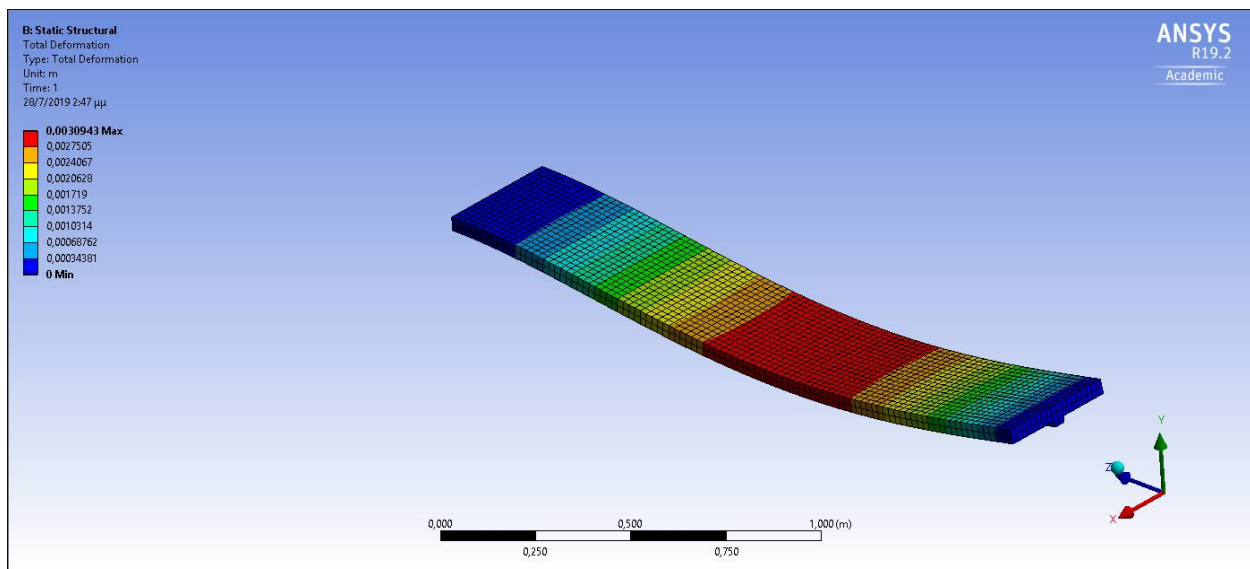




ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΑΣΑΡΕΛΑΣ ΣΚΑΦΟΥΣ ΑΠΟ
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΗΣ**



ΟΝΟΜΑ : ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΩΝΥΜΟ: ΣΕΡΒΟΣ

ΑΜ: 5929

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής

Ελλάδας και αναφέρεται στην μελέτη και κατασκευή πασαρέλας σκάφους από σύνθετα υλικά με σκοπό το χαμηλό της βάρος. Είναι γνωστό ότι σχεδόν όλα τα σκάφη αναψυχής χρησιμοποιούν πασαρέλες και η ζήτηση για ελαφρότερες πασαρέλες είναι μεγάλη.

Με την βοήθεια σχεδιαστικού προγράμματος αλλά και στην πράξη θα κατασκευάσουμε μια πασαρέλα από σύνθετα υλικά με σκοπό το βάρος της να μην ξεπερνά τα 10 κιλά. Τέλος θα ελέγξουμε αν η πασαρέλα που κατασκευάσαμε ικανοποιεί τα τεστ αντοχής.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Στέφανο Τσινοπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας, καθώς επίσης και τον εργοδότη μου Δρ. Κωνσταντίνο Κωνσταντή, Ναυπηγό Μηχανικό για την βοήθεια του και τον χώρο και χρόνο που χορήγησε για την εκπόνηση των πειραμάτων.

Σέρβος Νικόλαος

Μάρτιος 2019

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής
ΣΕΡΒΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

.....

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο αυτής της πτυχιακής εργασίας θα αναλύσουμε τι είναι μια πασαρέλα καθώς επίσης και τους πιο διαδεδομένους διαφορετικούς τύπους πασαρέλας που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται σήμερα σε σκάφη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα μιλήσουμε για τα σύνθετα υλικά και την ιστορία τους, καθώς επίσης και για τους διαφορετικούς τύπους αυτών με βάση τα επιμέρους υλικά που τα αποτελούν. Θα εμβαθύνουμε περισσότερο στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες καθώς επίσης και στις μηχανικές ιδιότητες αυτών.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρετε στα πεπερασμένα στοιχεία, τι είναι αυτά, την ιστορία της εξέλιξης τους και στους τύπους αστοχίας των ενισχυμένων με ίνες συνθέτων υλικών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα εμβαθύνουμε στα πεπερασμένα στοιχεία, στο πως έχουν εξελιχθεί στην σημερινή εποχή, στους λόγους ανάπτυξης τους και στις δυνατότητες που μας δίνουν τα υπολογιστικά προγράμματα αυτών. Τέλος, στην διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για μια σωστή ανάλυση και μερικά παραδείγματα.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στα αποτελέσματα του ANSYS που πάρθηκαν μέσω της μοντελοποίησης της πασαρέλας που κατασκευάσαμε ώστε να συγκριθούν αργότερα με τις μέτρησης του πρακτικού πειράματος.

Το έκτο κεφάλαιο αναλύει την κατασκευή της πασαρέλας στο εργαστήριο και συγκρίνει τα αποτελέσματα του πειράματος με αυτά του ANSYS.

Το έβδομο κεφάλαιο αφορά τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας.

[Εικόνα 1 Τηλεσκοπική πασαρέλα μονού τύπου \(www.nautical-structures.com, www.yachting-pages.com\)](http://www.nautical-structures.com)..... 11

| | |
|---|----|
| Εικόνα 2 Τυπικό σχεδιάγραμμα τηλεσκοπικής πασαρέλας μονού τύπου(www.nautical-structures.com) | 11 |
| | |
| www.nautical-structures.com , www.yachting-pages.com) | 12 |
| Εικόνα 4 Τυπικό σχεδιάγραμμα τηλεσκοπικής πασαρέλας διπλού τύπου(www.nautical-structures.com) | 12 |
| | |
| www.nautical-structures.com , www.yachting-pages.com) | 14 |
| Εικόνα 6 Τυπικό σχεδιάγραμμα πτυσσόμενης άνω πασαρέλας (www.nautical-structures.com) | 14 |
| Εικόνα 7 Πτυσσόμενη κάτω πασαρέλα τηλεσκοπικού τύπου(www.nautical-structures.com) | 15 |
| Εικόνα 8 Τυπικό σχεδιάγραμμα πτυσσόμενης κάτω πασαρέλας(www.nautical-structures.com) | 16 |
| Εικόνα 9 Τρόπος λειτουργίας και κινήσεις πασαρέλας τύπου ελβετικού σουγιά(www.nautical-structures.com) | 16 |
| Εικόνα 10 Πασαρέλα τύπου Ελβετικού σουγιά (www.nautical-structures.com , www.yachting-pages.com) | 18 |
| Εικόνα 11 Τυπικό σχεδιάγραμμα πασαρέλας τύπου ελβετικού σουγιά(www.nautical-structures.com) | 18 |
| Εικόνα 12 Ενσωματωμένη πλατφόρμα κολύμβησης(www.nautical-structures.com) | 19 |
| Εικόνα 13 Τυπικό σχέδιο ενσωματωμένης πλατφόρμας κολύμβησης (www.nautical-structures.com) | 19 |
| Εικόνα 14 Η αγορά των σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών από το 1970 έως το 2010 | 32 |
| Εικόνα 15 Μη προσανατολισμένο (αριστερά) και προσανατολισμένο (δεξιά) σύνθετο υλικό | 33 |
| Εικόνα 16 Βασικοί τύποι σύνθετων υλικών βάση τοποθέτηση ινών | 34 |
| Εικόνα 17 Διαδικασία παραγωγής ινών γυαλιού | 37 |
| Εικόνα 18 Τρόπος διαστρωμάτωσης ινών γυαλιού | 38 |
| Εικόνα 19 Τύποι ύφανσης ινών γυαλιού | 38 |
| Εικόνα 20 Τυπικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για τα υλικά των ινών και το χάλυβα | 44 |
| Εικόνα 21 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για διαφορετικές ίνες ενίσχυση | 47 |
| Εικόνα 22 Συγκριτικές ιδιότητες ινών ενίσχυσης | 48 |
| Εικόνα 23 Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών αστοχίας σε μια ινώδη στρώση | 56 |
| Εικόνα 24 Σχηματική αναπαράσταση της διαστρωματικής αποκόλλησης | 56 |
| Εικόνα 25 Μακροσκοπικοί μηχανισμοί αστοχίας των μηχανικών συνδέσεων πολύστρωτων πλακών | 58 |
| Εικόνα 26: Επιμήκυνση της δομής υπό την επίδραση φορτίου | 66 |
| Εικόνα 27: Διάρθρωση δομής (αριστερά) σε στοιχεία (δεξιά) | 67 |
| Εικόνα 28: Στοιχεία και κόμβοι | 67 |
| Εικόνα 29: Πλέγμα πολύπλοκης κατασκευής | 68 |
| Εικόνα 30: | 76 |
| Εικόνα 31: Παράδειγμα 1.1 | 80 |
| Εικόνα 32: Παράδειγμα 1.2 | 82 |
| Εικόνα 33: Άπλωμα εποξικής ρητίνης για τοποθέτηση του νεύρου | 87 |
| Εικόνα 34: Τοποθέτηση του νεύρου με την βοήθεια βάρους για την καλύτερη κόλληση | 88 |
| Εικόνα 35: Υαλο- ύφασμα πυκνότητας 450 γραμμαρίων ανά τετραγωνικό μέτρο | 88 |
| Εικόνα 36: Επάλειψη του νεύρου με εποξική ρητίνη πριν την τοποθέτηση του υαλο- υφάσματος | 89 |
| Εικόνα 37: Τοποθέτηση του υαλο- υφάσματος | 89 |
| Εικόνα 38: Επάλειψη του υαλο- υφάσματος με εποξική ρητίνη | 90 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 39: Τοποθέτηση της πασαρέλας σε αυτοσχέδιο φούρνο στους 60 βαθμούς κελσίου για την φάση σκλήρυνσης..... | 90 |
| Εικόνα 40: Φωτογραφία που πάρθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος μέτρησης της καμπυλότητας. | 91 |
| Εικόνα 41: Εισαγωγή μοντέλου στο ANSYS | 94 |
| Εικόνα 42: Διακριτοποίηση πασαρέλας σε πεπερασμένα στοιχεία..... | 94 |
| Εικόνα 43: Επιβολή φορτίσεων στα πασαρέλα (κύλιση) | 95 |
| Εικόνα 44: Επιβολή φόρτισης 800N | 95 |
| Εικόνα 45: Ολική μετατόπιση | 96 |
| Εικόνα 46: Equivalent elastic strain..... | 96 |
| Εικόνα 47: Τάση Von Misses | 97 |
| Εικόνα 48 : Παρουσίαση μοντέλου | 98 |
| Εικόνα 49: Ολική μετατόπιση | 99 |
| Εικόνα 50: Equivalent elastic strain..... | 99 |
| Εικόνα 51: Τάση von Misses | 100 |

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Κεφάλαιο 1° Πασαρέλες και διάδρομοι επιβίβασης | 9 |
| 1.1 Τηλεσκοπική πασαρέλα μονού τύπου | 10 |
| 1.2 Τηλεσκοπική πασαρέλα διπλού τύπου..... | 11 |
| 1.3 Πτυσσόμενη άνω τηλεσκοπική πασαρέλα | 12 |
| 1.4 Πτυσσόμενη κάτω πασαρέλα τηλεσκοπικού τύπου | 14 |
| 1.5 Πασαρέλα τύπου Ελβετικού σουγιά..... | 16 |
| 1.6 Ενσωματωμένη πλατφόρμα κολύμβησης | 18 |
| Κεφάλαιο 2° Ενισχυμένα με ίνες πλαστικά υλικά (Fibre Reinforced plastics – FRP)..... | 21 |
| 2.1 Εφαρμογές | 25 |
| 2.1.1 Διαστημική βιομηχανία | 25 |
| 2.1.2 Στο βυθό..... | 25 |
| 2.1.3 Αεροβιομηχανία | 27 |
| 2.1.4 Σκάφη και πλοία..... | 29 |
| 2.1.5 Επίγειες μεταφορές..... | 30 |
| 2.2 Η αγορά των ενισχυμένων με ίνες σύνθετων πολυμερών | 31 |
| 2.3 Κατηγορίες Συνθέτων..... | 32 |
| 2.3.1 Ίνες..... | 35 |
| 2.3.2 Μήτρες | 40 |
| 2.4 Ιδιότητες συνθέτων:..... | 43 |
| 2.5 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα συνθέτων υλικών..... | 50 |
| Κεφάλαιο 3° Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων | 53 |
| 3.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων | 54 |
| 3.2 Τύποι αστοχίας για ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά..... | 55 |
| Κεφάλαιο 4 Πεπερασμένα στοιχεία | 59 |
| 4.1 Εισαγωγή | 59 |
| 4.2 Η ιστορία των πεπερασμένων στοιχείων | 61 |
| 4.3 Λόγοι ανάπτυξης μεθόδου | 63 |
| 4.4 Γενικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων | 65 |
| 4.5 Δικτυωτοί φορείς- Ράβδος δικτυώματος..... | 71 |
| Κεφάλαιο 5 Περιγραφή του πειράματος/ Κατασκευή πασαρέλας..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το ANSYS | 93 |
| 6.1 Αποτελέσματα πασαρέλας χωρίς νεύρο δυσκαμψίας | 94 |
| 6.2 Αποτελέσματα πασαρέλας με νεύρο δυσκαμψίας..... | 97 |
| Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα | 103 |
| Βιβλιογραφία | 105 |

Κεφάλαιο 1^ο Πασαρέλες και διάδρομοι επιβίβασης

Μια πασαρέλα ή ένας διάδρομος είναι μια ανυψωμένη πλατφόρμα ή διάδρομος που συνήθως παρέχει ασφαλή διέλευση από και προς ένα πύργο, φορηγό, τρένο ή σκάφος. Οι πασαρέλες πρόσβασης είναι διαφορετικές από άλλους τύπους διαδρόμων και πλατφορμών, επειδή συνήθως χρειάζονται να μπορούν να μετακινούνται ή να περιστρέφονται και να αναπροσαρμόζουν τη θέση τους ώστε να ταιριάζουν στην υπάρχουσα διαμόρφωση των συνδεόμενων μερών για τη δίοδο των χρηστών.

Μια πολύ συνηθισμένη χρήση των διαδρόμων είναι να επιτρέπεται η διέλευση από μια αποβάθρα ή πλατφόρμα σε ένα αγκυροβολημένο σκάφος. Αυτές οι πασαρέλες είναι συνήθως αρκετά μακρές και εξασφαλίζουν ότι οι χρήστες δεν θα γλιστρήσουν από την πλατφόρμα ή ότι δεν υπάρχει η πιθανότητα να διατρέξουν κίνδυνο τα άτομα που περπατούν σε αυτές. Άλλη χρήση διαδρόμων εντοπίζεται στη συντήρηση και φόρτωση / εκφόρτωση υλικών από φορηγά και τρένα. Αυτοί οι διάδρομοι είναι συνήθως μικρότερου μήκους, καθώς η μεταβλητότητα της θέσης τους είναι μικρότερη και μπορεί να περιλαμβάνει πρόσθετα τεχνικά ή χαρακτηριστικά ασφαλείας προκειμένου να βοηθηθούν οι εργαζόμενοι στις προσπάθειές τους στο όχημα ή εκτός αυτού. Δεδομένης της ανάγκης εκτέλεσης αποτελεσματικά αυτών των καθηκόντων, οι διάδρομοι έχουν μερικά διακριτικά στοιχεία (www.saferack.com).

Πολλοί διάδρομοι κατασκευάζονται από ελαφρύτερα μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το οποίο έχει περισσότερο από το ήμισυ της πυκνότητας του χάλυβα, αν και ο χάλυβας παραμένει μια βιώσιμη επιλογή σε μερικά σενάρια. Με τη χρήση ελαφρύτερων, εξίσου ισχυρών υλικών, οι πασαρέλες μπορούν να ρυθμίζονται και να κινούνται πιο εύκολα και δυναμικά, ανεξάρτητα από το αν σχεδιάζονται για να συναντήσουν έναν διάδρομο ή απλά προσαρμόζονται για να ταιριάζουν με μια άλλη κίνηση ενώ έχουν αναπτυχθεί (www.saferack.com).

Μια άλλη βασική πτυχή είναι η επιφάνεια ή οι επιφάνειες πάνω στις οποίες περπατούν οι άνθρωποι στο διάδρομο. Μερικές φορές οι διάδρομοι χρησιμοποιούν μονές επίπεδες επιφάνειες που λειτουργούν ως ράμπες για να περπατήσουν. Ωστόσο, σε πολλές πασαρέλες, η επιφάνεια αυτή χωρίζεται σε διάφορα τμήματα με διαίρεση, ανεξάρτητα από το αν ο διάδρομος χρησιμοποιείται ή όχι ως σκάλα. Αυτά τα τμήματα δεν συνδέονται άμεσα μεταξύ τους, αλλά μέσω συστημάτων κατά μήκος των πλευρών που εξασφαλίζουν ότι τα τμήματα παραμένουν όρθια ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό των διαδρόμων. Εξαιτίας αυτού, οι διάδρομοι μπορούν να ανυψωθούν και να χαμηλωθούν, χωρίς καμία ανησυχία για την ικανότητα του ατόμου να μετακινηθούν πάνω τους ασφαλώς, όπως μπορεί συχνά να είναι ένα πρόβλημα με ράμπες που έχουν κατασκευαστεί με ενιαίες επίπεδες επιφάνειες (www.saferack.com).

Οι εφαρμογές των διαδρόμων απαιτούν την τοποθέτηση αυτών και πιθανώς την κίνηση τους (μεταφορά, έκταση ή περιστροφή) από ένα σταθερό σημείο, από το οποίο εκτείνονται πέρα από ένα κενό. Εξαιτίας αυτού, η ροπή που απαιτείται για την επανατοποθέτηση ή μετακίνηση τους μπορεί να είναι δύσκολη. Ωστόσο, οι διάδρομοι υψηλής ποιότητας θα διαθέτουν μια μορφή αντιστάθμισης, όπως το σύστημα αντιστάθμισης ελατηρίων, που επιτρέπει στον χρήστη ή τη μηχανή να επανατοποθετεί ή να μετακινεί εύκολα την πλατφόρμα χωρίς μεγάλη προσπάθεια (www.saferack.com).

Οι πασαρέλες αποτελούν μόνιμο εξοπλισμό σε σκάφη, τόσο αναψυχής όσο και μεγαλύτερα, καθώς αναλαμβάνουν την μεταφορά των επιβατών, εργαζομένων, πληρώματος από και προς την στεριά. Σε σχέση με τις πασαρέλες που χρησιμοποιούνται σε σκάφη, αυτές ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες.

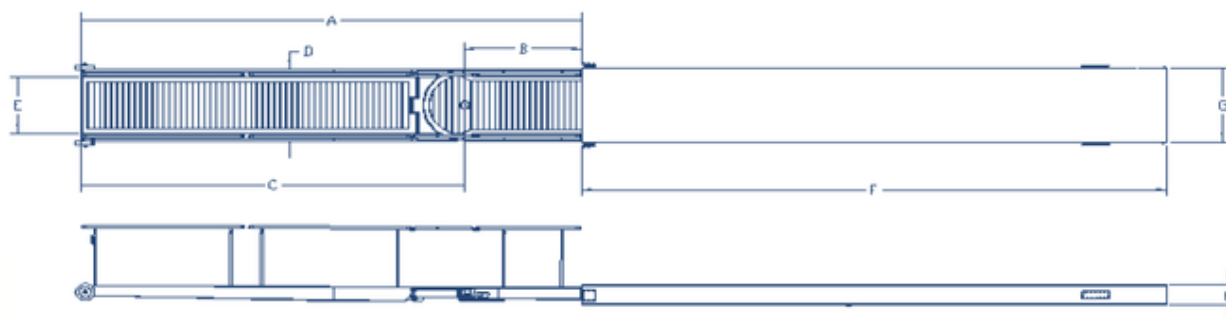
1.1 Τηλεσκοπική πασαρέλα μονού τύπου

Η πασαρέλα τηλεσκοπικού μονού τύπου είναι ένας σχεδιασμός που βελτιώνει την αποθηκευμένη απόδοση και την ανεπτυγμένη ευκαμψία της σανίδας. Η πασαρέλα μπορεί να αναπτυχθεί με το τηλεσκοπικό τμήμα να επεκτείνεται ή να αποσύρεται. Αυτό επιτρέπει στην υδραυλική τηλεσκοπική πασαρέλα μονού τύπου να χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία

συνθηκών επιβίβασης. Η τηλεσκοπική πασαρέλα μονού τύπου ορτσάρει +/- 20 μοίρες και μπορεί να περιστραφεί συνολικά 90 μοίρες.



Εικόνα 1 Τηλεσκοπική πασαρέλα μονού τύπου (www.nautical-structures.com, www.yachting-pages.com)



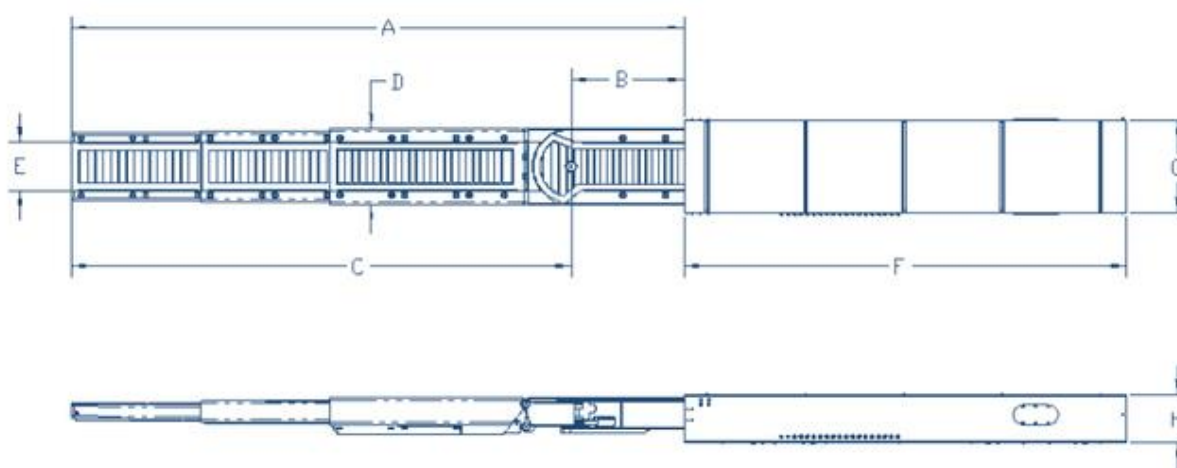
Εικόνα 2 Τυπικό σχεδιάγραμμα τηλεσκοπικής πασαρέλας μονού τύπου (www.nautical-structures.com)

1.2 Τηλεσκοπική πασαρέλα διπλού τύπου

Η τηλεσκοπική πασαρέλα διπλού τύπου είναι ένα σχέδιο που αυξάνει την αποθηκευμένη απόδοση της σανίδας. Διπλασιάζοντας τα τμήματα των σανίδων αυξάνεται ο λόγος του αποθηκευμένου μήκους προς το αναπτυγμένο μήκος. Αυτό επιτρέπει στον υδραυλικό πάσσαλο να τοποθετηθεί σε μικρότερο χώρο στο σκάφος. Η πασαρέλα μπορεί να αναπτυχθεί με τα τηλεσκοπικά τμήματα εκτεταμένα ή μαζεμένα. Αυτό επιτρέπει στην υδραυλική τηλεσκοπική πασαρέλα διπλού τύπου να χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία συνθηκών επιβίβασης. Η τηλεσκοπική πασαρέλα διπλού τύπου ορτσάρει +/- 20 μοίρες και περιστρέφεται συνολικά 90 μοίρες.



Εικόνα 3 Τηλεσκοπική πασαρέλα διπλού τύπου (www.nautical-structures.com, www.yachting-pages.com)



Εικόνα 4 Τυπικό σχεδιάγραμμα τηλεσκοπικής πασαρέλας διπλού τύπου (www.nautical-structures.com)

1.3 Πτυσσόμενη άνω τηλεσκοπική πασαρέλα

Η πτυσσόμενη τηλεσκοπική πασαρέλα παρέχει μια λύση για σχέδια σκαφών με περιορισμένο αποθηκευτικό χώρο ή απαιτήσεις για βελτιωμένο μήκος ανάπτυξης. Ο σχεδιασμός της παρέχει τη μεγαλύτερη απόδοση στην αναλογία μαζεμένου/ανεπτυγμένου μήκους. Αυτός ο λόγος ενισχύεται περαιτέρω όταν το τμήμα πτυσσόμενης σανίδας περιλαμβάνει ένα πρόσθετο τηλεσκοπικό τμήμα σανίδας. Η πασαρέλα διπλώνεται σε "στοίβα" τρόπο όταν μαζεύεται.

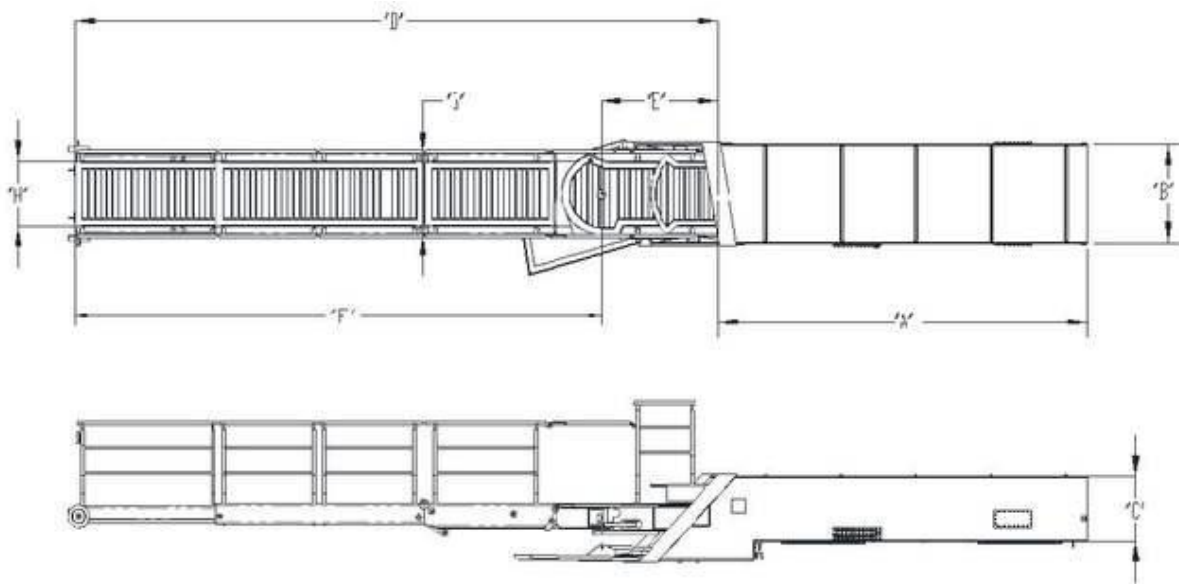
Ο σχεδιασμός αυτός της επιτρέπει να ανοίγει σε μια άκαμπτη θέση κλειδώματος, παρέχοντας επιβίβαση/αποβίβαση με πολύ ελαφριά εκτροπή και αναπήδηση ενώ

βρίσκεται στη λειτουργία αυτοστήριξης. Ο σχεδιασμός της πτυσσόμενης πασαρέλας αναπτύσσεται και με τα δύο τμήματα της ευθυγραμμισμένα εξαλείφοντας το "σκαλοπάτι" που απαντάται σε όλες τις τηλεσκοπικές σανίδες πολλαπλών τμημάτων, επιτρέποντας την πρόσθετη ασφάλεια και εξαλείφοντας πιθανά σημεία όπου ο χρήστης μπορεί να σκοντάψει κατά μήκος της σανίδας. Αυτός ο σχεδιασμός είναι επίσης ιδανικός για πασαρέλες που έχει διαμορφωθεί για να χρησιμοποιούνται από αναπηρική καρέκλα.

Η αναδιπλούμενη πασαρέλα είναι διαθέσιμη σε αναπτυγμένα μήκη από πέντε μέτρα έως πάνω από δέκα μέτρα ανάλογα με τις απαιτήσεις επιβίβασης του σκάφους.



Εικόνα 5 Πτυσσόμενη άνω τηλεσκοπική πασαρέλα (www.nautical-structures.com, www.yachting-pages.com)



Εικόνα 6 Τυπικό σχεδιάγραμμα πτυσσόμενης άνω πασαρέλας (www.nautical-structures.com)

1.4 Πτυσσόμενη κάτω πασαρέλα τηλεσκοπικού τύπου

Η πτυσσόμενη κάτω πασαρέλα παρέχει μια μοναδική λύση για σχέδια σκαφών με περιορισμένο αποθηκευτικό χώρο ή απαιτήσεις για βελτιωμένο μήκος ανάπτυξης. Ο σχεδιασμός αναδίπλωσης παρέχει τη μεγαλύτερη απόδοση στην αναλογία μαζεμένου/ανεπτυγμένου μήκους. Αυτή η αναλογία ενισχύεται περαιτέρω όταν το

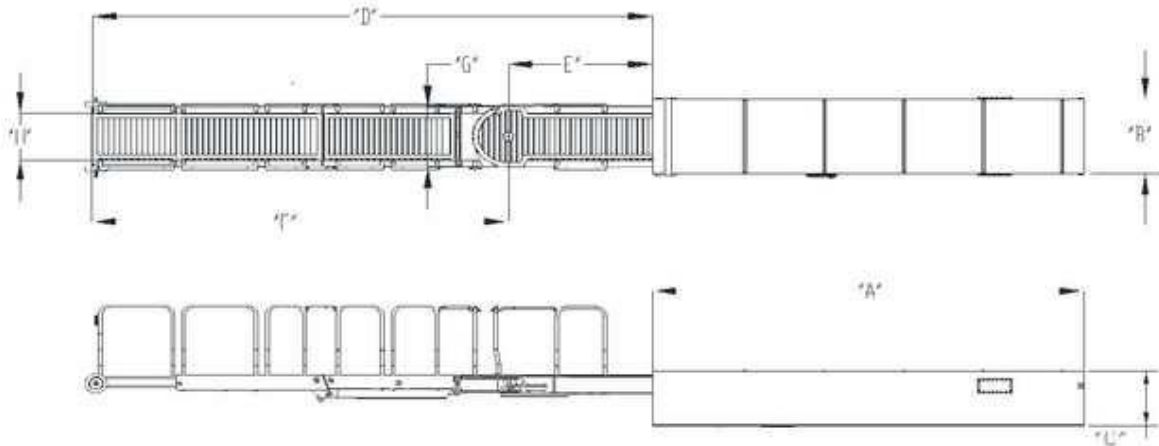
πτυσσόμενο τμήμα σανίδων περιλαμβάνει ένα πρόσθετο τηλεσκοπικό τμήμα. Η πασαρέλα διπλώνεται σε "στοίβα" όταν μαζεύεται.

Ο σχεδιασμός αυτός της επιτρέπει να ανοίγει σε μια άκαμπτη θέση κλειδώματος, παρέχοντας επιβίβαση/αποβίβαση με πολύ ελαφριά εκτροπή και αναπήδηση ενώ βρίσκεται στη λειτουργία αυτοστήριξης. Ο σχεδιασμός της πτυσσόμενης πασαρέλας αναπτύσσεται και με τα δύο τμήματα της ευθυγραμμισμένα εξαλείφοντας το "σκαλοπάτι" που απαντάται σε όλες τις τηλεσκοπικές σανίδες πολλαπλών τμημάτων, επιτρέποντας την πρόσθετη ασφάλεια και εξαλείφοντας πιθανά σημεία όπου ο χρήστης μπορεί να σκοντάψει κατά μήκος της σανίδας. Αυτός ο σχεδιασμός είναι επίσης ιδανικός για πασαρέλες που έχει διαμορφωθεί για να χρησιμοποιούνται από αναπηρική καρέκλα.

Η αναδιπλούμενη πασαρέλα είναι διαθέσιμη σε αναπτυσσόμενα μήκη από πέντε μέτρα έως πάνω από δέκα μέτρα ανάλογα με τις απαιτήσεις επιβίβασης του σκάφους.



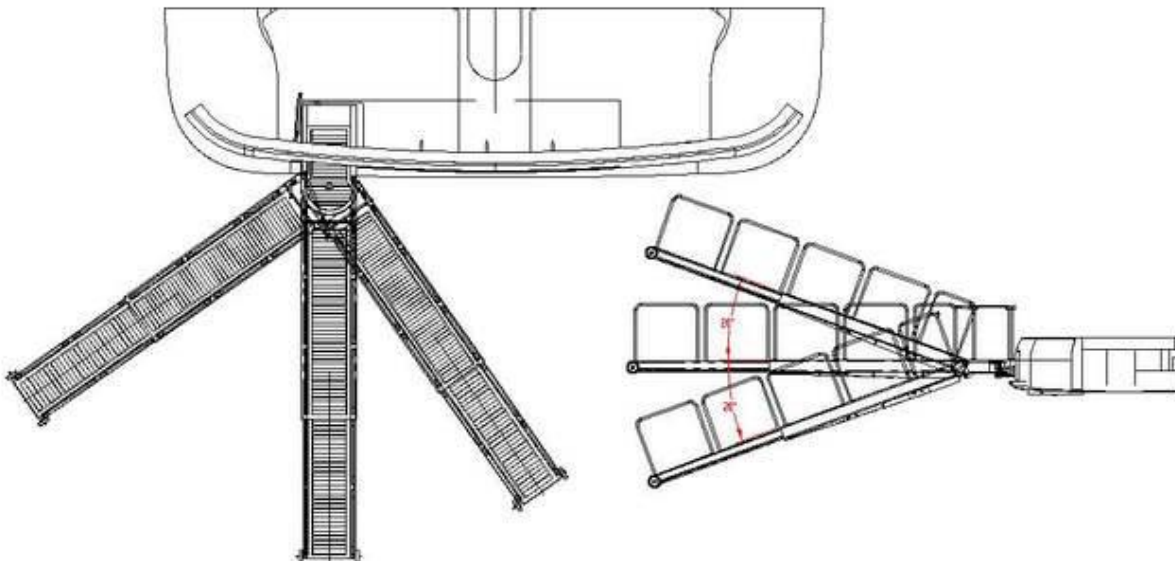
Εικόνα 7 Πτυσσόμενη κάτω πασαρέλα τηλεσκοπικού τύπου(www.nautical-structures.com)



Εικόνα 8 Τυπικό σχεδιάγραμμα πτυσσόμενης κάτω πασαρέλας(www.nautical-structures.com)

1.5 Πασαρέλα τύπου Ελβετικού σουγιά

Η πασαρέλα τύπου ελβετικού σουγιά περιστρέφεται με μια κίνηση παρόμοια με αυτή του ανοίγματος των εξαρτημάτων αυτού και αποθηκεύεται πίσω την πλατφόρμα επιβίβασης/αποβίβασης του σκάφους. Όταν η θύρα είναι κλειστή, το όνομα του σκάφους είναι ορατό.



Εικόνα 9 Τρόπος λειτουργίας και κινήσεις πασαρέλας τύπου ελβετικού σουγιά(www.nautical-structures.com)

Συνήθως κατασκευάζεται από ανθεκτική κατασκευή κράματος αλουμινίου και δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις λεπτότερες λεπτομέρειες από τους κατασκευαστές.

Χαρακτηριστικά ποιότητας περιλαμβάνουν: Στεγανό περίβλημα κατασκευασμένο είτε από χάλυβα είτε από κράμα αλουμινίου, αυτοπροωθούμενη ανάπτυξη, χωρίς χρήση ζωνών ή γραναζιών, υδραυλική λειτουργία για το ορτσάρισμα ή την περιστροφή, δυνατότητα να φέρει η κατασκευή το ίδιο βάρος της πάνω από την αποβάθρα, ενώ οι επιβάτες επιβιβάζονται με πολύ μικρές εκτροπές, χειρολισθήρες από ανοξείδωτο χάλυβα, παραδοσιακές επιφάνειες διαδρόμου από ξύλο τικ, με φωτισμό LED, ασύρματο τηλεχειριστήριο, σύστημα κλήσης / ενδοεπικοινωνίας / ασφάλειας, υδραυλικό αυτοματισμό, χαρακτηριστικό πλεύσης, και αυτοματοποιημένη υδραυλική θύρα. Το χαρακτηριστικό πλεύσης επιτρέπει την επέκταση του διαδρόμου πάνω στην αποβάθρα με το πλεονέκτημα ότι μπορεί να κινείται με την παλίνρροια και με το σκάφος στις γραμμές ελατηρίων.

Επιπλέον χαρακτηριστικά μπορεί να περιλαμβάνουν:

Τηλεσκοπικά τμήματα Μονά ή διπλά τηλεσκοπικά τμήματα που επιτρέπουν την προσαρμογή του αναπτυγμένου μήκους της σανίδας και επιτρέπουν στην πασαρέλα να ταιριάζει σε μικρότερα μήκη εγκλεισμού.

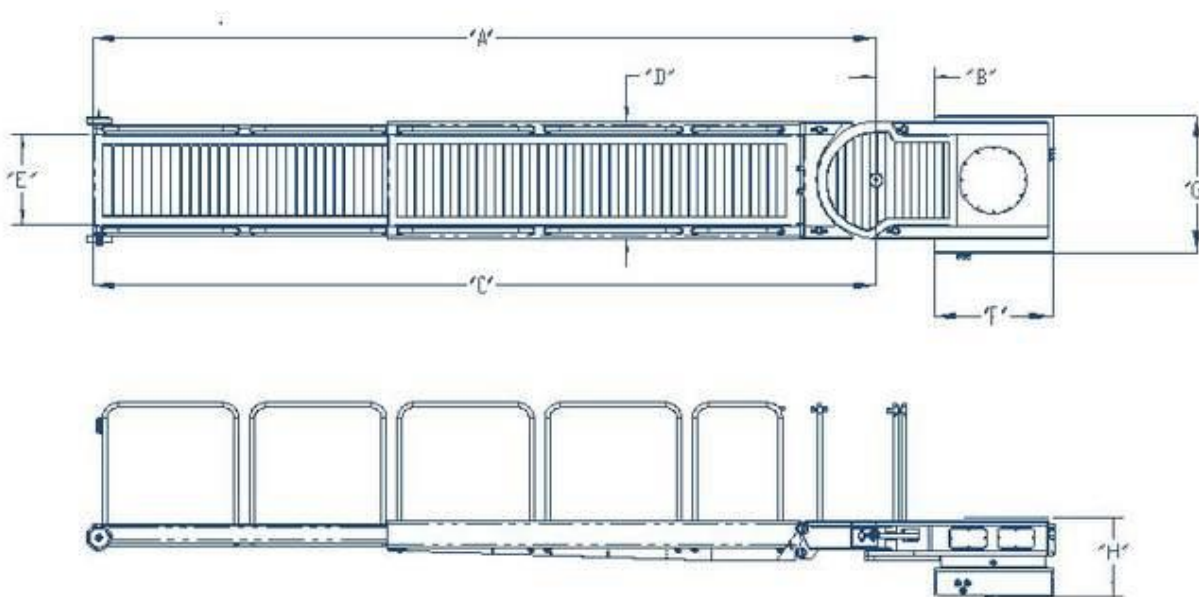
Τμήμα διπλώματος Επιτρέπει το να διπλώνεται πάνω ή κάτω, επιτρέποντας στην πασαρέλα να ταιριάζει σε ακόμη μικρότερα μήκη περιβλήματος.

Πτυσσόμενα και τηλεσκοπικά τμήματα Αυτό επιτρέπει το μέγιστο μέγεθος σε αναπτυγμένο μήκος ώστε να ταιριάζει στο μικρότερο δυνατό μήκος του περιβλήματος. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στη πασαρέλα να διπλώνεται άνω ή κάτω, με ένα μόνο ή διπλό τηλεσκοπικό τμήμα ενσωματωμένο στο πτυσσόμενο τμήμα.

Επιφάνεια μετακίνησης που μπορεί να έρχεται οριζόντια αυτόνομα επιτρέποντας στην πασαρέλα να αναπτυχθεί σε πιο απότομες γωνίες, παρέχοντας μεγαλύτερη χρησιμότητα στο ύψος υπηρεσίας μεταξύ καταστρώματος και αποβάθρας. Αυτή η σχεδίασης μπορεί να μετατρέψει κατ 'ουσία την πασαρέλα σε κλιμακοστάσιο.



Εικόνα 10 Πασαρέλα τύπου Ελβετικού σουγιά (www.nautical-structures.com, www.yachting-pages.com)



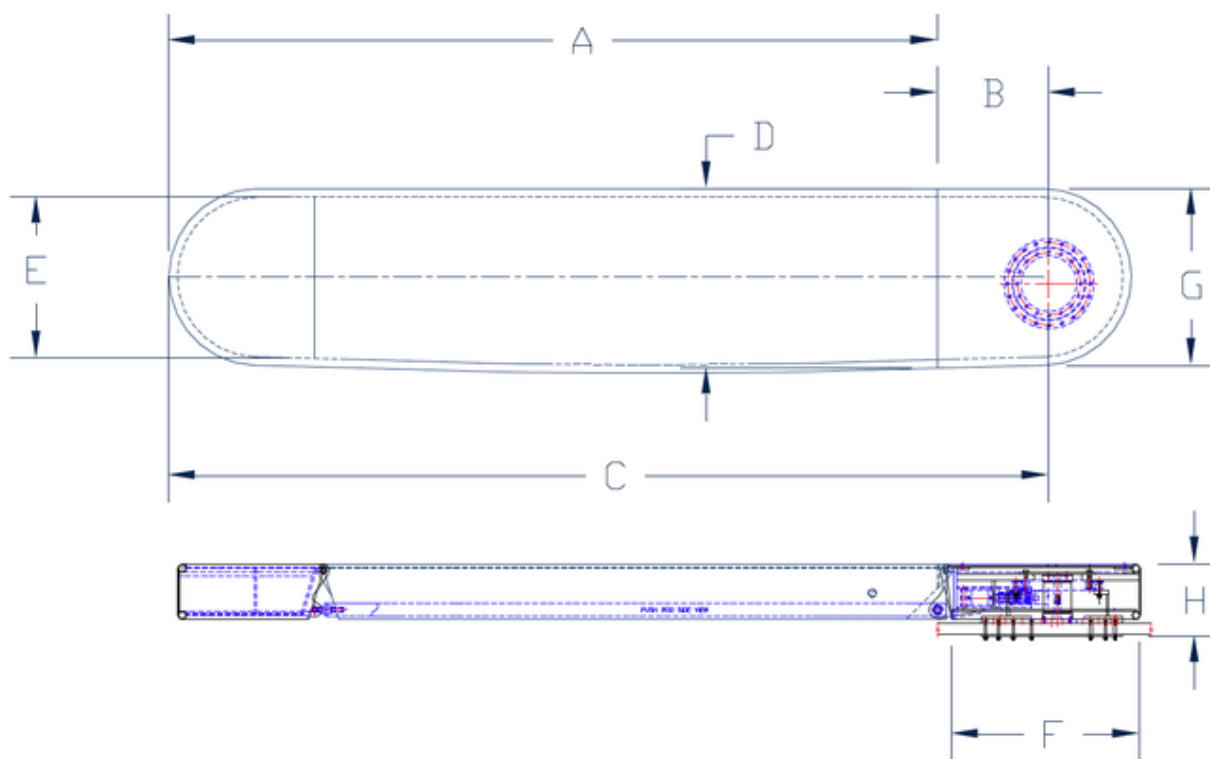
Εικόνα 11 Τυπικό σχεδιάγραμμα πασαρέλας τύπου ελβετικού σουγιά (www.nautical-structures.com)

1.6 Ενσωματωμένη πλατφόρμα κολύμβησης

Η ενσωματωμένη πλατφόρμα κολύμβησης τοποθετείται στη σταθερή πασαρέλα του σκάφους στο πίσω μέρος και χρησιμοποιείται παράλληλα για την επιβίβαση/αποβίβαση κατά την αγκυροβόληση του σκάφους.



Εικόνα 12 Ενσωματωμένη πλατφόρμα κολύμβησης(www.nautical-structures.com)



Εικόνα 13 Τυπικό σχέδιο ενσωματωμένης πλατφόρμας κολύμβησης (www.nautical-structures.com)

Κεφάλαιο 2^ο Ενισχυμένα με ίνες πλαστικά υλικά (Fibre Reinforced plastics – FRP)

Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες αντιπροσωπεύουν μια ριζική προσέγγιση στο σχεδιασμό δομικών υλικών σε σύγκριση με παραδοσιακά υλικά, όπως μέταλλα και κεραμικά. Αν και στον ζωντανό κόσμο, τόσο οι δομές των φυτών όσο και των ζώων, βασίζεται στην ενίσχυση υλικών μήτρας με εύκαμπτα νημάτια, η τεχνολογία παραγωγής τεχνικών υλικών του τύπου αυτού άρχισε να αναπτύσσεται πραγματικά από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα. Αυτό ήταν δυνατό καθώς οι οργανικές ρητίνες είχαν αρχίσει να παράγονται στη δεκαετία του 1930 και την ίδια δεκαετία κατασκευάστηκαν οι πρώτες συνθετικές ίνες. Τα σύνθετα υλικά, σήμερα, βρίσκουν χρήσεις σε όλες τις περιοχές και σε μερικά έχουν γίνει η κυρίαρχη μορφή του δομικού υλικού που χρησιμοποιείται και την βάση σύγκρισης άλλων υλικών. Αυτό ισχύει ασφαλώς για την αεροναυπηγική βιομηχανία ενώ αναμένεται η ραγδαία ανάπτυξη και σε χρήση από άλλους βιομηχανικούς τομείς καθώς ο 21ος αιώνας εξελίσσεται.

Το υλικό υπό μορφή νήματος μπορεί να έχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες αντοχής και ακαμψίας. Τα σύνθετα υλικά, ή τουλάχιστον τα περισσότερα από αυτά, δράττονται του γεγονότος αυτού. Οι λόγοι για τους οποίους οι ίνες είναι τόσο ισχυρότερες και συχνά πιο δύσκαμπτες από το ίδιο υλικό σε μορφή χύδην συμβαίνει επειδή οι λεπτές ίνες περιέχουν πολύ λιγότερα ελαττώματα από το χύδην υλικό, έτσι ώστε ένα σύνολο ινών που συνθέτουν ένα δεδομένο όγκο θα είναι πολύ ισχυρότερο από τον ίδιο όγκο του ίδιου υλικού σε χύδην μορφή. Αυτό που ισχύει για τις ίνες γυαλιού ισχύει επίσης για άλλα υλικά υπό μορφή ινών, έτσι ώστε οι ίνες να είναι πραγματικά μια εξαιρετική μορφή ύλης. Αν αναθεωρήσουμε το σύνολο των ινών που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να είναι προφανές ότι η δύναμη που εξετάζουμε είναι παράλληλη με τους άξονες των ινών. Το συγκρότημα ινών είναι εξαιρετικά ανισότροπο. Αυτό δεν θα συνέβαινε για το χύδην υλικό το οποίο έχει τα ίδια χαρακτηριστικά προς όλες τις κατευθύνσεις και ως εκ τούτου είναι ισότροπο. Αυτό δείχνει αμέσως τη διαφορά μεταξύ των σύνθετων υλικών και των πιο

παραδοσιακών υλικών. Τα σύνθετα, στο επίπεδο των στρωμάτων των ινών, είναι εγγενώς ανισότροπα, ενώ τα περισσότερα παραδοσιακά δομικά υλικά είναι ισότροπα.

Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από στρώματα ινών, παρόμοια με τα υφάσματα, και πολλοί από τους τρόπους χειρισμού τους έχουν την προέλευσή τους στην κλωστοϋφαντουργία. Τα σύνθετα υλικά είναι θεμελιωδώς δισδιάστατα, ενώ τα παραδοσιακά υλικά συνήθως κατασκευάζονται ως μπλοκ σε τρεις διαστάσεις και στη συνέχεια διαμορφώνονται στο τελικό τους σχήμα. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα στο σχηματισμό σύνθετων υλικών, καθώς ακριβώς όπως το ύφασμα μπορεί να κατασκευαστεί για να πάρει το σχήμα σύνθετων δομών, και έτσι μπορούν σύνθετα υλικά να διαμορφωθούν σε σύνθετα σχήματα. Η κατασκευή σύνθετων εξαρτημάτων εκμεταλλεύεται αυτό, και είναι σε θέση να ενσωματώσει πολλά μέρη σε μία λειτουργία, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος της κατασκευής. Αυτό είναι σημαντικό καθώς συχνά η αρχική δαπάνη μπορεί να φαίνεται δαπανηρή. Η πρώτη ύλη, όπως για παράδειγμα η ίνα γυαλιού και η πολυεστερική ρητίνη στο fiberglass, είναι περίπου τριπλάσια από την τιμή των συμβατικών υλικών, αλλά μερικές ίνες άνθρακα και πιο εξωτικές ρητίνες μπορεί να είναι έως και 30 φορές ακριβότερες. Ωστόσο, η πιθανότητα μείωσης των λειτουργικών βημάτων στην κατασκευή εξαρτημάτων μειώνει σημαντικά το συνολικό τελικό κόστος ενός μέρους.

Ενώ οι ίνες είναι σημαντικές σε οποιοδήποτε κατασκεύασμα από συνθετικό υλικό μέρος, είναι σαφές ότι δεν πλέουμε απλώς μια πτέρυγα ενός αεροπλάνου, το μέρος ενός σκάφους ή ένα τμήμα σώματος για ένα αυτοκίνητο. Οι ίνες συγκρατούνται μαζί σε μια μήτρα. Υπάρχουν πολλές ρητίνες που είναι διαθέσιμες για σύνθετα υλικά και ενώ οι περισσότερες είναι οργανικά πολυμερή υπάρχουν σύνθετα υλικά με άλλους τύπους μητρών. Αυτά μπορεί να είναι καουτσούκ, όπως σε ελαστικά ή μέταλλα όπως αλουμίνιο, μαγνήσιο και τιτάνιο, ειδικά γυαλιά και ακόμη και κεραμικά όπως καρβίδιο του πυριτίου. Υπάρχει μια αυξανόμενη αγορά για τσιμέντο ενισχυμένο με ίνες, αν και σε αυτόν τον τύπο σύνθετου υλικού το κλάσμα των ινών είναι μικρό και ο ρόλος τους είναι να αποτρέπεται η ανάπτυξη ρωγμών παρά να ενισχύεται. Η επιλογή του σπλισμού και της μήτρας των ινών υπαγορεύεται από την τελική χρήση στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το σύνθετο τμήμα και

θα εξαρτηθεί από τις ιδιότητες των συστατικών που χρησιμοποιούνται καθώς και από την οδό κατασκευής που πρόκειται να υιοθετηθεί.

Η χρήση δύο τύπων πολύ διαφορετικών υλικών για την κατασκευή ενός σύνθετου τμήματος ανοίγει πολλές δυνατότητες οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες στον σχεδιαστή χρησιμοποιώντας συμβατικά υλικά χύδην. Για παράδειγμα, το μέτρο εφελκυσμού μπορεί να αποσυνδεθεί από το συντελεστή διατμήσεως σε ένα σύνθετο τμήμα το οποίο επιτρέπει σχέδια δομών που δεν είναι δυνατά με συμβατικά υλικά.

Το μέγεθος της συνολικής σύνθετης αγοράς αναμένεται να φτάσει τα εκατό εκατομμύρια τόνους προς το τέλος της δεύτερης δεκαετίας του 21ου αιώνα. Τα πλαστικά ενισχυμένα με γυαλί (GRP) αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 90% της συνολικής παγκόσμιας αγοράς και αναπτύσσονται με ρυθμούς που αντιπροσωπεύουν ώριμη αγορά περίπου 4% ετησίως, παρόλο που υπάρχουν μεγάλες περιφερειακές διαφορές. Οι αγορές που έχουν αναπτυχθεί για αυτά τα σύνθετα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων σκαφών αναψυχής, ανεμογεννητριών, δεξαμενών αποθήκευσης, εξαρτημάτων αυτοκινήτων, οδοντικών εμφυτευμάτων και πολλών άλλων. Οι ίνες γυαλιού είναι προϊόντα χαμηλής προστιθέμενης αξίας, έτσι ώστε ακόμα και αν αντιπροσωπεύουν ένα τόσο μεγάλο τμήμα της βιομηχανίας, αντιπροσωπεύουν ένα χαμηλότερο ποσοστό της αξίας της παγκόσμιας σύνθετης αγοράς. Τα προηγμένα σύνθετα υλικά, που βασίζονται σε ίνες υψηλότερης απόδοσης, αντιπροσωπεύουν ένα δυσανάλογο μέρος της συνολικής αξίας της αγοράς, μολονότι αντιπροσωπεύουν μόλις το 1% περίπου του μεριδίου αγοράς. Ο ρυθμός ανάπτυξης των ενισχυμένων σύνθετων υλικών είναι σημαντικά μεγαλύτερος από εκείνον του GRP. Η συνολική σύνθετη αγορά αποτελείται από GRP και προηγμένα σύνθετα υλικά με αναπτυσσόμενη συμβολή από υλικά ενισχυμένα με φυσικές ίνες.

Η μεγαλύτερη χρήση σύνθετων υλικών υψηλής απόδοσης, σήμερα, είναι σε πολιτικές εφαρμογές, αλλά αρχικά ήταν στρατιωτικές και συγκεκριμένα αεροδιαστημικές δομές που χρησιμοποιούσαν σύνθετα υλικά. Ο λόγος είναι προφανής- η εξοικονόμηση βάρους. Για να φτάσουμε ψηλότερα και μακρύτερα είναι απαραίτητο να έχουμε επαρκή αντοχή και ακαμψία στο αεροσκάφος, για παράδειγμα, αλλά το βάρος θα περιορίσει την απόδοση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν περιορισμοί του βάρους των αποσκευών

κατά την επιβίβαση σε αεροπλάνο και γιατί ορισμένοι αερομεταφορείς χαμηλού κόστους έχουν μεγαλύτερους περιορισμούς βάρους από άλλους, ακριβότερους, μεταφορείς. Μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε την επίδραση του βάρους για ένα δεδομένο υλικό διαιρώντας την τελική αντοχή και το ελαστικό μέτρο με την πυκνότητά του για να δώσουμε αυτό που είναι γνωστό ως οι συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού. Εάν αυτό γίνεται για τα πιο κοινά μέταλλα, χάλυβα, αλουμίνιο και τιτάνιο, είναι καλό να διαπιστώσουμε ότι βρίσκουμε σχεδόν τις ίδιες τιμές αν το μέτρο του Young είναι κατανεμημένο με τη συγκεκριμένη βαρύτητα, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 Σύγκριση των διαφόρων μέτρων χαρακτηρισμού υλικών από διάφορα μέταλλα και ίνες

| Material | Specific gravity | Young's modulus (GPa) | Specific modulus (GPa) |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------|
| Steel | 7.9 | 200 | 25.3 |
| Aluminium | 2.7 | 76 | 28 |
| Titanium | 4.5 | 116 | 25.7 |
| Glass (bulk and fibre) | 2.5 | 72 | 27.6 |
| Carbon (high strength fibre) | 1.8 | 295 | 164 |
| Carbon (ultra high modulus fibre) | 2.16 | 830 | 384 |
| Kevlar 49 fibre | 1.45 | 135 | 93 |
| Zylon fibre | 1.56 | 280 | 180 |

Το γυαλί είναι μια ενδιαφέρουσα περίπτωση, καθώς είναι άμορφο και ακόμη και με τη μορφή ίνας, η μικροδομή του δεν ευθυγραμμίζεται όπως συμβαίνει με τις περισσότερες άλλες ίνες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ίνες γυαλιού που έχουν το ίδιο ελαστικό μέτρο όπως το γυαλί χύδην και, όπως μπορεί να φανεί, δεν υπάρχει εξοικονόμηση βάρους για την απαιτούμενη ακαμψία με την αντικατάσταση των μετάλλων στον πίνακα από γυάλινες ίνες. Επιπροσθέτως, το ειδικό μέτρο οποιουδήποτε σύνθετου υλικού ενισχυμένου με ίνες υάλου θα είναι μικρότερο από την τιμή που εμφανίζεται καθώς οι ίνες πρέπει να δεσμεύονται μαζί με το υλικό μήτρας ρητίνης και αυτή έχει χαμηλή ακαμψία. Οι άλλες ίνες, ωστόσο, παρουσιάζουν πολύ υψηλότερες τιμές από τα συμβατικά υλικά επιτρέποντας ακόμη και στην ανάγκη συνδυασμού τους με μια ρητίνη, με ένα κλάσμα όγκου ινών ή 0,6, είναι σαφές ότι υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση βάρους χρησιμοποιώντας σύνθετα υλικά. Παρόλο που οι ίνες γυαλιού δεν προσφέρουν εξοικονόμηση βάρους, είναι η πιο

ευρέως χρησιμοποιούμενη ενίσχυση για σύνθετα υλικά, καθώς το χαμηλό κόστος και η ευκολία χρήσης, διευκολύνει την κατασκευή. Για τις δομές υψηλής απόδοσης, όμως, η ανάπτυξη ινών υψηλής απόδοσης, όπως οι ίνες άνθρακα και Kevlar, στη δεκαετία του 1960 και 1970, επέτρεψε να γίνουν τα σύνθετα υλικά το υλικό επιλογής για έναν αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών.

2.1 Εφαρμογές

2.1.1 Διαστημική βιομηχανία

Τα εξελιγμένα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της σύνθετης αγοράς, αλλά οι εφαρμογές τους είναι συχνά εντυπωσιακές γιατί χρησιμοποιούνται όταν συμβατικά υλικά δεν μπορούν να ταιριάξουν με τις επιθυμητές ιδιότητές. Αυτό σημαίνει ότι βρίσκουν εφαρμογές στα σύνορα της μηχανικής. Η ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα αντιπροσωπεύει το 80% του βάρους της δομής ενός δορυφόρου λόγω των υψηλών ειδικών ιδιοτήτων αυτών των σύνθετων υλικών. Οι πιο δύσκαμπτες ίνες άνθρακα μπορούν να βρουν κάποιο ρόλο στη διασφάλιση της σταθερότητας διαστάσεων των μεγάλων κατασκευών δορυφορικών ή διαστημικών σταθμών. Εκτός από τη δυσκαμψία και τη δύναμή τους, τα σύνθετα υλικά ινών άνθρακα έχουν σχεδόν αμελητέο συντελεστή θερμικής διαστολής στην κατεύθυνση των ινών. Στο διάστημα, η έντονη αντίθεση στη θερμοκρασία μεταξύ της ηλιόλουστη πλευρά μιας δομής, μέχρι +150 ° C, και της πλευράς που βρίσκεται μακριά από τον ήλιο, η οποία θα μπορούσε να είναι -150 ° C, σημαίνει ότι η διαστασιακή σταθερότητα είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Ένα διαστημικό τηλεσκόπιο θα έχανε τη λειτουργία του αν η δομή του άλλαζε καθώς η θερμοκρασία άλλαζε. Τα σύνθετα υλικά έρχονται συνήθως με τη μορφή πάνελ συνδεδεμένων πάνω σε δομή κηρήθρας για να σχηματίσουν μια ελαφριά δομή η οποία είναι άκαμπτη.

2.1.2 Στο βυθό

Ένα νέο σύνορο, προς εξερεύνηση και κατάκτηση βρίσκεται σε βαθιά νερά για πετρελαϊκές γεωτρήσεις. Η υπεράκτια πετρελαϊκή βιομηχανία περιλαμβάνει τεράστιους πόρους και εγκαταστάσεις και έχει συγκεντρώσει σημαντική εμπειρία στη γεώτρηση σε μεγάλο βάθος χρησιμοποιώντας σωληνώσεις και περιβλήματα από χάλυβα. Καθώς όμως τα βάθη αυξάνονται, το βάρος των χαλύβδινων δομών που χρησιμοποιούνται για να φέρουν το πετρέλαιο στην επιφάνεια γίνεται ένας σοβαρός περιορισμός σε ό, τι είναι εφικτό. Σε βάθη μεγαλύτερα των 1500 μέτρων, το βάρος αποτελεί σοβαρό πρόβλημα, τόσο για τη μεταφορά των εξαρτημάτων στην ανοικτή θάλασσα όσο και επειδή η δομή πρέπει να υποστηρίζεται από την πλωτή πλατφόρμα. Η πυκνότητα του χάλυβα είναι οκταπλάσια από εκείνη του νερού, ώστε οποιαδήποτε άνωση να είναι αμελητέα. Τα σύνθετα ινών άνθρακα είναι προφανείς υποψήφιοι για αυτό το σύνορο. Η χαμηλή πυκνότητά τους σημαίνει ότι το φαινόμενο πλευστότητας στο νερό είναι σημαντικό. Επιπλέον, μπορούν να ταιριάζουν με τη δύναμη και την ακαμψία του χάλυβα και να παρέχουν μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση. Επιπλέον, είναι επίσης καλύτεροι θερμοκοιμονωτές και αυτό δεν είναι μια ασήμαντη ιδιότητα καθώς το πετρέλαιο φεύγει από τον βυθό της θάλασσας σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν τους 100 ° C αλλά το θαλάσσιο περιβάλλον είναι στους 4 ° C. Καθώς το έλαιο ψύχεται το ιξώδες του αυξάνεται και η ροή μπορεί να σταματήσει. Οι ανυψωτήρες και οι άλλοι αγωγοί μεταφοράς πετρελαίου και αερίου από τον πυθμένα της θάλασσας καθώς και από τη γη είναι σύνθετες δομές που απαιτούν διάρκεια ζωής 20 ετών. Αν και η βιομηχανία είναι από τη φύση της συντηρητική και διστάζει να υιοθετήσει νέα υλικά με τα οποία δεν έχει εμπειρία, τα προηγμένα σύνθετα ινών άνθρακα πρόκειται να έχουν μεγάλο αντίκτυπο σε αυτόν τον τομέα. Δεν υπάρχει πραγματικά καμία εναλλακτική λύση για την εξόρυξη πετρελαίου σε βάθος νερού άνω από 3000 μέτρα.

Πάνω από τη θάλασσα, στην πλατφόρμα, τα σύνθετα βρίσκουν επίσης χρήσεις παρά τους αρχικούς φόβους λόγω πυρασφάλειας. Η πρώτη γενιά υπεράκτιων πετρελαϊκών πλατφορμών δεν χρησιμοποίησε σύνθετα υλικά λόγω των ρητινών τους, που θεωρήθηκαν ως κίνδυνος πυρκαγιάς. Οι μεταγενέστερες έρευνες έδειξαν ότι εάν τα σύνθετα υλικά είχαν μεγαλύτερο πάχος από 8 mm, αυτά είχαν καλύτερη απόδοση από τον χάλυβα σε μεγάλη πυρκαγιά. Ο λόγος είναι ο ίδιος με το γιατί είναι καλύτερα να έχουμε μια ξύλινη πόρτα ανάμεσα σε εμάς και μια φωτιά από μια μεταλλική πόρτα. Η τελευταία

είναι ένας καλός αγωγός θερμότητας και τα μέταλλα θα μαλακώσουν και θα λυγίσουν αν η θερμοκρασία είναι αρκετά μεγάλη. Το ξύλο θα αρχίσει να καίγεται και αυτό θα παρέχει ένα προστατευτικό στρώμα στο υποκείμενο άκαυστο ξύλο. Τα σύνθετα που έχουν επαρκές πάχος συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο, με τη συσσώρευση και την εξάτμιση να καθυστερούν την πρόοδο μιας πυρκαγιάς. Τα σύνθετα χρησιμοποιούνται πλέον σε υπεράκτιες πλατφόρμες όχι μόνο για σωληνώσεις, αλλά και για σκάλα και πεζοδρόμους. Όπως και με τις διαστημικές εφαρμογές, η εξοικονόμηση βάρους, ακόμη και σε μια πετρελαϊκή πλατφόρμα που ζυγίζει χιλιάδες τόνους, εξακολουθεί να είναι σημαντική. Ακόμη και τα σχοινιά πρόσδεσης των πλατφορμών κατασκευάζονται από οργανικές ίνες για τους ίδιους λόγους. Τέτοια σχοινιά, κατασκευασμένα από πολυεστέρες, αραμίδια ή ίνες πολυαιθυλενίου υψηλού συντελεστή, πρέπει να έχουν φορτία θραύσης έως και 2000 τόνους και μήκους χιλιομέτρων. Αντικαθιστούν τις πολύ βαρύτερες αλυσίδες και τα χαλύβδινα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν

2.1.3 Αεροβιομηχανία

Η βιομηχανία αεροσκαφών ήταν η πρώτη που χρησιμοποίησε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες και, μαζί με το αλουμίνιο, κατέστη η σημαντικότερη κατηγορία υλικών που χρησιμοποιούνται στις αεροδιαστημικές δομές. Η υιοθέτησή τους από τη βιομηχανία ήταν θεαματική και ταχεία και ακόμη πιο εντυπωσιακή, καθώς η βιομηχανία έχει μερικούς από τους πιο αυστηρούς κανονισμούς ασφαλείας για τη χρήση υλικών όλων των βιομηχανικών τομέων. Αρχικά, τα σύνθετα εισήχθησαν σε στρατιωτικά αεροσκάφη και από τη δεκαετία του 1960 κάθε νέα γενιά μαχητικών αεροσκαφών και ελικοπτέρων έχει δει αύξηση της χρήσης τους έτσι ώστε το μερίδιο των σύνθετων να προσεγγίζει το 50% του δομικού βάρους. Οι πρωτότυπες εφαρμογές ήταν για δευτερεύουσες κατασκευές όπως επεκτάσεις πτερυγίων για αύξηση της εμβέλειας, κώνων μύτης και ελίκων ελικοπτέρων. Πολύ γρήγορα η ανώτερη αντίσταση στην κόπωση των σύνθετων υλικών σήμαινε ότι αντικατέστησαν τις μεταλλικές λεπίδες στα ελικόπτερα που έπρεπε να αλλάζουν κάθε 2000 ώρες πτήσης εξαιτίας της ανάπτυξης ρωγμής κόπωσης. Τα σύνθετα πτερύγια διαρκούν όσο το σώμα του ελικοπτέρου και είναι μια αξιοσημείωτη επίδειξη σύνθετης αντίστασης στην κόπωση σε σύγκριση με αυτή των μετάλλων. Το μεγαλύτερο

μέρος των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα αεροσκάφη είναι εποξειδικές μήτρες ενισχυμένες με άνθρακα ή με ίνες αραμιδίου.

Τα σύνθετα σε στρατιωτικά αεροσκάφη και ελικόπτερα χρησιμοποιούνται πλέον σε πρωτεύουσες δομές όπως φτερά, άτρακτο και δομή ουράς και έτσι αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο ποσοστό του δομικού τους βάρους. Όταν μετριέται η χαμηλή πυκνότητα των σύνθετων υλικών, συγκριτικά με τα ελαφρά κράματα, μπορεί να φανεί ότι το ποσοστό τους στο αεροσκάφος είναι ακόμη μεγαλύτερο από 50%.

Η γέννηση προηγμένων σύνθετων υλικών στην αεροναυπηγική βιομηχανία πρέπει, ωστόσο, να εξεταστεί κατά την υιοθέτησή τους σε πολιτικά αεροσκάφη. Αυτή η τάση ξεκίνησε τη δεκαετία του 1980 αλλά ωριμάστηκε σε πολύ ευρύτερη χρήση στις αρχές του 21ου αιώνα. Δεν είναι μόνο ότι αυτά τα αεροσκάφη τόσο μεγαλύτερα από τα στρατιωτικά αεροσκάφη, αλλά και ότι τα πρότυπα ασφαλείας είναι ακόμη πιο αυστηρά. Η σειρά αεροσκαφών της Airbus έχει δει μια σταδιακή, αλλά συνεχόμενη, βήμα προς βήμα, αύξηση στη χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών. Ένα αεροσκάφος όπως το Airbus A380 χρησιμοποιεί σύνθετα υλικά σε πολλά δομικά μέρη όπως η άνω άτρακτο που αποτελείται από ένα υλικό που ονομάζεται Glare, το οποίο είναι ένα φύλλο εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένης από ίνες γυαλιού και φύλλα αλουμινίου. Η χρήση του Glare παράγει 25% μείωση βάρους σε σύγκριση με άλλα παραδοσιακά υλικά. Χρησιμοποιείται επίσης στις προπορευόμενες άκρες των κατακόρυφων και οριζόντιων σταθεροποιητών, με αποτέλεσμα τη μείωση κατά 20% του βάρους.

Τα μικρότερα αεροσκάφη, όπως τα αεριωθούμενα αεροπλάνα, ήταν σε θέση να κινούνται ταχύτερα χρησιμοποιώντας προηγμένα σύνθετα υλικά. Είναι ενδιαφέρον ότι η εισαγωγή τους δεν οφείλεται μόνο σε ανώτερες μηχανικές ιδιότητες που συνδέονται με μικρότερο βάρος, αλλά και σε ορισμένες δομές, επειδή το σύνθετο υλικό ήταν φθηνότερο από το αλουμίνιο. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης απευθείας σε ένα τμήμα αρκετών βαθμίδων συναρμολόγησης που θα ήταν απαραίτητες στις μεταλλικές κατασκευές μειώνει το συνολικό κόστος κατασκευής. Η δυνατότητα χρήσης σύνθετων δομών για περισσότερο από μηχανικούς σκοπούς είναι ελκυστική. Αυτή η πολυλειτουργικότητα επιτρέπει στο σύνθετο υλικό να χρησιμοποιηθεί και για μόνωση, μειώνοντας έτσι τα προβλήματα συμπίκνωσης, μείωσης θορύβου, αντοχής στη φωτιά, ανθεκτικότητας στη διάβρωση και

μεγαλύτερης ευελιξίας σχεδιασμού. Οι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν στο σύνθετο υλικό, μετατρέποντάς το σε αυτό που είναι γνωστό ως έξυπνο υλικό και το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κατάστασης του τμήματος. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά προσφέρουν καλύτερη ανθεκτικότητα από το αλουμίνιο για σχεδόν ίδιο κόστος. Παρ'όλα αυτά, υπάρχει συνεχής αξιολόγηση των υλικών που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη και θα συνεχιστούν οι βελτιώσεις όχι μόνο στα σύνθετα αλλά και στα ελαφρά μέταλλα και κράματα αυτών. Οι διεργασίες κατασκευής που χρησιμοποιούνται με τις σύνθετες ουσίες θα συνεχίσουν να εξελίσσονται με στόχο τη μείωση του κόστους με τη χρήση αυτοματοποιημένων διαδικασιών και την αυξημένη χρήση τεχνολογιών προπαρασκευής που προέρχονται από την κλωστοϋφαντουργία.

2.1.4 Σκάφη και πλοία

Κάθε επισκέπτης σε μια μαρίνα θα δει εκατοντάδες κομψά και λαμπερά σκάφη αναψυχής που κυμαίνονται από τα μικρά έως πολύ μεγάλα, μέχρι τα 40 μ. Συντριπτικά, θα κατασκευαστούν από πολυεστερική ρητίνη ενισχυμένη με γυαλί. Η βιομηχανία άρχισε με την εισαγωγή ρητίνης πολυεστερικής σκλήρυνσης σε θερμοκρασία δωματίου στα τέλη της δεκαετίας του 1940, η οποία μπορούσε να ενισχυθεί με ίνες γυαλιού. Με τα χρόνια αυτό το υλικό έχει γίνει κυρίαρχο στη κατασκευή του σκάφους αναψυχής. Η ανοικτή κατασκευή καλουπιού των σκαφών αυτών των σκαφών είναι η πιο κοινή διαδικασία παραγωγής και έχει φέρει το κόστος των σκαφών στην οικονομική περιοχή πολλών περισσότερων ανθρώπων από ό, τι πριν από την εισαγωγή τους. Ωστόσο, η βιομηχανία θα μπορούσε να εξελιχθεί σε πιο κλειστή κατασκευή καλούπι λόγω της ανάγκης μείωσης των εκπομπών στυρενίου.

Τα περισσότερα γιότ και καταμαράν υψηλής απόδοσης, που χρησιμοποιούνται για αγώνες, περιέχουν βινύλιο ή εποξική ρητίνη ενισχυμένο με ίνες άνθρακα στα κύτη και τα κατάρτια. Η χρήση σύνθετων υλικών επέτρεψε τη συνεχή διακοπή των ραφών, αλλά τα προβλήματα που συνδέονται συνήθως με τις δυσκολίες κατασκευής περιορισμένων αριθμών μεγάλων δομών και τη μείωση των περιθωρίων ασφαλείας οδήγησαν σε ορισμένες προφανείς και απροσδόκητες αποτυχίες των καταρτιών.

2.1.5 Επίγειες μεταφορές

Η επίγειες μεταφορές καλύπτουν τα οδικά οχήματα, τραμ και τρένα. Τα τρένα χρησιμοποιούν πολλά σύνθετα υλικά, σχεδόν πάντα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού για λόγους κόστους, και βρίσκονται στις εσωτερικές δομές των βαγονιών. Η ανάγκη μείωσης του βάρους είναι σημαντική για τα τρένα υψηλής ταχύτητας και αυτό ενθάρρυνε τη συνεκτίμηση της χρήσης σύνθετων υλικών στις πρωτεύουσες δομές τους. Η εξοικονόμηση βάρους μπορεί αρχικά να μην αποτελεί μείζον ζήτημα με τα τρένα τα οποία περνούν το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής με μεγάλη ταχύτητα, με σχετικά μικρό χρόνο επιτάχυνσης. Προκειμένου να καταστούν οικονομικότερα τα τρένα, είναι επιθυμητό να αυξηθεί ο αριθμός των επιβατών που μεταφέρονται από κάθε αμαξοστοιχία. Αυξημένος αριθμός επιβατών σημαίνει αύξηση του βάρους και αυτό αποτελεί πρόβλημα. Η χρήση αλουμινίου ήταν ένα πρώτο βήμα, αλλά εξελιγμένα σύνθετα υλικά ερευνούνται ως ακόμη καλύτερη λύση. Το κόστος είναι ο περιοριστικός παράγοντας, αλλά καθώς οι αγορές προηγμένων υλικών αυξάνονται και το κόστος υλικών πέφτει, τα τρένα θα κατασκευαστούν με μεγάλα τμήματα κατασκευασμένα από προηγμένα σύνθετα υλικά.

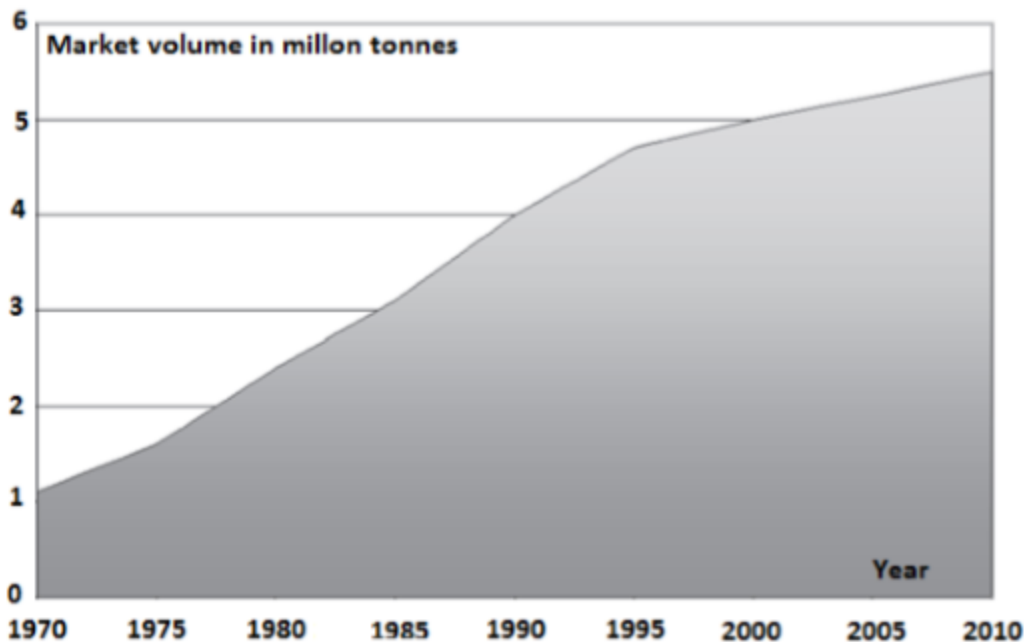
Τα τρένα του υπόγειου σιδηρόδρομου γίνονται όλο και περισσότερο με σύνθετα χαμηλού κόστους που συνιστούν ένα σημαντικό μέρος των τμημάτων του σώματος των αμαξών. Το βάρος είναι ένα προφανές μειονέκτημα καθώς τα τρένα πρέπει να επιταχύνουν και να φρενάρουν επανειλημμένα κατά τη διάρκεια της κανονικής χρήσης. Η ευελιξία κατασκευής που δίνουν τα σύνθετα υλικά αποδεικνύεται από τα καινοτόμα σχέδια που μπορούν να φανούν σε πολλά από τα συστήματα μετρό και τραμ που έχουν εγκατασταθεί σε πολλές ευρωπαϊκές πόλεις.

Τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά έχουν προσελκύσει από καιρό την προσοχή της σύνθετης κοινότητας, κυρίως λόγω του τεράστιου όγκου παραγωγής που εμπλέκεται. Είναι μια καλά εδραιωμένη βιομηχανία, η οποία κυριαρχείται από μια συντηρητική προσέγγιση της χρήσης υλικών και κυρίως από το κόστος. Τα αυτοκίνητα κατασκευάζονται με αυξανόμενο αριθμό πρόσθετων στοιχείων, όπως πιο περίπλοκα καθίσματα, μονάδες κλιματισμού και χαρακτηριστικά ασφαλείας, τα οποία αυξάνουν το βάρος σε μια εποχή όπου η οικονομία

καυσίμου είναι ολοένα και πιο σημαντική. Η αιτία για την εισαγωγή των σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η δυνατότητα δημιουργίας καινοτόμων σχημάτων σώματος καθώς και η μείωση του βάρους για την παραγωγή πρωτότυπων οχημάτων με ενισχυμένη αντοχή στη διάβρωση. Επιπλέον, εδώ και καιρό αναγνωρίζεται ότι τα σύνθετα υλικά μπορούν να απορροφήσουν περισσότερη ενέργεια σε περίπτωση σύγκρουσης για το ίδιο βάρος μιας μεταλλικής δομής.

2.2 Η αγορά των ενισχυμένων με ίνες σύνθετων πολυμερών

Η εικόνα 14 παρουσιάζει ένα διάγραμμα σχετικά με το συνολικό όγκο των ινολπισμένων πολυμερών στην αγορά. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι από το 1970 ο όγκος τους στην αγορά έχει τετραπλασιαστεί. Ο συνολικός όγκος των χρησιμοποιούμενων υλικών είναι 5,5 εκατομμύρια τόνοι. Συγκρινόμενο με την ετήσια χρήση χάλυβα περίπου 1400 εκατομμύρια τόνοι παραμένει ασφαλώς μικρή. Η διαφορά με την ετήσια παραγωγή σκυροδέματος είναι ακόμη μεγαλύτερη. Το 2010 περίπου 20.000 εκατομμύρια τόνοι σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν στη βιομηχανία.



Εικόνα 14 Η αγορά των σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών από το 1970 έως το 2010

2.3 Κατηγορίες Συνθέτων

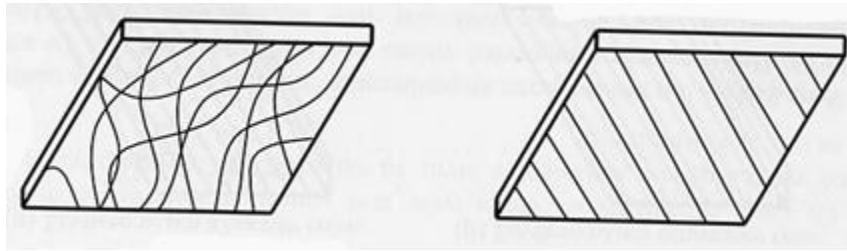
Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών συνιστά ένα δομικό στοιχείο από σύνθετο υλικό. Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή στα οποία κυρίως εστιάζεται αυτό το κεφάλαιο, έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Σε αυτή τη μορφή, τόσο οι ίνες όσο και η μήτρα διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κανένα από τα συστατικά στοιχεία όταν δρα μόνο του. Η συγκόλληση των προσανατολισμένων ινών πάνω στο μαλακότερο υλικό της μήτρας έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς με σαφώς καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά ινών (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.

- Σύνθετα υλικά στρωμάτων (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών

- Προσανατολισμένα (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Μη προσανατολισμένα (RANDOM), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό .

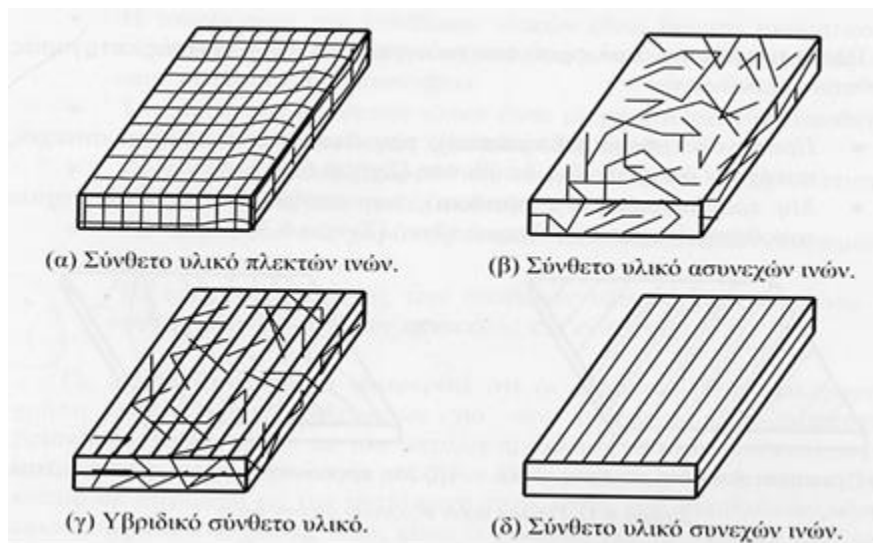


Εικόνα 15 Μη προσανατολισμένο (αριστερα) και προσανατολισμένο (δεξιά) σύνθετο υλικό

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- Πλεκτών ινών (woven fiber), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης. Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.
- Ασυνεχών ινών (chopped fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.

- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών-ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



Εικόνα 16 Βασικοί τύποι σύνθετων υλικών βάση τοποθέτηση ινών

Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των προσανατολισμένων σύνθετων υλικών συνεχών ινών (directional continuous fibrous composites). Λόγω του προσανατολισμού των ινών, το σύνθετο υλικό που προκύπτει συμπεριφέρεται ανισοτροπικά, σε αντιστοιχία με τη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτή η ανισοτροπική συμπεριφορά δίνει στο μελετητή τη δυνατότητα να διευθετήσει κατά τέτοιο τρόπο τις στρώσεις του σύνθετου υλικού έτσι ώστε να ενισχύσει το μέλος στη διεύθυνση που αναπτύσσονται οι υψηλότερες τάσεις.

Όπως προαναφέρθηκε, οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου

ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης - παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του φορτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

2.3.1 Ίνες

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες πολυαραμίδης.

(α) Ίνες Ύαλου.

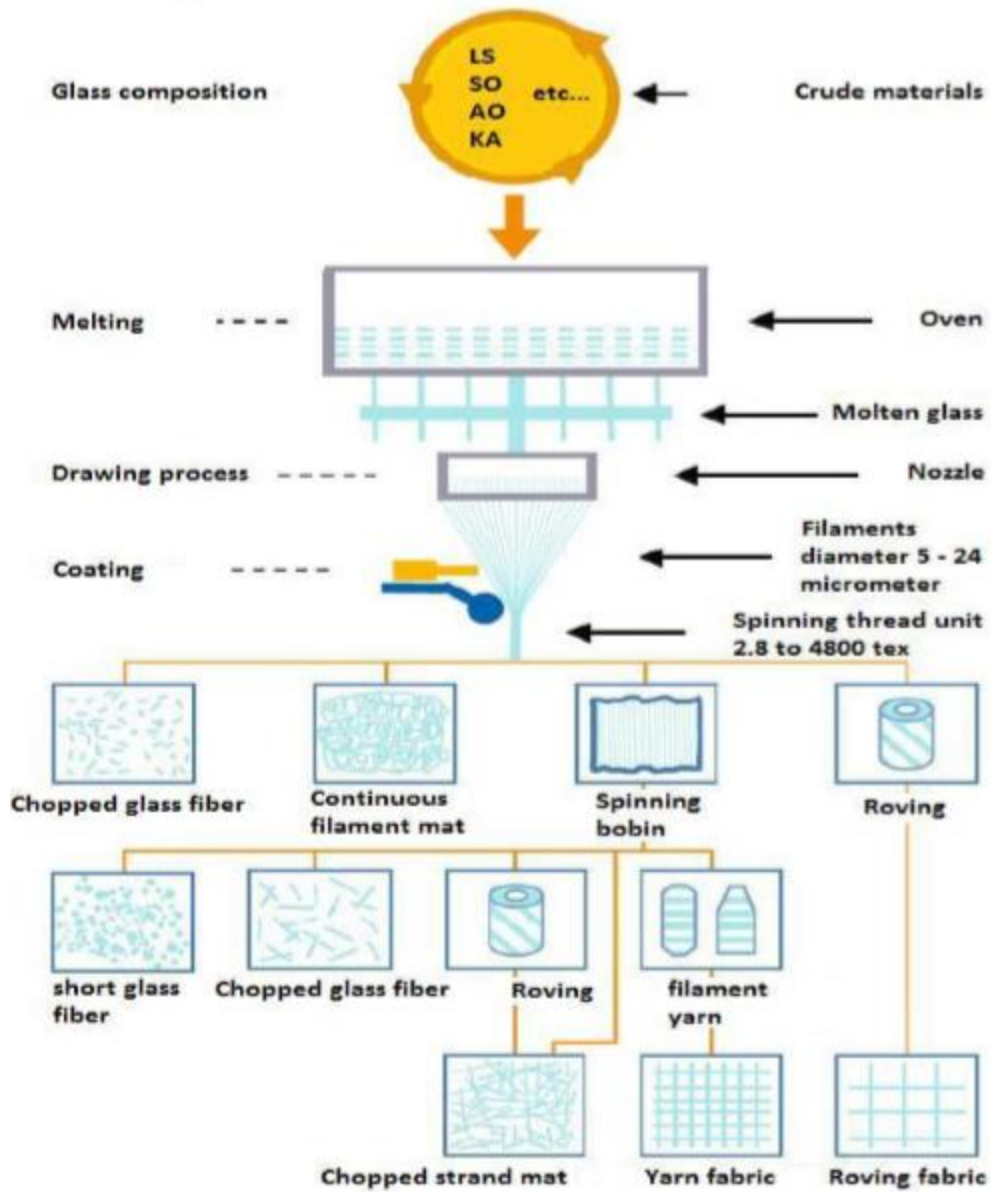
Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς, οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Αν και, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, ο ύαλος- S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω του υψηλού του κόστους έχει περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο.

Πίνακας 2 Ιδιότητες τύπων ινών υάλου.

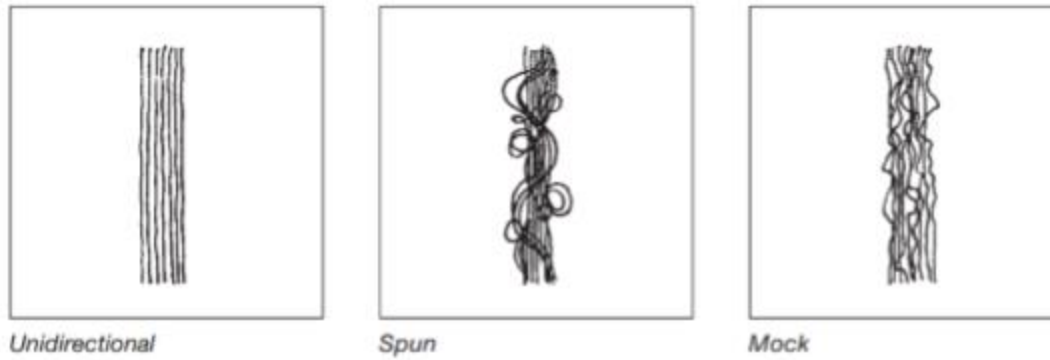
| Είδος υαλονήματος | Εφελκυστική αντοχή (MPa) | Μέτρο ελαστικότητας (GPa) | Επιμήκυνση θραύσης (%) | Πυκνότητα (gr/cm ³) |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|
| ύαλος-E | 2000 – 3000 | 70 – 75 | 3.0 – 4.5 | 2.54 |
| ύαλος-S | 3500 – 4800 | 85 – 90 | 4.5 – 5.5 | 2.48 |

Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Ο ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμίδης, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, ο ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

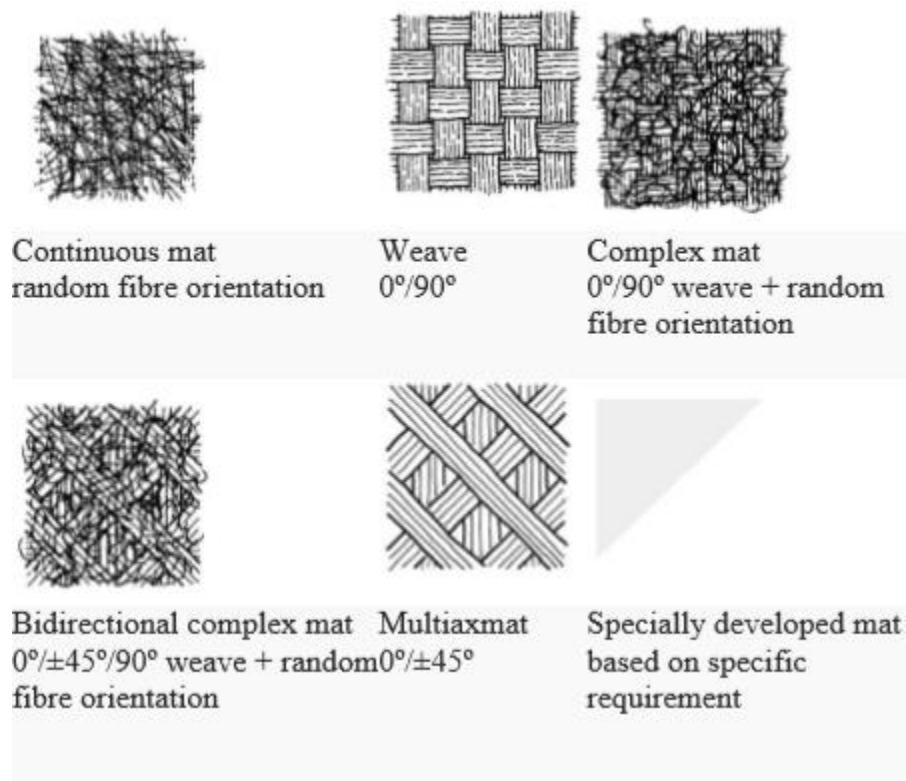
Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των ινών γυαλιού είναι το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, η χαμηλή ανθεκτικότητα σε υγρό και αλκαλικό περιβάλλον, καθώς και η χαμηλή μακροχρόνια αντοχή λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης (stress rupture). Παρακάτω παρουσιάζεται σε διάγραμμα η διαδικασία παραγωγής των ινών του γυαλιού.



Εικόνα 17 Διαδικασία παραγωγής ινών γυαλιού



Εικόνα 18 Τρόπος διαστρωμάτωσης ιών γυαλιού



Εικόνα 19 Τύποι ύφανσης ιών γυαλιού

(β) Ίνες Άνθρακα.

Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγίον με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000°C).

Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εντείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Θεωρητικά, οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες που προσεγγίζουν τα 100 GPa εφελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως, οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στην κρυσταλλική δομή.

Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0.2 έως 2.5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής.

Οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες, είτε αυτή είναι όξινοι είτε βασικοί, και επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

(γ) Ίνες Πολυαραμίδης.

Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμίδης που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμίδης σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία.

Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμίδης έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2.5 και 5.0%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%), ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

Εκτός από τις παραπάνω τρεις κύριες κατηγορίες, άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές πολιτικού μηχανικού είναι οι ακόλουθες:

- Ίνες γραφίτη: παράγονται όπως και οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση. Οι ίνες γραφίτη περιέχουν κατά τουλάχιστον 99% άνθρακα, ενώ το ποσοστό άνθρακα των ανθρακονημάτων είναι λιγότερο από 95%.
- Ίνες βορίου: έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο (0.05-0,2mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες. Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.
- Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου: έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

2.3.2 Μήτρες

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Η ρητίνη αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών και, ταυτόχρονα, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και ρητίνης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική

συμβατότητα έτσι ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεση τους.

Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στην πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλ' αυτά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες, καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομογενές υλικό.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Η προένταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η διάρρηξη λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3).

(α) Εποξικές Ρητίνες.

Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξικές ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους.

Πίνακας 3 Ιδιότητες ρητινών

| Είδος ρητίνης | Εφελκυστική αντοχή (MPa) | Μέτρο ελαστικότητας (GPa) | Επιμήκυνση θραύσης (%) | Πυκνότητα (gr/cm ³) |
|---------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Εποξική | 55 – 130 | 2.0 – 4.5 | 4.0 – 14.0 | 1.20 – 1.30 |
| Πολυεστερική | 35 – 104 | 2.1 – 4.1 | < 5.0 | 1.10 – 1.46 |
| Βινυλεστερική | 73 – 81 | 3.0 – 3.6 | 3.5 – 5.5 | 1.12 – 1.32 |

β) Πολυεστερικές Ρητίνες.

Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίδες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Η χημική αντίδραση με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλέγει ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα εάν η μάζα είναι μικρή η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση συγκριτικά με τις εποξικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται είναι η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης.

(γ) Βινυλεστερικές Ρητίνες.

Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξικό πολυμερές

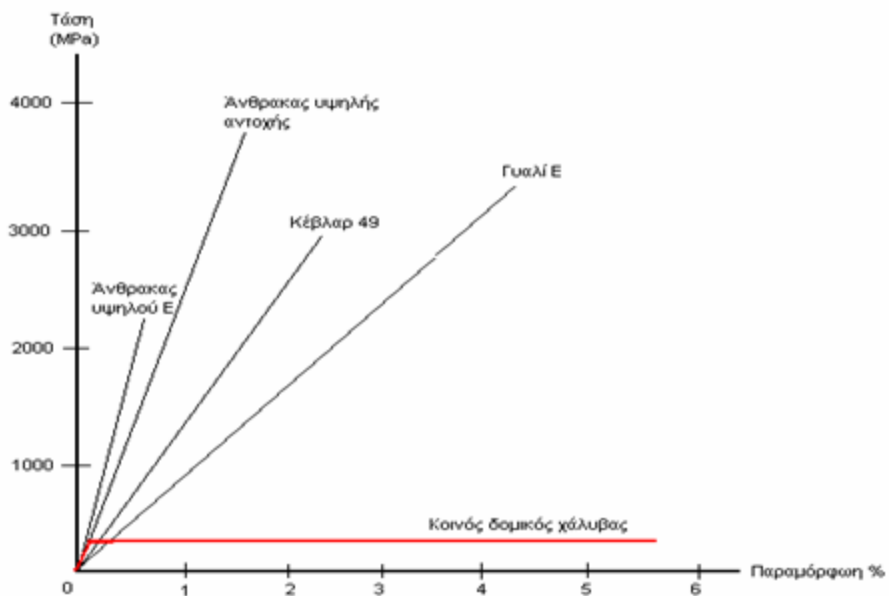
σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών υάλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών λόγω συστολής ξηράνσεως.

Αντιθέτως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξης του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξικών και των πολυεστερικών ρητινών.

2.4 Ιδιότητες συνθέτων:

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Στον Πίνακα παρουσιάζονται η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος μίας στρώσης των δύο συνηθέστερων τύπων ινοπλισμένων πολυμερών υγρής εφαρμογής που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση δομικών στοιχείων. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν με συνδυασμό είτε υαλονημάτων και εποξικής ρητίνης είτε ανθρακονημάτων και εποξικής ρητίνης. Στη διάθεση του μηχανικού βρίσκονται επίσης με τη μορφή ελασμάτων μικρού πλάτους (60 - 100 MM) και πάχους της τάξης του 1.5 MM προκατασκευασμένα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα τα οποία επικολλούνται στο σκυρόδεμα μέσω ρητίνης. Εφαρμόζονται κυρίως για την ενίσχυση πλακών και δοκών.

| Τύπος σύνθετου υλικού | Εφελκυστική αντοχή (MPa) | Μέτρο ελαστικότητας (GPa) | Πάχος στρώσης (mm) |
|---|--------------------------|---------------------------|--------------------|
| Υαλονήματα και εποξική ρητίνη | 1800 – 4300 | 65 – 80 | 0.30 – 1.30 |
| Ανθρακονήματα υψηλής αντοχής και εποξική ρητίνη | 2200 – 4300 | 200 – 450 | 0.12 – 0.60 |



Εικόνα 20 Τυπικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για τα υλικά των ινών και το χάλυβα

Τα σύνθετα υλικά που εφαρμόζονται στο πεδίο των ενισχύσεων προκύπτουν από το συνδυασμό συνεχών ινών, συνήθως μιας διεύθυνσης, και πολυμερικής μήτρας (γι αυτό και ονομάζονται ινοπλισμένα πολυμερή). Διακρίνονται δύο τύποι σύνθετων υλικών:

- Τύπου «δύσκαμπτου» ελάσματος (strip) πάχους 1-1.5mm και πλάτους μερικών χιλιοστών (50-100mm). Σε αυτά οι ίνες καταλαμβάνουν περίπου το 50-70% του συνολικού όγκου του υλικού
- Τύπου «εύκαμπτου» υφάσματος (fabric) η φύλλων (sheets) πάχους 0.1-0.5mm στα οποία όταν παρασκευάζονται με επιτόπου εφαρμογή της ρητίνης, το ποσοστό των ινών ανέρχεται σε 20-35%.

Τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται σε δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα, φέρουσα τοιχοποιία και ξύλο και χρησιμοποιούνται για:

- την αύξηση της αντοχής σε κάμψη
- την αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα και
- την περίσφιγξη υποστυλωμάτων/τοιχοποιιών

Πέρα από την αύξηση της αντοχής σε καμπτικά και διατμητικά φορτία, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ακόμα στις φέρουσες τοιχοποιίας:

- για την απορρόφηση εφελκυστικών τάσεων από στατικά ή δυναμικά φορτία σε τόξα, θόλους ή τρούλους
- για την αποκατάσταση και τον έλεγχο της κατακορυφότητας των τοίχων και
- για την περίδεση ρηγματωμένων κτιρίων, ώστε να αποκατασταθεί η έννοια της «κιβωτοειδούς» συμπεριφοράς των, ή μέρους αυτών και για τη συρραφή ρηγματώσεων.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών με ίνες σε μια κυρίως διεύθυνση μπορούν να μετρηθούν πειραματικά είτε να εκτιμηθούν βάσει των αντίστοιχων ιδιοτήτων των ινών και της μήτρας μέσω των εξισώσεων:

$$E_f = E_{fib} V_{fib} + E_m V_m$$

$$f_f = f_{fib} V_{fib} + f_m V_m$$

όπου:

E_f, f_f : μέτρο ελαστικότητας, εφελκυστική αντοχή σύνθετου υλικού παράλληλα στις ίνες E_{fib} , f_{fib} : μέτρο ελαστικότητας, εφελκυστική αντοχή ινών E_m, f_m : μέτρο ελαστικότητας, εφελκυστική αντοχή μήτρας V_{fib}, V_m : ογκομετρικό ποσοστό ινών, μήτρας ($V_m=1- V_{fib}$)

Επειδή όμως τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η εφελκυστική αντοχή των ινών είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της μήτρας ($E_{fib} \gg E_m, f_{fib} \gg f_m$) οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν κατά προσέγγιση ακόμα και αν στα αθροίσματα του δεξιού σκέλους αγνοηθούν οι δεύτεροι όροι. Δηλαδή, τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών ουσιαστικά μπορούν να εκτιμηθούν από το γινόμενο της αντίστοιχης ιδιότητας για τις ίνες επί το ογκομετρικό ποσοστό αυτών.

Τα σύνθετα υλικά έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας και μεγάλη αντοχή κατά τη διεύθυνση των ινών και είναι αδύναμα κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Δεδομένου ότι τα υλικά αυτά είναι έντονα ανισότροπα, οι συνέπειες από τοποθέτηση κατά την λανθασμένη διεύθυνση δύναται να είναι σημαντικές.

Στην περίπτωση των προκατασκευασμένων ελασμάτων, η παραγωγή του σύνθετου υλικού έχει γίνει σε βιομηχανική μονάδα και επομένως οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών

είναι γνωστές εκ των προτέρων (π.χ. βάσει εργαστηριακών μετρήσεων). Στην περίπτωση, όμως, των υφασμάτων υπάρχει μια αβεβαιότητα ως προς την ποσότητα της ρητίνης που θα εμποτίσει τις ίνες και επομένως ως προς το τελικό ογκομετρικό ποσοστό των ινών μέσα στο σύνθετο υλικό.

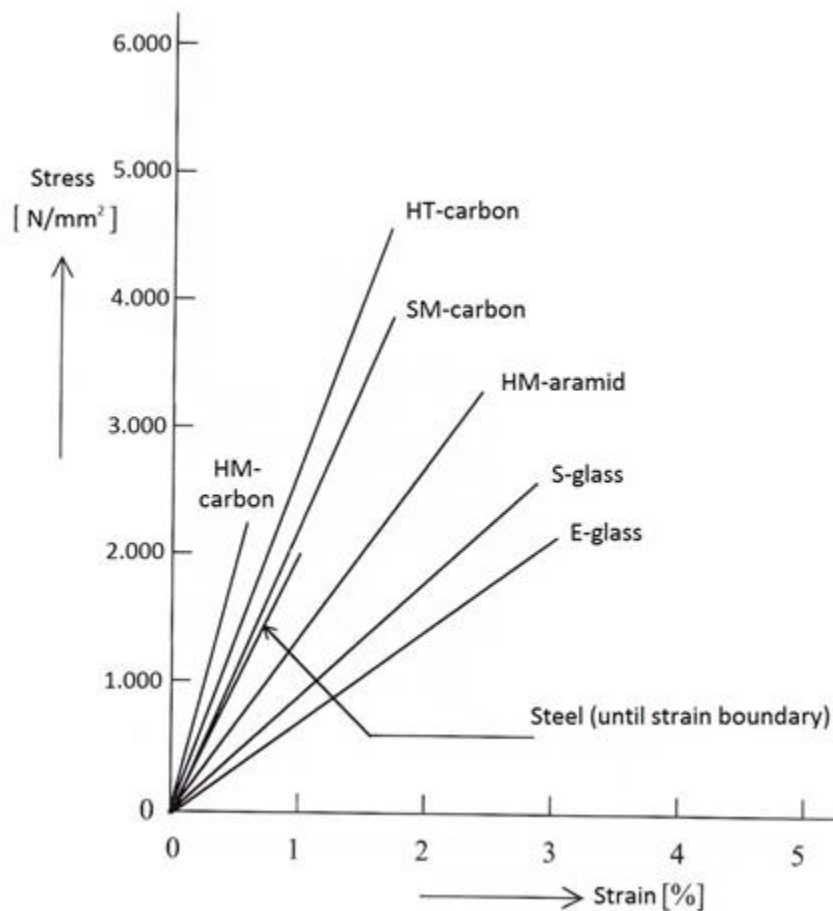
Κύριο χαρακτηριστικό τους, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η καθαρά ελαστική, γραμμική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία τους, καθώς οι ίνες συμπεριφέρονται γενικά μόνο ελαστικά. Το παραπάνω συνεπάγεται έλλειψη πλάστιμης συμπεριφοράς και επομένως αδυναμία απορρόφησης ενέργειας, γεγονός που αποτελεί βασικό μειονέκτημα των σύνθετων υλικών. Σπάνια, τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή διαρροή, ενώ η θραύση τους είναι η τυπική μορφή αστοχίας υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης. Μια τεχνική που χρησιμοποιείται ώστε να προσδώσει κάποιο βαθμό πλαστιμότητας στο υλικό είναι η σύνθεση του υλικού με ίνες διαφορετικού τύπου με αποτέλεσμα οι ίνες να αστοχούν σε διαφορετική τιμή παραμόρφωσης και να δημιουργείται τελικά μια ψευδο-πλάστιμη συμπεριφορά.

Η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών υπολογίζεται 3-4 φορές μεγαλύτερη από αυτή του κοινού χάλυβα. Όμως για μακροχρόνια φόρτιση, η εφελκυστική αντοχή μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Για υλικά με ίνες υάλου, η αντοχή μειώνεται στο 40-60% της αρχικής τιμής ενώ για υλικά με ίνες άνθρακα ή αραμιδίου το ποσοστό ανέρχεται σε 50-65% και 75-95% αντίστοιχα.

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται στα ενισχυόμενα στοιχεία είναι ότι στην περίπτωση ρηγματώσης πριν την αστοχία, η οποία είναι ψαθυρή εφόσον για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας προστίθεται μόνο εφελκυστικός σπλισμός, οι ρωγμές δεν είναι εμφανείς εφόσον καλύπτονται από τα σύνθετα υλικά και ενδέχεται να μη γίνουν αντιληπτές.

Στα ακόλουθα γράφημα (εικόνα 21,22) και πίνακα (Πίνακας 5) παρουσιάζονται ορισμένες σημαντικές μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων ινών γυαλιού, ινών άνθρακα και ινών αραμιδίου. Το γράφημα παρακάτω δείχνει τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης των υλικών αυτών σε σύγκριση με εκείνη του χάλυβα.

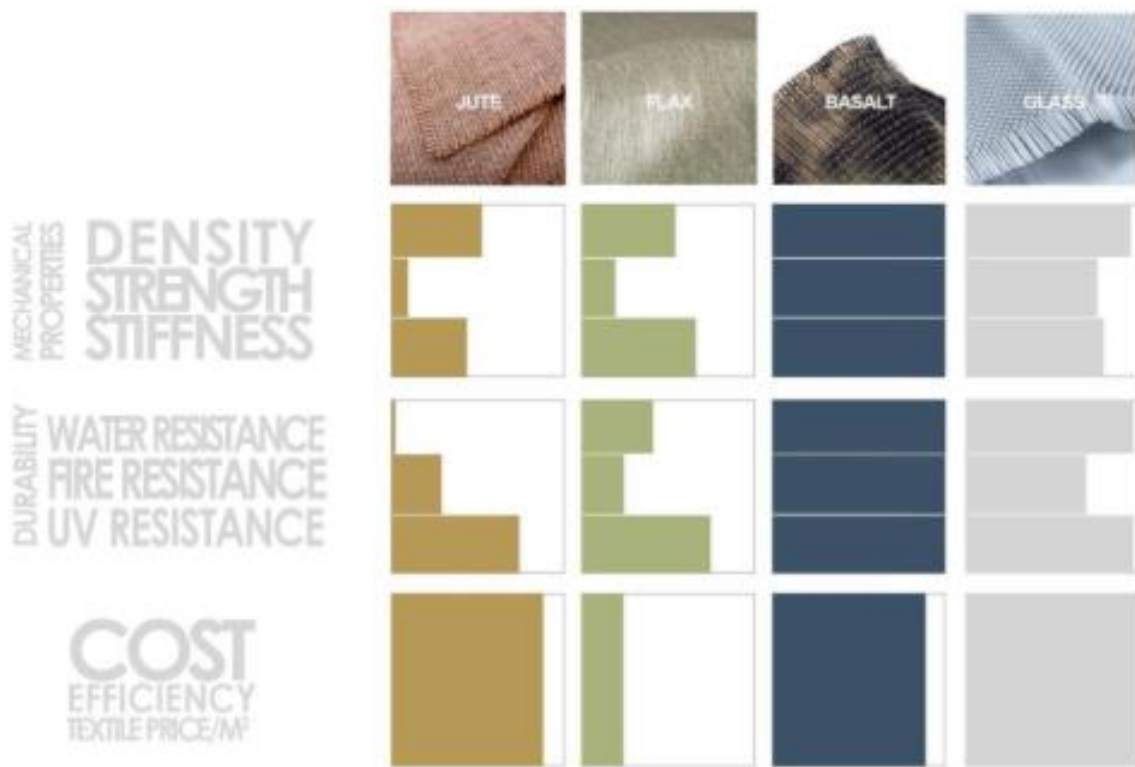
Στον πίνακα E-glass σημαίνει ηλεκτρική ποιότητας ίνες γυαλιού, S- glass σημαίνει ίνες γυαλιού υψηλής αντοχής. SM-άνθρακα σημαίνει ίνα άνθρακα τυπικού μέτρου ελαστικότητας, HT-άνθρακα σημαίνει υψηλής αντοχής ίνες άνθρακα, HM- άνθρακα σημαίνει ίνα άνθρακα μεγάλου μέτρου ελαστικότητας. HM-αραμιδίου σημαίνει επίσης υψηλό συντελεστή ινών αραμιδίου.



Εικόνα 21 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για διαφορετικές ίνες ενίσχυση

Πίνακας 4 Μηχανικές ιδιότητες ινών ενίσχυσης.

| Property | Symbol | Unit | Unsaturated | Epoxy Resin | Epoxy Resin | Epoxy Resin |
|-------------------------|--------|--------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | Polyester Resin | | | |
| Curing temperature | Tc | °C | - | 20 | 80+140 | 120+160 |
| Density | ρm | 3 kg/m | 1.150-1.250 | 1.150-2.000 | 1.150-2.000 | 1.200-1.300 |
| Modulus of elasticity | Em | $3 \cdot 10^2$ N/mm | 2,4-4,6 | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Poisson's ratio | vm | - | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| Tensile strength | stm | $2 \cdot 10^2$ N/mm | 40-85 | 50-70 | 60-80 | 80-90 |
| Compressive strength | scm | $2 \cdot 10^2$ N/mm | 140-150 | 90,0 | 130,0 | 120,0 |
| Rupture strain | em | % | 1,2-4,5 | 2,0-4,0 | 3,0-5,0 | 4,0-5,0 |
| Lin. Therm. Exp. Coeff. | αm | $-6 \cdot 10^{-6}$ /K | 80-150 | 90,0 | 60,0 | 65,0 |



Εικόνα 22 Συγκριτικές ιδιότητες ινών ενίσχυσης

Στο πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4) παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες δύο κοινών τύπων θερμοσκληρυνόμενων ρητινών. Ο πρώτος τύπος είναι μια ρητίνη ακόρεστης πολυεστερικής ρητίνης. Ο δεύτερος τύπος είναι μία εποξειδική ρητίνη. Στον πίνακα, παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές φαρμακοτεχνικές μορφές αυτής της ρητίνης σε επεξεργασία. Οι εποξειδικές ρητίνες διαφέρουν σε θερμοκρασία ωρίμανσης.

Πίνακας 5 Μηχανικές ιδιότητες διαφορετικών ρητινών μήτρας με περιεχόμενο ινών 60%.

| Property | Symbol | Unit | E-glass | SM-carbon | HT-carbon | HM-aramid |
|-------------------------------|------------|-------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Density | ρ | kg/m ³ | 2.000 | 1.550 | 1.550 | 1.350 |
| Long. modulus of elasticity | EL | 3 2 10 N/mm | 40 | 130 | 150 | 75 |
| Flexural modulus | EB | 3 2 10 N/mm | 35 | 125 | 130 | 70 |
| Transv. Modulus of elasticity | ET | 3 2 10 N/mm | 10,0 | 9,0 | 10,0 | 5,5 |
| Long. Transv. Shear Modulus | GLT | 3 2 10 N/mm | 4,5 | 6,0 | 6,0 | 2,5 |
| Long. Transv. Poisson's Ratio | ν_{LT} | - | 0,27 | 0,30 | 0,30 | 0,32 |
| Long. Tensile strength | sLt | 2 N/mm | 800 | 1.550 | 1.700 | 1.400 |
| Long. Compressive strength | sLc | 2 N/mm | 500 | 1.250 | 1.500 | 270 |
| Bending strength | sB | 3 N/mm | 850 | 1.600 | 1.750 | 625 |
| Transv. Tensile strength | sTt | 2 N/mm | 30 | 70 | 55 | 30 |
| Transv. Compressive strength | sTc | 2 N/mm | 140 | 200 | 250 | 55 |
| Long. Transv. shear strength | sLT | 2 N/mm | 65 | 90 | 80 | 35 |
| Interlaminar shear strength | ILSS | N/mm ² | 40 | 100 | 125 | 60 |
| Long. Lin. Therm. Exp. Coef. | α_L | -6 10 /K | 7 | 1,5 | 0,5 | -2 |
| Trnsv. Lin. Therm. Exp. Coef. | α_T | -6 10 /K | 20 | 25 | 30 | 60 |

2.5 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι:

- Χαμηλό ειδικό βάρος και επομένως ελάχιστο προστιθέμενο βάρος

Τα σύνθετα υλικά είναι σχετικά ελαφρά (έχουν βάρος περίπου στο 20-25% του χάλυβα) και παρουσιάζουν μικρό όγκο. Έτσι, δεν επιβάλλουν μεγάλες φορτιστικές επιβαρύνσεις στην κατασκευή και για το λόγο αυτό προτιμώνται από άλλα υλικά ή μεθόδους ενίσχυσης. Έτσι η εισαγωγή στον φορέα αυξάνει ελάχιστα τη μάζα του τμήματος και συνεπώς τα αδρανειακά φορτία όταν έχουμε δυναμική καταπόνηση. Επιπλέον τα κατακόρυφα νεκρά φορτία αυξάνονται λιγότερο.

- Υψηλή εφελκυστική αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα)
- Διαθεσιμότητα υλικού σε πολλά, διαφορετικά και μεγάλα μήκη.

Η διαθεσιμότητα των σύνθετων υλικών καθώς και η μεγάλη «ευκαμψία» τους και συνεπώς και η εργασιμότητα τους αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα απέναντι στα τυπικά υλικά. Επίσης, η βιομηχανική τυποποίηση τους επιτρέπει τη χρήση διαφόρων διατάξεων χωρίς περιορισμό σε γεωμετρικές διαστάσεις.

- Απλή και γρήγορη εφαρμογή, εύκολη εγκατάσταση, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου ο χώρος εργασίας είναι περιορισμένος.
- Αυξημένη ανθεκτικότητα σε διάβρωση

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σημαντική αντοχή στο χρόνο ενώ είναι ανθεκτικά απέναντι σε πολλούς από τους συνηθισμένους διαβρωτικούς παράγοντες όπως το νερό, η υγρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία, καθώς και το αλκαλικό ή όξινο περιβάλλον. Παράλληλα παρουσιάζουν σημαντική ανθεκτικότητα έναντι κόπωσης, ερπυσμό και κρουστικών καταπονήσεων.

- Μικρός χρόνος εκτέλεσης εργασίας
- Συμβατότητα με το υπόστρωμα

Η συμβατότητα αυτή αφορά μόνο τη ρητίνη, διότι οι ίνες των σύνθετων υλικών δεν έρχεται σε επαφή με τις ενισχυόμενες επιφάνειες.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι:

- Χαμηλή αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες
- Έλλειψη πλαστιμότητας
- Σχετικά υψηλό κόστος

Στην φάση οριακής κατάστασης αστοχίας εμφανίζεται ψαθυρή θραύση, ιδιότητα που δε συμβαδίζει με την τάση για πλαστικό σχεδιασμό των στοιχείων. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά έχουν τη δυνατότητα να αναλάβουν υψηλές ελαστικές παραμορφώσεις με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας των στοιχείων που έχουν ενισχυθεί με τη μέθοδο αυτή.

Κεφάλαιο 3^ο Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method - FEM), προέρχεται από το χώρο της μηχανικής και χρησιμοποιείται κατά κόρον για προβλήματα τα οποία έχουν να κάνουν με τη μελέτη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών αντικειμένων ακαθόριστου σχήματος. Αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο υπολογισμού η οποία αρχικά χρησιμοποιούταν για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται σε κατασκευές αεροναυπηγικής. Οι αρχές της βρίσκονται στο 1941 όταν ο R. Courat παρουσίασε τα βασικά στοιχεία της μεθόδου, χρησιμοποιώντας την υποδομή που δημιούργησαν μέσω του έργου τους οι Lord Rayleigh, W.Ritz και B. G. Galerkin. Λόγω του γεγονότος ότι οι αναλυτικές μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν στη μελέτη αντικειμένων οποιασδήποτε γεωμετρίας, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να δώσει τη λύση παρέχοντάς μας προσεγγιστικές λύσεις. Η μέθοδος εφαρμόστηκε πρώτη φορά στον τομέα των ηλεκτρολόγων μηχανικών το 1970. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει βρει ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως στην αεροναυπηγική, στη μηχανική, στη μηχανική των υγρών καθώς επίσης και σε προβλήματα διάδοσης κυμάτων και παλμών σε διάφορα μέσα. Μια από τις κατηγορίες αυτές αποτελούν και οι ηλεκτρικές μηχανές. Στον συγκεκριμένο κλάδο η μέθοδος χρησιμοποιείται για την εύρεση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο χώρο. Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να υπολογίσει χαρακτηριστικά πεδιακών αναλύσεων για οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα. Το μεγάλο της πλεονέκτημα λοιπόν έναντι των άλλων υπολογιστικών μεθόδων, είναι ότι είναι πολύ ευέλικτη για πολύπλοκες γεωμετρίες και ανομοιογενή υλικά.

Το 1909 ο Γερμανός μαθηματικός Ritz ανέπτυξε τις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ενώ το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε τη διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρι την ανακάλυψη του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές. Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου

των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών. Το 1941 ο Hrenikoff εισήγαγε την καλούμενη framework method (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών. Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν τη μέθοδο. Το 1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης έγραψε ένα βιβλίο με θέμα 'Ενεργειακά Γενικά περί των Πεπερασμένων Στοιχείων 21 θεωρήματα και η μέθοδος των μητρών' και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων. Το 1960 ο Ι. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων. Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley' της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα 'Πεπερασμένα στοιχεία' (Finite elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία. Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων. Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στη μηχανική, στα ρευστά, τη θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες.

3.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων με τη χρήση των μητρωικών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή μας παρέχει αποτελέσματα με μεγάλη αξιοπιστία και έχεις επίσης το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα (Daryl L. Logan, 2007).

Η σύνδεση μεταξύ των στοιχείων(elements) και των κόμβων(nodes), τα οποία αποτελούν το πλέγμα της γεωμετρίας μας, περιγράφονται από την παρακάτω σχέση:

$$[K] * \{u\} = \{f\}$$

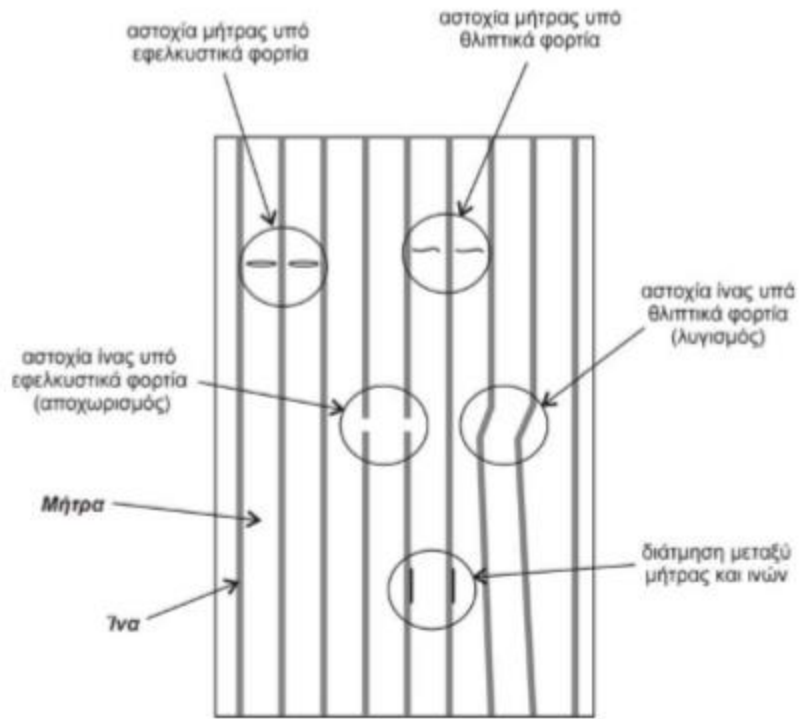
Όπου: $[K]$: είναι το μητρώο της ακαμψίας του στοιχείου, και το οποίο διαμορφώνεται βάσει της γεωμετρίας, των ιδιοτήτων του υλικού και των ιδιοτήτων του στοιχείου. $\{u\}$: είναι το διάνυσμα μετατόπισης, το οποίο περιγράφει πόσο μετατοπίστηκαν οι κόμβοι (nodes) από την αρχική τους θέση, λόγω των φορτίων που ασκούνται σε αυτούς. $\{f\}$: είναι το φορτίο που δέχονται τα στοιχεία (elements)

Αυτές είναι οι τρεις συνθήκες που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός συστήματος εξισώσεων που η μετατόπιση είναι ο άγνωστος. Επίσης, εφαρμόζονται οριακές συνθήκες (Boundary Conditions) για να αποτρέψουν την κίνηση στο άκαμπτο σώμα και για να βρεθούν οι μετατοπίσεις $\{u\}$ από τις γραμμικές εξισώσεις.

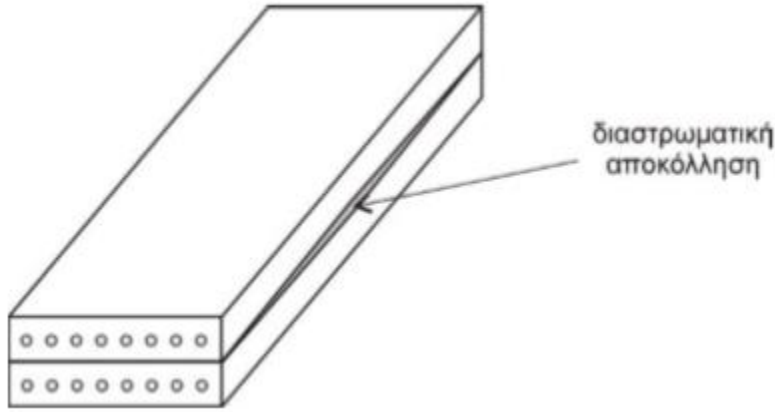
Από το διάνυσμα των μετατοπίσεων μπορούν να υπολογισθούν αντίστοιχα οι παραμορφώσεις σε όλες τις διευθύνσεις και μετέπειτα οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά την φόρτιση του υλικού.

3.2 Τύποι αστοχίας για ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, όπου η αστοχία ορίζεται ως η δημιουργία και διάδοση ρωγμών, στα σύνθετα υλικά, ο μακροσκοπικός ορισμός της αστοχίας δεν είναι διακριτός. Τα ετερογενή πολύστρωτα υλικά εμφανίζουν πολλές διαφορετικές τοπικές αστοχίες πριν από τον διαχωρισμό τους σε διαφορετικά κομμάτια. Οι τοπικές αστοχίες αναφέρονται ως 'βλάβη' και η ανάπτυξη τους με την αύξηση του φορτίου ή την παρέλευση του χρόνου ως 'συσσώρευση βλάβης'. Οι μηχανισμοί αστοχίας στα ινώδη σύνθετα υλικά είναι πολύπλοκοι. Σε μικρή κλίμακα οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας είναι: η αστοχία της μήτρας υπό εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία, η αστοχία των ινών υπό εφελκυστικά (αποχωρισμός ινών) και θλιπτικά φορτία (λυγισμός των ινών) και η διάτμηση μεταξύ μήτρας και ινών. Στο επίπεδο πολύστρωτης πλάκας, η διαστρωματική αποκόλληση (αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων) είναι η πιο συχνά παρατηρούμενη αστοχία.



Εικόνα 23 Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών αστοχίας σε μια ινώδη στρώση



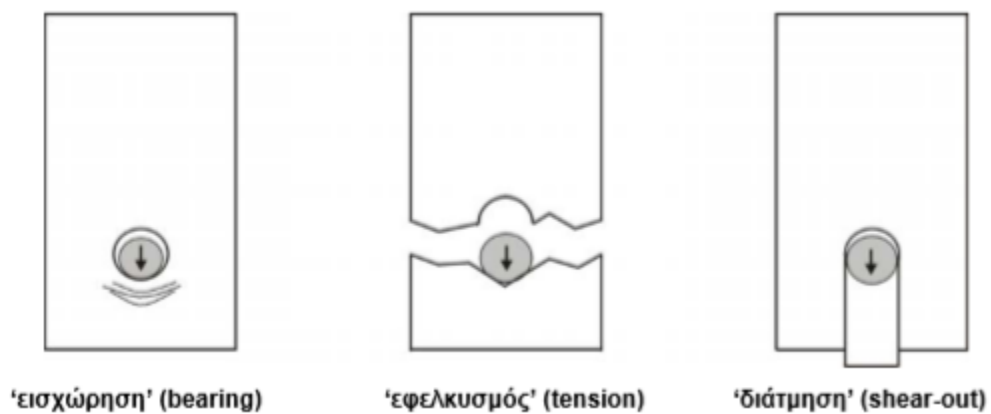
Εικόνα 24 Σχηματική αναπαράσταση της διαστρωματικής αποκόλλησης

Παρόλη την πρόοδο που έχει σημειωθεί στην ανάπτυξη κριτηρίων πρόβλεψης των αστοχιών σε επίπεδο στρώσης πολύστρωτων πλακών, δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα κριτήρια τα οποία να προβλέπουν ικανοποιητικά την αστοχία σε όλα τα επίπεδα της ανάλυσης, για όλες τις συνθήκες φόρτισης και για όλους τους τύπους των σύνθετων υλικών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δυσκολία της μοντελοποίησης των πολύπλοκων

μηχανισμών αστοχίας σύνθετα υλικά. Το αποτέλεσμα είναι να έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια εξειδικευμένα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ενδεικτικά, ορισμένα από τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς είναι τα κριτήρια Μέγιστης τάσης και Μέγιστης παραμόρφωσης, το κριτήριο Tsai-Hill, το κριτήριο Tsai-Wu και τα κριτήρια Hashin.

Η αντοχή και οι μηχανισμοί αστοχίας των μηχανικών συνδέσεων στα σύνθετα υλικά, διαφέρουν κατά πολύ από την αντοχή και τους μηχανισμούς αστοχίας των μηχανικών συνδέσεων στα μεταλλικά υλικά, εξαιτίας της ανισοτροπίας και ανομοιογένειας που παρουσιάζουν. Ο βέλτιστος σχεδιασμός των μηχανικών συνδέσεων σύνθετων υλικών, απαιτεί την κατανόηση όλων των μηχανισμών αστοχίας καθώς και την συσχέτιση τους με τα επιβαλλόμενα φορτία. Μέχρι σήμερα, ο σχεδιασμός αυτός, έχει περιοριστεί στον πειραματικό προσδιορισμό της επίδρασης γεωμετρικών παραμέτρων στην αντοχή της σύνδεσης. Η συνήθης διαδικασία του πειραματικού σχεδιασμού, είναι η διεξαγωγή πειραμάτων μέχρι την αστοχία, μεταβάλλοντας τον παράγοντα που είναι υπό μελέτη και κρατώντας τους άλλους σταθερούς. Την ίδια στιγμή, τα θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί, είναι προσεγγιστικά λόγω της αδυναμίας τους να υπολογίσουν τους πολύπλοκους μηχανισμούς αστοχίας και να λάβουν υπόψη σημαντικές παραμέτρους, όπως είναι η τριβή, η αλληλουχία στρώσεων, η ροπή συναρμογής, κ.τ.λ. Έχει παρατηρηθεί πειραματικά, ότι οι μηχανικές συνδέσεις πολύστρωτων πλακών, αστοχούν κάτω από τρεις βασικούς μακροσκοπικούς μηχανισμούς αστοχίας. Οι μηχανισμοί είναι ο 'εφελκυσμός' (tension), η 'διάτμηση' (shear-out) και η 'εισχώρηση' (bearing). Ο 'εφελκυσμός', είναι η εγκάρσια στην διεύθυνση της φόρτισης αστοχία, η οποία προκαλείται από εφελκυστικές δυνάμεις στο όριο της οπής. Η αστοχία αυτή παρατηρείται, όταν η απόσταση της οπής από την πλευρική άκρη της πλάκας είναι μικρή. Η 'διάτμηση', προκαλείται από υψηλές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται σε 45° διεύθυνση, ως προς την διεύθυνση της φόρτισης και εμφανίζεται σε όλες τις περιπτώσεις των ορθότροπων πολύστρωτων πλακών καθώς και όταν η απόσταση της οπής από το κάτω άκρο της πλάκας είναι μικρή. Τέλος, η 'εισχώρηση' (ο ήλος εισχωρεί στην πολύστρωτη πλάκα λόγω μεγάλης παραμόρφωσης της οπής), αναπτύσσεται στο υλικό, που βρίσκεται στην περιοχή της επαφής του ήλου με την πολύστρωτη πλάκα, προκαλείται κυρίως από θλιπτικές τάσεις που ενεργούν στην επιφάνεια της οπής και παρατηρείται, όταν ο λόγος

του πλάτους της πλάκας ως προς την διάμετρο της οπής, είναι μεγάλος. Η 'εισχώρηση' παρατηρείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων κόπωσης των μηχανικών συνδέσεων



Εικόνα 25 Μακροσκοπικοί μηχανισμοί αστοχίας των μηχανικών συνδέσεων πολύστρωτων πλακών

Κεφάλαιο 4 Πεπερασμένα στοιχεία

4.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η ανάπτυξή της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design).

Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητά της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Αρχικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτέλεσε μια ενεργειακή μέθοδο για την επίλυση δισδιάστατων φορέων, όπως οι μέθοδοι Rayleigh-Ritz και Galerkin, τις οποίες μετέφερε ουσιαστικά από το χώρο των συνεχών συστημάτων στα διακριτά συστήματα. Στη συνέχεια επικράτησαν οι αρχές των ισοπαραμετρικών στοιχείων που εξασφαλίζουν ακρίβεια στους υπολογισμούς και βελτιώνουν σημαντικά τον ενιαίο προγραμματισμό της μεθόδου.

Τέλος, η ανάπτυξη των προγραμμάτων προ- και μετά-επεξεργασίας (pre- and post-processing) των δεδομένων και αποτελεσμάτων καθιέρωσαν τη μέθοδο και τα αντίστοιχα προγράμματα που αναπτύχθηκαν. Έτσι σήμερα χρησιμοποιώντας προγράμματα που στηρίζονται στις αρχές του CAD ο χρήστης είναι σε θέση να μορφώσει, να τροποποιήσει το προσομοίωμά του και να καθορίσει τις επιβαλλόμενες φορτίσεις κατά τρόπο απλό και εύκολα ελέγξιμο. Μετά την επίλυση του προβλήματος, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται άμεσα και εποπτικά ενώ σε πολλά συστήματα παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης των αποτελεσμάτων με τη μορφή βάσεων δεδομένων (databases).

Η επόμενη γενιά των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων αναμένεται να περιλάβει και τη συγκροτημένη διαστασιολόγηση κατασκευών κατά τρόπο που να ενσωματώνει ισχύοντες κανονισμούς αλλά και εμπειρία από το σχεδιασμό διαφόρων κατηγοριών κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ως προσεγγιστική μέθοδος επιδέχεται βελτιώσεις και προσφέρεται για διαρκή έρευνα με σκοπό τη βελτίωση της. Έτσι παρά τα είκοσι πέντε χρόνια ζωής που διανύει, πολλά θέματα που σχετίζονται με τη μέθοδο δεν έχουν βρει ακόμη ευρύτερα αποδεκτές λύσεις. Έτσι πληθώρα πεπερασμένων στοιχείων διατίθενται για γενική ή ειδική εφαρμογή, ειδικές φορτίσεις κλπ., ενώ τα θέματα των βασικών κριτηρίων που κάθε αναπτυσσόμενο στοιχείο θα πρέπει να ικανοποιεί δεν είναι ακόμη πλήρως διευκρινισμένα και παραπέμπουν σε σύνθετες μαθηματικές αντιμετώπισεις. Για την συστηματοποίηση της έρευνας στη περιοχή έχουν θεσπιστεί χαρακτηριστικά παραδείγματα (benchmark tests) που διευκολύνουν και προωθούν σημαντικά την έρευνα για τη συμπεριφορά των στοιχείων [2].

Η εισαγωγή και ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (Η/Υ) άνοιξε νέους ορίζοντες στις επιστήμες. Αναπτύχθηκαν θεωρίες προσαρμοσμένες στον Η/Υ υπό μορφή μητρώων ή σειρών καθώς και υπολογιστικές μέθοδοι για να επιλύουν προβλήματα που ήταν αδύνατον να λυθούν παλαιότερα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method) αναπτύχθηκε λόγω των Η/Υ και χρησιμεύει για την επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής, της Θερμότητας, της Ρευστομηχανικής, του Ηλεκτρομαγνητισμού και άλλων. Η μέθοδος είναι δημοφιλής, δυνατή και χρησιμοποιείται στις κατασκευές και μελέτες αεροσκαφών, πλοίων, αυτοκινήτων, παντός είδους μηχανημάτων, γεφυρών, σηράγγων, πολυκατοικιών, θεμελιώσεων, οδοστρωμάτων και άλλων εφαρμογών.

Επίσης όλα τα Ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, οι βιομηχανίες, οι τεχνικές εταιρείες και οι μελετητές μηχανικοί, χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για την λύση των προβλημάτων των.

Υπάρχουν διαφορετικοί μέθοδοι (ή διαφορετικές φιλοσοφίες) για την ανάπτυξη της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Δύο από τις μεθόδους είναι:

- Η ενεργειακή μέθοδος, βασίζεται στην ολική δυναμική ενέργεια του σώματος ή της κατασκευής (total potential energy), μαζί με την μέθοδο των μετατοπίσεων. Η

μέθοδος είναι απλή και δεν απαιτεί την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Επίσης στα προβλήματα της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται η ενεργειακή μέθοδος, όταν υπάρχει η εξίσωση της δυναμικής ενέργειας, η οποία μετονομάζεται και λέγεται συναρτησιακή ενέργεια (functional). Η ενεργειακή μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όταν υπάρχει η δυνατότητα να εκφρασθεί η ολική δυναμική ενέργεια του προβλήματος στα στερεά ή η functional στα προβλήματα της μεταφοράς θερμότητας. Αν δεν γνωρίζουμε την ολική δυναμική ενέργεια, τότε χρησιμοποιούνται άλλοι μέθοδοι, όπως η μέθοδος του Galerkin.

- Η μέθοδος του Galerkin ανήκει στην γενική κατηγορία των Σταθμικών Υπολοίπων (methods of Weighted Residuals). Η μέθοδος Galerkin είναι γενική, δυνατή και εφαρμόζεται απ' ευθείας στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων

Ο τρόπος επίλυσης προβλημάτων με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων είναι σχεδόν ο ίδιος σε όλες τις περιοχές που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα, για την επίλυση μιας κατασκευής σχεδιάζουμε πρώτα την κατασκευή κατόπιν την χωρίζουμε σε μικρά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή τετράπλευρα, τα οποία λέγονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι ιδιότητες του υλικού και οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το υλικό εξετάζονται στα πεπερασμένα στοιχεία σαν συνάρτηση των αγνώστων μετατοπίσεων στις κορυφές του πεπερασμένου στοιχείου (μέθοδος των μετατοπίσεων). Λαμβάνουμε υπόψη τις οριακές συνθήκες καθώς και τα φορτία (μηχανικά και θερμικά) και καταλήγουμε στις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Η λύση του συστήματος των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους, οι οποίοι είναι οι κομβικές μετατοπίσεις, είναι η ζητούμενη προσεγγιστική λύση. Γνωστών των κομβικών μετατοπίσεων υπολογίζονται στα διάφορα σημεία της κατασκευής οι τάσεις (σ), οι παραμορφώσεις (ϵ) και οι αντιδράσεις (R) των στηρίξεων [3].

4.2 Η ιστορία των πεπερασμένων στοιχείων

Το 1909 ο Γερμανός μαθηματικός Ritz ανέπτυξε τις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρι της εφευρέσεως του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές.

Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών.

Το 1941 ο Hrennikoff εισήγαγε την καλούμενη framework method (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών.

Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαχίστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που εφευρέθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο.

Το 1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης έγραψε ένα βιβλίο με θέμα “Ενεργειακά θεωρήματα και η μέθοδος των μητρώων” και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων.

Το 1960 ο Ι. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου “University of California, Berkeley” της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα “Πεπερασμένα στοιχεία” (Finite elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία.

Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων.

Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, στα ρευστά, τη

θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες [3]

4.3 Λόγοι ανάπτυξης μεθόδου

Προβλήματα που δεν μπορούσαν να τα αγγίξουν οι επιστήμονες έως τώρα και τα θεωρούσαν άλυτα, με την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y) και των υπολογιστικών μεθόδων όπως των πεπερασμένων στοιχείων τα λύνουν σε μικρό χρόνο.

Στις Ηνωμένες πολιτείες της Αμερικής, στην Ευρώπη, και στις ανεπτυγμένες χώρες, η βιομηχανία, ο στρατός και το κράτος χρηματοδοτούν τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα και τις ερευνητικές εταιρείες, με σκοπό την ανάπτυξη προγραμμάτων.

Η ανάγκη της βιομηχανίας και των προβλημάτων της πράξης, οδήγησε την ανάπτυξη γραφικών προγραμμάτων τα οποία συνοδεύουν την ανάλυση-υπολογισμό που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Ο συνδυασμός των γραφικών με την ανάλυση-υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων υψώνουν την επιστήμη, την απλοποιούν, την κάνουν προσιτή και δημιουργική (state of the art).

Προϊόν της συστηματικής εργασίας των ερευνητών είναι η ανάπτυξη των εμπορικών προγραμμάτων για τον H/Y. Τα εμπορικά προγράμματα αποτελούνται από δύο μεγάλα προγράμματα: τα γραφικά και την ανάλυση.

Γραφικά προγράμματα. Τα γραφικά προγράμματα χρησιμοποιούνται πριν από την ανάλυση (Preprocessing) και μετά την ανάλυση (Post-processing).

- Preprocessing. Με την χρήση του γραφικού προγράμματος το σώμα ή η κατασκευή σχεδιάζεται και κατόπιν διακριτοποιείται στα πεπερασμένα στοιχεία.
- Post-processing. Μετά την ανάλυση γίνονται γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων όπως είναι η παραμόρφωση του σώματος, η διανομή των τάσεων εντός του σώματος και άλλων.

Πρόγραμμα για την ανάλυση-υπολογισμό. Το πρόγραμμα της ανάλυσης χρησιμοποιείται για την μελέτη ποικίλων προβλημάτων που μπορεί να αφορούν την μηχανική των στερεών ή των κατασκευών, στα ρευστά, στην θερμότητα, στην ακουστική, στην

κατεργασία των μετάλλων, στον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες περιοχές. Όλα τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, η βιομηχανία, οι τεχνικές εταιρείες, οι μηχανικοί της πράξης, οι προ-πτυχιακοί και οι μεταπτυχιακοί φοιτητές, χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα για τον Η/Υ για την μοντελοποίηση (ή προσομοίωση) προβλημάτων, όπως για παράδειγμα είναι τα παρακάτω:

- ANSYS
- LUSAS [5]
- ABAQUS
- NASTRAN
- MARC
- ADINA
- SAP90
- COSMOS

Τα προγράμματα παρέχουν υπορουτίνες (subroutines), ώστε ο χρήστης να μπορεί να προσθέσει το δικό του πρόγραμμα συνήθως σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN ή C, για να προσθέσει πληροφορίες που δεν υπάρχουν στο εμπορικό πρόγραμμα, όπως για παράδειγμα να τροποποιήσει, να βελτιώσει ή να προσθέσει νέες καταστατικές εξισώσεις (constitutive equations).

Υπάρχουν επίσης ειδικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, όπως για παράδειγμα είναι τα παρακάτω:

HITCAN (Metal matrix composites analyzer) και
CODSTRAN (polymer composites analyzer),

Τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο ερευνητικό κέντρο NASA Glen (Lewis) Research Center, Cleveland, Ohio, USA υπό την επίβλεψη και δημιουργού αυτών Dr. Christos C. Chamis. Τα προγράμματα αυτά, χρησιμοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία και την μηχανική των σύνθετων υλικών (fiber composite materials).

Η θεωρητική γνώση των πεπερασμένων στοιχείων βοηθά να αναπτύξει ο φοιτητής, ο ερευνητής ή ο μηχανικός της πράξης την αυτοεκτίμηση και την ικανότητα να λύνει, να λειτουργεί και να ερμηνεύει σωστά τα αποτελέσματα που λαμβάνει από ένα πρόγραμμα, και αν χρειαστεί να γράψει το δικό του πρόγραμμα [3].

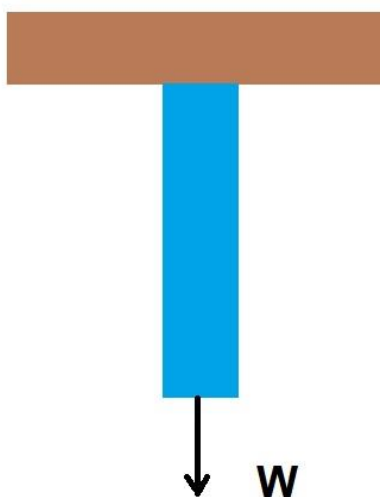
4.4 Γενικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στην ουσία η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μία μαθηματική μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Επειδή είναι μία αριθμητική (numerical) μέθοδος, έχει τη δυνατότητα επίλυσης περίπλοκων προβλημάτων που είναι δυνατό να εκφραστούν με τη μορφή διαφορικών εξισώσεων. Τέτοιου είδους προβλήματα παρουσιάζονται σε όλα τα πεδία των φυσικών επιστημών, επομένως η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων θεωρητικά δεν έχει όρια στην εφαρμογή της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων. Εξαιτίας του υψηλού κόστους της υπολογιστικής ισχύος τα αρχικά χρόνια εφαρμογής τους τα Πεπερασμένα Στοιχεία χρησιμοποιούνταν για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων, αλλά τα τελευταία χρόνια χρησιμεύουν στην επίλυση όλων και περισσότερων προβλημάτων σε μεγάλη ποικιλία επιστημών. Αρχικά χρησιμοποιούνταν mainframes, αλλά πλέον υπάρχει λογισμικό που εργάζεται σε προσωπικούς υπολογιστές σε περιβάλλον windows. Βεβαίως όπως και κάθε μέθοδος, τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, αλλά με την κατάλληλη εφαρμογή είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση των πηγών λάθους και η πληρέστερη εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων.

Η μελέτη ενός προβλήματος με Πεπερασμένα Στοιχεία συνίσταται στη δημιουργία ενός μοντέλου, ενός υλικού ή μιας κατασκευής, το οποίο αναλύεται στη συνέχεια στον Η/Υ για την εξαγωγή συγκεκριμένων αποτελεσμάτων, τα οποία ερμηνεύουν τις ιδιότητες του ή προβλέπουν την επίδραση συγκεκριμένων συνθηκών. Η μέθοδος χρησιμεύει στη δημιουργία νέων προϊόντων, τα οποία σχεδιάζονται στον Η/Υ και οι ιδιότητές τους μελετώνται λεπτομερώς προτού αυτό αποκτήσει φυσική υπόσταση. Επίσης χρησιμεύει στην τροποποίηση υπάρχοντων υλικών και στην περίπτωση μηχανικών αποτυχιών, χρησιμεύει στη διαπίστωση και διόρθωση του προβλήματος. Χρησιμοποιούνται δύο ειδών αναλύσεις Πεπερασμένων Στοιχείων, ανάλογα με το μοντέλο που εφαρμόζεται: δύο διαστάσεων και τριών διαστάσεων. Η ανάλυση δύο διαστάσεων είναι απλούστερη, έχει μικρότερο κόστος και είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί και σε απλό Η/Υ, αλλά τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της είναι λιγότερο ακριβή. Η ανάλυση τριών

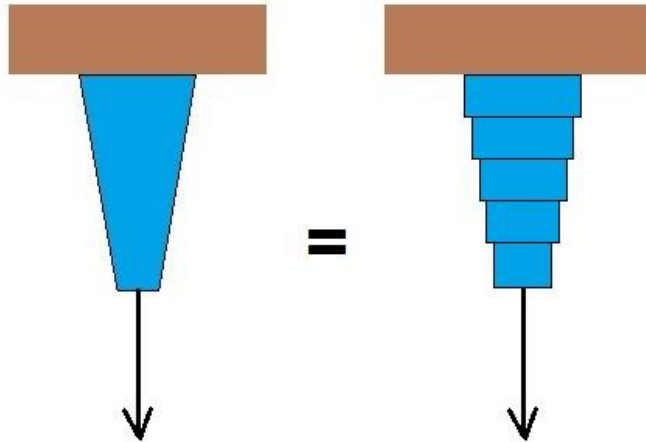
διαστάσεων είναι περισσότερο ακριβής στις προβλέψεις της, απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ και ειδικό λογισμικό, η χρήση της είναι ακριβέστερη και είναι περισσότερο απαιτητική στο σχεδιασμό της.

Η λογική στην οποία στηρίζεται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων παρουσιάζεται στο παρακάτω παράδειγμα: Η επιμήκυνση της δομής στο Σχ. 3.1 υπό την επίδραση ενός φορτίου εξαρτάται από το μέγεθος της φόρτισης και από τις ιδιότητες του υλικού.



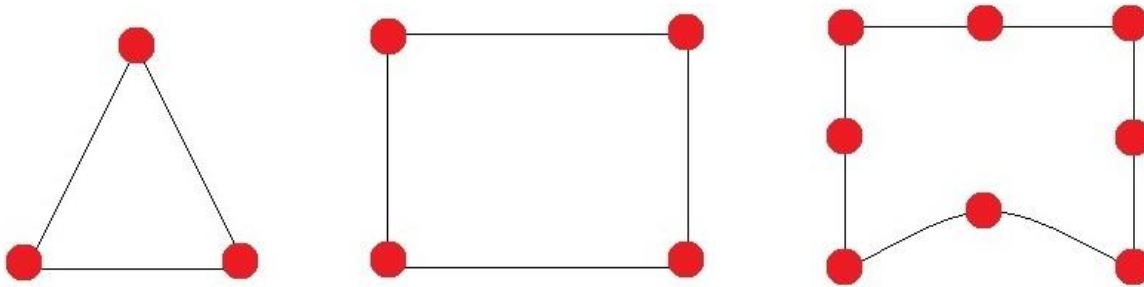
Εικόνα 26: Επιμήκυνση της δομής υπό την επίδραση φορτίου.

Η φόρτιση που ασκείται ισούται με το γινόμενο της ακαμψίας του υλικού επί την παρεκτόπιση που προκαλεί η δράση της, σύμφωνα με το νόμο του Hooke. Εάν η κατασκευή αυτή διαιρεθεί σε περισσότερα τμήματα (στοιχεία, elements), τα οποία θα συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται κόμβοι (nodes), Σχ. 3.2, η συνολική φόρτιση θα ισούται με το άθροισμα του γινομένου (ακαμψία \times παρεκτόπιση) για κάθε τμήμα. Η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος (mesh generation) ονομάζεται διακριτοποίηση (discretization).



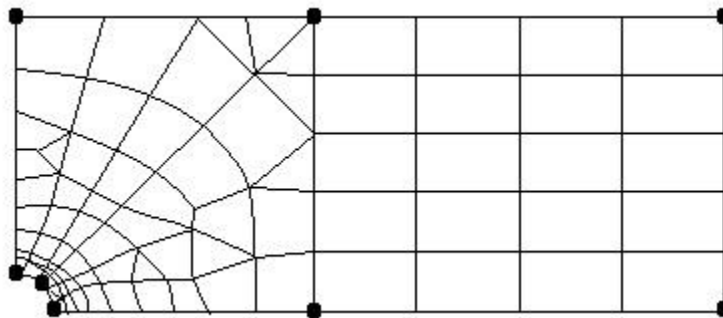
Εικόνα 27: Διαίρεση δομής (αριστερά) σε στοιχεία (δεξιά).

Τα στοιχεία είναι δυνατό να λάβουν κάθε μορφή, αλλά συνήθως έχουν τη μορφή γνωστών γεωμετρικών σχημάτων, όπως είναι το τρίγωνο, το παραλληλόγραμμο, το τετράγωνο και άλλα, Σχ. 3.3.



Εικόνα 28: Στοιχεία και κόμβοι.

Στις τρεις διαστάσεις τα στοιχεία είναι δυνατό να είναι κύβοι, παραλληλεπίπεδα και άλλα. Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων αποκαλείται επομένως από το στοιχεία που το αποτελούν δισδιάστατο ή τρισδιάστατο. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί ένα περίπλοκο σύστημα σημείων που καλούνται κόμβοι (nodes), αυτά σχηματίζουν ένα δίκτυο που αποκαλείται πλέγμα (mesh). Μία πολύπλοκη κατασκευή αναλύεται σε ένα πλέγμα πεπερασμένου αριθμού στοιχείων απλού σχήματος, Σχ. 3.4.



Εικόνα 29: Πλέγμα πολύπλοκης κατασκευής.

Το στοιχείο είναι η βασική δομική μονάδα με προκαθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Το πλέγμα προσομοιάζει με ιστό αράχνης, στον οποίο από κάθε κόμβο εκτείνεται ένα στοιχείο πλέγματος σε κάθε γειτονικό κόμβο. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και τις ιδιότητες υλικού που καθορίζουν με ποιό τρόπο θα συμπεριφερθεί μία κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης. Οι κόμβοι τοποθετούνται με ορισμένη πυκνότητα εντός του υλικού ανάλογα με τα επίπεδα τάσης που αναπτύσσονται σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή. Περιοχές με μεγαλύτερη αναμενόμενη τάση θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων από αυτές που η αναμενόμενη τάση είναι μικρότερη. Περιοχές που λαμβάνουν ιδιαίτερη σημασία είναι οι περιοχές στις οποίες είχε διαπιστωθεί σε πειραματικές μελέτες η παρουσία θραύσης ή γωνίες, κενά και περιοχές υψηλής τάσης. Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα. Εάν το πλέγμα είναι αδρό τότε είναι δυσχερής η σωστή επίλυση του προβλήματος. Αντίθετα, εάν το πλέγμα είναι ιδιαίτερα λεπτομερές και περιέχει μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων από ότι είναι αναγκαίο, τότε το κόστος του υπολογιστικού χρόνου και ο αναγκαίος χρόνος για την ανάλυση είναι δυνατό να υπερβαίνουν το όφελος από την ανάλυση. Είναι χρήσιμη μία σχετική γνώση σχετικά με την κατανομή των τάσεων εντός του υλικού. Υπάρχει ανάγκη λεπτομερούς πλέγματος όταν υπάρχει σημαντική μεταβολή των τάσεων και παραμορφώσεων και αδρού πλέγματος σε περιοχές με σταθερή σχετικά τάση. Η

παρεκτόπιση των στοιχείων θεωρείται ότι περιγράφεται από απλές πολυωνυμικές εξισώσεις.

Οι εξισώσεις ισορροπίας καταγράφονται σε ένα μαθηματικό πίνακα και επιλύονται από τον Η/Υ. Εφαρμόζοντας τις κατάλληλες συνθήκες περιορισμού (boundary conditions) και τις επιθυμητές φορτίσεις υπολογίζονται οι παρεκτοπίσεις των κόμβων επιλύοντας τις εξισώσεις του πίνακα. Από τις παρεκτοπίσεις των κόμβων υπολογίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που ασκούνται στην κατασκευή ή στο υλικό που μελετάται. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι δυνατή η μελέτη της επίδρασης σημαντικού αριθμού παραμέτρων, όπως είναι η μάζα, ο όγκος, η θερμοκρασία, η ενεργειακή τάση, η παραμόρφωση, η δύναμη, η παρεκτόπιση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση και άλλα.

Είναι επίσης δυνατή η εφαρμογή πολλαπλών συνθηκών στο ίδιο μοντέλο. Κάθε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων συνοδεύεται από μία βιβλιοθήκη στοιχείων, όπως ράβδοι, δοκοί, πλάκες, συμπαγή στοιχεία, ελατήρια και άλλα. Είναι επίσης δυνατή η μελέτη υλικών με διαφορετικές ιδιότητες εντός του ίδιου μοντέλου, δηλαδή ιστροπικών υλικών (με ομοιογενείς ιδιότητες σε όλη τη έκτασή τους), ορθοτροπικών υλικών (οι ιδιότητές τους είναι όμοιες μόνο σε γωνία 90°) και ανισοτροπικών υλικών (με διαφορετικές ιδιότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις σε όλη την έκτασή τους). Η δομική ανάλυση συνίσταται στη χρήση γραμμικών και μη γραμμικών μοντέλων. Τα γραμμικά μοντέλα χρησιμοποιούν απλές παραμέτρους θεωρώντας ότι το υλικό δεν υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Στα μη γραμμικά μοντέλα πραγματοποιείται φόρτιση πέραν της ελαστικής παραμόρφωσης, δηλαδή το υλικό θεωρείται ότι υφίσταται πλαστική παραμόρφωση, η οποία και μελετάται.

Παράδειγμα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι η ανάλυση κόπωσης, με την οποία γίνεται πρόβλεψη της αντοχής μίας κατασκευής σε κυκλική φόρτιση. Τέτοιου είδους ανάλυση αποκαλύπτει τις περιοχές στις οποίες είναι περισσότερο πιθανή η δημιουργία ή η επέκταση μίας ρωγμής. Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτέλεσε τη λύση στο ζήτημα της πρόβλεψης της αποτυχίας ενός υλικού εξαιτίας μη γνωστών τάσεων, επιτρέποντας τη μελέτη της κατανομής τάσεων εντός του υλικού, αποκαλύπτοντας την ύπαρξη προβληματικών περιοχών.

Η μέθοδος αυτή είναι περισσότερο απλή από την κατασκευή και τον έλεγχο δειγμάτων για κάθε πιθανή περίπτωση. Άλλο παράδειγμα εφαρμογής είναι η ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας, με την οποία μελετάται η αγωγιμότητα των υλικών ή των κατασκευών. Ενώ η μέθοδος αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις ανάγκες της αεροπορικής και της πυρηνικής βιομηχανίας, η χρήση της μεθόδου εξαπλώθηκε σημαντικά για την επίλυση μεγάλου αριθμού προβλημάτων. Υπάρχουν πλέον πακέτα λογισμικού με τα οποία είναι δυνατή η επίλυση εξαιρετικά πολύπλοκων προβλημάτων, όπως είναι αυτά που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.3. Μετά τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται η ανάλυση. Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων συνίσταται σε τρία κύρια στάδια, το προ-υπολογιστικό, το στάδιο επίλυσης και το μετα-υπολογιστικό στάδιο.

Το **προ-υπολογιστικό στάδιο** (preprocessor stage) της ανάλυσης συνίστανται σε:

- Ορισμό του τίτλου του προβλήματος
- Επιλογή των προτιμήσεων (preferences)
- Ορισμός τύπου και της μορφής των πεπερασμένων στοιχείων (2D ή 3D)
- Καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού (μέτρο ελαστικότητας Young, λόγος Poisson και άλλα)
- Δημιουργία μοντέλου με κατάλληλες διαστάσεις
- Καθορισμός πυκνότητας πλέγματος (mesh density)
- Δημιουργία πλέγματος (meshing)

Στο **στάδιο της επίλυσης** (computation stage) εφαρμόζονται στο μοντέλο οι συνθήκες φόρτισης και περιορισμού (loading and boundary conditions).

Στο **μετα-υπολογιστικό στάδιο** (post-processor stage) γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα οποία έχουν την μορφή πινάκων ή διαγραμμάτων.

Το κόστος της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία είναι μικρότερο από την πειραματική δοκιμή υλικών, αλλά δεν είναι και φθηνή. Το κόστος της χρήσης του ειδικού λογισμικού είναι σημαντικό, η χρήση του χρεώνεται σε ετήσια βάση, ενώ η τεχνική υποστήριξη και η εκπαίδευση είναι επίσης ακριβές. Η μέθοδος των πεπερασμένων

στοιχείων είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο σε όσους ασχολούνται με το βιομηχανικό και μηχανολογικό σχεδιασμό και χρησιμοποιείται σε περιοχές όπως:

1. Ο σχεδιασμός της δομικής αντοχής κατασκευών
2. Η ανάλυση του Shock
3. Η ακουστική
4. Η θερμική ανάλυση
5. Η μελέτη των δονήσεων
6. Η προσομοίωση συγκρούσεων
7. Μελέτη ηλεκτρικών φαινομένων
8. Προβλήματα λυγισμού
9. Δυναμικές αναλύσεις
10. Η μελέτη ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων

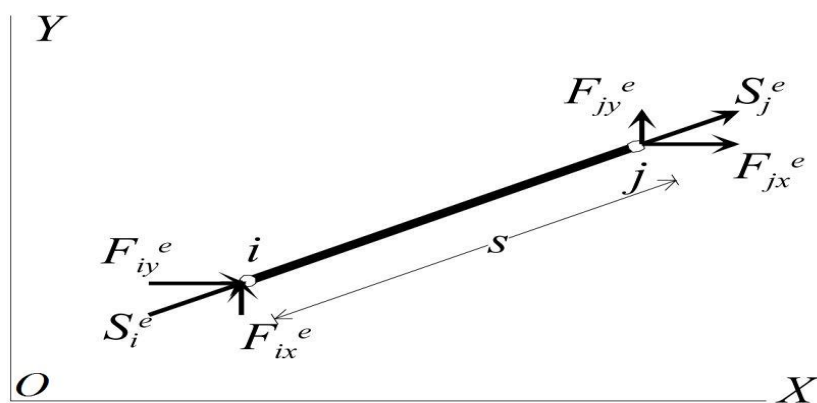
Ο σχεδιασμός ακόμα και των πιο απλών προϊόντων στηρίζεται στη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων αφού τα σχεδιαστικά προβλήματα δεν είναι δυνατό να επιλυθούν φθηνότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια με άλλη διαθέσιμη μέθοδο. Η φυσική εξέταση των υλικών που για δεκαετίες ήταν ο κανόνας θεωρείται πλέον ακριβή και όπου είναι δυνατό αντικαθίσταται με φθηνότερες, αξιόπιστες μεθόδους [4].

4.5 Δικτυωτοί φορείς- Ράβδος δικτυώματος

Αριθμούμε τους κόμβους και τις ράβδους του δικτυώματος, στη συνέχεια απομονώνουμε την ράβδο e . Η ράβδος e είναι ένα στοιχείο, μονοδιάστατο αμφιαρθρωτό, αφόρτιστο μεταξύ των δύο άκρων του, που καταπονείται μόνον από τις αξονικές δυνάμεις S_i και S_j που δρουν στα άκρα της i, j . Συμβολίζουμε με S^e το διάνυσμα των δυνάμεων $S^e = [S_i, S_j]^T$ που δρα στους κόμβους i, j , δηλαδή:

$$S^e = \begin{Bmatrix} S_i^e \\ S_j^e \end{Bmatrix}$$

Κάθε ράβδος του δικτυώματος είναι ορισμένη από τις συντεταγμένες των άκρων της i, j ως προς ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων, Σχ. 3.5, και χαρακτηρίζεται από το μήκος της s , τη σταθερή της διατομή A και το μέτρο ελαστικότητας E του υλικού από το οποίο αποτελείται.



Σχήμα 3.5: Ράβδος δικτυώματος ij ως προς ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων XOY .

Ας πάρουμε ένα τοπικό σύστημα αξόνων με αρχή το σημείο i τέτοιο ώστε ο άξονας των x να συμπίπτει με την διεύθυνση της ράβδου με φορά από τον κόμβο i προς τον κόμβο j , Σχ. 3.5.

Οι μετατοπίσεις της ράβδου είναι πάντα κατά την έννοια της ράβδου. Ας συμβολίσουμε με $\delta(x)$ την μετατόπιση κατά τη διεύθυνση της ράβδου ενός σημείου M που απέχει x από το σημείο i (χρησιμοποιείται το σύμβολο δ αντί του q επειδή αναφερόμαστε σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων). Η μετατόπισή του πρέπει να εκφραστεί σαν συνάρτηση των μετατοπίσεων δ_i και δ_j με έναν απλό παρεμβολικό τύπο. Αυτό μπορεί να γίνει κατ' ευθείαν ή με το να θεωρήσουμε ότι η μετατόπιση $\delta(x)$ δίνεται από ένα απλό πολυώνυμο:

$$\delta(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots = [1 + x + x^2 \dots] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

Η Εξ. (3.1) πρέπει να ισχύει και στους κόμβους $i(x=0)$ και $j(x=s)$ όπου οι μετατοπίσεις είναι αντίστοιχα δ_i και δ_j , δηλαδή:

$$\begin{aligned}\delta(0) &= \delta_i \\ \delta(s) &= \delta_j\end{aligned}\tag{4.2}$$

Άρα μόνο δύο όρους μπορούμε να κρατήσουμε από τη Εξ. (3.2) και κρατάμε πάντα τους όρους με ανιούσα σειρά, δηλαδή:

$$\delta(x) = a_1 + a_2x = [1 \quad x] \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix}$$

Ή

$$\delta(x) = M(x)a\tag{4.3}$$

Όπου

$$M(x) = [1 \quad x], \quad a = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix}\tag{4.4}$$

Εφαρμόζοντας τις Εξ. (3.1, 3.2) έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix}$$

Ή

$$\delta^e = Aa\tag{4.5}$$

Λύνοντας ως προς a και αντικαθιστώντας στην Εξ. (3.3) έχουμε:

$$\delta(x) = \left(1 - \frac{x}{s}\right) \delta_i + \frac{x}{s} \delta_j \quad \text{ή} \quad \delta(x) = (1 - \xi) \delta_i + \xi \delta_j, \quad \xi = \frac{x}{s}$$

Οπότε:

$$\delta(x) = [1 - \xi \quad \xi] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

Συμβολίζω με $N_i(x) = 1 - \xi$ και $N_j(x) = \xi$. Τα $N_i(x)$, $N_j(x)$ λέγονται **συναρτήσεις σχήματος**. Η Εξ. (3.6) γράφεται:

$$\delta(x) = [N_i(x) \quad N_j(x)] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} = N \delta^e \quad (4.7)$$

Στην Εξ. (3.7) θα φτάναμε αν αντιστρέψαμε την Εξ. (3.5), οπότε:

$$a = A^{-1} \delta^e$$

Και την αντικαθιστούμε στην Εξ. (3.3) οπότε:

$$\delta(x) = M(x) A^{-1} \delta^e$$

Άρα

$$N(x) = M(x) A^{-1} \quad (4.8)$$

Οι παραμορφώσεις δίνονται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{d\delta(x)}{dx} = \frac{1}{s} [-1 \quad 1] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix}$$

Ή σε μητρική μορφή:

$$\varepsilon = B_1 \delta^e \quad (4.9)$$

Όπου:

$$B_1 = \frac{1}{s} [-1 \quad 1] \quad (4.10)$$

Ενώ οι τάσεις προκύπτουν από τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων:

$$\sigma = E\varepsilon = EB_1\delta^e = \frac{E}{s} [-1 \quad 1]\delta^e \quad (4.11)$$

Το επόμενο βήμα που θα κάνουμε είναι να εφαρμόσουμε την αρχή δυνατών έργων στο στοιχείο e . Οι δυνατές παραμορφώσεις δe εκφράζονται με μια σχέση ανάλογη της Εξ. (3.9) αφού το μόνο που αλλάζει είναι οι δυνατές μετατοπίσεις των κόμβων. Επομένως αν συμβολίσουμε με $\delta\delta^e$ το διάνυσμα των δυνατών κομβικών μετατοπίσεων η δυνατή παραμόρφωση είναι:

$$\delta\varepsilon = B_1\delta\delta^e = \frac{1}{s} [-1 \quad 1]\delta\delta^e$$

Η αρχή των δυνατών έργων λέει ότι το δυνατό έργο E_ξ των εξωτερικών δυνάμεων $E_\xi = [\delta\delta^e]^T S^e$ είναι ίσο με το έργο των E_σ των εσωτερικών δυνάμεων:

$$E_\sigma = \int_{V^e} \delta\varepsilon^T \sigma dV$$

δηλαδή:

$$[\delta\delta^e]^T (S^e - \int_{V^e} B_1^T E B_1 dV \delta\delta^e) = 0 \quad (4.12)$$

Ονομάζω ακαμψία \bar{k}^e του στοιχείου e στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων την ποσότητα:

$$\bar{k}^e = \int_{V^e} B_1^T E B_1 dV \quad (4.13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα B_1 , E και η διατομή A της ράβδου είναι σταθερά προκύπτει:

$$\bar{k}^e = \frac{AE}{s} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Δεδομένου ότι το διάνυσμα $\delta\delta^e$ είναι ένα τυχαίο μη μηδενικό διάνυσμα η Εξ. (4.12) γράφεται:

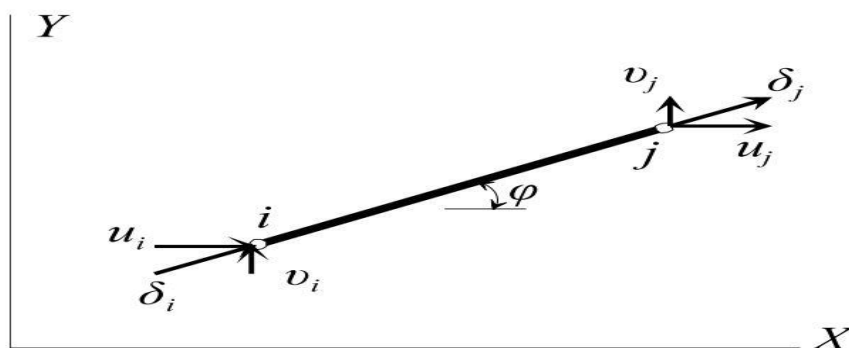
$$\bar{k}^e \delta^e = S^e \quad (4.15)$$

Θεωρούμε τώρα τις μετατοπίσεις στο καθολικό σύστημα XOY . Το διάνυσμα των κομβικών μετατοπίσεων q^e της ράβδου είναι:

$$q^e = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ v_j \\ u_j \end{Bmatrix} \quad (4.16)$$

Το διάνυσμα δ^e συνδέεται με το διάνυσμα q^e Σχ. 3.6 με την σχέση:

$$\begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ v_j \\ u_j \end{Bmatrix} \quad \text{ή}$$



Εικόνα 30:

$$\delta^e = a_1 q^e \quad (4.17)$$

Όπου l, m είναι τα συνημίτονα κατεύθυνσης της ράβδου e ως προς τους άξονες X, Y , δηλαδή:

$$l = \frac{X_j - X_i}{s} = \cos \varphi \quad m = \frac{Y_j - Y_i}{s} = \sin \varphi \quad (4.18)$$

Και $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j)$ οι συντεταγμένες των κόμβων i, j αντίστοιχα.

Έστω (F_{ix}^e, F_{iy}^e) και (F_{jx}^e, F_{jy}^e) οι συνιστώσες των S_i^e και S_j^e αντίστοιχα στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Από το Σχ. 30 προκύπτει:

$$\begin{Bmatrix} F_{ix}^e \\ F_{iy}^e \\ F_{jx}^e \\ F_{jy}^e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l & 0 \\ m & 0 \\ 0 & l \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_i^e \\ S_j^e \end{Bmatrix} \quad \text{ή} \quad F^e = a_1^T S^e \quad (4.19)$$

Η Εξ. (3.19) συνδέει το μητρώο στήλη F^e των κομβικών δυνάμεων στο καθολικό σύστημα με το μητρώο των κομβικών δυνάμεων S^e στο τοπικό σύστημα. Αντικαθιστώντας την Εξ. (4.17) στις Εξ. (4.9) και Εξ. (4.11) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= B_1 a_1 q^e = B q^e \\ \sigma &= E B_1 a_1 q^e = E B q^e \end{aligned}$$

Εφαρμόζοντας ξανά την αρχή των δυνατών έργων μετά από μια ανάλογη διαδικασία όπως προηγουμένως βρίσκουμε:

$$k^e q^e = F^e \quad (4.20)$$

Όπου

$$k^e = \int_{V^e} B^T E B dV = \int_{V^e} a_1^T B_1^T E B_1 a_1 dV = a_1^T \left(\int_{V^e} B_1^T E B_1 dV \right) a_1$$

Δηλαδή

$$k^e = a_1^T \bar{k}^e a_1 \quad (4.21)$$

το μητρώο ακαμψίας στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων. Κάνοντας τις πράξεις βρίσκουμε:

$$k^e = \frac{AE}{s} \begin{bmatrix} l^2 & lm & -l^2 & -lm \\ lm & m^2 & -lm & -m^2 \\ -l^2 & -lm & l^2 & lm \\ -lm & -m^2 & lm & m^2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Το μητρώο ακαμψίας \bar{k}^e και το μητρώο των κομβικών μετατοπίσεων δ^e στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, συνδέονται με το μητρώο των κομβικών δυνάμεων $S^e = [S_i^e \ S_j^e]^T$ επίσης στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων με την Εξ. (4.2), δηλαδή πρέπει να ισχύει:

$$AE \frac{(\delta_i - \delta_j)}{s} = S_i^e \quad AE \frac{(\delta_j - \delta_i)}{s} = S_j^e \quad (4.23)$$

Που είναι ήδη γνωστά από τον εφελκυσμό των ράβδων. Δηλαδή, η Εξ. (4.15) μπορεί να προκύψει και απευθείας.

Πολλαπλασιάζοντας από αριστερά την Εξ.(4.15) με a_1^T και χρησιμοποιώντας τις Εξ. (4.17) και Εξ. (4.19) προκύπτει:

$$(a_1^T \bar{k}^e a_1) q^e = F^e \quad \leftrightarrow \quad k^e q^e = F^e$$

Που συμπίπτει με την (4.20).

Από τη στιγμή που έχει αναπτυχθεί η Εξ. (4.20) η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος ακολουθεί τα βήματα της μητρωϊκής ανάλυσης των κατασκευών. Δηλαδή εφαρμόζουμε τις εξισώσεις ισορροπίας σε κάθε κόμβο i του δικτύωματος. Στις εξισώσεις αυτές τις εσωτερικές δυνάμεις $F_{ix}^e, F_{iy}^e, F_{iz}^e$ στον κόμβο i της ράβδου e τις αντικαθιστούμε από τη Εξ. (4.20). Έτσι βρίσκουμε σχέσεις που συνδυάζουν τις ακαμψίες $k^e (e=1,2,\dots,N)$ και των N ράβδων του δικτύωματος καθώς και όλες τις μετατοπίσεις των κόμβων. Η σχέσεις αυτές έχουν ως δεύτερο μέλος τις γνωστές εξωτερικές δυνάμεις R που εφαρμόζονται στους κόμβους του δικτύωματος. Αν συμβολίσουμε με K τον συνδυασμό-σύνθεση των ακαμψιών των επί μέρους ράβδων που περιγράψαμε πιο πάνω και με r το διάνυσμα που παριστά όλες τις μετατοπίσεις των κόμβων τότε θα έχουμε:

$$Kr = R \quad (4.24)$$

Όπου

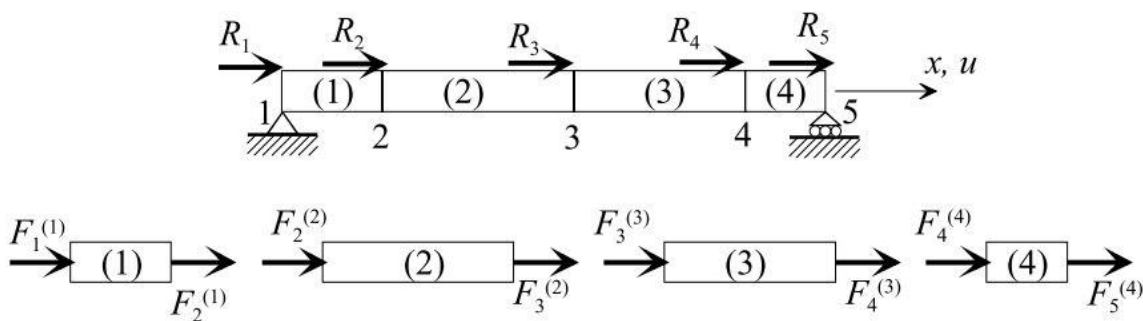
$$K = \sum_{e=1}^N k^e \quad (4.25)$$

Είναι το μητρώο ακαμψίας της ραβδωτής κατασκευής. (Προσοχή το σύμβολο Σ δεν παριστά κλασική άθροιση).

Πιο πολύ μπορεί να καταλάβει κανείς την διαδικασία μέσα από τα παραδείγματα που ακολουθούν.

Παράδειγμα 1.1

Θεωρούμε τη μονοδιάστατη αμφιέριστη δοκό σταθερής διατομής που φορτίζεται μονοαξονικά και έχει χωρισθεί σε τέσσερα πεπερασμένα στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα. Δεχόμαστε ότι η δοκός δεν λυγίζει επιπλέον, θεωρούμε ότι τα μητρώα ακαμψίας και φορτίσεως των στοιχείων είναι γνωστά.



Εικόνα 31: Παράδειγμα 1.1.

Κάθε κόμβος i έχει μόνον ένα βαθμό ελευθερίας, την αξονική μετατόπιση $u_i=q_i$. Εφαρμόζοντας την Εξ. (3.22) για κάθε ένα στοιχείο ξεχωριστά προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1^{(1)} \\ F_2^{(1)} \end{Bmatrix} \quad \begin{bmatrix} k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} \\ k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_2^{(2)} \\ F_3^{(2)} \end{Bmatrix} \quad (\alpha)$$

$$\begin{bmatrix} k_{33}^{(3)} & k_{34}^{(3)} \\ k_{43}^{(3)} & k_{44}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_3 \\ q_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_3^{(3)} \\ F_4^{(3)} \end{Bmatrix} \quad \begin{bmatrix} k_{44}^{(4)} & k_{45}^{(4)} \\ k_{54}^{(4)} & k_{55}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_4 \\ q_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_4^{(4)} \\ F_5^{(4)} \end{Bmatrix}$$

Τα στοιχεία k_{ij}^e των μητρώων k^e είναι μονοδιάστατα (1x1).

Για να σχηματισθούν οι εξισώσεις ισορροπίας όλης της δοκού θεωρείται η ισορροπία κάθε κόμβου ξεχωριστά. Οπότε,

$$\begin{aligned}
R_1 &= F_1^{(1)} &&= k_{11}^{(1)} q_1 + k_{12}^{(2)} q_2 \\
R_2 &= F_2^{(1)} + F_2^{(2)} &&= k_{21}^{(1)} q_1 + [k_{22}^{(1)} k_{22}^{(2)}] q_2 + k_{23}^{(2)} q_3 \\
R_3 &= F_3^{(2)} + F_3^{(3)} &&= k_{32}^{(2)} q_2 + [k_{33}^{(2)} k_{33}^{(3)}] q_3 + k_{34}^{(3)} q_4 \\
R_4 &= F_4^{(3)} + F_4^{(4)} &&= k_{43}^{(3)} q_3 + [k_{44}^{(3)} k_{44}^{(4)}] q_4 + k_{45}^{(4)} q_5 \\
R_5 &= F_5^{(4)} &&= k_{54}^{(4)} q_4 + k_{55}^{(4)} q_5
\end{aligned} \tag{\beta}$$

Όπου, R_1, \dots, R_5 οι συνολικές δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους $1, \dots, 5$ αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να γραφούν σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix}
k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\
k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} + k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} & 0 & 0 \\
0 & k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} + k_{33}^{(3)} & k_{34}^{(3)} & 0 \\
0 & 0 & k_{43}^{(3)} & k_{44}^{(3)} + k_{44}^{(4)} & k_{45}^{(4)} \\
0 & 0 & 0 & k_{54}^{(4)} & k_{55}^{(4)}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
q_1 \\
q_2 \\
q_3 \\
q_4 \\
q_5
\end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix}
R_1 \\
R_2 \\
R_3 \\
R_4 \\
R_5
\end{Bmatrix} \tag{\gamma}$$

Ή

$$Kr = R \tag{\gamma'}$$

Όπου, K είναι το ολικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής, r το μητρώο διάνυσμα των μετατοπίσεων των κόμβων και R το μητρώο διάνυσμα των κομβικών δυνάμεων.

Το σύστημα των εξισώσεων (γ') αποτελεί το τελικό σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας όλου του μέσου. Οποιοσδήποτε φορέας και να αντιμετωπισθεί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το σύστημα των τελικών εξισώσεων που θα σχηματισθεί θα είναι της μορφής των εξισώσεων (γ').

Παρατηρώντας το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων (γ), βλέπουμε ότι θα μπορούσαμε να σχηματίσουμε το ολικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής και απ' ευθείας. Έτσι δύναμη σε ένα κόμβο i προκαλούν οι μετακινήσεις u_j των κόμβων των στοιχείων e_1, e_2, \dots, e_N που έχουν κοινούς κόμβους τον i και j . Αυτό σημαίνει ότι το στοιχείο K_{ij} του ολικού μητρώου ακαμψίας θα είναι:

$$K_{ij} = k_{ij}^{e_1} + k_{ij}^{e_2} + \dots + k_{ij}^{e_N} \tag{\delta}$$

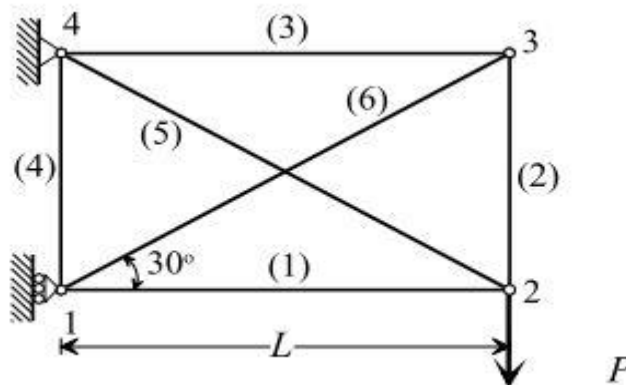
Όπου $k_{ij}^{e_1}, k_{ij}^{e_2}, \dots, k_{ij}^{e_N}$ είναι τα επιμέρους στοιχεία των μητρώων ακαμψίας των στοιχείων e_1, e_2, \dots, e_N .

Αξίζει να τονίσουμε ότι αν ο κόμβος j ανήκει μόνο στα στοιχεία e_1 και e_2 τότε η Εξ. (δ) περιλαμβάνει μόνο τους δύο πρώτους όρους αφού οι υπόλοιποι όροι είναι μηδενικοί.

Το πρόβλημα περιπλέκεται ελαφρώς αν ο αριθμός των κομβικών παραμέτρων είναι μεγαλύτερος του 1. Έτσι για παράδειγμα στον κόμβο j υπάρχουν οι μετατοπίσεις u_j, v_j οπότε και οι δυνάμεις θα είναι R_{xj}, R_{yj} θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η δύναμη R_{xj} προκαλείται από τις μετατοπίσεις u_j, v_j που πολλαπλασιάζουν τα στοιχεία της $(2j-1)$ γραμμής του μητρώου ακαμψίας κοκ. Στο παράδειγμα που ακολουθεί αποφύγαμε, για λόγους ευκολότερης κατανόησης αυτή την περιπλοκή παίρνοντας τις μετατοπίσεις u_j, v_j , με τη μορφή ενός διανύσματος q_j οπότε και τα στοιχεία K_{ij} του μητρώου ακαμψίας είναι μητρώα (2×2) .

Παράδειγμα 1.2

Υπολογίζουμε τις τάσεις των ράβδων του δικτυώματος του Σχ. 3.8 που έχουν κοινό μέτρο ελαστικότητας E και κοινό εμβαδό διατομής A . Από την Εξ. (3.22) προκύπτουν τα μητρώα ακαμψίας των ράβδων 1,2,3,4,5 αφού τα συνημίτονα κατεύθυνσης της κάθε ράβδου είναι:



Εικόνα 32: Παράδειγμα 1.2.

Ράβδος (1): $(l, m) = (1, 0)$

Ράβδος (2): $(l, m) = (0, 1)$

Ράβδος (3): $(l, m) = (-1, 0)$

Ράβδος (4): $(l, m) = (0, -1)$

Ράβδος (5): $(l, m) = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$

Ράβδος (6): $(l, m) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right)$

$$k^1 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k^2 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$$
$$k^3 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad k^4 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$$

$$k^5 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} \\ -\frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} \\ -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} \\ \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix}, \quad k^6 = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} \\ \frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} \\ -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} \\ -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & \frac{\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix}$$

Επομένως η σχέση που συνδέει τις μετατοπίσεις των κόμβων με τα επικόμβια εξωτερικά φορτία και τις αντιδράσεις R_{1x} , R_{4x} , R_{4y} στους κόμβους 1, 4 είναι:

$$\begin{Bmatrix} R_{1x} \\ 0 \\ 0 \\ -P \\ 0 \\ 0 \\ R_{4x} \\ R_{4y} \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -1 & 0 & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & 0 & 0 \\ \frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & 0 & -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & -\sqrt{3} \\ -1 & 0 & 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & 0 & 0 & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} \\ 0 & 0 & -\frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & -\sqrt{3} & \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} \\ -\frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} & 0 & 0 & 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -1 & 0 \\ -\frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & -\sqrt{3} & \frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{3\sqrt{3}}{8} & \frac{3}{8} & -1 & 0 & 1 + \frac{3\sqrt{3}}{8} & -\frac{3}{8} \\ 0 & -\sqrt{3} & \frac{3}{8} & -\frac{\sqrt{3}}{8} & 0 & 0 & -\frac{3}{8} & \sqrt{3} + \frac{\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Η λύση του συστήματος δίνει:

$$u_1 = -0.12847 \frac{PL}{EA}, \quad u_2 = -0.26340 \frac{PL}{EA}, \quad u_3 = -1.15864 \frac{PL}{EA}$$

$$u_3 = 0.38541 \frac{PL}{EA}, \quad v_3 = -1.82379 \frac{PL}{EA}$$

Οπότε η ισορροπία μας δίνει τις αντιδράσεις στους κόμβους 1, 4

$$R_{4x} = P \quad , \quad F_{4y} = -P\sqrt{3} \quad , \quad F_{1x} = P\sqrt{3}$$

Τέλος, αντικαθιστώντας τις μετατοπίσεις στις Εξ. (4.17) και Εξ. (4.15) προσδιορίζουμε τις τάσεις των ράβδων.

Κεφάλαιο 5 Περιγραφή του πειράματος/ Κατασκευή πασαρέλας

Αρχικά η γεωμετρία της πασαρέλας που κατασκεύασα ήταν μια απλή ορθογωνίου σχήματος σανίδα με τις παρακάτω διαστάσεις:

Μήκος: 2.2 μέτρα

Πλάτος: 0.35 μέτρα

Πάχος: 0.044 μέτρα (4 εκατοστά ο αφρός και 4 χιλιοστά οι στρώσεις του γυαλιού).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία της πασαρέλας είναι η παρακάτω.

Από τον αφρό κόπηκε μια σανίδα με τις προαναφερθείσες διαστάσεις.

Από το υαλο-υφασμα κόπηκαν 8 λωρίδες επίσης με τις προαναφερθείσες διαστάσεις.

Σε κάθε πλευρά του αφρού τοποθετηθήκαν ευθυγραμμισμένα 4 λωρίδες υαλο-υφασματος.

Στην συνέχεια ξεκινήσαμε την διαδικασία 'τυλίγματος' της σανίδας για να προχωρήσουμε στον εμποτισμό της με την εποξική ρητίνη.

Σε κάθε πλευρά κολλήθηκε ένα φύλο αποκόλλησης FIBERMAX VC009 (peelply) το οποίο βοηθάει στην δημιουργία μιας ομαλής επιφάνειας ώστε να αποφύγουμε την διαδικασία λείανσης της επιφάνειας μετά την πλαστικοποίηση της.

Πάνω από το φύλο αποκόλλησης σε κάθε πλευρά τοποθετήθηκε ένα φύλλο διάτρητης μεμβράνης FIBERMAX VC011(perforated film) το οποίο εξυπηρετεί στην καλύτερη κατανομή και κυκλοφορία της ρητίνης.

Τέλος, με πολύ μεγάλη προσοχή τυλίξαμε τα παραπάνω με σωληνωτό φιλμ κενού FIBERMAX VC130 (tubular vacuum film) το οποίο σφραγίστηκε με μαστιχοταινία FIBERMAX VC060.

Στο φιλμ κενού δημιουργήσαμε 2 οπές διαμέτρου 6.4 εκατοστών στις οποίες τοποθετήθηκαν 2 ανταπτορες σακούλας κενού εκ των οποίων ο ένας συνδέει την σακούλα κενού με την αντλία κενού και ο άλλος συνδέει την σακούλα κενού με την παροχή ρητίνης.

Αφού με την βοήθεια σωλήνα κατάλληλης διαμέτρου συνδέσουμε την αντλία με την σακούλα κενού και την παροχή ρητίνης με την σακούλα κενού μπορούμε να αρχίσουμε τον εμποτισμό μας με ρητίνη.

Σε ένα δοχείο, το οποίο προηγουμένως έχουμε καθαρίσει πάρα πολύ καλά για την απομάκρυνση σκόνης και ξένων σωματιδίων, ρίχνουμε την ρητίνη μας και στην συνέχεια τον καταλυτή αυτής, στις ποσότητες που αναφέρονται από τον κατασκευαστή, ώστε να ξεκινήσει ο πολυμερισμός της.

Πρέπει να προσέξουμε ότι ο πολυμερισμός της ρητίνης είναι μια εξώθερμη αντίδραση και επομένως εκλύονται μεγάλες ποσότητες θερμότητας οπότε η ανάμιξη της ρητίνης με τον καταλυτή της προτείνεται να γίνεται σε δοχείο με μεγάλη επιφάνεια για την αποφυγή δημιουργίας φωτιάς.

Αφού αναμείξουμε την ρητίνη με τον καταλυτή πρέπει να αναδέψουμε το μίγμα για τουλάχιστον 5 λεπτά ώστε να ομογενοποιηθεί.

Θέτοντας την αντλία μας σε λειτουργία αυτή θα αρχίσει να τραβάει αέρα μέσα από την σακούλα κενού η οποία θα συμπιεσθεί και θα πάρει το σχήμα της πασαρέλας μας εφαρμόζοντας τελειά πάνω σε αυτήν. Αφού δημιουργηθεί το κενό και η αντλία μας συνεχίζει την λειτουργία της θα παρατηρήσουμε ότι ρητίνη θα αρχίσει να έρχεται από την παροχή ρητίνης μας η οποία σιγά σιγά θα αρχίσει να εμποτίζει τον χώρο μέσα στην σακούλα.

Αφού όλος ο χώρος εμποτιστεί και η ρητίνη φτάσει στην 'έξοδο' από όπου η αντλία τραβάει τον αέρα θα αρχίσει να εξέρχεται η παραπανίσια ρητίνη που δεν απορροφήθηκε από τα υφάσματα και τον αφρό.

Εδώ πρέπει να προσέξουμε ώστε η ρητίνη που εξέρχεται να μην φτάσει μέσα στην αντλία καθώς θα την καταστρέψει. Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να τοποθετήσουμε μεταξύ της αντλίας και της σακούλας κενού μια παγίδα υγρών, ώστε η εξέρχουσα ρητίνη να φυλακίζεται εκεί.

Αφού ο εμποτισμός με ρητίνη ολοκληρώθηκε στην συνέχεια αποσυνδέσαμε την αντλία και την παροχή ρητίνης. Απομακρύναμε την σακούλα κενού και την διάτρητη μεμβράνη και τοποθετήσαμε την πασαρέλα σε φούρνο στους 60 βαθμούς κελσίου για 6 ώρες ώστε να πραγματοποιηθεί η πρώτη φάση σκλήρυνσης της.

Μετα από την πρώτη φάση σκλήρυνσης αφήσαμε για 12 ώρες την πασαρέλα να ηρεμίσει προτού περάσουμε στην δεύτερη φάση σκλήρυνσης που την τοποθετήσαμε σε φούρνο στους 60 βαθμούς για άλλες 6 ώρες.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε το πρώτο πείραμα όπου προσθέτοντας βάρη στο κέντρο της πασαρέλας μετράγαμε την καμπύλωση της. Όπως φαίνεται και στον σχετικό πίνακα η σχέση μεταξύ φορτίου και καμπύλωσης της πασαρέλας είναι μη αποδεκτή.

Για τον παραπάνω λόγο αποφασίσαμε να ξανακατασκευάσουμε την πασαρέλα επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία μόνο που αυτήν την φορά θα τοποθετήσουμε και ένα νεύρο στο κέντρο και κατά μήκος της πασαρέλας.

Αφού επαναλάβαμε όλη την παραπάνω διαδικασία λοιπόν με την διαφορά προσθήκης ενός νεύρου από το ίδιο υλικό αλλά μεγαλύτερου πάχους, επαναλάβαμε και το πείραμα

μέτρησης της καμπυλότητας με προσθήκη βαρών. Αυτή την φορά η σχέση βάρους και καμπύλωσης όπως φαίνεται και στον σχετικό πίνακα είναι αποδεκτή.

Το τελικό βάρος της πασαρέλας που φτιάξαμε είναι 8.5 κιλά.



Εικόνα 33: Άπλωμα εποξικής ρητίνης για τοποθέτηση του νεύρου.



Εικόνα 34: Τοποθέτηση του νεύρου με την βοήθεια βάρους για την καλύτερη κόλληση.



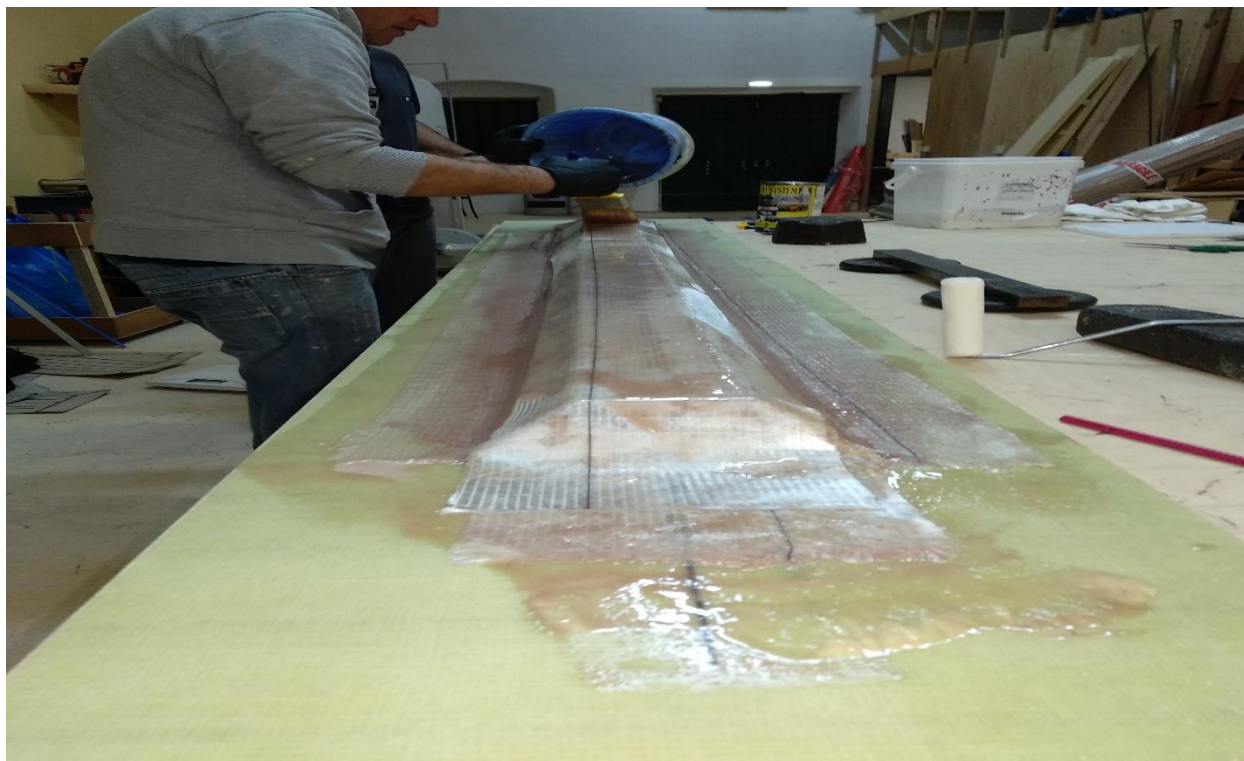
Εικόνα 35: Υαλο- ύφασμα πυκνότητας 450 γραμμαρίων ανά τετραγωνικό μέτρο.



Εικόνα 36: Επάλειψη του νεύρου με εποξική ρητίνη πριν την τοποθέτηση του υαλο-υφάσματος.



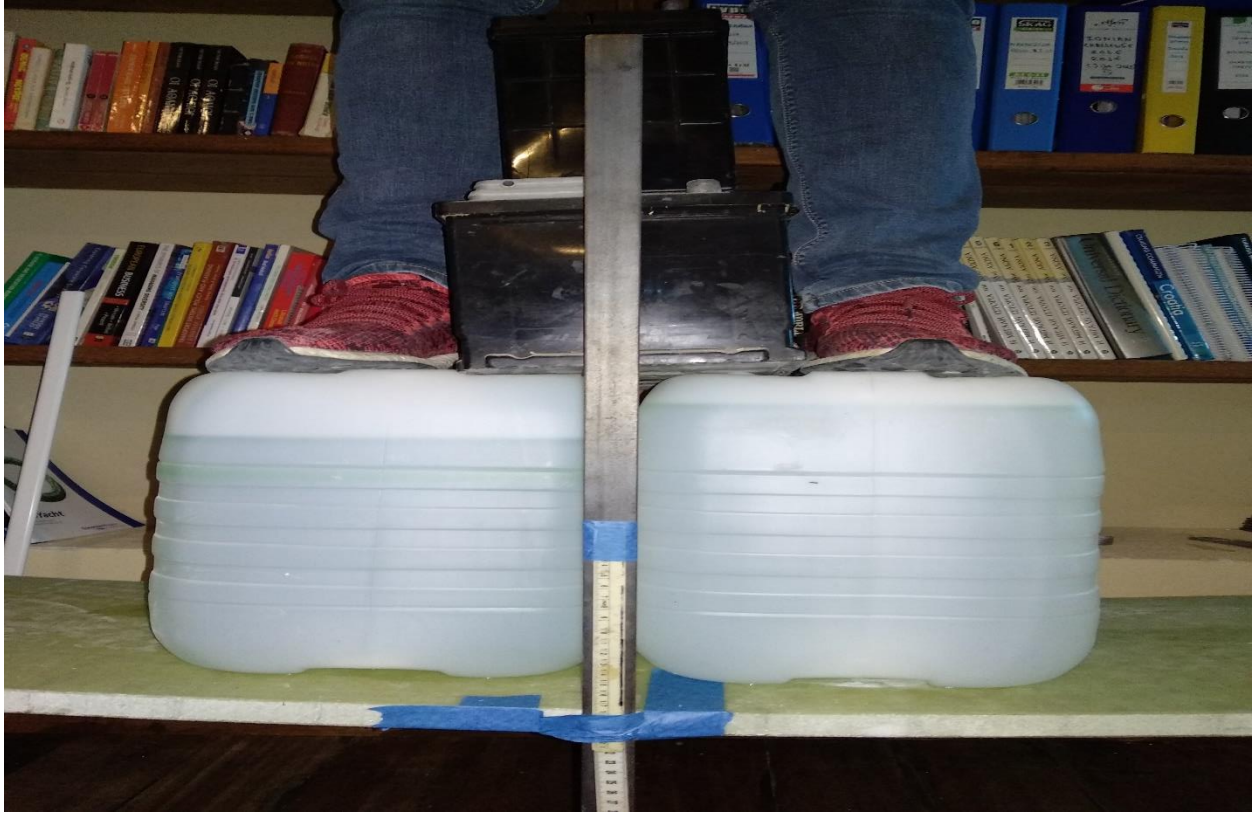
Εικόνα 37: Τοποθέτηση του υαλο-υφάσματος.



Εικόνα 38: Επάλειψη του υαλο- υφάσματος με εποξική ρητίνη.



Εικόνα 39: Τοποθέτηση της πασαρέλας σε αυτοσχέδιο φούρνο στους 60 βαθμούς κελσίου για την φάση σκλήρυνσης.



Εικόνα 40: Φωτογραφία που πάρθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος μέτρησης της καμπυλότητας.

Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το ANSYS

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως αυτή προέκυψε. Η γεωμετρία του μοντέλου που φτιάξαμε στο πρόγραμμα είναι ίδια με αυτήν της πασαρέλας που κατασκευάσαμε.

Μήκος: 2.2 μέτρα

Πλάτος: 0.35 μέτρα

Πάχος: 0.044 μέτρα

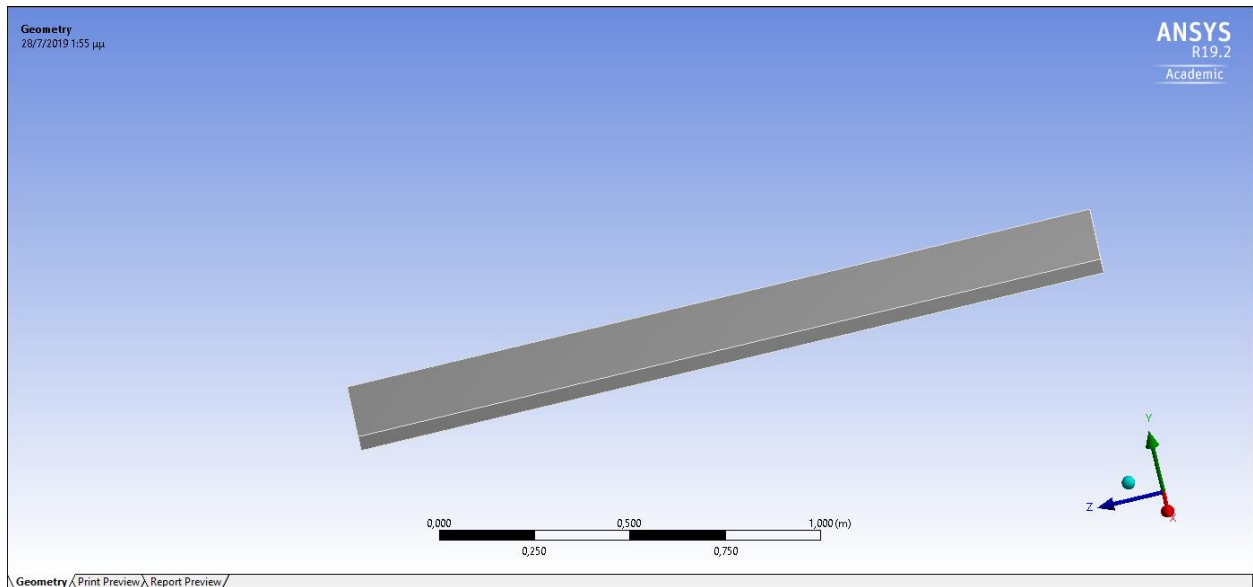
Η διαφορά σε σχέση με την πασαρέλα που κατασκευάσαμε είναι ότι το μοντέλο του προγράμματος φτιάχτηκε από ένα υλικό χωρίς να περιλαμβάνει αφρό PVC στο ενδιάμεσο όπως χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με σκοπό την μείωση του βάρους της πασαρέλας.

Το υλικό που επιλέχθηκε για την κατασκευή του μοντέλου είναι το FRP από την βάση δεδομένων του INVENTOR με τις παρακάτω ιδιότητες.

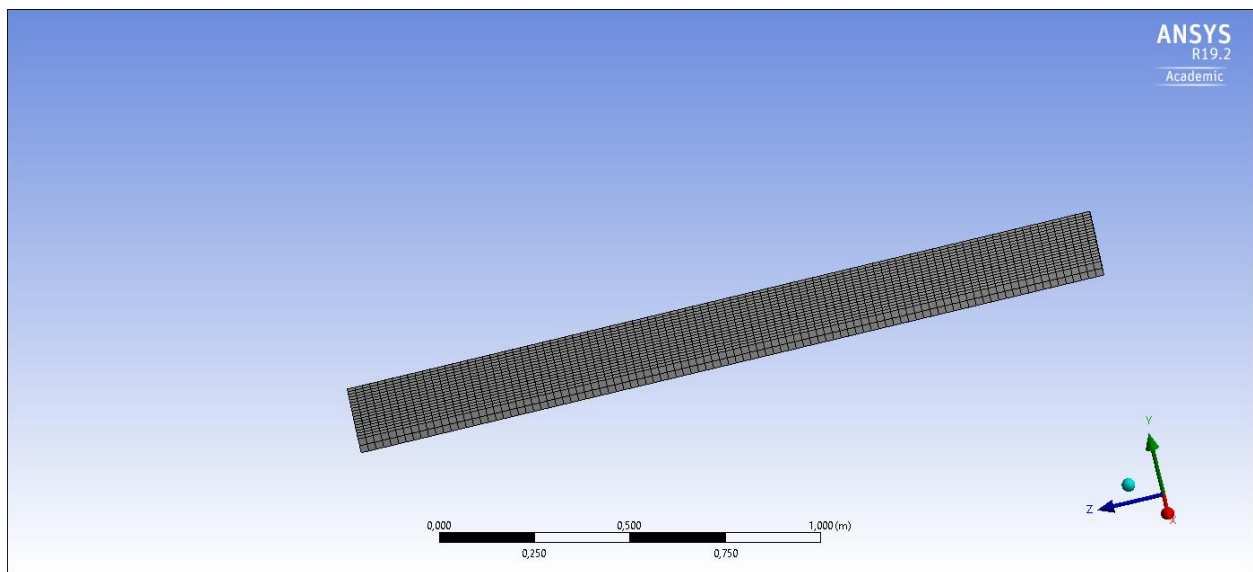
| | |
|----------------------|----------------------------|
| Thermal Conductivity | 6.687E-02 btu/(in*sec*F) |
| Specific Heat | 0.300 btu/ (lb*F) |
| Behavior | Isotropic |
| Young's Modulus | 8.000E+05 psi |
| Poisson's Ratio | 0.4 |
| Shear Modulus | 2.741E+05 psi |
| Density | 0.065 pound per cubic inch |
| Yield Strength | 1.000E+04 psi |
| Tensile Strength | 1.000E+04 psi |

Για αρχή θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την πασαρέλα χωρίς νεύρο δυσκαμψίας. Η φόρτιση που επιβλήθηκε είναι 800N σε απόσταση 1 μέτρο από το αριστερό άκρο καθώς υποθέσαμε ότι 20 εκατοστά από το δεξί άκρο στηρίζονται στην πλατφόρμα του σκάφους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στο δεξί άκρο επιβλήθηκε η συνθήκη στήριξης άρθρωση και στο άλλο άκρο επιβλήθηκε κύλιση.

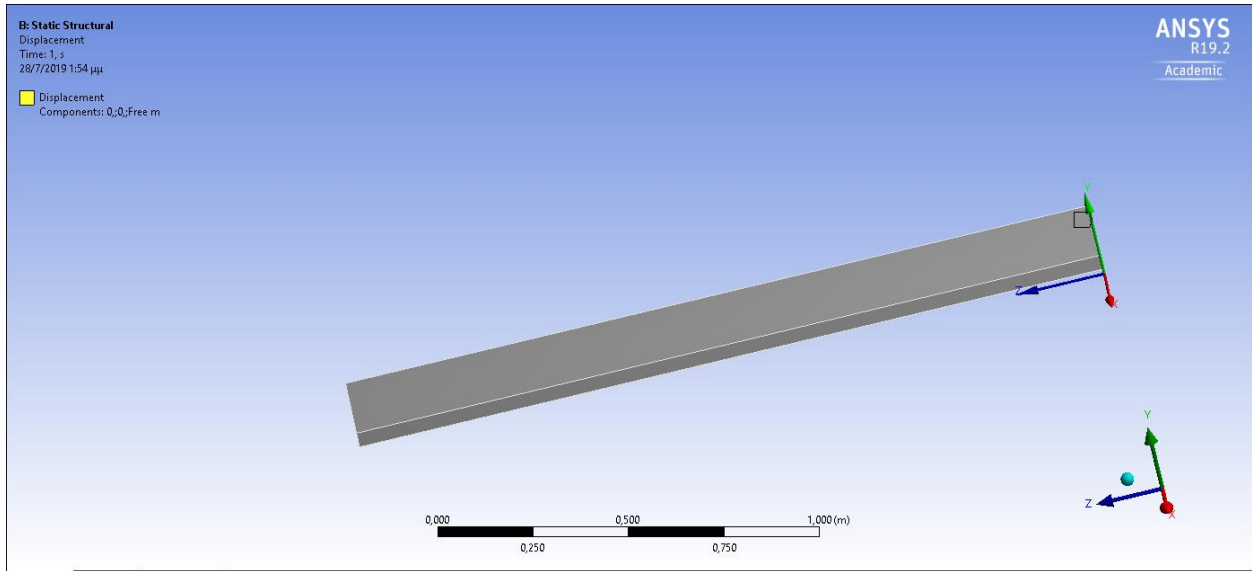
6.1 Αποτελέσματα πασαρέλας χωρίς νεύρο δυσκαμψίας.



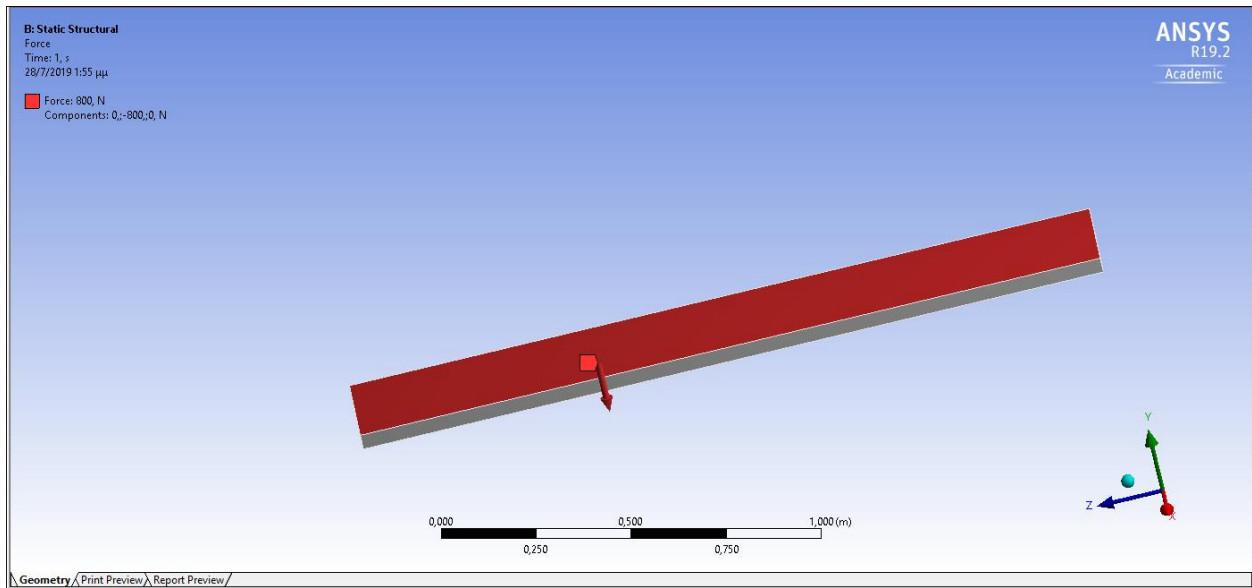
Εικόνα 41: Εισαγωγή μοντέλου στο ANSYS



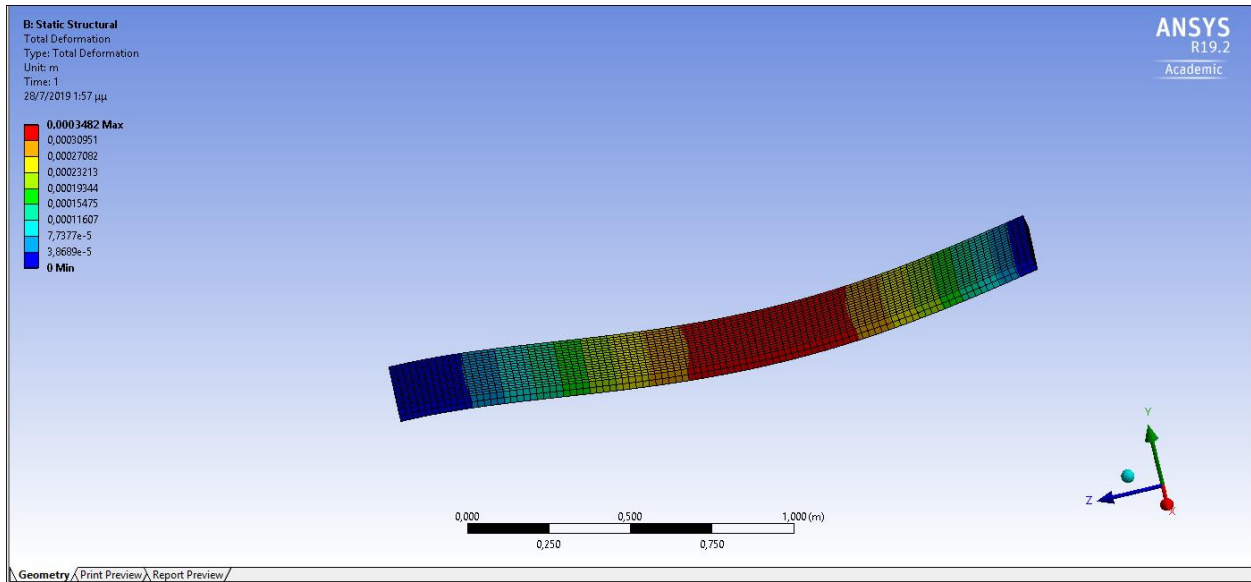
Εικόνα 42: Διακριτοποίηση πασαρέλας σε πεπερασμένα στοιχεία



Εικόνα 43: Επιβολή φορτίσεων στα πασαρέλα (κύλιση)

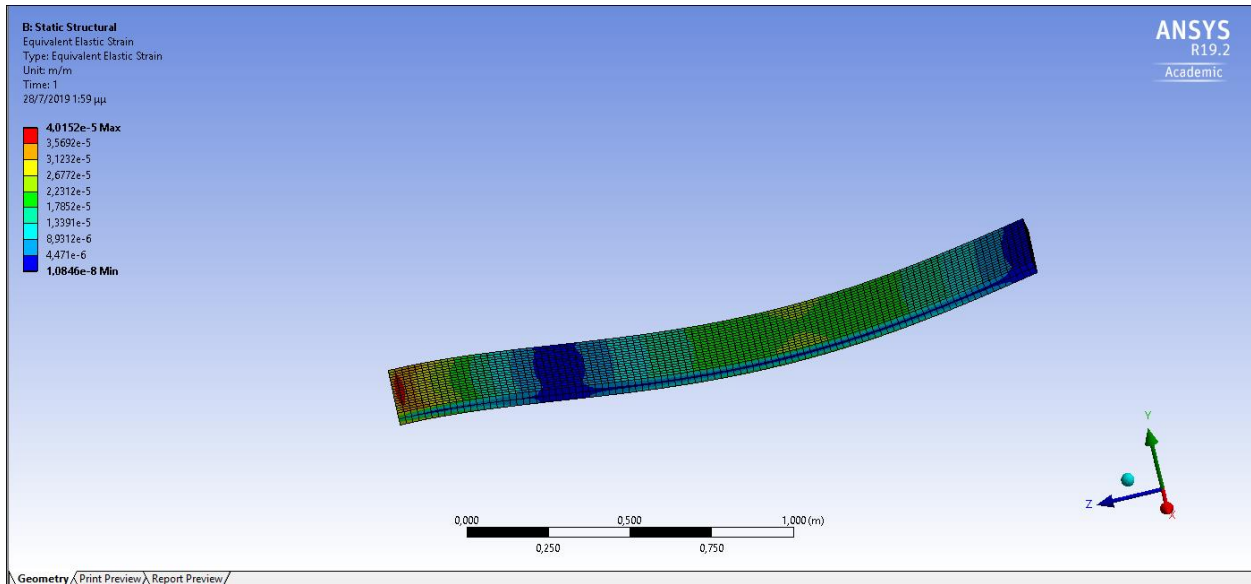


Εικόνα 44: Επιβολή φόρτισης 800N

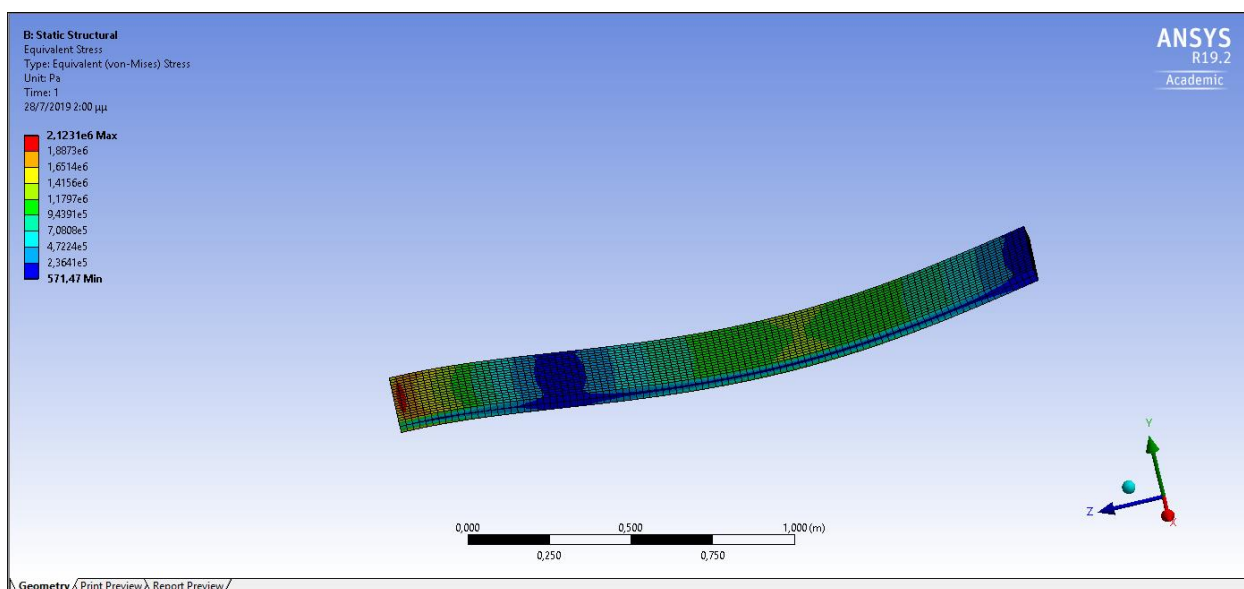


Εικόνα 45: Ολική μετατόπιση

Όπως παρατηρούμε η ολική μετατόπιση της πασαρέλας είναι μέγιστη στα 3,48 mm.



Εικόνα 46: Equivalent elastic strain



Εικόνα 47: Τάση Von Misses

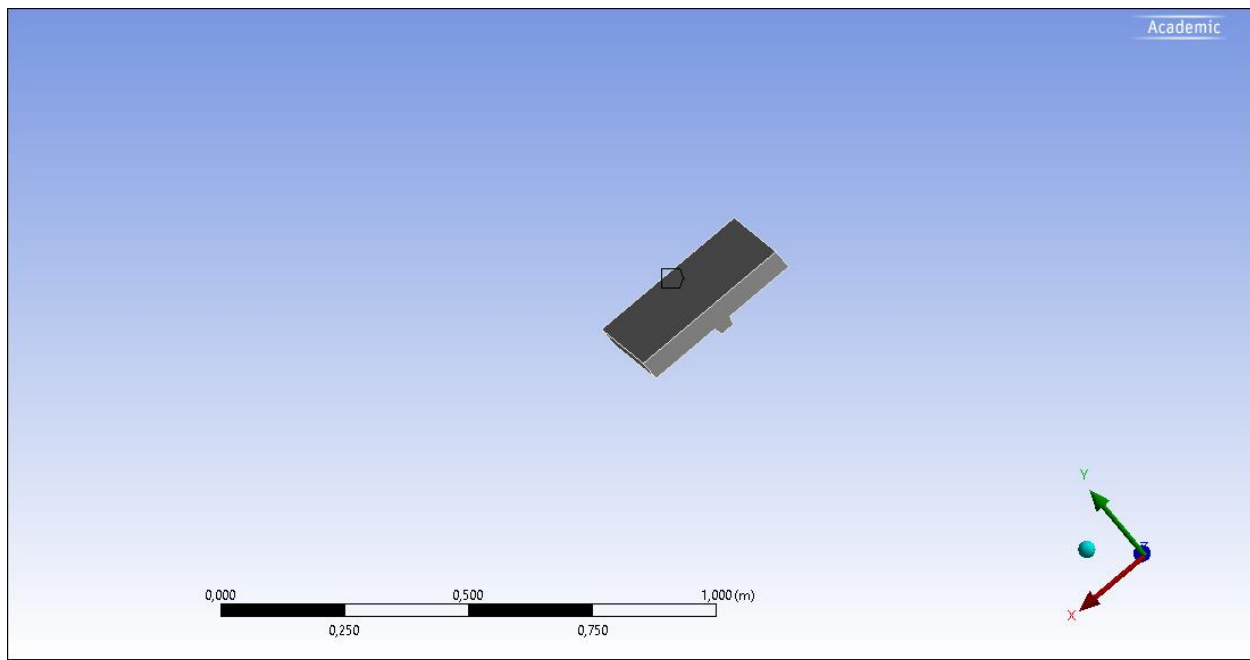
Η μέγιστη τάση von Misses ανέρχεται στα 2,13 MPa, η οποία είναι πολύ λιγότερη από την επιτρεπόμενη τάση της πασαρέλας που ανέρχεται στα 15 MPa περίπου.

6.2 Αποτελέσματα πασαρέλας με νεύρο δυσκαμψίας.

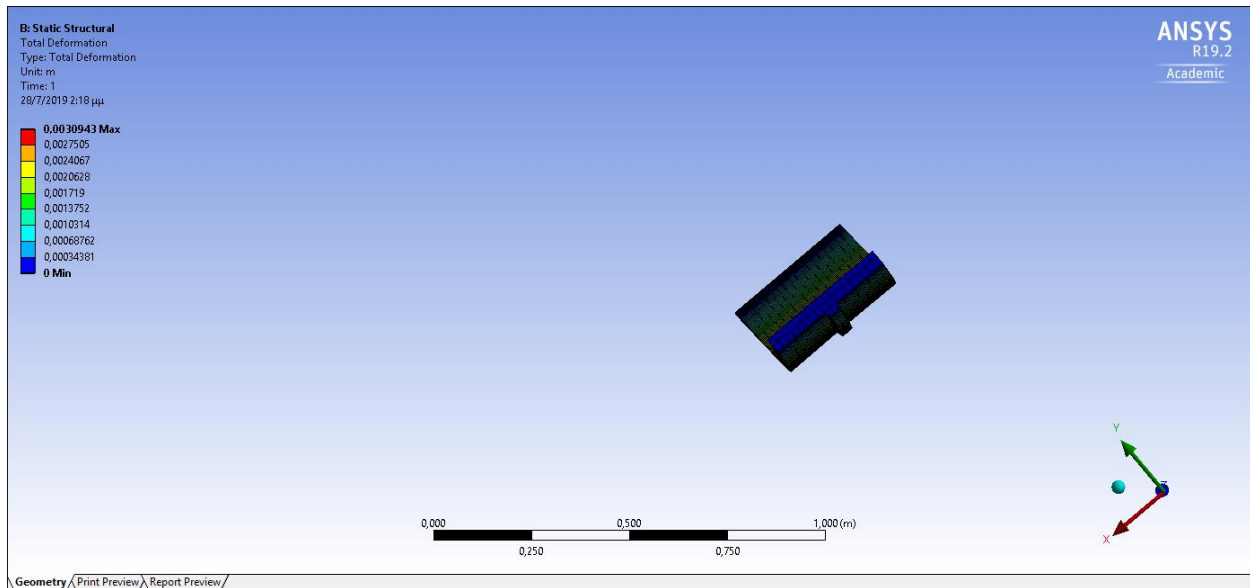
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων όπως αυτή προέκυψε.

Θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την πασαρέλα με νεύρο δυσκαμψίας.

Η φόρτιση που επιβλήθηκε είναι 2500N σε απόσταση 1 μέτρο από το αριστερό άκρο καθώς υποθέσαμε ότι 20 εκατοστά από το δεξί άκρο στηρίζονται στην πλατφόρμα του σκάφους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στο δεξί άκρο επιβλήθηκε η συνθήκη στήριξης άρθρωση και στο άλλο άκρο επιβλήθηκε κύλιση

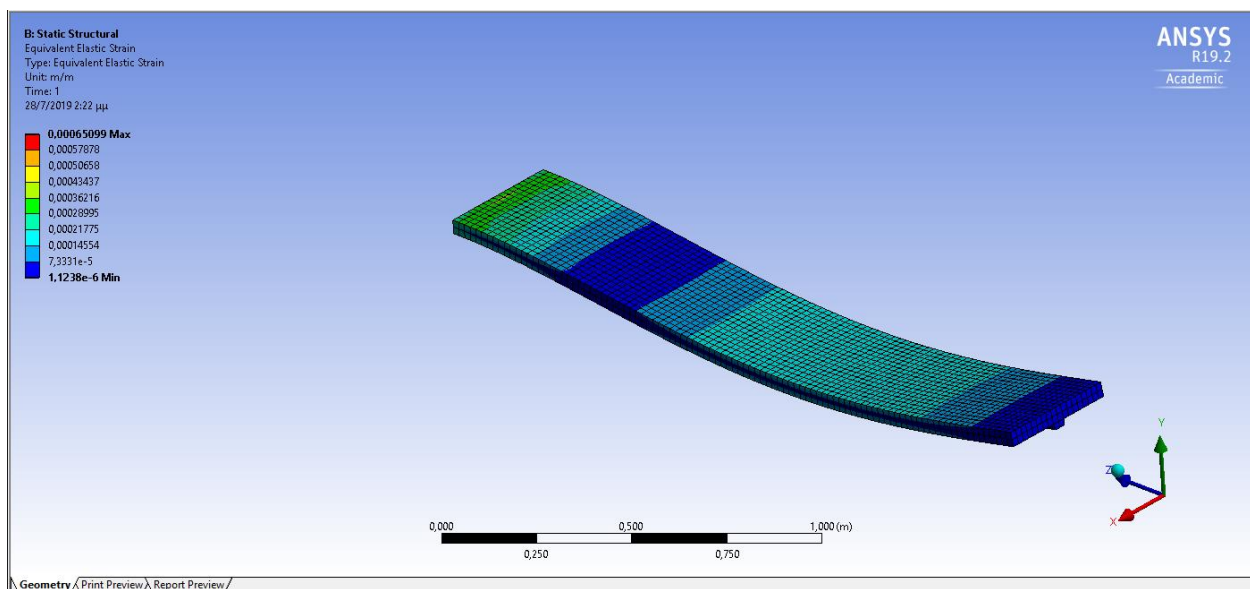


Εικόνα 48: Παρουσίαση μοντέλου

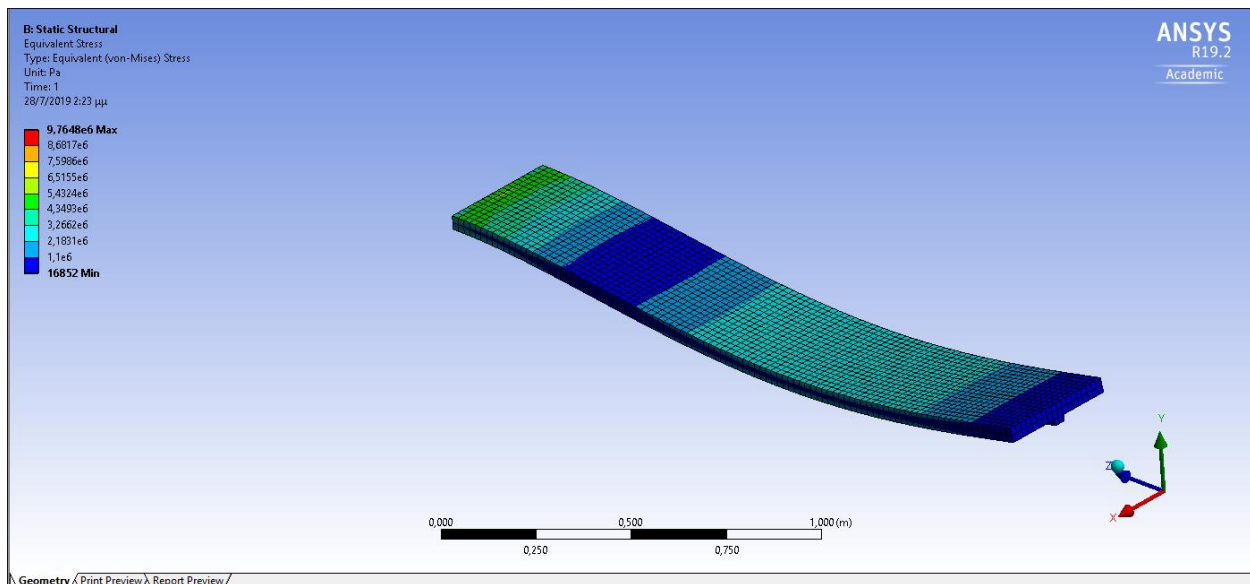


Εικόνα 49: Ολική μετατόπιση

Όπως παρατηρούμε η μετατόπιση παρόλο που το φορτίο αυξήθηκε κατά 3 φορές σε σχέση με την πασαρέλα χωρίς νεύρο δυσκαμψίας, η μετατόπιση μειώθηκε περίπου 1mm.



Εικόνα 50: Equivalent elastic strain



Εικόνα 51: Τάση von Misses

Η μέγιστη τάση von Misses ανέρχεται στα 9,76 MPa, η οποία είναι πολύ λιγότερη από την επιτρεπόμενη τάση της πασαρέλας που ανέρχεται στα 15 MPa περίπου. Παρόλο που η δύναμη αυξήθηκε κατά τρεις φορές η τάση παρέμεινε στα επιτρεπόμενα όρια και αυτό οφείλετε στην τοποθέτηση νεύρου δυσκαμψίας στο κάτω μέρος της πασαρέλας.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα πρακτικού πειράματος

| Πασαρέλα με νεύρο | |
|-------------------|----------------|
| Φορτίο(kg) | Μετατόπιση(mm) |
| 0 | 0 |
| 18 | 10 |
| 40 | 18 |
| 60 | 28 |
| 80 | 39 |
| 90 | 44 |
| 120 | 58 |
| 153 | 76 |
| 180 | 87 |
| 250 | 105 |

| Πασαρέλα χωρίς νεύρο | |
|----------------------|----------------|
| Φορτίο(kg) | Μετατόπιση(mm) |
| 0 | 0 |
| 12 | 20 |
| 24 | 30 |
| 36 | 45 |
| 48 | 55 |
| 60 | 70 |
| 64 | 74 |
| 68 | 78 |
| 74 | 85 |
| 80 | 90 |

Πίνακας 7: Αποτελέσματα πειράματος Ansys

| Πασαρέλα με νεύρο | |
|-------------------|----------------|
| Φορτίο(kg) | Μετατόπιση(mm) |
| 0 | 0 |
| 18 | 0,20 |
| 40 | 0,44 |
| 60 | 0,66 |
| 80 | 0,88 |
| 90 | 1,00 |
| 120 | 1,30 |
| 153 | 1,70 |
| 180 | 1,90 |
| 250 | 2,65 |

| Πασαρέλα χωρίς νεύρο | |
|----------------------|----------------|
| Φορτίο(kg) | Μετατόπιση(mm) |
| 0 | 0 |
| 12 | 0,7 |
| 24 | 1,1 |
| 36 | 1,4 |
| 48 | 1,8 |
| 60 | 2,3 |
| 64 | 2,5 |
| 68 | 2,6 |
| 74 | 2,90 |
| 80 | 3,48 |

Στους παραπάνω πίνακες παρατηρούμαι πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων του ANSYS και των αποτελεσμάτων του πρακτικού πειράματος.

Ο λόγος για αυτή την τεράστια διαφορά είναι η διαφορές του μοντέλου στο ANSYS με το μοντέλο που κατασκευάστηκε με τις σημαντικότερες να επισημαίνονται παρακάτω.

1. Η διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιήσαμε στο πρόγραμμα με αυτές των υλικών που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα.
2. Το μοντέλο στο πρόγραμμα φτιάχτηκε από ένα ενιαίο υλικό ενώ στην πραγματικότητα χρησιμοποιήσαμε και αφρό PVC για την μείωση του βάρους πράγμα που επηρέασε σημαντικά τις ιδιότητες της πασαρέλας.
3. Το υλικό του μοντέλου του προγράμματος είναι ισότροπο σε αντίθεση με την πραγματική πασαρέλα που είναι ανισότροπη.
4. Η σωστή επιλογή της κατεύθυνσης των ινών στο πρακτικό μοντέλο δεν λύθηκε υπόψιν πράγμα που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα.
5. Η στηρίξεις στο ANSYS ήταν στήριξη άρθρωσης στο ένα άκρο και στο άλλο κύλιση ενώ στο πείραμα και στα δυο άκρα κύλιση.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

- Στην παρούσα πτυχιακή εργασία ο φοιτητής μελέτησε και κατανόησε σε βάθος βασικούς νόμους της μηχανικής των υλικών και της αντοχής αυτών.
- Κατανοήθηκε πλήρως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ώστε αυτές μετά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον φοιτητή στην προσομοίωση του μοντέλου ώστε όταν εξαχθούν τα αποτελέσματα να μπορεί να κατανοήσει τι νόημα έχουν αυτά.
- Από τα αποτελέσματα προκύπτουν ότι ο συνδυασμός νεύρου δυσκαμψίας και σύνθετων υλικών μπορούν να αυξήσουν την αντοχή της πασαρέλας κατά τρεις φορές περίπου.
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια πολύ βασική μέθοδος για οποιοδήποτε σύγχρονο μηχανικό και η κατανόηση της πολύ σημαντική για επίλυση τέτοιων προβλημάτων.
- Τα αποτελέσματα του μοντέλου στο ANSYS με τις μετρήσεις που πήραμε στην πράξη διαφέρουν λόγω έλλειψης εμπειρίας από τον φοιτητή στην κατασκευή συνθέτων υλικών.
- Το βάρος της πασαρέλας που φτιάχτηκε ακόμα και με το νεύρο δυσκαμψίας ήταν 8.5 κιλά, σχεδόν το μισό από το βάρος μιας συμβατικής πασαρέλας με τις ίδιες διαστάσεις.

Βιβλιογραφία

<https://www.saferack.com/what-is-a-gangway/>

<http://www.nautical-structures.com/boarding-equipment,passerelles-gangplanks>

<https://www.yachting-pages.com/content/a-guide-on-the-different-types-of-yacht-passerelles-available.html>

Bunsell, A. R., & Renard, J. (2005). *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. CRC Press.

Weatherhead, R. G. (2012). *FRP technology: fibre reinforced resin systems*. Springer Science & Business Media.

Hughes, T. J. (2012). *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation.

Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics*. Elsevier.