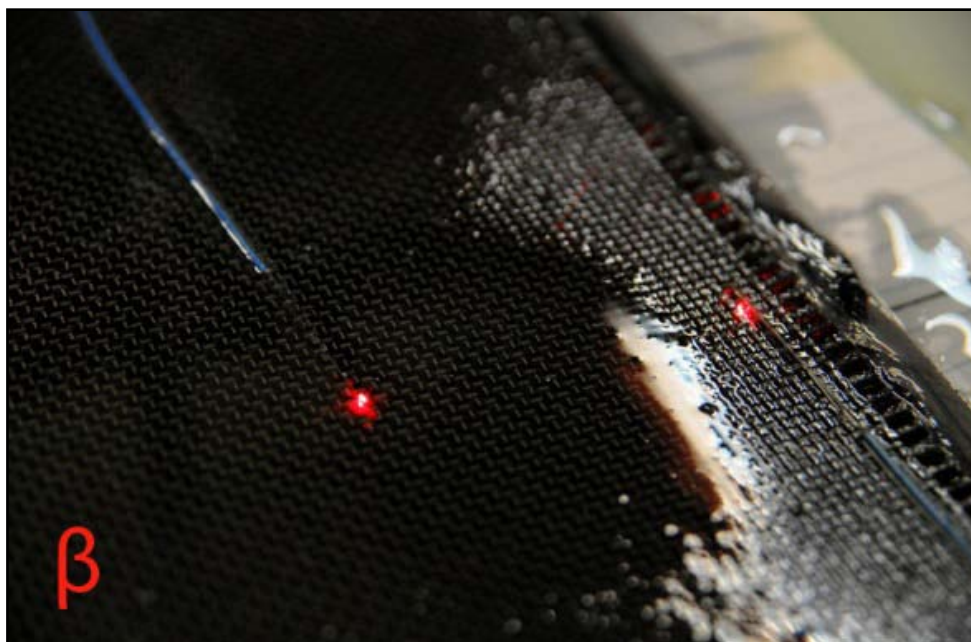
Δεδομένης της ευαισθησίας των οπτικών ινών, άρχισαν να λαμβάνονται μετρήσεις καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής του επιθέματος, για να μπορεί να προσδιοριστεί ο βαθμός καταπόνησης και ενδεχόμενη αστοχία αυτών. Προγραμματίστηκε καταγραφή μετρήσεων 36 ωρών, ούτως ώστε να συμπεριληφθεί στον χρόνο κατασκευής του επιθέματος και ο χρόνος σκλήρυνσης της ρητίνης με συχνότητα δειγματοληψίας 0.5 Hz.

Καθαρίστηκε η αμμοβολημένη επιφάνεια με καθαριστικό σπρέι επιφανειών τύπου Loctite 7063 και αμέσως τοποθετήθηκε η πρώτη στρώση ρητίνης. Ακριβώς από πάνω τοποθετήθηκε η οπτική ίνα 2 στην μαρκαρισμένη θέση και συγκρατήθηκε σταθερά πάνω στο χαλύβδινο δοκίμιο έξω από την περιοχή του επιθέματος με χαρτοταινία.

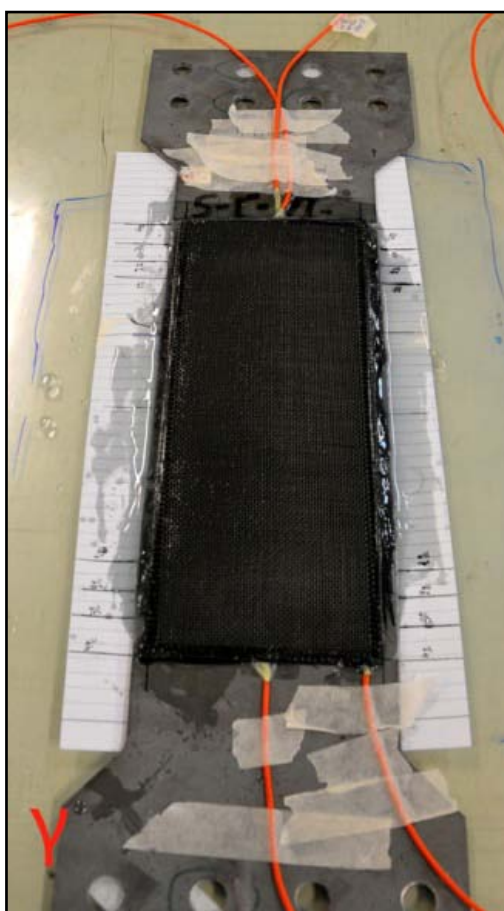
Τοποθετήθηκε με ιδιαίτερη προσοχή (γιατί ήταν σε άμεση επαφή με την πρώτη ίνα) η πρώτη στρώση, διαστάσεων 200 mm x 120 mm, και έπειτα οι τρεις επόμενες στρώσεις (βλ. Εικόνα 5.3α). Τοποθετήθηκαν οι οπτικές ίνες 3 και 4 στα σημεία που δείχνουν τα λέιζερ (μεταξύ 4^{ης} και 5^{ης} στρώσης) και έπειτα συγκρατήθηκαν στο χαλύβδινο δοκίμιο με χαρτοταινία (βλ. Εικόνα 5.3β). Στην επόμενη φάση τοποθετήθηκαν οι επόμενες 8 στρώσεις (τέσσερις των 232x120mm και τέσσερις των 262x120 mm). Στην άκρη του επιθέματος και πριν την πρώτη στρώση της τελευταίας ομάδας τοποθετήθηκε η οπτική ίνα 1 στην μαρκαρισμένη θέση, και συγκρατήθηκε σταθερά με χαρτοταινία. Κατά την τοποθέτηση της 13^{ης} στρώσης (300x120mm) παρατηρήθηκε ότι αυτή η οπτική ίνα είχε μετατοπιστεί από την αρχική θέση της, έξω από την περιοχή του επιθέματος, λόγω της πίεσης που άσκησε το ρολό στην τελευταία στρώση. Για τον λόγο αυτό έγινε διόρθωση της θέσης της ούτως ώστε ο αισθητήρας της να επανατοποθετηθεί στο σωστό σημείο. Τέλος τοποθετήθηκαν οι τρεις τελευταίες στρώσεις ολοκληρώνοντας έτσι την κατασκευή του επιθέματος, αφαιρέθηκαν οι βάσεις των λέιζερ και αφέθηκε το επίθεμα να πολυμεριστεί για 24 ώρες σε ελεγχόμενη θερμοκρασία δωματίου (26°C και 33% υγρασία) βλ. Εικόνα 5.3γ. Η διαδικασία τοποθέτησης διήρκησε 50 λεπτά και οι αρχικές συνθήκες του χώρου ήταν 19.4°C και 51% υγρασία.



Εικόνα 5.3α: Τοποθέτηση 1^{ης} ομάδας στρώσεων πάνω από την οπτική ίνα OF-2.

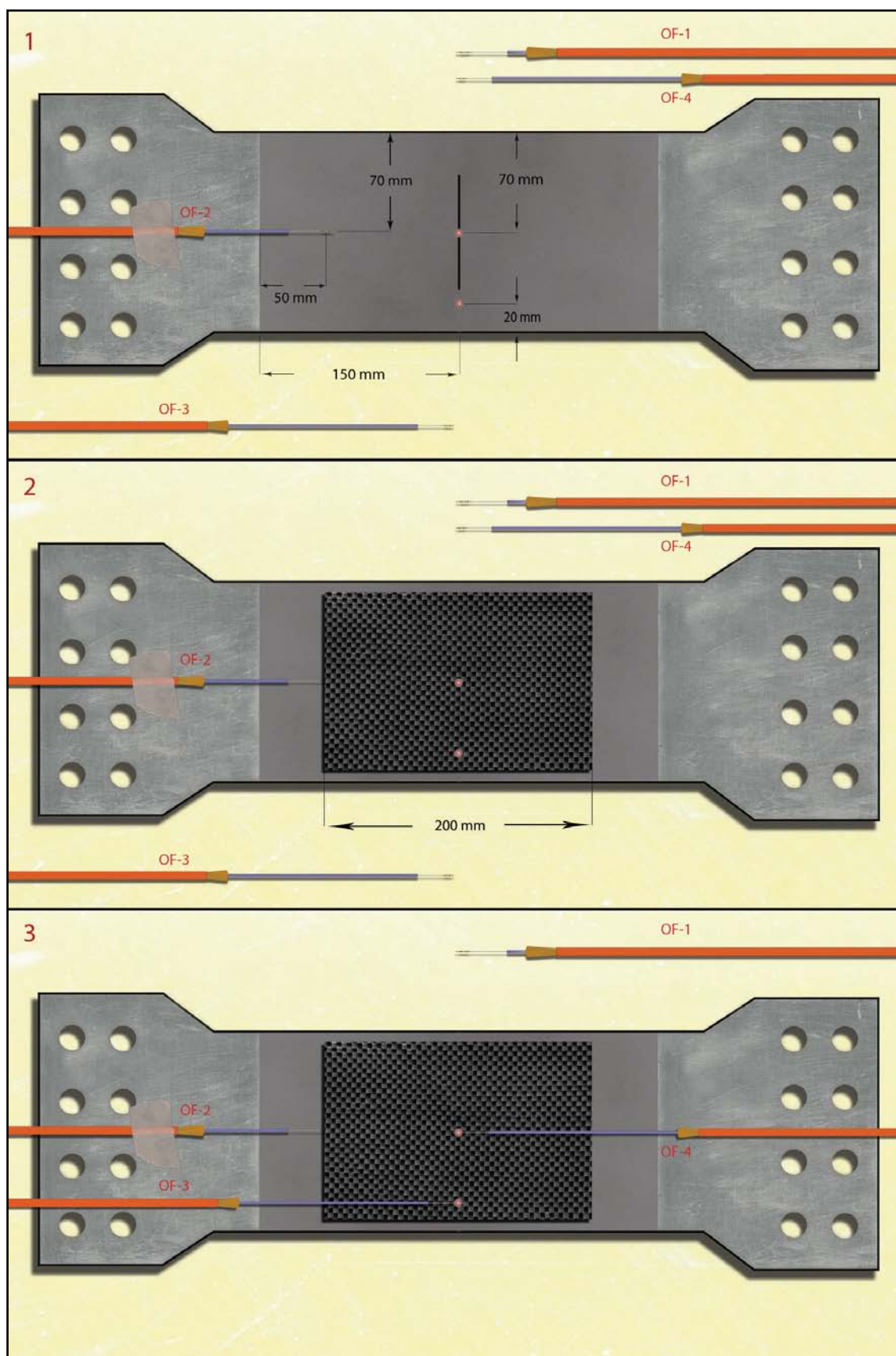


Εικόνα 5.3β: Τοποθέτηση των οπτικών ινών OF-3 και OF-4 πάνω από την 4^η στρώση.

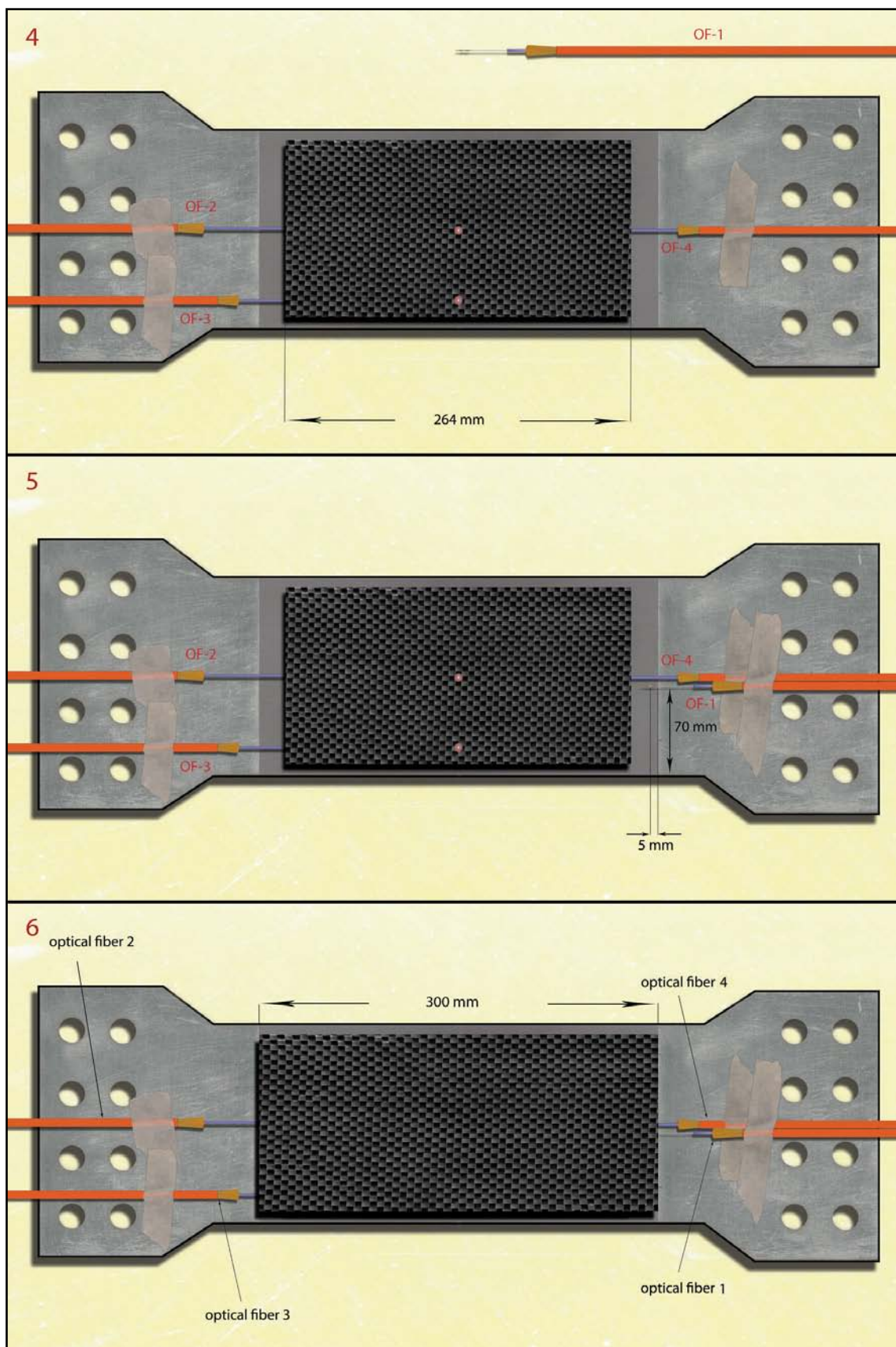


Εικόνα 5.3γ: Ολοκληρωμένη η κατασκευή του επιθέματος.

Η παραπάνω διαδικασία γίνεται πιο κατανοητή με τη βοήθεια των Σχημάτων 5.6 και 5.7.

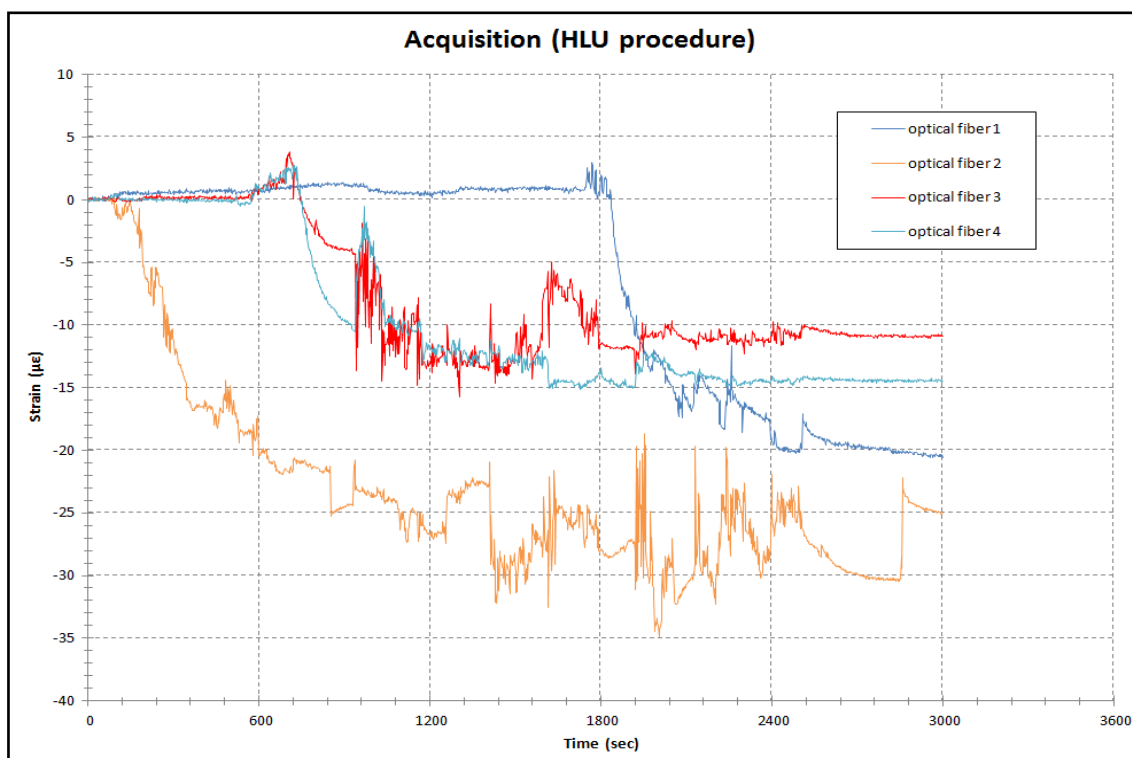


Σχήμα 5.6: Βήματα τοποθέτησης των αισθητήρων και του επιθέματος.



Σχήμα 5.7: Βήματα τοποθέτησης των αισθητήρων και του επιθέματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται σε διάγραμμα η καταγραφή των αισθητήρων οπτικών ινών κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης του επιθέματος. Οι τιμές των παραμορφώσεων ήταν μικρές και κυμάνθηκαν από 0 έως -35 $\mu\epsilon$ (βλ. Σχήμα 5.8). Παρατηρείται ότι η οπτική ίνα 2 (αυτή που τοποθετήθηκε πρώτη), κατέγραψε τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις, γεγονός αναμενόμενο εφόσον εφαπτόταν με το χάλυβδινο δοκίμιο και ασκούσαν πίεση πάνω της από την αρχή της κατασκευής του επιθέματος. Από τις καταγεγραμμένες παραμορφώσεις, συμπεραίνουμε ότι η επίστρωση του επιθέματος με την προαναφερθείσα διαδικασία δεν επηρέασε την ακεραιότητα των αισθητήρων.

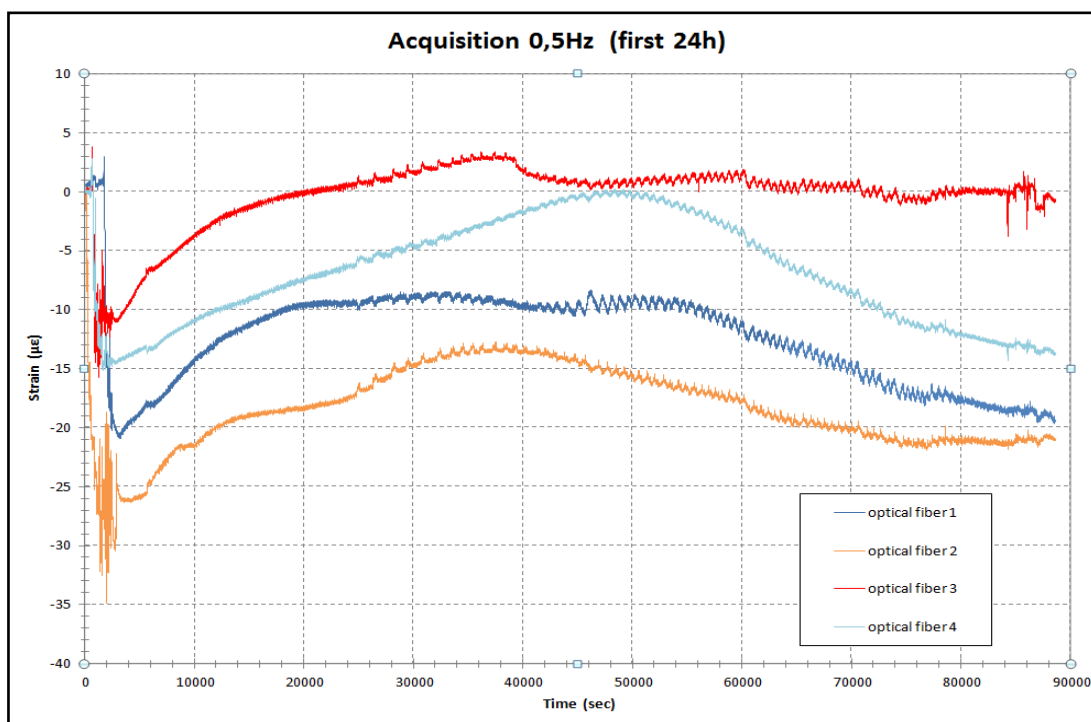


Σχήμα 5.8: Μεταβολή των παραμορφώσεων, κατά την επίστρωση του επιθέματος συναρτήσει του χρόνου.

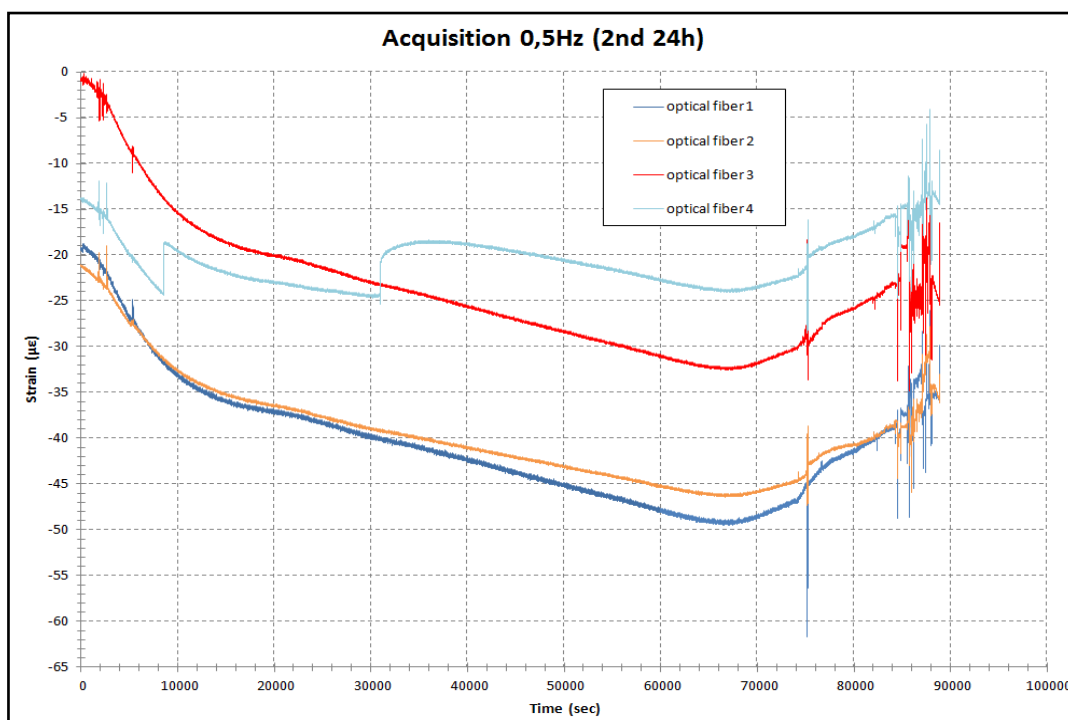
Παρακάτω παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι μετρήσεις των οπτικών ινών, από την αρχή της επίστρωσης του επιθέματος και για τις επόμενες πέντε ημέρες. Οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε τρία στάδια: το πρώτο εικοσιτετράωρο, το δεύτερο εικοσιτετράωρο, καθώς και τα τρία επόμενα. Στις δύο πρώτες μετρήσεις η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 0.5 Hz, ενώ για την τρίτη ήταν 0.1 Hz. Στόχος των μετρήσεων αυτών ήταν να καταγραφούν ενδεχόμενες παραμένουσες παραμορφώσεις στη ρητίνη κατά την στερεοποίηση της.

Στα δύο παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 5.9. & Σχήμα 5.10) απεικονίζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια του πρώτου και δεύτερου εικοσιτετράωρου. Στο πρώτο παρατηρούμε, την αρχική σταδιακή μείωση των θλιπτικών παραμορφώσεων για τις πρώτες 12 ώρες και την σταδιακή αύξηση τους τις επόμενες 12 έως ότου τελικά λάβουν τιμές κοντά στις αρχικές. Οι τιμές των παραμορφώσεων αυτών θεωρούνται μικρές και δεν επιτρέπουν να εξαχθεί κάποιο βασικό συμπέρασμα. Στο δεύτερο διάγραμμα παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων. Οι παραμορφώσεις φτάνουν τα -30 έως -50 $\mu\epsilon$. Η οπτική ίνα 4 φαίνεται ότι σε δύο σημεία αποκλίνει της σταθερής της πορείας. Αυτό ίσως οφείλεται σε «γλίστρημα» του αισθητήρα μέσα στην ρητίνη. Παρόλα αυτά οι τιμές είναι πολύ μικρές για να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Οι ταυτόχρονες μεταβολές που παρατηρούνται στις καταγραφές των οπτικών ινών οφείλονται σε μετακίνηση του δοκιμίου

πάνω στον πάγκο εργασίας. Στο τέλος των μετρήσεων παρατηρείται μια έντονη καταγραφή που οφείλεται στις μετακινήσεις του δοκιμίου κατά τη τοποθέτηση των δύο ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων.

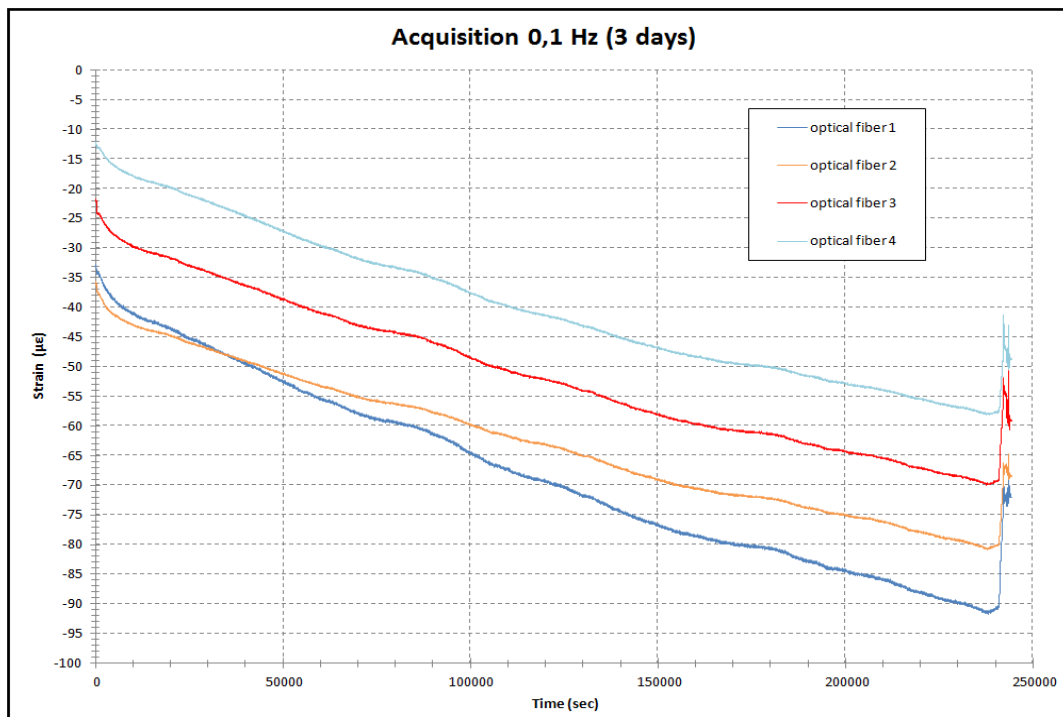


Σχήμα 5.9: Μεταβολή των παραμορφώσεων, για τις πρώτες 24 ώρες μετά την επίστρωση του επιθέματος, συναρτήσει του χρόνου.



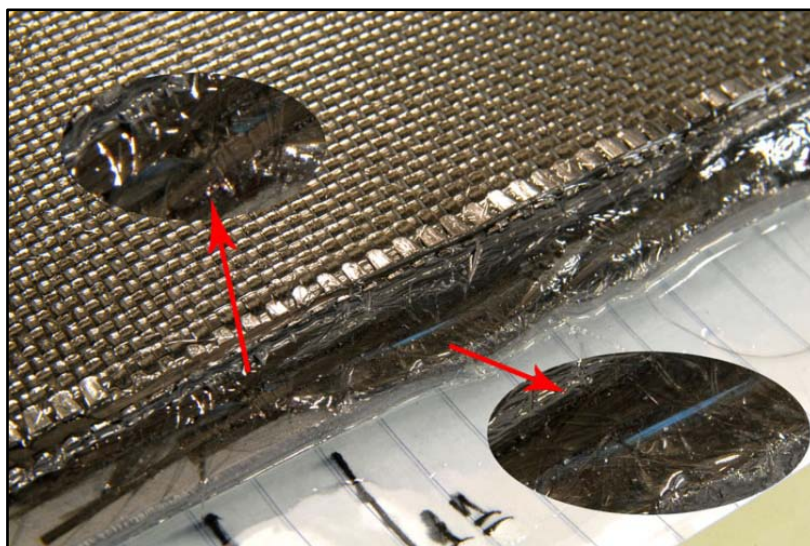
Σχήμα 5.10: Μεταβολή των παραμορφώσεων, το δεύτερο 24ωρο μετά την επίστρωση του επιθέματος συναρτήσει του χρόνου.

Στο τρίτο διάγραμμα (Σχήμα 5.11) παρατηρείται γενικά σταθερή αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων. Οι τιμές έφτασαν τα -60 έως -90 με. Γίνεται έτσι αντιληπτό το μέγεθος των παραμενουσών παραμορφώσεων μέσα στο επίθεμα. Στο τέλος της καταγραφής παρατηρείται μια ταυτόχρονη μείωση των παραμορφώσεων που οφείλεται πάλι σε μετακίνηση του δοκιμίου.



Σχήμα 5.11: Μεταβολή των παραμορφώσεων, την 3^η, 4^η και 5^η μέρα από την επίστρωση του επιθέματος, συναρτήσει του χρόνου.

Στην συνέχεια κατά την επιθεώρηση του δοκιμίου παρατηρήθηκε ότι η οπτική ίνα 3 είχε ξεφύγει της προσχεδιασμένης θέσης της, καθώς ένα μέρος του προστατευτικού περιβλήματος (μπλε περίβλημα) διακρινόταν εξωτερικά του επιθέματος, κάτω από την ρητίνη (βλ. Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4: Λεπτομέρεια από την μετατόπιση της οπτικής ίνας 3 στο άκρο του επιθέματος.

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μην γνωρίζουμε την ακριβή θέση της ίνας μέσα στο επίθεμα. Ο λόγος αυτής της μετατόπισης φαίνεται να είναι η πίεση που ασκήθηκε στις στρώσεις του επιθέματος κατά την επίστρωση του και συνεπώς και στην ίνα. Επειδή η οπτική ίνα βρισκόταν αρχικά πολύ κοντά στο άκρο του επιθέματος (10 mm) , φαίνεται πως με τις διαδοχικές πιέσεις από το χειροκίνητο ρολό σπρώχτηκε σιγά σιγά προς τα έξω.

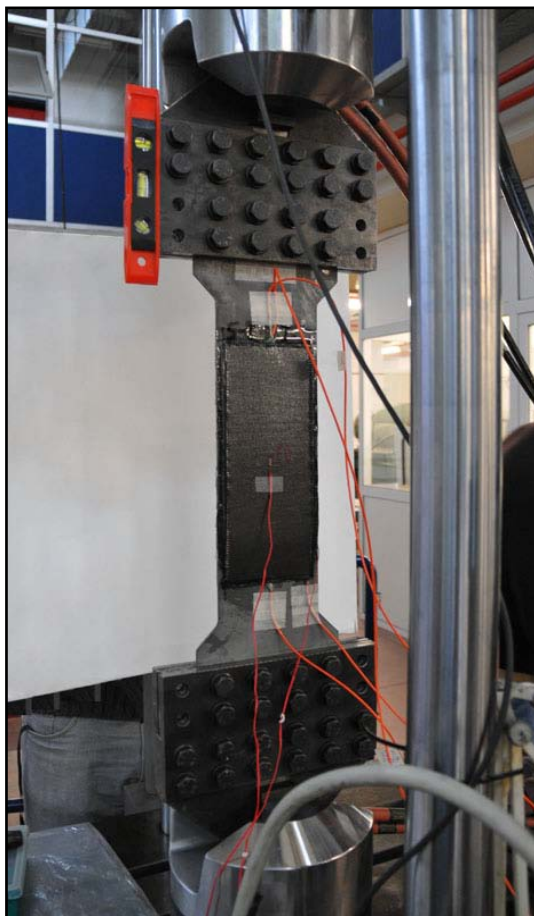
Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι κατά την τοποθέτηση των στρώσεων με την μέθοδο της επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay Up) οι στρώσεις μετακινούνταν ελάχιστα από την θέση τους, ανάλογα με την πίεση που εφαρμοζόταν πάνω τους με το ρολό. Αυτό με την σειρά του σημαίνει ότι οι οπτικές ίνες ενδεχομένως να μην βρίσκονται ακριβώς στις προκαθορισμένες θέσεις τους. Αυτό διαπιστώνεται στο επόμενο εδάφιο όταν αφαιρείται το επίθεμα από το δοκίμιο, μετά το πέρας του πειράματος. Επίσης οι ίνες που ήταν σε άμεση επαφή με τον χαλύβδινο δοκίμιο μπορούσαν να τοποθετηθούν θεωρητικά νωρίτερα, αλλά επιλέχθηκε να μην κολληθούν με κυανοακρυλική κόλλα, όπως έγινε στα προηγούμενα πειράματα, για να μην υπάρχουν δυο διαφορετικές φάσεις από διαφορετικά κολλητικά μέσα στην περιοχή του επιθέματος.

5.3 Παράμετροι Δοκιμής

Η υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS του ENT στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές (Εικόνα 5.5), είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002. Οι αρπάγες συγκράτησης των προσαρμογέων των δοκιμίων είναι υδραυλικές.

Πριν από την πειραματική δοκιμή εφαρμόστηκε στο δοκίμιο μια προφόρτιση ίση με 30 kN, έτσι ώστε το σύστημα δοκίμιο-προσαρμογείς να βρεθεί στην τελική του θέση, μηδενίζοντας τις τυχόν ανοχές του. Η προφόρτιση αυτή επιβλήθηκε ως γραμμικά αυξανόμενη δύναμη με ρυθμό 0.5 kN/s. Στη συνέχεια, το δοκίμιο αποφορτίστηκε τελείως με τον ίδιο ρυθμό. Η τελική φόρτιση επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης με ταχύτητα 1.0 mm/min. Η δοκιμή τελείωσε όταν το επίθεμα σταμάτησε να συμβάλει στην αντοχή του δοκιμίου και ο χάλυβας είχε μπει βαθιά μέσα την πλαστική περιοχή.

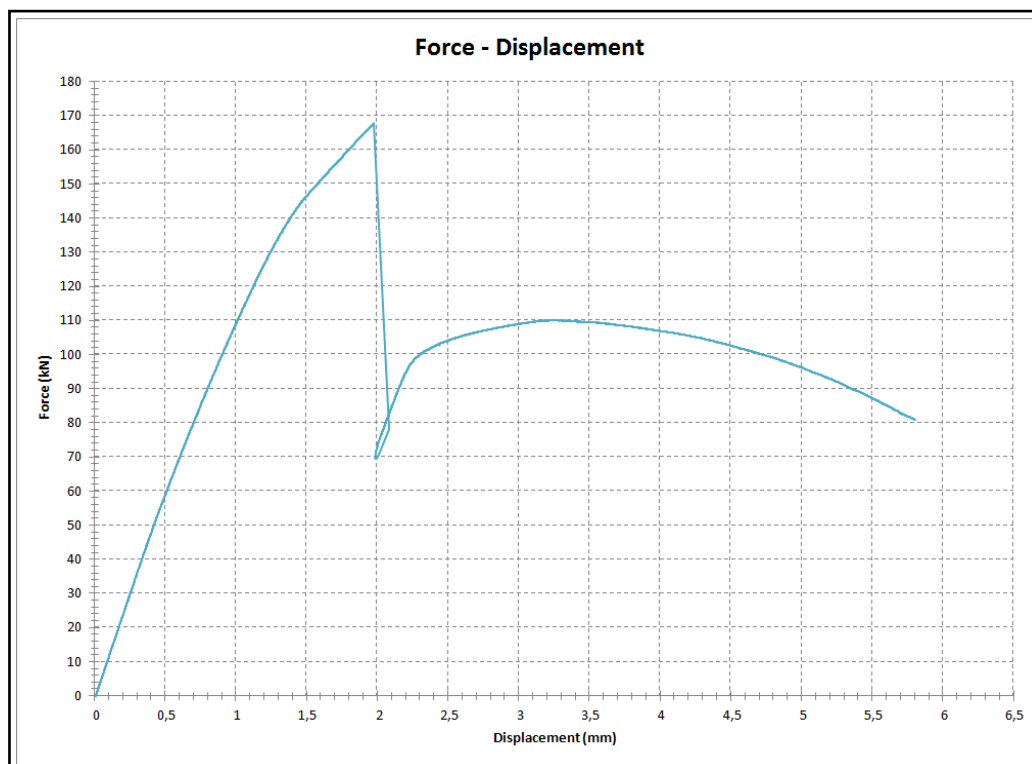
Στη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε μετρήθηκαν και καταγράφηκαν η εφαρμοζόμενη δύναμη, η επιμήκυνση του δοκιμίου, καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις στα σημεία του χάλυβα και του επιθέματος, που έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της υδραυλικής μηχανής δοκιμών, ένα πρόσθετο εξωτερικό σύστημα Spider-8 της εταιρείας HBM, πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους, για την καταγραφή των δεδομένων από τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα, καθώς και το λογισμικό πρόγραμμα Evolution της εταιρείας FISO για την καταγραφή των μετρήσεων των οπτικών ινών.



Εικόνα 5.5: Το δοκίμιο τοποθετημένο στην υδραυλική μηχανή.

5.4 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Όλες οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή διαγραμμάτων. Στο Σχήμα 5.12 φαίνεται η συνολική απόκριση του δοκιμίου, με τη μορφή της μεταβολής της επιμήκυνσής του (όπως αυτή υπολογίστηκε από το LVDT της μηχανής εφελκυσμού) συναρτήσει της επιβαλλόμενης εφελκυστικής δύναμης.

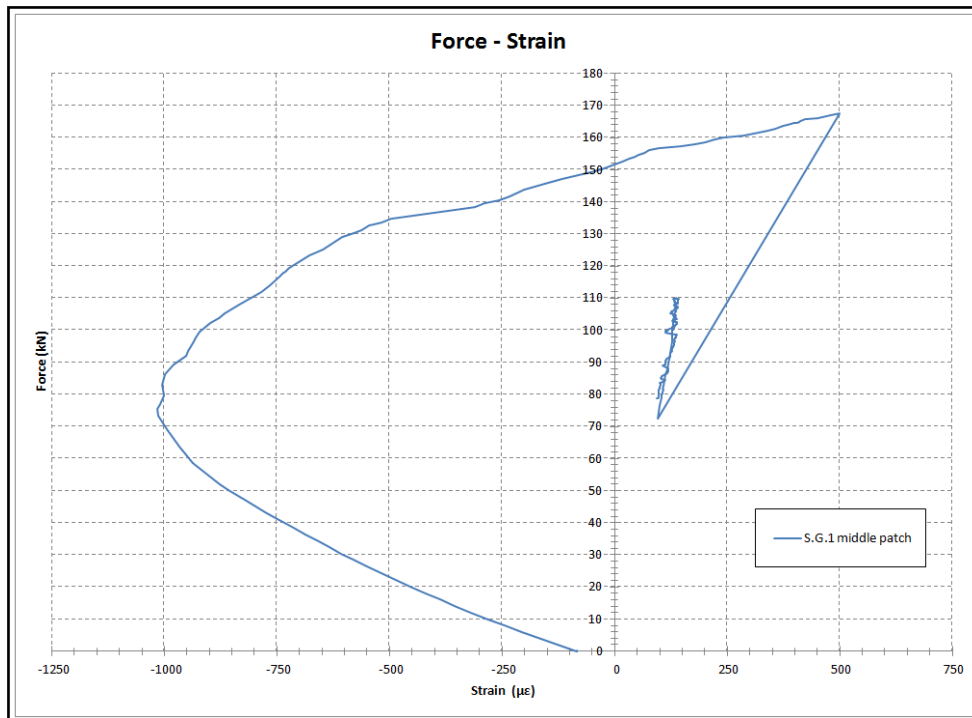


Σχήμα 5.12: Μεταβολή της επιμήκυνσης του δοκιμίου συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης.

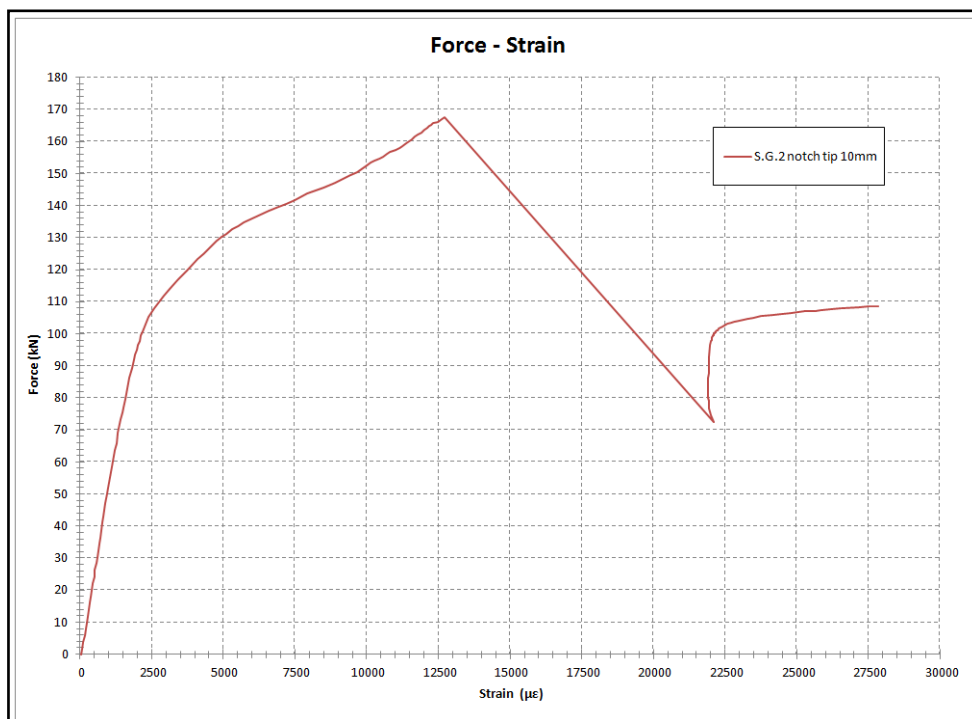
Παρατηρούμε την ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου μέχρι περίπου τα 80 kN όπου αρχίζει και η είσοδος του στην πλαστική περιοχή. Στο σημείο αυτό αλλάζει η κλίση της καμπύλης και γίνεται εντονότερη από τα 140 kN και μετά. Στην συνέχεια συμβαίνει αστοχία της κόλλησης μεταξύ του επιθέματος και του χάλυβα (αποκολλήθηκε το επίθεμα σχεδόν από την μέση του και μέχρι το ένα άκρο, από την μεριά που ήταν τοποθετημένες οι οπτικές ίνες 1 και 4), με αποτέλεσμα την απότομη πτώση του μεταφερόμενου φορτίου, αφού το επίθεμα δεν έφερε πια καθόλου φορτίο. Έπειτα το χαλύβδινο δοκίμιο συνεχίζει να παραλαμβάνει φορτία μέχρι να μπει βαθιά μέσα στην πλαστική περιοχή. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι η φόρτιση επιβάλλεται ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της φερόμενης δύναμης εάν επέρχεται αλλαγή στην ακαμψία του δοκιμίου. Το φορτίο αστοχίας του επιθέματος ήταν 167.7 kN και το μέγιστο φορτίο του χαλύβδινου δοκιμίου 110 kN.

Οι παραμορφώσεις στις θέσεις που τοποθετήθηκαν τα δύο ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα. Στην θέση 1 (SG-1) οι παραμορφώσεις του δοκιμίου είναι αρχικά θλιπτικές (η καταγραφή ξεκινάει από τα -83 με εξαιτίας των παραμενουσών παραμορφώσεων από την προφόρτιση) και στη συνέχεια μετατρέπονται σε εφελκυστικές λόγω της φόρτισης (βλ. Σχήμα 5.13). Αυτό οφείλεται στην κάμψη του δοκιμίου στην κεντρική του περιοχή, λόγω της μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής με μονόπλευρο επίθεμα. Το μονόπλευρο επίθεμα προκαλεί τη δημιουργία ενός βέλους κάμψης

με διεύθυνση προς το χαλύβδινο μέρος της διατομής, βέλος κάμψης το οποίο αυξάνει με αύξηση του επιβαλλόμενου εφελκυστικού φορτίου. Στην θέση 2 (SG-2) παρατηρούμε ότι αναπτύσσονται πολύ μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις στον χάλυβα, πριν την αποκόλληση του επιθέματος. Όταν αστοχεί το επίθεμα καταγράφεται μια ραγδαία αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται απότομη μείωση της δύναμης (βλ. Σχήμα 5.14).

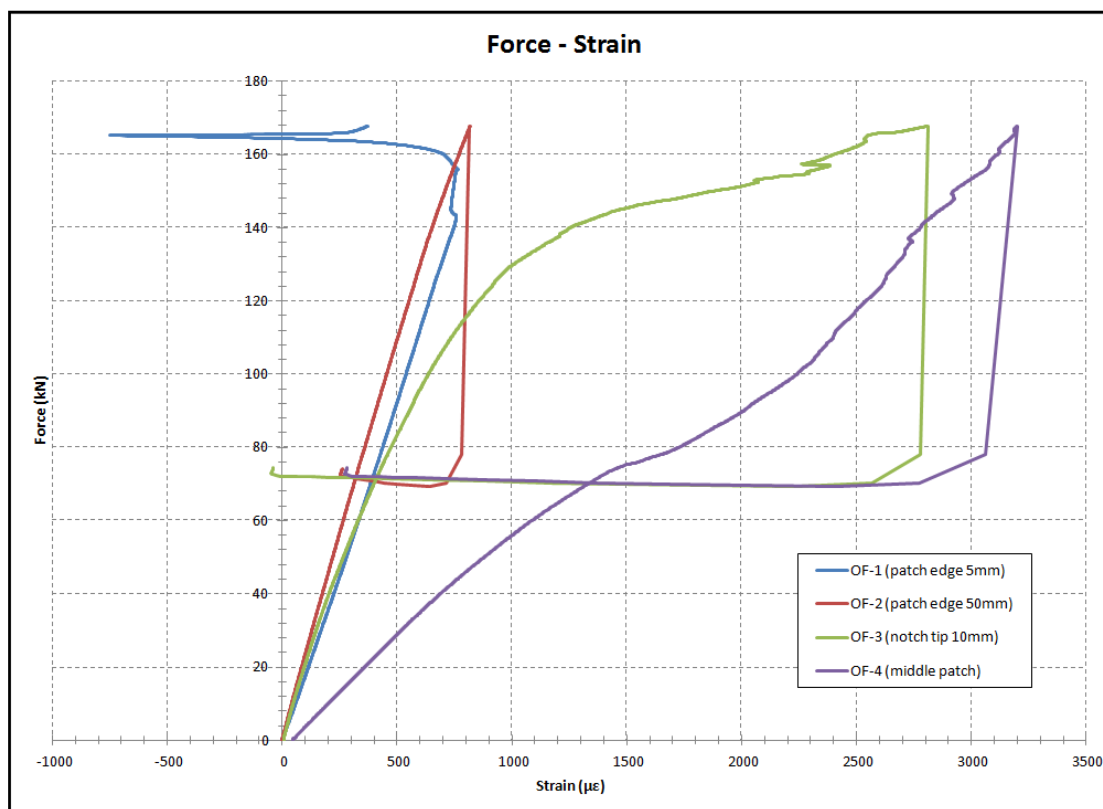


Σχήμα 5.13: Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στην θέση του SG-1.



Σχήμα 5.14: Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στην θέση του SG-2.

Οι παραμορφώσεις που καταγράφηκαν από τις τέσσερις οπτικές ίνες, συναρτήσει της εφελκυστικής δύναμης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.15: Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της δύναμης στις θέσεις των οπτικών ινών.

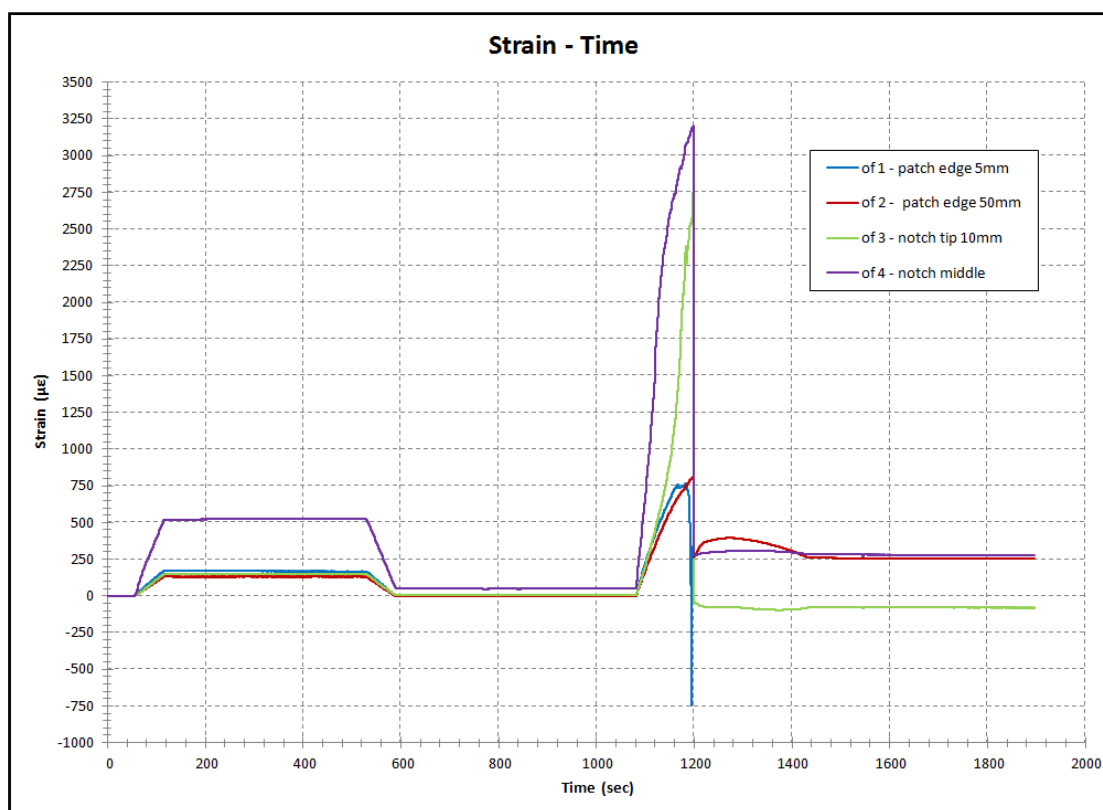
Η οπτική ίνα 1 (OF-1) κατέγραψε αρχικά θετικές παραμορφώσεις γραμμικά αυξανόμενες μέχρι το επιβαλλόμενο φορτίο να φτάσει τα 140 kN. Έπειτα παρατηρείται μια μικρή ανωμαλία και στη συνέχεια μια απότομη αλλαγή από θετικές παραμορφώσεις σε αρνητικές, λίγο πριν από την αποκόλληση του επιθέματος. Αυτή η αλλαγή, πιθανόν να οφείλεται σε κάποια μικρή τοπική αστοχία λίγο πριν την αστοχία της κόλλησης μεταξύ του δοκιμίου και του επιθέματος και είναι πιθανόν να συνδέεται με την αλλαγή της κλίσης στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (βλ. Σχήμα 5.12). Η οπτική ίνα έσπασε και σταμάτησε να καταγράφει μετά την αποκόλληση του επιθέματος. Η αστοχία της συνέβη, διότι το επίθεμα αποκολλήθηκε από την πλευρά που ήταν τοποθετημένη η ίνα.

Η οπτική ίνα 2 (OF-2) κατέγραψε θετικές παραμορφώσεις, που ήταν γραμμικά αυξανόμενες μέχρι την αποκόλληση του επιθέματος. Έπειτα λόγω της αποκόλλησης του επιθέματος, καταγράφηκε μια απότομη πτώση του φορτίου ακολουθούμενη από μείωση των παραμορφώσεων.

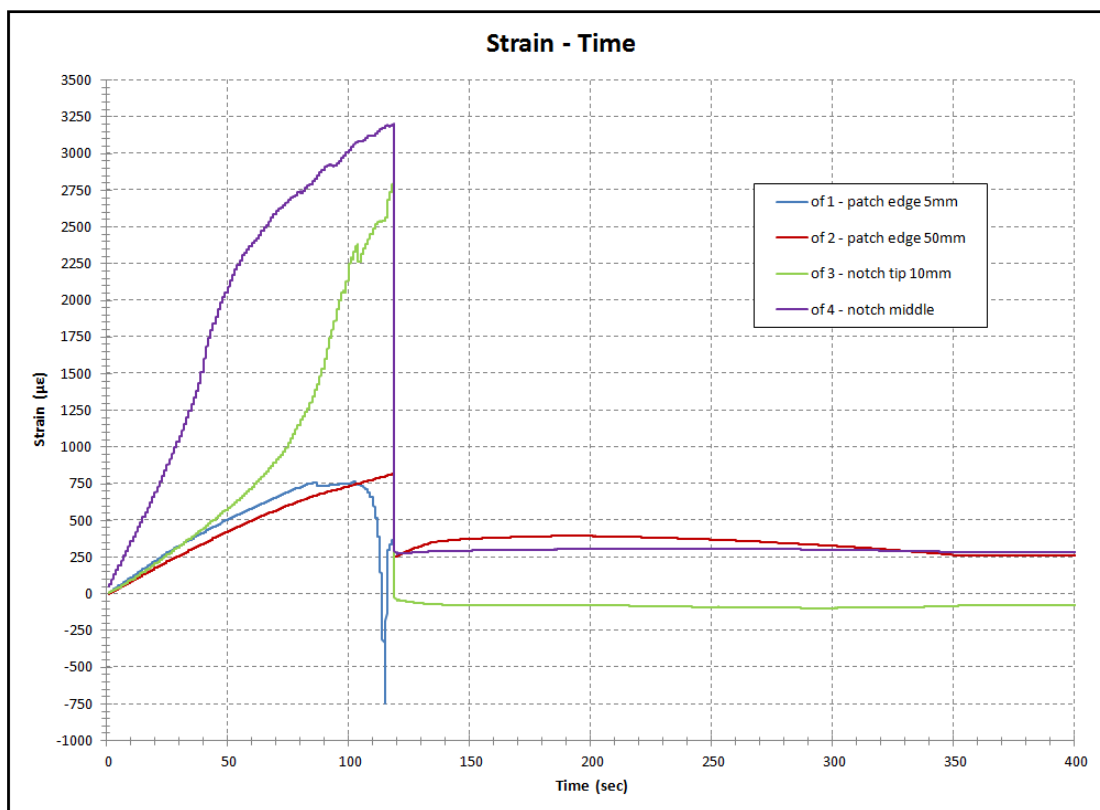
Η οπτική ίνα 3 (OF-3) κατέγραψε θετικές παραμορφώσεις γραμμικά αυξανόμενες μέχρι τα 70 kN περίπου. Στην συνέχεια παρατηρείται αύξηση των παραμορφώσεων με ταχύτερο ρυθμό. Πριν την αποκόλληση του επιθέματος παρατηρούνται μη γραμμικότητες που μπορεί να οφείλονται σε τοπικές αστοχίες του επιθέματος. Μετά την αποκόλληση του επιθέματος μηδενίζονται σχεδόν ακαριαία οι παραμορφώσεις. Φαίνεται ότι το σημείο που είναι τοποθετημένη η ίνα, δεν παραλαμβάνει φορτία πια και συνεπώς δεν καταγράφονται παραμορφώσεις.

Τέλος η οπτική ίνα 4 (OF-4) κατέγραψε και αυτή θετικές παραμορφώσεις γραμμικά αυξανόμενες μέχρι τα 70 kN περίπου, αλλά μεγαλύτερες και με ταχύτερο ρυθμό απ' ότι οι υπόλοιπες ίνες. Όπως ήταν αναμενόμενο, στην θέση πάνω από την εγκοπή, το φορτίο παραλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από το επίθεμα με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες τάσεις και άρα να αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Πριν από την αποκόλληση του επιθέματος καταγράφονται και εδώ κάποιες μη γραμμικότητες που πιθανόν να οφείλονται και αυτές σε τοπικές αστοχίες. Μετά την αποκόλληση του επιθέματος οι παραμορφώσεις μειώνονται απότομα και λαμβάνουν μια σταθερή τιμή μέχρι το τέλος του πειράματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μεταβολές των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου, όπως καταγράφηκαν από το πρόγραμμα πρόσκτησης δεδομένων των οπτικών ινών. Στο πρώτο διάγραμμα (Σχήμα 5.16) παρουσιάζεται η καταγραφή, που περιλαμβάνει όλη την πειραματική διαδικασία, από την προφόρτιση, μέχρι και την τελική φόρτιση. Το δεύτερο διάγραμμα (Σχήμα 5.17) περιλαμβάνει την καταγραφή μόνο της τελικής φόρτισης.

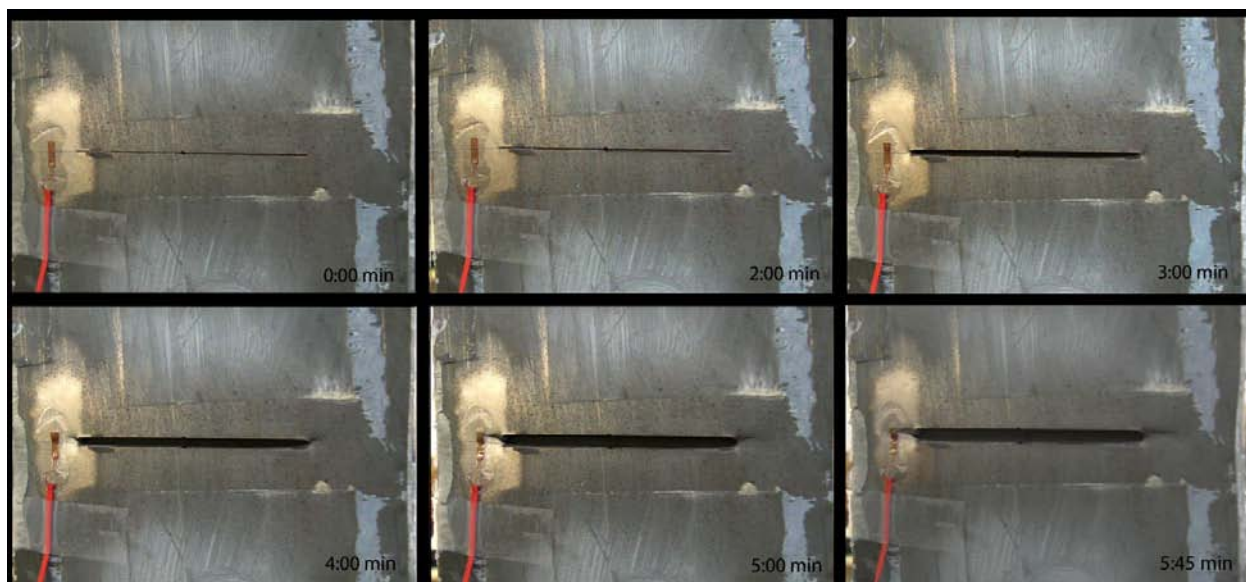


Σχήμα 5.16: Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου (προφόρτιση - τελική φόρτιση).



Σχήμα 5.17: Μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου (τελική φόρτιση).

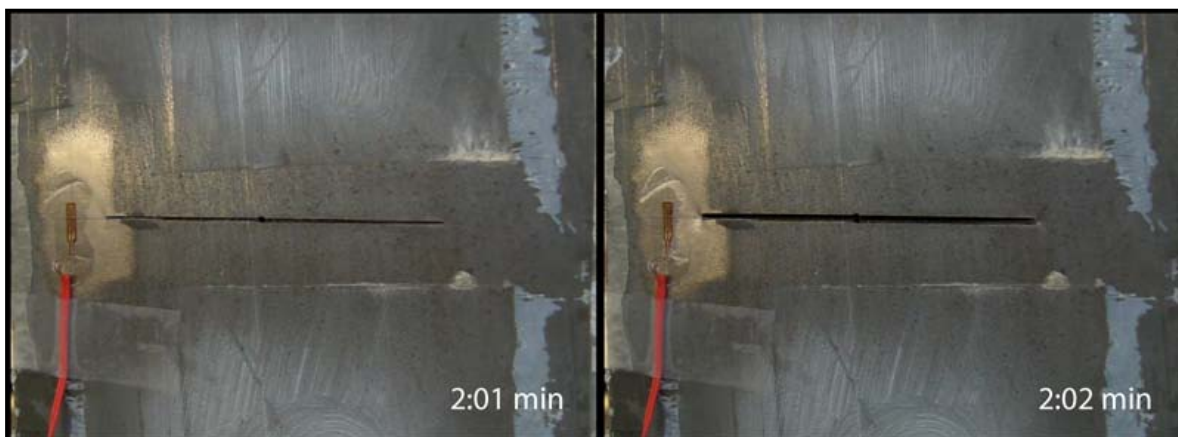
Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος καταγράφηκε σε βίντεο η συμπεριφορά του δοκιμίου στην πίσω πλευρά του, στο σημείο της εγκοπής. Στην εικόνα 5.6 αποτυπώνονται στιγμιότυπα από την καταγραφή αυτή, από την αρχή μέχρι το τέλος του πειράματος.



Εικόνα 5.6: Στιγμιότυπα από την εξέλιξη του πειράματος στην θέση της εγκοπής.

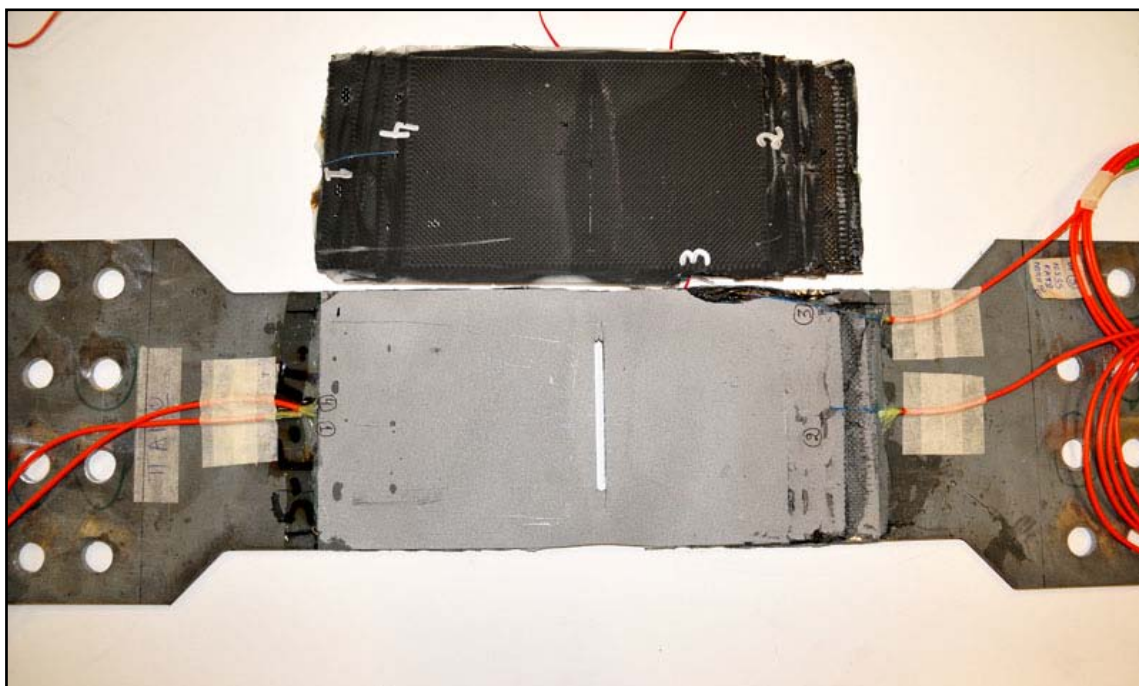
Παρατηρείται η αύξηση του πλάτους της εγκοπής καθώς το δοκίμιο προχωράει στην πλαστική περιοχή. Όταν επέρχεται η αποκόλληση του επιθέματος (στα 2:02 λεπτά από την

έναρξη της δοκιμής) το χαλύβδινο δοκίμιο αναγκάζεται να λάβει όλο το φορτίο μόνο του. Έτσι το πλάτος της εγκοπής αυξάνεται ακαριαία, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7: Απότομη αύξηση του πλάτους της εγκοπής την στιγμή της αποκόλλησης του επιθέματος.

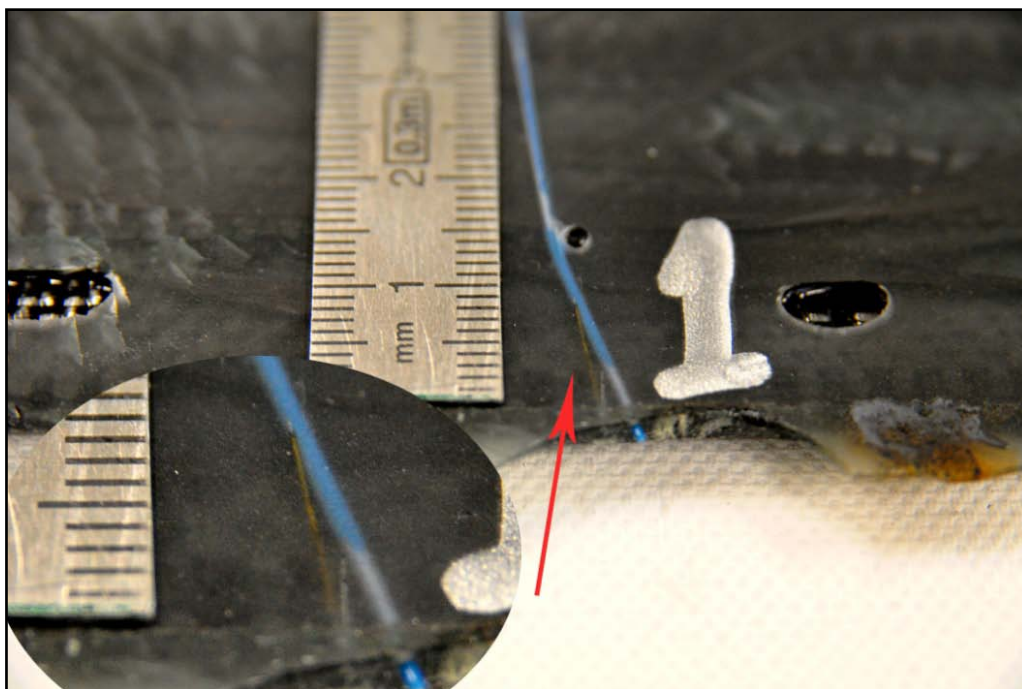
Στη συνέχεια το δοκίμιο βγήκε από τη μηχανή εφελκυσμού και αποσυνέδεθηκε από τους χαλύβδινους προσαρμογείς. Αφαιρέθηκε το επίθεμα από το δοκίμιο ούτως ώστε να γίνει επιθεώρηση σε αυτό αλλά και στην περιοχή που είχε κολληθεί (βλ. Εικόνα 5.8). Αυτό έγινε κυρίως για να αξιολογηθούν οι πραγματικές θέσεις των ινών, εφόσον για διάφορους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν ήταν βέβαιο αν οι οπτικές ίνες είχαν παραμείνει στις θέσεις που είχαν αρχικά τοποθετηθεί.



Εικόνα 5.8: Το δοκίμιο μετά την αφαίρεση του επιθέματος.

Ελέγχθηκαν έπειτα οι θέσεις των οπτικών ινών 1, 2 και 3. Η οπτική ίνα 1 βρισκόταν στην προσχεδιασμένη θέση της. Το κέντρο του αισθητήρα της βρισκόταν στα 5 mm από το άκρο

του επιθέματος, αλλά με μία μικρή κλίση ως προς τον διαμήκη άξονα του επιθέματος, που δεν θεωρείται όμως σημαντική (βλ. Εικόνα 5.9). Η ίνα βρισκόταν μέσα στην ρητίνη κάτω από το επίθεμα που σημαίνει ότι μετρούσε παραμορφώσεις στη διεπιφάνεια μεταξύ του χάλυβα και του επιθέματος.

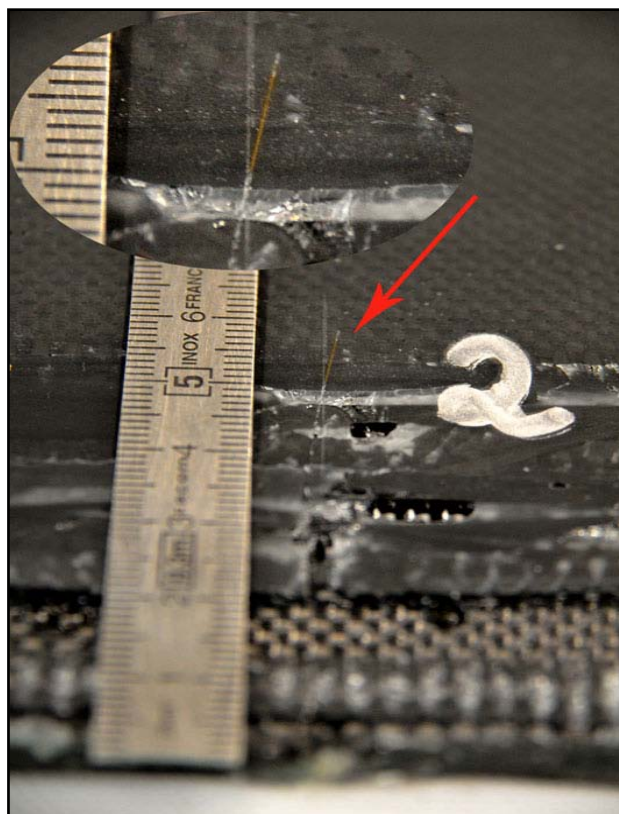


Εικόνα 5.9: Η θέση του αισθητήρα της οπτικής ίνας 1.

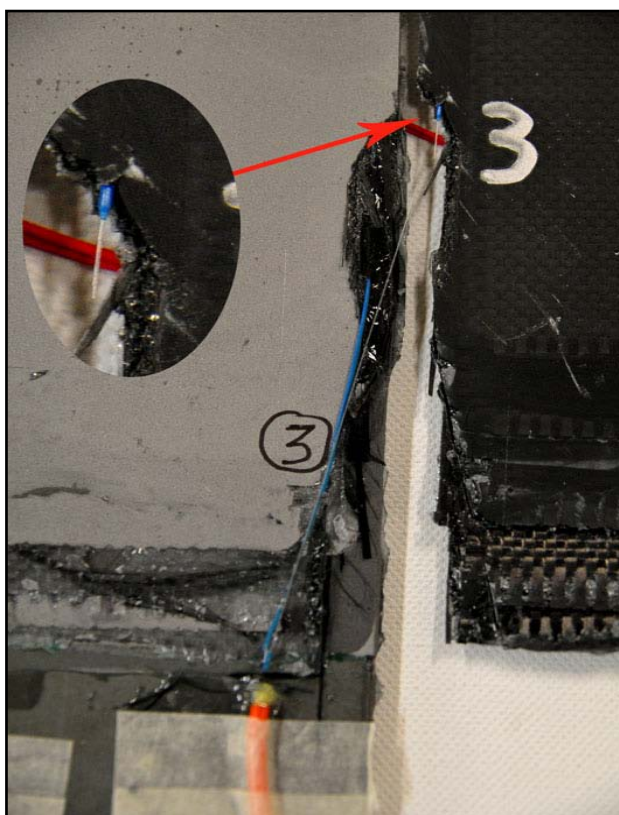
Ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 2 (βλ. Εικόνα 5.10) βρισκόταν 4 mm μετατοπισμένος ως προς τον διαμήκη άξονα του επιθέματος, αλλά βρισκόταν ακριβώς κάτω από το άκρο της πρώτης στρώσης. Αυτό σημαίνει ότι βρισκόταν στην σωστή θέση ως προς τον αρχικό σχεδιασμό, υποδηλώνει όμως ότι η πρώτη στρώση πιθανόν να μετακινήθηκε από την προβλεπόμενη θέση της κατά την επίστρωση (εφόσον απείχε από το άκρο του επιθέματος 54 mm αντί για 50 mm). Παρατηρείται επίσης και σε αυτήν την ίνα μια ελαφριά κλίση ως προς τον διαμήκη άξονα.

Η οπτική ίνα 3, όπως είχε παρατηρηθεί από την αρχή, είχε φύγει από την θέση της σε τέτοιο βαθμό που φαινόταν εξωτερικά του επιθέματος. Παρόλα αυτά δεν ήταν δυνατή η εύρεση της νέας θέσης της δια γυμνού οφθαλμού, καθώς ο αισθητήρας της πιθανότατα να παρέμεινε ανάμεσα στις στρώσεις που είχε αρχικά τοποθετηθεί (βλ. Εικόνα 5.11). Από τα αποτελέσματα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, (βλ. εδάφιο 5.5.2) αποδεικνύεται τελικά ότι ο αισθητήρας της οπτικής ίνας δεν μετατοπίστηκε σημαντικά από την προσχεδιασμένη του θέση.

Ο αισθητήρας της οπτικής ίνας 4 δεν ήταν διακριτός, καθώς βρισκόταν ανάμεσα στις στρώσεις του επιθέματος. Παρόλα αυτά η μπλε επικάλυψή της (όση ήταν ορατή) φαινόταν ότι ακολουθούσε την σωστή πορεία προς το μέσο του επιθέματος.



Εικόνα 5.10: Η θέση του αισθητήρα της οπτικής ίνας 2.



Εικόνα 5.11: Η θέση της οπτικής ίνας 3.

5.5 Αριθμητική Προσομοίωση

5.5.1 Περιγραφή Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τον καθορισμό του αριθμητικού μοντέλου, τη διαδικασία επίλυσης του και τη εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα ANSYS 12.0. Ο κώδικας μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είχε διερευνηθεί, αναπτυχθεί και ολοκληρωθεί σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες [32],[33]. Ως εκ τούτου ο κώδικας χρησιμοποιήθηκε έτοιμος με κάποιες όμως τροποποιήσεις, ούτως ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μοντελοποίησης, οι ιδιότητες των υλικών, η γεωμετρία του μοντέλου, η επιλογή των στοιχείων, το είδος της ανάλυσης και τέλος ο βασικός στόχος της αριθμητικής προσομοίωσης, που είναι η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Μηχανικές ιδιότητες και μοντελοποίηση υλικών

Η μεταλλική πλάκα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αποτελείτο από κοινό ναυπηγικό χάλυβα Grade A, μέτρου ελαστικότητας E , λόγου Poisson ν και ορίου διαρροής σ_0 . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση αναγράφονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 : Αριθμητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα [33].

Υλικό	E (MPa)	ν	σ_0 (MPa)
Χάλυβας	200000	0.30	348

Το δοκίμιο του χάλυβα μοντελοποιήθηκε ως ελαστοπλαστικό γραμμικά κρατυνόμενο, ισοτροπικό υλικό. Για να προσδιοριστεί πλήρως δόθηκε μια τιμή για το μέτρο κράτυνσης (γραφικά αποδίδεται ως η κλίση της ευθείας μετά το σημείο διαρροής και παίρνει τιμές που προκύπτουν ως ποσοστό του αρχικού μέτρου ελαστικότητας), ίση με 0.015E δηλαδή 3000 MPa. Βάσει της επιλογής αυτής, ο χάλυβας προσομοιώνεται πλήρως στην ελαστική περιοχή, αλλά και στην πλαστική περιοχή για μετατόπιση έως και σχεδόν τα 3 mm.

Το επίθεμα από σύνθετα υλικά μοντελοποιήθηκε ως ομοιογενές γραμμικά ελαστικό ορθοτροπικό υλικό με τις τιμές των μηχανικών του ιδιοτήτων διαφορετικές στις τρεις ορθοκανονικές διευθύνσεις του (τρία κάθετα μεταξύ τους, επίπεδα συμμετρίας). Κατά συνέπεια, ορίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας E_x , E_y , E_z οι λόγοι Poisson $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$ και τα μέτρα διάτμησης G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} . Όμως, το ύφασμα ινών άνθρακα Plain Weave είναι ισοσταθμισμένο, με αποτέλεσμα το σύνθετο υλικό να θεωρηθεί ότι έχει ίσο μέτρο ελαστικότητας κατά τις διευθύνσεις x και y . Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στο αριθμητικό μοντέλο παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Αριθμητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων του επιθέματος από σύνθετα υλικά [33].

Υλικό	E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xz} (MPa)
PW/HLU	42950	42950	5000	0.30	0.02	0.30	2400	1600	2400

Το κολλητικό μέσο (adhesive), αποτελείται από την ίδια την εποξειδική ρητίνη που αποτελεί και τη μήτρα του σύνθετου υλικού. Μοντελοποιήθηκε ως γραμμικά ελαστικό, ιστροπικό υλικό με μέτρο ελαστικότητας E και λόγο Poisson ν . Οι τιμές αυτές προέρχονται από την βιβλιογραφία και φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.4

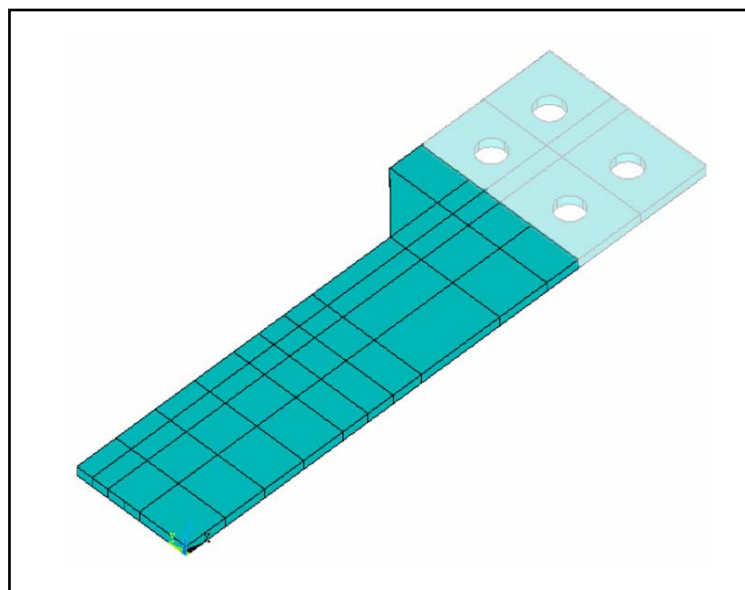
Πίνακας 5.4: Αριθμητικές τιμές μηχανικών ιδιοτήτων του κολλητικού μέσου [33].

Υλικό	E (MPa)	ν
Κολλητικό μέσο	4500	0.25

Γεωμετρία μοντέλου

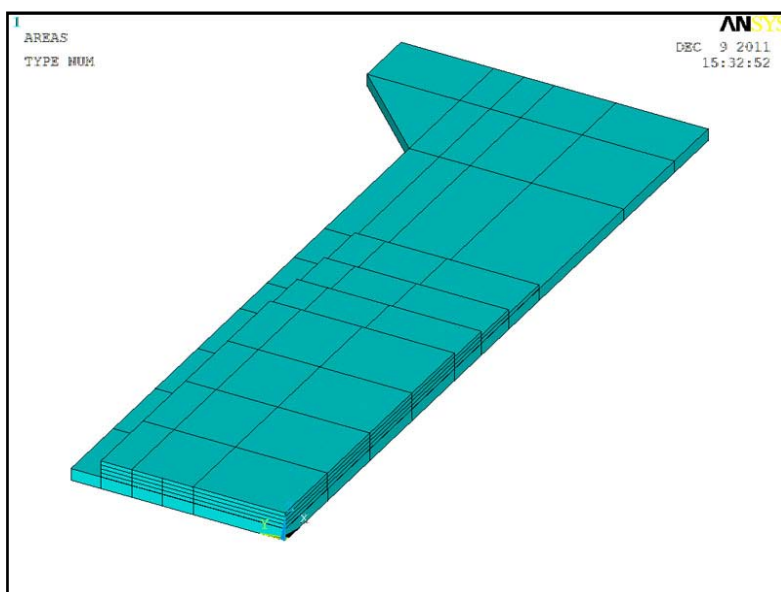
Η γεωμετρία του μοντέλου είναι ίδια με αυτήν που αναφέρθηκε στο εδάφιο 5.2.2 με τις παρακάτω σημαντικές τροποποιήσεις. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε πρόκειται ουσιαστικά για το $\frac{1}{4}$ του συνολικού δοκιμίου. Η επιλογή αυτή έγινε, αφενός διότι το δοκίμιο είναι συμμετρικό ως προς τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα και αφετέρου για να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα η υπολογιστική ισχύς. Επίσης δεν χρησιμοποιήθηκε όλο το μήκος του δοκιμίου παρά μόνο τα 250 mm αυτού, που προκύπτουν από το σημείο στο οποίο σταματάνε οι ειδικοί προσαρμογείς που συγκρατούν το δοκίμιο στις αρπάγες της υδραυλικής μηχανής εφελκυσμού και στο οποίο ο χάλυβας μένει ελεύθερος (βλ. σχήμα 5.18). Η επιλογή αυτή της γεωμετρίας έγινε με γνώμονα την απλότητα της κατασκευής και βασίσθηκε σε γραμμικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων [33]. Τέλος όσον αφορά το επίθεμα, η μοντελοποίηση της γεωμετρίας του έγινε ουσιαστικά ανάποδα από τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε πειραματικά. Η επικλινής κατασκευή του δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί κατά τον ίδιο τρόπο, γι αυτό οι ομάδες στρώσεων μοντελοποιήθηκαν με την αντίστροφη σειρά, δηλαδή οι μεγαλύτερες στρώσεις κάτω και οι μικρότερες πάνω.

Όλες οι προηγούμενες τροποποιήσεις που υιοθετήθηκαν, διατηρούν αυτούσιες τις βασικές διαστάσεις του δοκιμίου και δεν επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα.



Σχήμα 5.18: Μοντελοποίηση του $\frac{1}{4}$ του συνολικού δοκιμίου χωρίς την περιοχή συγκράτησης από τις αρπάγες.

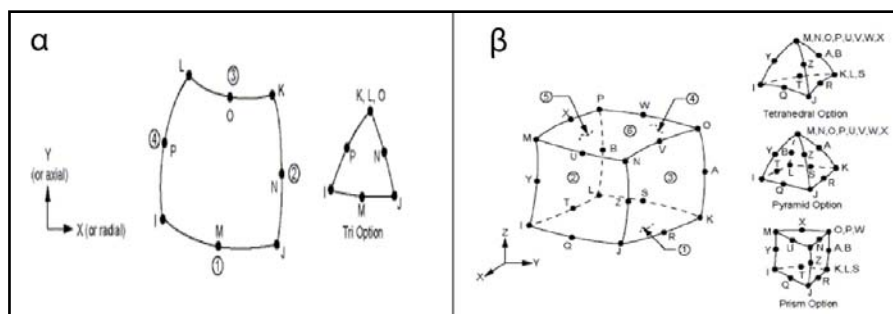
Για την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου από το δισδιάστατο, έγινε προεκβολή κατά την διεύθυνση του πάχους (διεύθυνση z) των κατάλληλων επιφανειών (βλ. Σχήμα 5.19). Αρχικά δημιουργήθηκε ο όγκος της μεταλλικής πλάκας με προεκβολή της συνολικής επιφάνειας που είχε κατασκευαστεί. Στη συνέχεια επιλέγοντας τις επιφάνειες που αντιστοιχούσαν στην έκταση του κολλητικού μέσου και με την αντίστοιχη προεκβολή τους δημιουργήθηκε το αντίστοιχο στρώμα. Τέλος, για να δημιουργηθεί ο όγκος του επιθέματος επιλέχθηκαν και έγινε η προεκβολή εκείνων των επιφανειών που αποτελούσαν κάθε φορά την έκταση της αντίστοιχου μήκους ομάδας στρώσεων (βλ. εδάφιο 5.3).



Σχήμα 5.19: Τελική μοντελοποίηση της γεωμετρίας με την δημιουργία όγκων.

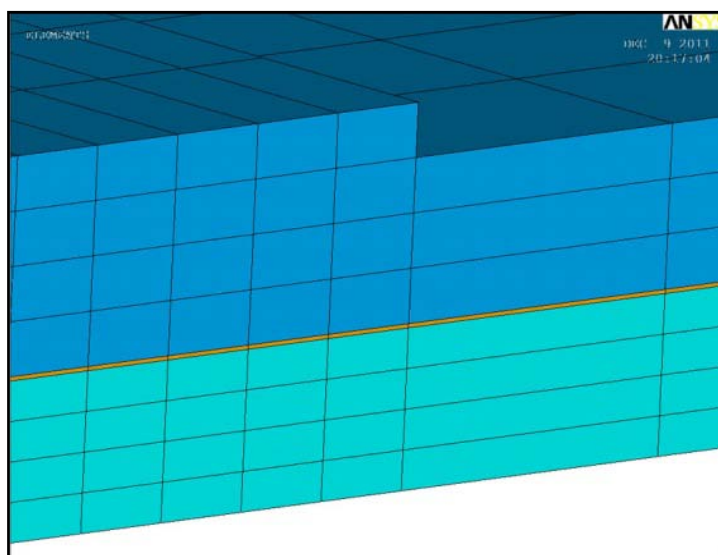
Επιλογή στοιχείων – Διακριτοποίηση

Αρχικά, για το δισδιάστατο μοντέλο γίνεται χρήση του δισδιάστατου στοιχείου PLANE 82 (βλ. Σχήμα 5.20α). Το στοιχείο αυτό αποτελείται από οχτώ κόμβους (8-node), με δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (2 μετατοπίσεις). Η χρήση του χαρακτηρίζεται ως βοηθητική καθώς, όπως εξελίσσεται η πορεία δημιουργίας του μοντέλου, η επιφάνεια μετατρέπεται σε όγκο, μέσω της διαδικασίας της προεκβολής, με αποτέλεσμα η επιφάνεια και τα δισδιάστατα στοιχεία να παύουν να υπάρχουν και να μην παίζουν κανένα ρόλο στη διαδικασία της κυρίως επίλυσης. Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο στοιχείο είκοσι κόμβων (20-node) SOLID95 (βλ. Σχήμα 5.20β). Αυτό έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις x , y και z) και μπορεί να προσομοιώσει ορθοτροπικά υλικά, γεγονός το οποίο συνάδει με την μηχανική συμπεριφορά του επιθέματος από σύνθετα υλικά. Το στοιχείο SOLID95 έχει επιπλέον χαρακτηριστικά, μεταξύ άλλων, πλαστικότητας, μεγάλων εκτροπών και μεγάλων παραμορφώσεων.



Σχήμα 5.20: α) Γεωμετρία στοιχείου PLANE82, β) Γεωμετρία στοιχείου SOLID95.

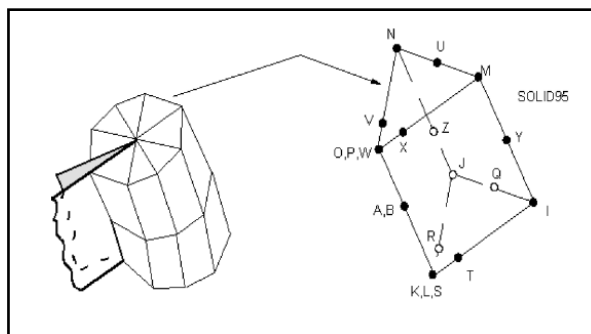
Ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεύθυνση του πάχους για το χάλυβινο μέρος του μοντέλου, ήταν ίσος με τέσσερα. Για την προσομοίωση του κολλητικού μέσου χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο κατά το πάχος (έγιναν και δοκιμές με τέσσερα στοιχεία για λόγους που θα αναφερθούν παρακάτω), ενώ για το ενισχυτικό επίθεμα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα στοιχεία, ένα για κάθε ομάδα στρώσεων διαφορετικού μήκους. Στο Σχήμα 5.21 φαίνεται συνολικά ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο κατά τη διεύθυνση του πάχους, όπου με κυανό χρώμα συμβολίζεται ο χάλυβας, με πορτοκαλί το κολλητικό μέσο και με γαλάζιο το ενισχυτικό επίθεμα.



Σχήμα 5.21: Αριθμός στοιχείων κατά τη διεύθυνση του πάχους.

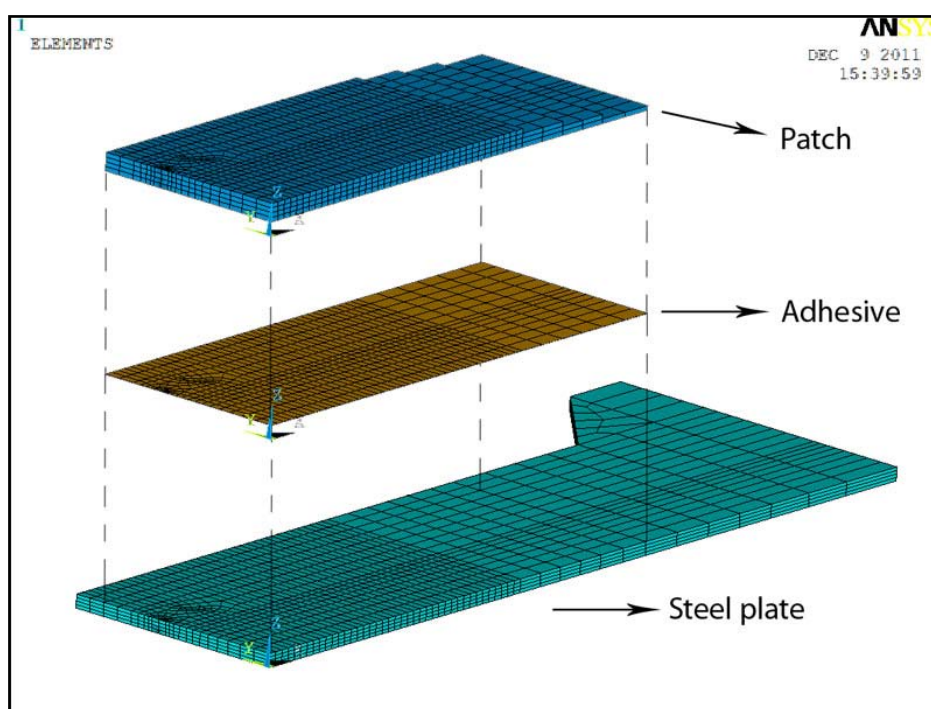
Η διακριτοποίηση κατά τις διευθύνσεις x και y ποικίλει ανάλογα με την περιοχή που εξετάζεται, διότι σε περιοχές που απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι προτιμητέα η αύξηση του αριθμού των στοιχείων. Μια τέτοια περιοχή είναι αυτή γύρω από την εγκοπή με αποτέλεσμα το μέγεθος των στοιχείων να κυμαίνεται από 1.25 mm κοντά στο άκρο αυτής έως 5.67 mm. Το μέγεθος των στοιχείων μακριά από την περιοχή της εγκοπής κυμαίνεται από 9 mm έως 20 mm για μείωση της υπολογιστικής ισχύος.

Για την μοντελοποίηση της εγκοπής καθορίστηκε ο αριθμός των ιδιόμορφων στοιχείων γύρω από αυτήν, ίσος με 8 (βλ. σχήμα 5.22). Η τιμή αυτή προκύπτει καθώς από την τιμή αυτή και πάνω οι τιμές του Συντελεστή Έντασης Τάσης συγκλίνουν ενώ ταυτόχρονα ικανοποιείται η συνθήκη της θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων που ορίζει ως ελάχιστη γωνία τριγωνικών στοιχείων τις 15° (με την επιλογή 8 στοιχείων η γωνία αυτή ισούται με 22.5°) [32].



Σχήμα 5.22: Γεωμετρία ιδιόμορφου στοιχείου SOLID95.

Τέλος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23 μια γενική άποψη της διακριτοποίησης σε όλα τα μέρη του μοντέλου.

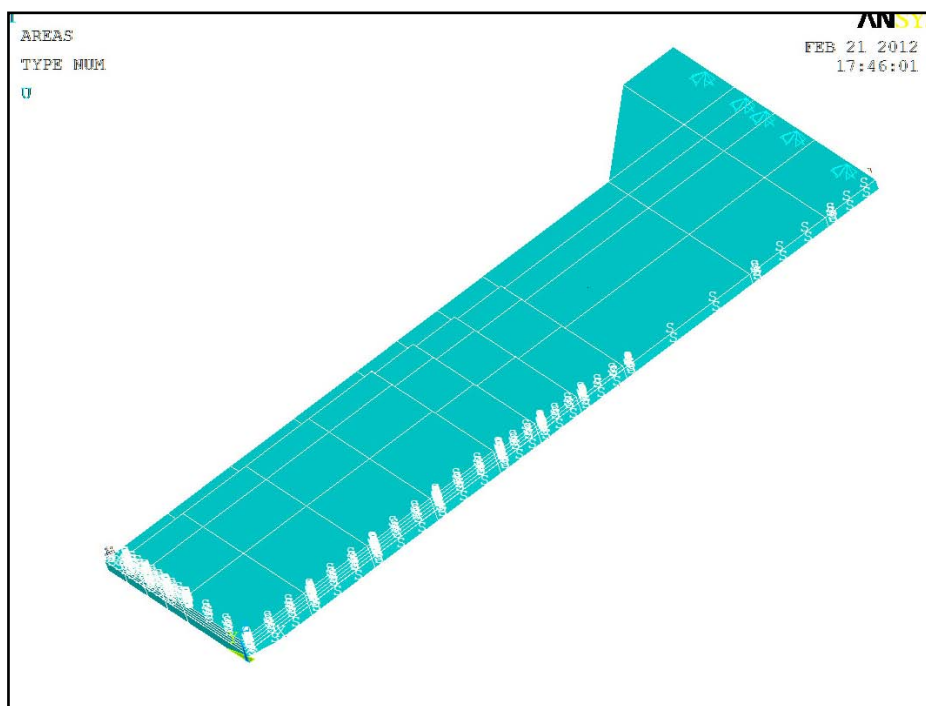


Σχήμα 5.23: Διακριτοποίηση του τελικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Συνοριακές συνθήκες – Είδος Φόρτισης

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων καθορίζουν εξίσου την πιστή προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται. Ειδικότερα, η επιλογή μοντελοποίησης του πειραματικού δοκιμίου μόνο κατά τη της συνολικής γεωμετρίας, επιβάλλει επιπλέον συνοριακές συνθήκες που πρέπει να καθοριστούν. Έτσι, επιβλήθηκαν συνθήκες συμμετρίας στις επιφάνειες εκείνες που θα εξασφάλιζαν τη προσομοίωση ολόκληρης της γεωμετρίας, δηλαδή στις επιφάνειες κατά τα επίπεδα x-z και y-z (επίπεδα συμμετρίας). Δεν περιορίστηκαν τα στοιχεία κατά το πάχος του μεταλλικού υλικού που αντιστοιχούν στο μισό του μήκους της ρωγμής a (λόγω συνθηκών συμμετρίας), ίσο με 40 mm (Σχήμα 5.24). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η ιδιαίτερη επιβολή συνοριακών συνθηκών που απαιτούν οι κόμβοι που απαρτίζουν το κολλητικό μέσο, δεδομένου ότι η άνω σειρά κόμβων είναι κοινή με τους κόμβους του επιθέματος (άρα

υπάρχει συνέχεια υλικού και κατ' επέκταση επιβολή συνθηκών συμμετρίας) ενώ η κάτω σειρά κόμβων είναι κοινή με του κόμβους του χάλυβα (άρα ύπαρξη εγκοπής και κατά συνέπεια μη περιορισμός τους).



Σχήμα 5.24: Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στο μοντέλο, εφαρμόστηκε η επιβαλλόμενη φόρτιση όπως και η συνθήκη περιορισμού στους κόμβους που περικλείονται στην εγκάρσια διατομή που βρίσκεται σε μήκος 250 mm (ελεύθερο άκρο). Η φόρτιση επιβλήθηκε με τη μορφή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης, η τιμή της οποίας στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ορίστηκε ίση με 1 mm. Εξαιτίας του τρόπου πρόσδεσης των δοκιμίων μέσω των ειδικών χαλύβδινων προσαρμογέων και της ομοιόμορφα επιβαλλόμενης εφελκυστικής μετατόπισης συνεπάγεται ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης η περιοχή αυτή παραμένει ευθύγραμμη και παράλληλη με τον y -άξονα και δεν περιστρέφεται γύρω από τον άξονα αυτό.

Είδος Ανάλυσης

Για την πιστότερη προσομοίωση του φαινομένου που εξετάζεται, επιλέχτηκε η μη γραμμική ανάλυση. Μια προσέγγιση για την επίλυση 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 πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων προσαρμόζει το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής στη νέα παραμορφωσιακή κατάσταση, πριν επιβληθεί το επόμενο τμήμα του φορτίου. Η βηματική προσέγγιση του προβλήματος εισάγει ένα σημαντικό τελικό σφάλμα στα αποτελέσματα, λόγω της συσσώρευσης σφάλματος σε κάθε βήμα φόρτισης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος. Κατά τη μέθοδο αυτή το κάθε τμήμα του επιβαλλόμενου φορτίου διαιρείται σε μικρότερες ενότητες. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η φόρτιση επιβάλλεται ως σταθερού ρυθμού εφελκυστική μετατόπιση με βήμα 0.016 mm, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της φερόμενης δύναμης, σε εξήντα διακριτά βήματα.

5.5.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης – Σύγκριση με Πειραματικά Αποτελέσματα

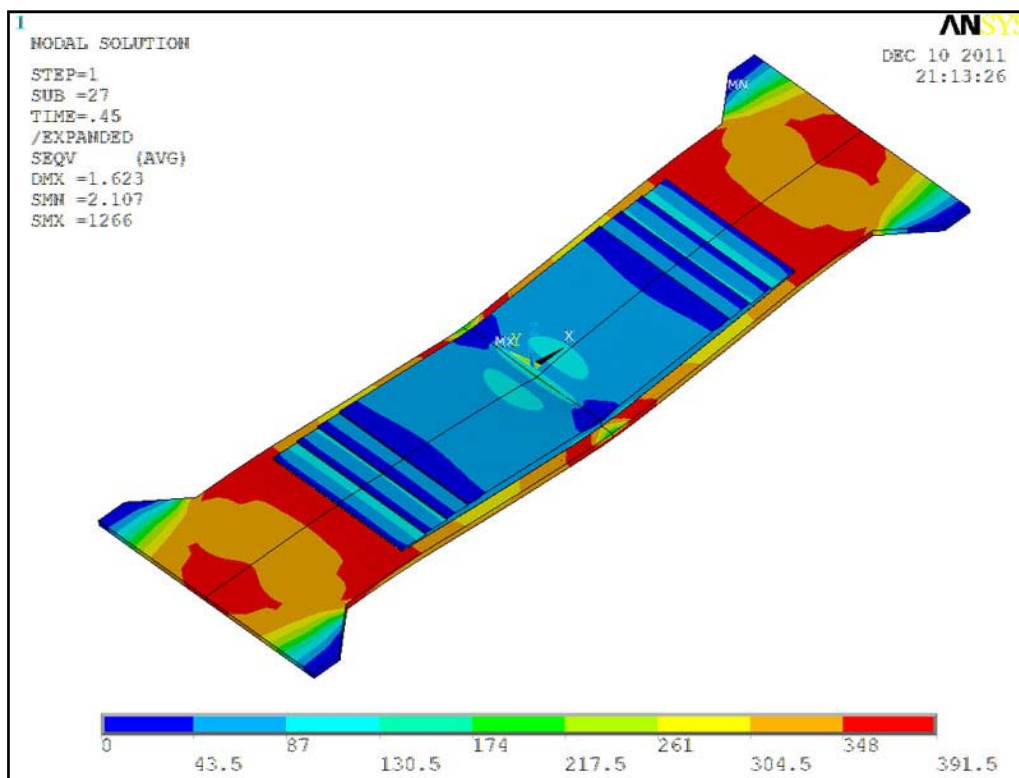
Τα μεγέθη που μετρήθηκαν και καταγράφηκαν στην πειραματική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη, η συνολική επιμήκυνση του δοκιμίου (μαζί με το μήκος των ειδικών προσαρμογών) καθώς και οι διαμήκεις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία του ενισχυτικού επιθέματος (OF-1 έως OF-4 και SG-1) και του χάλυβα (SG-2). Κατά συνέπεια, για να γίνει η απαιτούμενη σύγκριση είναι αναγκαίο να εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Όμως, οι επιλογές που έγιναν κατά τη δημιουργία του μοντέλου έχουν άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα αυτά με επιτακτική την ανάγκη κατάλληλων προσαρμογών και θεωρήσεων ώστε οι διαφορές που προκύπτουν είτε να εξαλειφθούν, είτε να ληφθούν υπ' όψη.

Ένα σημείο στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση, είναι ότι το μοντέλο δεν περιέχει κανένος είδους κριτήριο αστοχίας, με αποτέλεσμα το επίθεμα να θεωρείται τελείως κολλημένο στο χάλυβα καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την πραγματική εξέλιξη του φαινομένου. Επομένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι συγκρίσιμα με τις πειραματικές μετρήσεις μόνο κατά τη διάρκεια που το επίθεμα δεν έχει υποστεί αποκόλληση από το χάλυβα. Οποιαδήποτε σύγκριση μετά την έναρξη του φαινομένου αυτού είναι άνευ σημασίας.

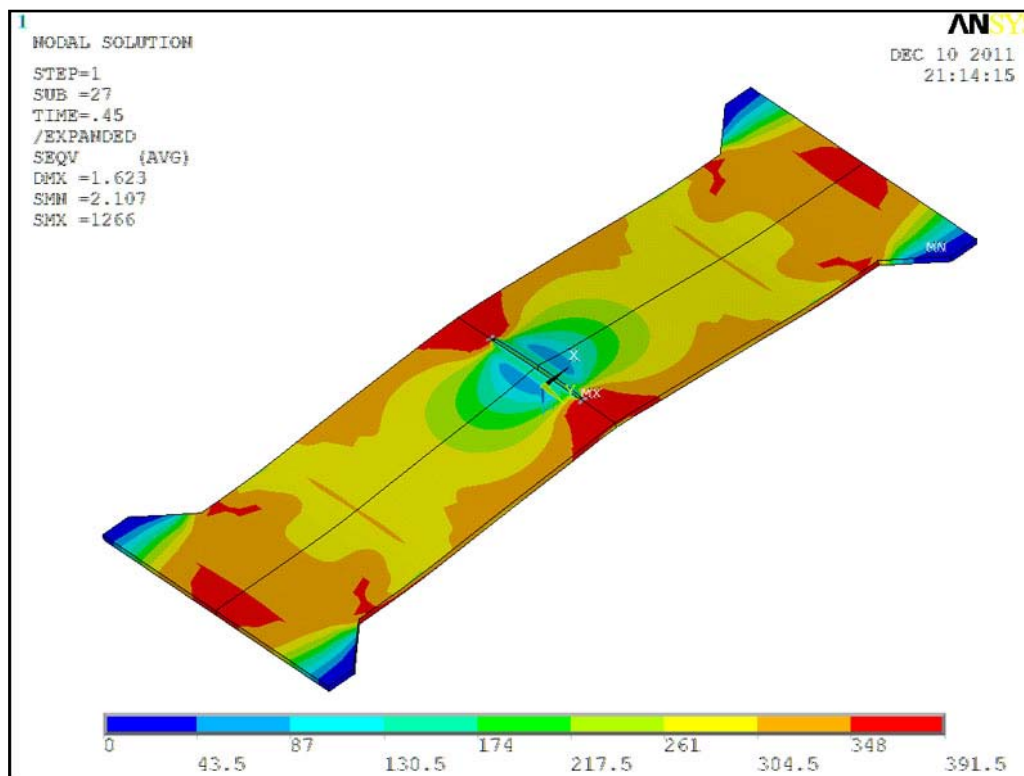
Θεωρώντας το μήκος του μοντέλου ίσο με 250 mm δημιουργείται μια επιπλέον διαφορά στην απεικόνιση της συνολικής επιμήκυνσης μεταξύ της πειραματικής μέτρησης και του αριθμητικού αποτελέσματος. Αυτό συμβαίνει διότι οι μετρήσεις που έγιναν καταγράφουν την επιμήκυνση των δοκιμίου μαζί με το μήκος των ειδικών προσαρμογών και τις μικρές μετακινήσεις των κοχλιών συγκράτησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Από την άλλη μεριά, μοντελοποιώντας μόνο το ελεύθερο μήκος του δοκιμίου είναι επόμενο στα εξαγόμενα αποτελέσματα να παρουσιάζεται μικρότερη επιμήκυνση από την πραγματική. Η διαφορά αυτή εξαλείφεται και οι καμπύλες μπορούν να συγκριθούν σε μεγάλο βαθμό αν πολλαπλασιαστεί η επιμήκυνση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με ένα διορθωτικό συντελεστή της τάξης του 1.8. Κατά συνέπεια, η αντίστοιχη καμπύλη που θα παρουσιαστεί μετά, έχει υποστεί την παραπάνω διόρθωση.

Μια επιπλέον προσαρμογή που έγινε στα αριθμητικά αποτελέσματα για να συμβαδίζουν με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις αφορά στην επιλογή μοντελοποίησης μόνο του $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, τα αποτελέσματα που αφορούσαν στην επιμήκυνση του μοντέλου και στην εφαρμοζόμενη δύναμη δεν αντιστοιχούσαν στις πραγματικές τιμές. Διπλασιάζοντας τις τιμές αυτές επιτυγχάνεται η πλήρης αντιστοίχιση τους με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις καθώς με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται αποτελέσματα που αφορούν ολόκληρη τη γεωμετρία. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα σχετικά με τις διαμήκεις παραμορφώσεις δεν επηρεάζονται από τις παραπάνω δύο διορθώσεις καθώς εκφράζονται μέσω αδιάστατου μεγέθους (strains).

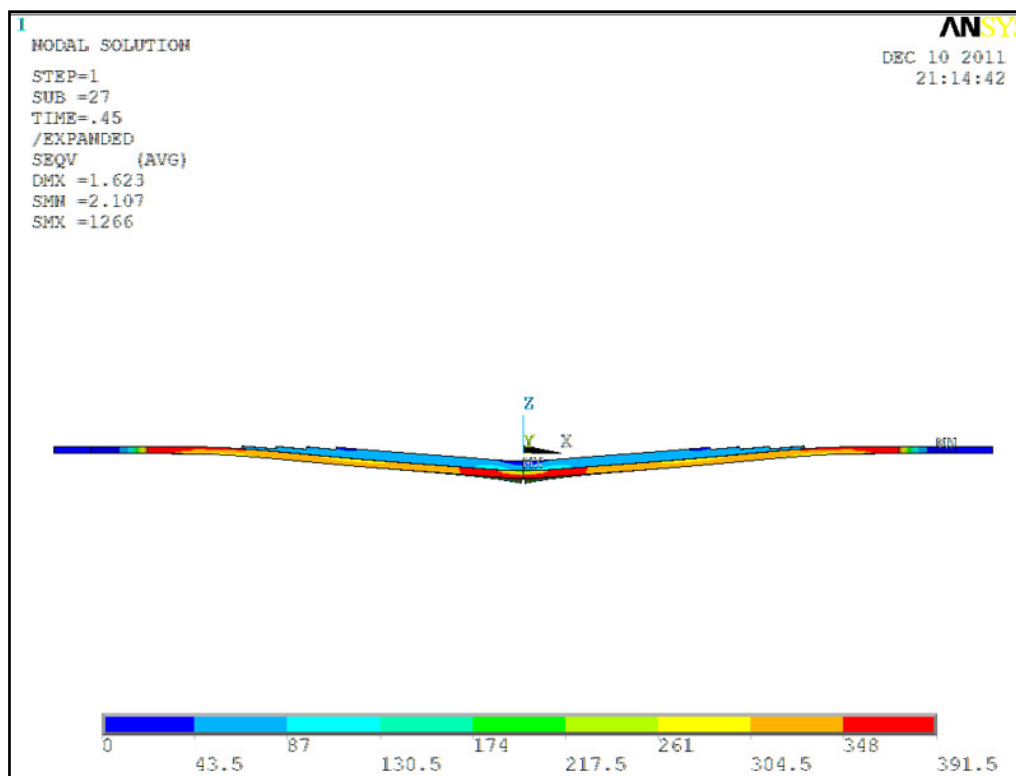
Έχοντας αναφέρει τις προσαρμογές που έγιναν για την ορθότητα των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης με την μορφή σχημάτων. Στα σχήματα 5.25 έως 5.27 φαίνεται η κατανομή των τάσεων κατά von Mises του δοκιμίου για επιβαλλόμενο φορτίο της τάξης των 185 kN σε άνοψη, κάτοψη και πλάγια όψη. Η τιμή αυτού του φορτίου επιλέχθηκε για να ερευνηθούν τα σημεία του δοκιμίου που αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τάσεις λίγο πριν την είσοδο του στην διαρροή. Με κόκκινο χρώμα υποδεικνύονται οι περιοχές του χάλυβα που έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή (τιμές των τάσεων κατά von Mises μεγαλύτερες των 348 MPa, τιμή που αντιπροσωπεύει το όριο διαρροής του υπό μελέτη χάλυβα).



Σχήμα 5.25: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises (άνοψη)



Σχήμα 5.26: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises (κάτοψη)



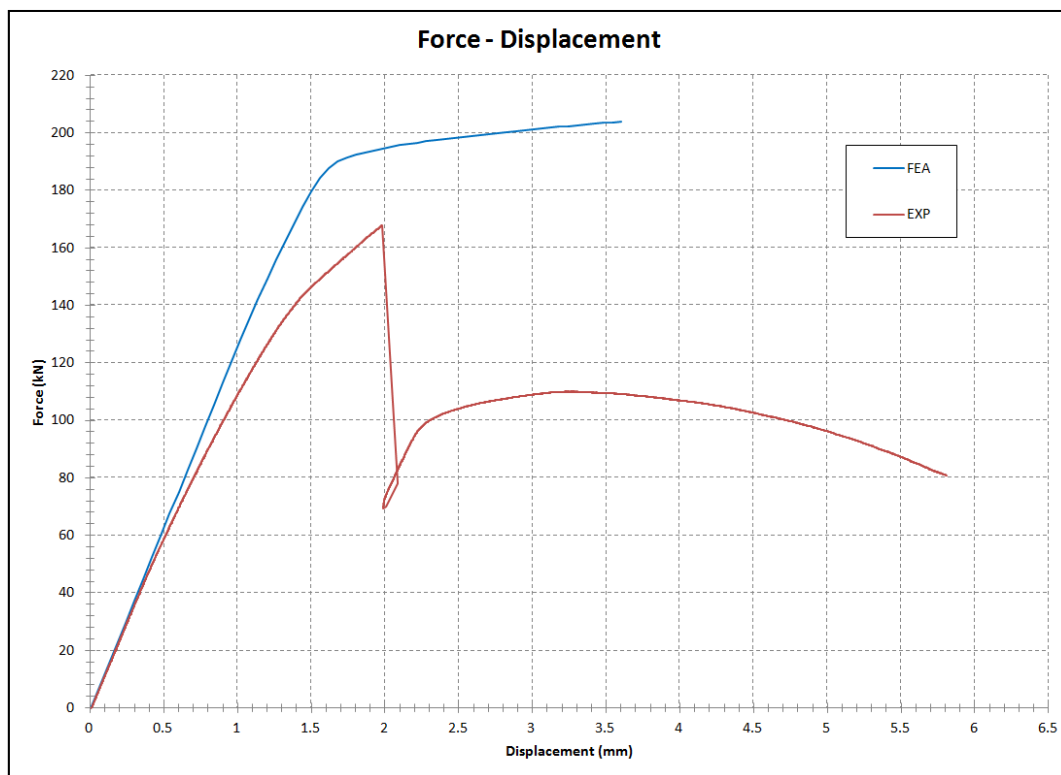
Σχήμα 5.27: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises (πλάγια όψη)

Απεικονίζεται με σαφήνεια η τυπική συμπεριφορά χαλύβδινης πλάκας με μονόπλευρη ενίσχυση που καταπονείται σε εφελκυσμό, καθώς παρατηρείται παραμόρφωση της κατασκευής έξω από το επίπεδο, δηλαδή η εμφάνιση του φαινομένου της κάμψης. Αυτό οφείλεται στη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα εξαιτίας της παρουσίας του μονόπλευρου επιθέματος και ως εκ τούτου στη δημιουργία μη συμμετρικής εγκάρσιας διατομής. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραμορφώσεις έχουν μεγεθυνθεί έτσι ώστε να παρουσιάζονται πιο κατατοπιστικές πληροφορίες για την εξέλιξη του φαινομένου.

Γνωρίζοντας τις ακριβείς θέσεις των αισθητήρων οπτικών ινών (Optical Fibers, OF) και των ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (Strain Gages, SG) που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των ζητούμενων μεγεθών κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής, επόμενο είναι να αναζητηθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα και στο αριθμητικό μοντέλο. Επομένως, οι τιμές αυτές εξήχθησαν από τους κόμβους που περικλείονται στις θέσεις των αισθητήρων οπτικών ινών (αυτές που διαπιστώθηκαν μετά την αφαίρεση του επιθέματος), καθώς και κατά το μήκος αναφοράς (gage length) του κάθε επιμηκυνσιόμετρου. Τα μεγέθη αυτά αφορούν στις ελαστικές διαμήκεις παραμορφώσεις των κόμβων που αντιστοιχούν στους αισθητήρες οπτικών ινών και στα επιμηκυνσιόμετρα που είναι τοποθετημένα στο ενισχυτικό επίθεμα των σύνθετων υλικών. Για το επιμηκυνσιόμετρο που είναι τοποθετημένο στο χάλυβα απαιτείται η εξαγωγή τόσο των ελαστικών, όσο και των πλαστικών διαμήκων παραμορφώσεων καθώς ενδέχεται η περιοχή αυτή του χάλυβα να έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή από κάποιο φορτίο κι έπειτα.

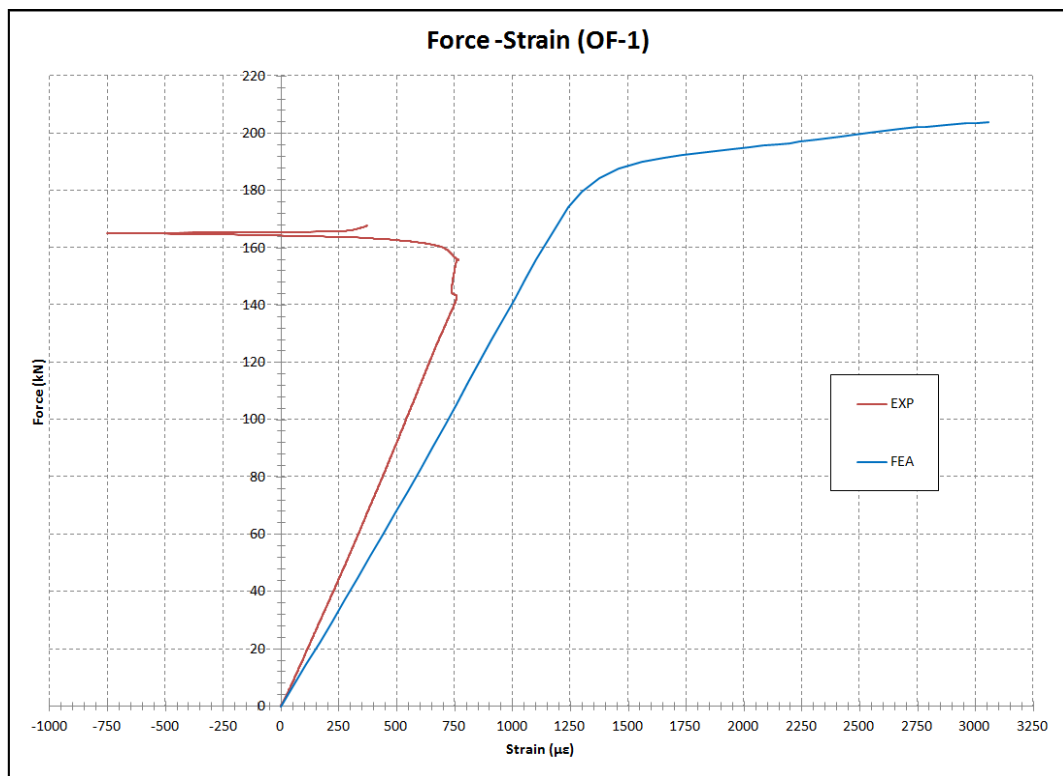
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) παρατίθενται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων, συγκρίνοντας τα ταυτόχρονα με τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών μετρήσεων (EXP). Επιπροσθέτως, εξετάζεται το κατά πόσο αυτά ταυτίζονται με την πραγματικότητα, όπως αυτή εκφράζεται από τα πειραματικά δεδομένα, ενώ γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστούν οι αιτίες τυχόν αποκλίσεων.

Η μεταβολή της συνολικής επιμήκυνσης συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.28, όπου γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα. Μόνο η ελαστική περιοχή της συμπεριφοράς του δοκιμίου προσομοιώνεται επακριβώς από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απουσιάζουν κριτήρια αστοχίας του κολλητικού μέσου, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται η αποκόλληση του ενισχυτικού επιθέματος στο αριθμητικό αποτέλεσμα. Κατά συνέπεια, η μη γραμμικότητα που εμφανίζεται στα αριθμητικά αποτελέσματα οφείλεται μόνο στη διαρροή του χαλύβδινου υποστρώματος, που ξεκινά στην περιοχή γύρω από τη ρωγμή.

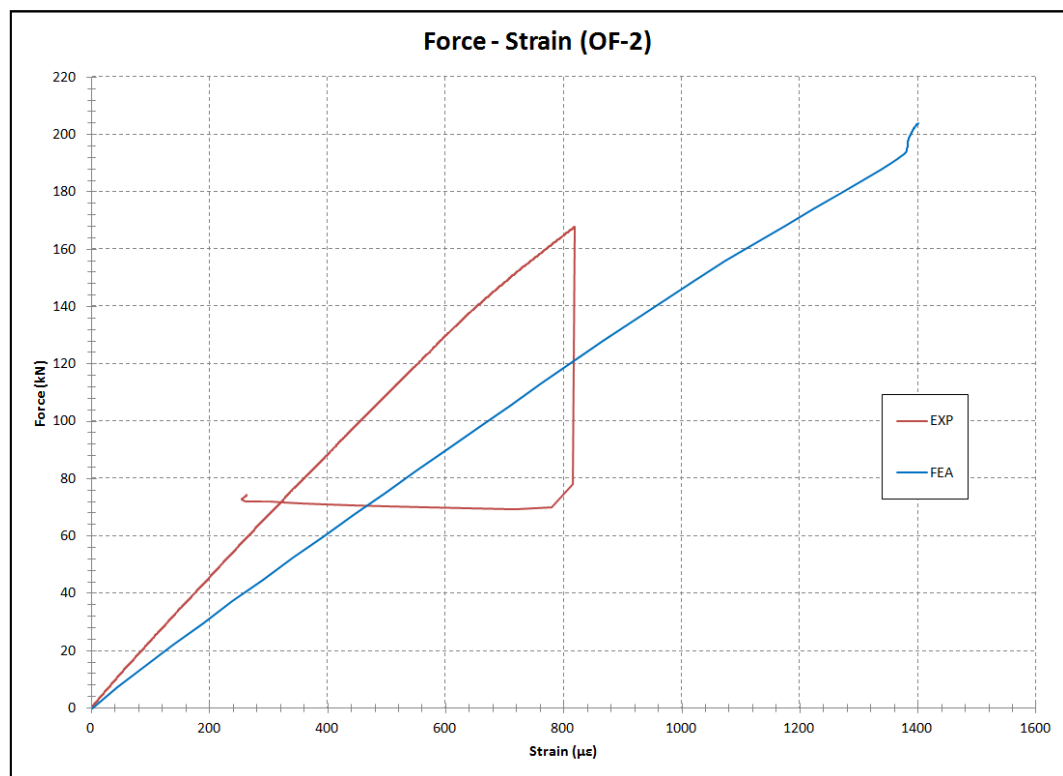


Σχήμα 5.28: Καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης για τις θέσεις των αισθητήρων οπτικών ινών OF-1 και OF-2 (Σχήμα 5.29 και 5.30). Στην θέση OF-1, παρατηρείται μικρή σχετικά απόκλιση στα αποτελέσματα μεταξύ των πειραματικών και των αριθμητικών μετρήσεων. Παρόλο που υπάρχει γραμμική συμπεριφορά μέχρι τα 140 kN και στα δυο αποτελέσματα, η αριθμητική λύση υπολογίζει μεγαλύτερες παραμορφώσεις για κάθε τιμή του φορτίου. Η απόκλιση αυτή πιθανόν να οφείλεται στη γωνία που έχει η τελική θέση του αισθητήρα, ως προς τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου (βλ. Εικόνα 5.9). Ο αισθητήρας καταγράφει μόνο διαμήκεις παραμορφώσεις, υπολογίζοντας έτσι μόνο μια συνιστώσα της συνολικής παραμόρφωσης. Μετά τα 140 kN δεν υπάρχει νόημα σύγκρισης εφόσον απ' ότι φαίνεται και πειραματικά ο αισθητήρας καταγράφει αστοχίες μέχρι την αποκόλληση του επιθέματος, χαρακτηριστικό το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Τα ίδια ισχύουν και για τη θέση OF-2. Στο σημείο αυτό, για να αποκλειστεί το ενδεχόμενο η διακριτοποίηση στο κολλητικό μέσο να ευθύνεται για τις αποκλίσεις και στις δυο θέσεις, μοντελοποιήθηκε ξανά με μεγαλύτερη διακριτοποίηση (τέσσερα στοιχεία κατά το πάχος αντί για ένα που ήταν αρχικά). Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ακριβώς τα ίδια.

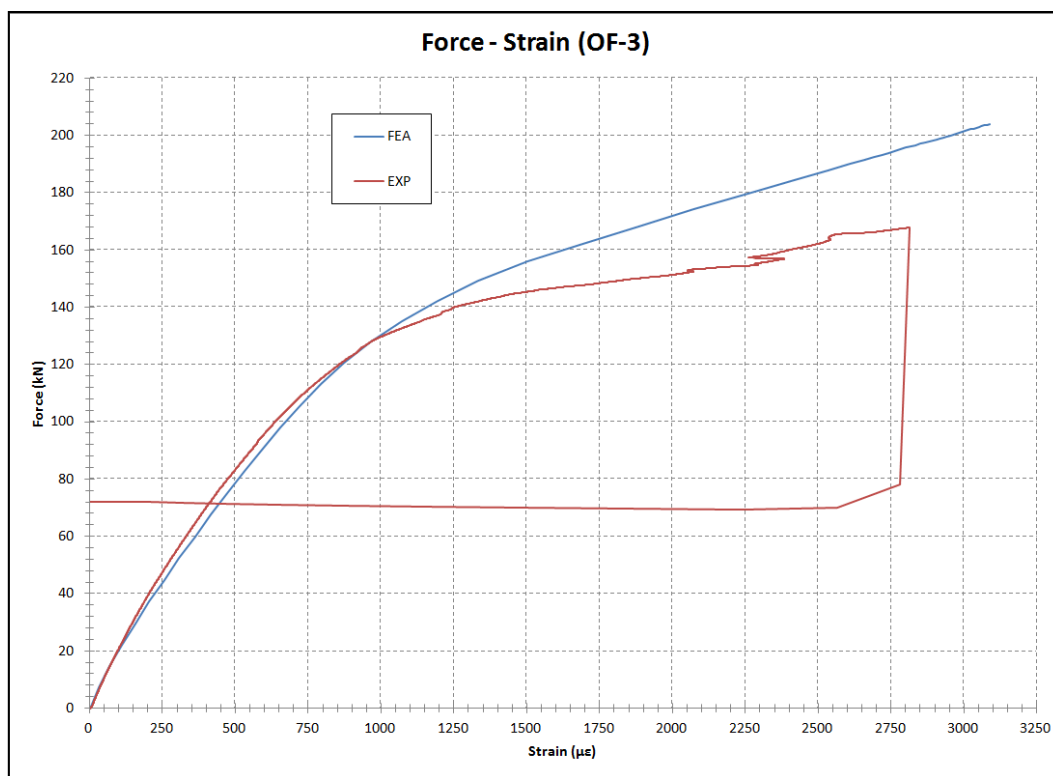


Σχήμα 5.29: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση OF-1.

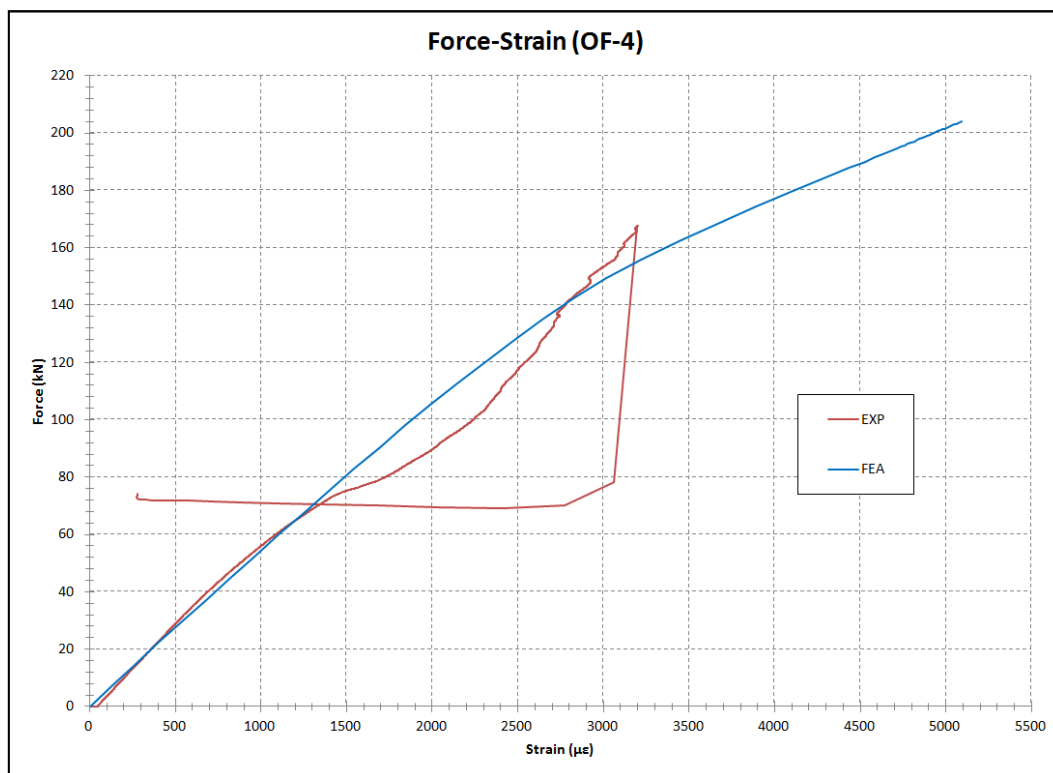


Σχήμα 5.30: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση OF-2.

Οι καμπύλες φορτίου παραμόρφωσης στις θέσεις OF-3 και OF-4 φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 5.31: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση OF-3.

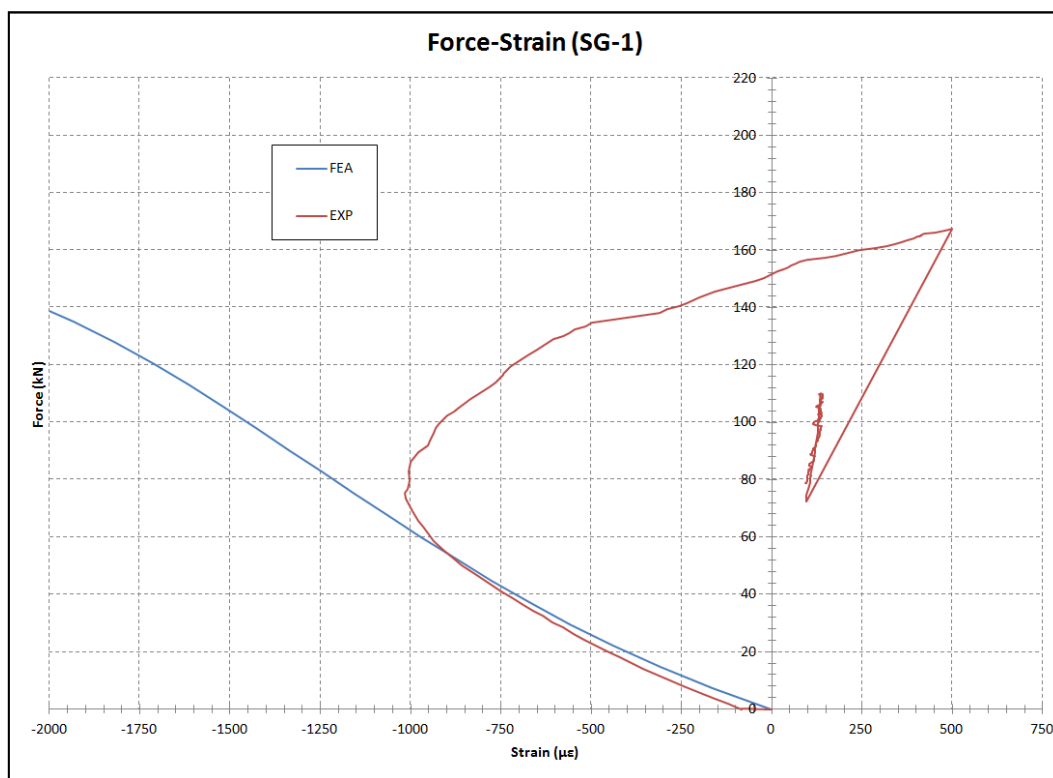


Σχήμα 5.32: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση OF-4.

Παρατηρείται και στις δυο θέσεις πολύ καλή προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αντίστοιχα αριθμητικά. Στην θέση OF-3 παρατηρείται σχεδόν ίδια συμπεριφορά στις καμπύλες μέχρι περίπου τα 130 kN. Από το σημείο εκείνο και μετά,

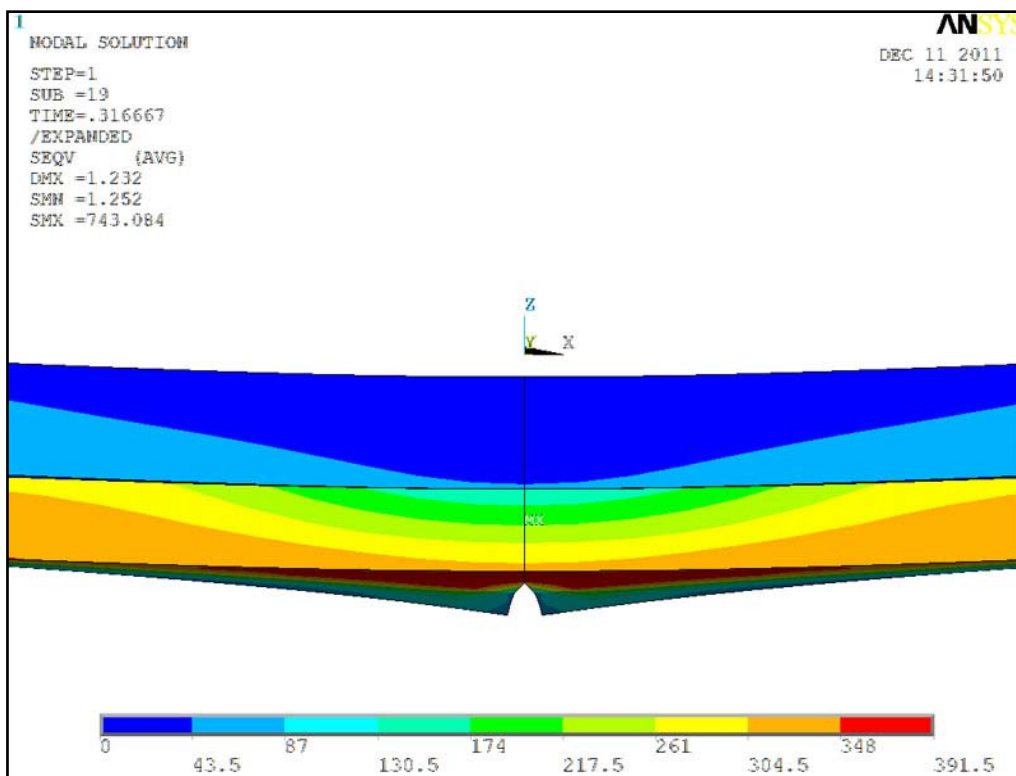
καταγράφηκαν πειραματικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις, οι οποίες ενδέχεται να οφείλονται σε αστοχίες μέσα στο επίθεμα ή/και στη διεπιφάνεια χάλυβα-επιθέματος. Στην θέση OF-4 παρατηρείται ίδια συμπεριφορά μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών μετρήσεων μέχρι τα 70 kN περίπου. Μετά το σημείο αυτό παρατηρείται ότι ο αισθητήρας της οπτικής ίνας καταγράφει λίγο μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων, χωρίς όμως να αποκλίνει σημαντικά, από αυτές της αριθμητικής προσομοίωσης.

Όσον αφορά την θέση SG-1 παρατηρείται πολύ καλή προσομοίωση των αποτελεσμάτων μέχρι τα 60 kN (Σχήμα 5.33). Στις πειραματικές μετρήσεις οι παραμορφώσεις είναι αρχικά θλιπτικές και στην συνέχεια μετατρέπονται σε εφελκυστικές εξαιτίας της φόρτισης. Αυτό πιθανός να οφείλεται σε κάποια τοπική κάμψη του επιθέματος, η οποία όμως γίνεται λιγότερο σημαντική όσο το φορτίο αυξάνει. Η τοπική αυτή κάμψη είναι διαφορετική από την κάμψη ολόκληρου του δοκιμίου που οφείλεται στη μη συμμετρική εγκάρσια διατομή. Αυτό λοιπόν το φαινόμενο μπορεί να δικαιολογηθεί από κάποια τοπική αστοχία, που όμως δεν μπορεί να υπολογιστεί από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για λόγους που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Αξίζει να υπενθυμισθεί, ότι η πειραματική καταγραφή ξεκινάει από τα -83 με εξαιτίας των παραμενουσών παραμορφώσεων από την προφόρτιση.



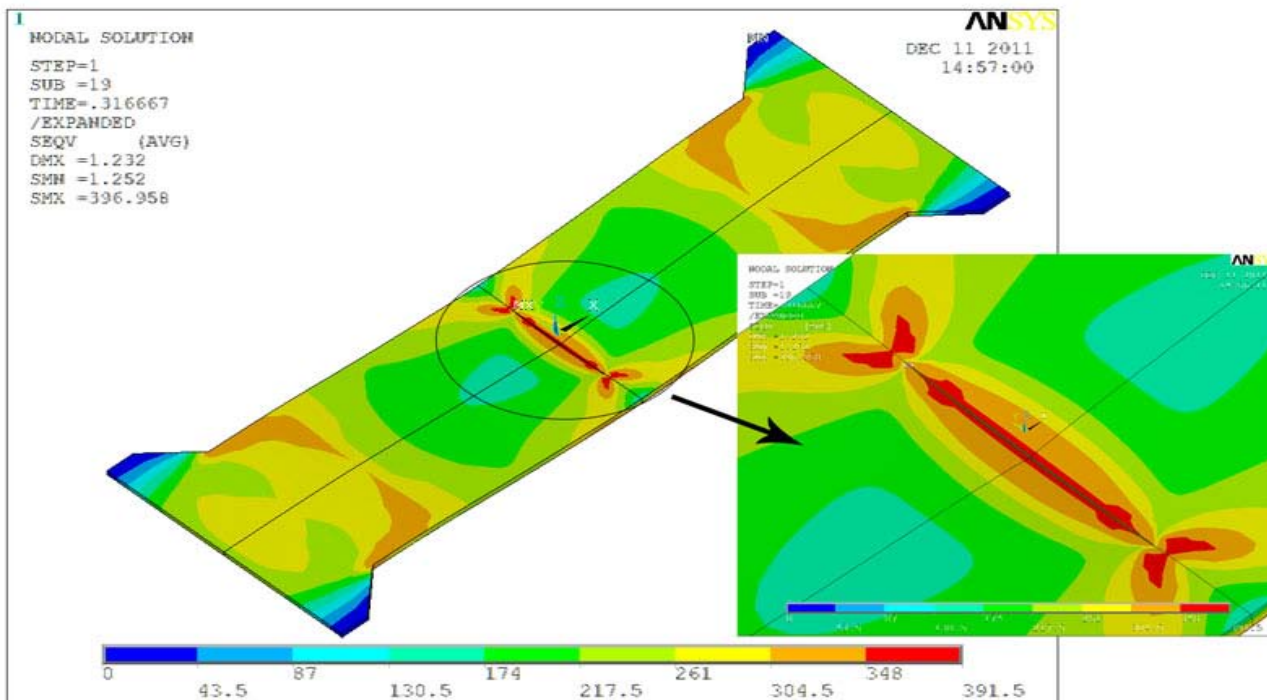
Σχήμα 5.33: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση SG-1.

Στο σημείο αυτό γίνεται μια προσπάθεια σύνδεσης των πειραματικών μετρήσεων στις θέσεις OF-4 και SG-1 με την βοήθεια και της αριθμητικής προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι στα 70 kN περίπου, συμβαίνει μια αλλαγή της συμπεριφοράς στην καταγραφή των παραμορφώσεων και στις δυο θέσεις. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό τι συμβαίνει στο δοκίμιο τη στιγμή της συγκεκριμένης φόρτισης παρατηρήθηκε εκτενέστερα το σημείο γύρω από την εγκοπή (βλ. Σχήμα 5.34).



Σχήμα 5.34: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises γύρω από την εγκοπή για φορτίο 70 kN (λεπτομέρεια πλάγια όψη).

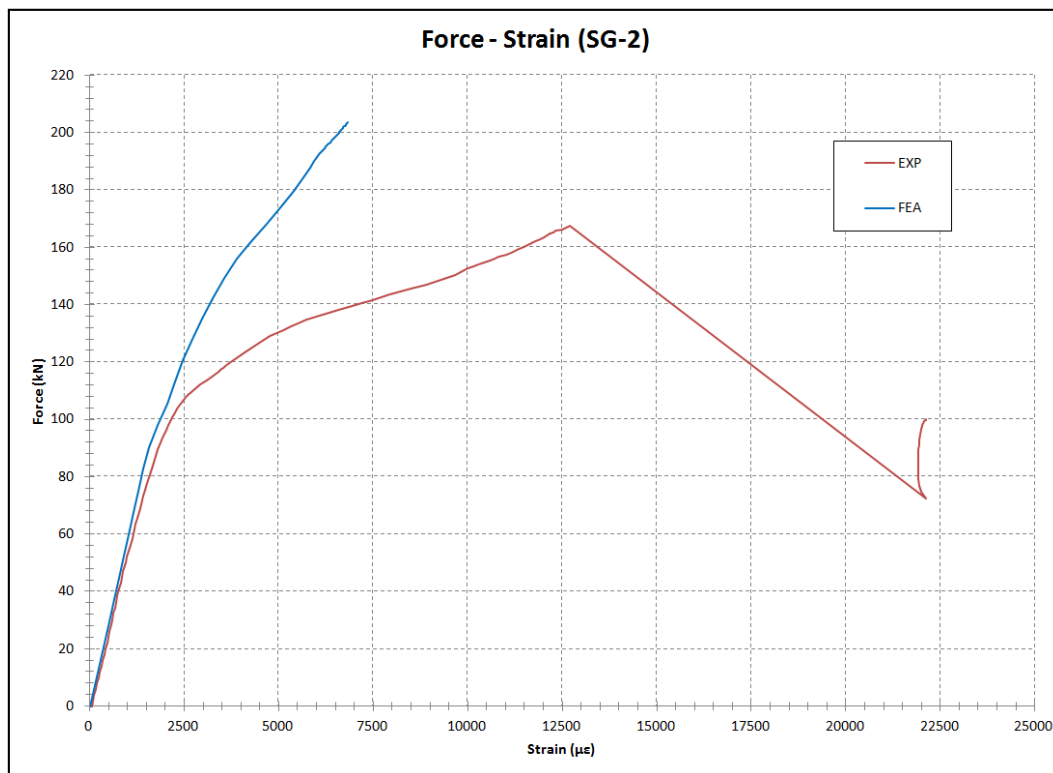
Είναι εμφανές όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το φαινόμενο της κάμψης στο σημείο αυτό. Ταυτόχρονα στη χαλύβδινη πλάκα (βλ Σχήμα 5.35) παρατηρείται η είσοδος της περιοχής γύρω από την εγκοπή στην πλαστική περιοχή (κόκκινες περιοχές).



Σχήμα 5.35: Κατανομή των τάσεων κατά von Mises στη χαλύβδινη πλάκα για φορτίο 70 kN.

Με βάση τα παραπάνω φαινόμενα μπορεί να δικαιολογηθεί στο σημείο πάνω από την εγκοπή, μια τοπική αποκόλληση του επιθέματος (debonding) με αποτέλεσμα το φαινόμενο της κάμψης να εξασθενεί και το επίθεμα να φορτίζεται με ολοένα και μεγαλύτερο εφελκυστικό φορτίο μέχρι την αστοχία. Η καταγραφή των μεγαλύτερων εφελκυστικών φορτίων και άρα παραμορφώσεων καταγράφεται και από τους δυο αισθητήρες OF-4 και SG-1, όπως φαίνεται στις αντίστοιχες καμπύλες μετά τα 70 kN.

Στην θέση SG-2 (βλ. Σχήμα 5.36), όπως και προηγουμένως, τα αριθμητικά αποτελέσματα (μπλε γραμμή) προσομοιώνουν με ακρίβεια, μόνο την περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς και λιγότερο αυτή της πλαστικής συμπεριφοράς του δοκιμίου, καθώς το μοντέλο δεν περιλάμβανε κριτήρια αστοχίας σχετικά με την αποκόλληση του επιθέματος.



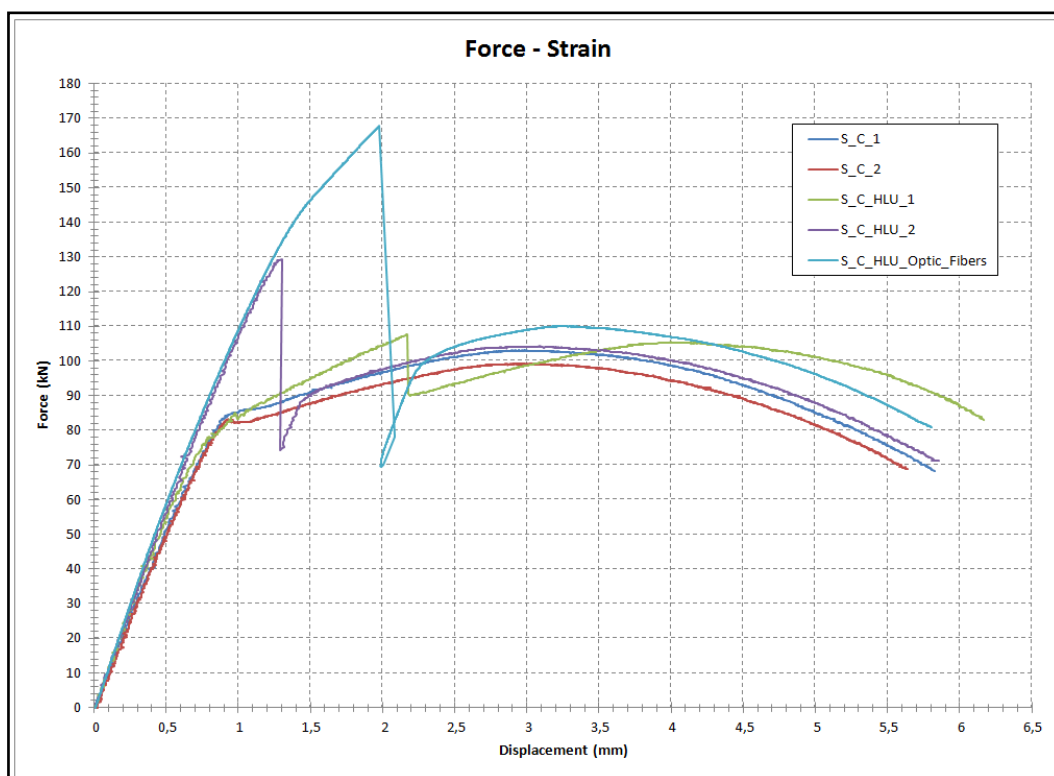
Σχήμα 5.36: Καμπύλες φορτίου-παραμορφώσεων στη θέση SG-2.

5.6 Σύγκριση με Προηγούμενα Αποτελέσματα

Στο εδάφιο αυτό γίνεται σύγκριση των παραπάνω πειραματικών μετρήσεων με αυτά που προέκυψαν από τα πειράματα του προγράμματος Πυθαγόρας [30]. Στο πρόγραμμα Πυθαγόρας, εκτός των άλλων, μελετήθηκαν οι συμπεριφορές σε στατικό εφελκυσμό δύο χαλύβδινων πλακών με εγκοπή χωρίς επίθεμα και δύο χαλύβδινων πλακών με εγκοπή και επίθεμα από σύνθετα υλικά, ίδιων με την ενισχυμένη πλάκα που μελετήθηκε στην εργασία αυτή. Τα επιθέματα στις ενισχυμένες πλάκες κατασκευάστηκαν με την μέθοδο της επίστρωσης με το χέρι (HLU) και με το ίδιο ύφασμα (Plain Weave) που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του επιθέματος της εργασίας αυτής. Η μόνη διαφορά στη μέθοδο κατασκευής ήταν η χρήση της ρητίνης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε διαφορετική ρητίνη που είχε όμως παρόμοιες ιδιότητες.

Στα πειράματα του προγράμματος Πυθαγόρα, χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα σε διάφορα σημεία των δοκιμίων και των επιθεμάτων για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Δυο από τις θέσεις αυτές είναι ίδιες με τις θέσεις 1 και 2 των επιμηκυνσιομέτρων (SG-1 και SG-2) του δοκιμίου της παρούσας εργασίας, όπου θα γίνει και η σύγκριση.

Στην αρχή γίνεται σύγκριση στο ρυθμό μεταβολής της επιμήκυνσης των δοκιμίων συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης. Στην σύγκριση αυτή (Σχήμα 5.37) φαίνεται η απόκριση των δύο δοκιμίων χωρίς επίθεμα (S_C_1 και S_C_2), των δοκιμίων με επίθεμα (S_C_HLU_1 S_C_HLU_2) και του δοκιμίου με επίθεμα της παρούσας εργασίας (S_C_HLU_Optic_Fibers).



Σχήμα 5.37: Μεταβολή της επιμήκυνσης των δοκιμίων συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε οι τα δοκίμια αναφοράς S_C_1 και S_C_2 επιδεικνύουν μια αναμενόμενη συμπεριφορά, αποκρινόμενα αρχικά γραμμικά και περνώντας στη συνέχεια στην πλαστική περιοχή. Το όριο διαρροής τους είναι 84.6 kN και 82.5 kN αντίστοιχα. Η

συμπεριφορά των δοκιμών με επίθεμα είναι γενικά παρόμοια. Αρχικά παραμορφώνονται ελαστικά, με την περιοχή ελαστικής τους απόκρισης να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δοκιμών χωρίς επίθεμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, λόγω της παρουσίας του επιθέματος, αναπτύσσονται χαμηλότερες τάσεις στον χάλυβα για το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο και άρα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι υψηλότερα επιβαλλόμενα φορτία. Στη συνέχεια συμβαίνει αστοχία της κόλλησης μεταξύ του επιθέματος και του χάλυβα, με αποτέλεσμα την απότομη πτώση του μεταφερόμενου φορτίου, αφού το επίθεμα δεν φέρει πια καθόλου φορτίο. Μετά την αποκόλληση του επιθέματος, τα δοκίμια εισέρχονται απότομα στην πλαστική περιοχή και ακολουθούν την τυπική απόκριση των δοκιμών χωρίς επίθεμα, παραμορφούμενα πλαστικά και φθάνοντας σε ένα μέγιστο φορτίο.

Πιο συγκεκριμένα στο δοκίμιο S_C_HLU_1, αναπτύχθηκαν σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις πριν από την αποκόλληση του επιθέματος σε σχέση με τα άλλα δύο. Ενώ στο δοκίμιο S_C_HLU_Optic_Fibers είναι εμφανές το αρκετά μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας του επιθέματος. Οι τιμές του φορτίου στις οποίες αστόχησαν τα επιθέματα των δοκιμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.5 και συγκρίνονται με το φορτίο διαρροής των δοκιμών αναφοράς χωρίς επίθεμα. Από τη σύγκριση αυτή είναι εμφανής η υπεροχή των δοκιμών με επίθεμα, αφού το εύρος φορτίων στο οποίο συμπεριφέρονται ελαστικά είναι αυξημένο από 29 έως και 101% ως προς το φορτίο διαρροής των μη ενισχυμένων δοκιμών.

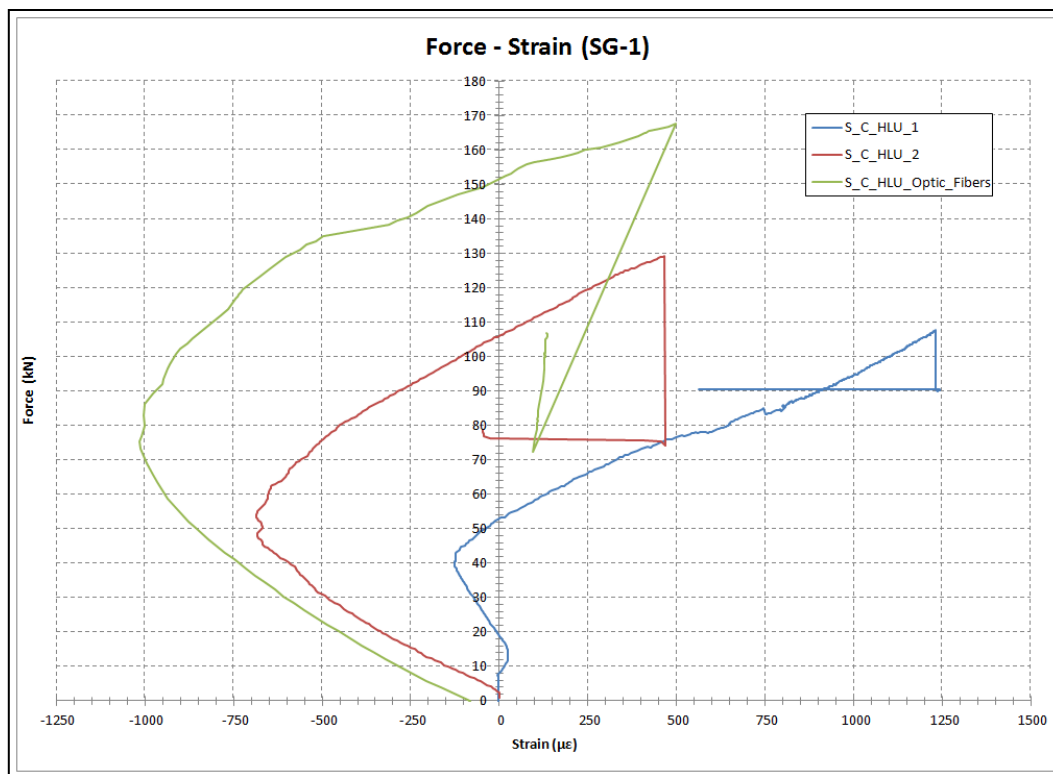
Πίνακας 5.5: Φορτίο αστοχίας των δοκιμών

Δοκίμιο	Φορτίο Αστοχίας Επιθέματος (kN)	% Διαφορά ²	Μέση % Διαφορά ²	Μέγιστο Φορτίο (kN)
S_C_1	84.6 ¹	-	-	103.1
S_C_2	82.5 ¹	-	-	99.4
S_C_HLU_1	107.6	29	62	105.3
S_C_HLU_2	129.4	55		104.2
S_C_HLU Optic Fibers	167.7	101		110

¹ Φορτίο Διαρροής.

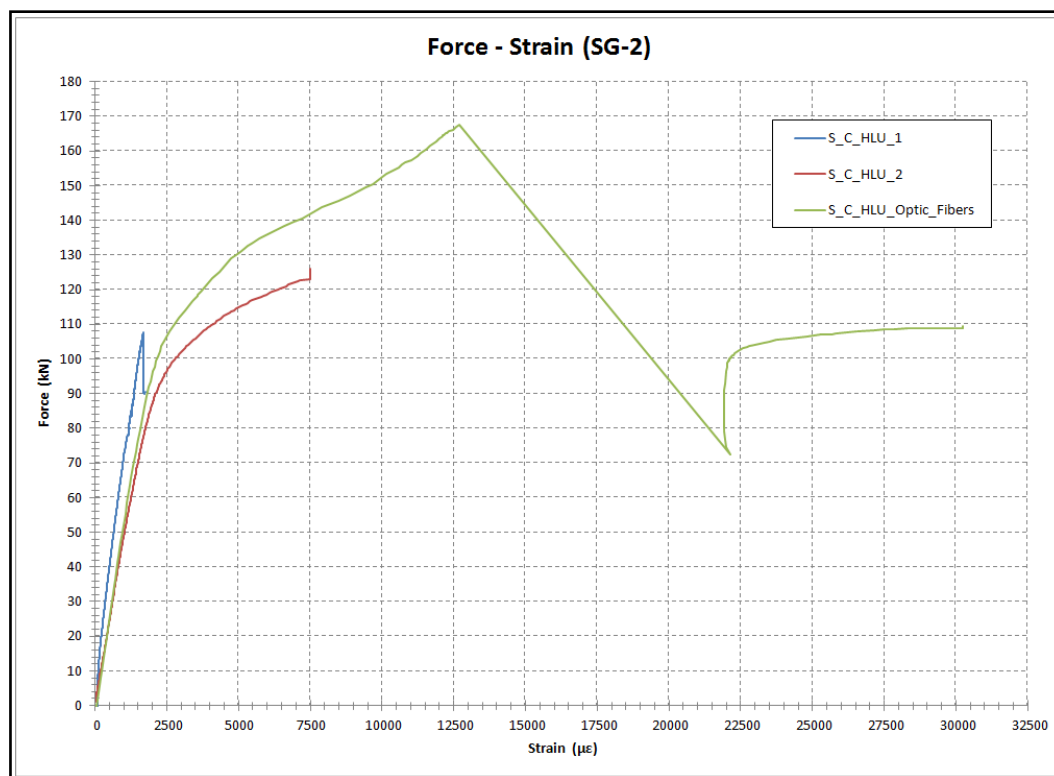
² Από τη μέση τιμή των φορτίων διαρροής των δοκιμών S_C_1 και S_C_2.

Έπειτα γίνεται η σύγκριση στις θέσεις των επιμηκυνσιομέτρων. Στη θέση 1, ακριβώς επάνω από την εγκοπή, οι παραμορφώσεις των δοκιμών αυτών είναι στην αρχή θλιπτικές, μετατρέπομενες από κάποιο φορτίο και έπειτα σε εφελκυστικές (βλ. Σχήμα 5.38). Όπως έχει ειπωθεί προηγουμένως, το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα σε κάποια τοπική κάμψη του επιθέματος η οποία συμβαίνει ακριβώς επάνω από την εγκοπή και η οποία γίνεται λιγότερο σημαντική όσο το φορτίο αυξάνει και συνεπώς και το εφελκυστικό φορτίο που φέρει το επίθεμα αυξάνει επίσης. Το SG-1 του δοκιμίου S_C_HLU_Optic_Fibers καταγράφει μεγαλύτερες παραμορφώσεις έναντι των άλλων δυο δοκιμών. Αυτό δείχνει ότι στο επίθεμα του δοκιμίου αυτού αναπτύσσονται μεγαλύτερα καμπτικά φορτία.



Σχήμα 5.38: Μεταβολή των παραμορφώσεων στην θέση SG-1 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 5.39) φαίνεται η μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου στην θέση του SG-2. Και στα τρία δοκίμια παρατηρείται μια κοινή γραμμική συμπεριφορά στην αρχή. Έπειτα στο δοκίμιο S_C_HLU_1 παρατηρείται μετά την αποκόλληση του επιθέματος σταμάτημα της καταγραφής των παραμορφώσεων, πιθανόν λόγω αποκόλλησης του επιμηκυσιομέτρου. Στο δοκίμιο S_C_HLU_2 παρατηρείται καταγραφή στην πλαστική περιοχή, μέχρι την αποκόλληση του επιθέματος και μετά σταμάτημα της καταγραφής. Από την άλλη, στο δοκίμιο S_C_HLU_Optic_Fibers παρατηρούνται μετά τα 100 kN, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις μέχρι την αστοχία του επιθέματος και έπειτα, συνέχεια της καταγραφής μέχρι να μπει το δοκίμιο αρκετά μέσα στην πλαστική περιοχή. Ουσιαστικά το επιμηκυσιομέτρο στο δοκίμιο S_C_HLU_Optic_Fibers «καταφέρνει» και καταγράφει και την απότομη αύξηση των παραμορφώσεων κατά την αποκόλληση του επιθέματος. Αυτό πιθανόν να συμβαίνει λόγω καλύτερης τοποθέτησης του επιμηκυσιομέτρου.



Σχήμα 5.39: Μεταβολή των παραμορφώσεων στην θέση SG-2 συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου.

Κεφάλαιο 6

Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

6.1 Ανακεφαλαίωση

Ανακεφαλαιώνοντας, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η εξοικείωση με την χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών, μέσω τριών πειραματικών εφαρμογών. Οι αισθητήρες αυτοί, τύπου Fabry-Perot χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στο συγκεκριμένο εργαστήριο και γι' αυτό ήταν αναγκαία η διερεύνηση του τρόπου λειτουργίας αλλά και χρήσης τους.

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν τρία διαφορετικά είδη δοκιμών τα οποία φορτίστηκαν κυρίως από στατικό εφελκυστικό φορτίο και υπολογίστηκαν σε αυτά οι παραμορφώσεις με την χρήση αισθητήρων οπτικών ινών. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για ένα χαλύβδινο έλασμα, έναν κολλητό σύνδεσμο μετάλλου με μέταλλο και ένα μεγάλο μεγέθους δοκίμιο από χάλυβα με κεντρική διαμερή εγκοπή ενισχυμένο με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε κάθε πείραμα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα από αριθμητικές αναλύσεις ούτως ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της χρήσης των αισθητήρων οπτικών ινών, ως μετρητικά μέσα παραμορφώσεων.

Στην αρχή, έγινε μια θεωρητική προσέγγιση των βασικών αρχών λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών, και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον τύπο αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Παράλληλα, παρουσιάστηκαν μερικές πρόσφατες εφαρμογές για την καλύτερη κατανόηση του ρόλου των αισθητήρων στα συστήματα παρακολούθησης της ακεραιότητας των κατασκευών. Έπειτα παρουσιάστηκε εν συντομία ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των παραμορφώσεων από τους αισθητήρες οπτικών ινών, για τις τρεις εφαρμογές.

Στην πρώτη εφαρμογή διερευνήθηκε η στατική συμπεριφορά σε κάμψη, εφελκυσμό και θλίψη ενός δοκιμίου χάλυβα. Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων στο δοκίμιο αυτό χρησιμοποιήθηκε μεταξύ άλλων και ένας αισθητήρας οπτικής ίνας. Επειδή ήταν η πρώτη εφαρμογή υπολογισμού παραμορφώσεων της παρούσας εργασίας, διερευνήθηκε αρχικά ο τρόπος τοποθέτησης των αισθητήρων οπτικών ινών, ενώ στην πορεία τέθηκε το δοκίμιο σε δοκιμές κάμψης με σκοπό να ρυθμιστεί η συνδεσμολογία των μετρητικών διατάξεων και να καλιμπραριστούν οι μετρήσεις μεταξύ των συστημάτων καταγραφής. Αφού έγιναν οι απαραίτητες ρυθμίσεις για την σωστή καταγραφή των αισθητήρων, τοποθετήθηκε το χαλύβδινο δοκίμιο στην υδραυλική μηχανή και καταπονήθηκε σε εφελκυσμό και θλίψη στην ελαστική του περιοχή.

Στη δεύτερη εφαρμογή μελετήθηκε η στατική συμπεριφορά ενός κολλητού συνδέσμου μετάλλου με μέταλλο (single lap joint) σε εφελκυσμό. Για την καταγραφή των διαμηκών

παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν δυο αισθητήρες οπτικών ινών που τοποθετήθηκαν στην περιοχή του κολλητικού μέσου, μεταξύ των δύο μετάλλων.

Τέλος, στην τρίτη εφαρμογή διερευνήθηκε η στατική συμπεριφορά σε εφελκυσμό, ρωγματομένης (notched) πλάκας χάλυβα, που ήταν ενισχυμένη με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Η εφαρμογή αυτή αποτελούσε μια επέκταση προηγούμενης σειράς πειραμάτων που είχαν διεξαχθεί στο ίδιο εργαστήριο, με τη διαφορά ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες οπτικών ινών σαν βασικές μετρητικές διατάξεις για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Έτσι λοιπόν, ο σχεδιασμός αυτής της εφαρμογής βασίστηκε σε ήδη υπάρχοντα σχέδια και υλικά. Στόχος του πειράματος ήταν αφενός η ενσωμάτωση των αισθητήρων οπτικών ινών στο επίθεμα και ο έλεγχος αξιοπιστίας των μετρήσεων τους και αφετέρου η σύγκριση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων πειραμάτων.

6.2 Συμπεράσματα

Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπόρεσαν να υπολογίσουν με ακρίβεια τις παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν στα δοκίμια και των τριών εφαρμογών. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζουν γενικά μια ταύτιση με τις μετρήσεις των αισθητήρων, ενώ παρουσιάζονται ταυτόχρονα και κάποιες μεμονωμένες αποκλίσεις στην πρώτη και την τρίτη εφαρμογή. Οι αποκλίσεις αυτές βασίζονται κυρίως στην μη ορθή τοποθέτηση των αισθητήρων, σε σχέση με την επιδιωκόμενη θέση τους.

Γίνεται έτσι εμφανές ότι υπάρχει μια δυσκολία στην τοποθέτηση των αισθητήρων οπτικών ινών, που έχει να κάνει κυρίως με το μέγεθος αλλά και το σχήμα τους. Γι αυτό, πρέπει κάθε φορά, να διερευνάται εκτενέστερα ο τρόπος τοποθέτησης τους, ενώ παράλληλα να ακολουθούνται λεπτομερώς οι οδηγίες του κατασκευαστή. Η σωστή τοποθέτηση του αισθητήρα και η άμεση επαφή του με το εκάστοτε δοκίμιο είναι τεράστιας σημασίας για την απόκτηση ορθών μετρήσεων. Παρόλο όμως αυτό το αρνητικό χαρακτηριστικό, οι αισθητήρες οπτικών ινών διαθέτουν τεράστια πλεονεκτήματα, αν αναλογιστεί κανείς το πλήθος των εφαρμογών που αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε αντίθεση με τους συμβατικούς αισθητήρες (strain gages).

Ο τύπος των αισθητήρων οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας εργασίας εστιάζει σε πιο τοπικά φαινόμενα, σε σχέση με τους συμβατικούς αισθητήρες, χάρη στο πολύ μικρό μήκος αναφοράς τους (περίπου 1 mm). Με την χρήση τους ήταν εφικτός ο υπολογισμός παραμορφώσεων όχι μόνο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, αλλά και πριν από αυτά, κατά την κατασκευή των δοκιμίων, αλλά και κατά την διάρκεια πολυμερισμού των κολλητικών μέσων. Τη δυνατότητα αυτή δεν μπορούσαν να την προσφέρουν οι συμβατικοί αισθητήρες (strain gages). Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις μετρήσεις αυτές θεωρούνται χρήσιμα για την αξιολόγηση του μεγέθους των παραμενουσών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται εσωτερικά των κολλητικών μέσων. Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι οι οπτικοί αισθητήρες τοποθετούνται σε σημεία που είναι αδύνατον να τοποθετηθούν οι συμβατικοί αισθητήρες.

Η καταγραφή των θλιπτικών παραμορφώσεων από τις οπτικές ίνες με το πρόγραμμα Catman δεν ήταν εφικτή, επειδή απαιτείται αρνητικό voltage για την ανάγνωση τους από την συσκευή Spider. Αυτό δεν είναι δυνατόν γιατί τα modules του Chassis SD-5, από όπου λαμβάνεται το σήμα, δεν υποστηρίζουν αρνητικές τάσεις (analog output 0-5V). Η περεταίρω διερεύνηση για τη διευθέτηση του θέματος αυτού με πιθανή τροποποίηση του προγράμματος Catman κρίνεται απαραίτητη. Όσον αφορά τις καταγραφές των εφελκυστικών παραμορφώσεων, ο συγχρονισμός μεταξύ των προγραμμάτων Evolution και Catman επιδέχεται διορθώσεις. Όλα αυτά βέβαια, εφόσον κρίνεται απαραίτητη η χρήση και

δεύτερου προγράμματος για την καταγραφή των παραμορφώσεων από τους αισθητήρες οπτικών ινών σε οποιαδήποτε μελλοντική εφαρμογή. Με την παρούσα τεχνολογία θεωρείται καλύτερη η χρήση του προγράμματος Evolution για την ευκολία και την αμεσότητα της πρόσκτησης δεδομένων.

Η απογύμνωση των συγκεκριμένων οπτικών ινών από το εξωτερικό τους περίβλημα είναι εφικτή, εφόσον αυτή πραγματοποιηθεί με ιδιαίτερη προσοχή. Με την διαδικασία αυτή, μειώνεται αισθητά το πάχος των οπτικών ινών (περίπου 3 φορές) και δίνεται η δυνατότητα σε αυτές να τοποθετηθούν σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στην περιοχή ενδιαφέροντος με τέτοιο τρόπο, ώστε να επηρεάζουν λιγότερο τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού στο οποίο εισέρχονται.

Από την σύγκριση της ενισχυμένης χαλύβδινης πλάκας με επίθεμα από σύνθετα υλικά με τις αντίστοιχες του προγράμματος Πυθαγόρας, διαπιστώνεται ότι το φορτίο αστοχίας του επιθέματος του δοκιμίου της παρούσας εργασίας είναι μεγαλύτερο από τα άλλα δοκίμια. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην διαφορετική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε αλλά και στην μέθοδο επίστρωσης των επιθεμάτων (HLU), που η ποιότητα της μπορεί να διαφοροποιείται από δοκίμιο σε δοκίμιο. Φαίνεται όμως από τα παραπάνω, ότι η τοποθέτηση των αισθητήρων οπτικών ινών μέσα στο επίθεμα δεν επηρέασε αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες του επιθέματος, ελαττώνοντας με κάποιο τρόπο το φορτίο αστοχίας του.

Οδηγούμαστε έτσι στο συμπέρασμα ότι οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχετικά εύκολα για την παρατήρηση των μεταβολών των παραμορφώσεων και σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως είναι μια σύνθετη κατασκευή ή ένα κολλητικό μέσο. Γι' αυτό άλλωστε η χρήση τους, θεωρείται ιδανική για την παρακολούθηση της ακεραιότητας των κατασκευών (SHM).

Βιβλιογραφία

1. *Fiber optic sensors*. F.Yu,S.Yin, Marcel-Dekker, 2002
2. *Health Monitoring of airspace structures*, W.Staszewski, C.Boller, G.Tomlinson, John Wiley & Sons Inc., 2004
3. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, Udd, E. (Editor), Wiley-Interscience, New York, NY, 2nd Edition, 2006
4. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Jose Miguel Lopez-Higuera, John Wiley & Sons Inc., 2002
5. *Fiber Optic Sensors*, Bahareh Gholamzadeh, and Hooman Nabovati, World Academy of Science, Engineering and Technology 42 2008
6. *Fiber Optic Sensors For Structural Control* Daniele Inaudi and Andrea del Grosso 2008
7. *Optical fiber sensors-Principles and components*. Dakin and B.Culshaw, Vol.I, Artech House, Boston
8. *Fiber Optic Methods For Structural Health Monitoring*, Branko Glisic and Daniele Inaudi, John Wiley & Sons , Ltd,2007
9. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Jose Miguel Lopez-Higuera, John Wiley & Sons Inc., 2002.
10. *Fabry-Pérot Fiber-Optic Sensors for Physical Parameters Measurement in Challenging Conditions* , Éric Pinet R & D Department, FISO Technologies inc. 2009
11. FISO Technologies Inc.: www.fiso.com, SMARTEC S.A.: www.smartec.ch or Roctest Ltd.: www.roctest.com
12. *Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects*, Daniele Inaudi, Smartec SA, Switzerland, Roctest Ltd, Canada 2007
13. *Monitoring with Fiber Optic Sensors of a Cable-Stayed Bridge in the Port of Venice*, A. Del Grosso, A. Torre, G. Brunetti, D. Inaudi, A. Pietrogrande, 2006
14. *Stress measurements in the main cable of a suspension bridge under dead and traffic loads*, M. Talbot & J.F. Laflamme, B. Glišić, 2007
15. *Monitoring of Concrete Bridges with Long-Gage Fiber Optic Sensors*, Daniele Inaudi, Samuel Vupillot, 2000
16. *Structural Monitoring of the Manhattan cable stayed bridge*, Manhattan, New York, 2005-2007, Micron Optics, Smartec
17. *Long-term monitoring of high-rise buildings using long-gage fiber optic sensors*, B. Glišić & D. Inaudi Smartec SA, J.M. Lau, Y.C. Mok & C.T. Ng Housing & Development Board (HDB), Singapore 2005
18. *Case Study: Application of Structural Health Monitoring technology in civil structures in mainland China*, Hui Li, Zhiming Guo, Jinping Ou, Zonglian Guo
19. *Monitoring Program Criteria Development for Evaluation of Groined Masonry Arch Stability*, A. Korjakins, K. Bondars, 2008
20. *Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing*, Daniele Inaudi, Branko Glisic, Smartec SA, Canada, 2006
21. *Structural health monitoring R&D at the "European Research Establishments in Aeronautics" (EREA)*, Daniel L. Balageas,2002
22. *Fiber Optic Wing Shape Sensing on NASA's Ikhana UAV*,L.Richards, A.R.Parker, W.L.Ko , A. Piazza, NASA,2008

-
23. *Case study – Marine: Four Island Tanker, Must System, Vinashin shipyard (Vietnam), Micron Optics, Smartec SA, 2007*
 24. *Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blade*, M.A. Rumsey, J.A. Paquette, Sandia National Laboratories, 2008
 25. *Fiber Optic Sensors*, Technical market report from BCC Research, fall 2008
 26. *Evolution Chassis and Software*, MAN-00079 R2, Fiso technologies Inc., 2007
 27. *Instruction Manual, Senoptic Fiber-Optic Sensors, Fabry Perot Strain Gage, FOS Series*, Roctest Limited, 2000
 28. *Characteristics of Extrinsic Fabry-Perot Interferometric (EFPI) Fiber-Optic Strain Gages*, David A. Hare and Thomas C. Moore, Sr. Langley Research Center, Hampton, Virginia NASA, 2000
 29. *Testing an Adhesive Bonding*, R.Cau, Eindhoven University of Technology, 2007
 30. *Πειραματική Διερεύνηση της Στατικής Συμπεριφοράς σε εφελκυσμό Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά*, Α. Μυρσιώτης, Ν. Τσούβαλης, Πυθαγόρας ΙΙ Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στα Πανεπιστήμια, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2006
 31. *Numerical Modeling of the static and dynamic Experimental tests performed in Composite Patch Reinforced Steel Plates with Defects*, N. Tsouvalis, J. Kouloukouras, D. Dimou and L. Mirisiotis, Pithagoras II, Support of University Research Teams, Athens 2007
 32. *Αναλυτική και Αριθμητική Μοντελοποίηση της Χρήσης Επιθεμάτων από Σύνθετα Υλικά για την Ενίσχυση και Επισκευή Χαλύβδινων Κατασκευών*, Β.Π. Σωτηρόπουλος, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2007.
 33. *Αριθμητική Μοντελοποίηση Ρωγματομένων και Διαβρωμένων Χαλύβδινων Ελασμάτων, Ενισχυμένων με Επίθεμα από Σύνθετα Υλικά*, Ι. Κουλουκούρας, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
 34. *Αντοχή Υλικών Τόμος*, Θ. Κερμανίδης, Πάτρα, 1999
 35. *Μηχανική Σύνθετων Υλικών*, Ν.Γ. Τσούβαλης, Αθήνα 1998
 36. *Using Finite Elements in Mechanical Design*, J.T. Mottram, C.T. Shaw, McGraw – Hill, 1996