



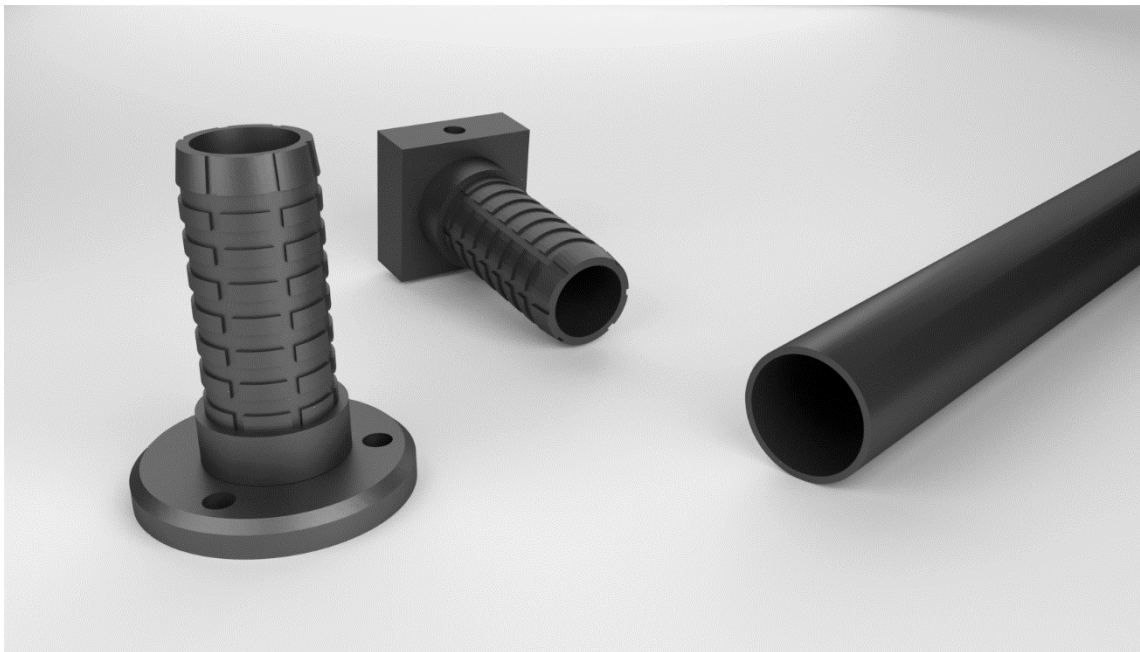
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΩΛΗΝΑ
ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ**

ΚΕΦΑΛΑ ΣΩΤΗΡΙΑ

ΑΕΜ 1281



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΙΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Κοζάνη, Ιούλιος 2018

Περίληψη

Σήμερα, η τεχνική περιέλιξης των ινών (Filament Winding Technique) εγγυάται πολύ υψηλά επίπεδα ποιότητας στον τομέα της παραγωγής κατασκευαστικών στοιχείων από σύνθετα υλικά. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί πειραματικά και αριθμητικά η βέλτιστη σύνδεση μεταξύ ενός σωλήνα ανθρακονημάτων κατασκευασμένο με τη μέθοδο περιέλιξης ινών και δύο συνδέσμων που εφαρμόζονται στα άκρα του. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνδέσμων, αφότου έχει προηγηθεί η παραγωγή τους.

Τα τρία μοντέλα μελετώνται σε στατική ανάλυση και η εργασία επικεντρώνεται στα δύο, εφόσον το ένα από αυτά οδηγήθηκε σε θραύση κατά τα εργαστηριακά πειράματα. Παράλληλα, έμφαση δίδεται στη συσχέτιση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης των μοντέλων με πεπερασμένα στοιχεία με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια, μελετώνται σε ανάλυση ιδιομορφών. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε κατάλληλη πειραματική μέθοδος προσδιορισμού των μορφικών παραμέτρων του συναρμολογήματος. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δίνει μία απόκλιση 1.5%-31.5%. Έπειτα, αναδεικνύονται βασικές εφαρμογές σωληνωτών χωροδικτυωμάτων από ανθρακονήματα, ένα υποπλαίσιο αγωνιστικής μηχανής και ένα ενδεικτικό χωροδικτύωμα για την καταγραφή αποτελεσμάτων που εμβαθύνουν στη συμπεριφορά της σύνδεσης που εξετάστηκε. Η εργασία κλείνει με την παρουσίαση των συμπερασμάτων, ενώ τέλος προτείνονται θέματα που χρήζουν ενδιαφέροντος για μελλοντική έρευνα.

Abstract

Today, Filament Winding Technique guarantees high quality levels in the production of structures made of composite materials. The purpose of this thesis is to investigate experimentally and numerically the optimal connection between a filament wound carbon fiber tube and two end fitting connectors. More specifically, three different models of the connectors were investigated, after their production process.

Static analysis performed to three models, and the research focused on the two, since one of them subjected fracture during experiments. Following on, a significant amount of attention is brought to correlate the numerical with the experimental results. Then, a modal analysis is performed. More specifically, an experiment is performed to identify the modal parameters of the structure. The comparison between these data will eventually result in a diversion of 1.5%-31.5%. Next, applications of the carbon fiber tubes are highlighted such as a motorcycle's subframe and an indicative truss in order to focus on the optimal connection system which we conclude to. This paper ends with a presentation of the extracted conclusions while other issues for future research are proposed.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γιαγκόπουλο Δημήτριο, Επ. Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Π.Δ.Μ. τόσο για την ανάθεση του εν λόγω θέματος όσο και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την εταιρεία «B&T Composites» για την κατασκευή των σωλήνων από ανθρακονήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και του φίλους μου για την στήριξη που μου έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	10
2.1 ΕΙΔΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	10
2.1.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (<i>Fiber-reinforced composites</i>).....	11
2.2 ΊΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	12
2.2.1 Παραγωγή ανθρακονημάτων	13
2.2.2 Μορφές ινών άνθρακα	16
2.2.3 Ιδιότητες ανθρακονημάτων.....	16
2.2.4 Εφαρμογές ανθρακονημάτων	17
2.3 ΜΗΤΡΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	19
2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	20
2.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	22
2.5.1 Ελαστική συμπεριφορά ινώδων σύνθετων υλικών.....	23
2.6 ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΟΥ	25
2.7 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ	26
2.7.1 Περιέλιξη ίνας (<i>Filament winding</i>).....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΩΛΗΝΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ	30
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ	30
3.2 ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΩΛΗΝΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	39
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	39
4.1.1 Μοντελοποίηση – τύποι πεπερασμένων στοιχείων.....	40
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΩΛΗΝΑ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ.....	41
4.2.1 Εισαγωγή ιδιοτήτων των υλικών	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	49
5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	49
5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	50

5.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΣΗΣ ΜΕ STRAIN GAUGES	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	60
6.1 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	61
6.1.1 Εξίσωση κίνησης ταλαντωτικού συστήματος	61
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΡΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	65
7.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ.....	66
7.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ.....	68
7.2.1 Rational fraction polynomial method (RFPM)	68
7.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ	71
7.3.1 Οριακές συνθήκες, διέγερση και μετρήσεις πειράματος.....	71
7.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης και πειράματος.....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΩΛΗΝΩΤΑ ΧΩΡΟΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ CARBON	76
8.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΠΛΑΙΣΙΟΥ	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΕ ΧΩΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΩΜΑ.....	80
9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΩΡΟΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ.....	80
9.1.1 Στατική ανάλυση χωροδικτυώματος	81
9.1.2 Ιδιομορφική ανάλυση χωροδικτυώματος	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, επιδιώκεται η μελέτη της δυναμικής και στατικής συμπεριφοράς σωλήνα ανθρακονημάτων με συνδέσμους, με χρήση αριθμητικών και πειραματικών μεθόδων. Η ολοκληρωμένη διάταξη υπόκειται σε τρία σενάρια ανάλυσης και προσομοίωσης με συνδέσμους από τρία διαφορετικά υλικά. Οι σωλήνες προς μελέτη είναι κατασκευασμένοι με τη μέθοδο περιέλιξης ινών (filament winding), ενώ οι σύνδεσμοι σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος SolidWorks της εταιρίας Dassault Systems SolidWorks Corporation και έπειτα κατασκευάστηκαν.

Δομή

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δέκα κεφάλαια. Μετά την εισαγωγή που γίνεται στο παρόν κεφάλαιο, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά ως προς την ταξινόμησή τους, τις μεθόδους μορφοποίησής τους και τις χρήσεις τους. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής των συνδέσμων και η μορφή σύνδεσής τους με το σωλήνα από ανθρακονήματα. Επιπλέον, στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφεται η μοντελοποίηση του σύνθετου υλικού και των συνδέσμων ανάλογα με το υλικό κατασκευής στο λογισμικό πακέτο ANSA. Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η στατική ανάλυση των δύο μοντέλων προκειμένου να βρεθούν οι μέγιστες μετατοπίσεις και τάσεις, όταν επιδρούν τέσσερα διαφορετικά βάρη. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη μέθοδο της μορφικής ανάλυσης και προσδιορίζονται οι τιμές ιδιοσυχνοτήτων από την ιδιομορφική ανάλυση του συναρμολογήματος. Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη διαδικασία μορφικής αναγνώρισης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων. Στη συνέχεια, γίνεται μία αναφορά σε σωληνωτά χωροδικτύωματα. Αρχικά παρουσιάζεται μία υφιστάμενη κατασκευή υποπλαισίου αγωνιστικής μηχανής, η οποία υποβάλλεται σε στατική μελέτη. Στη συνέχεια αναλύεται ένα πιο σύνθετο γεωμετρικά χωροδικτύωμα. Λαμβάνουμε αποτελέσματα για αναπτυσσόμενες τάσεις, μετατοπίσεις, καθώς και για ιδιοσυχνότητες του χωροδικτύωματος. Τέλος, στο κεφάλαιο 10 βρίσκονται τα συμπεράσματα της εργασίας, όπως επίσης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

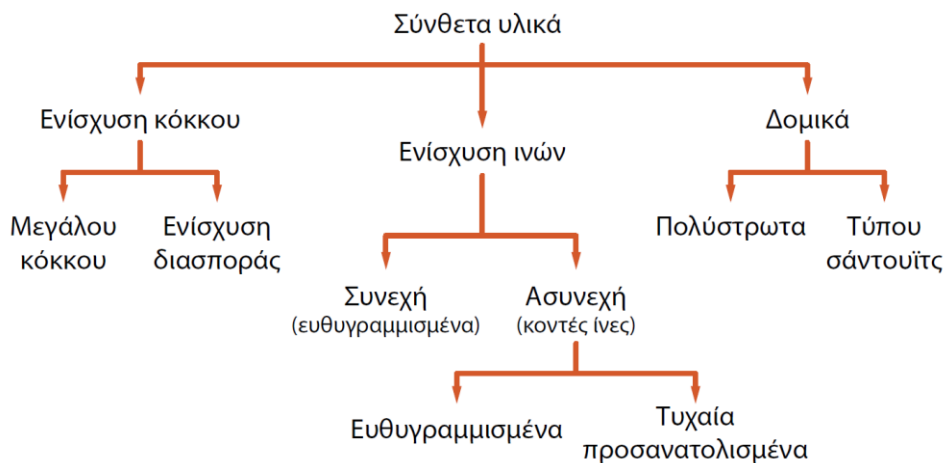
Κεφάλαιο 2: Σύνθετα υλικά

2.1 Είδη σύνθετων υλικών

Η ανάγκη για κατασκευές ανθεκτικότερες και ελαφρύτερες οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών. Με τα σύνθετα υλικά εξοικονομείται ενέργεια, καθώς αυξάνεται ο λόγος αντοχή προς βάρος. Εξαιτίας των πλεονεκτημάτων τους, τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους κατασκευαστικούς τομείς.

Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη τουλάχιστον δύο μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα που χαρακτηρίζεται ως **συστατικό ενίσχυσης** προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται **μήτρα**, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Τα συστατικά από τα οποία θα αποτελείται το σύνθετο υλικό πρέπει να είναι χημικά ανόμοια και να διαχωρίζονται μεταξύ τους μέσω διακριτής επιφάνειας [1].

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 2.1:



Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

1. **Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών** (fiber reinforced composites), αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε συνεχή μήτρα. Στα ινώδη σύνθετα υλικά η μήτρα ενισχύεται με ίνες τυχαίου ή μη προσανατολισμού, κάποιου ισχυρότερου υλικού.

2. **Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων** (particulate composites), αποτελούμενα από σωματίδια σφαιρικά, κυβικά, νιφάδες, κλπ. διαφόρων υλικών σε ένα σώμα. Τα κοκκώδη υλικά έχουν υποδεέστερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα ινώδη, εφόσον η συνεισφορά των σωματιδίων στη μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου είναι μικρότερη από αυτή των ινών.
3. **Στρωματικά / Πολύστρωτα σύνθετα υλικά** (laminated composites) αποτελούμενα από στρώσεις των ενισχυτικών ινών, με συγκεκριμένο προσανατολισμό, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με το συνδετικό υλικό.

2.1.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (Fiber-reinforced composites)

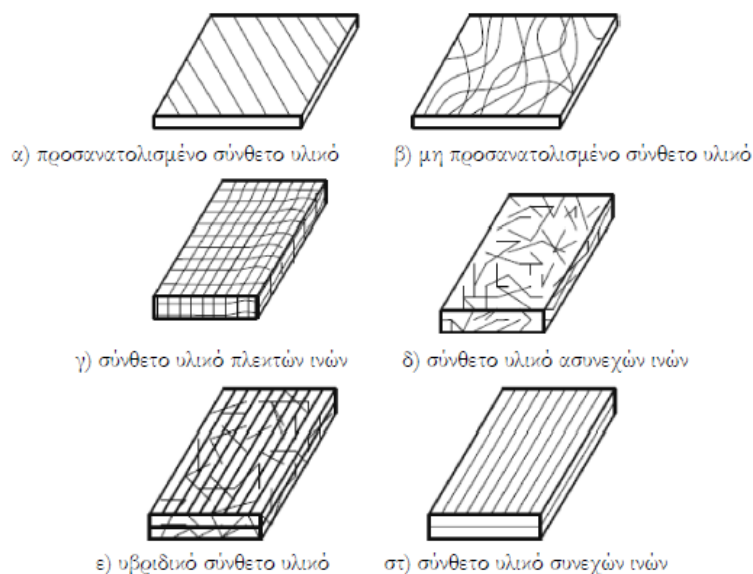
Τα ινώδη σύνθετα υλικά με τα οποία και θα ασχοληθούμε χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Το ενισχυτικό υλικό μπορεί να είναι συνεχείς ή κοντές ίνες. Στα προηγμένα σύνθετα υλικά οι κύριοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι τα ανθρακονήματα (carbon fibers), υαλονήματα (glass fibers) και οι ίνες πολυαραμιδίου (Kevlar). Στο σχήμα 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τύποι σύνθετων ινώδων υλικών.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διεύθυνση των ινών μέσα στη μήτρα διακρίνονται σε [2]:

- **Προσανατολισμένα** (directional), με ίνες που είναι συνεχείς και έχουν την ίδια διεύθυνση.
- **Μη προσανατολισμένα** (random), με ίνες να έχουν διαφορετικές διευθύνσεις μέσα στο συνδετικό υλικό.

Ανάλογα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής, οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με ποικίλους τρόπους στο συνδετικό υλικό. Συγκεκριμένα εμφανίζονται ως (σχήμα 2.2):

- **Υφασμένες ίνες** (woven mat) οι οποίες αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα οπότε είναι δύσκολο να αποκολληθούν
- **Συνεχείς ίνες** (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση
- **Στρώματα ασυνεχών ινών** (chopped strand fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες και μη προσανατολισμένες
- **Υβριδικά σύνθετα** που έχουν σαν ενίσχυση περισσότερους από ένα τύπο ίνας.



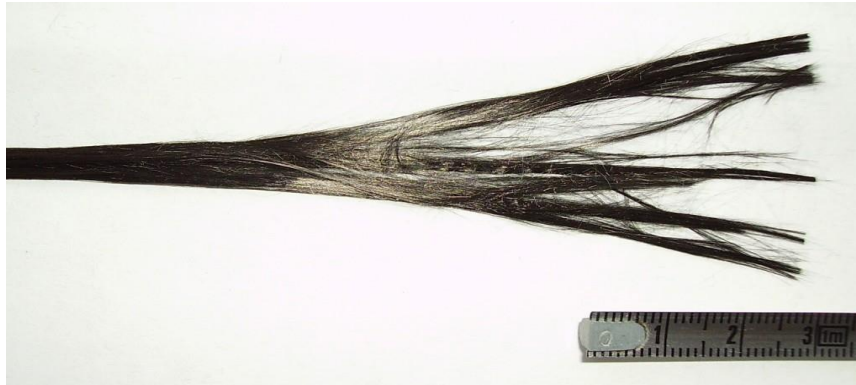
Σχήμα 2.2: Τύποι σύνθετων ινώδων υλικών [Πηγή: Ανάπτυξη και χαρακτηρισμός σφαιροειδούς φιάλης υπό πίεση από σύνθετα υλικά, Αρφαριώτης]

2.2 Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα (carbon fiber) εμφανίστηκαν το 1879 όταν οι *Edison* και *Swan* ανθρακοποιούσαν καλάμια μπαμπού για την παρασκευή ινών που χρησιμοποιούνταν ως νήματα πυρακτώσεως σε λαμπτήρες. Ως ίνες άνθρακα ορίζονται οι ίνες που περιέχουν τουλάχιστον 92% άνθρακα, ενώ οι ίνες που περιέχουν τουλάχιστον 99% άνθρακα ονομάζονται ίνες γραφίτη. Στο γραφίτη τα άτομα άνθρακα είναι διαταγμένα με τη μορφή φύλλων αποτελούμενα από εξαγωνικούς αρωματικούς δακτυλίους. Οι ίνες άνθρακα είναι γραφίτης στον οποίο τα φύλλα είναι μακριά και λεπτά σαν ταινίες. Ένα σύνολο από τέτοιες ταινίες αποτελούν μία ίνα άνθρακα. Η περιεκτικότητα του άνθρακα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της θερμικής επεξεργασίας. Αποτελείται από πολλές ίνες μαζί, η κάθε ίνα είναι 5-10μm σε διάμετρο. Όταν συνδυάζεται με πλαστική ρητίνη λέγεται πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα και έχει εξαιρετικό συνδυασμό υψηλής αντοχής και μειωμένου βάρους [3].

Οι ίνες άνθρακα έχουν χαμηλή θερμική διαστολή και χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης

αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.



Σχήμα 2.3: Ίνες άνθρακα [Πηγή: <https://en.wikipedia.org>]

Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλινών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

2.2.1 Παραγωγή ανθρακονημάτων

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία ανθρακονημάτων αναπτύσσεται συνεχώς για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις που προκύπτουν από διάφορες εφαρμογές. Κάθε ίνα άνθρακα παράγεται από ένα δομικό πολυμερές. Το πολυμερές αυτό είναι συνήθως ίνες κυτταρίνης (rayon), πολυακρilonιτρίλιο (PAN) ή πίσσα.

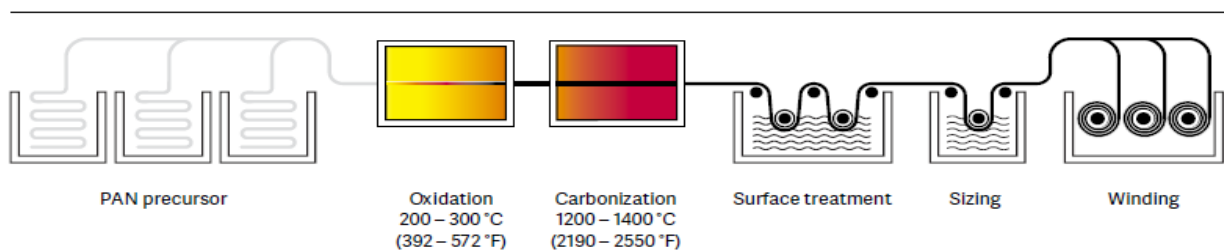
Ίνες άνθρακα με βάση το PAN

Σε σχέση με όλα τα άλλα πρόδρομα υλικά, το PAN αποδείχθηκε το πιο κατάλληλο για την παραγωγή ινών άνθρακα από πλευράς συνολικού περιεχομένου άνθρακα, υψηλότερης απόδοσης, κατεργασίας, δομής, ιδιοτήτων και κόστους. Σχεδόν το 70% των ανθρακονημάτων της παγκόσμιας παραγωγής σήμερα αποτελείται από ίνες άνθρακα με

βάση το PAN. Η παραγωγή των ινών άνθρακα με βάση το PAN περιλαμβάνει δύο ή τρία στάδια, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4 [2]:

- **Οξειδωση** των ινών PAN στον αέρα σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (100-200°C) με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης έτσι ώστε να ευθυγραμμιστούν οι αλυσίδες του πολυμερούς
- **Πυρόλυση** υπό τάση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία (1000-1500°C) για την απομάκρυνση των ανόργανων και αλειφατικών αλυσίδων, ενώ παραμένει η ίνα αποτελούμενη από γραφίτικά επίπεδα σε μορφή πλέγματος εξαγωνικών κυψελίδων.
- **Γραφίτοποίηση** σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), προκειμένου να παραχθούν υψηλού μέτρου ελαστικότητας ίνες. Η γραφίτωση γίνεται με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, η οποία οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών.

Manufacturing process

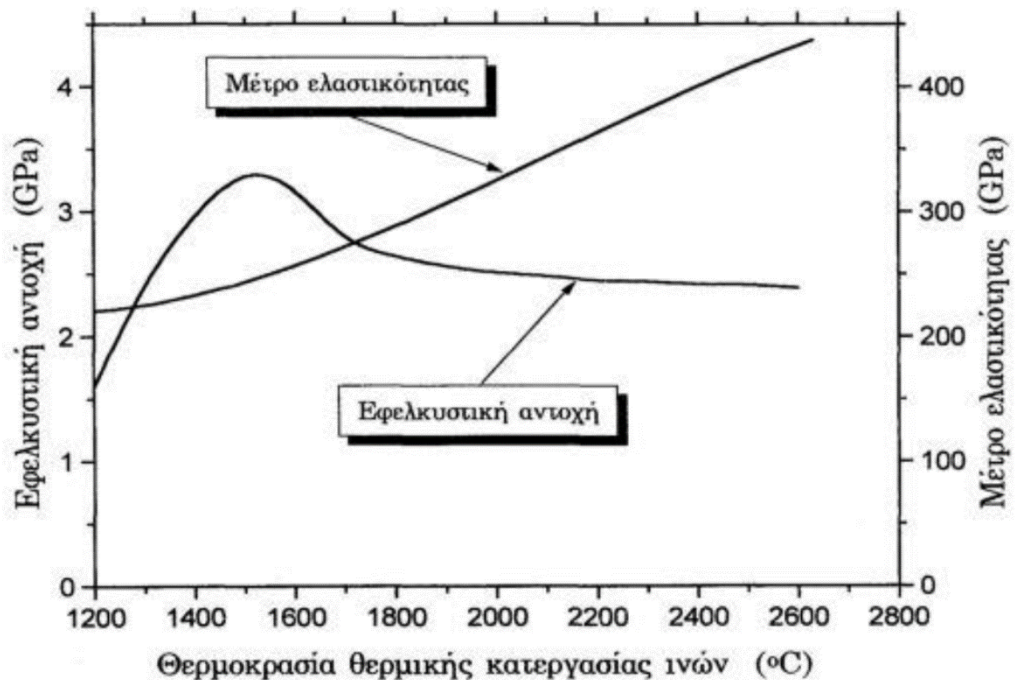


Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ενισχυτικών ινών άνθρακα σε δύο στάδια [Πηγή: <http://www.sglgroup.com>]

Μετά τη διαδικασία της γραφίτοποίησης γίνεται μία επιφανειακή κατεργασία των ινών, που συνήθως είναι μία ηλεκτρολυτική διαδικασία. Έπειτα επικαλύπτονται με μία μικρή ποσότητα κόλλας ζωικής προέλευσης, επιλεγμένη ώστε να ταιριάζει με το υλικό της μήτρας. Τέλος, περιτυλίσσονται σε κυλίνδρους (μπομπίνες).

Ανάλογα με την τιμή της θερμοκρασίας που εκτελούνται τα στάδια παραγωγής επηρεάζονται οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες του σύνθετου, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα [4]. Η θερμοκρασία της πυρόλυσης επηρεάζει άμεσα την αντοχή των ανθρακονημάτων. Για επίτευξη υψηλής αντοχής ανθρακονημάτων (High Tensile), η διαδικασία της πυρόλυσης θα διεξαχθεί στο εύρος των 1.500–1.600°C, διότι σε θερμοκρασίες πάνω από 1.600°C παρατηρείται μείωση της αντοχής εφελκυσμού. Αντιθέτως, επεξεργασία θερμοκρασίας 1.600–1.800°C και πάνω από 3.000°C, στο στάδιο

γραφιτοποίησης παράγονται "ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας" (High Module Carbon Fibers) που έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400GPa και διάμετρο 10 μ m.



Σχήμα 2.5: Επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας κατεργασίας στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας ινών άνθρακα από PAN [Πηγή: Πρόβλεψη της εναπομένουσας αντοχής πολύστρωτων ινώδων σύνθετων υλικών μετά από κρούση και βελτίωση της κρουστικής συμπεριφοράς τους με την εισαγωγή ενισχυτικών πλαστικών στρώσεων, Σταυρόπουλος]

Τα ανθρακονήματα παρουσιάζουν ξεχωριστά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στις ιδιότητες και στο κόστος τους ανάλογα με το πολυμερές που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους. Οι ίνες με βάση το PAN έχουν χαμηλότερο κόστος και βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες.

Ίνες άνθρακα μπορούν να παρασκευαστούν από πίσσα διαφόρων μορφών, όπως πετρελαϊκή άσφαλτο, λιθανθρακόπισσα ή υπολείμματα PVC. Συγκρίνοντας τη μέθοδο παραγωγής ινών άνθρακα από PAN σε σχέση με εκείνη από πίσσα, η τελευταία είναι φθηνότερη αλλά οι ίνες παρουσιάζουν φτωχότερες μηχανικές ιδιότητες.

Η κυτταρίνη (Rayon) είναι ένα φυσικό πολυμερές το οποίο συχνά συναντάται σε μορφή ινών. Οι βαμβακερές ίνες (κυτταρίνης) ήταν οι πρώτες που ενανθρακώθηκαν. Ο τρόπος αυτός παραγωγής ανθρακονημάτων στις μέρες μας δε χρησιμοποιείται γιατί έχει χαμηλή απόδοση παραγωγής (20-30% σε σχέση με το PAN που είναι 55%).

2.2.2 Μορφές ινών άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα είναι διαθέσιμες σε δύο μορφές, συνεχείς ή ασυνεχείς [5]. Οι ασυνεχείς ίνες μπορεί να είναι τεμαχισμένες (milled) ή ψιλοκομμένες (chopped). Οι πιο διαδεδομένες συνεχείς ίνες του εμπορίου είναι οι θύσανοι νημάτων και τα πλεγμένα στρώματα και υφάσματα (woven fabric). Μορφές ινών άνθρακα παρουσιάζονται και στο σχήμα 2.6. Στα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών, λαμβάνονται οι εξαιρετικά λεπτές ίνες (filaments), ομαδοποιούνται και σχηματίζουν με περιστροφή (yarn) ή χωρίς περιστροφή (tow) ενισχυτικά νήματα ή πλεξίδες. Τα νήματα αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υφασμάτων με διαφορετικές πλέξεις. Τα υφάσματα από ανθρακόνημα είναι συνήθως πολυαξονικά, δηλαδή αποτελούνται από μονοδιευθυντικά υφάσματα με διαφορετικές κατευθύνσεις ραμμένα μεταξύ τους. Συνήθως, χρησιμοποιούνται απ' ευθείας προεμπτισμένα υφάσματα σε εφαρμογές, τα οποία αποτελούνται από το υλικό της ενίσχυσης με μία ελαφρώς ψημένη μήτρα ρητίνης.



Σχήμα 2.6: Μορφές ανθρακονημάτων [Πηγή: <http://www.carbonfiber.gr.jp>]

Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από έναν κυλινδρικό οδηγό. Το μέγεθος της ίνας άνθρακα μετριέται σε χιλιάδες από κλωστές K. Τα K όταν υπάρχουν δίπλα σε κάθε περιγραφή δέσμης ανθρακονημάτων δείχνουν τον αριθμό των νημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν. 1K σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκαν 1.000 ίνες/δέσμη (filaments per tow), 3K 3.000 κλωστές, 6K 6.000 κλωστές. Επίσης τα 6K είναι δύο φορές πιο βαριά από τα 3K.

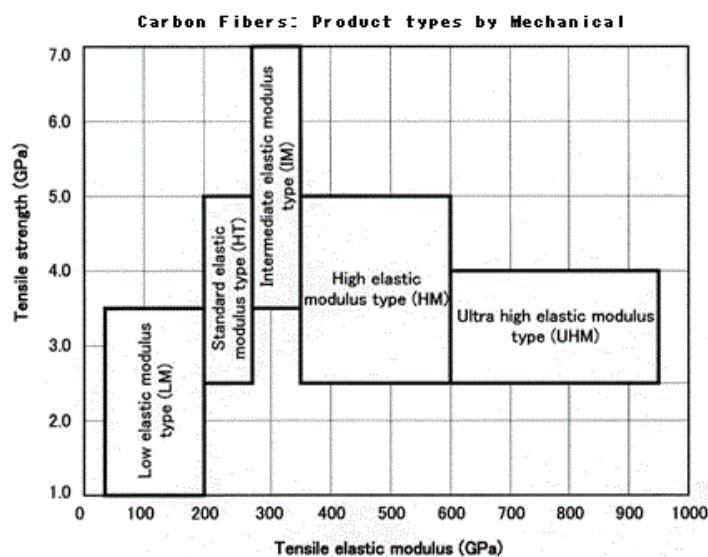
2.2.3 Ιδιότητες ανθρακονημάτων

Τα πλεονεκτήματα των ανθρακονημάτων σε γενικές γραμμές είναι, η χαμηλή τους πυκνότητα, η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής, η

υψηλή θερμική αγωγιμότητα και η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση. Επίσης, πρέπει να τονίσουμε την πολύ καλή χημική σταθερότητα, ακόμα και σε ισχυρά οξέα και άλλα.

Όσον αφορά τα αρνητικά στοιχεία των ινών άνθρακα, αυτά αφορούν την ανισοτροπία που παρουσιάζουν, τη μικρή παραμόρφωση μέχρι τη θραύση, τη μικρή αντοχή τους σε θλίψη συγκριτικά με τον εφελκυσμό. Η κατηγοριοποίησή τους ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7 και έχει ως εξής [5]:

- Πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας ($E > 600\text{GPa}$) ή Ultra High Modulus (UHM)
- Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (E μεταξύ $350\text{-}600\text{GPa}$) ή High Modulus (HM)
- Μεσαίου μέτρου ελαστικότητας (E μεταξύ $200\text{-}350\text{GPa}$) ή Intermediate Modulus (IM)
- Κανονικού μέτρου ελαστικότητας (E μεταξύ $200\text{-}280\text{GPa}$) ή Standard Modulus (HT)
- Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό ($E < 200\text{GPa}$) ή Low elastic Modulus (LM)



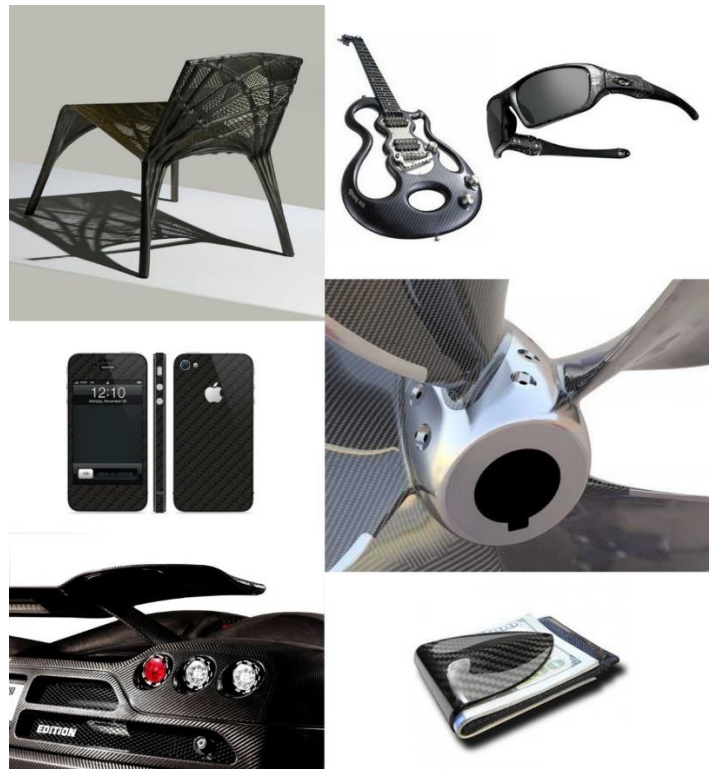
Σχήμα 2.7: Ταξινόμηση ανθρακονημάτων με βάση τις μηχανικές τους ιδιότητες [Πηγή: <http://www.carbonfiber.gr.jp>]

2.2.4 Εφαρμογές ανθρακονημάτων

Η εξέλιξη της τεχνολογίας συμβάλλει στην αξιοποίηση και στην εφαρμογή των σύνθετων υλικών με ταυτόχρονη αντικατάσταση των κοινών υλικών. Τα σύνθετα υλικά και κυρίως το ανθρακόνημα βρίσκουν εφαρμογές στην καθημερινότητά μας σε πολύ μεγάλο βαθμό

[2].Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες εφαρμογές, κάποιες από αυτές απεικονίζονται και στο σχήμα 2.8:

1. Στον τομέα υψηλής τεχνολογίας: αεροδιαστημική και πυρηνική μηχανική, κυρίως για το πλεονέκτημα της χαμηλής θερμικής διαστολής των υλικών αυτών και για τη σταθερότητά τους σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές.
2. Στην αυτοκινητοβιομηχανία και κυρίως στα αγωνιστικά αυτοκίνητα λόγω του αζεπέραστου λόγου αντοχής προς βάρος του υλικού. Μάλιστα οι κατασκευαστές των αγωνιστικών έχουν αναπτύξει μεθόδους για να δώσουν στα εξαρτήματα από ανθρακονήματα αντοχή σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση, κάνοντάς τα ανθεκτικά σε αυτή τη διεύθυνση αλλά αδύναμα σε διευθύνσεις όπου ασκείται στο τεμάχιο μικρό ή καθόλου φορτίο.
3. Στον τομέα γενικής μηχανικής και μεταφοράς: μηχανικά μέρη όπως ρουλεμάν, γρανάζια, άξονες, πτερύγια, ανεμιστήρες.
4. Σε αθλητικά είδη όπως στα αγωνιστικά ποδήλατα (σκελετοί, πιρούνια, τροχοί, αναπτύξεις, τιμόνια, λαιμοί τιμονιού, σέλες και άλλα).
5. Σε ιατρικά βοηθήματα όπως επιθέματα ή στηρίγματα για το ανθρώπινο σώμα. Παροχή στήριξης σε κάποιες ασθένειες νευρολογικής φύσης, προσθετικά μέλη, ορθοπεδικά εμφυτεύματα, τμήματα αξονικών τομογράφων και άλλα.
6. Στη ναυπηγική τα ανθρακονήματα έχουν αντικαταστήσει πλήρως τα κοινά υλικά και χρησιμοποιούνται προκειμένου εμπορικά πλοία και σκάφη να είναι ελαφρύτερα και να κινούνται με υψηλότερες ταχύτητες.
7. Σε διάφορα καταναλωτικά προϊόντα (για λόγους κατασκευαστικούς αλλά και διακοσμητικούς) εσωτερική διακόσμηση αυτοκινήτων, πλοίων, αεροπλάνων, σε μουσικά όργανα, αθλητικά παπούτσια και πολλές άλλες εφαρμογές.



Σχήμα 2.8: Εφαρμογές ανθρακονημάτων

2.3 Μήτρες σύνθετων υλικών

Στα σύνθετα υλικά ο ρόλος της μήτρας είναι καθοριστικός γιατί επιτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες. Τα μηχανικά φορτία που δέχεται το σύνθετο υλικό μεταφέρονται μέσω του υλικού της μήτρας στο ενισχυτικό υλικό. Συγκεκριμένα, προστατεύει την επιφάνεια ενίσχυσης από το περιβάλλον και άλλους παράγοντες, όπως η υγρασία, η θερμότητα, αποτρέποντας ενδεχόμενη χημική προσβολή. Ακόμα και οι πιο ανθεκτικές ίνες δεν θα λειτουργήσουν ικανοποιητικά εάν το υλικό της μήτρας δεν επιλεγεί σωστά. Η μήτρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα και σχετική ευκαμψία, ενώ το σημείο τήξης της πρέπει να είναι υψηλότερο της μέγιστης θερμοκρασίας του σύνθετου υλικού.

Οι μήτρες για σύνθετα υλικά διακρίνονται σε οργανικές (πολυμερικές), μεταλλικές και κεραμικές. Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τις οργανικές μήτρες και κυρίως την εποξική ρητίνη, καθώς αυτή χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

Θερμοπλαστικές

Τα θερμοπλαστικά υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης, κυρίως εξαιτίας του χαμηλού κόστους και της εύκολης επεξεργασίας τους. Με θέρμανση, ένα θερμοπλαστικό υλικό μπορεί να μετατραπεί από δύσκαμπτο σε ρευστό και στη συνέχεια μπορεί να μετατραπεί ξανά σε άμορφο στερεό ανάλογα με τις συνθήκες μορφοποίησης και θερμοκρασίας.

Θερμοσκληρυνόμενες

Οι εποξικές ρητίνες αποτελούν ουσιαστικά τη χημική ένωση-αντίδραση δύο επιμέρους στοιχείων, της ρητίνης και του σκληρυντή. Η διαδικασία της θερμοσκληρύνσεως είναι μη αντιστρέψιμη. Ο ρόλος του σκληρυντή (ή καταλύτη) είναι ουσιαστικά να πολυμερίσει τα μονομερή στελέχη της ρητίνης και η διαδικασία αυτή ονομάζεται θεραπεία (curing). Είναι μια διαδικασία η οποία μπορεί να ρυθμισθεί βάσει θερμοκρασίας και φυσικά επιλογής του σκληρυντή. Τόσο η θερμοκρασία, όσο και η ποσότητα του σκληρυντή επηρεάζουν τη ρητίνη. Θεωρητικά, όσο περισσότερο διαρκεί η θεραπεία, η ρητίνη αποκτά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες σύνθετων υλικών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές, οι φαινολικές και οι βινυλεστερικές. Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινώδη σύνθετα υλικά λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν.

2.4 Παράμετροι που επιδρούν στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού

Για τη μορφοποίηση και το σχεδιασμό ενός σύνθετου υλικού είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη και παράμετροι όπως: η διάμετρος, το μήκος, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο υλικό και η καλή συνάφεια ινών-μήτρας. Όλες αυτές οι ιδιότητες σε συνδυασμό προσδιορίζουν και τις τελικές ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού [1].

Γεωμετρία ινών

Μία από τις βασικές παραμέτρους είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας (s) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους (l) προς την ακτίνα (r) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως συνεχών ή ασυνεχών. Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους.

Στις ασυνεχείς ίνες υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος l_c , για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), που ορίζεται από τη σχέση:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i}$$

Όπου σ_f η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και τ_i η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους l_c , η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή, ενώ, αν είναι μεγαλύτερο ($>15 l_c$), η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

Ποσοστό ινών

Εξίσου σημαντική παράμετρος στην αντοχή και στη στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αποτελεί η αναλογία των ινών, δηλαδή το ποσοστό του όγκου των ινών σε σχέση με τον όγκο του σύνθετου υλικού. Το ποσοστό ινών εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδο μορφοποίησης που χρησιμοποιείται για το συνδυασμό της ρητίνης και των ινών. Επίσης εξαρτάται και από τον τύπο της ρητίνης και τη μορφή με την οποία ενσωματώνονται οι ίνες στη μήτρα. Εφόσον οι μηχανικές ιδιότητες των ινών είναι καλύτερες από αυτές των ρητινών, μεγαλύτερο ποσοστό ινών θα εξασφαλίσει βέλτιστες ιδιότητες για το σύνθετο υλικό. Στην πραγματικότητα από τα πιο υψηλά ποσοστά ινών είναι περίπου το 70%, εξαιτίας όμως των παραμέτρων κατασκευής, κυμαίνεται στο 50%-70%. Μικρό ποσοστό των ινών μπορεί να περιορίσει τις ιδιότητες του σύνθετου, ενώ υψηλό ποσοστό ($>80\%$) μπορεί να επιφέρει προβλήματα στην κατασκευή του, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

Προσανατολισμός των ινών

Γενικά η μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων είναι αρκετά διαφορετική από αυτή των συμβατικών ιστροπικών υλικών. Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν κυρίως ανισοτροπική συμπεριφορά, δηλαδή εμφανίζουν ιδιότητες που σε κάθε σημείο τους είναι διαφορετικές προς όλες τις διευθύνσεις. Τις περισσότερες φορές εμφανίζουν μόνο ορθοτροπικότητα, δηλαδή οι ιδιότητές τους είναι διαφορετικές στις τρεις διευθύνσεις του καρτεσιανού συστήματος, έχουν όμως τρία επίπεδα συμμετρίας, που ορίζονται από το καρτεσιανό σύστημα.

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής φορτίου. Για την επίτευξη

όσο το δυνατόν πιο ιστροπικής συμπεριφοράς του σύνθετου, χρησιμοποιούνται ίνες διαφόρων προσανατολισμών. Όταν ένα σύνθετο υλικό αποτελείται από μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας, E) και η βέλτιστη αντοχή, επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.

Συνάφεια ινών-μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες και τη λειτουργία του συνθέτου. Η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Ο δεσμός της διεπιφάνειας ελέγχει τον τρόπο που διαδίδεται η ρωγμή στις ίνες. Όταν ο δεσμός αυτός είναι ισχυρός, η ρωγμή δεν διαδίδεται κατά μήκος των ινών και η ενίσχυση παραμένει λειτουργική ακόμα και μετά την διάσπαση των ινών σε πολλαπλά σημεία. Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull-out) των ινών από τη μήτρα, που φυσικά η κατάσταση αυτή οδηγεί σε αστοχία.

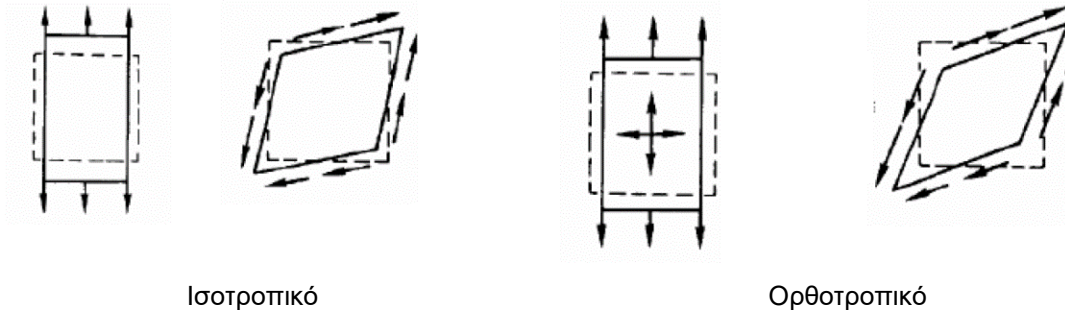
2.5 Μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά σύνθετου υλικού

Για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών γίνονται συνήθως οι παρακάτω παραδοχές:

1. Η ίνα και η μήτρα συμπεριφέρονται σαν ελαστικά υλικά
2. Η διεπιφάνεια ανάμεσα στην ίνα και στη μήτρα είναι απειροστικά λεπτή
3. Οι ίνες είναι διανεμημένες ομοιόμορφα στο υλικό της μήτρας
4. Υπάρχει τέλεια συμβατότητα στις παραμορφώσεις ινών και μήτρας

Οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των ινών και της μήτρας. Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young $\{E\}$, ο λόγος Poisson $\{\nu\}$ και το μέτρο διάτμησης $\{G\}$ αποτελούν βασικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών και καθορίζουν τη συμπεριφορά τους ανάλογα με τις φορτίσεις που δέχονται. Τα σύνθετα πολύστρωτα είναι συχνά **ορθοτροπικά**, δηλαδή έχουν 3 επίπεδα συμμετρίας στα οποία οι ιδιότητες εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Μία εφαρμοζόμενη τάση προκαλεί διαφορετική παραμόρφωση στη διεύθυνση εφαρμογής της και στην κάθετη σ' αυτήν διεύθυνση. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε τη διαφορετική συμπεριφορά ενός ιστροπικού και ενός ορθοτροπικού υλικού σε ορθή τάση και διάτμηση στο σχήμα 2.9. Για το χαρακτηρισμό των

ορθοτροπικών υλικών απαιτούνται 9 μεγέθη, 3 για κάθε διεύθυνση. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συμπεριφορά ενός ισοτροπικού και ενός ορθοτροπικού υλικού σε ορθή τάση και διάτμηση [2].



Σχήμα 2.9: Συμπεριφορά ενός ισοτροπικού και ενός ορθοτροπικού υλικού σε ορθή τάση και διάτμηση [Πηγή: Analysis and Performance of Fibre composites, B.D. Agarwal]

2.5.1 Ελαστική συμπεριφορά ινώδων σύνθετων υλικών

Οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά είναι γραμμικές και ακολουθούν το νόμο του Hooke, ο οποίος ορίζει την σχέση τάσης (σ) και παραμόρφωσης (ε) ως εξής:

$$\text{Για την ίνα} \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (2.1)$$

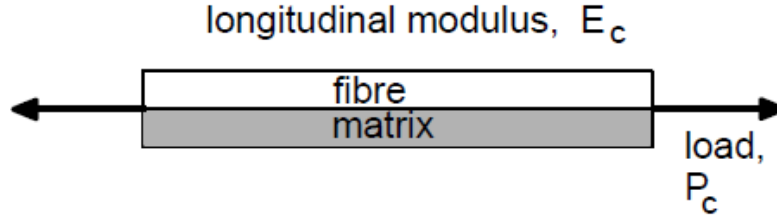
$$\text{Για τη μήτρα} \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (2.2)$$

Εάν το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας, τότε η τάση στην ίνα θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση στην μήτρα. Για φόρτιση παράλληλα στη διεύθυνση των ινών υποθέτουμε ότι ο δεσμός μεταξύ ίνας και μήτρας είναι τέλειος, οπότε ισχύει η σχέση:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1$$

Το συνολικό φορτίο P_c που φέρει το σύνθετο είναι το άθροισμα των φορτίων που φέρουν οι ίνες και η μήτρα και απεικονίζεται στο σχήμα 2.10:

$$P_f = \sigma_f A_f \quad \text{και} \quad P_m = \sigma_m A_m \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.10: Μοντέλο σύνθετου υλικού σε διαμήκη συμπεριφορά [Πηγή: Simulation of Loading the Polymer/Carbon Fiber Composites and Prediction of Safety Factors, Branislav Duleba]

$$P_c = P_f A_f + P_m A_m = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m = \sigma_1 A \quad (2.4)$$

Όπου A_f, A_m είναι οι διατομές ίνας και μήτρας αντίστοιχα και P_f, P_m τα αντίστοιχα φορτία. Εισάγοντας τα μέτρα ελαστικότητας της μήτρας και της ίνας:

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_1 \quad (2.5)$$

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad (2.6)$$

Θεωρούμε τα ποσοστά όγκου V_f και V_m , αντίστοιχα για την ίνα και τη μήτρα και ότι ισχύει $V_f + V_m = 1$

Το μέτρο ελαστικότητας για το σύνθετο υλικό στη διεύθυνση 1 δίνεται από τη σχέση:

$$E_1 = E_f \left(\frac{A_f}{A} \right) + E_m \left(\frac{A_m}{A} \right) = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.7)$$

Η τελευταία σχέση είναι γνωστή ως **κανόνας των μιγμάτων**.

Η τάση δρα εγκάρσια στη διατομή και φέρεται εξίσου από τις ίνες και τη μήτρα:

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma_2 \quad \varepsilon_f \neq \varepsilon_m \neq \varepsilon_1 \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (2.9)$$

Η συνολική παραμόρφωση είναι ίση με το μέσο όρο των παραμορφώσεων της μήτρας και της ίνας ζυγισμένες με τα κλάσματα όγκου τους:

$$\varepsilon_2 = V_m \varepsilon_m + V_f \varepsilon_f = \frac{\sigma_2 V_f}{E_f} + \frac{\sigma_2 V_m}{E_m} \quad (2.10)$$

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 = E_2 \left[\frac{\sigma_2 V_f}{E_f} + \frac{\sigma_2 V_m}{E_m} \right] \quad (2.11)$$

Άρα

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (2.12)$$

Ο προσδιορισμός του λόγου Poisson και της διαμητικής τάσης δίνεται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (2.13)$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (2.14)$$

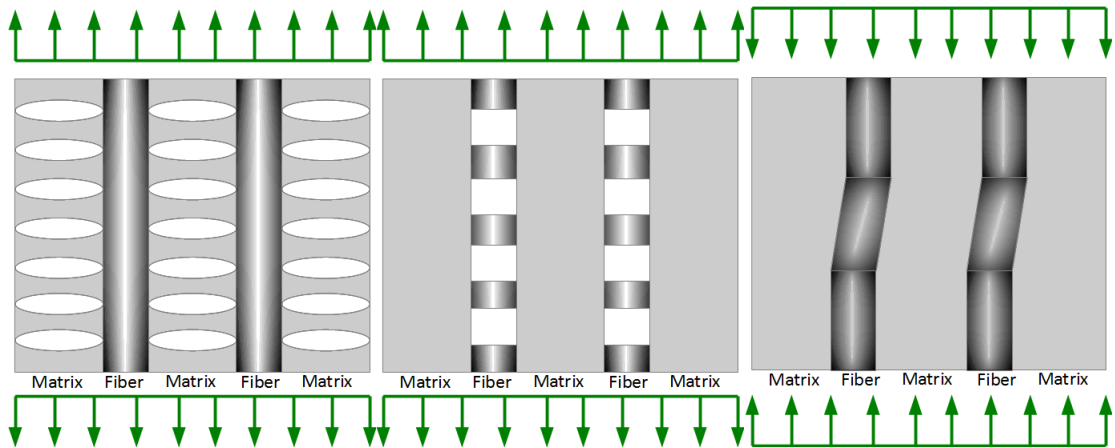
Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μόνο γραμμική ελαστική συμπεριφορά, γι' αυτό σε κατάσταση φόρτισης οι παραμορφώσεις αυξάνονται ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση με σταθερό ρυθμό, μέχρι τη θραύση. Συνεπώς, τα σύνθετα υλικά εντάσσονται στην κατηγορία των ψαθυρών [2].

2.6 Αστοχία υλικού

Στα σύνθετα υλικά σε αντίθεση με τα μέταλλα ο μακροσκοπικός ορισμός της αστοχίας δεν είναι διακριτός. Εμφανίζουν πολλές διαφορετικές τοπικές αστοχίες πριν από το διαχωρισμό τους σε διαφορετικά κομμάτια. Ως 'βλάβη' ονομάζονται οι τοπικές αστοχίες ενώ ως 'συσσώρευση βλάβης' η ανάπτυξη των τοπικών αστοχιών με το πέρασμα του χρόνου ή την αύξηση του φορτίου. Τέτοιοι μηχανισμοί εμφανίζονται στο σχήμα 2.11. Συγκεκριμένα, οι μηχανισμοί αστοχίας στα ινώδη σύνθετα υλικά είναι:

- Η αστοχία της ρητίνης υπό εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία
- Η αστοχία των ινών από εφελκυστικά (θραύση) και θλιπτικά φορτία (λυγισμός)
- Η διάτμηση μεταξύ ίνας και ρητίνης.
- Σε περίπτωση πολλαπλών στρώσεων υλικού η αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων είναι η πιο συχνά παρατηρούμενη αστοχία.

Αν και τα ανθρακονήματα από μόνα τους δεν είναι ευάλωτα στην UV ακτινοβολία, οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται σε αυτά ίσως να είναι. Οπότε για την προστασία από τις ακτίνες του ηλίου των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται από ανθρακονήματα καλό είναι να χρησιμοποιούνται ρητίνες ανθεκτικές σε αυτές και συχνά βάζονται οι επιφάνειες με προστατευτικό στη UV ακτινοβολία βερνίκι.



Σχήμα 2.11: Αστοχία μήτρας, αστοχία ίνας, λυγισμός (fiber kinking) [Πηγή: Analysis of composite chassis, Niklas Danielsson]

2.7 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών ενισχυμένα με ίνες

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μορφοποίησης των ανθρακονημάτων στην επιθυμητή γεωμετρία. Ανάλογα με το σχήμα, την αντοχή, το μέγεθος και τις ανάγκες κάθε κατασκευής χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι μορφοποίησης. Οι κύριες τεχνικές μορφοποίησης είναι οι εξής [1]:

Ασυνεχής μορφοποίηση ανθρακονημάτων:

- Επίστρωση με το χέρι (Hand Lay-Up)
- Επίστρωση με ψεκασμό ινών (Spray-Up Technique)
- Τεχνικές επίστρωσης με καλούπια (Molding Techniques)
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (Pressure Bag ή Vacuum bag)
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (Matched Die-Moulding)
- Χύτευση με Μεταφορά Ρητίνης (Resin Transfer Moulding)

Συνεχής μορφοποίηση ανθρακονημάτων:

- Περιέλιξη Νημάτων (Filament Winding)
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (Pultrusion)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)

Κυλινδρικές κατασκευές και σωλήνες από σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε ποικίλες εφαρμογές στη βιομηχανία. Έρευνες που αφορούν κυλίνδρους και σωλήνες από σύνθετα υλικά στοχεύουν στην αξιοποίηση διαφορετικών ενισχυτικών συστατικών σε

ποικίλα σχήματα, βελτιστοποίηση των μεθόδων κατασκευής τους και στην προσομοίωση κατασκευών με εφαρμογή διαφόρων υλικών για βέλτιστη λειτουργία αυτής.

Στην παρούσα διπλωματική οι σωλήνες κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T Composites με τη μέθοδο περιέλιξης ίνας (filament wound method), εκτενέστερη περιγραφή της οποίας βρίσκεται παρακάτω.

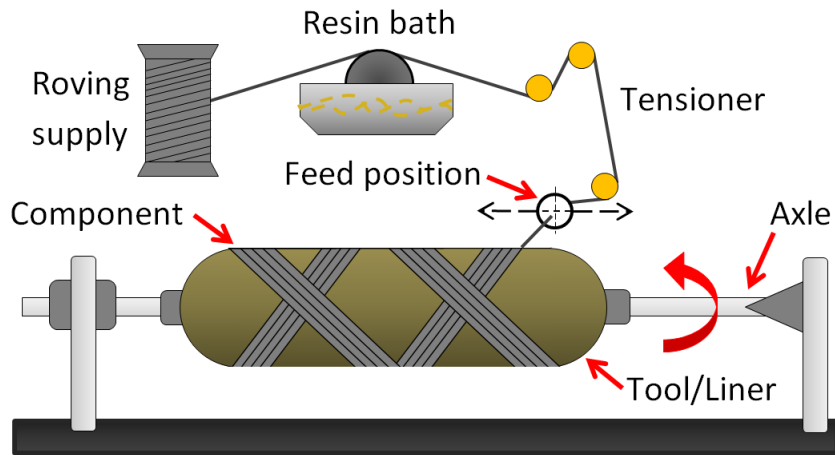
2.7.1 Περιέλιξη ίνας (Filament winding)

Συγκεκριμένα η μέθοδος περιέλιξης των ινών εισήχθη για πρώτη φορά το 1947 από τον M. W. Kellog για την παραγωγή ποικίλων εξαρτημάτων με σφαιρικό, κωνικό και γεωειδές σχήμα. Είναι μια κατεργασία όπου τεντωμένες, προσανατολισμένες ίνες και συγκεκριμένη ποσότητα ρητίνης, περιτυλίσσονται γύρω από ένα περιστρεφόμενο άξονα-καλούπι έτσι ώστε να παραχθούν σύνθετα γεωμετρικά στοιχεία, συνήθως κυλινδρικές γεωμετρίες. Μετά την εναπόθεση του κατάλληλου αριθμού στρώσεων, ο πολυμερισμός διεξάγεται είτε σε φούρνο είτε στη θερμοκρασία δωματίου και τέλος απομακρύνεται ο κύλινδρος περιέλιξης. Η χρήση μίας τέτοιας κατεργασίας φαίνεται στο σχήμα 2.12.

Ο ισχυρός προσανατολισμός των ινών δίνει κελύφη με υψηλή μηχανική αντοχή. Με αυτή την τεχνική κατασκευάζονται σύνθετα πολύστρωτα υλικά με το επιθυμητό πάχος, περιεκτικότητα ρητίνης και γωνία πλέξης σε κάθε στρώση (layer).

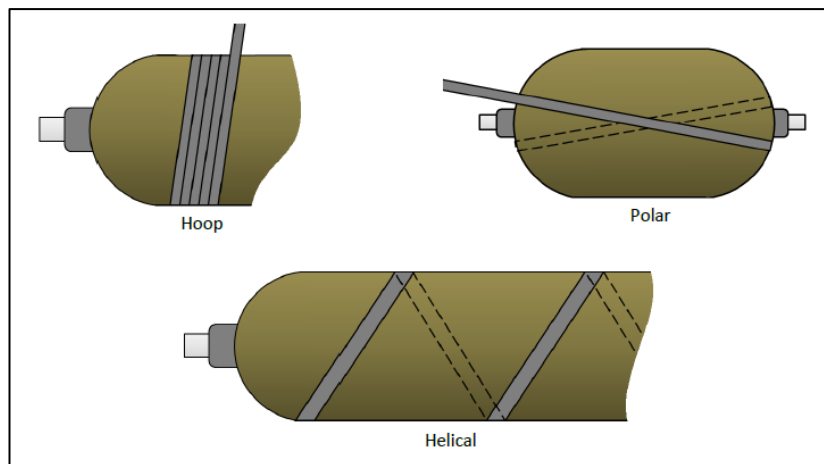
Ως προς τη διαδικασία περιέλιξης των ινών διακρίνονται δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν οι ίνες περνούν μέσα από το λουτρό ρητίνης πριν την περιέλιξη στο τύμπανο, έτσι έχουμε περιέλιξη υγρού τύπου (wet winding) εάν οι ίνες διαβρέχονται από ρητίνη πριν τυλιχτούν στο τύμπανο και ξηρού τύπου εάν χρησιμοποιούνται προ-εμβαπτισμένες ίνες σε ρητίνη (dry winding). Σε αυτή την περίπτωση μειώνεται η πιθανότητα βλάβης της ίνας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και μπορεί να υπολογιστεί με περισσότερη ακρίβεια η περιεκτικότητα ρητίνης του πολύστρωτου.

Οι περισσότερες μηχανές περιέλιξης μοιάζουν με τόρνο. Οι παράμετροι της κατεργασίας ελέγχονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή με αποτέλεσμα να υπάρχουν πάρα πολλές επιλογές όσον αφορά την τάση, τον προσανατολισμό της ίνας κτλ. Το τύμπανο περιστρέφεται με περιφερειακή ταχύτητα που κυμαίνεται γύρω στις 90-110 m/min. Προτιμάται συνήθως μικρή ταχύτητα περιστροφής για ακριβέστερα αποτελέσματα. Το σύστημα ρύθμισης τάσης έχει μεγάλη σημασία για τη σωστή διεξαγωγή της κατεργασίας, ιδιαίτερα σε μεγάλες γωνίες τυλίγματος. Εφόσον από το σύστημα καθορίζεται η τριβή μεταξύ των ινών και του άξονα, θα πρέπει η τάση να διατηρείται σε ορισμένη τιμή καθ' όλη τη λειτουργία της περιέλιξης [6].



Σχήμα 2.12: Περιέλιξη ίνας (Filament winding) [Πηγή: Life cycle cost analysis for filament winding of composite structures, Francisco Muro]

Η γωνία πλέξης (θ) και τα μοτίβα τυλίγματος των νημάτων είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες των κατασκευών που παράγονται με αυτή τη μέθοδο. Διάφορα μοτίβα περιέλιξης είναι δυνατά (π.χ. **ελικοειδή**, **περιφερειακά** και **πολικά**) ώστε να δώσουν τα επιθυμητά μηχανικά χαρακτηριστικά. Τέτοια μοτίβα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.13.

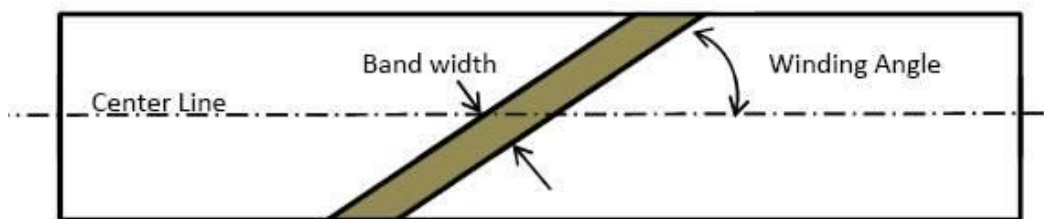


Σχήμα 2.13: Μοτίβα περιέλιξης [Πηγή: Life cycle cost analysis for filament winding of composite structures, Francisco Muro]

Για την εξισορρόπηση των δυνάμεων υιοθετούνται συνήθως γωνίες $\pm \theta$. Οι βέλτιστες γωνίες τυλίγματος εξαρτώνται από την εκάστη περίπτωση φόρτισης. Οι σωλήνες σπάνια κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου από ίνες 0° ή από ίνες 90° καθώς θα μπορούσαν να αποκολληθούν εύκολα. Η συμβολή της αντοχής των ινών στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού

είναι μέγιστη μόνο όταν είναι παράλληλες προς την κατεύθυνση φόρτισης. Η αντοχή και η ακαμψία μειώνονται όταν οι ίνες δεν είναι παράλληλες προς την κατεύθυνση φόρτισης [7].

Ενδεικτικά, γωνία τυλίγματος 0° (axial) κάνει τους σωλήνες πολύ ανθεκτικούς σε διαμήκη κάμψη και αξονική τάση. Με εφαρμογή γωνίας 90° (hoop) οι σωλήνες αντιστέκονται περισσότερο στο λυγισμό και είναι πιο στιβαροί. Οι γωνίες $\pm 45^\circ$ είναι ιδανικές για αντίσταση στη στρέψη. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14 ελικοειδής προσανατολισμός γωνίας πλέξης.



Σχήμα 2.14: Ελικοειδής γωνία πλέξης [Πηγή: Life cycle cost analysis for filament winding of composite structures, Francisco Muro]

Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι η γωνία πλέξης (θ) και η ακολουθία στρώσεων (stacking sequence) επηρεάζουν άμεσα τη συνολική μηχανική συμπεριφορά, τις περιπτώσεις βλάβης και έχουν εξαιρετική σημασία για το σχεδιασμό και την κατασκευή κάθε σύνθετου υλικού. Ενδεικτικά, έχει αποδειχθεί ότι πολύστρωτα σύνθετα υλικά με εξωτερική στρώση 90° ανθίστανται υψηλότερα φορτία μέχρι να προκληθεί τελικά αστοχία.

Τα τελευταία χρόνια υπήρξε σημαντική πρόοδος (όσο και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές εξελίσσονταν) όσον αφορά τα προγράμματα προσομοίωσης περιέλιξης. Κάποια από αυτά είναι το ESAcomp, το CadWindTM, το FiberGraphixTM και το CadPathTM [8]. Πέρα από την προσομοίωση των διαδρομών περιέλιξης στον άξονα και τον προσδιορισμό της απαραίτητης κίνησης της μονάδας, πολλά από τα προγράμματα αυτά περιλαμβάνουν συστήματα υπολογισμού και προσομοίωσης γωνίας τυλίγματος. Επιπρόσθετα, τα λογισμικά που κυκλοφορούν στην αγορά στις μέρες μας περικλείουν και υπολογισμό πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και κάποια βελτιστοποίηση μεθόδου παραγωγής (production process optimisers).

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός σωλήνα και συνδέσμων

Το συναρμολόγημα που αναλύεται στην παρούσα εργασία αποτελείται από ένα σωλήνα ανθρακονημάτων, στα άκρα του οποίου συγκολλούνται δύο σύνδεσμοι. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός των μελών του συναρμολογήματος και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην κατασκευή τους για την επίτευξη της πειραματικής διαδικασίας.

3.1 Περιγραφή συναρμολογήματος

Ο σχεδιασμός του συναρμολογήματος θα γίνει με χρήση του λογισμικού Solidworks της εταιρίας Dassault Systemes SolidWorks Corporation. Αρχικά τέθηκαν οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί σχεδιασμού έτσι ώστε να σχεδιαστούν οι δύο σύνδεσμοι, με τις απαραίτητες διαστάσεις και γεωμετρία. Ο ένας σύνδεσμος που θα αναφέρεται ως σύνδεσμος 1, προσαρμόζεται σε βάση στήριξης η οποία πακτώνεται, ενώ ο δεύτερος σύνδεσμος 2 συγκολλάται στο ελεύθερο άκρο του σωλήνα. Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι 25mm και δέχεται συγκολλητούς συνδέσμους που έχουν με εξωτερική διάμετρο 24.80mm.

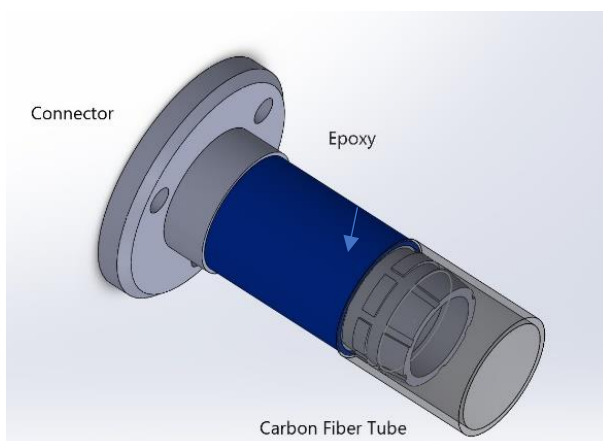
Η σύνδεση του σωλήνα με τους δύο συνδέσμους γίνεται με χρήση εποξικής κόλλας δύο συστατικών, την Plexus-M300. Η κόλλα τοποθετείται σε υγρή μορφή και κατόπιν στερεοποιείται. Για την ανάπτυξη συνδέσεων σύνθετων υλικών με κόλλες υψηλής αντοχής διεξάγεται σήμερα διεξοδική έρευνα, καθώς αυτός ο τρόπος σύνδεσης συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα.

Βασικό πλεονέκτημα του συγκολλητού συνδέσμου είναι η ευκολία συναρμολόγησης καθώς δεν απαιτείται η διάτρηση των συνδεόμενων υλικών και παράλληλα μειώνεται το επιπλέον βάρος από αντίστοιχη κοχλιοσύνδεση. Ως αποτέλεσμα, η σύνδεση μπορεί να παραλάβει είτε στατικά είτε δυναμικά φορτία και τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων μειώνονται [9].

Το κύριο μέρος των συνδέσμων που ενώνεται με το σωλήνα αποφασίστηκε να είναι το ίδιο και για τους δύο συνδέσμους και ορίζεται στα 50.80mm. Για την εξασφάλιση λειτουργικότητας, σχεδιάζονται στο κύριο μέρος τους προεξοχές σε κυκλική διάταξη. Οι προεξοχές επιτρέπουν στους συνδέσμους να συστέλλονται και να διαστέλλονται χωρίς μεγάλη αλλαγή στη διάμετρο του κύριου μέρους τους. Η σύνδεση του συναρμολογήματος απεικονίζεται αναλυτικότερα στο σχήμα 3.1. Επιπλέον, οι προεξοχές αυτές συμβάλλουν στον ομοιόμορφο διαμοιρασμό τάσεων στο εξάρτημα και στην κολλητική επιφάνεια, ώστε να μην εμφανίσει αστοχία και αυξάνουν την αντοχή της διάταξης. Με την προσθήκη

προεξοχών στους συνδέσμους διευκολύνεται και η διαδικασία κόλλησης μεταξύ των συνδέσμων και του σωλήνα καθώς μπορεί να εφαρμοστεί περισσότερο υλικό εποξικής κόλλας. Συγκεκριμένα, το πάχος τους ορίστηκε στα 0.64mm.

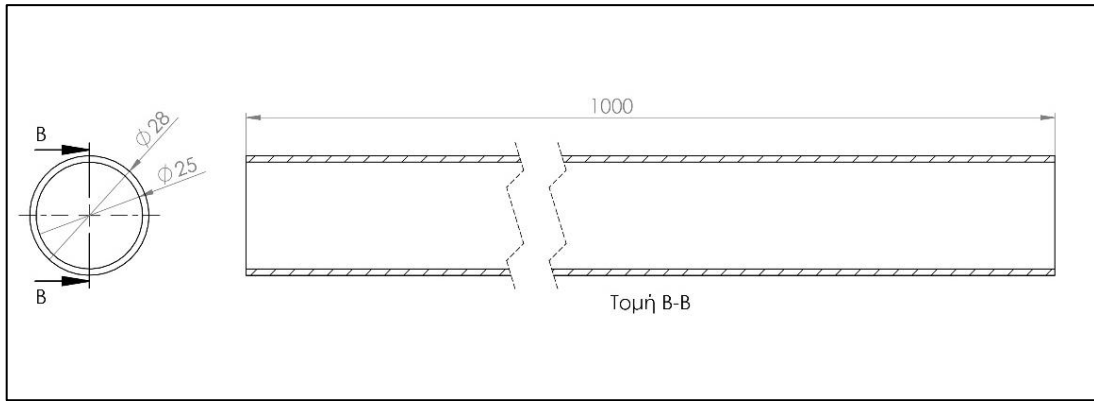
Στην ποιότητα σύνδεσης με εποξική κόλλα, οι επιφάνειες που έρχονται σε επαφή παίζουν καθοριστικό ρόλο. Με κατάλληλη διαχείριση των επιφανειών μπορεί να αυξηθεί η αντοχή της σύνδεσης. Αρχικά, λειαίνεται με το χέρι η επιφάνεια στο εσωτερικό του σωλήνα καθώς και του κύριου μέρους των συνδέσμων χρησιμοποιώντας γυαλόχαρτο, στη συνέχεια οι επιφάνειες καθαρίζονται και εφαρμόζεται εποξική κόλλα.



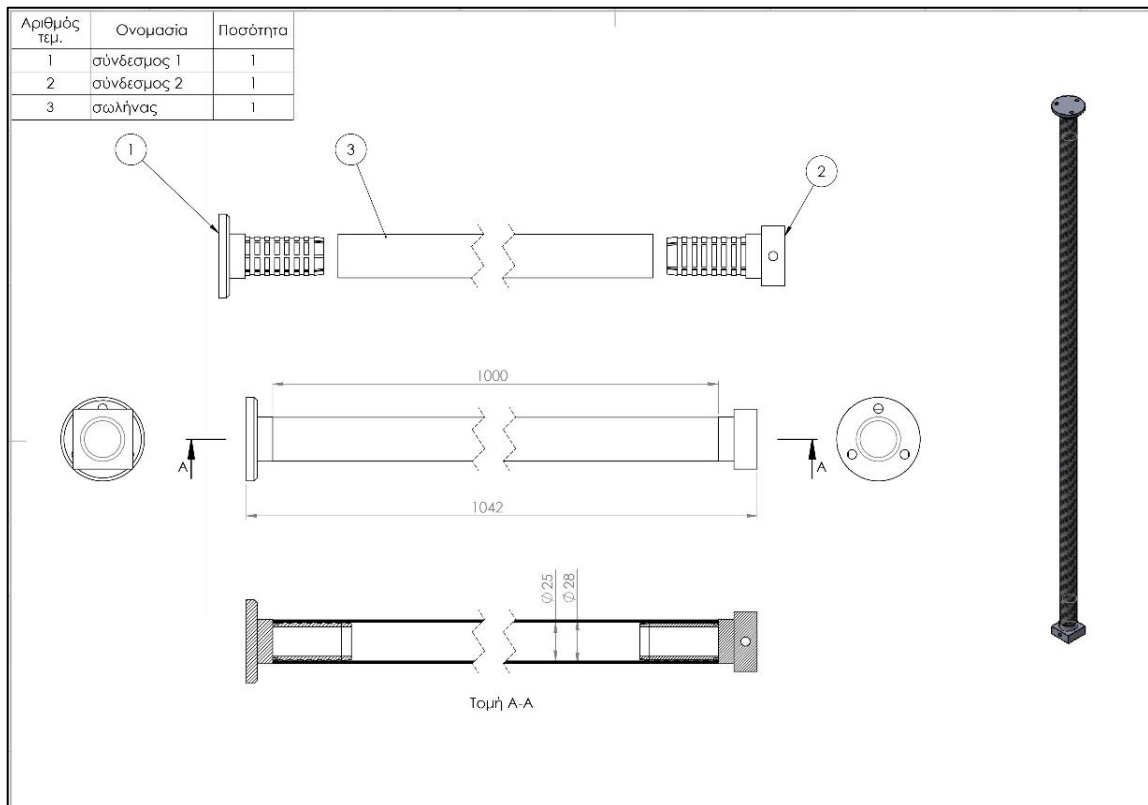
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση σύνδεσης

Στη βάση του συνδέσμου 1 σχεδιάστηκαν 3 οπές με διάμετρο 6mm, έτσι ώστε να μπορεί να πακτωθεί σε κατάλληλη βάση στήριξης, η οποία σχεδιάστηκε απευθείας προεπεξεργαστή ANSA. Αντίστοιχα, ο σύνδεσμος 2 παρουσιάζει στη βάση τετραγωνική δομή με πλευρά 38.57mm και ύψος 15mm με μία διαμπερή οπή, από την οποία θα κρεμαστούν τα βάρη που απαιτεί η πειραματική διαδικασία.

Ο σωλήνας ανθρακονημάτων σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα δοκίμια, δηλαδή το μήκος του ορίστηκε στο 1m. Στα σχήματα 3.2-3.7 παρουσιάζονται οι βασικές διαστάσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων και του σωλήνα.



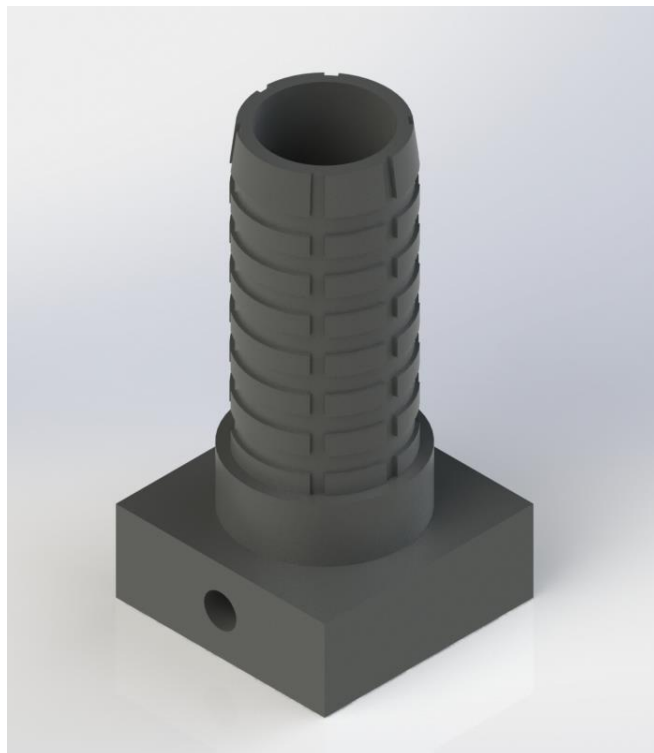
Σχήμα 3.2: Βασικές διαστάσεις σωλήνα ανθρακονημάτων



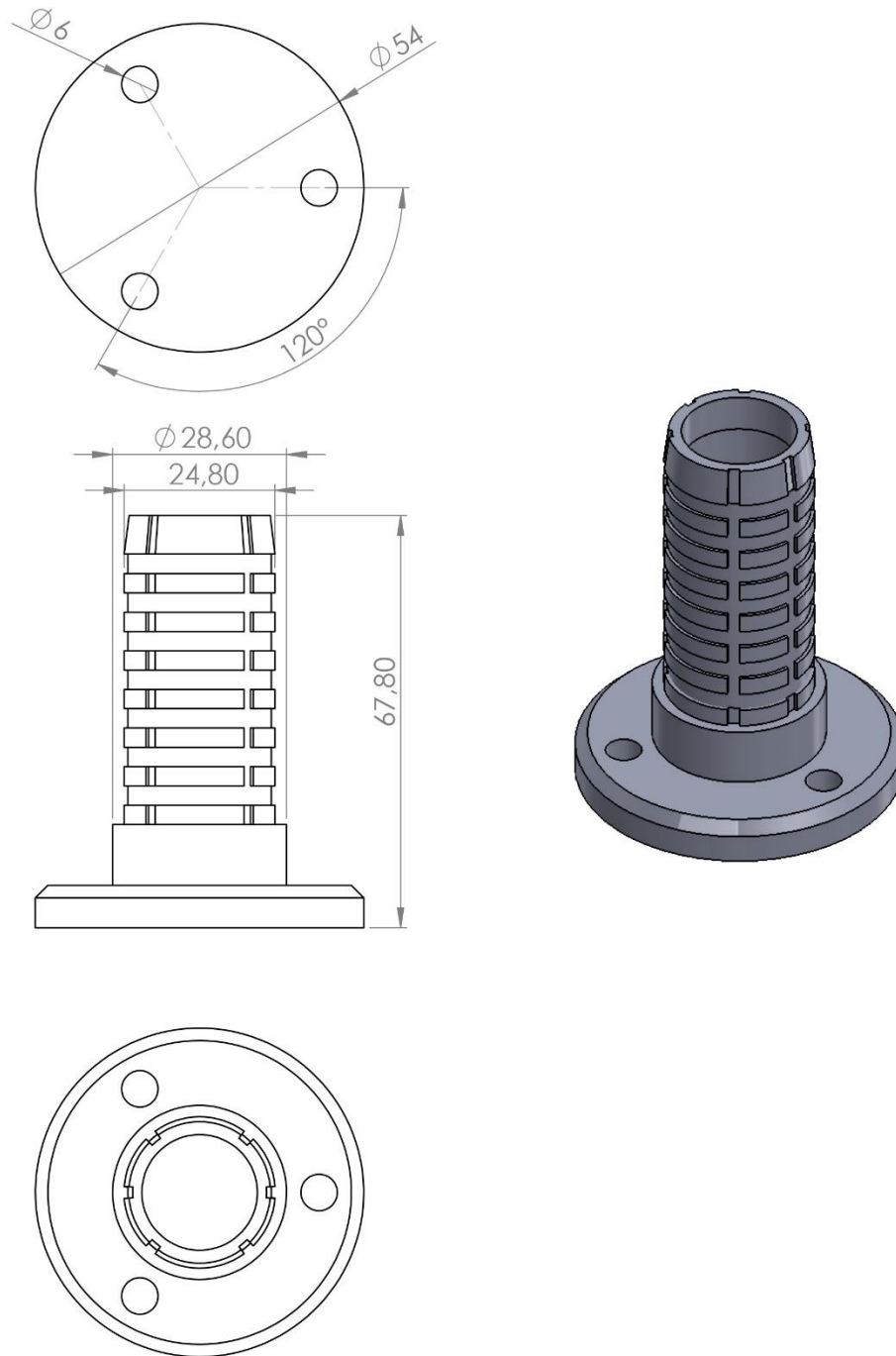
Σχήμα 3.3: Ολοκληρωμένη απεικόνιση του συναρμολογήματος



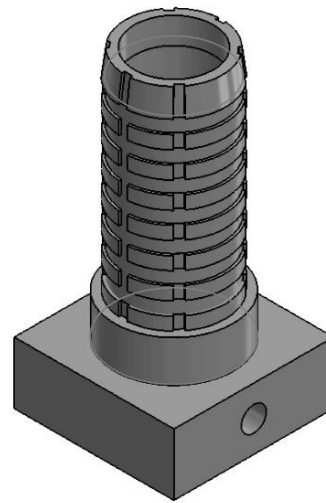
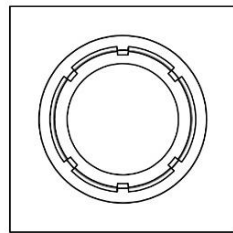
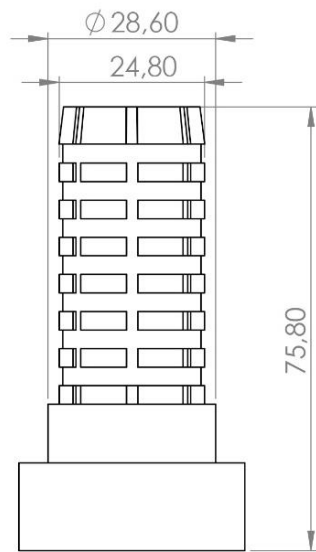
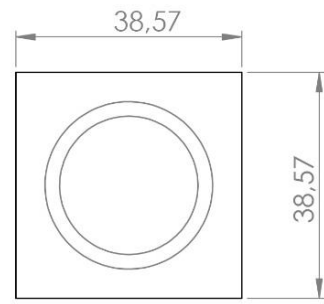
Σχήμα 3.4: Ισομετρική απεικόνιση σύνδεσμου 1



Σχήμα 3.5: Ισομετρική απεικόνιση σύνδεσμου 2



Σχήμα 3.6 : Κατασκευαστικό σχέδιο σύνδεσμου 1 με βασικές διαστάσεις



Σχήμα 3.7 : Κατασκευαστικό σχέδιο σύνδεσμου 2 με βασικές διαστάσεις

3.2 Υλικά συνδέσμων

Για την πειραματική διαδικασία οι σύνδεσμοι αυτοί κατασκευάστηκαν με χρήση τρισδιάστατης (3D) εκτύπωσης από υλικό ενισχυμένο με **ίνες άνθρακα** και από ABS-M30 μέσω του εκτυπωτή που βρίσκεται στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία μέθοδος προσθετικής κατασκευής κατά την οποία τα αντικείμενα κατασκευάζονται μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Επιπλέον, οι σύνδεσμοι κατασκευάστηκαν και από αλουμίνιο μέσω εργαλειομηχανής CNC υψηλής τεχνολογίας σε συνδυασμό με το λογισμικό CAD. Αντίστοιχα, σχηματίστηκαν τρία συναρμολογήματα με σωλήνες ανθρακονημάτων ίδιων διαστάσεων και συνδέσμους από τα τρία υλικά.

ABS-M30

Το ένα υλικό είναι το **ABS-M30**. Το ABS συγκαταλέγεται στα θερμοπλαστικά υλικά και βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς εξαιτίας του χαμηλού του κόστους και των μηχανικών ιδιοτήτων του. Το ABS είναι πλαστικό, ελαφρύ υλικό. Έχει μεγάλες δυνατότητες μορφοποίησης, γι' αυτό χρησιμοποιείται συχνά για κατασκευή πρωτοτύπων παραγωγής. Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζεται ο σύνδεσμος 2 από ABS.

ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑ

Οι σύνδεσμοι εκτυπώθηκαν 3D με υλικό ενισχυμένο με **ίνες άνθρακα**, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης και του σύνθετου υλικού. Το τελικό προϊόν, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8, είναι υψηλής αντοχής και ασφαλώς αρκετά ελαφρύ, όπως έδειξαν και οι μετρήσεις. Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σχετίζονται άμεσα με τη θέση εκτύπωσης των συνδέσμων, δηλαδή αν τυπωθούν κάθετα ή οριζόντια. Στο σχήμα 3.8 απεικονίζονται οι σύνδεσμοι από ανθρακόνημα.

ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6082-T6

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι σύνδεσμοι από αλουμίνιο. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές εξαιτίας των φυσικών ιδιοτήτων του. Το αλουμίνιο και τα κράματα του, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην οξείδωση και στη διάβρωση, έτσι προσφέρονται για όλους τους τύπους των μηχανουργικών κατεργασιών,

χύτευση, κοπή, εξέλαση κλπ. Το κράμα του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των συνδέσμων είναι της σειράς 6 και συγκεκριμένα το 6082-T6.

Χρησιμοποιείται ευρέως σε κατασκευές διότι έχει άριστη απόδοση επεξεργασίας, εξαιρετική συγκολλησιμότητα, σκληρότητα και καλή αντοχή στη διάβρωση και οξείδωση. Όσον αφορά τη μηχανική αντοχή του αλουμινίου φθάνει το όριο θραύσεως 250 MPa.

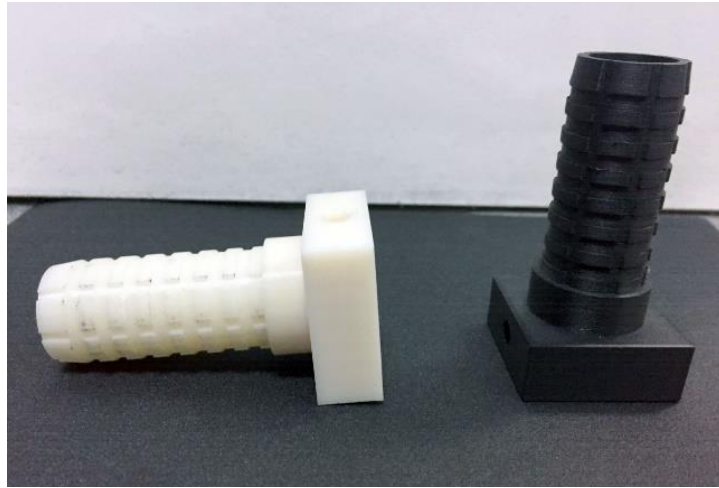


Σχήμα 3.8: Σύνδεσμοι 1 και 2 από αλουμίνιο και carbon

Η πυκνότητα για κάθε σύνδεσμο προσδιορίστηκε από τις μετρήσεις του βάρους του. Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται το βάρος ανάλογα το υλικό κατασκευής.

Πίνακας 3.1: Βάρος συνδέσμων 1 και 2

	Aluminium 6082-T6	Carbon	ABS-M30
Σύνδεσμος 1	86 gr	30 gr	28 gr
Σύνδεσμος 2	95 gr	25 gr	35 gr



Σχήμα 3.9: Σύνδεσμος 2 από carbon και ABS

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση σωλήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

4.1 Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία

Ένα πλέον ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί για την επίλυση προβλημάτων μηχανολογίας και μαθηματικής φυσικής είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method ή Finite Elements Analysis). Επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων [10].

Η μέθοδος αυτή είναι προσεγγιστική, μπορεί όμως να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και το πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας. Αυτό ισχύει γιατί δημιουργεί προσεγγιστικές τιμές σε διακεκριμένα σημεία της περιοχής του και υποδιαιρεί σε μικρότερα στοιχεία το αρχικό σύστημα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι απλούστερες εξισώσεις της επίλυσης των πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζονται σε ένα σύστημα εξισώσεων προς επίλυση που μοντελοποιεί το αρχικό πρόβλημα.

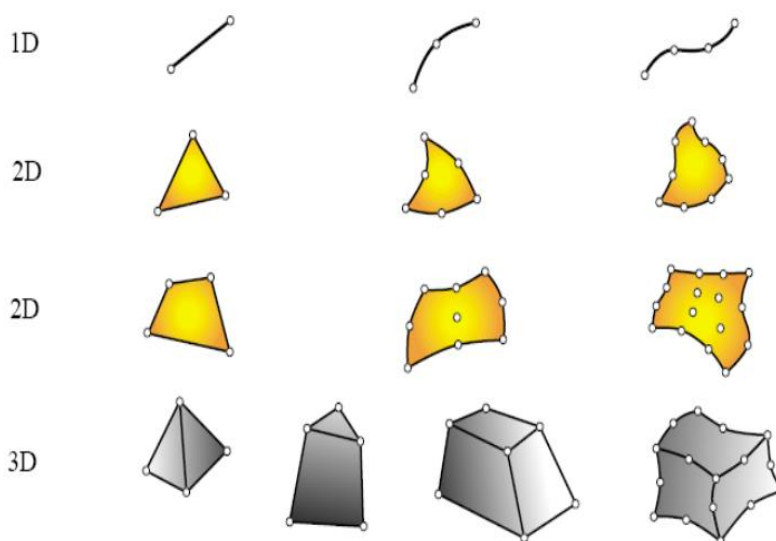
Το βασικό μειονέκτημα υπήρξε η αυξημένη απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ το οποίο όμως με τη ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστών έχει ξεπεραστεί σε μεγάλο βαθμό. Η μέθοδος αυτή έχει μεγάλη επιτυχία και χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως στον τομέα της έρευνας καθώς και στη βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διαφόρων κατασκευών. Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Η προσομοίωση (διακριτοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται σε συνοριακούς κόμβους. Ορίζεται ο αριθμός, ο τύπος, το μέγεθος και η διάταξη των στοιχείων της κατασκευής.
2. Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (αγνώστων) μετατοπίσεων που θα καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
3. Παραγωγή των μητρώων στιβαρότητας και διανυσμάτων φορτίου του στοιχείου.
4. Συγκέντρωση των εξισώσεων των στοιχείων για τη λήψη των ολικών εξισώσεων ισορροπίας.
5. Επίλυση ως προς τις άγνωστες μετατοπίσεις κόμβων
6. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, (μετατοπίσεις και τάσεις) με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος.

4.1.1 Μοντελοποίηση – τύποι πεπερασμένων στοιχείων

Η υποδιαίρεση της κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία είναι μία διαδικασία κατά την οποία κρίνεται η ικανότητα ενός μηχανικού να αποφασίσει για τον αριθμό, το μέγεθος και τη διάταξη των στοιχείων που θα χρησιμοποιήσει έτσι ώστε η κατασκευή να αναπαρασταθεί όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ταυτόχρονα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όσο μεγαλύτερη η υποδιαίρεση, τόσο μεγαλύτερος κόπος απαιτείται και υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας ενός δύσχρηστου υπολογιστικού μοντέλου.

Η βασική διάκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων πεπερασμένων στοιχείων αφορά τις διαστάσεις στις οποίες αυτά αναπτύσσονται. Ο απλούστερος τύπος που συνήθως χρησιμοποιείται είναι τα γραμμικά στοιχεία, ακολουθούν τα επιφανειακά στοιχεία, ενώ περισσότερο σύνθετα είναι τα χωρικά στοιχεία. Ακόμα, σε περίπτωση καμπύλων γεωμετριών χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία με καμπυλωμένες πλευρές.



Σχήμα 4.1: Βασικές γεωμετρικές πεπερασμένων στοιχείων

Εάν τα γραμμικά και τα επιφανειακά στοιχεία δεν μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά μιας κατασκευής, όταν δηλαδή αυτή αποτελείται από φέροντα στοιχεία με τρεις σημαντικές διαστάσεις, τότε χρησιμοποιούνται κυρίως χωρικά στοιχεία. Ασφαλώς είναι δυνατή η συνδυαστική χρήση διαφορετικών τύπων στοιχείων, για την αποτελεσματικότερη προσομοίωση κατασκευών, όταν αυτό θεωρηθεί σκόπιμο από τον μελετητή.

4.2 Μοντελοποίηση σωλήνα ανθρακονημάτων

Το ANSA είναι ένα λογισμικό (pre-processor) CAE (Computer Aided Engineering), το οποίο έχει πολλές δυνατότητες ανάλυσης και προσομοίωσης. Για την επιτυχή ολοκλήρωση μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν κάποια στάδια, τα οποία συμβάλλουν στην εξαγωγή πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

Τα στάδια αυτά αφορούν την εισαγωγή της γεωμετρίας στο ANSA, τη δημιουργία πλέγματος (mesh) σε αυτήν, το οποίο αποτελείται από τα στοιχεία (elements), που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω κόμβων (nodes). Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει εισαγωγή των ιδιοτήτων των υλικών και θα οριστούν οι συνοριακές συνθήκες και οι συνθήκες ελέγχου.

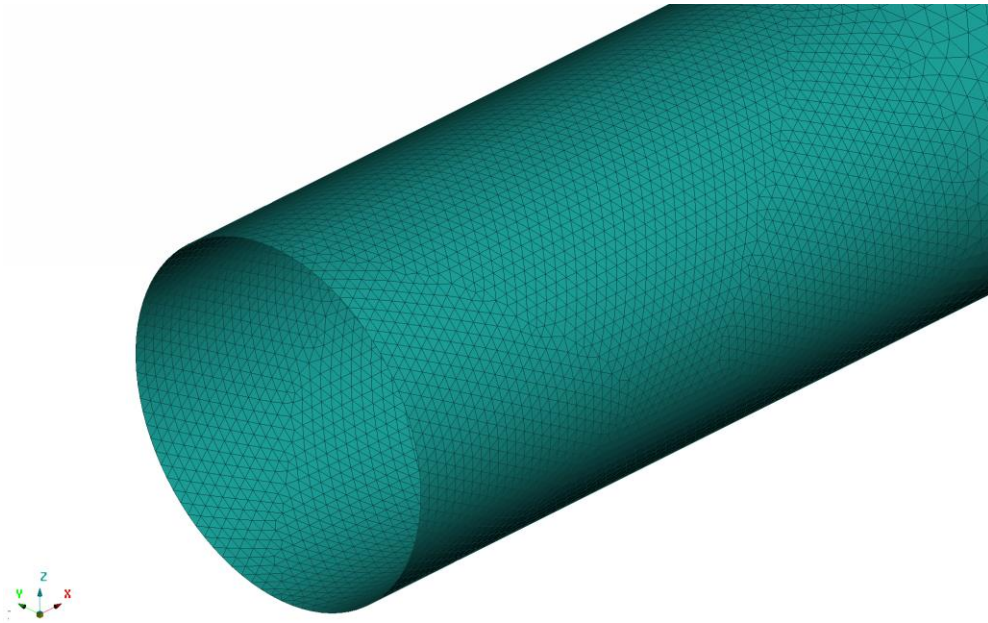
Ένα σύνθετο υλικό μπορεί να μοντελοποιηθεί με πεπερασμένα στοιχεία είτε όγκου είτε επιφανειακά. Υπάρχουν όμως ορισμένοι περιορισμοί στη χρήση στοιχείων όγκου στην προσομοίωση σύνθετων υλικών. Μία στρώση από στοιχεία όγκου αντιπροσωπεύει όλο το σύνθετο υλικό, αντίθετα με τα επιφανειακά στοιχεία κάθε στρώση τους αντιπροσωπεύει μια στρώση του σύνθετου υλικού και αποκρίνεται ως ένα ορθοτροπικό υλικό.

Στο ANSA για την προσομοίωση σύνθετων υλικών επιλέγεται η ακριβής στρωματοποίηση (stacking sequence) της κατασκευής, καθώς και για κάθε στρώση ο προσανατολισμός και το πάχος της. Η στρωματοποίηση του σωλήνα έχει ως εξής: $[\pm 8/+86/\pm 8/\pm 8]_T$. Κάθε στρώση έχει διαφορετικό πάχος, ανάλογα με τη γωνία τυλίγματος. Συγκεκριμένα, για γωνίες ± 8 είναι 0.26mm και για +86 είναι 0.16mm. Στον πίνακα 4.1 φαίνεται ακριβώς ο τρόπος που τοποθετήθηκαν οι προσανατολισμένες στρώσεις ανθρακονημάτων (stacking sequence).

Πίνακας 4.1: Προσανατολισμός και lay up σωλήνα

Ply	Angle	Thickness [mm]
1	8	0.26
2	-8	0.26
3	86	0.16
4	8	0.26
5	-8	0.26
6	8	0.26
7	-8	0.26

Η μοντελοποίηση συνήθως γίνεται ανάλογα με την κατασκευή και το μέγεθός της, έτσι αποφασίστηκε ο σωλήνας να προσομοιωθεί με επιφανειακά στοιχεία (shell elements). Η δημιουργία πλέγματος στο ψηφιοποιημένο μοντέλο του σωλήνα έγινε με επιφανειακά δισδιάστατα τριγωνικά στοιχεία (shell elements) CTRIA3, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 και η πλευρά του τριγώνου (element length) ορίστηκε σε 2.00 mm.



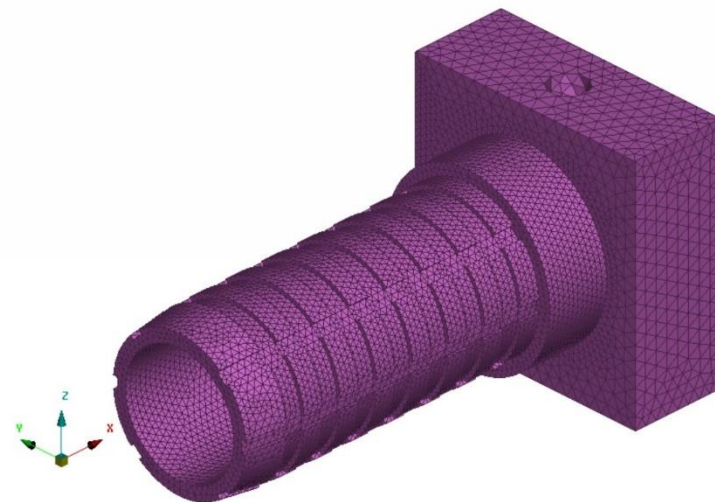
Σχήμα 4.2: Διακριτοποίηση σωλήνα με επιφανειακά δισδιάστατα τριγωνικά στοιχεία

Διακριτοποίηση συνδέσμων

Τα σχέδια που δημιουργήθηκαν στο Solidworks για τους δύο συνδέσμους εισέρχονται στο περιβάλλον του ANSA για τη διαδικασία της ανάλυσής τους. Για τη διακριτοποίηση των συνδέσμων χρησιμοποιήθηκαν χωρικά τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements) με γεωμετρία τετραέδρου (tetras). Το μέγεθος των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι διαφορετικό στο κύριο μέρος (1 mm) και στη βάση (2 mm). Η τελευταία παραδοχή ισχύει και για τους δύο συνδέσμους. Η διακριτοποίηση των συνδέσμων παρουσιάζεται στα σχήματα 4.3, 4.4.



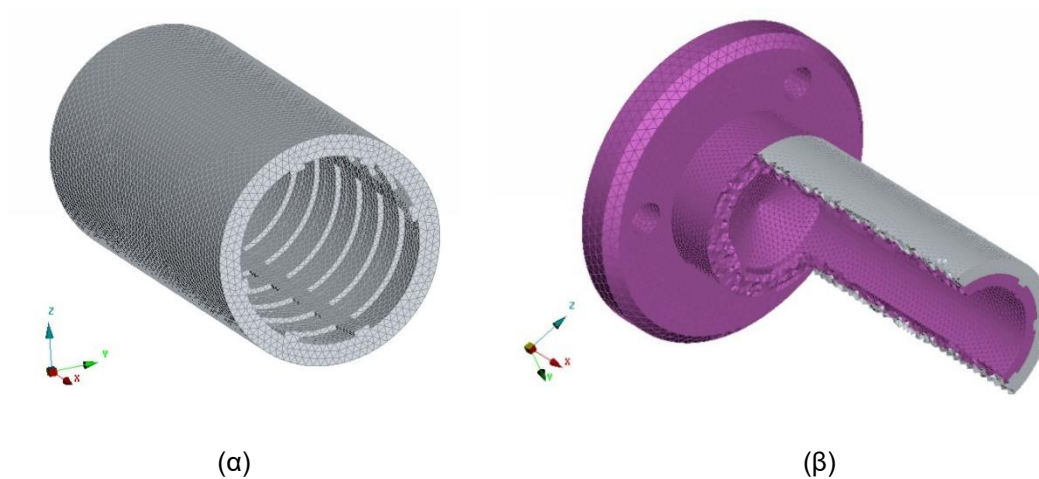
Σχήμα 4.3: Διακριτοποίηση σύνδεσμου 1



Σχήμα 4.4: Διακριτοποίηση σύνδεσμου 2

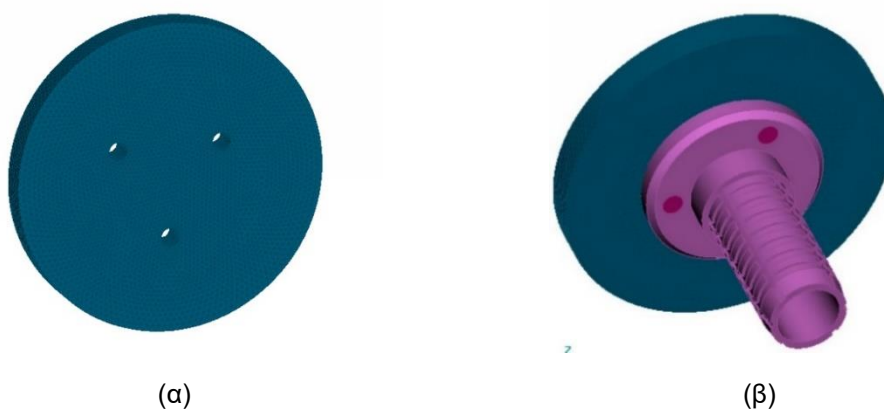
Διακριτοποίηση εποξικής κόλλας και βάσης στήριξης

Η κόλλα μοντελοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις μελέτης ως συμπαγές στοιχείο (solid element) με γεωμετρία τετραέδρου, όπως δείχνει και το σχήμα 4.5 το οποίο έχει ισότροπη συμπεριφορά και το μέγεθος των στοιχείων ορίστηκε στο 1 mm.



Σχήμα 4.5: Διακριτοποίηση εποξικής κόλλας (α) και απεικόνιση σύνδεσής της με σύνδεσμο 1 (β)

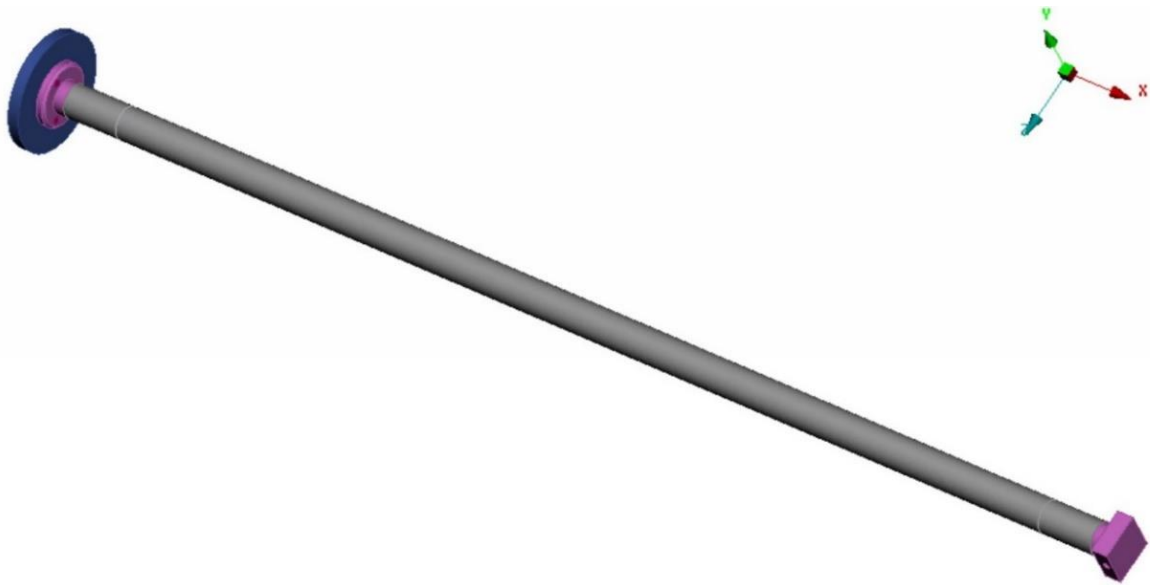
Η βάση στήριξης μοντελοποιήθηκε με χωρικά τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements) με γεωμετρία τετραέδρου (tetras). Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση της βάσης στήριξης και η σύνδεσή της με σύνδεσμο 1.



Σχήμα 4.6: Διακριτοποίηση βάσης στήριξης (α) και απεικόνιση σύνδεσης με σύνδεσμο 1 (β)

Το τελικό μοντέλο αποτελείται από 69289 επιφανειακά δισδιάστατα τριγωνικά στοιχεία και 634465 τετραεδρικά χωρικά στοιχεία διακριτοποίησης. Η τελική μοντελοποιημένη γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 4.7.

Τελική μοντελοποιημένη γεωμετρία



Σχήμα 4.7: Τελικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

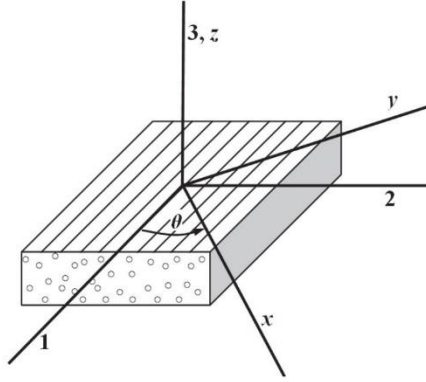
4.2.1 Εισαγωγή ιδιοτήτων των υλικών

Προσομοίωση σωλήνα

Το επόμενο στάδιο της μοντελοποίησης αφορά την εισαγωγή των ιδιοτήτων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν. Η μοντελοποίηση του σύνθετου υλικού του σωλήνα είναι μία πολύπλοκη διαδικασία και διαφέρει από την μοντελοποίηση οποιονδήποτε ισότροπων υλικών. Για τον καθορισμό του κάθε υλικού οι βασικές παράμετροι που απαιτούνται είναι:

- Μέτρο ελαστικότητας υλικού (Tensile Modulus),
- συντελεστής Poisson (Poisson's ratio),
- πυκνότητα υλικού από την οποία καθορίζεται η μάζα του στοιχείου (density),
- μέτρο διάτμησης (Shear Modulus)

Σε αντίθεση με τα ανισοτροπικά υλικά, το μητρώο ακαμψίας για τα ορθοτροπικά υλικά εξαρτάται από το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται. Οι xyz άξονες για κάθε στρώση του σύνθετου υλικού αναφέρονται ως κύριο σύστημα συντεταγμένων και συνδέονται με τον προσανατολισμό των ινών. Δηλαδή, x είναι η διεύθυνση των ινών, y η διεύθυνση κάθετα στις ίνες και z η διεύθυνση κατά το πάχος των σωλήνων.



Σχήμα 4.8: Κύριο σύστημα αξόνων-διευθύνσεων για μία στρώση σύνθετου με ίνες [Πηγή: Investigation of opportunities for lightweight vehicles using advanced plastics and composites Park, C-K., Kan, C-D., Hollowell]

Τα ορθοτροπικά υλικά έχουν τρία επίπεδα συμμετρίας και ο αριθμός των ελαστικών σταθερών περιορίζεται στις 12 [11]. Το μητρώο των υλικών σταθερών θα έχει την εξής μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} & 0 & 0 & 0 \\ C_{xy} & C_{yy} & C_{yz} & 0 & 0 & 0 \\ C_{xz} & C_{yz} & C_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{zx} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

Εναλλακτικά, ο γενικευμένος νόμος του Hooke γράφεται σε μορφή μητρώου ως:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (4.2)$$

Ο 6x6 συμμετρικός πίνακας ακαμψίας συμπληρώνεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$C_{xx} = E_x \left(1 - \left(\frac{E_z}{E_y} \right) \nu_{yz}^2 \right) D, C_{xy} = (E_y \nu_{xy} + E_z \nu_{xz} \nu_{yz}) D, C_{xz} = E_z (\nu_{xy} \nu_{yz} + \nu_{xz}) D$$

$$C_{yy} = E_y \left(1 - \left(\frac{E_z}{E_x} \right) \nu_{xz}^2 \right) D, C_{yz} = \left(\frac{E_z}{E_x} \right) (E_x \nu_{yz} + E_y \nu_{xy} \nu_{xz}) D, C_{zz} = E_z \left(1 - \left(\frac{E_y}{E_x} \right) \nu_{xy}^2 \right) D$$

$$C_{44} = C_{yz}, \quad C_{55} = C_{xz}, \quad C_{66} = C_{xy}$$

$$\text{Όπου } D^{-1} = 1 - 2 \left(\frac{E_z}{E_x} \right) \nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{xz} - \nu_{xz}^2 \left(\frac{E_z}{E_y} \right) - \nu_{yz}^2 \left(\frac{E_z}{E_y} \right) - \nu_{xy}^2 \left(\frac{E_y}{E_x} \right)$$

ν_{ij} = λόγος Poisson, E_x, E_y, E_z = Μέτρο ελαστικότητας στις x, y, z κατευθύνσεις σε Μρα

Γενικά κάθε στρώση (lamina) του σωλήνα θεωρείται ως ορθοτροπικό υλικό, γι' αυτό και επιλέχθηκε στο ANSA το **MAT8**. Σύμφωνα με τον οδηγό χρήστη ανάλυσης του MD Nastran, το MAT8 για επιφανειακά στοιχεία ορίζεται από την εξίσωση:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$


Για την κατασκευή των σωλήνων που κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T Composites χρησιμοποιήθηκε ως ενίσχυση άνθρακόνημα TORAYCA T700SC-12K με βάση το PAN και εποξική ρητίνη Epikote Resin 828L. Στο σχήμα 4.9 παρατίθενται ορισμένες ιδιότητες των νημάτων της εταιρίας TORAYCA.

TORAYCA®		DATA SHEET		
Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.				
FIBER PROPERTIES				
		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in ³	1.80 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E		0.3 %	TY-030B-05
	F0E		0.7 %	TY-030B-05
	Twist	Never twisted		

Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα T700 που χρησιμοποιήθηκαν [Πηγή: <http://www.toraycfa.com>]

Αντίστοιχα, στον τον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Πίνακας 4.2: Μηχανικές ιδιότητες για τις ίνες, τη ρητίνη και το σύνθετο υλικό

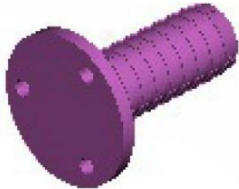
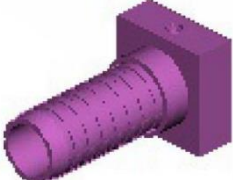
 Composite Tube	Carbon fiber Torayca T700-1200sc-50c	Epoxy Hexion Epikote Resin 828L	Carbon fiber Vf [65%]
E1[GPa]	230		146.45
E2[GPa]	14	4	7.73
E3[GPa]	14		8.3
v12	0.246	0.35	0.28
G12[GPa]	14.5		3.54
G23[GPa]	6.2	1.48	3.95
G13[GPa]	14.5		2.8
Density[tn/mm³]	1.6E-9		

Προσομοίωση συνδέσμων, κόλλας και βάσης στήριξης


Στην περίπτωση των ψηφιοποιημένων μοντέλων όλα τα υλικά εκτός του σωλήνα θεωρήθηκαν ως ιστροπικά και για τα δύο μοντέλα. Στο ANSA για ιστροπικά υλικά επιλέγει ο χρήστης το **MAT1** και καθορίζει μέτρο ελαστικότητας, πυκνότητα και λόγο Poisson.

Στον πίνακα 4.3 παρατίθενται οι ιδιότητες αλουμινίου που ορίστηκαν στους συνδέσμους για το μοντέλο 1. Στον πίνακα 4.4 αναγράφονται οι ιδιότητες της βάσης στήριξης που είναι από ασάλι.

Πίνακας 4.3: Μηχανικές ιδιότητες συνδέσμων 1 και 2 για το μοντέλο 1


Aluminium 6082-T6			
 	E[GPa]	ν	Density [tn/mm ³]
	69	0.33	2.7E-9

Πίνακας 4.4: Μηχανικές ιδιότητες βάσης στήριξης

Steel Base			
	E[GPa]	ν	Density [tn/mm ³]
	210	0.3	7.85E-9

Χρησιμοποιήθηκε η εποξική κόλλα δύο συστατικών Plexus-M300, ιδιότητες της οποίας βρήκαμε στο <http://www.matweb.com> και φαίνονται στον πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Ιδιότητες εποξικής κόλλας

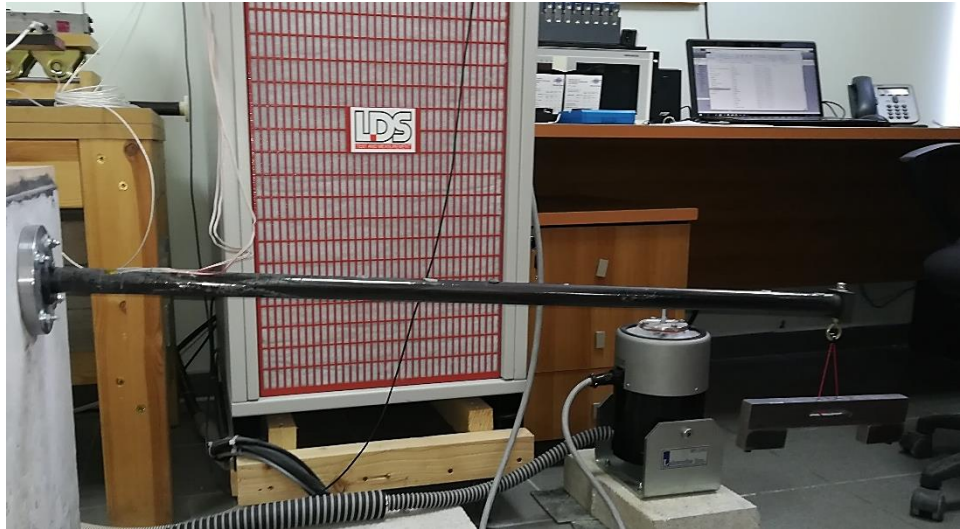
Κόλλα Plexus M300			
	E[GPa]	ν	Density [tn/mm ³]
	1.14	0.45	9.83E-10

Κεφάλαιο 5: Στατική ανάλυση

Τα τρία συναρμολογήματα που υποβλήθηκαν στην πειραματική διαδικασία εξοπλίστηκαν με αισθητήρες παραμόρφωσης (strain gauges) για να ερευνηθούν οι τιμές τάσεων που αναπτύσσονται στο σημείο σύνδεσης του σωλήνα ανθρακονημάτων με τους αισθητήρες κατά τις στατικές φορτίσεις. Επιπλέον, από την καταγραφή των μετατοπίσεων του συνδέσμου 2 κατά τη στατική ανάλυση, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την αντοχή και στιβαρότητα των τριών υλικών των συνδέσμων. Αντίστοιχα, πραγματοποιείται αριθμητική ανάλυση με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Τα μοντέλα στη συνέχεια θα αξιολογηθούν από τη σύγκριση των αριθμητικών τους αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων πειραματικών μετρήσεων.

5.1 Πειραματική διαδικασία

Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν στα τρία μοντέλα, βάρη με μάζες 170gr, 775gr και 1480gr και 2115gr και βάση αυτών επιλέχθηκαν και οι φορτίσεις του μοντέλου πεπερασμένων στον άξονα z. Το σχήμα 5.1 απεικονίζει την πειραματική διάταξη του εργαστηρίου. Τα τέσσερα βάρη εφαρμόζονται στη βίδα που τοποθετείται στο σύνδεσμο 2. Κατά την ανάλυση αυτή το πρόβλημα θεωρείται μη εξαρτημένο από το χρόνο.



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο για το μοντέλο 2 με συνδέσμους από ανθρακονήματα κατά τη στατική ανάλυση.

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος του μοντέλου 3, ο σύνδεσμος 1 από ABS που χρησιμοποιείται για την πάκτωση, υπέστη θραύση, όταν τοποθετήθηκε βάρος με μάζα 2115gr. Από το αποτέλεσμα αυτό σαφώς απορρίπτεται ως ενδεχόμενο σιβαρού συναρμολογήματος το μοντέλο 3 και δεν εξετάζεται το μοντέλο πεπερασμένων. Τόσο οι τάσεις όσο και οι μετατοπίσεις θα εξεταστούν για τα μοντέλα 1 και 2.

5.2 Ανάλυση σε πεπερασμένα στοιχεία

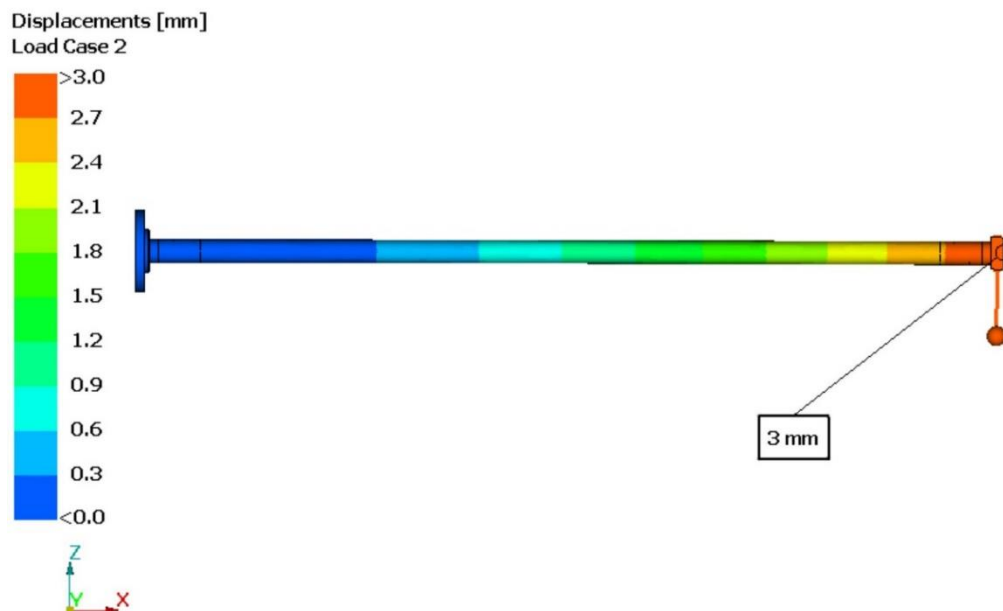
Συγκεκριμένα στο μοντέλο που προσομοιώθηκε περιορίστηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας της βάσης στήριξης με SPC (single point constraint). Ο τρόπος σύνδεσης της κάθε μάζας με το σύνδεσμο 1 μοντελοποιείται με στοιχεία RBE2 καθώς εκεί υπάρχει στερεή σύνδεση με βίδα. Για την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία λήφθηκε υπόψη επιπλέον το βάρος 30 gr της βίδας, όπου αναρτήθηκαν τα βάρη.

Όπως προαναφέρθηκε, η δημιουργία του μοντέλου έγινε σε κατάλληλο λογισμικό ANSA (pre-processing), η επίλυση έγινε με το λογισμικό Epilysis και η ανάλυση των αποτελεσμάτων στο μΕΤΑ post-processor. Στους πίνακες 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των μοντέλων 1 και 2 από το εργαστηριακό πείραμα και από την αριθμητική τους προσομοίωση.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση μετατοπίσεων πειράματος και αριθμητικής ανάλυσης για το μοντέλο 1 με συνδέσμους αλουμινίου

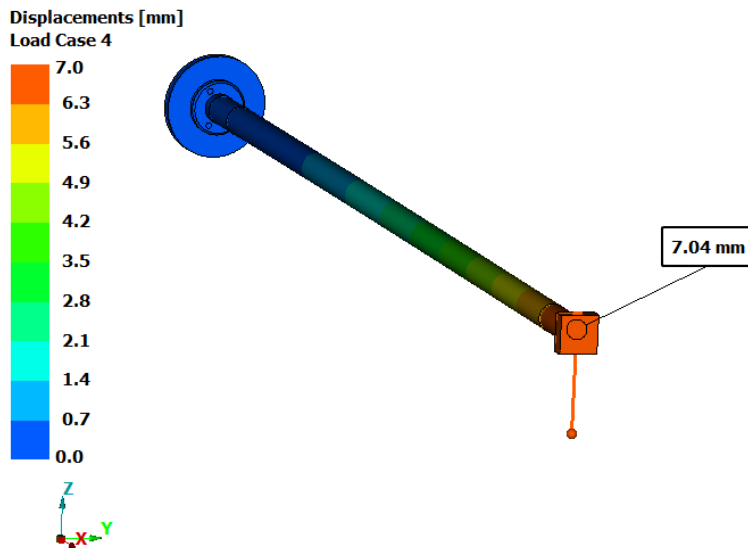
Cases 1 - 4	Measured	Model FEA	Relative error
Mass [gr]	Displacement [mm]	Displacement [mm]	(%)
200	1	1.19	19
805	2.5	3	20
1510	4	4.7	17.5
2145	7	7.04	0.57

Για την πρώτη περίπτωση προσομοίωσης του συναρμολογήματος με συνδέσμους αλουμινίου, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα για το αριθμητικό και για το πειραματικό μοντέλο συγκλίνουν αρκετά. Το σφάλμα είναι σε επιτρεπτά όρια, διότι πρέπει να λάβουμε υπόψη και το ότι αναφερόμαστε σε πολύ μικρές μετατοπίσεις, οπότε μπορεί το μοντέλο πεπερασμένων να θεωρηθεί αξιόπιστο. Οι μετατοπίσεις που προκύπτουν παρουσιάζονται στα σχήματα 5.2 και 5.3. Ενδεικτικά απεικονίζονται οι περιπτώσεις για τις μάζες 805gr και 2145gr.



Σχήμα 5.2: Μετατόπιση ολοκλήρωμένου μοντέλου 1 για την περίπτωση υποβολής βάρους 805 gr

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που έχουν γίνει για την προσομοίωση του ορθοτροπικού υλικού του σωλήνα, προκύπτει ότι οι ιδιότητες του αλουμινίου που επηρεάζουν επίσης τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.



Σχήμα 5.3: Μετατόπιση ολοκληρωμένου μοντέλου 1 για την περίπτωση υποβολής βάρους 2145gr

Η μέγιστη μετατόπιση που σημειώνεται στην περίπτωση του μεγαλύτερου βάρους είναι 7.04mm, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.3. Μελετώντας τα αποτελέσματα, διαπιστώνει κανείς εύκολα ότι το αλουμίνιο δεν επιτρέπει μεγάλες μετατοπίσεις και οι μετρήσεις βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων. Αυτό σημαίνει ότι το συναρμολόγημα είναι αρκετά στιβαρό. Επίσης, οι μετατοπίσεις αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου, οπότε η συμπεριφορά του μοντέλου 1 θεωρείται γραμμική.

Για την προσομοίωση του μοντέλου 2 ώστε να ανταποκρίνεται στην επιθυμητή κατάσταση των πειραματικών αποτελεσμάτων, το μέτρο ελαστικότητας του υλικού έπρεπε να μεταβληθεί για κάθε περίπτωση φόρτισης. Το 3d printed carbon προσομοιώθηκε με ιστροπικό υλικό MAT1 του ANSA με πυκνότητα 1.1E-9 και Poisson 0.37.

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας που έπρεπε να καθοριστούν για την προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

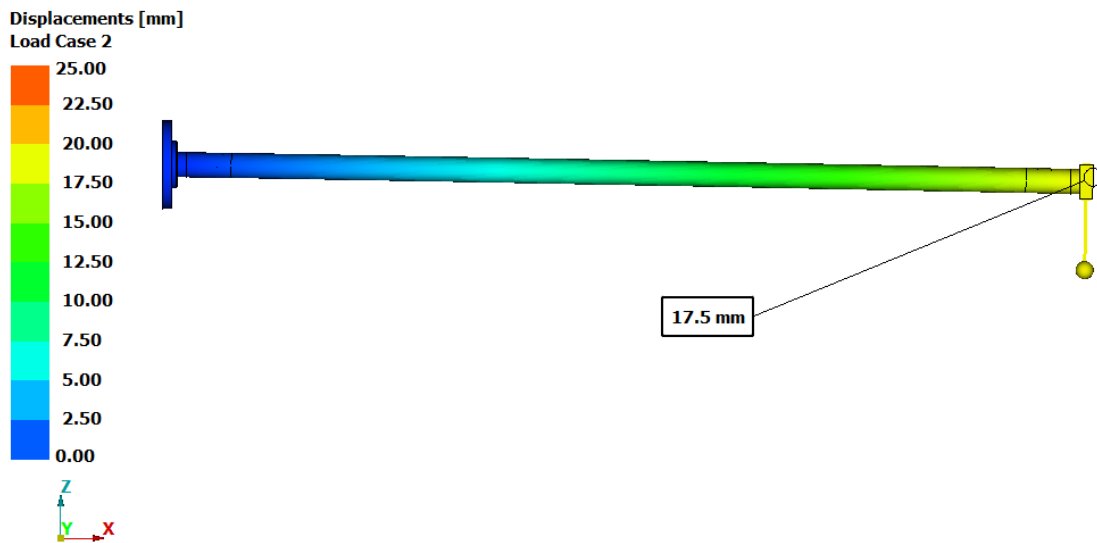
Πίνακας 5.2: Μέτρα ελαστικότητας για τους συνδέσμους carbon του μοντέλου 2 σε κάθε περίπτωση φόρτισης

Cases 1 - 4	E
Mass [gr]	[MPa]
200	900
805	250
1510	200
2145	164

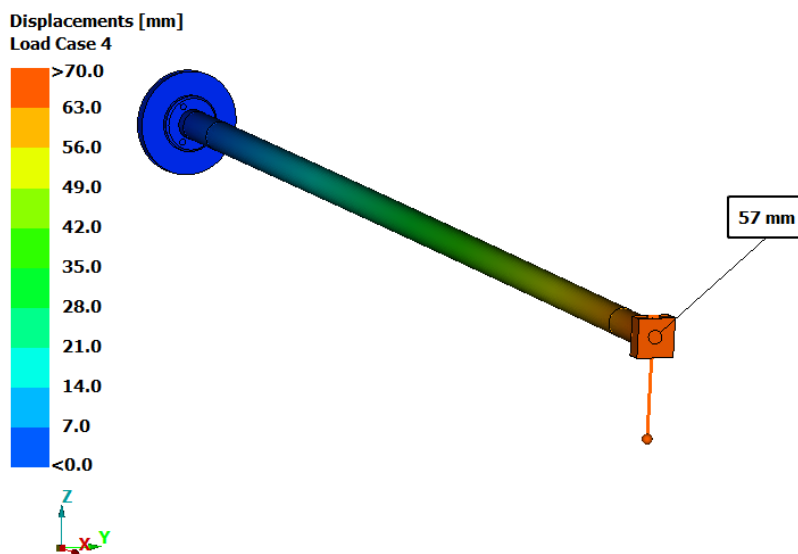
Πίνακας 5.3: Σύγκριση μετατοπίσεων πειράματος και αριθμητικής ανάλυσης για το μοντέλο 2 με συνδέσμους carbon

Cases 1 - 4	Measured	Model FEA	Relative error
Mass [gr]	Displacement [mm]	Displacement [mm]	(%)
200	3	2.8	6.66
805	20	17.5	12.5
1510	40	38	5
2145	65	57	12.31

Βάση των αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι το μοντέλο 2 (3d printed carbon) εμφανίζει μεγαλύτερες μετατοπίσεις σχετικά με το μοντέλο 1. Επίσης παρατηρούμε ότι οι θεωρητικές τιμές που προκύπτουν παρουσιάζονται μειωμένες σε σχέση με τις τιμές του πειραματικού μοντέλου. Οι μετατοπίσεις που προκύπτουν παρουσιάζονται στα σχήματα 5.4 και 5.5. για τις περιπτώσεις υποβολής μαζών 805gr και 2145gr.



Σχήμα 5.4: Μετατόπιση ολοκληρωμένου μοντέλου 2 για την περίπτωση υποβολής βάρους 805gr



Σχήμα 5.5: Μετατόπιση ολοκληρωμένου μοντέλου 2 για την περίπτωση υποβολής βάρους 2145gr

Για το μοντέλο 2 με συνδέσμους από carbon οι ιδιότητες του υλικού είναι άγνωστες, και δεν μπορούμε να τις πάρουμε απ' ευθείας από τη βιβλιογραφία. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις μετατοπίσεις του μοντέλου 2 είναι κατανοητό ότι το 3D printed carbon των συνδέσμων είναι πολύ εύκαμπτο σε σχέση με τους συνδέσμους αλουμίνιου. Επιπλέον,

παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά, που καθιστά ακόμα πιο δύσκολη την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του με αριθμητικές μεθόδους.

5.3 Μέτρηση τάσης με Strain Gauges

Όπως προαναφέρθηκε, η τεχνική των αισθητήρων παραμόρφωσης (strain gauges) χρησιμοποιήθηκε για να εκτιμηθούν οι τιμές των τάσεων του μοντέλου. Συγκεκριμένα, αισθητήρας τύπου ροζέτας τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του πάνω μέρους του σωλήνα κατά το διαμήκη άξονά του σε απόσταση 50mm από την αρχή του σωλήνα. Ο αισθητήρας αποτελείται από λεπτά σύρματα τα οποία επικολλώνται με ειδική κόλλα στην περιοχή του υλικού προς εξέταση. Κατά τη φόρτιση του υλικού τα σύρματα επιμηκύνονται ή βραχύνονται και έτσι μεταβάλλεται η ηλεκτρική τους αντίσταση. Τα καλώδια από τον αισθητήρα τύπου ροζέτας όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7 συνδέονται με το σύστημα συλλογής δεδομένων και καταγράφουν τις μετρήσεις από τους τρεις άξονες μέτρησης.

Η τεχνική εγκατάστασης των αισθητήριων παραμόρφωσης είναι ίδια όπως και για μεταλλικά υλικά. Η επιφάνεια εφαρμογής των αισθητηρίων προετοιμάζεται κατάλληλα ώστε να είναι λεία.

Η παραμόρφωση ποσοτικοποιείται μέσω της παραμόρφωσης εφελκυσμού (ε) η οποία ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του μήκους (ΔL) προς το αρχικό μήκος (L) σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (5.1)$$

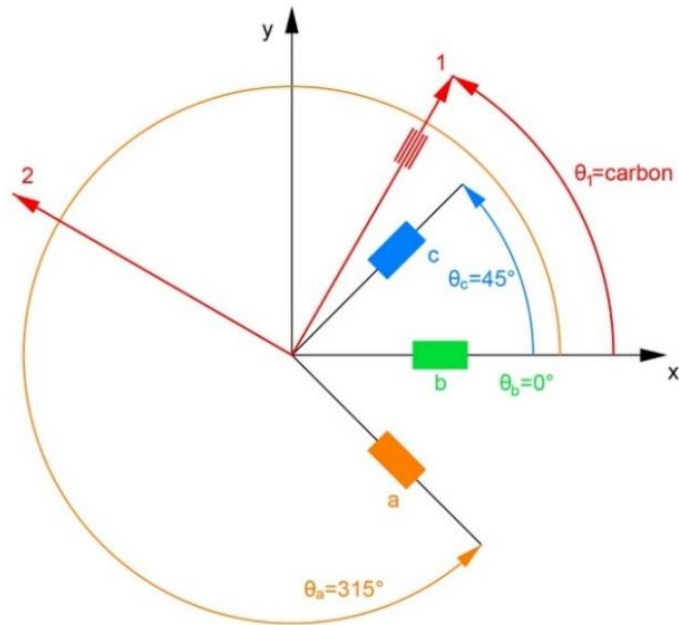
Το λογισμικό απόκτησης των δεδομένων χρησιμοποιεί την παρακάτω εξίσωση για τις μετρήσεις:

$$\frac{\Delta R}{R} = G\varepsilon \quad (5.2)$$

Ως G ορίζεται μία ποσότητα χαρακτηριστική του υλικού που ονομάζεται παράγοντας G (gauge factor). Το λογισμικό επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει την αντίσταση R και τον παράγοντα G και μετρώντας τη μεταβολή αντίστασης ΔR , δίνει την παραμόρφωση ε ως αποτέλεσμα.

Προκειμένου να εκτιμηθούν σωστά αποτελέσματα για τις αναπτυσσόμενες τάσεις, το κύριο σύστημα συντεταγμένων των αισθητηρίων παραμόρφωσης τροποποιήθηκε ώστε να

συμπίπτει με τους αντίστοιχους άξονες των ινών στην επιφάνεια του σωλήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Μετασχηματισμός δεδομένων από το κύριο σύστημα συντεταγμένων των αισθητήρων στους αντίστοιχους άξονες των ινών στην επιφάνεια του σωλήνα

Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων στις τρεις διαφορετικές διευθύνσεις ε_a , ε_b , ε_c χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τριών αγνώστων παραμέτρων ε_1 , ε_2 , γ_{12} , που υπολογίζονται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 \cos^2(\theta_a - \theta_1) + \varepsilon_2 \sin^2(\theta_a - \theta_1) + \gamma_{12} \cos(\theta_a - \theta_1) \sin(\theta_a - \theta_1) \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_1 \cos^2(\theta_b - \theta_1) + \varepsilon_2 \sin^2(\theta_b - \theta_1) + \gamma_{12} \cos(\theta_b - \theta_1) \sin(\theta_b - \theta_1) \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 \cos^2(\theta_c - \theta_1) + \varepsilon_2 \sin^2(\theta_c - \theta_1) + \gamma_{12} \cos(\theta_c - \theta_1) \sin(\theta_c - \theta_1) \quad (5.5)$$

Όπου $\theta_1 = 8^\circ$, $\theta_a = 315^\circ$, $\theta_b = 0^\circ$, $\theta_c = 45^\circ$

Για την απόκτηση αποτελεσμάτων θεωρούμε γνωστά το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση παράλληλα και κάθετα των ινών E_x , E_y , το λόγο Poisson ν και το μέτρο διάτμησης G_{12} . Στη συνέχεια υπολογίζονται αντίστοιχα οι τάσεις σ_1 , σ_2 και η διατμητική τάση τ_{12} από τις σχέσεις:

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}(\varepsilon_1 + \nu_{21}\varepsilon_2) \quad (5.6)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}(\varepsilon_2 + \nu_{12}\varepsilon_1) \quad (5.7)$$

$$\tau_{12} = G_{12}\gamma_{12} \quad (5.8)$$



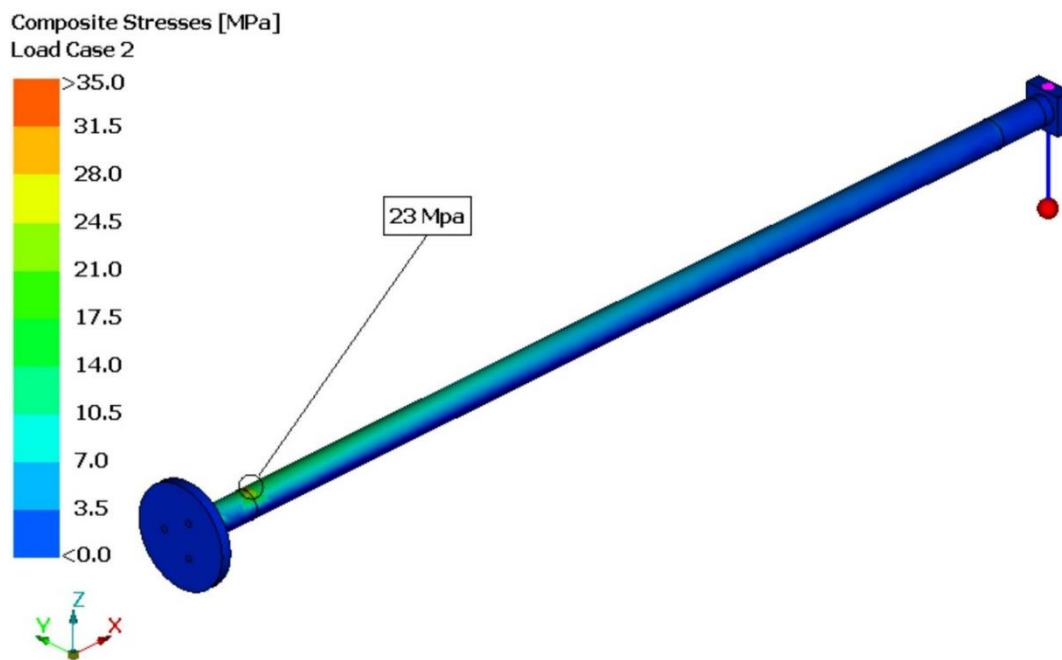
Σχήμα 5.7 : Απεικόνιση τοποθέτησης αισθητήρων παραμόρφωσης (strain gauges)

Η αναλυτική λύση του προβλήματος υπολογίστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, και στους πίνακες 5.4 και 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δύο μοντέλα. Σε ότι αφορά τις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από το λογισμικό ANSA, προέκυψαν από τη θεώρηση ανάπτυξης τάσεως σε μία περιοχή που αντιστοιχεί σε αυτήν που τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες παραμόρφωσης στο πείραμα. Στα σχήματα 5.8-5.11 απεικονίζονται οι τάσεις για τα μοντέλα 1 και 2 στις περιπτώσεις υποβολής βάρους 805gr και 2145gr.

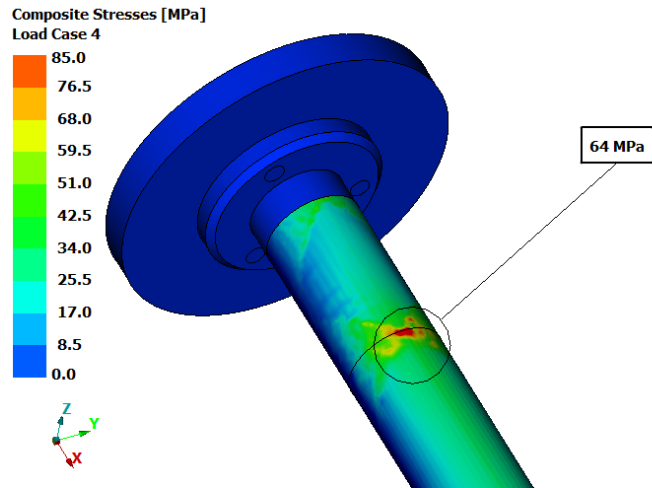
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα τάσεων υπό την επίδραση βάρους για το μοντέλο 1 με συνδέσμους από αλουμίνιο

Cases	Measured	FEA	Relative error
Mass [gr]	σ_1 [MPa]	σ_1 [MPa]	(%)
200	5.86	6.4	9.22
805	27.28	23	15.69
1510	52.67	43	18.36
2145	75.34	64	15.05

Η μέγιστη τάση από τα πειραματικά δεδομένα που αναπτύσσεται είναι 75.34 MPa υπό την επίδραση βάρους 2145gr.



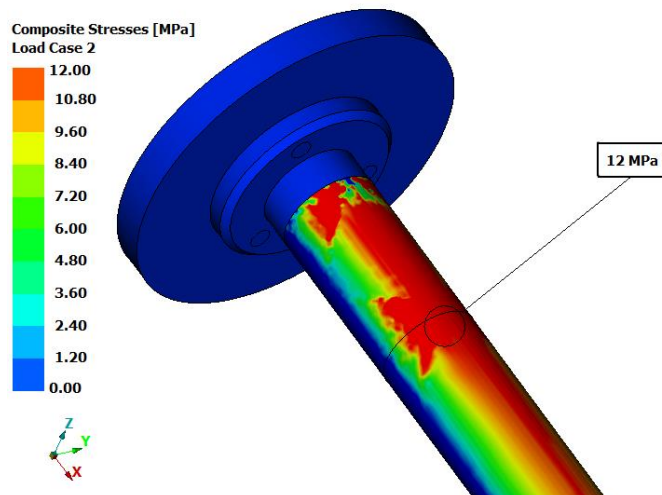
Σχήμα 5.8: Απεικόνιση τάσης στο σημείο των αισθητήρων μέτρησης για το μοντέλο 1 στην περίπτωση υποβολής βάρους 805gr



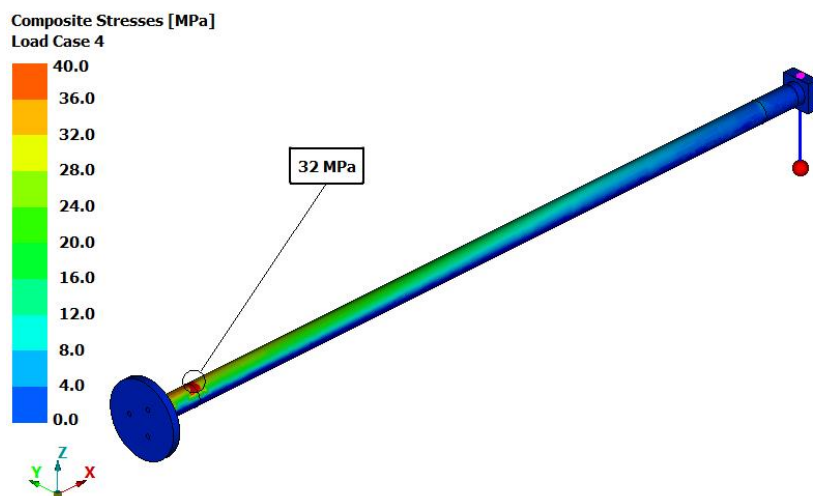
Σχήμα 5.9: Απεικόνιση τάσης στο σημείο των αισθητήρων μέτρησης για το μοντέλο 1 στην περίπτωση υποβολής βάρους 2145gr

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα τάσεων υπό την επίδραση βάρους για το μοντέλο 2 με συνδέσμους από carbon

Cases	Measured	FEA	Relative error
Mass [gr]	σ_1 [MPa]	σ_1 [MPa]	(%)
200	1.93	2.6	34.71
805	9.97	12	20.36
1510	18.82	24.5	30.18
2145	27.35	32	17



Σχήμα 5.10: Απεικόνιση τάσης στο σημείο των αισθητήρων μέτρησης για το μοντέλο 2 στην περίπτωση υποβολής βάρους 805gr



Σχήμα 5.11: Απεικόνιση τάσης στο σημείο των αισθητήρων μέτρησης για το μοντέλο 2 στην περίπτωση υποβολής βάρους 2145gr

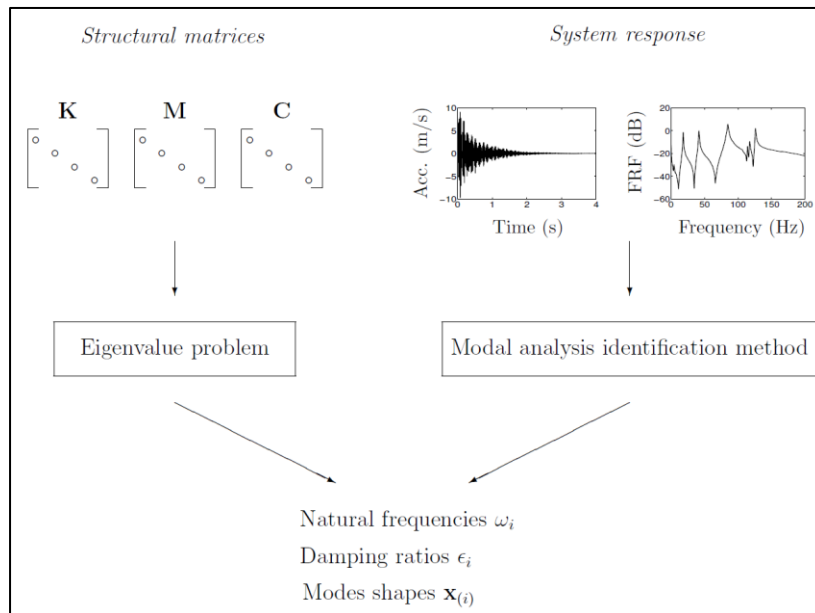
Κεφάλαιο 6: Μορφική ανάλυση

Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τον τομέα της μορφικής ανάλυσης συστημάτων. Η τεχνική αυτή αποτελεί μία καθιερωμένη διαδικασία για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς περίπλοκων μηχανολογικών κατασκευών. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι σε τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, ναυτιλίας, αεροδιαστημικής και της δομικής μηχανικής.

Η μορφική ανάλυση είναι η μέθοδος προσδιορισμού των χαρακτηριστικών ενός συστήματος έτσι ώστε να οριστεί ένα μαθηματικό μοντέλο που θα μπορεί να περιγράψει σωστά τη δυναμική του συμπεριφορά. Το σύστημα μπορεί να είναι μία απλή κατασκευή ή να αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η ιδιοσυχνότητα (modal frequency), ο συντελεστής απόσβεσης (modal damping) και οι ιδιομορφές (mode shapes).

Ο υπολογισμός των μορφικών χαρακτηριστικών μπορεί να γίνει είτε με υπολογιστικές μεθόδους, είτε πειραματικά. Μία σχηματική απεικόνιση για αυτή τη διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1. Για υπολογιστική μέθοδο απαιτούνται γνώσεις για τη γεωμετρία της κατασκευής, τις οριακές συνθήκες και τις ιδιότητες του υλικού (μάζα, απόσβεση, ακαμψία). Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί μία από τις πιο

διαδεδομένες μεθόδους για την εξέταση της μορφικής συμπεριφοράς και τον έλεγχο της αξιοπιστίας των κατασκευών. Η πειραματική διαδικασία αφορά την εφαρμογή κρουστικής διέγερσης στην κατασκευή και την μέτρηση της απόκρισης με διάφορα αισθητήρια όργανα έτσι ώστε μέσω των μετρούμενων σημάτων να προσδιοριστεί η συνάρτηση μετάδοσης.



Σχήμα 6.1: Υπολογιστική και πειραματική μορφική ανάλυση [Πηγή: Experimental modal analysis Gaetan Kerschen, Jean-Claude Golinval]

6.1 Ταλάντωση κατασκευών

6.1.1 Εξίσωση κίνησης ταλαντωτικού συστήματος

Η γενική μορφή εξίσωσης κίνησης ενός ταλαντωτικού συστήματος σε μητρική μορφή δίνεται ως [12]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = f(t) \quad (6.1)$$

Όπου $[M]$ είναι το μητρώο μάζας, $[C]$ το μητρώο απόσβεσης, $[K]$ το μητρώο στιβαρότητας, x το διάνυσμα αποκρίσεων και f το διάνυσμα της διέγερσης του συστήματος. Όταν η εξωτερική διέγερση είναι μηδέν, τότε το σύστημα ταλαντώνεται ελεύθερα ($f(t) = 0$) και η εξίσωση κίνησης δίνεται από τη σχέση:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (6.2)$$

Το παραπάνω σύστημα είναι συζευγμένο. Για την επίλυσή του χρησιμοποιείται η μέθοδος μορφικής ανάλυσης, η οποία βασίζεται στην επίλυση του παρακάτω ιδιοπρόβληματος για τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών.

ΙΔΙΟΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στην ανάλυση εισάγονται οι ιδιομορφές $\{\varphi\}$ και οι ιδιοσυχνότητες ω , οι οποίες προσδιορίζονται από την επίλυση του ιδιοπρόβληματος:

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = 0 \quad (6.3)$$

Τα N ιδιοδιανύσματα $\{\varphi\}$ μπορούν να γραφούν σε ένα πίνακα της μορφής:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N1} & \cdots & \varphi_{NN} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

ο οποίος ονομάζεται πίνακας ιδιομορφών. Οι N ιδιοσυχνότητες μπορούν επίσης να γραφτούν σε πίνακα σε μορφή:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \omega_N^2 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Το ιδιοπρόβλημα γράφεται στη μητρική μορφή ως:

$$K\Phi = M\Phi\Omega^2 \quad (6.6)$$

Η μητρική μορφή των συνθηκών ορθογωνικότητας είναι:

$$\hat{K} = \Phi^T k \Phi \quad (6.7)$$

και

$$\hat{M} = \Phi^T m \Phi \quad (6.8)$$

Όπου \hat{K} και \hat{M} είναι τα διαγώνια μορφικά μητρώα ακαμψίας και μάζας με διαγώνια στοιχεία:

$$\hat{k}_n = \Phi_n^T K \Phi_n \quad (6.9)$$

και

$$\hat{m}_n = \Phi_n^T M \Phi_n \quad (6.10)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο της μορφικής ανάλυσης, για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων, θεωρούμε ότι η λύση έχει τη μορφή:

$$\{x\} = \sum_i (\varphi_i) \xi_i \quad (6.11)$$

Όπου $\{x\}$ = το διάνυσμα των φυσικών μετατοπίσεων, (φ_i) = η i -ιοστή ιδιομορφή και ξ_i = η i -ιοστή μορφική μετατόπιση και $\{\xi\} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T$. Με τη χρήση αυτού του μετασχηματισμού επιτυγχάνεται η αποσύζευξη του ταλαντωτικού συστήματος.

Λύνοντας το ιδιοπρόβλημα, το μόνο που χρειάζεται να γίνει είναι να υπολογιστεί η χρονική απόκριση του συστήματος, δηλαδή το $\xi(t)$. Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό στην εξίσωση κίνησης του ταλαντωτικού συστήματος ταλάντωσης με απόσβεση, προκύπτει:

$$[M]\Phi\{\ddot{\xi}\} + [C]\Phi\{\dot{\xi}\} + [K]\Phi\{\xi\} = f(t) \quad (6.12)$$

Πολλαπλασιάζοντας με Φ^T προκύπτει:

$$\Phi^T [M] \Phi \{\ddot{\xi}\} + \Phi^T [C] \Phi \{\dot{\xi}\} + \Phi^T [K] \Phi \{\xi\} = \Phi^T f(t) \quad (6.13)$$

Η παραπάνω εξίσωση με χρήση των συνθηκών ορθογωνικότητας των κανονικοποιημένων ιδιομορφών, γράφεται:

$$m_j \{\ddot{\xi}\} + c^* \{\dot{\xi}\} + k_j \{\xi\} = \Phi^T f(t) \quad (6.14)$$

Όπου με c^* συμβολίζεται ο μη διαγώνιος πίνακας

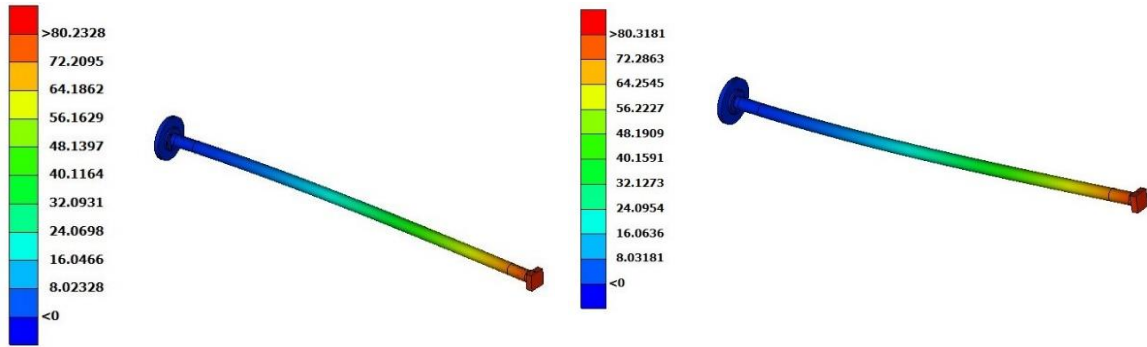
$$c^* = \Phi^T [C] \Phi. \quad (6.15)$$

Το νέο σύστημα που προκύπτει είναι και πάλι συζευγμένο, διαμέσου του πίνακα απόσβεσης C , και η εξίσωση είναι και πάλι συζευγμένη διαμέσου των μορφικών ταχυτήτων $\{\dot{\xi}\}$.

6.2 Αποτελέσματα μορφικής ανάλυσης ψηφιοποιημένου μοντέλου

Η αριθμητική επίλυση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στα λογισμικά επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων (solver) Dynamis και Epilysis. Αφού γίνει η επεξεργασία του μοντέλου, οριστούν τα δεδομένα του προβλήματος και οι οριακές συνθήκες, στη συνέχεια εξάγονται τα αποτελέσματα στο λογισμικό επίλυσης. Η ανάγνωση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης γίνονται στο μ ETA post-processor της BETA CAE Systems S.A και συγκεντρώνονται στον πίνακα 6.1..

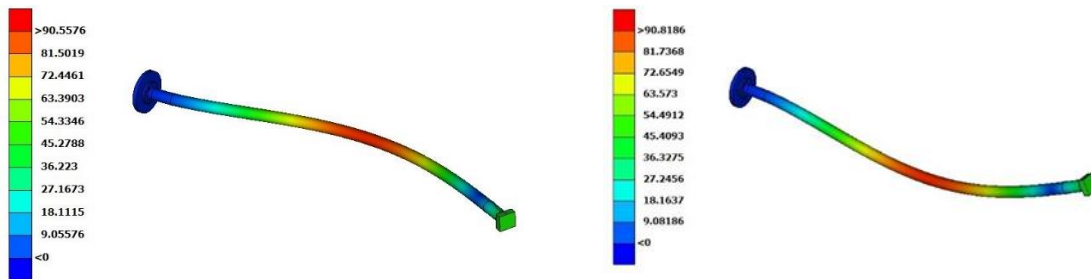
Στα σχήματα 6.2-6.4 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι 7 ιδιομορφές του μοντέλου που προέκυψαν από την επίλυση του ιδιοπρόβληματος.



1^η Ιδιομορφή 21.45Hz

2^η Ιδομορφή 22.98Hz

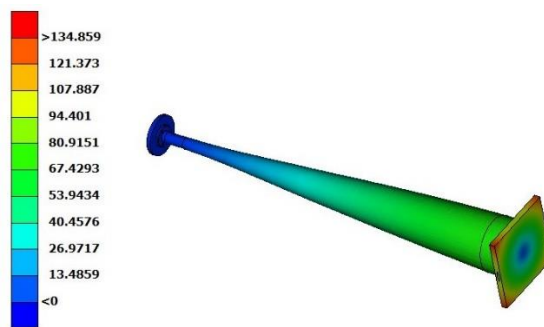
Σχήμα 6.2: 1^η ιδιομορφή και 2^η ιδιομορφή μοντέλου πεπερασμένων



3^η Ιδιομορφή 172.23Hz

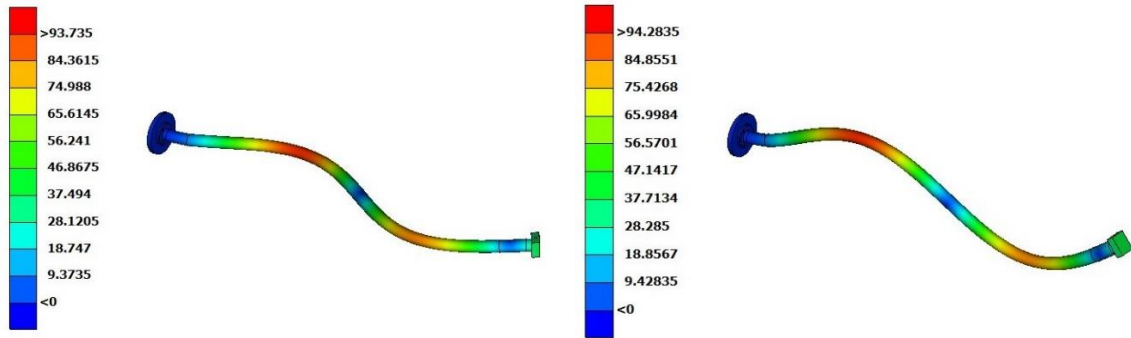
4^η Ιδιομορφή 181.22Hz

Σχήμα 6.3: 3^η ιδιομορφή και 4^η ιδιομορφή μοντέλου πεπερασμένων



5^η Ιδιομορφή 408.12Hz

Σχήμα 6.4: 5^η ιδιομορφή μοντέλου πεπερασμένων



6^η Ιδιομορφή 505.12Hz

7^η Ιδιομορφή 525.35Hz

Σχήμα 6.5: 6^η και 7^η ιδιομορφή μοντέλου πεπερασμένων

Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα μορφικής ανάλυσης του μοντέλου 1 πεπερασμένων στοιχείων

Mode	Μοντέλο 1 Aluminum Connectors Fixed Free Frequency (Hz)	
	1	21.45
2	22.98	
3	172.23	
4	181.22	
5	408.12	
6	505.12	
7	525.35	

Κεφάλαιο 7: Μορφική αναγνώριση παραμέτρων

Η διαδικασία της μορφικής αναγνώρισης των μορφικών παραμέτρων του σωλήνα από ανθρακόνημα, απαιτεί τον πειραματικό προσδιορισμό των συναρτήσεων μετάδοσης. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία με την οποία συλλέχθηκαν οι συναρτήσεις μετάδοσης για ορισμένα σημεία του σωλήνα και για διάφορες περιπτώσεις κρούσης. Στόχος του πειράματος ήταν να υπολογιστούν οι ιδιοσυχνότητες του σωλήνα και στη συνέχεια να συγκριθούν με αυτές της αριθμητικής ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων [13].

7.1 Πειραματικός προσδιορισμός συνάρτησης μετάδοσης

Για την πειραματική μορφική ανάλυση είναι απαραίτητο να οριστούν αρχικά οι οριακές συνθήκες. Ο καθορισμός τους είναι ένα σημαντικός παράγοντας καθώς επηρεάζουν τα γενικά δεδομένα της κατασκευής, κυρίως για τις μετέπειτα αναλύσεις, όπως είναι οι κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις και η σύγκριση με τα αποτελέσματα των πεπερασμένων.

Πολλές φορές η ανάλυση του μοντέλου στα πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να γίνει σε ελεύθερες συνθήκες (free-free) όπου το αντικείμενο δεν συνδέεται με το περιβάλλον. Για την προσέγγιση μιας τέτοιας κατάστασης στην πραγματικότητα, η κατασκευή μπορεί να κρεμαστεί από σκοινί ή ελατήριο. Εξίσου σημαντική για την ανάλυση είναι η μορφή της διέγερσης που θα επιλεγεί. Ένα κοινό μέσο για τη διέγερση της κατασκευής αποτελεί το κρουστικό σφυρί (Impact Hammer). Η συσκευή αυτή παράγει ένα παλμό διέγερσης στην υπό δοκιμή κατασκευή.

Αν και είναι σχετικά απλό να εφαρμοστεί αυτή η τεχνική, πιο δύσκολο είναι η απόκτηση ορθών αποτελεσμάτων. Σημαντική προϋπόθεση για αυτό αποτελεί η σωστή επιλογή του άκρου του κρουστικού σφυριού καθώς επηρεάζει άμεσα τις μετρήσεις. Το εύρος της συχνότητας διέγερσης συνδέεται με τη σκληρότητα του άκρου. Ανάλογα με το αντικείμενο μελέτης υπάρχουν διαφορετικά υλικά (κεφαλές) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ένα αρκετά μαλακό κρουστικό άκρο, πιθανόν να μην διεγείρει επαρκώς την κατασκευή.

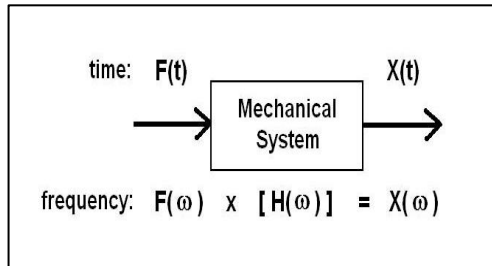
Βασικό μειονέκτημα της κρουστικής διέγερσης αποτελεί η δυσκολία εφαρμογής της σε ευαίσθητες επιφάνειες. Επιπλέον, είναι δύσκολο να ελεγχθεί το μέγεθος της δύναμης ή το φάσμα των συχνοτήτων στην κρούση. Κατά συνέπεια επηρεάζεται η αναλογία σήματος προς θόρυβο και έτσι πιθανόν να προκύψουν κακής ποιότητας δεδομένα.

Η συνάρτηση μετάδοσης (FRF) είναι μία βασική μέθοδος υπολογισμού της απόκρισης του συστήματος στο πεδίο των συχνοτήτων. Δηλαδή εξετάζει το πώς αποκρίνεται η κατασκευή υπό μία διέγερση. Η είσοδος είναι σε μορφή δύναμης ενώ η έξοδος μπορεί να είναι σε μορφή ταχύτητας, μετατόπισης ή επιτάχυνσης. Για τη μέτρηση της απόκρισης χρησιμοποιούμε διάφορους αισθητήρες. Το επιταχυνσιόμετρο είναι ο πιο κοινός αισθητήρας για τις μορφικές αναλύσεις. Καταγράφει την επιτάχυνση μιας κατασκευής υπό διέγερση και εξάγει το σήμα με τη μορφή τάσης. Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται ένα μοντέλο μίας εισόδου και μίας εξόδου. Εγκαθίσταται πάνω σε οποιαδήποτε επιφάνεια με σκοπό τη μέτρηση της κίνησής της και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την μεταβολή της επιτάχυνσης ως προς το χρόνο.

Οι συναρτήσεις μετάδοσης $H(\omega)$ ορίζονται ως ο λόγος του μετασχηματισμού Fourier των αποκρίσεων $X(\omega)$ προς τον μετασχηματισμό Fourier της δύναμης διέγερσης $F(\omega)$ και εξαρτώνται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Έτσι,

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (7.1)$$

Όπου, $X(\omega) = \int_0^\infty x(t)e^{-i\omega t} dt$ και $F(\omega) = \int_0^\infty f(t)e^{-i\omega t} dt$



Σχήμα 7.1: Μοντέλο εισόδου-εξόδου γραμμικού δυναμικού συστήματος

Αφού υπολογιστεί ο μετασχηματισμός Fourier για το σήμα εισόδου-εξόδου, υπολογίζονται οι φασματικές πυκνότητες $S_{XX}(\omega)$, $S_{FF}(\omega)$ και η διαφασματική πυκνότητα $S_{XF}(\omega)$ για τα δύο σήματα:

$$S_{XX}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2\pi T} X_T(\omega) X_T^*(\omega) \right] = X(\omega) X^*(\omega) \quad (7.2)$$

$$S_{FF}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2\pi T} F_T(\omega) F_T^*(\omega) \right] = F(\omega) F^*(\omega) \quad (7.3)$$

$$S_{XF}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2\pi T} X_T(\omega) F_T^*(\omega) \right] = X(\omega) F^*(\omega) \quad (7.4)$$

Στην περίπτωση που ο θόρυβος εμφανίζεται στην είσοδο, τότε:

$$H_1(x) = \frac{S_{XX}(\omega)}{S_{XF}(\omega)} \quad (7.5)$$

Εναλλακτικά, εάν ο θόρυβος εμφανίζεται στην έξοδο, δηλαδή στη μέτρηση της απόκρισης τότε η συνάρτηση μετάδοσης είναι:

$$H_2(x) = \frac{S_{XF}(\omega)}{S_{FF}(\omega)} \quad (7.6)$$

Γενικά, όταν εμφανίζεται θόρυβος και στην είσοδο, αλλά και στην έξοδο, τότε η συνάρτηση μετάδοσης H θα δίνεται στο διάστημα εμπιστοσύνης $H_1 \leq H \leq H_2$.

Για την εκτίμηση της ακρίβειας της μέτρησης της συνάρτησης μετάδοσης, ορίζεται ο συντελεστής ομοιότητας που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Για βέλτιστη μέτρηση πρέπει ο συντελεστής να έχει τιμή 1.

$$\gamma^2(\omega) = \frac{S_{XF}(\omega)S_{XF}^*(\omega)}{S_{XX}(\omega)S_{FF}^*(\omega)} \quad (7.7)$$

7.2 Μέθοδοι υπολογισμού παραμέτρων ταλάντωσης

7.2.1 Rational fraction polynomial method (RFPM)

Μετά τον πειραματικό προσδιορισμό των συναρτήσεων μετάδοσης του συστήματος, ακολουθεί ο υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων ω_r , των μέτρων απόσβεσης ζ_r , και των ιδιομορφών ϕ_r . Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή πειραματικών παραμέτρων είναι η RFPM (Rational Fraction Polynomial Method). Οι συναρτήσεις μετάδοσης μπορούν να γραφτούν σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\begin{pmatrix} X_1(\omega) \\ X_2(\omega) \\ \vdots \\ X_n(\omega) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) & \dots & H_{1m}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \dots & H_{2m}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \dots & H_{nm}(\omega) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_1(\omega) \\ F_2(\omega) \\ \vdots \\ F_m(\omega) \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

Η οποία γράφεται σε συμπαγή μορφή :

$$\underline{X}(\omega) = H(\omega)\underline{F}(\omega) \quad (7.9)$$

Όπου $H(\omega)$ είναι ο πίνακας μετάδοσης του συστήματος. Τα στοιχεία του πίνακα αυτού αποτελούν τις επιμέρους συναρτήσεις μετάδοσης, οι οποίες επίσης μπορεί να εκφραστούν στην κλασματική μορφή (Partial Fraction Form).

$$H(\omega) = \sum_{r=1}^N \left[\frac{r_r}{i\omega - p_r} + \frac{r_r^*}{i\omega - p_r^*} \right] \quad (7.10)$$

ή εναλλακτικά σε μια ρητή κλασματική μορφή:

$$H(\omega) = \frac{\sum_{r=0}^{2N-1} a_r(i\omega)^r}{\sum_{r=0}^{2N} b_r(i\omega)^r} \quad (7.11)$$

όπου

$$p_r = -\omega_r \zeta_r + i\omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2} \quad (7.12)$$

Στις παραπάνω εκφράσεις, p_r είναι ο r -οστός πόλος, r_r είναι το υπόλοιπο στον r -οστό πόλο, N είναι ο αριθμός βαθμών ελευθερίας του μοντέλου, a_r είναι ο σταθερός συντελεστής του πολυωνύμου του αριθμητή και b_r ο συντελεστής του πολυωνύμου του παρονομαστή.

Η Εξίσωση (7.10) παρουσιάζει τη συνάρτηση μετάδοσης με παραμετρικούς όρους, οι οποίοι καθορίζουν τη θέση των πόλων της. Δηλαδή, για ένα μοντέλο N βαθμών ελευθερίας η συνάρτηση μετάδοσης περιέχει N ζεύγη πόλων. Σε αυτή τη μορφή ο αριθμητής παρουσιάζεται ως ένα ζεύγος σταθερών μιγαδικών συζυγών, που ονομάζονται υπόλοιπα. Κάθε πόλος έχει διαφορετικό υπόλοιπο, με το οποίο συσχετίζεται. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μορφή της συνάρτησης μετάδοσης στη μορφική αναγνώριση, οι άγνωστοι παράμετροι είναι οι πόλοι και τα υπόλοιπα.

Η εξίσωση (7.11) αποδίδει τη συνάρτηση μετάδοσης ως ένα κλάσμα δύο πολυωνύμων, ανεξάρτητου βαθμού το ένα από το άλλο. Οι ρίζες του αριθμητή αποτελούν τα μηδενικά (zeros) της συνάρτησης μετάδοσης και οι ρίζες του πολυωνύμου του παρονομαστή, το οποίο αποκαλείται χαρακτηριστικό πολυώνυμο, αποτελούν τους πόλους αυτής. Για αυτή τη μορφή συνάρτησης οι άγνωστοι είναι οι πόλοι και οι μηδενιστές.

Οι δύο μορφές, στις οποίες έχει εκφραστεί η συνάρτηση μετάδοσης, εμπεριέχουν ακριβώς τις ίδιες πληροφορίες και συσχετίζονται μεταξύ τους. Δηλαδή γνωρίζοντας τους συντελεστές της μιας μορφής μπορεί να υπολογισθούν οι συντελεστές της άλλης. Το πρόβλημα της αναγνώρισης των παραμέτρων περιλαμβάνει την εύρεση των άγνωστων σταθερών $a_r, (r=1, \dots, 2N-1)$ και $b_r, (r=1, \dots, 2N)$, έτσι ώστε το σφάλμα ανάμεσα στην αναλυτική έκφραση της συνάρτησης μετάδοσης στη μορφή της εξίσωσης (7.11) και στην πειραματικά εκτιμώμενη να είναι το ελάχιστο δυνατό. Για το σκοπό αυτό, ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στην αναλυτική συνάρτηση μετάδοσης $H(\omega)$ και στην πειραματική $H_e(\omega)$, στη συχνότητα ω , ως η συνάρτηση λάθους στη μορφή:

$$\underline{e}' = \sum_{r=0}^{2N-1} a_r (i\omega)^r / \sum_{r=0}^{2N} b_r (i\omega)^r - H_e i\omega_n \quad (7.13)$$

Ή εναλλακτικά

$$\underline{e}' = \sum_{r=0}^{2N-1} a_r (i\omega)^r - H_e(\omega_n) \left[\sum_{r=0}^{2N-1} b_r (i\omega)^r + (i\omega_n)^{2N} \right] \quad (7.14)$$

Με $b_{2N} = 1$. Στη συνέχεια, ορίζεται ένα διάνυσμα σφάλματος για όλες τις μετρούμενες συχνότητες:

$$\underline{e}' = (e'_1 \quad e'_2 \quad \dots \quad e'_L)^T \quad (7.15)$$

Άρα, η 7.14 γράφεται σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\underline{e}' = \begin{bmatrix} 1 & (i\omega_1) & (i\omega_1)^2 & \dots & (i\omega_1)^{2N-1} \\ 1 & (i\omega_2) & (i\omega_2)^2 & \dots & (i\omega_2)^{2N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & (i\omega_L) & (i\omega_L)^2 & \dots & (i\omega_L)^{2N-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{2N-1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} H_e(\omega_1)(\omega_1)^{2N} \\ H_e(\omega_2)(\omega_2)^{2N} \\ \vdots \\ H_e(\omega_L)(\omega_L)^{2N} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} H_e(\omega_1) & H_e(\omega_1)(j\omega_1) & \dots & \dots & H_e(\omega_1)(j\omega_1)^{2N-1} \\ H_e(\omega_2) & H_e(\omega_2)(j\omega_2) & \dots & \dots & H_e(\omega_2)(j\omega_2)^{2N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_e(\omega_L) & H_e(\omega_L)(j\omega_L) & \dots & \dots & H_e(\omega_L)(j\omega_L)^{2N-1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} b \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{2N-1} \end{pmatrix} \quad (7.16)$$

ή εναλλακτικά, στη συμπαγέστερη μορφή

$$\underline{e}' = P\underline{a} - T\underline{b} - w \quad (7.17)$$

Η συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, συνάρτηση κόστους ορίζεται

$$j = \underline{e}^{*T} \underline{e} \quad (7.18)$$

Αντικαθιστώντας την Εξίσωση 7.17 στην 7.18 εξάγεται η σχέση:

$$j(\underline{a}, \underline{b}) = \underline{a}^T Re(\underline{P}^* \underline{T} \underline{P}) \underline{a} + \underline{b}^T Re(\underline{T}^* \underline{T}) \underline{b} + \underline{w}^* \underline{T} \underline{w} - 2 \underline{a}^T Re(\underline{P}^* \underline{T} \underline{P}) \underline{b} - 2 \underline{a}^T Re(\underline{P}^* \underline{T} \underline{w}) - 2 \underline{b}^T Re(\underline{T}^* \underline{T} \underline{w}) \quad (7.19)$$

Η ιδανική περίπτωση αντιστοιχεί στις βέλτιστες τιμές των διανυσμάτων \underline{a} και \underline{b} , για τις οποίες η συνάρτηση κόστους μηδενίζεται. Στην πράξη αυτό που επιζητείται είναι η ελαχιστοποίηση της διαφοράς των πειραματικών από τα αναλυτικά αποτελέσματα. Η ιδανική συνθήκη ισχύει όταν τα διανύσματα \underline{a} και \underline{b} ικανοποιούν ταυτόχρονα τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial j}{\partial \underline{a}} = Re(\underline{P}^* \underline{T} \underline{P}) \underline{a} - Re(\underline{P}^* \underline{T} \underline{T}) \underline{b} - Re(\underline{P}^* \underline{T} \underline{w}) = 0 \quad (7.20)$$

και

$$\frac{\partial j}{\partial \underline{b}} = Re(\underline{T}^* \underline{T}) \underline{b} - Re(\underline{T}^* \underline{T} \underline{P}) \underline{a} - Re(\underline{T}^* \underline{T} \underline{w}) = 0 \quad (7.21)$$

Έτσι, καταστρώνεται ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων συναρτήσει των \underline{a} και \underline{b} , που μπορεί να επιλυθεί με κατάλληλες αριθμητικές μεθόδους. Μετά την εύρεση των βέλτιστων τιμών των συντελεστών του αριθμητή και του παρονομαστή της εξίσωσης 7.11 μπορούν να υπολογιστούν οι μορφικές παράμετροι του συστήματος.

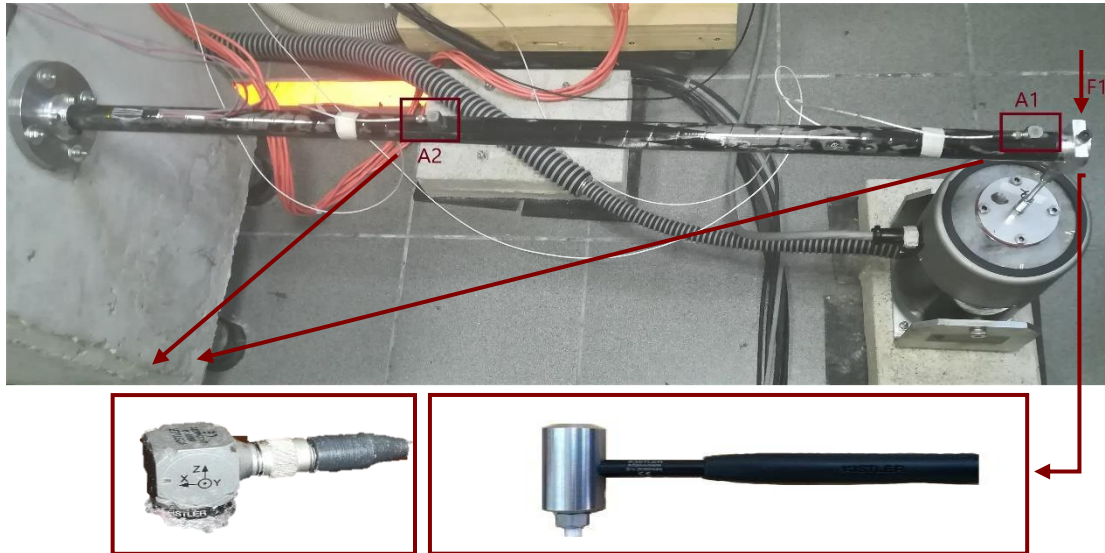
7.3 Προσδιορισμός παραμέτρων ταλάντωσης

7.3.1 Οριακές συνθήκες, διέγερση και μετρήσεις πειράματος

Στο εργαστηριακό πείραμα οι οριακές συνθήκες πάκτωσης ήταν εύκολο να προσομοιωθούν, καθώς η κατασκευή είχε μικρό βάρος. Συγκεκριμένα, πακτώθηκε το ένα άκρο του σωλήνα από τη βάση στήριξης, η οποία βιδώθηκε σε άκαμπτη επιφάνεια. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μόνο για την περίπτωση των συνδέσμων από αλουμίνιο, εφόσον η συμπεριφορά του μοντέλου 2 δεν θα έδινε αξιόπιστα αποτελέσματα στη μορφική ανάλυση. Οι μετρήσεις στην περίπτωση των συνδέσμων από ABS, δεν παρατίθενται καθώς ο πακτωμένος σύνδεσμος έσπασε κατά τη διάρκεια στατικής διέγερσης.

Κατά την εφαρμογή της πειραματικής διάταξης για την μέτρηση των συναρτήσεων μετάδοσης τοποθετήθηκαν 2 τριαξονικά αισθητήρια (επιταχυνσιόμετρα) σε δύο σημεία των σωλήνων με αριθμούς A1 και A2 αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2. Συγκεκριμένα, το επιταχυνσιόμετρο A2 τοποθετήθηκε σε απόσταση 415mm από την αρχή του σωλήνα και

το A1 σε απόσταση 980mm, τα οποία μετρούν επιταχύνσεις σε τρεις διευθύνσεις, παράλληλα στο σωλήνα, κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο και κάθετα στο κατακόρυφο επίπεδο.

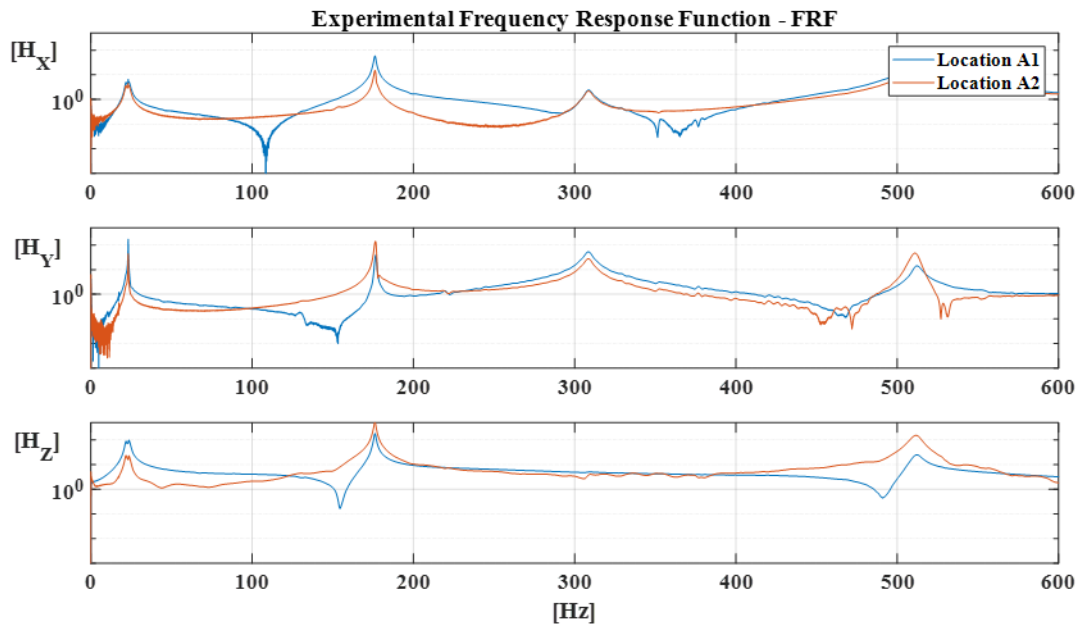


Σχήμα 7.2: Σημεία τοποθέτησης τριαξονικών επιταχυνσιόμετρων

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν κρουστικές διεγέρσεις στους άξονες x,y,z στο σύνδεσμο 2, έτσι ώστε αφού συλλεχθούν αρκετές μετρήσεις, να υπολογιστούν οι συναρτήσεις μετάδοσης. Κάθε τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο καταγράφει την απόκριση του συστήματος σε τρία κανάλια (x, y, z). Αυτό σημαίνει πως για μία διέγερση, η καταγραφή γίνεται σε έξι κανάλια (2 επιταχυνσιόμετρα).

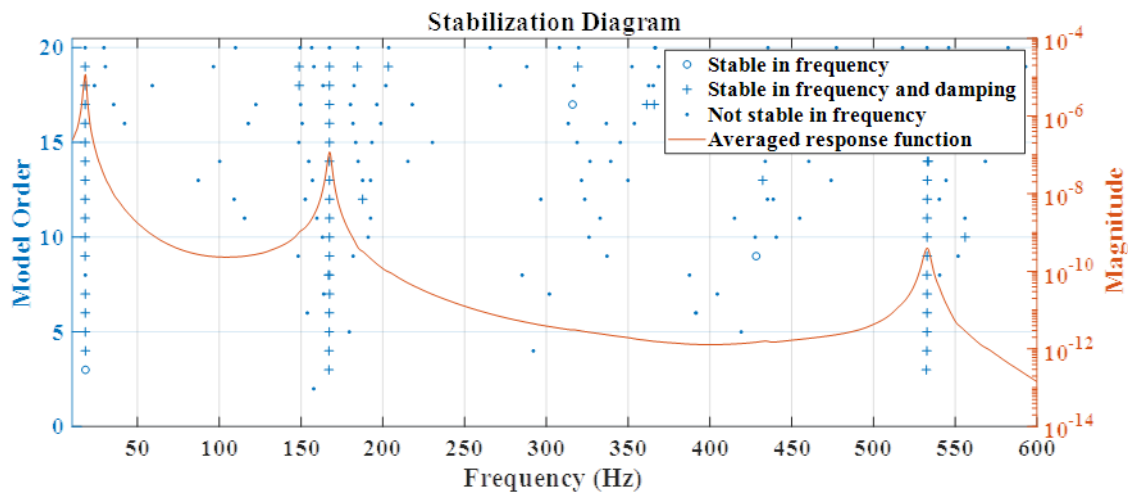
Η παρουσίαση των συναρτήσεων μετάδοσης αποφασίστηκε να γίνει σε ένα εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος 0-600Hz. Η συλλογή και επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων έγινε μέσω κατάλληλου λογισμικού Labview της National Instruments. Στη συνέχεια, αφού συγκεντρώθηκαν οι χρονικές ιστορίες των επιταχύνσεων, επεξεργάστηκαν στο λογισμικό MATLAB, για να εξαχθούν οι ιδιοσυχνότητες και οι αποσβέσεις.

Στο σχήμα 7.3 παρατίθενται οι συναρτήσεις μετάδοσης των διεγέρσεων για το μοντέλο 1 στις 3 διευθύνσεις, όπως προέκυψαν από το πείραμα. Η μπλε γραμμή αναφέρεται στις λήψεις του πρώτου επιταχυνσιόμετρου και η κόκκινη στο δεύτερο.



Σχήμα 7.3: Μέτρο συνάρτησης μετάδοσης ως προς τις συχνότητες της ταλάντωσης του σωλήνα με συνδέσμους από αλουμίνιο για τη διέγερση F1 (z axis)

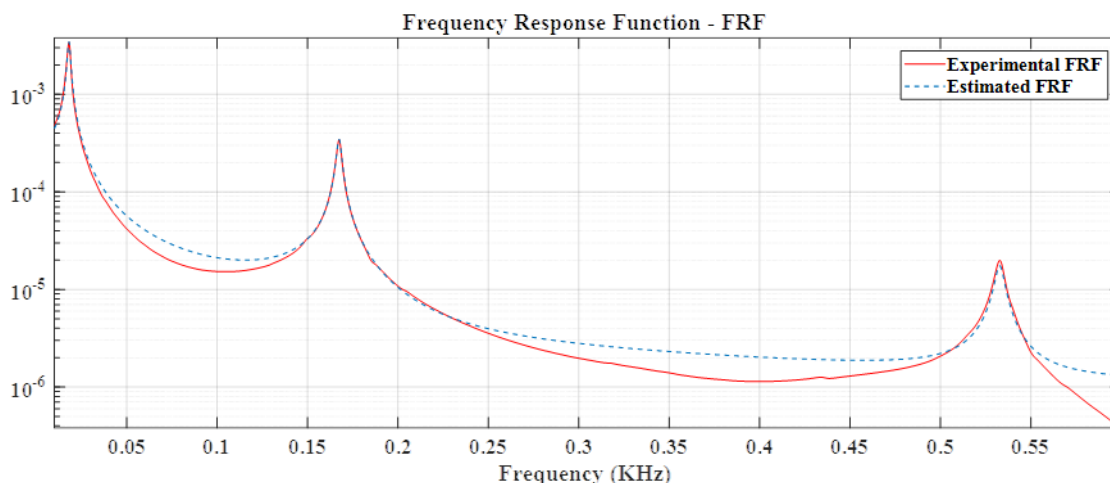
Στη συνέχεια, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου RFPM με στόχο τη βέλτιστη αναγνώριση των μορφικών παραμέτρων του συστήματος και παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου.



Σχήμα 7.4: Διάγραμμα Ευστάθειας (Stabilization diagram)

Αναφορικά με την ευστάθεια των συστημάτων, το λογισμικό MATLAB μας παρέχει έναν εύκολο τρόπο εύρεσης της θέσης των πόλων της χαρακτηριστικής εξίσωσης του συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4. Από το διάγραμμα ευστάθειας μπορεί να

αποφανθεί αν το σύστημα είναι ευσταθές και δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστούν οι συχνότητες που παραμένουν σταθερές για συγκεκριμένη τάξη πολυωνύμου. Στο σχήμα 7.5 παρουσιάζεται η συνάρτηση μετάδοσης του συστήματος για μία διέγερση, καθώς και η ανακατασκευασμένη μορφή της.



Σχήμα 7.5: Διαγράμμα ανακατασκευασμένης καμπύλης συνάρτησης μετάδοσης

7.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης και πειράματος

Σε αυτό το σημείο, από την άντληση των παραπάνω αποτελεσμάτων θα γίνει σύγκριση μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων των δύο μοντέλων που προέκυψαν από την ιδιομορφική ανάλυση πεπερασμένων με αυτές του πειράματος. Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες κάθε διαδικασίας, καθώς και το σφάλμα που προέκυψε για κάθε ιδιομορφή.

Πίνακας 7.1: Σύγκριση ιδιοσυχνοτήτων μοντέλου πεπερασμένων και πειραματικών ιδιοσυχνοτήτων για το μοντέλο 1

Mode	Identified		Numerical - FEA	
	Frequency (Hz)	Damping (%)	Frequency (Hz)	Relative Error (%)
1	21.92	0.85	21.45	2.14
2	23.89	0.63	22.98	3.8
3	176.81	0.82	172.23	2.59
4	178.53	0.25	181.22	1.5
5	310.32	0.71	408.12	31.5

6	510.14	0.91	505.12	0.98
7	511.36	1.2	525.35	2.73

Παρατηρούμε πως εμφανίζεται ένα σχετικό σφάλμα που κυμαίνεται μεταξύ 1.5%-31.5%. Υπάρχει αρκετά καλή σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των τιμών των οποίων προκύπτουν από το προτεινόμενο θεωρητικό μοντέλο με εξαίρεση τη 5^η ιδιομορφή η οποία είναι στρεπτική.

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία σαφώς και θα έχει κάποια απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα εξαιτίας των χαρακτηριστικών των σύνθετων υλικών. Σημαντικός παράγοντας λάθους στη μοντελοποίηση σύνθετων υλικών είναι η αβεβαιότητα που υπάρχει στην ακρίβεια των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων. Οι ιδιότητες του υλικού δεν μπορούν να προβλεφθούν απευθείας από τη βιβλιογραφία. Τόσο η διαδικασία παραγωγής, όσο και ο τύπος του υλικού επηρεάζουν τις ιδιότητές του. Σαφώς, δεν επιτυγχάνεται ακριβής προσέγγιση της μοντελοποίησης της περιέλιξης των ινών, που σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνει περαιτέρω έρευνα και να εφαρμοσθούν μέθοδοι βελτιστοποίησης και ενημέρωσης των μοντέλων.

Η παραδοχή που γίνεται στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι πως το σύνθετο υλικό θεωρείται ως ένα ομογενές ορθοτροπικό μέσο και δεν λαμβάνει υπόψη τις εσωτερικές ιδιαιτερότητες της γεωμετρίας του σύνθετου. Για παράδειγμα, στη μοντελοποίηση των σωλήνων θεωρήθηκε ομοιόμορφη κατανομή πάχους σε κάθε στρώμα (layer), όμως κατά την κατεργασία τους πιθανόν να υπήρξαν διακυμάνσεις. Δεδομένης της συμπίεσης που ασκούν τα πάνω στρώματα στα χαμηλότερα, τα εσωτερικά στρώματα τείνουν να είναι λεπτότερα από τα εξωτερικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άγνωστη μεταβολή των ιδιοτήτων των υλικών που όμως, δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί για να συνυπολογιστεί στο σφάλμα. Προκειμένου να επιτευχθεί η επαλήθευση του μοντέλου, απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός του μοντέλου, σωστή διακριτοποίηση της γεωμετρίας του και ακριβής περιγραφή των δύο συστατικών του σύνθετου.

Κεφάλαιο 8: Σωληνωτά χωροδικτυώματα carbon

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η ανάλυση μίας υφιστάμενης κατασκευής από σωλήνες ανθρακονημάτων με μεταλλικούς συνδέσμους, η οποία χρησιμοποιείται σαν υποπλαισιο αγωνιστικής μηχανής. Ο συνδυασμός αλουμινίου και carbon χρησιμοποιείται για την ελάττωση του βάρους της κατασκευής και για την εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων των δύο υλικών. Η κατασκευή, αφού μοντελοποιηθεί στο λογισμικό ANSA, θα αναλυθεί στατικά και αξιολογούνται τα αναλυτικά αποτελέσματα με σύγκριση με πειραματικά.



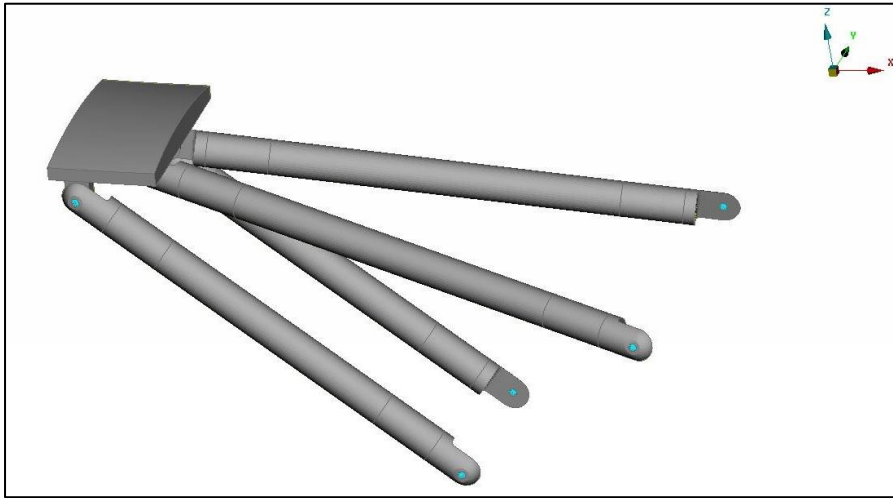
Σχήμα 8.1: Απεικόνιση γεωμετρίας υποπλαισίου

8.1 Μοντελοποίηση υποπλαισίου

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1, το υποπλαισίον αποτελείται από τέσσερις σωλήνες και 8 συνδέσμους αλουμινίου. Η σύνδεση μεταξύ τους πραγματοποιείται από εποξική κόλλα δύο συστατικών η οποία στη συνέχεια μοντελοποιήθηκε ως ιστροπικό υλικό με ιδιότητες της Plexus M300 που παρατίθενται στον πίνακα 4.5.

Το αλουμίνιο καθορίζεται ως ιστροπικό υλικό και καταχωρείται με MAT1, ενώ οι σωλήνες carbon καθορίζονται ως ορθοτροπικά υλικά (MAT8). Επισημαίνεται ότι η κατασκευάστρια εταιρία είναι η ίδια, οπότε μπορούμε να καθορίσουμε και τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες για τους σωλήνες. Οι ακολουθία στρώσεων είναι η επίσης η ίδια με του μοντέλου του

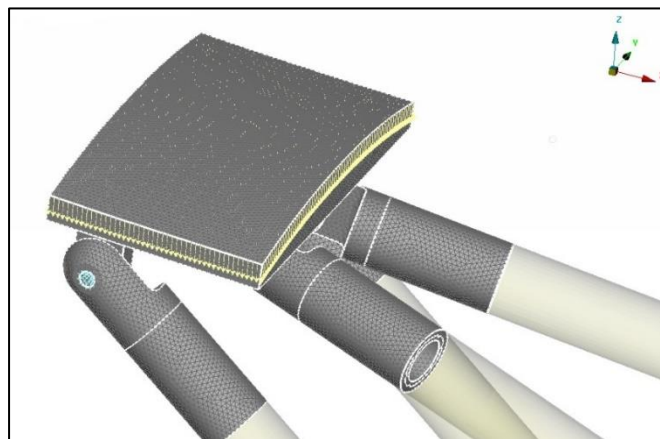
εργαστηριακού πειράματος. Οι πίνακες 4.1 και 4.2 δίνουν τις απαραίτητες πληροφορίες για να συμπληρωθούν οι καρτέλες του λογισμικού και να χαρακτηριστούν πλήρως οι σωλήνες.



Σχήμα 8.2: Ολοκληρωμένη μοντέλο υποπλαισίου

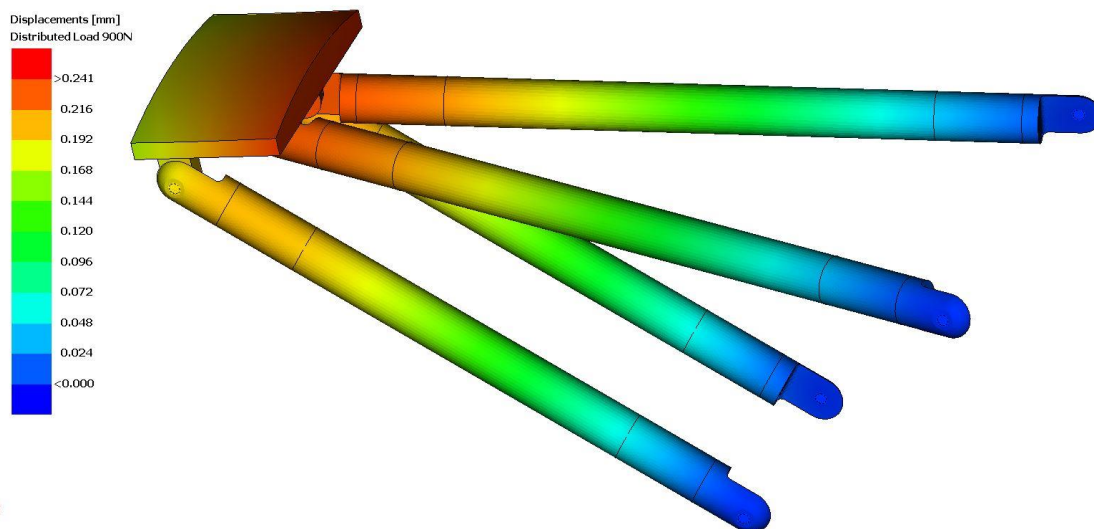
Όσον αφορά τη διακριτοποίηση του μοντέλου, για τους συνδέσμους αλουμινίου χρησιμοποιήθηκαν χωρικά τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements) με γεωμετρία τετραέδρου (tetras), με πλευρά που ορίστηκε στα 2mm. Οι σωλήνες προσομοιώθηκαν με επιφανειακά δισδιάστατα τετραγωνικά στοιχεία (quads). Οι τέσσερις σύνδεσμοι συνδέονται με βάση αλουμινίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2, ενώ για τους υπόλοιπους τέσσερις θεωρείται πάκτωση και έχουν περιοριστεί όλοι οι βαθμοί ελευθερίας με SPC1 (single point constraint). Επιπλέον, οι βίδες έχουν προσομοιωθεί με RBE3.

Στη **στατική μελέτη** που πραγματοποιείται, εφαρμόζεται ομοιόμορφη κατανομή δύναμης 900N στη βάση αλουμινίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.3, για την ανάδειξη αποτελεσμάτων μετατόπισης και μέγιστης τάσης.



Σχήμα 8.3: Ομοιόμορφη κατανομή δύναμης 900N στη βάση αλουμινίου

Ο υπολογισμός βασίζεται στη μετατόπιση των συνδέσμων και της βάσης κατά τη φόρτισή τους και την ανάπτυξη τάσεων στη γύρω περιοχή. Βάση των αποτελεσμάτων, με το συνδυασμό των δύο υλικών η μέγιστη μετατόπιση που παρατηρείται είναι 0.24mm, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.4.



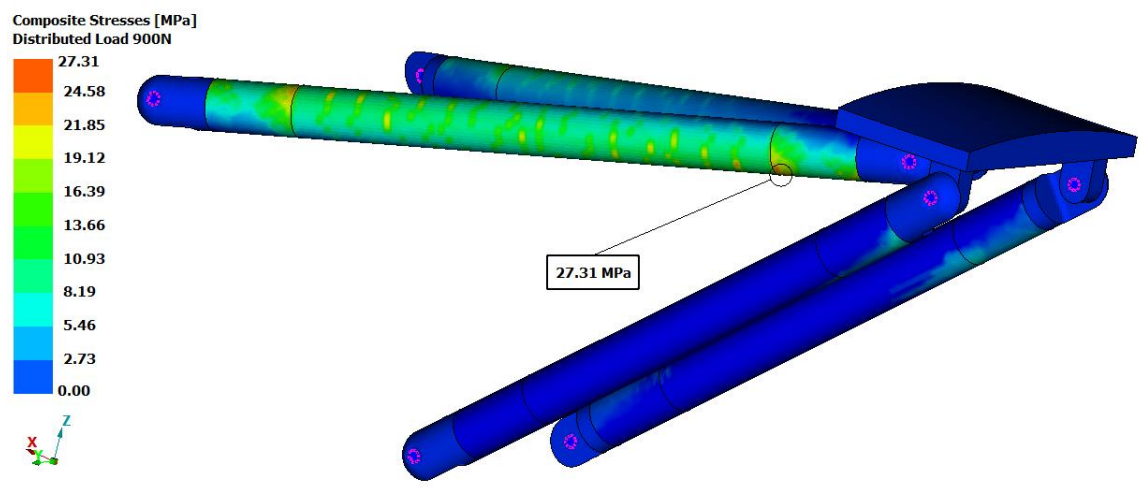
Σχήμα 8.4: Μετατοπίσεις μοντέλου κατά τη φάση φόρτισης 900N.

Σύγκριση αποτελεσμάτων

Η συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων των πεπερασμένων στοιχείων είναι αρκετά καλή διότι και στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε, μετρήθηκε μέγιστη μετατόπιση 0.8mm.

Σαφώς και είναι λογικό να εμφανίζεται κάποια απόκλιση, διότι η συνδυασμένη φόρτιση που ορίστηκε με χρήση του λογισμικού δεν μπορεί να επιτευχθεί κατά την πειραματική διαδικασία. Η παραμετρική ανάλυση μπορεί να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την επίδραση της κατανομής δυνάμεων, αλλά δεν εξασφαλίζει ρεαλιστική συμπεριφορά. Το σφάλμα που προκύπτει οφείλεται και σε προβλέψιμους παράγοντες. Ενώ οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού είναι πραγματικές ως νούμερα, οι διάφορες μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης των υλικών αλλάζουν τις ιδιότητές του ως προς κάθε κατεύθυνση.

Επιπλέον, μέγιστη τάση 27.31MPa παρουσιάζεται στο σημείο σύνδεσης του συνδέσμου με έναν από τους σωλήνες, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5.



Σχήμα 8.5: Μέγιστη τάση του μοντέλου κατά τη φάση φόρτισης 900N

Κεφάλαιο 9: Εφαρμογή διάταξης σε χωρικό δικτύωμα

Οι περισσότερες κατασκευές, όπως γέφυρες ή κτίρια, αποτελούνται από δικτυώματα, τα οποία ενώνονται και σχηματίζουν ένα χωροδικτύωμα. Βασικές απαιτήσεις τέτοιων κατασκευών, είναι η αντοχή και η λειτουργικότητα, σε συνδυασμό βέβαια με την ικανοποίηση απαιτήσεων οικονομικής φύσεως. Στην ανάλυση δικτυωμάτων η δύναμη της κάθε ράβδου έχει τη διεύθυνση του άξονά της, γι' αυτό τα ινοπλισμένα πολυμερή, δηλαδή σύνθετα υλικά που αποτελούνται από συνεχείς μονοδιευθυντικές ίνες θεωρούνται μία από τις καλύτερες επιλογές υλικού για την κατασκευή χωροδικτυωμάτων. Συγκεκριμένα, τέτοιες κατασκευές επωφελούνται πλήρως από την υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα που αυτά παρουσιάζουν στη διεύθυνση των ινών, με ταυτόχρονη εξοικονόμηση βάρους.

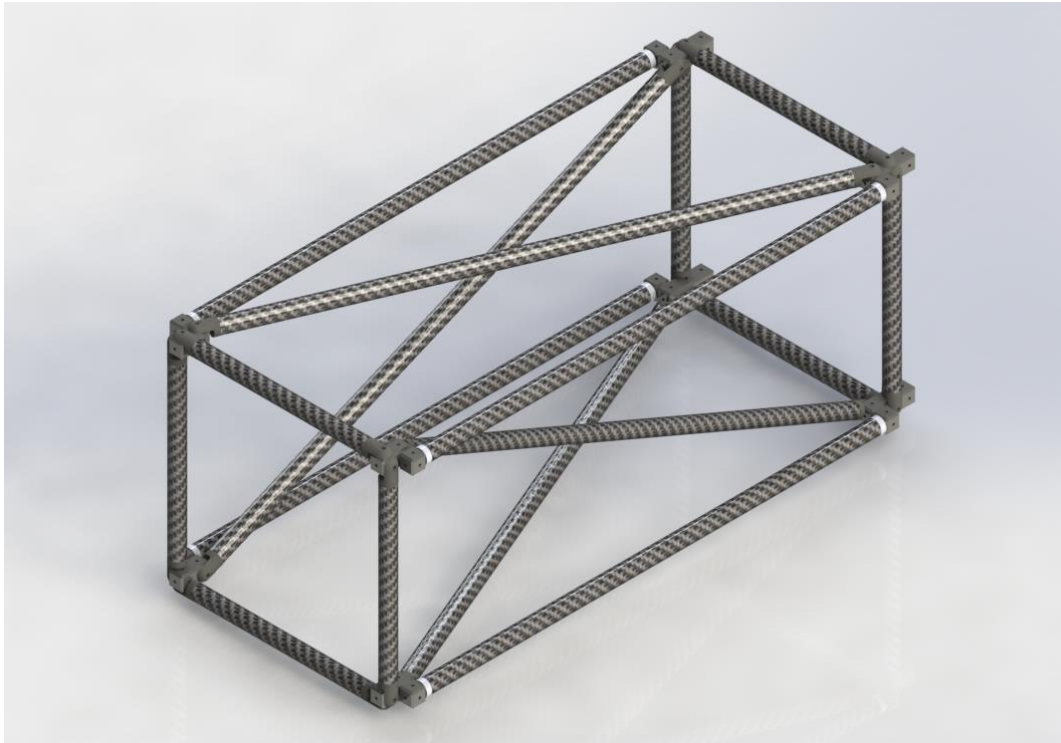
9.1 Περιγραφή χωροδικτυώματος

Με τον όρο δικτύωμα, εννοούμε ένα σύστημα δεσμικών ράβδων, που είναι κατάλληλα συνδεδεμένες στα άκρα τους, έτσι ώστε να αποτελούν ένα στερεό σχηματισμό. Οι αρθρώσεις ονομάζονται κόμβοι και οι στερεοί φορείς ράβδοι. Τα δικτυώματα είναι από τους σημαντικότερους τύπους μηχανικών κατασκευών.

Στην περίπτωση κατά την οποία όλες οι ράβδοι δικτυώματος βρίσκονται σε ένα επίπεδο και η φόρτιση του ανήκει στο επίπεδο αυτό, το δικτύωμα αυτό αναφέρεται ως **επίπεδο**, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, ο φορέας ονομάζεται χωρικό δικτύωμα ή **χωροδικτύωμα**.

Σωλήνες κυκλικής διατομής χρησιμοποιούνται συχνά ως μέλη δικτυωμάτων σε διάφορες κατασκευές. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η χρήση της διάταξης του σωλήνα με τους συνδέσμους ως μέλη για το σχηματισμό χωροδικτυώματος. Οι σωλήνες ανθρακονημάτων αντιστοιχούν με τις ράβδους του δικτυώματος, ενώ στους κόμβους του χρησιμοποιείται μόνο το μέρος με τις προεξοχές, ενώ στο επάνω μέρος τους γίνεται μία διαμόρφωση γεωμετρίας για την επίτευξη συναρμολόγησης. Σημειώνεται ότι για το χωροδικτύωμα θα αναλυθεί μόνο ως αριθμητικό μοντέλο.

Το χωροδικτύωμα που σχεδιάστηκε έχει βασικές διαστάσεις 970mm μήκος, 430mm μήκος, ύψος 487mm. Χρησιμοποιήθηκαν οι σωλήνες ίδιων διαστάσεων εσωτερικής και εξωτερικής διαμέτρου 25mm και 28mm αντίστοιχα και στους κόμβους σχεδιάστηκαν σύνδεσμοι με γεωμετρία κύβου για να μπορεί η συναρμολόγηση με τους συνδέσμους που σχεδιάστηκαν και για την πειραματική διαδικασία. Κάθε κύβος έχει ακμή 28.7mm. Στο σχήμα 9.1 παρουσιάζεται η συνολική γεωμετρία του χωροδικτυώματος, όπως σχεδιάστηκε.



Σχήμα 9.1: Σχηματική αναπαράσταση του χωροδικτυώματος

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού, η μοντελοποίηση του χωροδικτυώματος πραγματοποιήθηκε στο ANSA, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Οι σύνδεσμοι αλουμινίου αποδείχθηκαν ως πιο στιβαροί κατά τη σύνδεσή τους με τους σωλήνες από ανθρακόνημα, έτσι αποφασίστηκε το χωροδικτύωμα να αποτελείται από συνδέσμους αυτού του υλικού.

9.1.1 Στατική ανάλυση χωροδικτυώματος

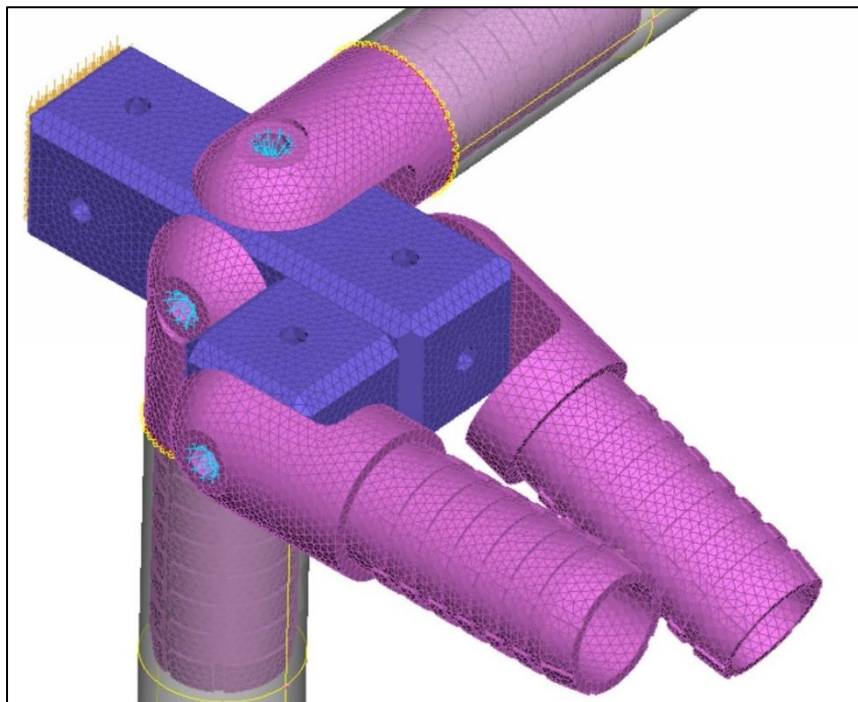
Στην ανάλυση του χωροδικτυώματος με πεπερασμένα στοιχεία η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια, όπως και για την προσομοίωση που προηγήθηκε για το συναρμολόγημα (μοντέλο 1).

Οι σωλήνες του χωροδικτυώματος αποφασίστηκε να διακριτοποιηθούν με επιφανειακά δισδιάστατα τριγωνικά στοιχεία. Η πλευρά του τριγώνου ορίζεται σε 2.00mm, αλλά προσαρμόζεται αναλόγως όπου απαιτείται. Για τη διακριτοποίηση των συνδέσμων και της εποξικής κόλλας χρησιμοποιήθηκαν χωρικά τρισδιάστατα στοιχεία (solid elements) με γεωμετρία τετραέδρου (tetras). Τα τετραεδρικά αυτά στοιχεία έχουν πλευρά επίσης 2.00mm.

Οι βασικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού των σωλήνων παρατίθενται στον πίνακα 4.2 και οι ιδιότητες των συνδέσμων αλουμινίου στον πίνακα 4.3 που βρίσκονται στο τέταρτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, καθορίζονται οι τιμές της κόλλας που χρησιμοποιήθηκε και στην πειραματική διαδικασία, που καταγράφονται στον πίνακα 4.5. Οι σύνδεσμοι και η κόλλα ορίστηκαν ως ιστροπικά υλικά και καταχωρήθηκαν με MAT1. Ο σωλήνας προσομοιώθηκε με ορθοτροπικό υλικό και επιλέχθηκε το MAT8. Αντίστοιχα, καθορίστηκαν και οι γωνίες τυλίγματος για κάθε στρώση του σύνθετου υλικού ως εξής: $[\pm 8/+86/\pm 8/\pm 8]_T$. Κάθε στρώση έχει διαφορετικό πάχος, ανάλογα με τη γωνία τυλίγματος δηλαδή, για γωνίες: ± 8 είναι 0.52mm και για $+86$ είναι 0.16mm.

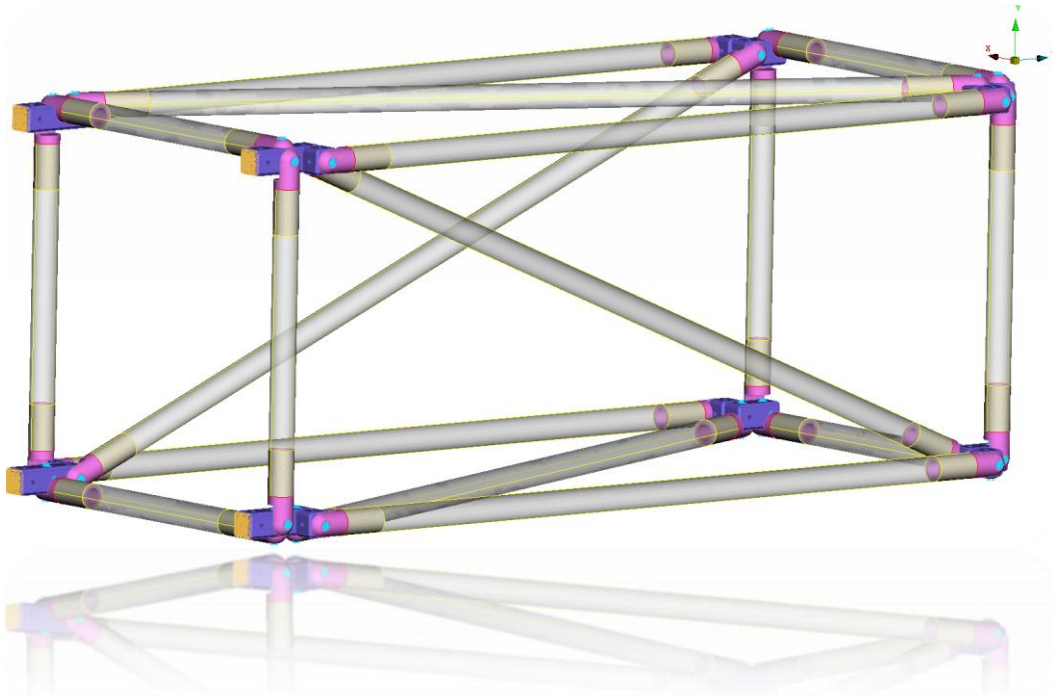
Μετά τη μοντελοποίηση του χωροδικτυώματος, εξετάζεται ολόκληρο το μοντέλο στατικά με την εφαρμογή δύναμης 1000N σε έναν από τους κάτω κόμβους του, στη διεύθυνση y, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.4. Το μοντέλο του χωροδικτυώματος αντιμετωπίζεται ως πακτωμένο.

Ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των συνδέσμων μοντελοποιείται με στοιχεία RBE2 και προσομοιώνεται στερεή σύνδεση με βίδα. Στο σχήμα 9.2 παρουσιάζεται η προσομοίωση σύνδεσης του χωροδικτυώματος για ένα κόμβο του. Η πάκτωση εφαρμόζεται και στους τέσσερις κόμβους από τη μία πλευρά του, συγκεκριμένα σε μία έδρα του κύβου και για αυτή την επιφάνεια έχουν περιοριστεί όλοι οι βαθμοί ελευθερίας με SPC1 (single point constraint), όπως φαίνεται στο σχήμα 9.2.

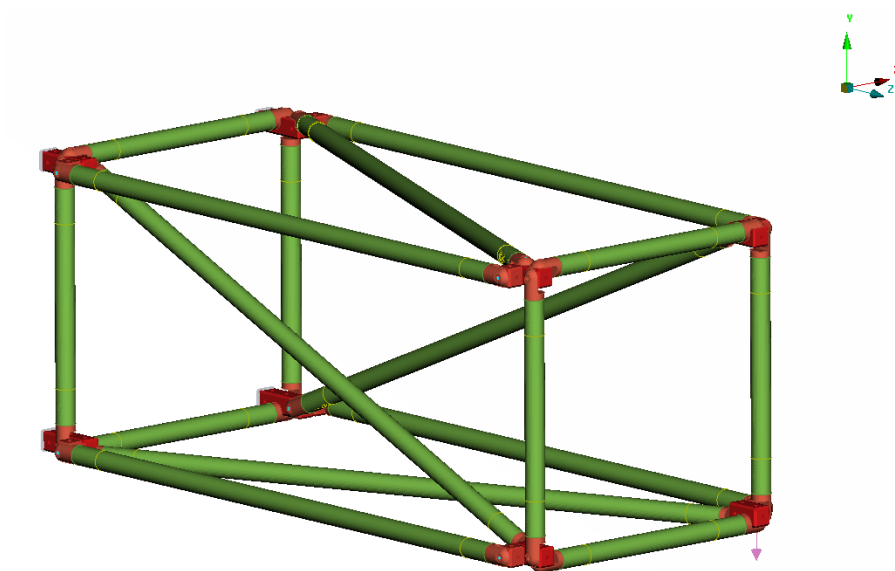


Σχήμα 9.2: Προσομοίωση σύνδεσης του χωροδικτυώματος για ένα κόμβο του

Το τελικό μοντέλο, όπως διαμορφώθηκε στο ANSA pre-processor αποτελείται από 518984 επιφανειακά δισδιάστατα τριγωνικά στοιχεία και 1543869 τετραεδρικά χωρικά στοιχεία διακριτοποίησης. Η τελική μοντελοποιημένη γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 9.3.

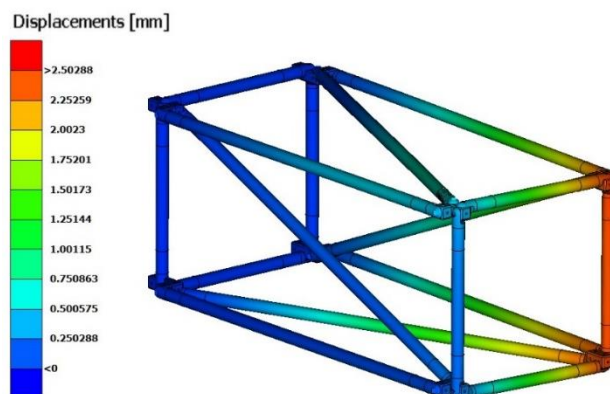


Σχήμα 9.3: Ολοκληρωμένο μοντέλο πεπερασμένων του χωροδικτύωματος



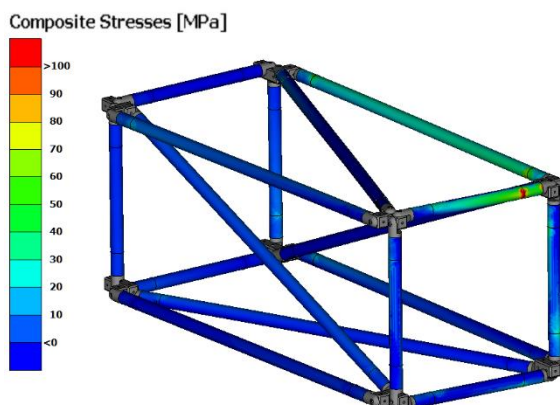
Σχήμα 9.4: Γραφική απεικόνιση φόρτισης 1000N

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πακέτο μΕΤΑ post-processor, της BETA CAE Systems. Τα αποτελέσματα αφορούν τις μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται στους κόμβους και τις ράβδους του χωροδικτυώματος, καθώς και τη μέγιστη μετατόπισή του. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 9.5 στα σημεία που ασκείται η δύναμη παρατηρείται μετατόπιση 2.5mm.



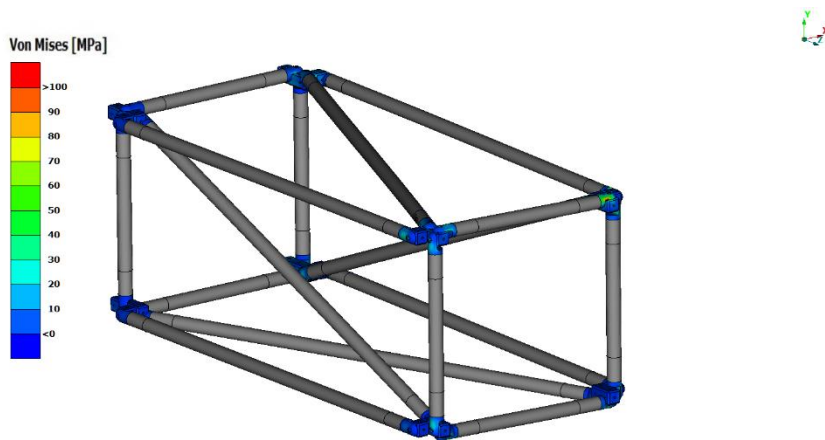
Σχήμα 9.5: Μετατόπιση μοντέλου χωροδικτυώματος για την περίπτωση υποβολής δύναμης 1000N

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι οι συνολικές αναπτυσσόμενες τάσεις είναι πολύ μικρές ή και μηδενικές σε σχέση με τα σημεία εφαρμογής δύναμης, στα οποία εμφανίζεται τάση 100MPa. Όπως ήταν αναμενόμενο από προηγούμενες αναλύσεις που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο σημείο σύνδεσης του σωλήνα με το σύνδεσμο. Τα αποτελέσματα που λαμβάνουν υπόψη τις τάσεις και του σύνθετου υλικού κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά.



Σχήμα 9.6: Γραφική απεικόνιση μέγιστης τάσης (Composite Stresses)

Σε δεύτερο σενάριο ανάλυσης, γίνεται εξέταση μόνο των ιστροπικών υλικών, συγκεκριμένα του αλουμινίου που βρίσκεται στους κόμβους του χωροδικτυώματος. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση τάσεων Von Mises παρουσιάζονται στην εικόνα 9.7.



Σχήμα 9.7: Γραφική απεικόνιση μέγιστης τάσης (Von Mises)

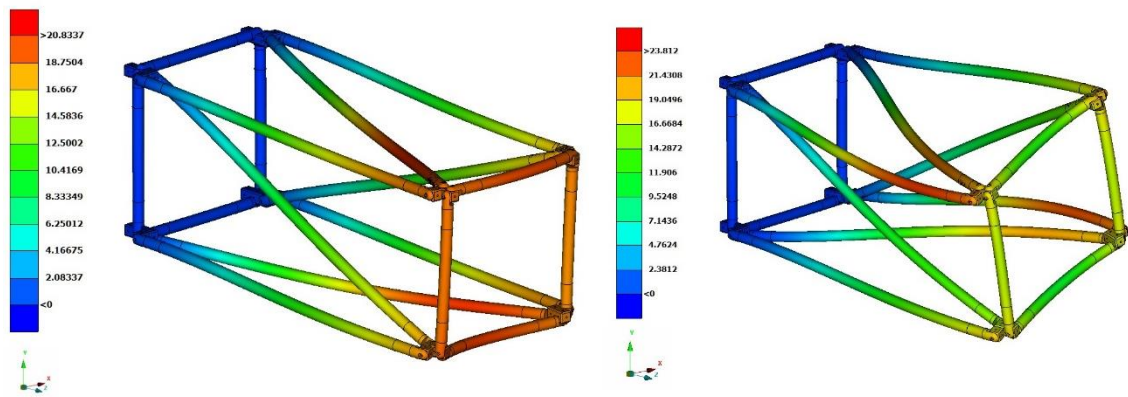
Η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στους κόμβους είναι 100MPa, γνωρίζουμε όμως ότι το όριο διαρροής του αλουμινίου είναι 250MPa, άρα κυμαινόμαστε σε ασφαλή πεδίο και επιβεβαιώνουμε τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

9.1.2 Ιδιομορφική ανάλυση χωροδικτυώματος

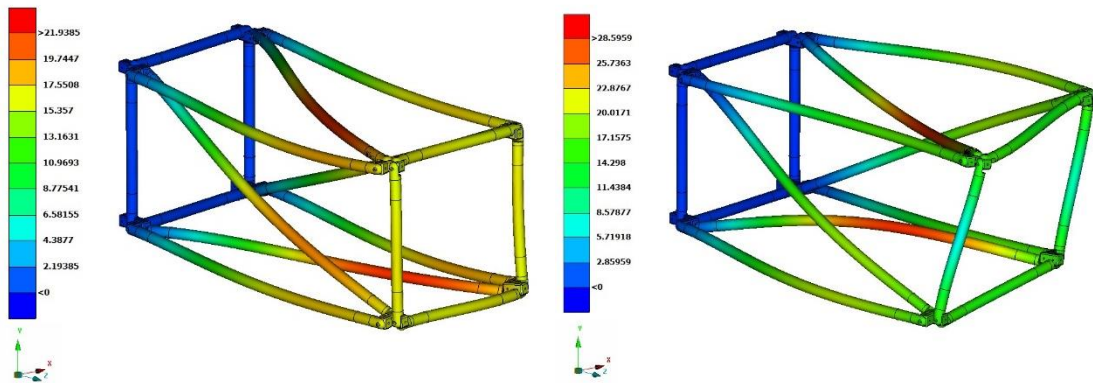
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αριθμητικός προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών. Το μοντέλο θεωρείται πακτωμένο στους τέσσερις κόμβους όπως και στις στατικές αναλύσεις. Εξάγονται οι πέντε πρώτες ιδιομορφές, οι οποίες απεικονίζονται στα σχήματα 9.8-9.10 και οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων παρατίθενται στον πίνακα 9.1.

Πίνακας 9.1: Αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων μοντέλου πεπερασμένων

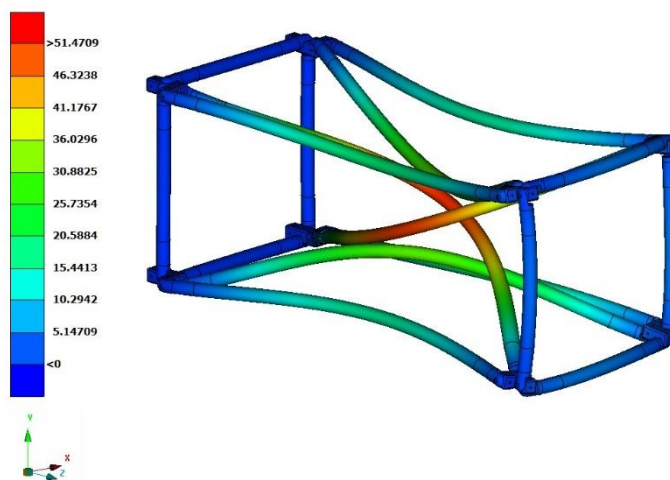
Mode	Space truss - Aluminum Connectors Frequency (Hz)
1	85.96
2	89.04
3	95.76
4	113.05
5	114.81



Σχήμα 9.8: 1^η ιδιομορφή και 2^η ιδιομορφή μοντέλου πεπερασμένων, με ιδιοσυχνότητες 85.96Hz και 89.04Hz



Σχήμα 9.9: 3^η ιδιομορφή 4^η ιδιομορφή μοντέλου πεπερασμένων, με ιδιοσυχνότητες 95.76Hz και 113.05Hz



Σχήμα 9.10: 5^η ιδιομορφή μοντέλου πεπερασμένων, με ιδιοσυχνότητα 114.81Hz

Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης ενός συναρμολογήματος, η συμπεριφορά του οποίου μελετάται και πειραματικά. Στόχος ήταν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη βέλτιστη σύνδεση μεταξύ ενός σωλήνα και δύο συγκολλητών συνδέσμων για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις υλικού.

Η σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικής και αριθμητικής στατικής ανάλυσης κατέδειξε βέλτιστο, το μοντέλο με τους συνδέσμους αλουμινίου. Από τις μετρήσεις, η ελάχιστη μετατόπιση που προέκυψε ήταν για το μοντέλο αυτό και επιτεύχθηκε μεγαλύτερη ταύτιση με το μοντέλο πεπερασμένων.

Στην μετέπειτα πειραματική ανάλυση που ακολούθησε υποβλήθηκε μόνο το μοντέλο 1, για το οποίο προσδιορίστηκαν οι μορφικές παράμετροι. Ακολούθησε η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της αναλυτικής επίλυσης ιδιοπροβλήματος του μοντέλου σε πεπερασμένων με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών τιμών, με εξαίρεση την 5^η στρεπτική ιδιομορφή. Στις υπόλοιπες ιδιοσυχνότητες η τιμή του σφάλματος κυμαίνεται από 0.98%-2.73%, το οποίο είναι λογικό, στα πλαίσια των παραδοχών που έχουν γίνει για τα σύνθετα υλικά και σε συνδυασμό με μικρές αποκλίσεις στις μηχανικές ιδιότητες όλων των υλικών.

Ακολούθησε στατική ανάλυση με πειραματική και αριθμητική προσέγγιση σε σωληνωτό υποπλάσιο αγωνιστικής μηχανής, το οποίο αποτελείται από σωλήνες ανθρακονημάτων και συνδέσμους αλουμινίου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αποδεικνύουν μία στιβαρή και ανθεκτική κατασκευή, καθώς δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια.

Σε τελευταίο στάδιο, σχεδιάζεται ένα χωρικό δικτύωμα πιο σύνθετης γεωμετρίας, με ιδιότητες του βέλτιστου μοντέλου από τα συναρμολογήματα. Παρατίθενται αριθμητικά αποτελέσματα από στατική φόρτιση 1000N στον ένα κόμβο του χωροδικτύωματος, καθώς και πέντε πρώτες ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες. Παρουσιάζονται ιδιαίτερα θετικά τα αποτελέσματα, καθώς όλες οι μετρήσεις δεν ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Από τα αποτελέσματα προκύπτουν ζητήματα τα οποία χρήζουν περισσότερης έρευνας:

- Εφαρμογή αξιόπιστων κριτηρίων αστοχίας σύνθετων υλικών για την ανίχνευση όλων των πιθανών αστοχιών που αναπτύσσονται στο σύνθετο υλικό.

- Πειραματική μελέτη για την επίδραση των διαφορετικών στρώσεων (winding ply configuration), γωνιών τυλίγματος (unidirectional, cross ply, angle ply) και διαφορετικού πάχους σωλήνα.
- Κατασκευή του χωρικού δικτυώματος για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf
- [2] Γκερού, Ε. (n.d.), Διπλωματική εργασία : Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης ινών άνθρακα-μεταλλικών κόνεων ψευδαργύρου: κατασκευή, μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες,2011
- [3] [Ηλεκτρονικό] <http://www.wikipedia.org/wiki/Ανθρακόνημα>
- [4] Σταυρόπουλος, Χ, Διδακτορική διατριβή : Πρόβλεψη της εναπομένουσας αντοχής πολύστρωτων ινώδων σύνθετων υλικών μετά από κρούση και βελτίωση της κρουστικής συμπεριφοράς τους με την εισαγωγή ενισχυτικών πλαστικών στρώσεων,1998
- [5] [Ηλεκτρονικό] <http://www.carbonfiber.gr.jp>
- [6] Balya. Bora, Ph.D. Thesis, Design and analysis of filament wound composite tubes, 2004
- [7] [Ηλεκτρονικό] <http://www.performance-composites.com>
- [8] Sotiris Koussios.Filament Winding: A Unified Approach, IOS Press,2004
- [9] Adams, R.D., Comyn, J., and Wake, W. C. (1997) Structural adhesive joints in engineering, Chapman & Hall Adams,London
- [10] Καρύδης, Π. (2003).Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές.
- [11] Park, C-K., Kan, C-D., Hollowell, W., & Hill, S.I. (2012, December). Investigation of opportunities for lightweight vehicles using advanced plastics and composites. (Report No. DOT HS 811 692). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

[12] Σ. ΝΑΤΣΙΑΒΑΣ, ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: ΖΗΤΗ, 2001.

[13] Αραιόπουλος, Α. (n.d.), Διπλωματική εργασία : Διερεύνηση μεθόδων ενημέρωσης και βελτιστοποίησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με χρήση πειραματικών δεδομένων.