



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της επίδρασης σύνθετων υλικών
στη μηχανική συμπεριφορά χιονοσανίδας

ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΑΣΟΝΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής Δ. Μανωλάκος

ΑΘΗΝΑ 2015

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ. Δ. Μανωλάκο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα προσωπικού μου ενδιαφέροντος και τον υποψήφιο διδάκτορα Κιτσέλη Αλέξανδρο για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε βοηθώντας με.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την υπομονή που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου

Γιαννόπουλος Ιάσοντας

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Χιονοσανίδα

1.1 Ιστορική αναδρομή.....	7
1.2 Υλικά κατασκευής.....	7
1.2.1 Επιφάνεια ολίσθησης.....	8
1.2.2 Πλάγιες λάμες.....	9
1.2.3 Στρώσεις ενίσχυσης υαλονημάτων.....	9
1.2.4 Πυρήνας ξύλου.....	9
1.2.5 Πλαϊνές λωρίδες προστασίας του πυρήνα.....	10
1.2.6 Προαιρετικές στρώσεις επιπλέον ενίσχυσης.....	10
1.2.7 Στρώση γραφικών.....	10
1.2.8 Εποξική κόλλα.....	10
1.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	11
1.3.1 Μήκος σανίδας.....	11
1.3.2 Μήκος ενεργής ακμής.....	11
1.3.3 Ακτίνα ακμής.....	12
1.3.4 Πλάτος στάσης.....	12
1.3.5 Προφίλ σανίδας.....	12
1.4 Μέθοδος κατασκευής.....	13
1.5 Μηχανικά χαρακτηριστικά	15
1.5.1 Ελαστικότητα σε κάμψη.....	16
1.5.2 Ελαστικότητα σε στρέψη.....	16
1.6 Κατηγορίες χιονοσανίδων.....	17

1.6.1 Σανίδες αγωνιστικής χιονοδρομίας.....	17
1.6.2 Σανίδες τουριστικής χιονοδρομίας.....	18

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

2.1 Εισαγωγή cad- cae	20
2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	21
2.3 Μοντελοποίηση	21
2.4 Αυτόματη γένεση πλέγματος.....	23
2.5 Καθορισμός Είδους ανάλυσης.....	32
2.6 Στάδια ανάλυσης.....	34

Κεφάλαιο 3

Σύνθετα υλικά

3.1 Ορισμός.....	35
3.2 Ιστορική εξέλιξη	35
3.3 Κατηγορίες σύνθετων υλικών.....	37
3.3.1 Σύνθετα με σωματίδια.....	37
3.3.2 Στρωματικά σύνθετα.....	38
3.3.3 Ινώδη σύνθετα.....	39
3.4 Μήτρες.....	40
3.5 Ίνες γυαλιού.....	42

3.6 Ίνες άνθρακα.....	45
3.7 Υφάσματα ενίσχυσης.....	48
3.7.1 Διαστρωμάτωση και προσανατολισμός.....	52

Κεφάλαιο 4

Προσομοίωση Siemens NX 9.0

4.1 Διαστάσεις μοντέλου.....	55
4.2 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών.....	56
4.2.1 Πυρήνας ξύλου.....	57
4.2.2 Υφάσματα ενίσχυσης fiberglass	58
4.2.3 Στρώσεις ενίσχυσης ανθρακονημάτων carbon- fiber.....	60
4.3 Δημιουργία πλέγματος.....	62
4.4 Ορισμός συνθηκών σύνδεσης.....	64
4.5 Αρχικές συνθήκες ανάλυσης	66
4.5.1 Προσομοίωση κάμψης τριών σημείων.....	66
4.5.2 Προσομοίωση στρέψης.....	67
4.6 Αποτελέσματα μοντέλων.....	69
4.6.1 Μόνιμες ενισχύσεις.....	69
4.6.2 Αφαιρούμενες ενισχύσεις.....	85
4.7 Συμπεράσματα.....	94

Παράρτημα

Κατάλογος Εικόνων.....	95
Βιβλιογραφία.....	100

Κεφάλαιο 1 – Χιονοσανίδα

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη εμφάνιση της χιονοσανίδας έγινε στα μέσα της δεκαετίας του '60 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και είχε σκοπό εξελίξει το skateboard και να μεταφέρει την κυματοσανίδα (Surf) που είχε ευρεία διάδοση από παλιότερα από τους ωκεανούς στα βουνά. Οι πρώτες ιδιοκατασκευές αποτελούνταν συνήθως από δεμένα μεταξύ τους πέδιλα του σκι ή από ξύλινες σανίδες που μιμούνταν το σχήμα του surf και είχαν δέστρες για να ασφαρίζονται τα πόδια του αναβάτη για πιο ασφαλή χειρισμό. Γρήγορα το κοινό του αθλήματος πολλαπλασιάστηκε και δέκα χρόνια αργότερα αρχισαν να κάνουν την εμφάνισή τους οι πρώτες εταιρίες που κατασκεύαζαν χιονοσανίδες. Όπως ήταν αναμενόμενο σε λίγα χρόνια και κυρίως μέσω πειραματισμού στον τρόπο και τα υλικά παραγωγής τα μοντέλα μεταλλάχθηκαν από απλούστατες σε σύνθετες sandwich κατασκευές με σκοπό να προσφέρουν στον αναβάτη μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων και αυξημένη κατευθυντικότητα. Πλέον οι σανίδες έχουν πολλαπλές στρώσεις υλικών από την εξελιγμένη επιφάνεια ολίσθησης στο χιόνι με εξαιρετικά μικρή τριβή και δέστρες που ασφαλίζουν απόλυτα τα πόδια μέχρι ενισχύσεις που αλλάζουν τοπικά την σκληρότητα της σανίδας για να δίνουν καλύτερη αίσθηση στον αθλούμενο.

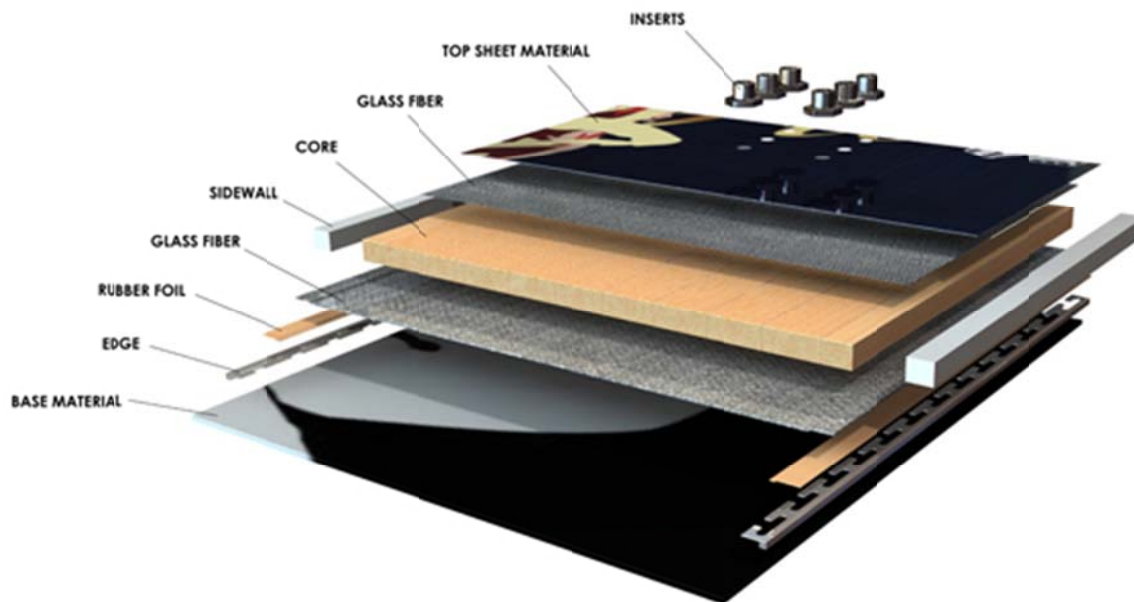
Τα τελευταία χρόνια το άθλημα γνώρισε μεγάλη άνθιση, τέτοια που οδήγησε στην αναγνώριση του σαν ολυμπιακό άθλημα και στην εισαγωγή του για πρώτη φορά στο πρόγραμμα των χειμερινών ολυμπιακών αγώνων του Nagano το 1998 σε δύο μάλιστα κατηγορίες αγώνα giant slalom και halfpipe. Πλέον τα αγωνίσματα που περιλαμβάνονται είναι τέσσερα αφού στις τελευταίες ολυμπιάδες προστέθηκαν το boardercross και το slopestyle.

1.2 Υλικά κατασκευής

Στη σημερινή τους μορφή οι σανίδες αποτελούνται από 6 ή και παραπάνω στρώσεις υλικών κάθε μια από τις οποίες έχει διαφορετική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.

Αυτές είναι από κάτω προς τα πάνω:

- Επιφάνεια ολίσθησης
- Πλάγιες λάμες
- Κάτω στρώση ενίσχυσης (fiberglass)
- Πυρήνας ξύλου ή εναλλακτικού υλικού
- Πλαϊνές λωρίδες προστασίας του πυρήνα
- Πάνω στρώση ενίσχυσης (fiberglass)
- Προαιρετικές επιπλέον ενισχύσεις (Kevlar/ carbon fiber)
- Στρώση γραφικών και προστασίας από ακτινοβολία UV



Εικόνα 1.1 Ενδεικτική τομή σανίδας

1.2.1 Επιφάνεια ολίσθησης

Η βάση της σανίδας αποτελείται από υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο UHMWPE καθώς το υλικό παρουσιάζει πολύ μικρό συντελεστή τριβής που βοηθάει στην ολίσθηση ακόμα και σε πλαγιές με μικρή κλίση. Επίσης έχει την απαραίτητη σκληρότητα ώστε να μην καταστρέφεται εύκολα σε περίπτωση που έρθει σε επαφή με πέτρες. Πέρα από αυτό είναι σχετικά εύκολη και γρήγορη η επισκευή του μετά από τυχόν ζημιά μικρής κλίμακας και το η επισκευή επαναφέρει την βάση σχεδόν στο εκατό τις εκατό της αρχικής του κατάστασης συμβάλλοντας στην μακροβιότητα της σανίδας.

1.2.2 Πλάγιες λάμες

Περιφεριακά της βάσης κολλιούνται ειδικά σχηματισμένες λάμες από χάλυβα. Σκοπός τους είναι να δίνουν καλύτερη αίσθηση στον αναβάτη καθώς έχουν μικρή ενδοτικότητα στην επαφή με το χιόνι ή ακόμα και με τον πάγο που τυχόν συναντηθεί κατά την διάρκεια της κατάβασης. Επιπλέον διευκολύνουν σε απότομες αλλαγές κατεύθυνσης επειδή «γαντζώνουν» στο χιόνι υπό την δύναμη που ασκεί ο αθλητής μέσω του βάρους του και την εκάστοτε στάση του σώματος του.

1.2.3 Στρώσεις ενίσχυσης (fiberglass)

Σχεδόν όλες οι σανίδες έχουν τουλάχιστον 2 ομάδες στρώσεων μια πάνω και μία κάτω από τον πυρήνα του ξύλου που εμποτίζονται με εποξικές κόλλες και προσδίδουν την επιθυμητή σκληρότητα στο τελικό προϊόν. Ανάλογα με την διεύθυνση και το μέγεθος της ενίσχυσης που προτιμάται χρησιμοποιούνται στρώσεις με διαφορετικό προσανατολισμό ινών και διαφορετικό πάχος. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε κάθε μερία του πυρήνα δύο ή τρεις μονοκατευθυντικές στρώσεις με διαφορετικό προσανατολισμό που είναι ραμμένες μεταξύ τους απευθείας για ευκολία και μείωση του χρόνου που χρειάζεται κατά την παραγωγή.

1.2.4 Πυρήνας ξύλου ή εναλλακτικού υλικού

Βασικό κομμάτι της σανίδας αποτελεί ο πυρήνας ξύλου αφού καταλαμβάνει τον μισό περίπου όγκο της. Κατασκευάζεται από πολλαπλές λωρίδες ξύλων που κολλούνται μεταξύ τους κατά την διαμήκη κατεύθυνση. Οι πολλαπλές λωρίδες είναι προτιμώμενες αφ' ενός γιατί είναι δύσκολο και αρκετά πιο ακριβό να βρεθούν μονοκόμματα ξύλα κατάλληλου μεγέθους, που να μην έχουν ατέλειες (όπως ρόζους και ρογμές) που θα επηρέαζαν το τελικό προϊόν με μη προβλεπόμενο τρόπο. Αφ' ετέρου με αυτή την διαδικασία μπορεί ο κατασκευαστής να συνδιάσει σε μία σανίδα διαφορετικά είδη ξύλου σκληρότερα ή μαλακότερα και σε διαφορετικές αναλογίες με σκοπό το βέλτιστο συνδιασμό μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και όσο το δυνατόν μικρότερου βάρους. Τα πιο συνηθισμένα είδη ξυλείας είναι ο φραξός (Ash), το σφεντάμι (Maple), η οξιά (Beech) , η κίτρινη λεύκη (yellow poplar) , το μπαμπού και η rawltonia.

Σε ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται εναλλακτικοί πυρήνες με σκοπό την περαιτέρω μείωση του βάρους. Αυτοί αποτελούνται είτε από αφρό πολυουρεθάνης(foam) είτε από κυψέλες αλουμινίου (aluminium honeycomb). Ωστόσο δεν προσφέρουν την ίδια «ενεργητικότητα» με το χύλο και γι'αυτό δεν έχουν επικρατήσει σε μεγάλη κλίμακα στη βιομηχανία.

1.2.5 Πλαϊνές λωρίδες προστασίας του πυρήνα

Στα πλάγια του πυρήνα υπάρχουν λεπτές λωρίδες σκληρού πλαστικού, συνήθως UHMWPE ή abs, για να προστατεύουν το ξύλο από την υγρασία. Επίσης βοηθούν στη άμεση μεταφορά της δύναμης που βάζει ο αναβάτης από την πάνω μεριά της σανίδας, όπου βιδώνονται οι δέστρες, προς τις λάμες που έρχονται σε απευθείας επαφή με το χιόνι και καθορίζουν τις αλλαγές κατεύθυνσης.

1.2.6 Προαιρετικές επιπλέον ενισχύσεις (Kevlar/ carbon fiber)

Στα πιο high end μοντέλα υπάρχουν επιπλέον υλικά ενίσχυσης όπως Kevlar και carbon fibers που δεν καταλαμβάνουν ολόκληρη την επιφάνεια της σανίδας. Αυτό γίνεται πρώτον, γιατί είναι αρκετά πιο άκαμπτα από τα υπόλοιπα υλικά και έτσι ακόμα και η περιορισμένη εφαρμογή τους αλλάζει ριζικά τα τελικά χαρακτηριστικά. Και δεύτερον γιατί σκοπός τους είναι η εντοπισμένη ενίσχυση σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής.

1.2.7 Στρώση γραφικών και προστασίας από ακτινοβολία UV

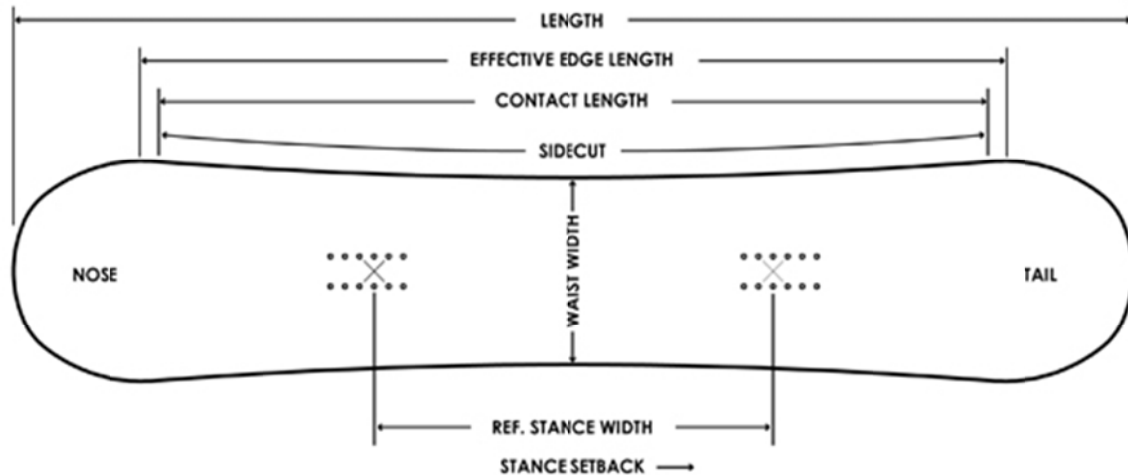
Τέλος στο πάνω μέρος κολλιέται μια λεπτή στρώση ειδικού πλαστικού συνήθως pbt (polybutylene terephthalate) ή abs (Acrylonitrile butadiene styrene). Η λειτουργία της είναι να αποτελεί βάση για να τυπωθούν τα γραφικά της σανίδας αλλά και να την προστατεύουν από την υπεριώδη ακτινοβολία (UV), η οποία διασπά την εποξική ένωση και προκαλεί πρόωρη καταστροφή.

1.2.8 Εποξική κόλλα

Έχει το ρόλο να ενώνει όλες τις παραπάνω στρώσεις με ομογενή τρόπο και να δημιουργεί το ενιαίο τελικό προϊόν. Συνήθως χρησιμοποιούνται μίγματα με σχετικά χαμηλό ιξώδες ώστε να

επιτυγχάνεται ευκολότερος και ομοιόμορφος εμποτισμός των υφασμάτων ενίσχυσης. Επίσης το χαμηλό ιξώδες αποτρέπει τον σχηματισμό φυσαλίδων αέρα ανάμεσα στις στρώσεις, που μπορεί να οδηγήσουν σε αποκόλληση.

1.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά



Εικόνα 1.2 Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά χιονοσανίδας

1.3.1 Μήκος σανίδας

Το συνολικό μήκος, που κυμαίνεται από 1,4 έως 1,8 μέτρα, είναι από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά κάθε σανίδας. Επιλέγεται κυρίως με βάση το βάρος του αθλητή και το είδος καταβάσεων που προτιμά. Μια μακριά σανίδα έχει μεγαλύτερη ροπή αδράνειας και άρα αντιστέκεται παραπάνω στις αλλαγές πορείας από ότι μία πιο κοντή. Παρά την μειωμένη ευελιξία τους όμως παρουσιάζουν αυξημένη σταθερότητα σε καταβάσεις με μεγάλες ταχύτητες και απορροφούν καλύτερα τις ανωμαλίες την επιφάνεια του χιονιού λόγω της μεγάλης επιφάνειας ολίσθησης. Η μεγαλύτερη επιφάνεια προκαλεί επίσης αύξηση της πλευστότητας σε απάτητο φρέσκο, ξηρό χιόνι – πούδρα.

1.3.2 Μήκος «ενεργής» ακμής (effective edge)

Είναι το μήκος μεταξύ των φαρδύτερων σημείων στη μύτη και την ουρά της σανίδας αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια στροφών η ακμή αυτή έρχεται σε επαφή με το χιόνι και καθορίζει

ουσιαστικά την πορεία που θα πάρει η σανίδα. Συνεπώς με αύξηση του μήκους της ακμής έχουμε μεγαλύτερη σταθερότητα κατά την διάρκεια στροφών.

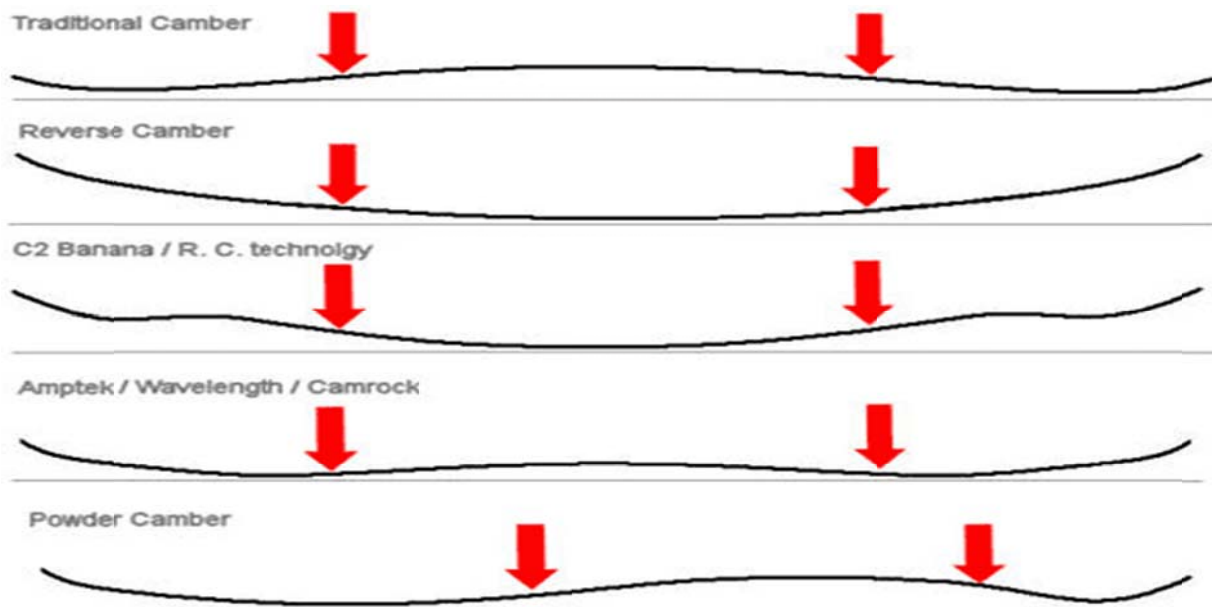
1.3.3 Ακτίνα ακμής (Sidecut)

Είναι η ακτίνα με την οποία έχει σχεδιαστεί η ακμή της σανίδας. Σανίδες με μεγάλη ακτίνα μπορούν να διαγράψουν ανοιχτές στροφές με μεγάλη ταχύτητα ευκολότερα και σταθερότερα, ενώ αυτές με μικρότερη ακτίνα επιτρέπουν πιο απότομες αλλαγές πορείας.

1.3.4 Πλάτος στάσης (stance width)

Είναι η απόσταση μεταξύ των σημείων που βιδώνονται οι δέστρες, άρα και το άνοιγμα μεταξύ των ποδιών του αθλητή κατά την κατάβαση. Συνήθως τα σημεία αυτά είναι συμμετρικά ως προς το κέντρο της σανίδας. Σε σανίδες σχεδιασμένες για καταβάσεις απάτητου χιονιού μπορεί να είναι μετατοπισμένα προς την ουρά της σανίδας, διευκολύνοντας έτσι τον αναβάτη να κρατά τη μύτη της σανίδας πάνω από την επιφάνεια του χιονιού και να επιτυγχάνει καλύτερη «πλευστότητα».

1.3.5 Προφίλ σανίδας (Camber)



Εικόνα 1.3 Είδη Προφίλ χιονοσανίδων

Παραδοσιακά οι σανίδες σχεδιάζονταν με τέτοιο προφίλ ώστε όταν αφήνονται σε επίπεδη επιφάνεια να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια μόνο σε δύο μικρές λωρίδες στη μύτη και την ουρά αντίστοιχα και ο κορμός της σανίδας είναι ανασηκωμένος. Έτσι η σανίδα απαιτεί μια αρχική φόρτιση για να επιπεδωθεί και να συναντήσει την επιφάνεια του χιονιού κατά την κατάβαση και γι' αυτό δίνει αυξημένη δυνατότητα ελέγχου στον αθλητή ειδικά σε αλλαγές πορείας.

Εναλλακτικά μπορεί το σημείο επαφής να είναι μόνο στο κέντρο της σανίδας και όλη η υπόλοιπη σανίδα να ακουμπά στο χιόνι μετά από την αρχική φόρτιση άρα η ουρά και μύτη έχουν την τάση να ανασηκώνονται πιο εύκολα. Αυτός ο σχεδιασμός προτιμάται γιατί επιτρέπει με ευκολία κάποιες συγκεκριμένες φιγούρες και στις προσγειώσεις των αλμάτων αφήνει στον αθλητή μεγαλύτερα περιθώρια λάθος με τίμημα όμως τον μειωμένο έλεγχο ειδικά σε μεγάλες ταχύτητες. Τα τελευταία χρόνια έχουν πληθύνει οι σανίδες που σχεδιάζονται με συνδιασμό αυτών των δύο μεθόδων σε μια προσπάθεια εκμεταλλευτούν μόνο τα πλεονεκτήματα τους.

1.4 Μέθοδος κατασκευής

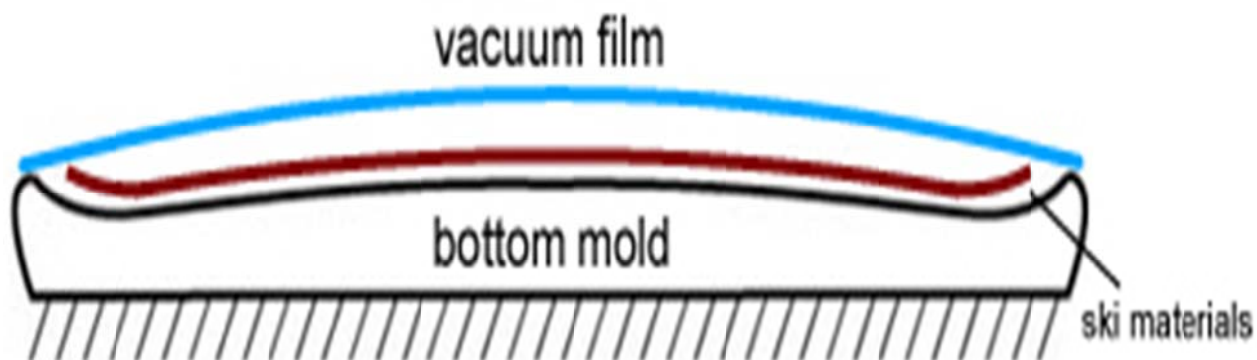
Αρχικά φτιάχνεται ο πυρήνας του ξύλου από κατα μήκος κολλημένες λωρίδες. Πλανάρεται στη συνέχεια στο τελικό του σχήμα και πάχος- λεπτο στη μύτη και την ουρά, πιο χοντρό στον κορμό- και στα πλάγια του κολλούνται οι πλαστικές λωρίδες προστασίας. Το υλικό της βάσης κόβετε στο κατάλληλο σχήμα και οι λάμες διαμορφώνονται και κολλούνται περιμετρικά της. Τέλος τα υφάσματα ενισχύσης κόβονται σε κομμάτια ανάλογα με το σχεδιασμό της σανίδας. Με όλα τα υλικά έτοιμα, οι στρώσεις ευθυγραμμίζονται στην επιθυμητή σειρά και ανάμεσά τους απλώνονται ομοιόμορφες στρώσεις εποξικής κόλλας. Η σανίδα τοποθετείται ανάμεσα σε φύλλα αλουμινίου πρεσάρεται σε κατάλληλο καλούπι ώστε να αποκτήσει το προφίλ και να το διατηρήσει λόγω της στερεοποίησης της κόλλας.



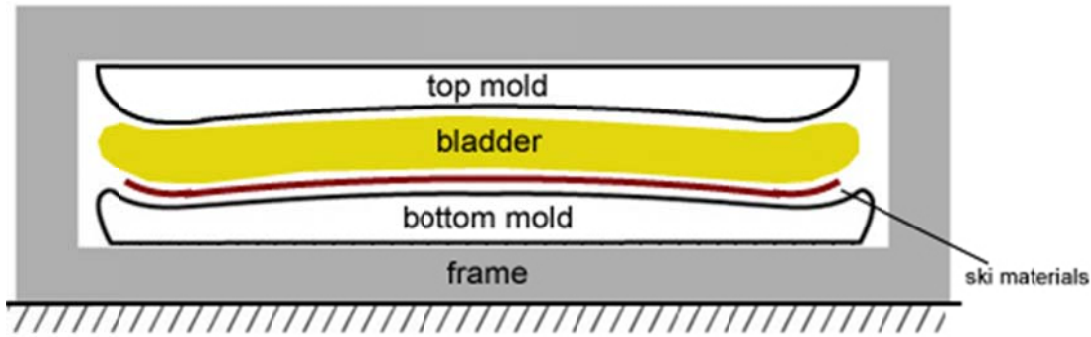
Εικόνα 1.4 Στάδιο προετοιμασίας χιονοσανίδας για πρεσάρισμα

Το πρεσάρισμα γίνεται είτε με τη χρήση αντλίας κενού, είτε σε θερμενόμενη πρέσα αέρα. Στην πρώτη περίπτωση το προϊόν εγκλωβίζεται μαζί με το καλούπι σε ανθεκτική σακούλα και το κενό ασκεί την απαραίτητη πίεση για την κατασκευή. Στη δεύτερη, που χρησιμοποιείται και κατά κόρον στη βιομηχανία, η φούσκα αέρα που τροφοδοτείται από αεροσυμπιεστή δημιουργεί την ομοιόμορφη πίεση. Ηλεκτρικές κουβέρτες ανεβάζουν τη θερμοκρασία μέχρι και στους 80 C ώστε να επιταχυνθεί η στερεοποίηση της κόλλας.

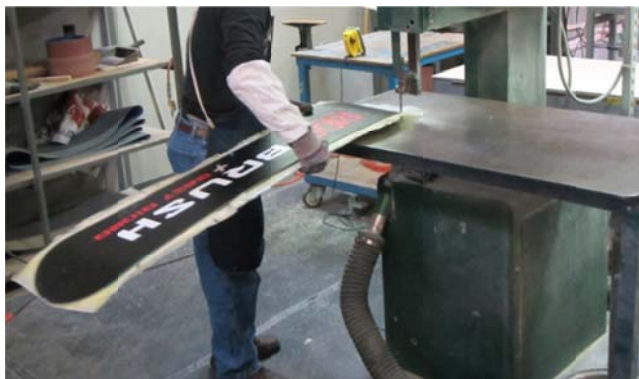
Τέλος αφού πιεστεί, η σανίδα καθαρίζεται περιμετρικά από το επιπλέον υλικό των υφασμάτων ενίσχυσης και της κόλλα που έχει διαφύγει περιμετρικά της λόγω της συμπίεσης



Εικόνα 1.5 Πρεσάρισμα με αντλία κενού



Εικόνα 1.6 Πρεσάρισμα σε πρέσσα αέρα



Εικόνα 1.7 Διαδικασία αποβολής επιπλέον υλικού μετά το πρεσάρισμα

1.5 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Το υλικό και το πάχος του πυρήνα ξύλου καθώς και το είδος των ενισχύσεων που έχει η σανίδα είναι αυτά που της προσδίδουν τα συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά. Η επίδραση του υλικού της βάσης και της στρώσης των γραφικών είναι πολύ μικρότερου μεγέθους, αφού από τη μία τα υλικά αυτά είναι πολύ πιο ελαστικά και από την άλλη το πάχος των στρώσεων είναι πολύ μικρό.

Με δεδομένη την στάση του αθλητή και τη φύση του αθλήματος οι δυνάμεις που ασκούνται στη σανίδα έχουν την τάση είτε να την κάμψουν είτε να την στρέψουν κατά τον διαμήκη άξονα.

1.5.1 Ελαστικότητα σε κάμψη



Εικόνα 1.8 Εμπειρική δοκιμή ελαστικότητας σε κάμψη

Το χαρακτηριστικό αυτό συνδέεται άμεσα με την συμπεριφορά της σανίδας. Μια εύκαμπτη σανίδα είναι πιο ευέλικτη και απαιτεί για παράδειγμα μικρότερη προσπάθεια από τον αθλητή για να πηδήξει κάποιο εμπόδιο, ωστόσο σε υψηλότερες ταχύτητες ή σε ανώμαλη επιφάνεια χιονιού παρουσιάζει μεγαλύτερη αστάθεια καθώς λόγω των μεγαλύτερων δυνάμεων παραμορφώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό. Αντίστοιχα για να πραγματοποιήσει κανείς ένα άλμα με μια δύσκαμπτη σανίδα και πρέπει να ασκήσει αρκετή παραπάνω δύναμη. Η σανίδα όμως ακόμα και σε μεγάλες ταχύτητες θα είναι πιο σταθερή αφού οι παραμορφώσεις της θα είναι μικρότερες και ελεγχόμενες.

1.5.2 Ελαστικότητα σε στρέψη



Εικόνα 1.9 Εμπειρική δοκιμή ελαστικότητας σε στρέψη

Όπως η συμπεριφορά σε κάμψη επηρεάζει την ευθεία πορεία του αθλητή, έτσι η ελαστικότητα σε στρέψη επηρεάζει την ευκολία αλλαγής κατεύθυνσης. Η τάση να στρέψης της σανίδας εμφανίζεται κυρίως όταν η ακμή της ακουμπά το χιόνι κατά τη διάρκεια μιας στροφής, γιατί

τότε ο αθλητής ασκεί με τη στάση του μεγαλύτερη δύναμη και δέχεται μεγαλύτερες αντιδράσεις από την επιφάνεια του χιονιού. Όμοια ακριβώς πριν την απογείωση σε φιγούρες που περιέχουν περιστροφές ο αθλητής ασκεί στρεπτικές δυνάμεις στην σανίδα προσπαθώντας να ξεκινήσει την περιστροφή της εναέριας φιγούρας. Αντίστοιχα με πριν, η αυξημένη ακαμψία προσδίδει σταθερότητα και καλύτερο χειρισμό σε μεγαλύτερες ταχύτητες αλλά σε μικρότερες υστερεί σε ευελιξία.

1.6 Γενικές κατηγορίες χιονοσανίδων

Το κριτήριο με το οποίο διαχωρίζονται οι σανίδες είναι όπως είναι η χρήση για την οποία ενδείκνυνται. Έτσι έχουμε σανίδες για αγωνιστική χιονοδρομία και για «τουριστική» χιονοδρομία. Προφανώς σε κάθε μία από αυτές υπάρχει περαιτέρω διάκριση με βάση πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τα βασικά στοιχεία της κάθε κατηγορίας.

1.6.1 Σανίδες αγωνιστικής χιονοδρομίας

Χρησιμοποιούνται σε αγωνίσματα χρονομετρημένης κατάβασης (boardercross και giant slalom) όπου στόχος είναι η διάσχιση προσχεδιασμένης και προετοιμασμένης με μηχανικά μέσα διαδρομής στον μικρότερο δυνατό χρόνο. Τα αγωνίσματα αυτά είναι το boardercross και το slalom.



Εικόνα 1.10 Σανίδες αγωνιστικής χιονοδρομίας

Προφανώς πρέπει να είναι πάρα πολύ σταθερές σε υψηλές ταχύτητες και να δίνουν στον αθλητή τη δυνατότητα στον αθλητή να πραγματοποιεί αλλαγές πορείας με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια καθώς η παραμικρή αστάθεια ή απόκλιση από την βέλτιστη πορεία κοστίζει χρόνο. Για αυτό το λόγο οι σανίδες αυτές έχουν μειωμένη ελαστικότητα σε κάμψη αλλά και σε στρέψη η οποία επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό με την χρήση ανθρακονυματικών ενισχύσεων.

Έτσι μπορεί και το συνολικό βάρος της σανίδας να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Όσον αφορά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, οι σανίδες είναι αρκετά στενές αλλά αισθητά πιο μακριές για να ελαχιστοποιούν το χρόνο εναλλαγής από λάμα σε λάμα (την αλλαγή κατεύθυνσης) αλλά να διατηρείται μεγάλη η επιφάνεια ολίσθησης. Επίσης έχουν μεγάλη καμπυλότητα camber που οδηγεί σε αύξηση της σταθερότητας σε μεγάλες ταχύτητες. Επίσης η ακτίνα ακμής (sidecut) είναι πολύ μεγάλη διευκολύνοντας τη χάραξη γρήγορων αλλά ελεγχόμενων στροφών. Τέλος είναι σχεδιασμένες ασύμμετρα, δηλαδή έχουν διαφορά μεταξύ της μύτης και της ουράς ώστε να βελτιστοποιείται η πορεία προς μία μόνο φορά. Βέβαια για να ισχύουν τα παραπάνω θα πρέπει ο αθλητής να έχει μεγάλη εμπειρία και να είναι εκγυμνασμένος για να μπορεί να χειριστεί τέτοιου είδους σανίδες, δηλαδή είναι ιδιαίτερα απαιτητικές στον χειρισμό τους και θα κούραζαν πολύ γρήγορα αν δεν την χρησιμοποιεί για τον σκοπό που είναι σχεδιασμένες.

1.6.2 Σανίδες «τουριστικής» χιονοδρομίας

Οι σανίδες είναι σχεδιασμένες για καταβάσεις σε φυσικές πλαγιές βουνών με μεγάλες εναλλαγές επιφάνεια χιονιού και επιτρέπουν στον αναβάτη μεγαλύτερη ευελιξία . Οι τρεις βασικές υποκατηγορίες χιονοσανίδων τουριστικής χιονοδρομίας είναι οι εξής.

-Freestyle

Χρησιμοποιούνται από αθλητές σε αγωνίσματα εναέριων φιγούρων (halfpipe και slopestyle). Είναι σχετικά κοντές ώστε να διευκολύνουν την περιστροφή του αθλητή κατά τη διάρκεια μιας φιγούρας λόγω μικρότερης ροπής αδράνειας και πιο φαρδιές με σκοπό να είναι πιο σταθερές κατά την προσγείωση του άλματος. Οι σανίδες δεν έχουν αυστηρά καθορισμένο προφίλ (camber) και η επιλογή γίνεται με βάση την υποκειμενική γνώμη του κάθε αθλητή για το ποιο προφίλ τον βολεύει καλύτερα. Η ακτίνα ακμής (sidecut) και η ακαμψία τους είναι συνήθως μικρή για πιο εύκολες απότομες αλλαγές πορείας. Τέλος είναι συμμετρικά σχεδιασμένες και έτσι ο αθλητής μπορεί να κατευθυνθεί και προς της δύο μεριές με αντίστοιχη άνεση.

Freeride

Η σχεδίαση τους επιτρέπει τη βέλτιστη απόδοση σε απότομες πλαγιές με φυσικές συνθήκες χιονιού και ιδιαίτερα σε καταστάσεις με μεγάλα ύψη φρέσκου χιονιού, έτσι πρέπει να έχουν αυξημένη «πλευστότητα». αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης του μήκους της σανίδας και μέσω της ασύμμετρης γεωμετρίας - η μύτη της σανίδας είναι μεγαλύτερη από την ουρά της- ωστόσο αυτό οδηγεί στην δυσκολία κίνησης και προς της δύο κατευθύνσεις. Η ακτίνα ακμής είναι σχετικά μεγάλη και η ακαμψία σε κάμψη και στρέψη επίσης, για να ενισχύεται η σταθερότητα στις υψηλές ταχύτητες.

All- mountain

Οι χιονοσανίδες είναι μια μίξη μεταξύ των δύο προηγούμενων σανίδων σε σκοπό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις κατάβασης με αρκετά ικανοποιητικό τρόπο και γι’

αυτό και προτιμάται από τους περισσότερους αθλητές αναψυχής οι οποίοι είναι και το μεγαλύτερο μέρος των χρηστών των χιονοδρομικών κέντρων.

Κεφάλαιο 2 – Ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

2.1 Computer Aided Design - Computer Aided Engineering

Η αύξηση της χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους τομείς της μηχανολογίας έχει συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην πρόοδο της επιστήμης. Υπάρχει πλέον η δυνατότητα να σχεδιαστεί μια μηχανολογική κατασκευή αλλά και να μελετηθεί ως προς την στατική, δυναμική, θερμική συμπεριφορά της. Ελαχιστοποιώντας έτσι και το χρόνο αλλά και το κόστος ενός μηχανολογικού πρωτοτύπου.

Computer- Aided Design(CAD) είναι η σχεδίαση με τη χρήση Η/Υ που επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων. Τα προγράμματα CAD προσφέρουν ευκολία στο χρήστη μέσα από τις αυτοματοποιημένες εντολές τους, που ποικίλουν από απλά γεωμετρικά εργαλεία μέχρι διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών μέσω παρεμβολών. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει αλλαγές και διορθώσεις στο αρχικό του μοντέλο πολύ γρήγορα, κάτι που επηρεάζει θετικά το χρόνο βελτιστοποίησης μιας γεωμετρίας.

Computer- Aided Engineering (CAE) είναι αντίστοιχα η μελέτη της συμπεριφοράς ενός μοντέλου CAD και η επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων αρχικών τιμών πάνω σε αυτό. Οι προσομοιώσεις αυτές μπορεί να έχουν στατικό, δυναμικό, θερμοδυναμικό, ρευστομηχανικό ή κ.α. χαρακτήρα. Με τη βοήθεια του λογισμικού δημιουργείται ένα απλουστευμένο μοντέλο και μετά την εκτέλεση της ανάλυσης διαβάζονται τα αναμενόμενα αποτελέσματα είτε με τη μορφή πίνακα είτε κυρίως με οπτική απεικόνιση πάνω στο αρχικό μοντέλο. Στις περισσότερες περιπτώσεις για την εξαγωγή αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method – FEM).

Το βασικό όφελος που έχει ο συνδυασμός προγραμμάτων CAD και CAE η δυνατότητα αναγνώρισης και διόρθωσης τυχόν λαθών του σχεδιασμού πριν την κατασκευή πρωτοτύπου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται εκθετικά το συνολικό κόστος της παραγωγής του τελικού προϊόντος, αφού το συνήθως ιδιαίτερα δαπανηρό και χρονοβόρο στάδιο της κατασκευής πρωτοτύπων ελαχιστοποιείται.

2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Συνοπτική περιγραφή

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) διαχωρίζει την πραγματική κατασκευή σε συστατικά στοιχεία, τα οποία ενώνονται με πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Έτσι μπορεί να αποτελέσει φυσιολογική προσομοίωση ακόμα και για κατασκευές πολύπλοκης γεωμετρίας. Τα στοιχεία είναι τις περισσότερες φορές τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κορυφές τους αποτελούν συνήθως τους κόμβους της ανάλυσης. Η εξαγωγή του αποτελέσματος γίνεται μέσω αλγεβρικών εξισώσεων που με κριτήριο τη συνέχεια της κατασκευής και την εκπλήρωση των προκαθορισμένων από τον χρήστη αρχικών συνθηκών υπολογίζουν τους βαθμούς ελευθερίας του κάθε κόμβου. Κατά το διαχωρισμό σε στοιχεία δεν απαιτείται το πλέγμα να είναι ομοιόμορφο σε ολόκληρο το μοντέλο. Μπορούν δηλαδή συγκεκριμένες περιοχές να μελετηθούν με μεγάλη ακρίβεια ενώ άλλες όχι τόσο σημαντικές για την ανάλυση με μικρότερη ακρίβεια, ελαχιστοποιώντας έτσι τον απαιτούμενο χρόνο για την επίλυση. Προφανώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων για μια

συγκεκριμένη προσομοίωση αυξάνεται και η ακρίβεια του αποτελέσματος. Παράλληλα όμως μεγαλώνει ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος και η οι απαιτήσεις του προγράμματος σε υπολογιστική μνήμη.

2.3 Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

Η μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από τη δημιουργία της γεωμετρίας, το διαχωρισμό της μέσω κατάλληλου πλέγματος και τον καθορισμό των συνοριακών συνθηκών της προσομοίωσης. Σήμερα πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου προ-επεξεργαστή και έτσι μειώνεται ο χρόνος που απαιτείται σε σχέση με παλιότερα που ο μηχανικός έπρεπε να εισάγει όλα τα δεδομένα με γραμμές εντολών από αυτόνομο αρχείο δεδομένων.

Παράλληλα έχει βελτιωθεί και η ακρίβεια της μοντελοποίησης, αφού πλέον τα περισσότερα συστήματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων F.E.A (Finite Element Analysis) παρέχουν και δυνατότητα σχεδίασης CAD ή είναι αναπτυγμένα ώστε να συνεργάζονται με συγγενές πρόγραμμα CAD. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται το στάδιο της μετάφρασης κατά το οποίο είναι πιθανόν να υπάρξει απώλεια δεδομένων. Επίσης πέρα από το μεγάλο εύρος εργαλείων σχεδίασης και τη δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων γεωμετριών υπάρχει μεγάλη ευκολία γρήγορης διόρθωσης του μοντέλου - με βάση τα αποτελέσματα μιας αρχικής ανάλυσης- με αυτόματη προσαρμογή των δεδομένων για την επόμενη ανάλυση. Τέλος τα σύγχρονα συστήματα F.E.A. παρέχουν λειτουργίες αυτόματης βελτιστοποίησης της γεωμετρίας με σκοπό την ακριβέστερη αποτύπωση κατά τη δημιουργία του πλέγματος και λειτουργίες απλοποίησης της γεωμετρίας, δηλαδή απαλοιφής στοιχείων που δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα της ανάλυσης (όπως για παράδειγμα ένα fillet) αλλά μόνο επεκτείνουν το χρόνο που απαιτείται για αυτήν.

Μετά την οριστικοποίηση της γεωμετρίας ακολουθεί το στάδιο της δημιουργίας πλέγματος που είναι και το σημαντικότερο σε όλη τη διαδικασία. Για μεγαλύτερη ευκολία διαχωρισμού της γεωμετρίας σε κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία τα συστήματα F.E.A. παρέχουν εργαλεία αυτόματης δημιουργίας πλέγματος, με δυνατότητα καθορισμού βασικών παραμέτρων όπως το μέγεθος των στοιχείων και τοπικής εστίασης της ανάλυσης σε κρίσιμες περιοχές του μοντέλου. Τα στοιχεία που υποστηρίζει το κάθε σύστημα αποτελούν την βιβλιοθήκη στοιχείων

του και καθορίζουν ουσιαστικά το εύρος των προβλημάτων που μπορεί να λύσει. Όπως αναφέρθηκε προτιμάται η μεγαλύτερης ακρίβειας ανάλυση σε περιοχές του μοντέλου με απότομες μεταβολές σε σχέση με περιοχές που αναμένεται να έχουν προοδευτικές μεταβολές.

Η τοπική αύξηση της ακρίβειας γίνεται κατά την κλασική μορφή των πεπερασμένων στοιχείων (h-version) αυξάνοντας την πυκνότητα του πλέγματος με παράλληλη μείωση της μέσης διάστασης των στοιχείων. Έτσι μια συγκεκριμένη γεωμετρία διαχωρίζεται σε μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων. Αντίθετα στην r-version το απλούστερο πλέγμα παραμένει σταθερό και αλλάζει ο βαθμός των πολυωνυμικών συναρτήσεων μορφής δίνοντας τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ ακριβέστερης προσέγγισης του μοντέλου ή χαμηλότερου επιπέδου ακρίβειας για γρήγορα αποτελέσματα στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού.

Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί ο τύπος της ανάλυσης και οι οριακές συνθήκες της ανάλυσης. Τα συστήματα προσφέρουν επιλογές στατικών ή δυναμικών, γραμμικών ή μη γραμμικών, επίπεδων παραμορφωσιακών και άλλων αναλύσεων. Οι κόμβοι του πλέγματος συσχετίζονται με τους βαθμούς ελευθερίας που περιέχουν το αντίστοιχο ζητούμενο μέγεθος του προβλήματος (π.χ. μετατόπιση, περιστροφή, θερμοκρασία). Ο χρήστης εισάγει τις οριακές συνθήκες που αντιστοιχίζονται σε ένα σύνολο βαθμών ελευθερίας των επιλεγμένων κόμβων του πλέγματος. Όλα τα συστήματα έχουν εργαλεία εύκολου καθορισμού οριακών συνθηκών όπως φορτίσεων και στηρίξεων με δυνατότητα ορισμού τους πάνω γεωμετρία CAD και όχι απευθείας στους κόμβους του πλέγματος και σύστημα στη συνέχεια τις μετατρέπει αυτόματα σε οριακές συνθήκες στους αντίστοιχους κόμβους.

Τα στοιχεία του πλέγματος χαρακτηρίζονται τέλος με τις ιδιότητες συγκεκριμένου υλικού ανάλογα με το είδος της ανάλυσης. Τέτοιες βασικές ιδιότητες είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young, ο λόγος του Poisson, η ειδική θερμότητα, ο συντελεστής αγωγιμότητας, η λανθάνουσα θερμότητα, η ιξωδοελαστικότητα και άλλες.

Με το μοντέλο πλέον πλήρως καθορισμένο εκτελείται η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μέσα από τον μετα-επεξεργαστή (post-processor). Γίνεται απεικόνιση των παραμορφώσεων, τάσεων και η παραμορφωμένη γεωμετρία με χρωματική συνήθως κλίμακα, ενώ στην παρουσίαση προβλημάτων δυναμικής ανάλυσης

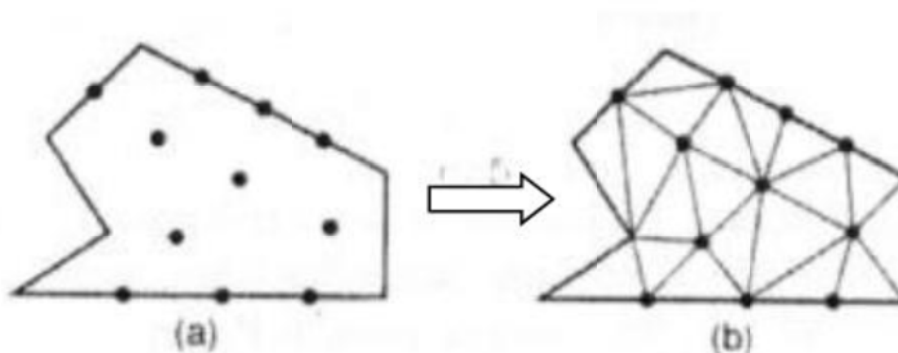
υπάρχει επιλογή χρήσης animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσον και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Πέραν της απεικόνισης παρέχονται και μέθοδοι καταλογοποίησης των αποτελεσμάτων.

2.4 Αυτόματη γένεση πλέγματος

Ο χρήστης με τη βοήθεια των μεθόδων αυτόματης γένεσης πλέγματος αρκεί μόνο να ορίσει το μοντέλο CAD, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος (πυκνότητα και τύπος στοιχείου) και τις οριακές συνθήκες. Σε κάποιες ημιαυτόματες μεθόδους απαιτούνται περαιτέρω ενέργειες, όπως διαχωρισμός του μοντέλου σε υποπεριοχές. Ο Ho-Le (1988). [11](K. Ho-Le, Finite element mesh generation methods: a review and classification, Computer-Aided Design, Volume 20, Issue 1, January–February 1988, Pages 27–38) ταξινόμησε τις μεθόδους γένεσης όπως αναφέρονται παρακάτω.

Μέθοδος σύνδεσης κόμβων (N.C.A. node connection approach)

Είναι πολύ διαδεδομένη γιατί είναι απλή στη σύλληψη της. Όπως φαίνεται στο σχήμα αρχικά δημιουργούνται οι κόμβοι (α) και στη συνέχεια ενώνονται καθορίζοντας τα στοιχεία της ανάλυσης



Εικόνα 2.1 Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

Οι μέθοδοι γένεσης κόμβων και στοιχείων που έχουν δημοσιευθεί αναφέρονται παρακάτω

Γένεση κόμβων

Μέθοδος του Cavendish (1974).

Μέθοδος του Shimada (1995).

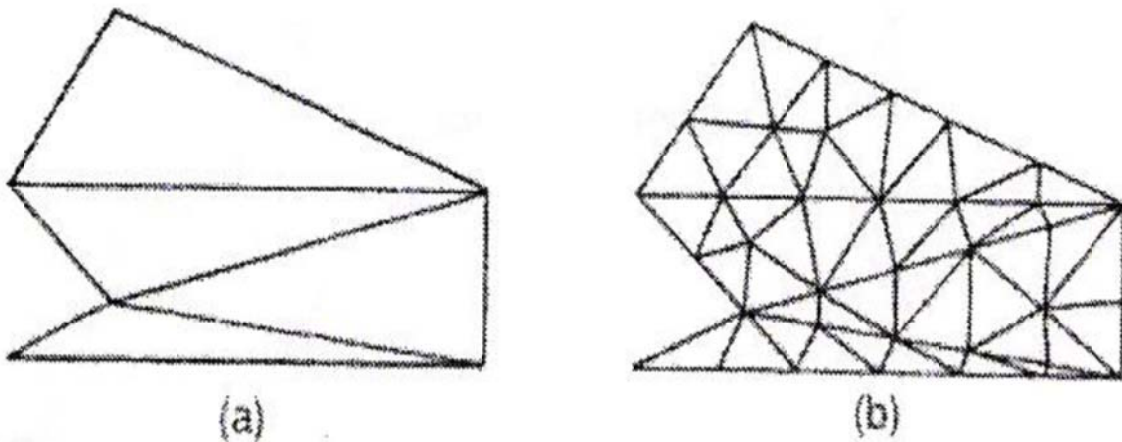
Γένεση στοιχείων

Μέθοδος Lee (1983)

Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay.

Μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (T.D.A. topology decomposition approach)

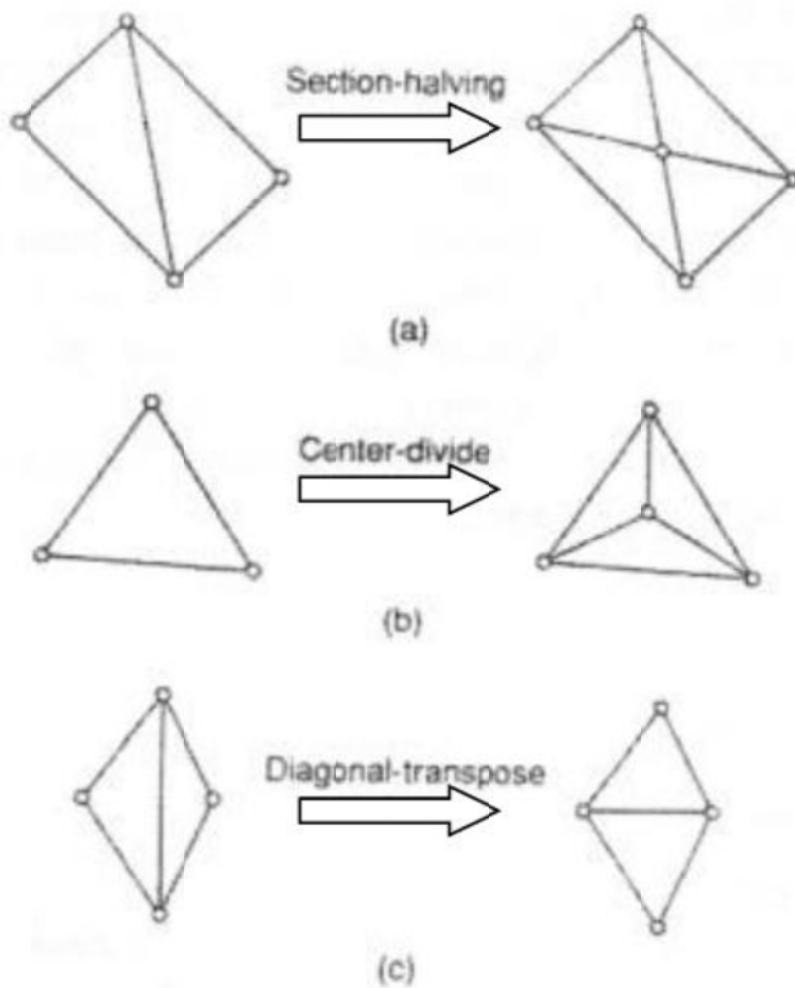
Με βάση αυτήν την προσέγγιση δισδιάστατων μοντέλων που αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984) ένα αρχικό πολύγωνο κατακερματίζεται σε μεγάλα τριγωνικά στοιχεία, τα οποία με τη σειρά τους διαχωρίζονται σε μικρότερα μέχρις ότου επιτευχθεί η καθορισμένη πυκνότητα του πλέγματος. Για τη δημιουργία των αρχικών τριγώνων από τις κορυφές του μοντέλου ο Wordenweber χρησιμοποίησε τους λεγόμενους τελεστές Euler, όπως χρησιμοποιούνται και στη μοντελοποίηση όγκων.



Εικόνα 2.2 Μοντελοποίηση όγκων

Για τον περαιτέρω διαχωρισμό των τριγώνων αυτών και τη δημιουργία του τελικού πλέγματος εφαρμόζονται οι τρεις μέθοδοι που ακολουθούν. Η πρώτη, που χρησιμοποιείται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους, προσθέτει ένα κόμβο πάνω σε αυτή και συνορεύοντα στοιχεία χωρίζονται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον καινούριο κόμβο. Κατά τη δεύτερη ένα μεγάλο στοιχείο υποδιαιρείται με τη βοήθεια νέου κόμβου στο κέντρο βάρους του. Τέλος τη τρίτη μέθοδος βελτιώνει την ποιότητα στοιχείων που είναι ήδη αρκετά μικρά για να διαχωριστούν, στρίβοντας τη διαγώνιο του τετράπλευρου που ορίζεται από δύο γειτονικά τρίγωνα.

Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomasma (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων.



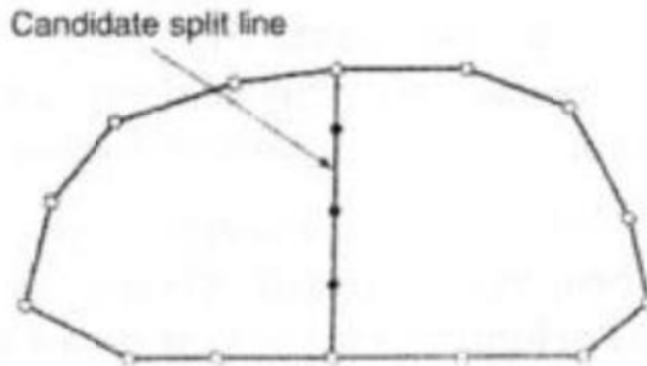
Εικόνα 2.3 Μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης

Μέθοδοι αποσύζευξης γεωμετρίας (G.D.A. geometry decomposition approaches)

Χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν αναδρομές ή επαναλήψεις και έχουν κι αυτές δυνατότητες επέκτασης στις τρεις διαστάσεις.

Οι μέθοδοι αναδρομικής αποσύζευξης διαιρούν το αρχικό μοντέλο σε κυρτά μέρη όπως περιγράφει ο Bykat (1976). Το σύνορο κάθε μέρους διαχωρίζεται από κόμβους με γνώμονα την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Ακολουθεί προσεγγιστική διαίρεση στη μέση του

μακρύτερου άξονα και στη διαχωριστική γραμμή εισάγονται κατάλληλα καινούριοι κόμβοι. Οι κόμβοι συνδέονται δημιουργώντας νέα μικρότερα στοιχεία και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθούν τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με το επιθυμητό μέγεθος.



Εικόνα 2.4 Μέθοδος αποσύζευξης γεωμετρίας

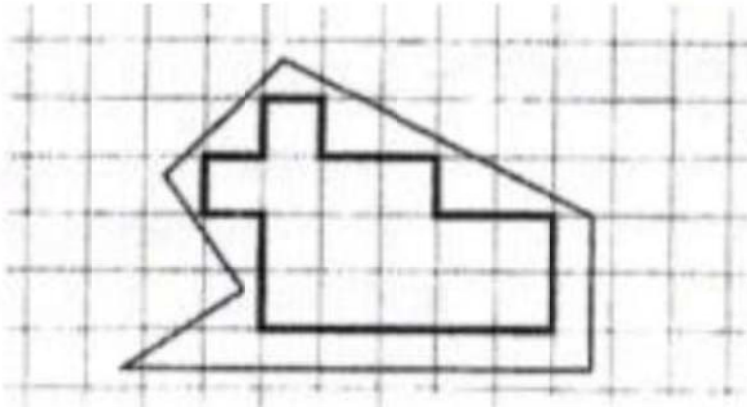
Άλλες μέθοδοι σταματούν τη διαίρεση όταν παραχθούν εξάγωνα ή οκτάγωνα στοιχεία και στη συνέχεια τα μετατρέπουν σε τριγωνικά ή τετραπλευρικά με βάσει προκαθορισμένα πρότυπα. Έτσι επιτυγχάνεται αύξηση του αριθμού των τριγώνων και τετραγώνων.

Η βασική μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο υπο-όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου, μέχρις ότου όλοι οι όγκοι περιορισθούν σε τετράεδρα. Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση όπου μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με απευθείας τρόπο. Ωστόσο, κάθε τετράεδρο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 εξάεδρα, ή στοιχεία brick, εάν είναι επιθυμητό. [19] A. Bykat, *Design of a recursive, shape controlling mesh generator*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 19, Issue 9, pages 1375–1390, September 1983

Μέθοδος βάσει πλέγματος (G.B.A. grid-based approach)

Προέκυψε από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και αν τα κελιά του κατά μήκος του συνόρου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία μπορεί να αποτελέσει πλέγμα. Στη μέθοδο των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) το αρχικό αντικείμενο διαχωρίζεται από

τριγωνικό grid δημιουργώντας σύνορο της μορφής zigzag. Τα σημεία του zigzag μετακινούνται μέχρι να συναντήσουν το πραγματικό σύνορο και να δημιουργηθεί το τελικό πλέγμα. Μια άλλη εφαρμογή αντί να μετακινήσει τα σημεία του zigzag δημιουργεί ανάμεσα σε αυτό και το πραγματικό σύνορο τριγωνικά στοιχεία μέσω αλγορίθμου τριγωνοποίησης.



Εικόνα 2.5 Μέθοδος βάσει πλέγματος

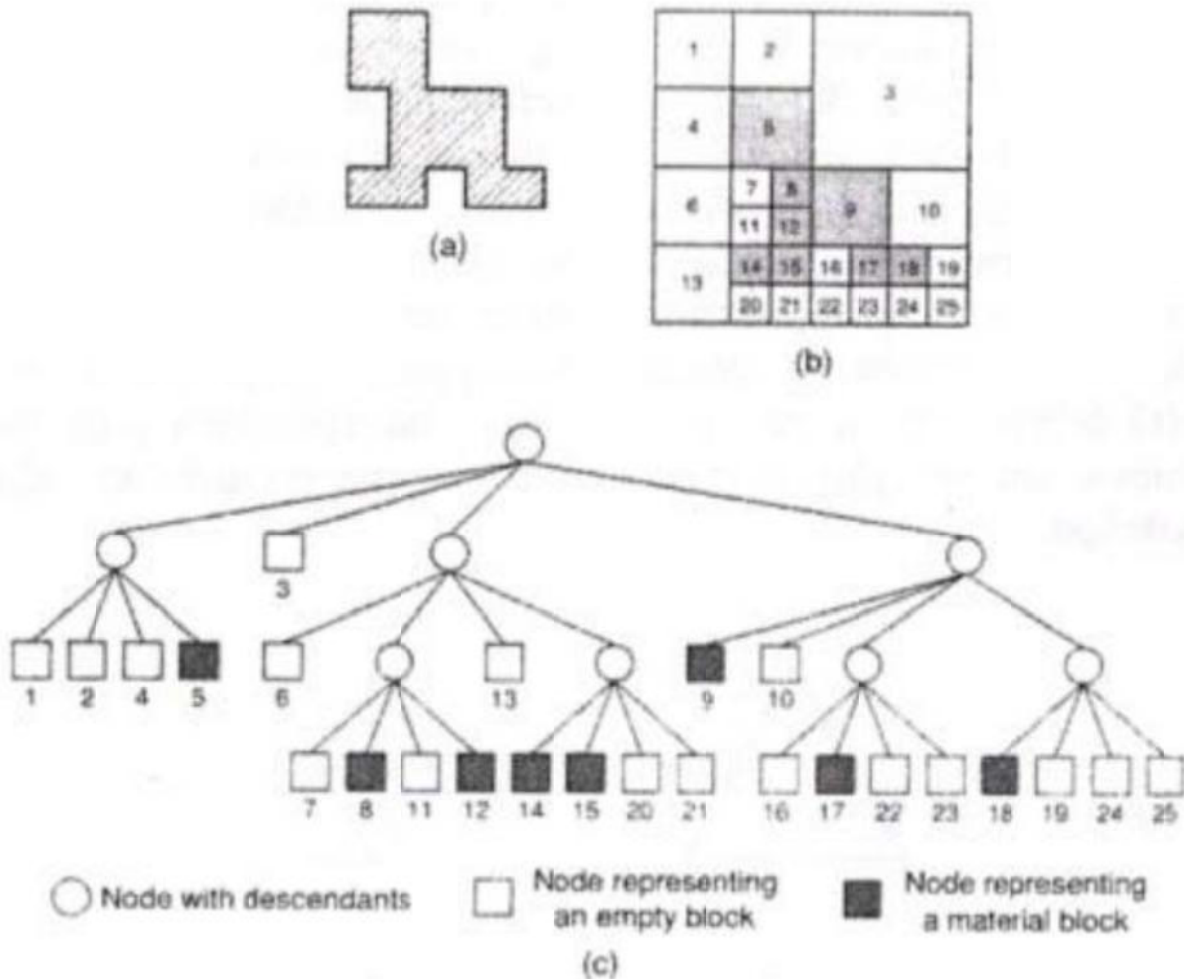
Οι Yerry και Shephard (1984) χρησιμοποίησαν μια δενδριτική (quadtree) αναπαράσταση του αντικείμενου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadtree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που περικλείει το αντικείμενο.

Τα πλέγματα γεννώνται ως εξής:

Βήμα 1: Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υπο-διαίρεται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικείμενου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός ("completely inside") αντικείμενου ή επικαλύπτονται ("overlapping").

Βήμα 2: Κάθε τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαίρεται ώστε να ικανοποιήσει την

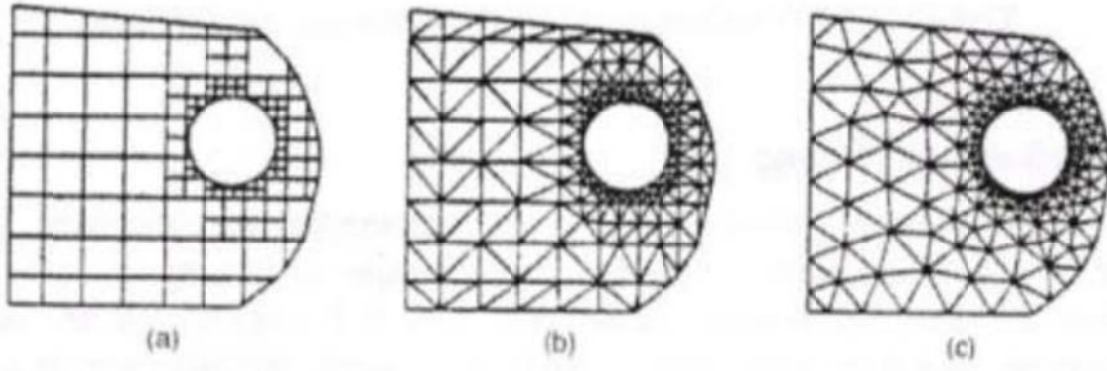
προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming) εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία).



Εικόνα 2.6 Αναπαράσταση τετραδικού δέντρου

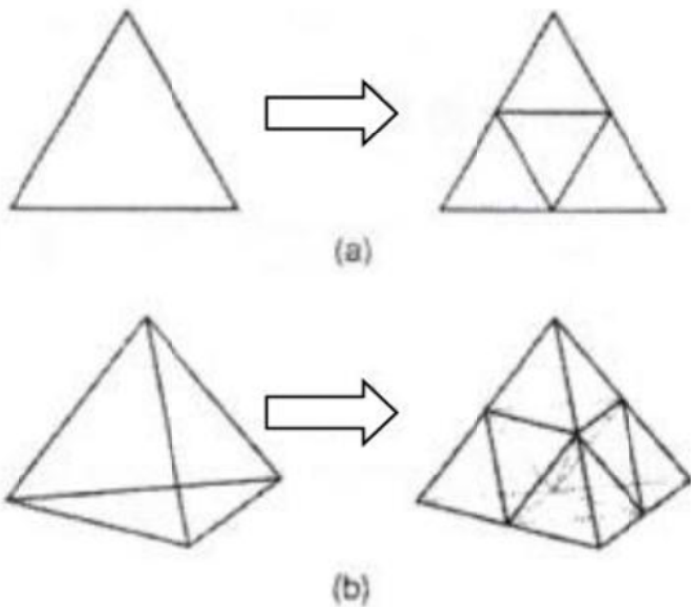
Βήμα 3: Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment) έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνον τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάται σε τετράεδρα όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν την

συμβιβαστότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.



Εικόνα 2.7 Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree

Οι Jung και Lee (1996) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβικής ρίζας) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων. Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Έτσι μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου.



Εικόνα 2.8 Υποδιαίρεση τριγώνου και τετράεδρου

Μέθοδος απεικόνισης

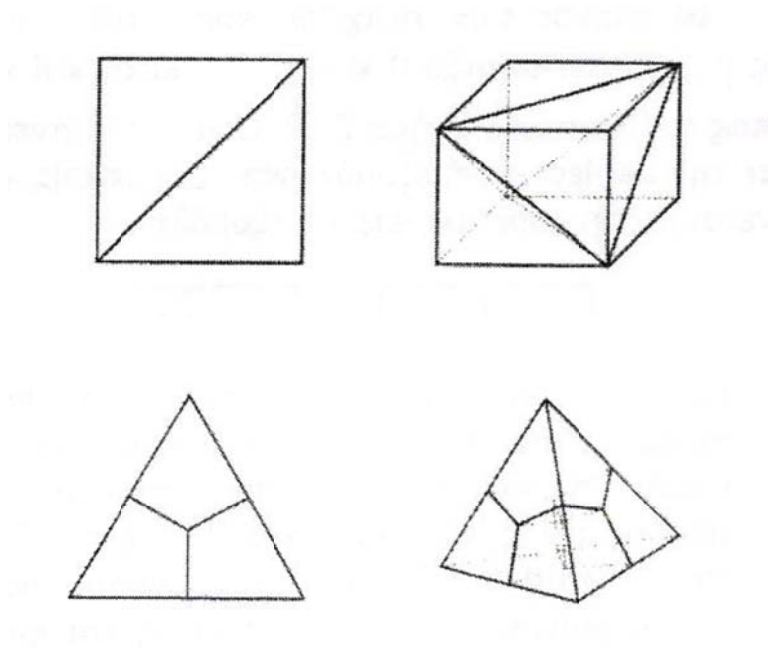
Χρησιμοποιείται από τις περισσότερες εμπορικές εφαρμογές δημιουργίας πλέγματος και απαιτεί την υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποπεριοχές ειδικής τοπολογίας. Για την κάθε περιοχή δημιουργείται αυτόματα πλέγμα με απεικόνιση προς κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς και διακριτοποίηση του κανονικού χωρίου με γνώμονα την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Στη συνέχεια απεικονίζεται αντίστροφα το κανονικό χωρίο προς την αρχική επιφάνεια του αντικειμένου. Οι διαφορετικές περιοχές του αντικειμένου ενώνονται και το ενιαίο πλέγμα προκύπτει έτσι ώστε να ικανοποιείται το συμβιβαστό του πλέγματος στις κοινές πλευρές των περιοχών. Τέτοιες τυπικές μέθοδοι είναι η απεικόνιση με παρεμβολή Coons και η ισοπαραμετρική απεικόνιση.

Βελτίωση ποιότητας πλέγματος

Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος, κυρίως εκείνες που βασίζονται στην προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα επαρκές για την περαιτέρω

ανάλυση. Έτσι, πρέπει να ακολουθήσουμε μια πορεία τριών βημάτων ώστε να το βελτιώσουμε:

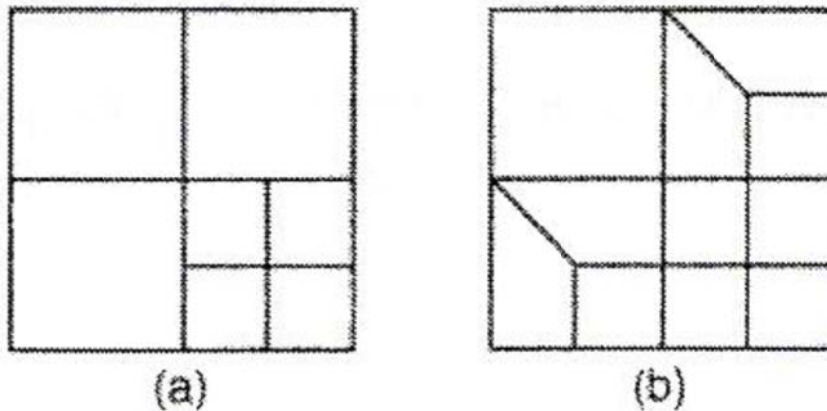
Μετατροπή τύπου στοιχείων: ένα τα στοιχεία του πλέγματος δεν είναι του επιθυμητού τύπου, μετασχηματίζονται σε άλλου τύπου. Τα τετραπλευρικά και εξαεδρικά στοιχεία μετατρέπονται εύκολα σε τρίγωνα και τετράεδρα, ενώ τα τρίγωνα και τετράεδρα σε τετράπλευρα και εξάεδρα. Στη δεύτερη μετατροπή τα στοιχεία ενδέχεται να μην είναι καλοσχηματισμένα γιατί οι γωνίες γύρω από τους καινούριους κόμβους είναι συχνά μεγάλες.



Εικόνα 2.9 Μετατροπή τριγώνου και τετραγώνου σε bricks

Εκλέπτυνση πλεγμάτων: Στοιχεία του πλέγματος διαιρούνται μόνο όταν το μέγεθος τους είναι μεγαλύτερο του ζητούμενου. Έτσι μπορεί να παραβιαστεί η συμβατότητα μεταξύ γειτονικών στοιχείων. Για τριγωνικά στοιχεία η συμβατότητα προκύπτει με απλή διχοτόμηση της

μεγαλύτερης ακμής, ωστόσο για τετραπλευρικά η λύση δεν είναι τόσο εύκολη.



Εικόνα 2.10 Τροποποίηση μη συμβατικών πλεγμάτων

Εξομάλυνση πλέγματος: Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εξομάλυνσης για μη καλοσηματισμένα στοιχεία είναι η εξομάλυνση Laplace. Επανατοποθετεί τους κόμβους έτσι ώστε κάθε εσωτερικός κόμβος να βρίσκεται στο κέντρο βάρους ενός μεγαλύτερου πολυγώνου. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται συνήθως επαναληπτική διαδικασία ενώ δεν είναι πάντοτε εγγυημένο το καλό αποτέλεσμα της διαδικασίας.

2.5 Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιήσουμε τον τρόπο ανάλυσης, στη συνέχεια θα δώσουμε κάποιες γενικές κατευθύνσεις. Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Για παράδειγμα, ελαστική ανάλυση (elastic analysis) ή πρόβλημα δυναμικού (potential problem). Τα προβλήματα δυναμικού αφορούν την επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson που διέπουν τη μηχανική ατρίβους ρευστού, μετάδοση θερμότητας, κοκ. Μια δεύτερη επιλογή που καλείται να κάνει ο μελετητής είναι ο καθορισμός του προβλήματος σαν: Στατικό πρόβλημα (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή Δυναμικό πρόβλημα (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο.

Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ. Μια άλλη κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) ή μη-γραμμικό (nonlinear)

Γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων) τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά.

Μη γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγούμενα. Σε «ελαστικά» προβλήματα η μη-γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.[9]

2.6 Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία διακρίνουμε τα ακόλουθα στάδια:

1ο Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

2ο Στάδιο → Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.

3ο Στάδιο → Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (μπορεί να γίνει και σε προηγούμενο στάδιο) και επιβολή των οριακών συνθηκών.

4ο Στάδιο → Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό – μη γραμμικό μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

5ο Στάδιο → Αναγνώριση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράσταση αυτών.

Κεφάλαιο 3 - Σύνθετα Υλικά

3.1 Ορισμός

Σύνθετα υλικά ονομάζονται εκείνα τα οποία αποτελούνται από επιμέρους συστατικά με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Το αποτέλεσμα της σύνθεσης είναι ένα υλικό με άλλα χαρακτηριστικά από αυτά των αρχικών υλικών. Το πρώτο μέρος ενός σύνθετου υλικού είναι αυτό που ευθύνεται για την ενίσχυση της δομής και τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς και χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης, ενώ το δεύτερο είναι το οποίο είναι χαμηλής πυκνότητας, χρησιμοποιείται με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του συστατικού ενίσχυσης.

Για να θεωρηθεί ένα υλικό σύνθετο θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του ενός συστατικού να είναι τουλάχιστον 5πλασια από του άλλου αλλά και η περιεκτικότητα του να μην είναι πολύ μικρή. Ο Agarwal (1990) όρισε τα σύνθετα ως τα υλικά τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Το μειωμένο βάρος, οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, το χαμηλό κόστος συντήρησης αλλά και η εύκολη διαδικασία παραγωγής έχουν οδηγήσει στην εξάπλωση της χρήσης σύνθετων υλικών και στην ανάδειξή τους σαν ένα από τα κύρια κατασκευαστικά υλικά σε πλήθος εφαρμογών. Παράλληλα με την συνεχή έρευνα στον συγκεκριμένο τομέα αντιμετωπίζονται όλο και πιο αποτελεσματικά τα μειονεκτήματά τους, όπως το υψηλό επίπεδο ερπυσμού και η αλλαγή συμπεριφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες ή θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς αναπτύσσονται καλύτερα υλικά ενίσχυσης αλλά και μήτρας.

3.2 Ιστορική εξέλιξη

Εδώ και χιλιάδες χρόνια ο άνθρωπος συνδυάζει διαφορετικά μεταξύ τους φυσικά υλικά για να δημιουργήσει βελτιωμένα υλικά που να εκπληρώνουν τις εκάστοτε ανάγκες του. Τέτοια υλικά

ήταν αρχικά το ξύλο, ο πηλός και η πέτρα με χαρακτηριστικό παράδειγμα αρχαίου σύνθετου υλικού το μείγμα πηλού με άχυρο.

Αντίστοιχο παράδειγμα είναι οι πολυστρωματικές βέργες ξύλου που χρησιμοποιούνταν στην Αίγυπτο για το λόγο ότι παρουσίαζαν μικρότερη στρέβλωση και απορρόφηση υγρασίας από ότι ένα συνεχές κομμάτι φυσικού ξύλου. Στη Μεσοποταμία βερνίκωναν τα τούβλα και τα πλακίδια με σκοπό να αποφευχθεί η επιφανειακή φθορά τους, ενώ σε πολλούς αναπτυσσόμενους πολιτισμούς συναντάμε σύνθετα υλικά από γύψο και ζωικό τρίχωμα με αποτέλεσμα την ενίσχυση του εύθραυστου αρχικά γύψου.

Η πρώτη εμφάνιση σύνθετου υλικού με πλαστική μήτρα γίνεται στις αρχές του 20^{ου} αιώνα σαν μείγμα λεπτών ινών ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη. Εμπνευστής του υλικού που έγινε γνωστό με το όνομα βακελίτης ήταν ο Βέλγος ερευνητής Leo Baekland. Ωστόσο ραγδαία ανάπτυξη στον κλάδο των σύνθετων υλικών σημειώθηκε κυρίως τα τελευταία 40 χρόνια. Η, μέχρι πρότινος αδύνατη, παραγωγή ινών γυαλιού με ιδιαίτερα υψηλή αντοχή και ινών βορίου (1960) με υψηλή ακαμψία αποτέλεσε τροχοπέδη για την δημιουργία υλικών με καλύτερη απόδοση και μειωμένο βάρος, κάτι που ήταν κύριο ζητούμενο για την αεροδιαστημική βιομηχανία της εποχής.

Οι ίνες άνθρακα που σήμερα αποτελούν πολύ βασικό υλικό ενίσχυσης στις αεροδιαστημικές κατασκευές εμφανίζονται αρχικά το 1964, ενώ οι ίνες αραμιδίου που συναντώνται στα ελαστικά αυτοκινήτων άρχισαν να διατίθενται στο εμπόριο μετά το 1970.

Σε αυτό το διάστημα των τελευταίων 40 χρόνων οι ιδιότητες των ινών ενίσχυσης, όπως η ειδική αντοχή (αντοχή/ πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (δυσκαμψία/ πυκνότητα) ολοένα και βελτιώνονται. Τα παραγόμενα υλικά χρησιμοποιούνται σε συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών και έχουν καθορίσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις διαδικασίες σχεδίασης και παραγωγής.

3.3 Κατηγορίες σύνθετων υλικών

3.3.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites)

Στα υλικά αυτά, που ονομάζονται και κοκκώδη, η ενίσχυση γίνεται μέσω κόκκων ενός υλικού σε μήτρα ενός άλλου. Ανάλογα με το είδος των υλικών προκύπτουν οι παρακάτω κατηγορίες.

Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα

Το πιο διαδεδομένο παράδειγμα τέτοιου υλικού είναι το σκυρόδεμα, όπου κόκκοι άμμου και πέτρας αναμειγνύονται με τσιμέντο και νερό το οποίο μετά από χημική αντίδραση σκληραίνει. Έτσι το τελικό προϊόν παρουσιάζει αυξημένη αντοχή λόγω της παρουσίας των κόκκων πέτρας.

Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα

Τέτοια υλικά κατασκευάζονται ως λύση στο πρόβλημα της αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας και της μείωσης φθοράς της μήτρας. Η μεταλλική σκόνη εγκλείεται για παράδειγμα σε θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη και έτσι δημιουργείται ένα σύνθετο υλικό πιο ανθεκτικό και με μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας από ότι η ρητίνη.

Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα

Η τεχνική χρησιμοποιείται με μέταλλα με επιθυμητές ιδιότητες τα οποία όμως είναι εύθραυστα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, π.χ. χρώμιο, βολφράμιο. Χρησιμοποιώντας τα ως κοκκώδες έγκλεισμα σε μήτρα όλκιμων μετάλλων επιτυγχάνεται η παραγωγή ενός σύνθετου υλικού που είναι όλκιμο αλλά παρουσιάζει κάποιες από τις επιθυμητές ιδιότητες του υλικού ενίσχυσης.

Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα

Ονομάζονται και κεραμομέταλλα και χωρίζονται σε δύο είδη ανάλογα με το υλικό του εγκλείσματος. Τα κεραμομέταλλα με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου σε μήτρα άλλου μετάλλου, που επιτυγχάνουν την απαιτούμενη αντίσταση σε διάβρωση κατά τις εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και τα κεραμομέταλλα με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου σε μεταλλική μήτρα που μπορούν ανάλογα με τη φύση του εγκλείσματος να παρουσιάσουν αυξημένη σκληρότητα και αντοχή. Επίσης χρησιμοποιούνται ως ράβδοι ελέγχου αλλά και ως καύσιμα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.

3.3.2 Στρωματικά σύνθετα υλικά

Αποτελούνται από φύλλα διαφορετικών υλικών των οποίων ο συνδυασμός δίνει στο τελικό σύνθετο υλικό τη ζητούμενη ιδιότητα όπως αντοχή, ακαμψία, αντίσταση στη διάβρωση ή τη φθορά και άλλα. Κυριότερα είδη τέτοιων υλικών είναι

Διμέταλλα

Συνδεδεμένα φύλλα μετάλλων με διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής δημιουργούν ένα υλικό το οποίο κάμπτεται με προβλεπόμενο τρόπο στην αλλαγή της θερμοκρασίας. Έτσι τα είναι δυνατή η χρήση τους σε εφαρμογές μέτρησης θερμοκρασίας.

Επιμεταλλωμένα μέταλλα

Ένα μέταλλο επικαλύπτεται με ένα άλλο έτσι ώστε να παραχθεί ένα υλικό που παρουσιάζει συνδυασμό των ιδιοτήτων των συστατικών

Ύαλος ασφαλείας

Μια στρώση πλαστικού συμπιέζεται ανάμεσα σε φύλλα γυαλιού και έτσι εκμεταλλευόμεστε την ανθεκτικότητα και την δυνατότητα διατήρησης της διαφάνειας του γυαλιού, ενώ παράλληλα το πλαστικό προκαλεί μείωση της ψαθυρότητας στο σύνθετο υλικό.

Υλικά με επίστρωση πλαστικού

Η επίστρωση διάφορων υλικών με πλαστικά είναι μια άλλη μέθοδος βελτίωσης των ιδιοτήτων τους. Για παράδειγμα στρώματα γυαλιού ή αμιάντου μετά την επίστρωση με σιλικόνη αποκτούν πυριμαχικές ιδιότητες.

3.3.3 Ινώδη σύνθετα υλικά

Στην περίπτωση αυτή η ενίσχυση γίνεται μέσω του εγκλεισμού ινών ενός υλικού σε μήτρα ενός άλλου φυσικού ή μη. Ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο των ινών είναι πολύ μεγάλος και σε πολλές περιπτώσεις η ακαμψία και η ανθεκτικότητα τους μεγαλύτερες από αυτές που παρουσιάζει το αντίστοιχο υλικό στη συνήθη μορφή του. Συνεπώς η γεωμετρία των ινών παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων της. Ο λόγος για τον οποίο οι ίνες έχουν καλύτερες ιδιότητες απ' ό,τι το αντίστοιχο υλικό οφείλεται στην ευθυγράμμιση των κρυστάλλων κατά τον διαμήκη άξονα της, γεγονός που οδηγεί σε μια καλύτερη δομή με λιγότερες ατέλειες.

Ανάλογα με το μήκος τους οι ίνες διακρίνονται σε:

Ίνες μεγάλου μήκους

Ο λόγος μήκους προς διάμετρο σε αυτή την περίπτωση είναι εξαιρετικά μεγάλος και η διάμετρος σε πολλές περιπτώσεις είναι τις ίδιας τάξης μεγέθους με τους κρυστάλλους του υλικού. Τέτοιες ίνες χαρακτηρίζονται από σχεδόν τέλεια δομή στο εσωτερικό τους με αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής ακαμψίας και της ειδικής αντοχής και γι' αυτό η χρήση τους είναι ιδιαίτερα συχνή σε κατασκευές που το συνολικό βάρος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο όπως αεροπλάνα, διαστημόπλοια κ.α.. Οι μακριές ίνες γυαλιού του εμπορίου, για παράδειγμα, έχουν αντοχή θραύσεως μεταξύ 2.8 και 4.8 GPa ενώ αυτές εργαστηριακής

παραγωγής μπορεί να φτάσουν και τα 7 GPa. Τα φύλλα γυαλιού λόγω της τυχαία εσωτερικής δομής τους έχουν τάση θραύσεως μόλις της τάξεως των μερικών MPa.

Ίνες μικρού μήκους

Λόγω του περιορισμένου μήκους τους οι ασυνέχειες στη δομή τους είναι ακόμα λιγότερες και έτσι τα χαρακτηριστικά τους πλησιάζουν τις θεωρητικές τιμές και ξεπερνούν κατά πολύ αυτά του αντίστοιχου υλικού στην συμβατική του μορφή.

3.4 Μήτρες

Όπως το υλικό ενίσχυσης συνεισφέρει στην αύξηση της αντοχής του σύνθετου, η μήτρα εξασφαλίζει την διατήρηση της δομής και των ιδιοτήτων του. Προστατεύει της είναι από τυχόν δυσμενές περιβάλλον, διανέμει της τάσεις προς τις ίνες, παραλαμβάνει τις διατμητικές τάσεις μεταξύ των στρώσεων του σύνθετου, αποτρέπει την διάδοση ρωγμών. Για να μπορεί να λειτουργεί με αυτόν τον τρόπο πρέπει να παρουσιάζει ολκιμότητα, ευκαμψία, ανθεκτικότητα και να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις αλλαγές θερμοκρασίας. Σημαντικός παράγοντας για τη αποτελεσματική κατασκευή ενός σύνθετου υλικού είναι η μέγιστη πρόσφυση μεταξύ ινών και μήτρας.

Οι μήτρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το υλικό τους:

Οργανικές (Polymer Matrix)

A) Θερμοπλαστικές, οι οποίες αποτελούνται από γραμμικές αλυσίδες πολυμερών με ασθενείς ωστόσο συνδέσεις μεταξύ τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει το υλικό κάνοντάς το πιο μαλακό, με αντιστρεπτή όμως διαδικασία. Έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής και έτσι χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ενισχυτικά αντίστοιχου κόστους σε πολλές εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS).

B) Θερμοσκληρυνόμενες, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις ως προς τις μηχανικές ιδιότητες. Η τρισδιάστατη δομή πλέγματος και οι ισχυροί δεσμοί μεταξύ των μοριακών αλυσίδων που πληθαίνουν με την αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργούν σκληρότερα και ψαθυρότερα σύνθετα υλικά. Κλασικά παραδείγματα τέτοιων μητρών είναι οι πολυεστερικές, οι εποξειδικές και οι φαινολικές ρητίνες.

Μεταλλικές μήτρες

Είναι απαραίτητες στις εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες ανώτερες των 500 βαθμών Κελσίου, τη στιγμή που οι οργανικές έχουν όριο περίπου τους 300. Οι μεταλλικές μήτρες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, μπορούν να παραλάβουν καλύτερα τα φορτία που αδυνατούν να παραλάβουν οι ίνες λόγω προσανατολισμού, μεγαλύτερη αντοχή σε συνθήκες δυσμενούς περιβάλλοντος και αυξημένη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επίσης τεμάχια σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας μπορούν να συνδεθούν εύκολα με συγκόλληση. Από την άλλη όμως παρατηρείται εύκολη αποκόλληση των ινών από τη μήτρα και ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού στο όριο διαρροής της μήτρας, ενώ παράλληλα τα σύνθετα έχουν μεγαλύτερο βάρος και η διαδικασία παραγωγής τους είναι ακριβότερη.

Κεραμικές μήτρες

Τα κεραμικά υλικά σκληρά με μεγάλη στιβαρότητας και αντοχή στη διάβρωση και τη χημική προσβολή. Η ενίσχυση τέτοιων υλικών αποσκοπεί κυρίως στην καλύτερη αντοχή της μήτρας στις απότομες θερμικές μεταβολές και τις μηχανικές καταπονήσεις. Η μεγάλη διαφορά των συντελεστών διαστολής της μήτρας και των ενισχυτικών ινών προκαλούν σημαντικό πρόβλημα συνάφειας μεταξύ τους.

Από τα πιο διαδεδομένα και ευρέως χρησιμοποιούμενα σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα στις οικοδομικές κατασκευές, όπου τσιμέντο ενισχύεται με χάλυβα καθώς και οι κατασκευές από μήτρα γύψου και ενίσχυση ινών γυαλιού.

3.5 Ίνες γυαλιού

Η βιομηχανική παραγωγή υάλινων ινών ξεκίνησε το 1930 με σκοπό τη χρήση σε φίλτρα και μονώσεις. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε πάνω από το 90% των σύνθετων πολυμερών. Προκειμένου να προσφέρουν ικανοποιητική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται με γνώμονα την υψηλή στιβαρότητα, τη χαμηλή πυκνότητα και τη μεγάλη τάση θραύσεως.

Οι ίνες γυαλιού ήταν οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν σε σύγχρονα σύνθετα υλικά (1940) και σήμερα ανήκουν στην κατηγορία των πιο φθηνών υλικών ενίσχυσης. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση χωρίζονται στους τύπους E, R και S.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

Εικόνα 3.1 Πίνακας ιδιοτήτων υαλονημάτων

E-glass (E=electrical):

Είναι τα υαλονήματα με την πιο συχνή χρήση με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία καθώς και καλή συμπεριφορά στις θερμοκρασιακές αλλαγές και στην υγρασία. Βασικό μειονέκτημά τους είναι η μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

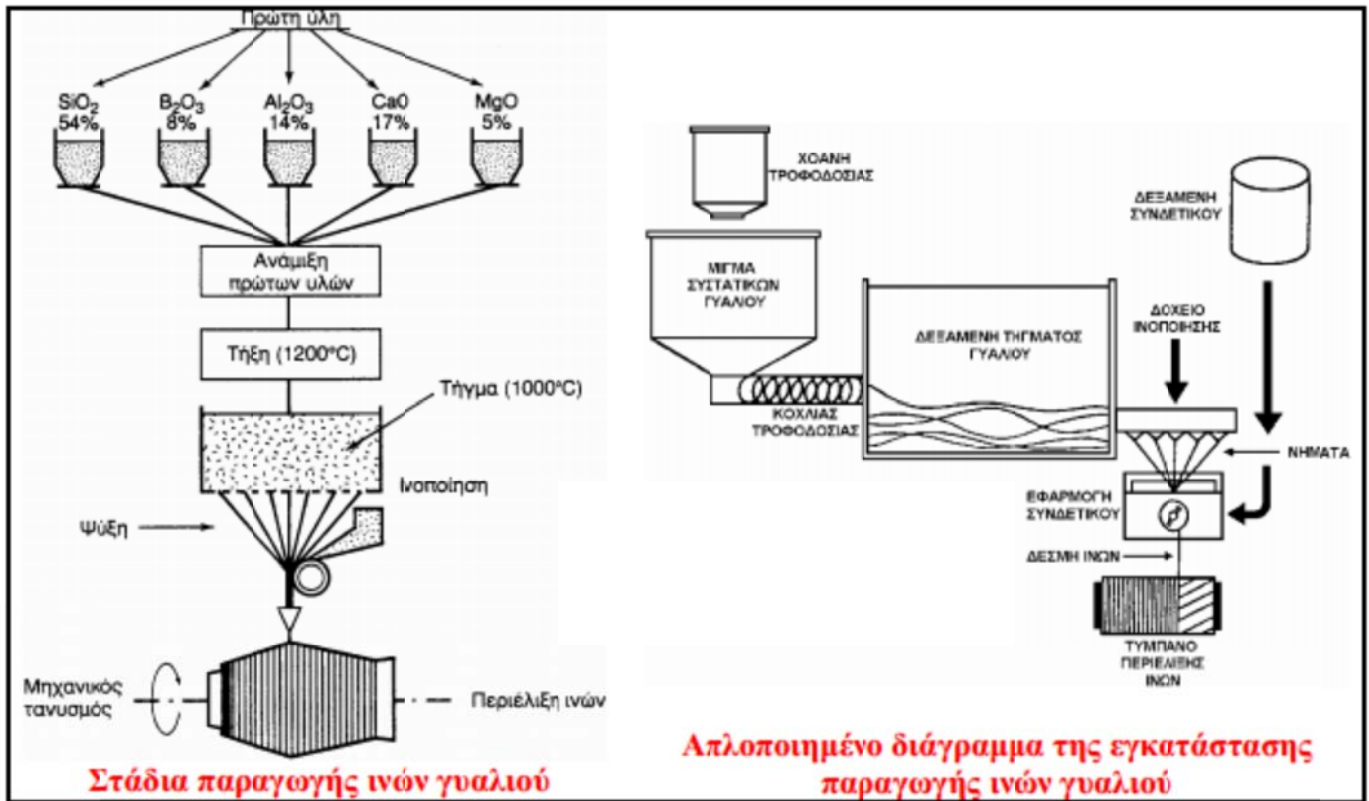
C-glass (c=corrosion): Παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση και καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά από αυτά των ινών E, για αυτό το λόγο είναι και ακριβότερες.

S-glass (S=stiffness):

Το ακριβότερο από τα τρία είδη και με μεγαλύτερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Λόγω των βελτιωμένων χαρακτηριστικών του χρησιμοποιείται σε εφαρμογές στην αεροπορική βιομηχανία.

Το κυριότερο πρόβλημα των ινών γυαλιού είναι η μεγάλη ευαισθησία σε χαράξεις και γρατζουνιές. Προκαλούνται στην επιφάνειά τους περιοχές συγκέντρωσης τάσεων και ακολουθεί η ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Οι ίνες παράγονται με διέλαση τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα. Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή και στη συνέχεια το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητους πυθμένες μεγέθους οπών 1-2 mm. Λόγω βαρύτητας το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές και οι παραγόμενες ίνες εξολκεύονται μέχρι τελικής διαμέτρου 1-15μm. Μετά την ψύξη τους με ελαφρό ψεκασμό νερού οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που τις επικαλύπτει με προστατευτικό λιπαντικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizers) που προστατεύουν και βελτιώνουν την πρόσφυση μεταξύ μήτρας και ινών. Τέλος οι ίνες περιτυλίγονται ανά δέσμες γύρω από κυλινδρικό τύμπανο που περιστρέφεται με ταχύτητες της τάξης των 50 m/s και τα ρολά που δημιουργούνται υφίστανται ξήρανση πριν από οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφοποίησης τους.



Εικόνα 3.2 Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου E

Εφαρμογές σύνθετων ενισχυμένων με ίνες γυαλιού:

Ναυπηγική: Σε αυτόν τον τομέα τα σύνθετα με ενίσχυση υαλονημάτων έχουν αντικαταστήσει σχεδόν καθολικά τα παραδοσιακά υλικά όπως το ξύλο. Η χαμηλή πυκνότητα η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η δυνατότητα χύτευσης ολόκληρων τμημάτων σκαφών σε καλούπια διευκόλυναν την ανάπτυξη μικρών βιομηχανιών παραγωγής σκαφών αναψυχής. Επίσης με την χρήση τέτοιων υλικών ελαχιστοποιήθηκε και το κόστος της επισκευής και της συντήρησης των σκαφών.

Οικοδομές: Μεγάλες ποσότητες σύνθετων υλικών γυαλιού χρησιμοποιούνται υπό μορφή επίπεδων ή καμπύλων ημιδιάφανων επιφανειών για την κατασκευή ορόφων ή θόλων σε μεγάλα οικοδομικά έργα όπως για παράδειγμα τα σκέπαστρα σταδίων. Λόγω του μικρού τους

βάρους διευκολύνουν οικονομικά το σχεδιασμό και την παραγωγή των στοιχείων υποστήριξης τους.

Μεταφορές: Οι χερσαίες μεταφορές είναι ακόμα ένας τομέας με σημαντική χρήση ενισχυμένων πλαστικών με υαλονήματα αφού η μείωση του βάρους που προκαλούν οδηγεί στη εξοικονόμηση καυσίμων. Μερικά παραδείγματα είναι οι καμπίνες των φορτηγών και οι προφυλακτήρες πολλών αυτοκινήτων ιδιωτικής χρήσης με την εφαρμογή τους στην κατασκευή αμαξωμάτων να περιορίζεται για την ώρα στα αγωνιστικά αυτοκίνητα. Πέραν αυτού χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή αμαξοστοιχιών σιδηροδρόμων με έμφαση κατά το σχεδιασμό στην αύξηση της αντοχής σε περιπτώσεις κρούσεων μεγάλης ενέργειας.

Ηλεκτρικά είδη: Οι ίνες γυαλιού παράγονται σε διάφορους τύπους . Ένας από αυτούς τους τύπους ινών γυαλιού είναι και ο τύπος E-glass όπου το πρόθεμα E αναφέρεται στον όρο Electrical. Αυτός ο τύπος γυαλιού έχει κατασκευαστεί ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές και ιδιαίτερα εκεί που απαιτείται ηλεκτρική μόνωση. Όταν αναμειχθεί με πλαστική μήτρα ,μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος που είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Παραδείγματα είναι οι ηλεκτρικοί διακόπτες, οι ηλεκτρικοί διανομείς ,οι υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων και άλλα προϊόντα .

3.6 Ίνες από άνθρακα και γραφίτη (Carbon and graphite fibers)

Οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη είναι το βασικό μέσο ενίσχυσης σύνθετων υλικών σε εφαρμογές σύνθετης γεωμετρίας με χαμηλό συνολικό βάρος αλλά με υψηλές απαιτήσεις σε μηχανικές ιδιότητες. Τέτοιες ίνες, παρά τις πολλές διαφορετικές εκδοχές τους, χαρακτηρίζονται σε γενικές γραμμές από μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό και υψηλό μέτρο ελαστικότητας ενώ παράλληλα παρουσιάζουν αντίσταση στη διάβρωση και εξαιρετικά χαρακτηριστικά κόπωσης.

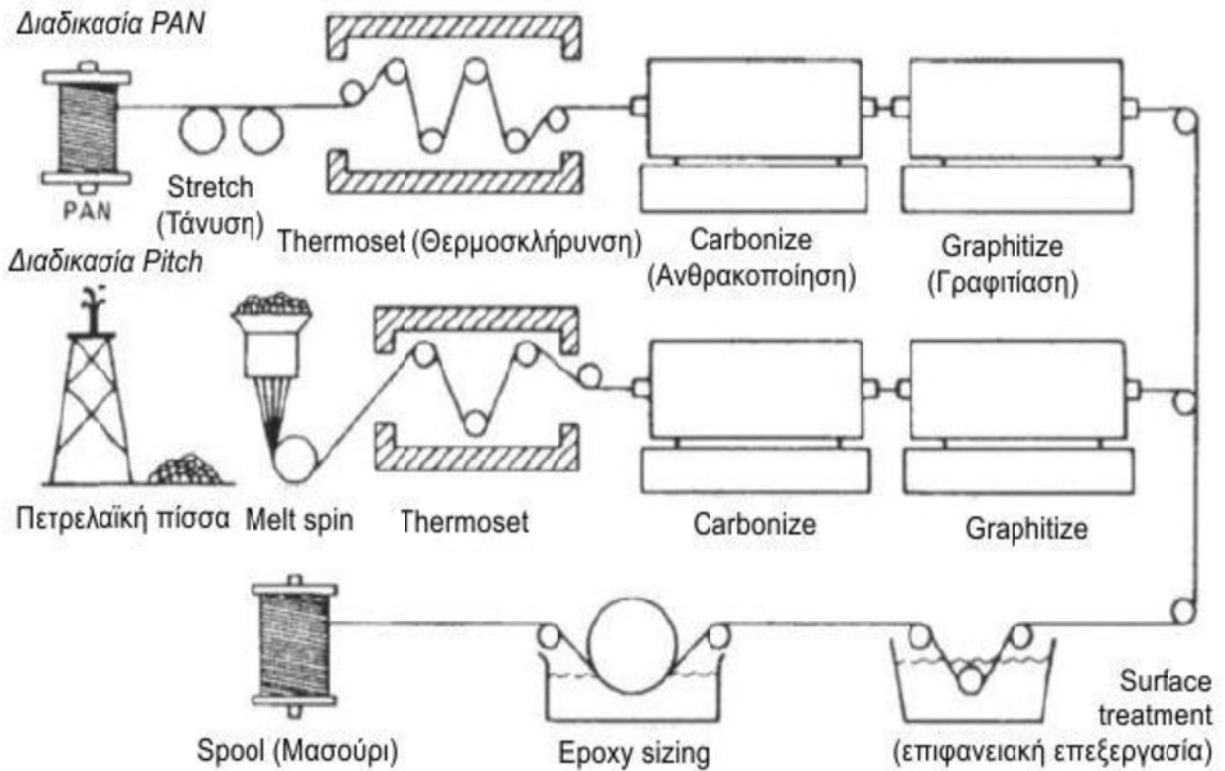
Συγκεκριμένα οι ίνες γραφίτη κατεργάζονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1600° C και αποκτούν τρισδιάστατη διάταξη ατόμων με περιεχόμενο άνθρακα άνω του 99%. Το μέτρο

ελαστικότητας τους είναι της τάξης των 340 GPa. Η κατεργασία ινών άνθρακα γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και η περιεκτικότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 93 και 95% .

Οι ίνες κατασκευάζονται με αρχικό υλικό ραϊγιόν (rayon) , πίσσα (pitch) ή polyacrylonitrile (PAN) με την τελευταία περίπτωση να παράγει ίνες με σχεδόν διπλάσιο όριο διαρροής αλλά να είναι και η πιο ακριβή. Οι ίνες από πίσσα παρά τη χαμηλότερη αντοχή τους μπορούν να παρουσιάσουν το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας μέχρι και 900 GPa.

Κατά την διαδικασία με PAN οι ίνες τανύονται, θερμοσκληρύνονται, ανθρακοποιούνται, γραφιτιάζονται και τέλος κατεργάζονται επιφανειακά. Λόγω του εφελκυσμού κατά την παραγωγή τα μόρια προσανατολίζονται καλύτερα. Η θερμοσκλήρυνση σε ατμόσφαιρα αέρα σταθεροποιεί τη δομή πριν την ανθρακοποίηση στους 1500° C και ατμόσφαιρα αζώτου που μετατρέπει το PAN σε άνθρακα. Οι ίνες που προκύπτουν είναι συρρικνωμένες 50% ελαφρύτερες. Στη συνέχεια για να παραχθεί ίνα γραφίτη με ακόμα σταθερότερη κρυσταλλική δομή πραγματοποιείται γραφίτοποίηση στους 3000° C και στο τελικό στάδιο οι ίνες περνούν από ηλεκτροστατικό αλκαλικό λουτρό ώστε να αποκτήσουν καλύτερη ικανότητα πρόσφυσης με τη μήτρα.

Όταν οι ίνες προκύπτουν από πίσσα (pitch) αρχικά το υλικό θερμαίνεται 40 ώρες στους 450° C μέχρι να αποκτήσει μορφή υγρού με υψηλό ιξώδες και υψηλό βαθμό μοριακής τάξης. Έπειτα στροβιλίζεται μέσω ενός ακροφυσίου με στενό στόμιο και τα μόρια ευθυγραμμίζονται κατά τον διαμήκη άξονα της ίνας. Τα υπόλοιπα στάδια μέχρι το τελικό προϊόν είναι αντίστοιχα με αυτά της παραγωγής με PAN. Οι ίνες γραφίτη που προκύπτουν μπορούν, όπως αναφέρθηκε να έχουν πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας εάν υποστούν γραφίτοποίηση σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και αυτό γιατί οι κρύσταλλοι του γραφίτη ευθυγραμμίζονται σχεδόν πλήρως με τον άξονα των ινών. Αυτό οδηγεί σε αδυναμία των ινών να παραλάβουν διατμητικές τάσεις και άρα μικρότερη αντοχή σε θλίψη. Η θερμική αγωγιμότητα είναι μεγάλη και αυτό είναι ένας ακόμα λόγος για την πολύ διαδεδομένη χρήση τους στο πεδίο της αεροδιαστημικής το χαμηλό βάρος, η αυξημένη ακαμψία αλλά και ικανότητα απαγωγής θερμότητας είναι προαπαιτούμενα.



Εικόνα 3.3 Διαδικασίες παραγωγής ινών άνθρακα pan και pitch

Ο τύπος του πρόδρομος που χρησιμοποιείται και οι συνθήκες κατά την επεξεργασία των ινών είναι καθοριστικοί παράγοντες για την αντοχή της στην τελική μορφή καθώς μπορεί να δημιουργήσουν ατέλειες στη μικροδομή. Οι τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής διαστολής είναι ελαφρώς αρνητικές και μειώνονται περαιτέρω με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Σήμερα τα ανθρακονήματα είναι διαθέσιμα από μεγάλο αριθμό παραγωγών με πολλές επιλογές σε ότι αφορά την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας. Παρέχονται σε δέσμες άπλεκτων ινών με την τυπική διάμετρο ίνας μεταξύ 7 και 10 μm . Το μέγεθος κάθε δεσμίδας παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία από 1000 μέχρι 200.000 ίνες. Οι πιο μικρές δεσμίδες έχουν αυξημένη αντοχή αλλά και κόστος. Για αυτό δεσμίδες της τάξεως των 1000 ινών χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές πολύ υψηλής απόδοσης όπου συνήθως ο περιορισμός κόστους μικρής σημασίας. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μεγέθη στην αεροναυπηγική είναι 3, 6 και 12 χιλιάδων ινών (3K, 6K και 12K). Όπως είναι φυσικό το κόστος των ινών επηρεάζεται εκτός από το μέγεθος της δεσμίδας και από τη μηχανικά χαρακτηριστικά της.

Τα ιδεατά μηχανολογικά υλικά πρέπει να έχουν υψηλή αντοχή, δυσκαμψία, σκληρότητα και χαμηλό βάρος. Τα σύνθετα πολυμερών με ενίσχυση ινών άνθρακα και γραφίτη πληρούν αυτά τα κριτήρια όσο πολύ λίγα υλικά. Επιπλέον αστοχούν ελαστικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι χημικά αδρανή και καθόλου επιρρεπή στον ερπυσμό και στην αστοχία. Μερικά μειονεκτήματά τους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν είναι η ψαθυρότητά τους, η σχετικά μικρή αντοχή σε θλίψη σε σύγκριση με τον εφελκυσμό, η χαμηλή αντίσταση στην κρούση και το υψηλό κόστος αν τις συγκρίνει κανείς με τις ίνες από γυαλί.

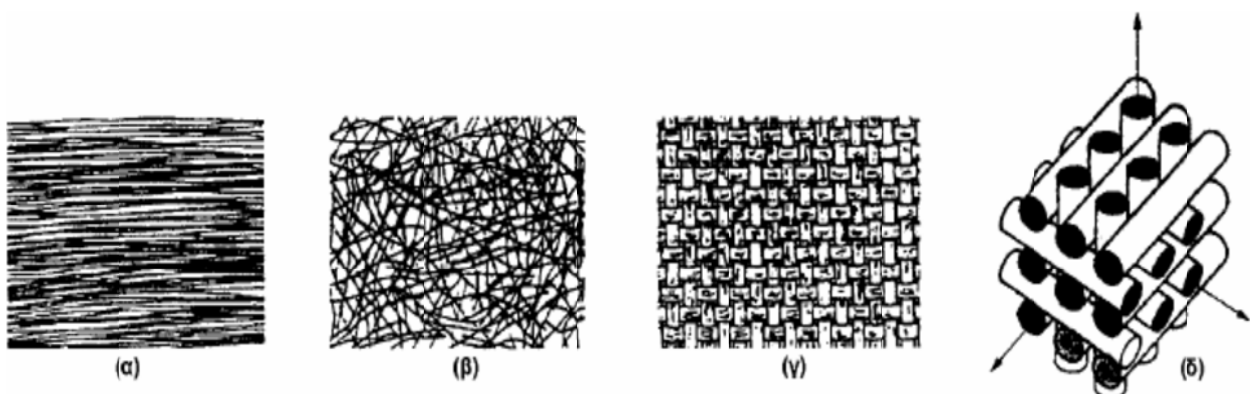
3.7 Υφάσματα ενίσχυσης

Κριτήριο για την ταξινόμηση των σύνθετων με ενίσχυση ινών αποτελεί ο προσανατολισμός και η διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται σε μονοδιευθυντικά σύνθετα, οι ίνες των οποίων προσανατολίζονται προς την ίδια διεύθυνση και πολυδιευθυντικά σύνθετα, οι ίνες των οποίων έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Τα πολυδιευθυντικά διακρίνονται στα εξής:

Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης

Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης

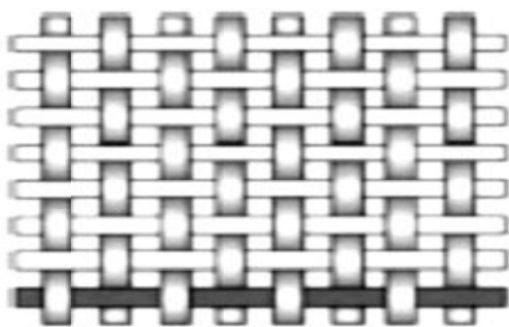
Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.



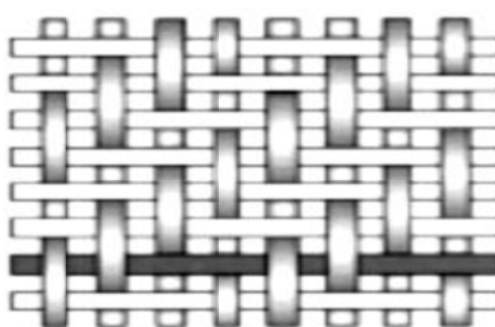
Εικόνα 3.4 Τύποι διάταξης ινών

Ειδικότερα, η διάταξη πλέξης ύφανσης διαθέτει πολυάριθμα πρότυπα (μοτίβα) πλέξης. Σε αυτά παρατηρούνται οι ίνες οριζόντιας (κατά το μήκος) διεύθυνσης (warp) και κατακόρυφης

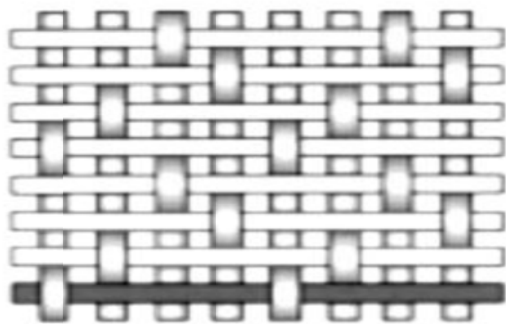
διεύθυνσης (weft ή fill). Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου οι δεύτερες ίνες είναι υπό γωνία όχι 90° (συνήθως 22,5° ή 45°). Ο τύπος της πλέξης επηρεάζει την απόδοση του υφάσματος με πολλούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένων της σταθερότητας, της προσαρμοστικότητας, του πορώδους, της αντοχής και της δυσκαμψίας. Σχεδόν κάθε δυνατή πλέξη μπορεί να πλεχθεί, αλλά για κατασκευαστικούς λόγους έχουν επικρατήσει οι εξής έξι



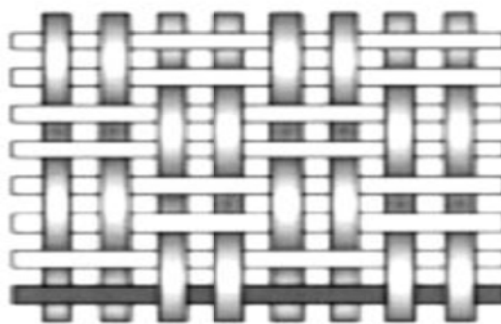
Plan Weave



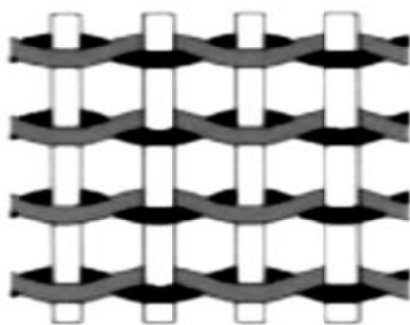
Twill Weave



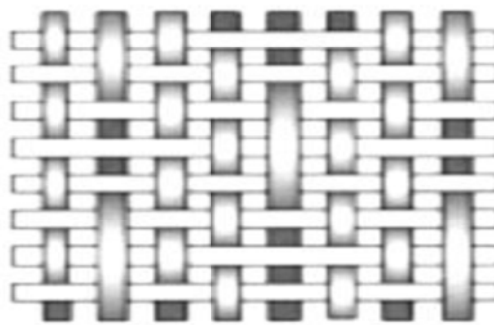
Satin Weave



Basket Weave



Leno Weave



Mock Leno Weave

Εικόνα 3.5 Τυπικές πλέξεις ύφανσης

Plain: Κάθε οριζόντια ίνα περνά εναλλάξ κάτω και πάνω από κάθε κατακόρυφη. Το ύφασμα είναι συμμετρικό, με καλή σταθερότητα και λογικό πορώδες. Όμως, είναι το πιο δύσκολο να απλωθεί, και ο υψηλός βαθμός κυμάτωσης των ινών οδηγεί σε

σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλα πρότυπα πλέξης. Τείνει να μη χρησιμοποιείται για πολύ βαριές υφάνσεις, λόγω του υπέρμετρου πλισαρίσματος.

Twill: Μία ή περισσότερες οριζόντιες ίνες πλέκονται εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερες κατακόρυφες ίνες με έναν τακτικό επαναλαμβανόμενο τρόπο. Τούτο παράγει την οπτική εντύπωση μιας ευθείας ή τεθλασμένης διαγώνιας "ράβδωσης" στο ύφασμα. Σε σχέση με την plain πλέξη παρατηρείται καλύτερη δυνατότητα εμποτισμού και μικρότερη κυμάτωση, με μία μικρή μόνο μείωση της σταθερότητας. Με μειωμένο πλισάρισμα, το ύφασμα δίνει επίσης μία ομαλότερη επιφάνεια και ελαφρώς υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες.

Satin: Οι πλέξεις satin είναι ουσιαστικά πλέξεις twill τροποποιημένες ώστε να παράγουν λιγότερες διασταυρώσεις οριζοντίων και κατακόρυφων ινών. Ο αριθμός "harness" που χαρακτηρίζει την πλέξη (τυπικά 4, 5 και 8) είναι ο συνολικός αριθμός

των ινών που περνούν προτού το μοτίβο αρχίσει να επαναλαμβάνεται. Τα υφάσματα αυτών των πλέξεων είναι πολύ επίπεδα, επιδεικνύουν καλό εμποτισμό και, λόγω της μικρής κυμάτωσης, έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες. Τα πρότυπα αυτά επιτρέπουν στις ίνες να πλέκονται με τη μεγαλύτερη εγγύτητα και παράγουν υφάσματα με μία "σφιχτή" πλέξη. Ωστόσο, η χαμηλή σταθερότητά τους και η ασυμμετρία τους πρέπει να ληφθεί υπόψη (η ασυμμετρία οδηγεί στη μία όψη του υφάσματος να δεσπόζουν οι ίνες οριζόντιας κατεύθυνσης, ενώ στην άλλη να δεσπόζουν οι κατακόρυφης κατεύθυνσης).

Basket: Η πλέξη αυτή είναι κατά βάση ίδια με την plain, μόνο που εδώ δύο ή περισσότερες οριζόντιες ίνες συνυφαίνονται εναλλάξ με δύο ή περισσότερες κατακόρυφες. Μια διάταξη δύο οριζοντίων που διασταυρώνονται με δύο κατακόρυφες ίνες καλείται 2x2 basket, αλλά οι διατάξεις των ινών δεν είναι απαραίτητο να είναι συμμετρικές. Συνεπώς, είναι πιθανό να

έχουμε 8×2, 5×4, κ.τ.λ. Η πλέξη αυτή είναι πιο επίπεδη και, λόγω λιγότερου πλισαρίσματος, πιο δυνατή από την plain, αλλά λιγότερο σταθερή. Πρέπει να χρησιμοποιείται σε βαριές υφάνσεις.

Leno: Η πλέξη αυτή βελτιώνει τη σταθερότητα σε "ανοικτά" υφαντά, τα οποία έχουν μικρό περιεχόμενο σε ίνες. Αποτελεί μία μορφή plain πλέξης στην οποία οι γειτονικές οριζόντιες ίνες τυλίγονται γύρω από διαδοχικές κατακόρυφες ίνες για να σχηματίσουν ένα ελικοειδές ζεύγος, το οποίο σταθεροποιεί κάθε κατακόρυφη ίνα στη θέση της. Τα υφάσματα με πλέξη leno χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα πρότυπα πλέξης, διότι αν χρησιμοποιηθεί μόνη της η ανοικτή αυτή πλέξη δε θα μπορούσε να δώσει ένα αποτελεσματικό σύνθετο προϊόν.

Mock Leno: Μία εκδοχή της plain πλέξης στην οποία περιστασιακές οριζόντιες ίνες, σε τακτικά διαστήματα, παρεκκλίνουν από την τυπική κάτω – πάνω εναλλαγή και εναλλάσσονται κάθε δύο ή περισσότερες ίνες. Τούτο συμβαίνει με παρόμοια συχνότητα και στην κατακόρυφη διεύθυνση, και το συνολικό αποτέλεσμα είναι να

ύφασμα με αυξημένο πάχος, πιο τραχεία επιφάνεια και πρόσθετο πορώδες.

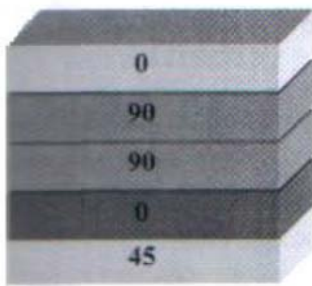
3.7.1 Διαστρωμάτωση υφασμάτων

Χρησιμοποιώντας μονοδιευθυντικά υφάσματα το ένα πάνω στο άλλο παράγεται ένα σύνθετο υλικό με τη μορφή πολυστρώματος. Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετούνται οι στρώσεις, δηλαδή ο προσανατολισμός των ινών ως προς το πολύστρωμα, καθορίζει τις τελικές ιδιότητες του υλικού.

Η περιγραφή τέτοιων πολύστρωτων σύνθετων γίνεται μέσω της γωνίας που σχηματίζουν οι ίνες τις κάθε στρώσης με τον προκαθορισμένο άξονα Χ. Αν ένα στρώμα έχει ίνες παράλληλες προς τον άξονα Χ τότε ο προσανατολισμός του είναι 0° ενώ αν αυτές είναι κάθετες 90°. Για το

μονοσήμαντο ορισμό των υπόλοιπων προσανατολισμών απαιτείται η σύμβαση ότι μια γωνία που διαγράφεται με αντίθετη φορά του ρολογιού είναι θετική και η αντίστροφη της αρνητική.

Ένα πολύστρωμα του οποίου όλες οι στρώσεις έχουν τον ίδιο προσανατολισμό ονομάζεται μονοδιευθυντικό πούστρωμα. Αυτό του οποίου οι στρώσεις εναλλάσσονται κάθετα μεταξύ τους (0° και 90°) είναι το διασταυρούμενο και στην περίπτωση που ο προσανατολισμός είναι εναλλάξ $+\theta$ και $-\theta$ τότε παράγεται πολύστρωμα υπό γωνία.



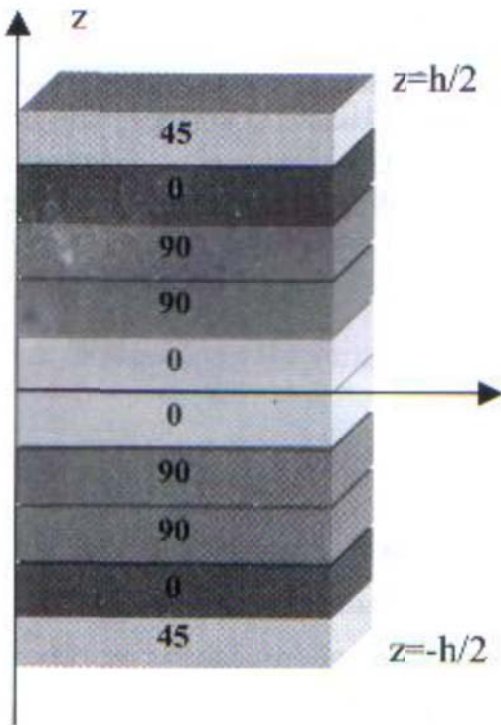
Κωδικός Πλάκας: [45/0/90₂/0]_T

Εικόνα 3.6 Κωδικός πλάκας σε πολύστρωμα διαφορετικού προσανατολισμού ινών

Ο κωδικός πολύστρωτου ξεκινά από τη γωνία της κάτω στρώσης και ακολουθούν οι υπόλοιπες χωρισμένες από κάθετο διαχωριστικό (/). Αν υπάρχουν περισσότερες από μία πλάκες στη σειρά που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, τότε ορίζονται στον κωδικό μέσω δείκτη. Η διάταξη μπαίνει σε αγκύλες παίρνει δείκτη «T» αν είναι ολοκληρωμένη και «S» αν είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο $z=0$.

Για επαναλαμβανόμενες ομάδες στρώσεων μπορεί το πολύστρωμα να γραφτεί με τη χρήση σετ που μπαίνει σε αγκύλες και ο αριθμητικός δείκτης ορίζει τον αριθμό των επαναλήψεων του.

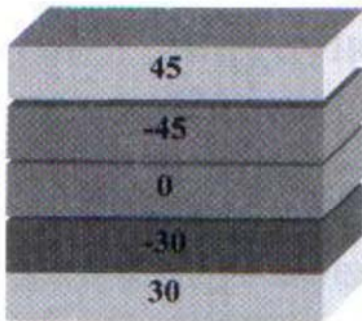
Στην περίπτωση που το πολύστρωμα αποτελείται από στρώσεις ινών διαφορετικού υλικού, κάθε γωνία ακολουθείται από τον αντίστοιχο δείκτη για την ίνα που χρησιμοποιείται.



ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΠΛΑΚΑ

Κωδικός Πλάκας: $[45/0/90_2/0]_S$

Σημ: Εάν θέλουμε να έχουμε μια μόνο κεντρική στρώση, στο $z=0$, τότε τη βάζουμε με υπεργράμμιση δηλαδή: $[45/0/90_2/\bar{0}]_S$. Η στρώση αυτή ανήκει κατα το ήμισυ στο κάθε επίπεδο $[-h/2,0]$, $[0,h/2]$.



Κωδικός Πλάκας: $[\pm 30/0/\mp 45]_S$

Σημ: Κάθε πρόσημο αναπαριστά μια στρώση

Θετικές είναι οι γωνίες ανθρωρολογιακά ως προς το x -άξονα της πλάκας.

Εικόνα 3.7 Κωδικός πλάκας συμμετρικού πολυστρώματος

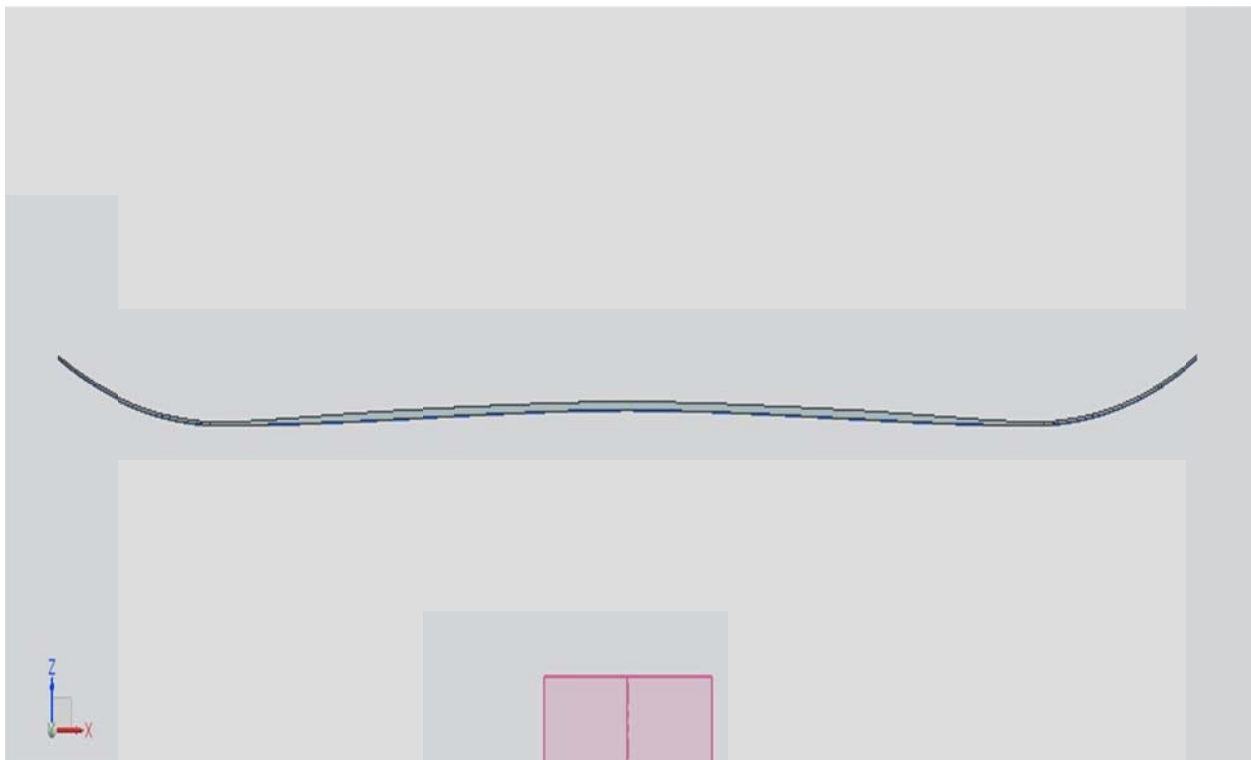
Laminate	Κώδικας	Laminate	Κώδικας
45°		45°	
0°		0°	
90°		90°	
45°		45°	
0°		0°	
90°	[(45/0/90) ₂] or [45/0/90] _{2s}	90°	[(45/0/90) ₄] or [45/0/90] _{4s}
90°		45°	
0°		0°	
45°		90°	
90°		45°	
0°		0°	
45°		90°	

Εικόνα 3.8 Κωδικοποίηση συμμετρικών σετ στρωμάτων

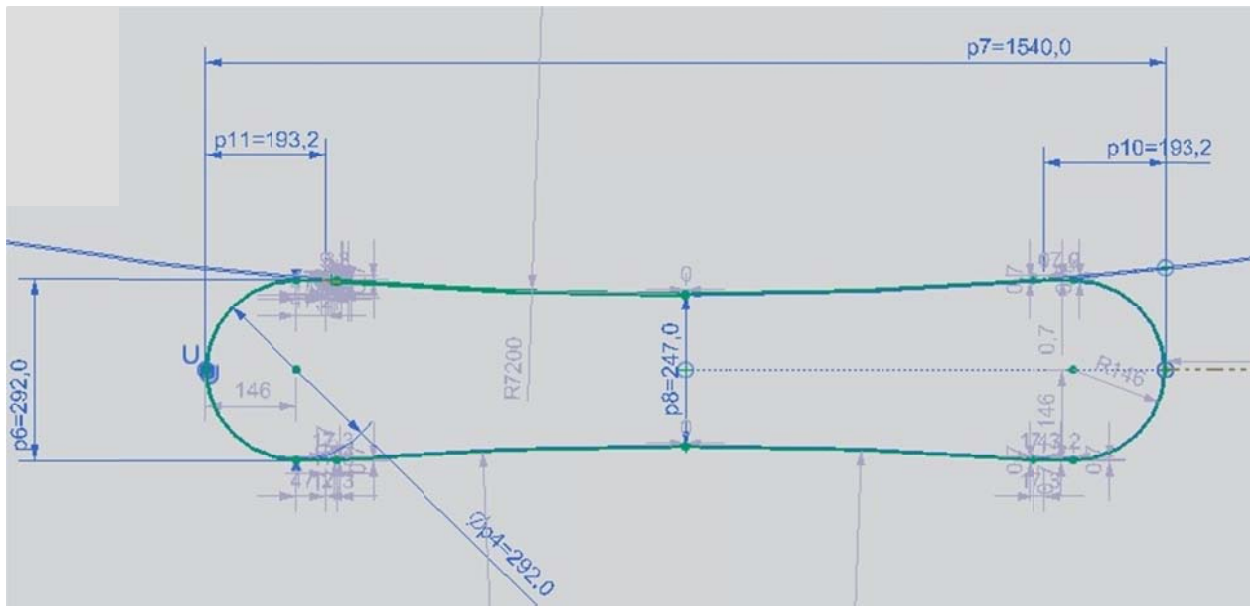
Κεφάλαιο 4 – Προσομοίωσης στο πρόγραμμα Siemens nx 9.0

4.1 Επιλογή διαστάσεων μοντέλου

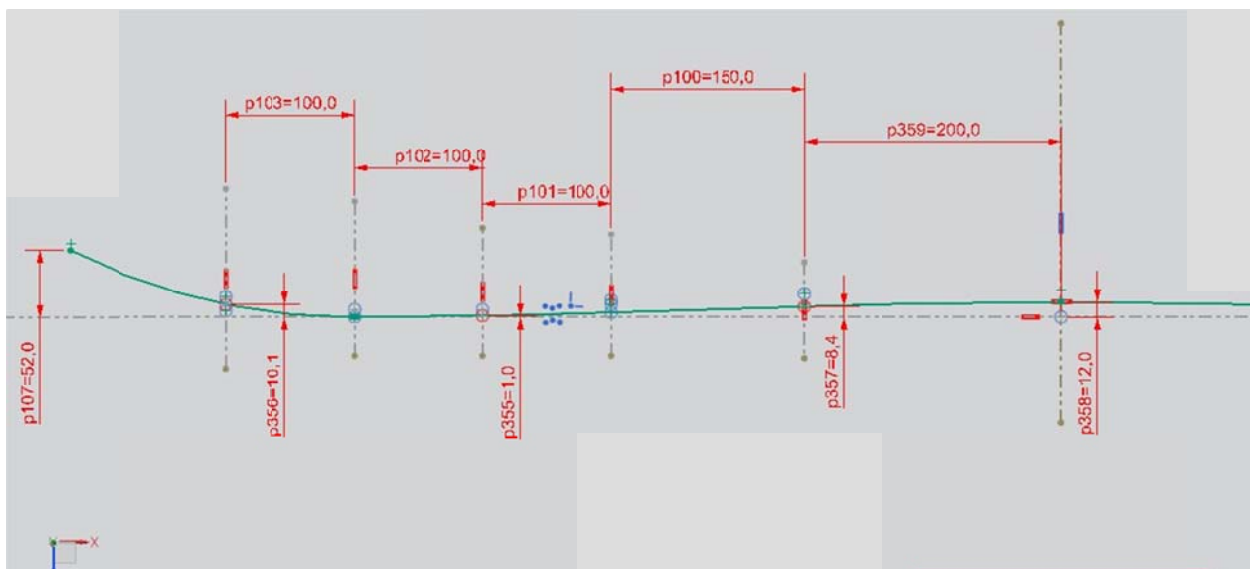
Οι συγκεκριμένες διαστάσεις επιλέχθηκαν γιατί αντιπροσωπεύουν τα προϊόντα με το μεγαλύτερο ποσοστό πωλήσεων σύμφωνα με τους περισσότερους κατασκευαστές (1,52-1,56μέτρα). Ένας ακόμη λόγος ήταν ότι υπήρχε η δυνατότητα να γίνουν πειραματικές μετρήσεις σε χιονοσανίδες που έχουν αντίστοιχη γεωμετρία για της οποίες ο κατασκευαστής παρέχει εκτεταμένα στοιχεία σε ότι αφορά τα υλικά που περιέχουν. Γνωρίζοντας αυτά τα στοιχεία μπορεί να γίνει ακριβέστερη μοντελοποίηση της κατασκευής και άρα μπορεί να εκτιμηθεί αρχικά η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θα πάρουμε από την προσομοίωση στο υπολογιστικό πρόγραμμα.



Εικόνα 4.1 Πλάγια όψη μοντέλου



Εικόνα 4.2 Κάτοψη μοντέλου



4.2 Προετοιμασία μοντέλου

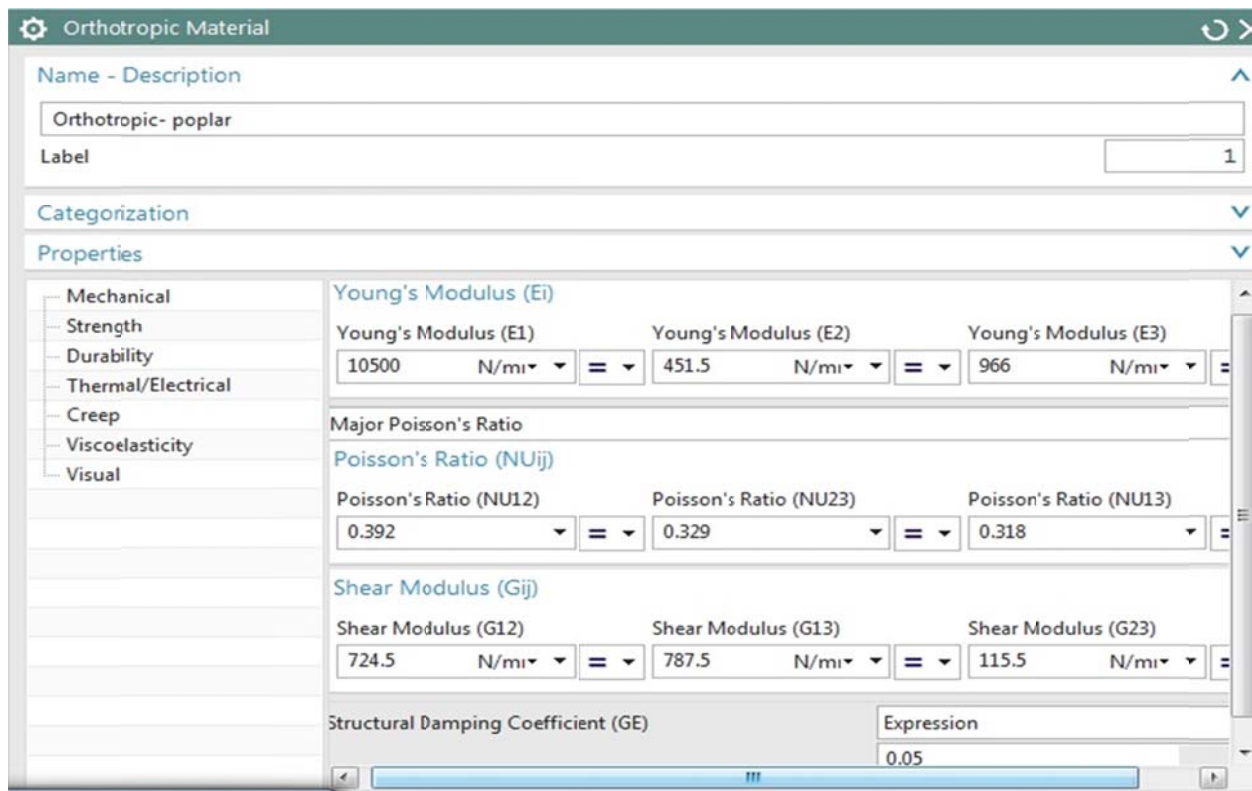
Η φύση της κατασκευής είναι τέτοια που επιβάλλει την χρήση κάποιου προγράμματος που ευνοεί την προσομοίωση των στρώσεων. Ωστόσο στην συγκεκριμένη εφαρμογή ο πυρήνας του ξύλου που είναι βασικό στοιχείο δεν έχει σταθερό πάχος και άρα πρέπει σχεδιαστεί σαν ξεχωριστό σώμα πάνω στο οποίο κολλιούνται οι υπόλοιπες στρώσεις.

4.2.1 Πυρήνας ξύλου (υλικό, εισαγωγή δεδομένων, απλοποίηση)

Με έτοιμο το σκίτσο της περιφέρειας της σανίδας πρέπει να κατασκευάσουμε το τρισδιάστατο σώμα του πυρήνα ξύλου. Αρχικά δημιουργούμε ομοιόμορφο extrude και στη συνέχεια με τη βοήθεια της εντολής trim body μορφοποιούμε το σώμα ώστε να έχει το επιθυμητό πάχος, μικρό στη μύτη και την ουρά και μεγαλύτερο στη μέση της σανίδας. Τέλος η σανίδα πρέπει να αποκτήσει μη επίπεδο όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες και αυτό γίνεται μέσα από την εντολή global shapring που επιτρέπει την διαμόρφωση σωμάτων με οδηγό προκαθορισμένες επιφάνειες.

Στη συγκεκριμένη μελέτη ο πυρήνας ξύλου ορίζεται σαν ενιαίο κομμάτι ξύλου σε αντίθεση με την κοινή πρακτική που θέλει τον πυρήνα να δημιουργείται από λωρίδες ξύλου κολλημένες μεταξύ τους. Αυτή η απλοποίηση θεωρήθηκε αποδεκτή γιατί κύριος λόγος που γίνεται κόλληση λωρίδων είναι ότι τα μεγαλύτερα κομμάτια ξύλου που δεν έχουν ατέλειες κοστίζουν πολύ περισσότερο και ότι ελαχιστοποιείται η φύρα κατά την παραγωγική διαδικασία. Στην προσομοίωση όμως χρησιμοποιούνται δεδομένα για τις ιδιότητες του ξύλου που αφορούν δοκίμια χωρίς ατέλειες, κάτι που θα πρέπει να οδηγήσει στη μείωση του σφάλματος σε μεγάλο βαθμό.

Το είδος ξύλου που ορίστηκε για τον πυρήνα είναι η κίτρινη λεύκη (yellow poplar) καθώς είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ξύλο στην βιομηχανία παραγωγής χιονοσανίδων. Η βιβλιοθήκη υλικών του υπολογιστικού προγράμματος δεν είχε αντίστοιχη επιλογή, οπότε έπρεπε να δημιουργηθεί νέο υλικό με ορθοτροπική φύση και να αναζητηθούν οι μηχανικές ιδιότητες από μελέτες για το συγκεκριμένο θέμα.

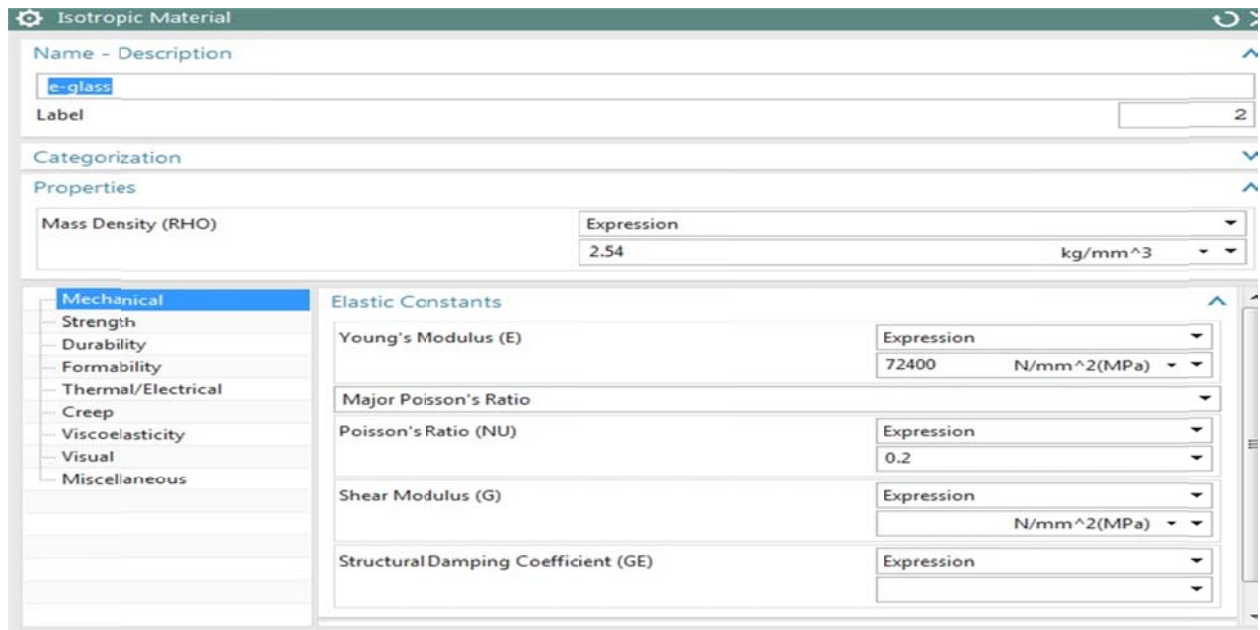


Εικόνα 4.3 Εισαγωγή ιδιοτήτων ξύλου

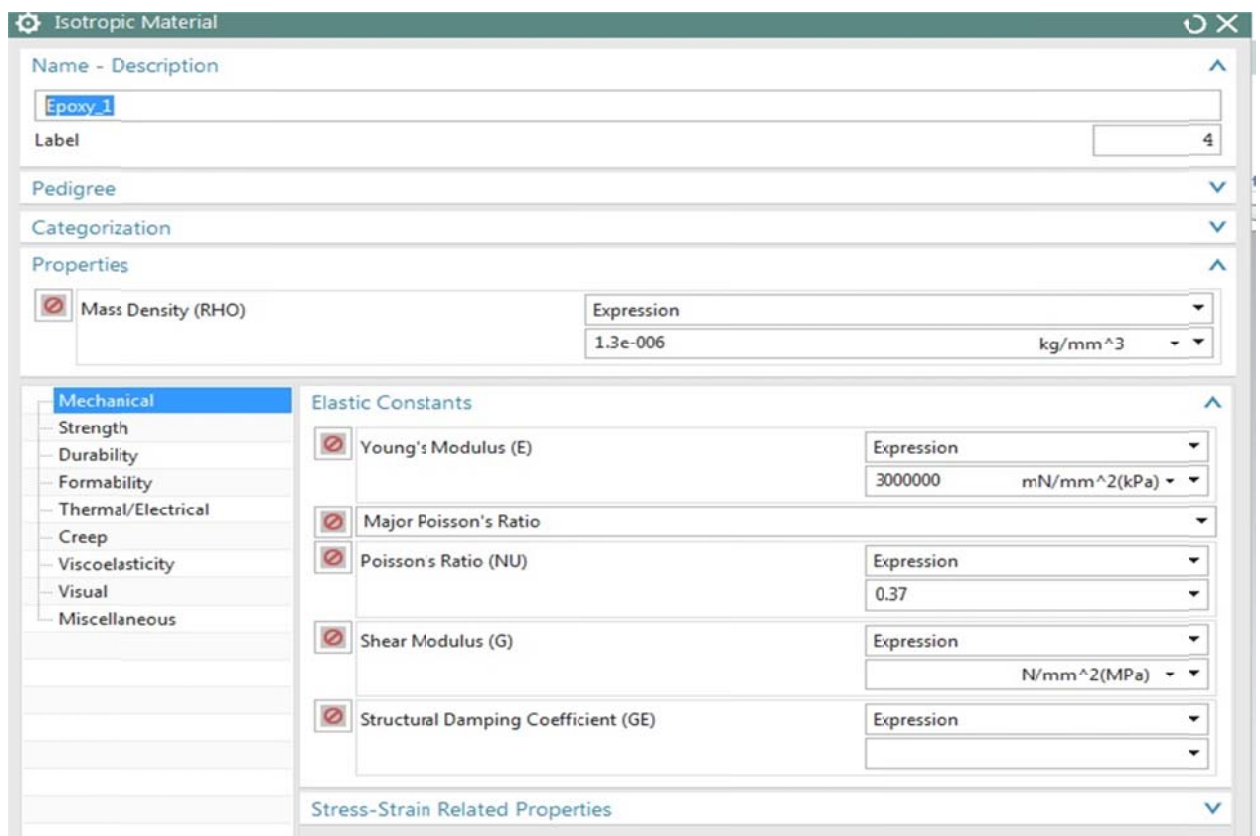
4.2.2 Υφάσματα ενίσχυσης fiberglass

Η προσομοίωση των σύνθετων στρώσεων στο λογισμικό που χρησιμοποιούμε μπορεί να γίνει με χρήση διδιάστατων στοιχείων και των ειδικών δυνατοτήτων που παρέχονται για στρωματικά υλικά. Τα δεδομένα για τα είδη και τους προσανατολισμούς των υαλονημάτων που επικρατούν στην παραγωγή snowboard αναζητήθηκαν στο διαδίκτυο, ωστόσο πολύ λίγες πηγές έδιναν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τα υλικά και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Έτσι έπρεπε να γίνει αξιολόγηση στοιχείων από διαφορετικές πηγές ώστε να μοντελοποιηθούν όσο το δυνατόν καλύτερα τα υλικά ενίσχυσης.

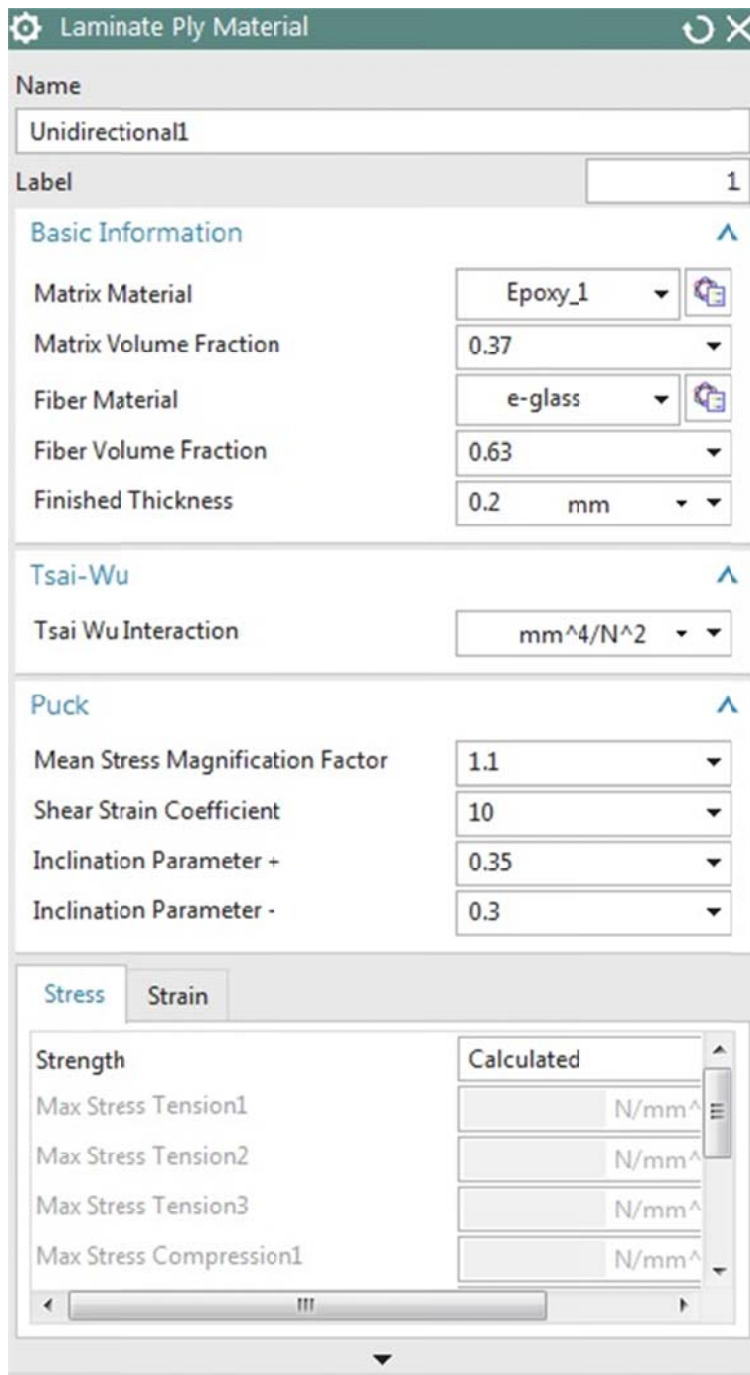
Στην περίπτωση των υαλονημάτων ο ορισμός του υλικού έγινε ως ply material, μια δυνατότητα που παρέχει το NX 9.0, όπου ο χρήστης καταχωρεί τα υλικά της μήτρας και ινών, την αναλογία τους και τον προσανατολισμό των ινών και το πρόγραμμα υπολογίζει τις αναμενόμενες ιδιότητες του σύνθετου. Έτσι έγινε εισαγωγή των στοιχείων για τη ρητίνη και αντίστοιχα για το e-glass σαν ισοτροπικά υλικά και δημιουργήθηκε ένα μονοδιευθυντικό σύνθετο



Εικόνα 4.4 Εισαγωγή ιδιοτήτων υαλοϋφάσματος



Εικόνα 4.5 Εισαγωγή ιδιοτήτων εποξικής ρητίνης

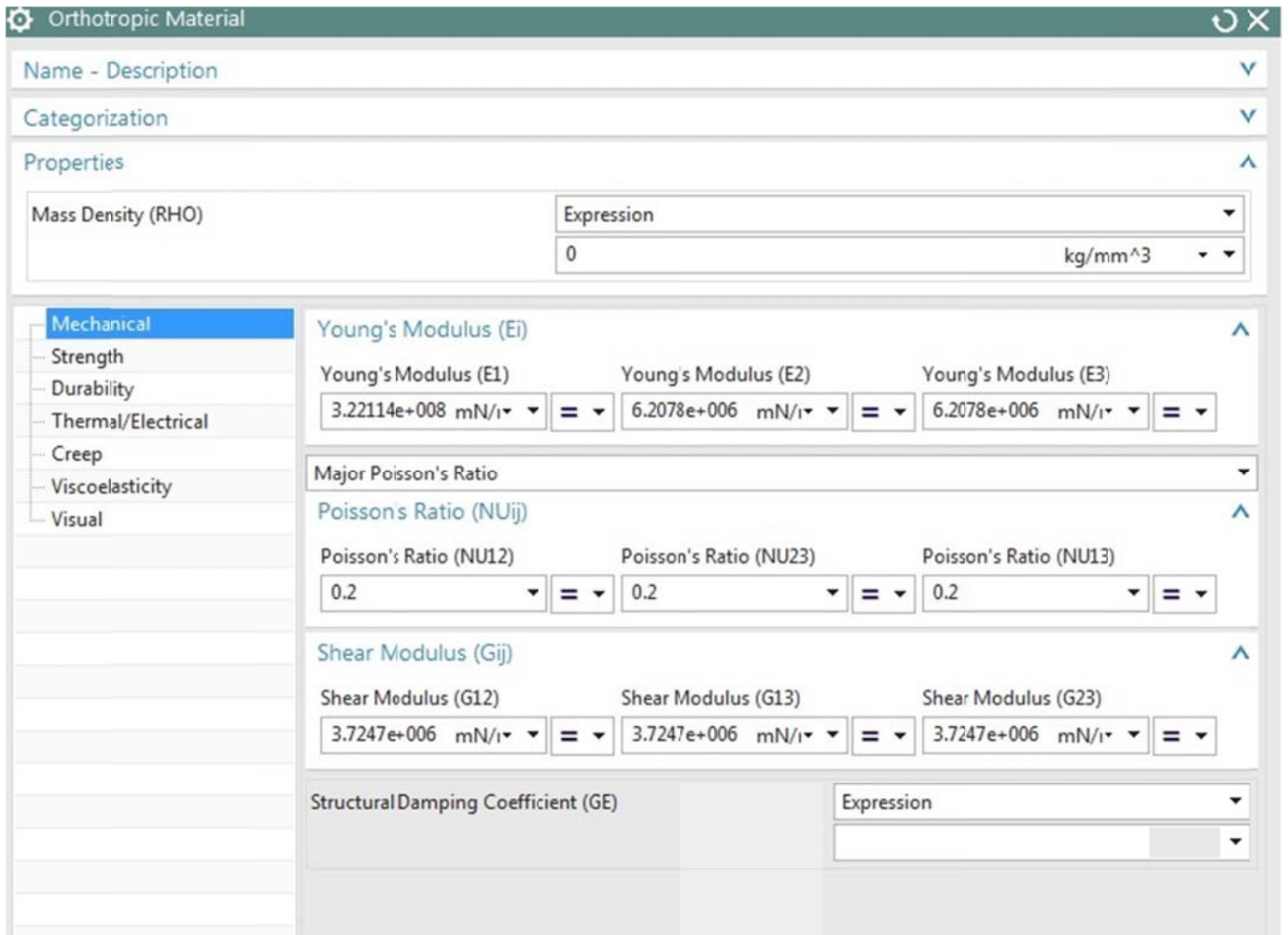


Εικόνα 4.6 Δημιουργία σύνθετου με μήτρα εποξική ρητίνη και ίνες υαλοϋφάσματος

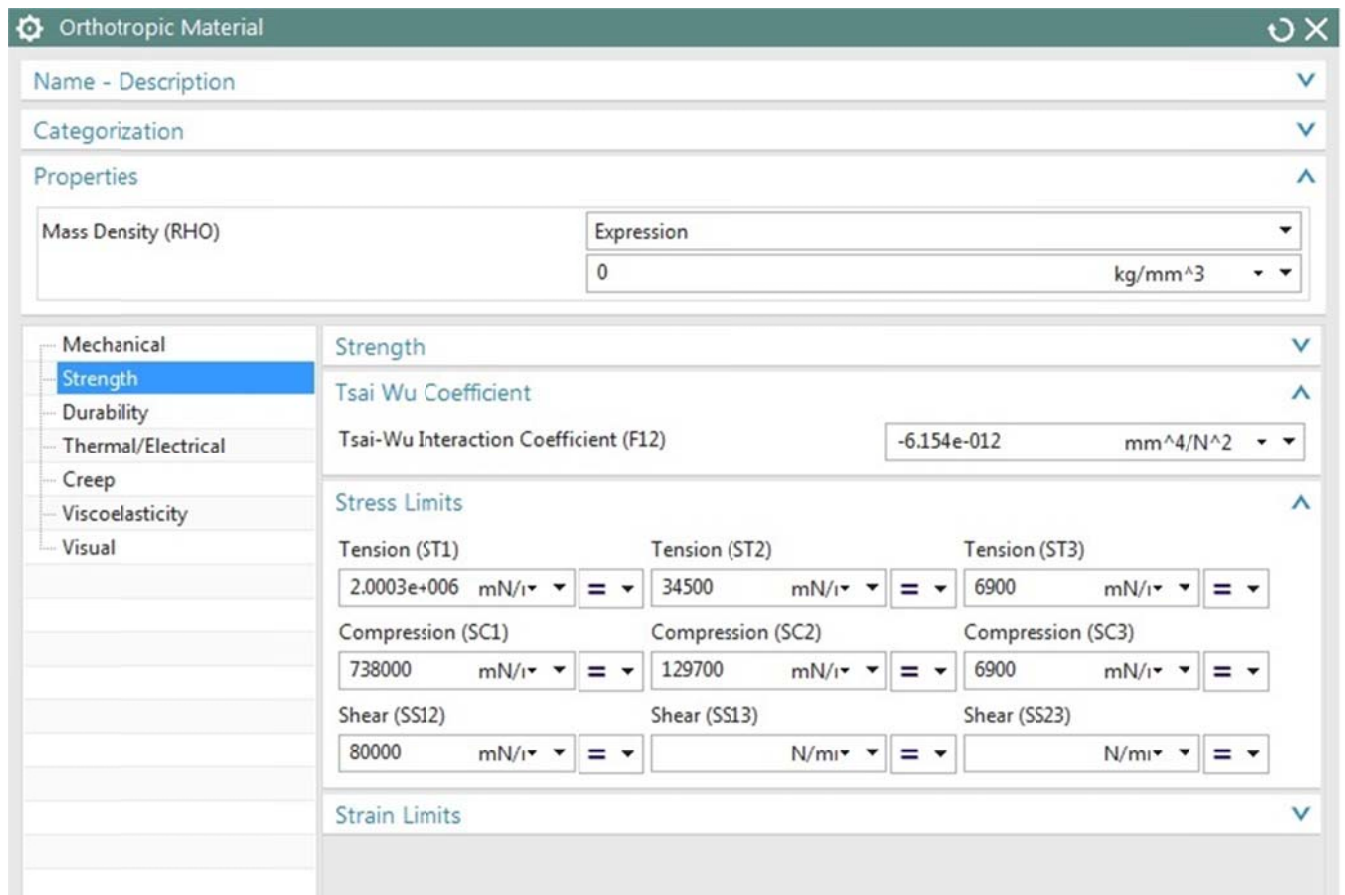
4.2.3 Στρώσεις ενίσχυσης ανθρακονημάτων carbon- fiber

Η επιλογή του συγκεκριμένου είδους νήματος για τις ενισχύσεις με ίνες άνθρακα έγινε με βάση τις πληροφορίες κατασκευαστών χιονοσανίδων, που όμως δεν παρείχαν ακριβείς τιμές

για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Έτσι έγινε σύγκριση με καταλόγους προϊόντων από εταιρίες παραγωγής ανθρακονημάτων, ώστε να βρεθούν δεδομένα για τις ιδιότητες των επιθυμητών σύνθετων. Οι τιμές πολλών κατασκευαστών αφορούσαν την τελική μορφή του κάθε σύνθετου βάσει της αναλογίας ινών/μήτρας και θεωρήθηκε ότι εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι οι τιμές που υπολογίζει το NX 9.0 με τη χρήση της επιλογής Create Ply Material. Για αυτόν το λόγο οι στρώσεις ανθρακονημάτων προσομοιώθηκαν απευθείας μέσω αυτών των τιμών.



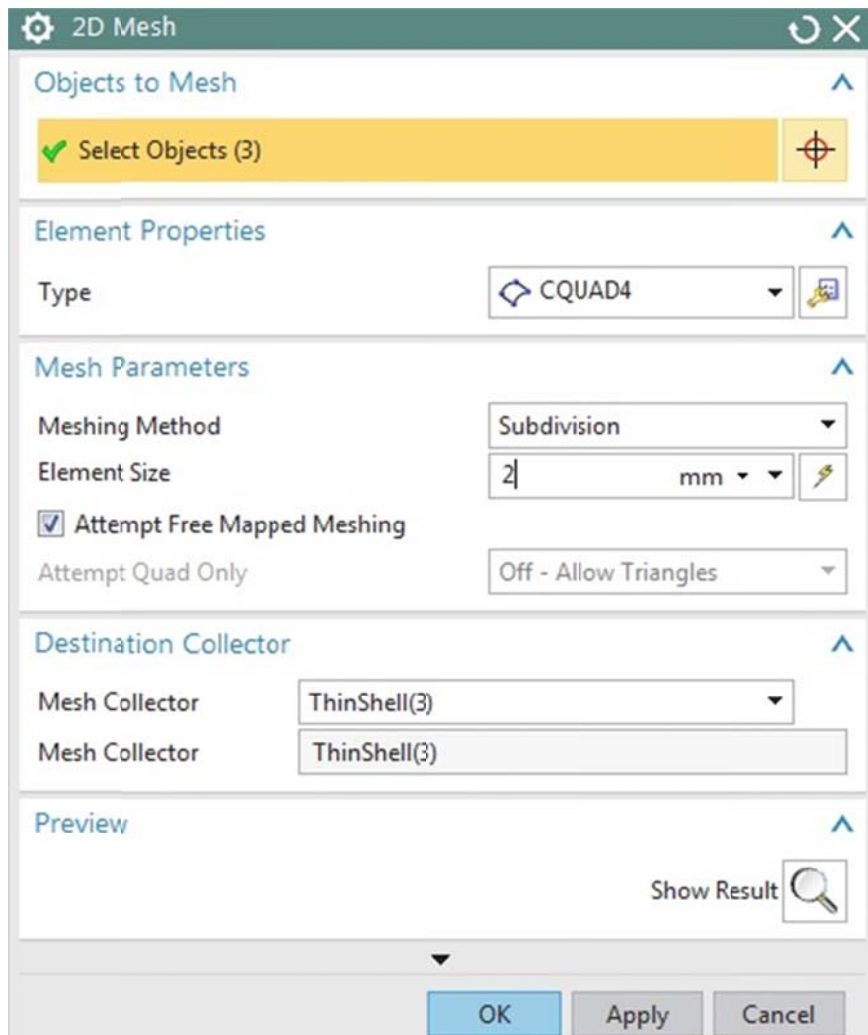
Εικόνα 4.7 Εισαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων υφάσματος ανθρακονημάτων



Εικόνα 4.8 Εισαγωγή χαρακτηριστικών αντοχής υφάσματος ανθρακονημάτων

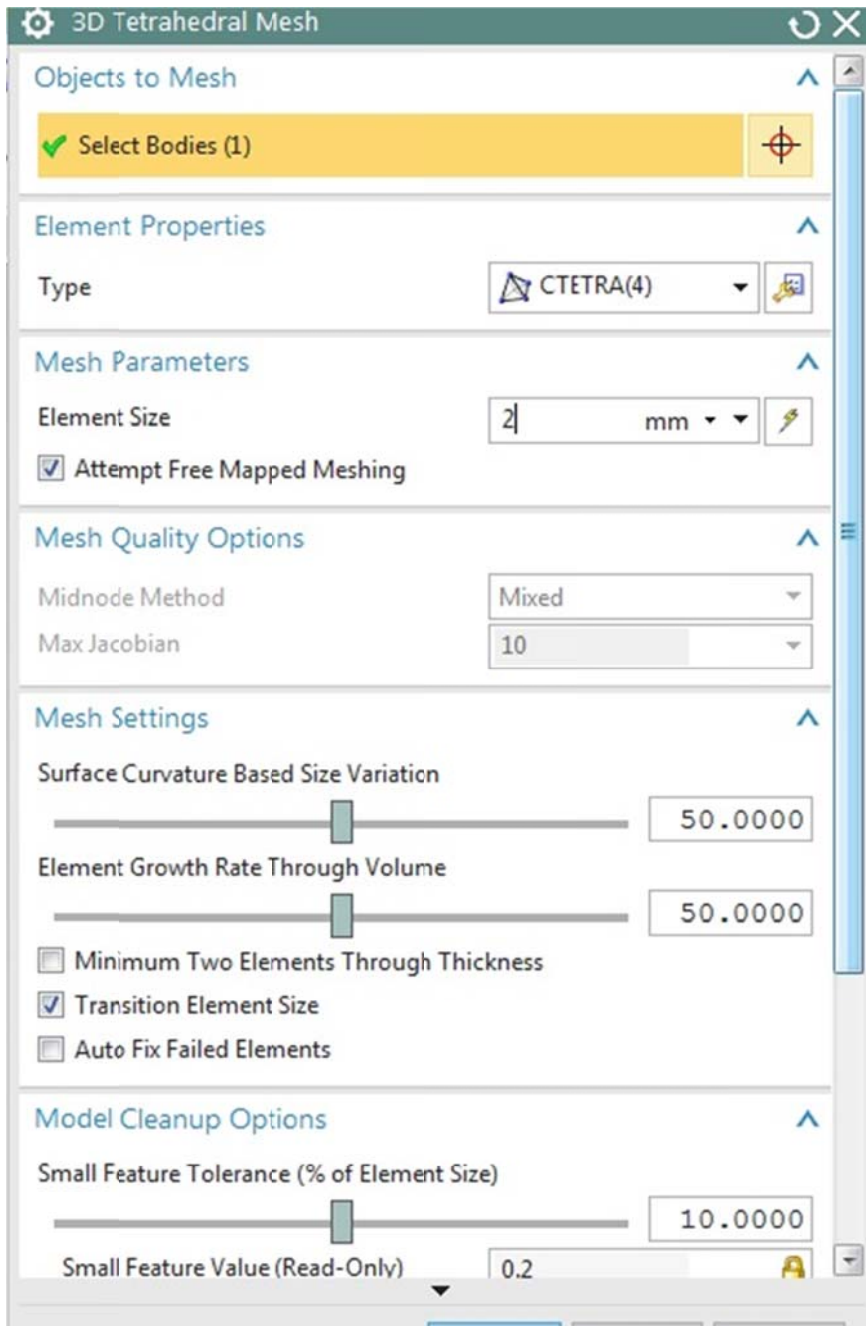
4.3 Δημιουργία πλέγματος

Τα δισδιάστατα τμήματα του μοντέλου που αντιπροσωπεύουν τα σύνθετα υλικά στην κατασκευή δημιουργείται 2-Δ πλέγμα (2D mesh) με την αντίστοιχη εντολή του προγράμματος και καθορίζονται το είδος και το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 4.9 Δημιουργία διδιάστατου πλέγματος

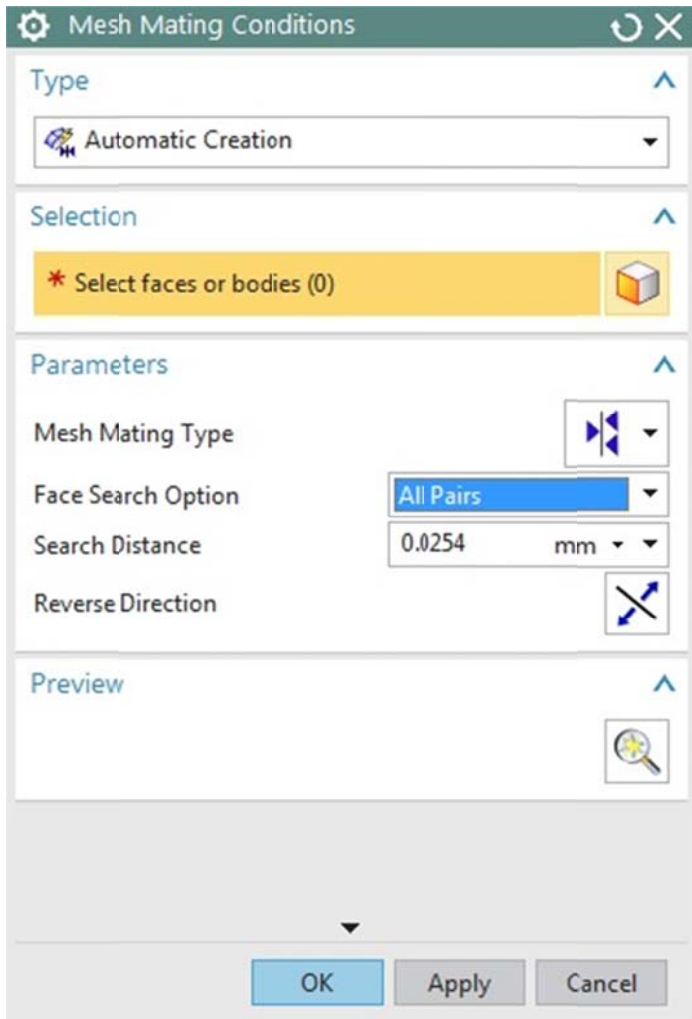
Κατά τον ίδιο τρόπο φτιάχνεται και το 3-Δ πλέγμα για το σώμα του πυρήνα ξύλου με τον χρήστη να επιλέγει πάλι τα δεδομένα των στοιχείων προς δημιουργία.



Εικόνα 4.10 Δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος

4.4 Ορισμός συνθηκών σύνδεσης

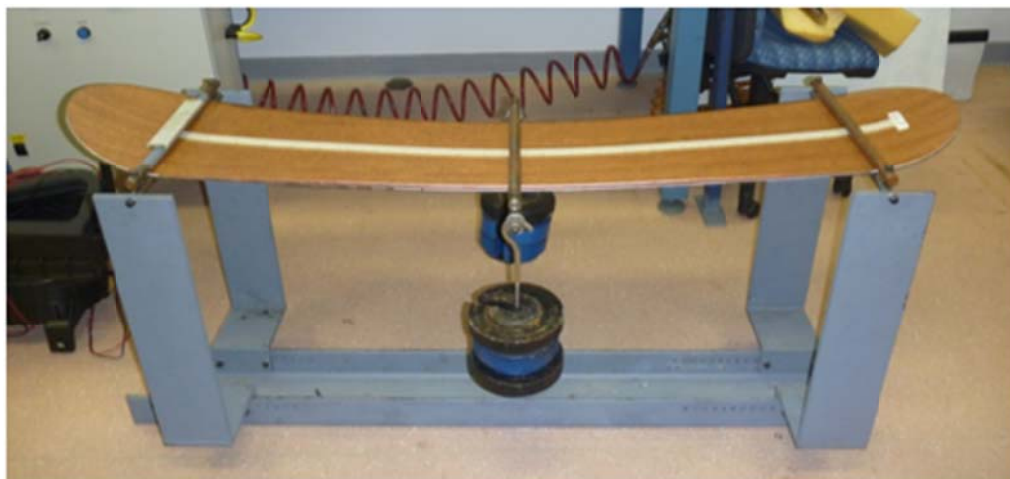
Το NX 9.0 παρέχει στο χρήστη απλοποιημένες μεθόδους σύνδεσης ή επαφής μεταξύ των επιφανειών και ακμών ενός μοντέλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η σύνδεση μεταξύ των επιφανειών των υφασμάτων ενίσχυσης και του πυρήνα έγινε με την εντολή “mesh mating conditions” και την επιλογή glue “non- coincident” συνδέει αυτόματα επιφάνειες που δεν έχουν απαραίτητα πανομοιότυπα πλέγματα.



Εικόνα 4.11 Ορισμός συνθηκών σύνδεσης

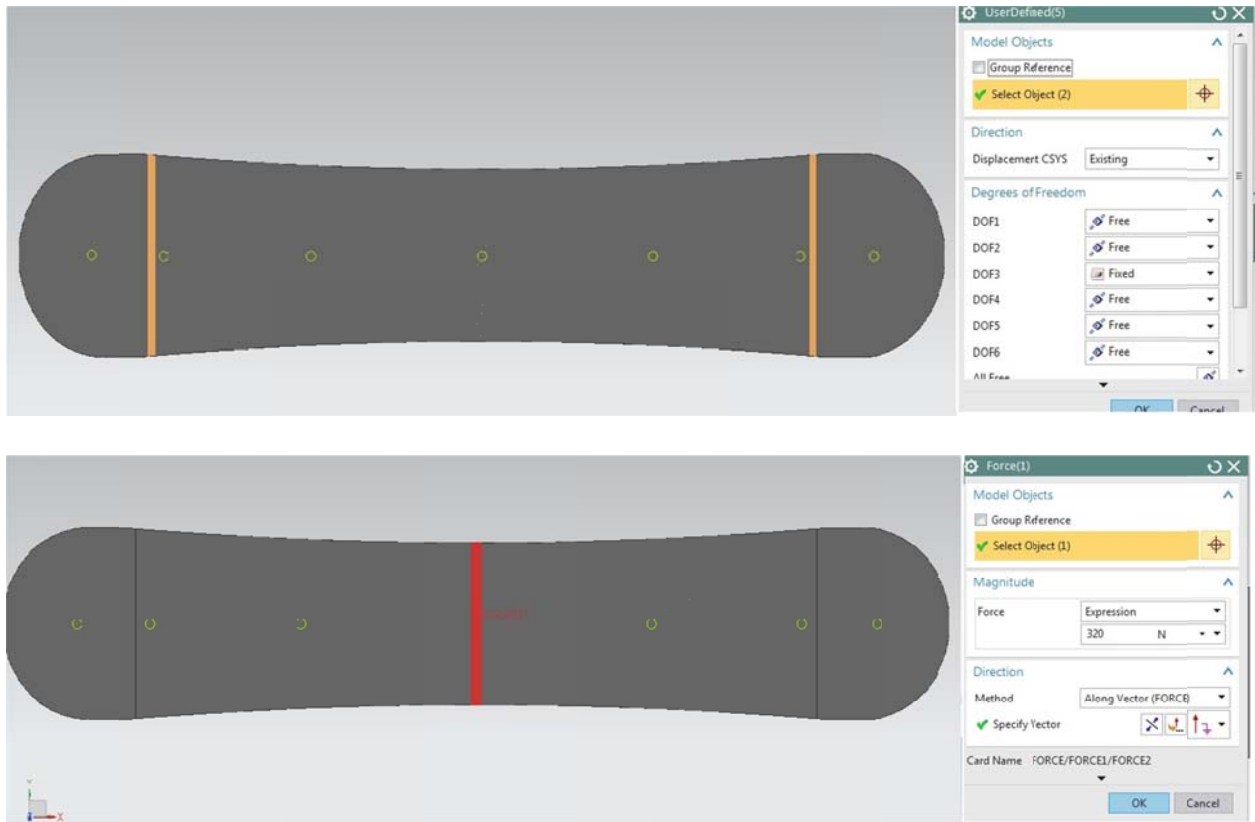
4.5 Αρχικές συνθήκες ανάλυσης

4.5.1 Προσομοίωση κάμψης τριών σημείων



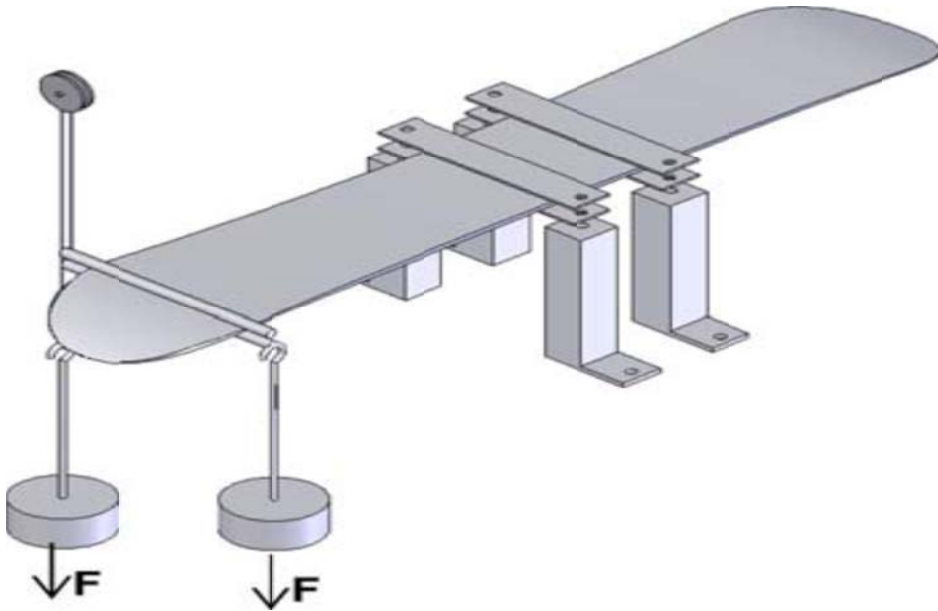
Εικόνα 4.12 Τεστ κάμψης τριών σημείων

Η διαδικασία αυτής της μέτρησης πραγματοποιείται από πολλούς κατασκευαστές χιονοσανίδων για την εξακρίβωση της ελαστικότητας του προϊόντος κατά τον διαμήκη άξονα. Οι συγκεκριμένοι αρχικοί περιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα για αυτή την προσομοίωση ήταν για την μετατόπιση στον άξονα Z στα σημεία όπου εδράζεται η σανίδα όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Επίσης η λωρίδα στην οποία ασκείται η δύναμη περιορίζεται ως προς την κίνηση κατά X, ώστε να παραμένει στον ίδιο κατακόρυφο άξονα και οι παραμορφώσεις της σανίδας να παραμένουν συμμετρικές και να μπορεί να γίνει ασφαλέστερη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων για διαφορετικά μοντέλα. Η δύναμη που επιλέχθηκε με βάση τα δεδομένα από προηγούμενες μελέτες για την ελαστική συμπεριφορά χιονοσανίδων, και αποφασίστηκε η φόρτιση 320 N η οποία προκαλεί επαρκή παραμόρφωση στις σανίδες να είναι επαρκώς διακριτές οι μεταβολές μεταξύ των μοντέλων.



Εικόνα 4.13 Εισαγωγή αρχικών συνθηκών για την κάμψη τριών σημείων

4.5.2 Προσομοίωση στρέψης

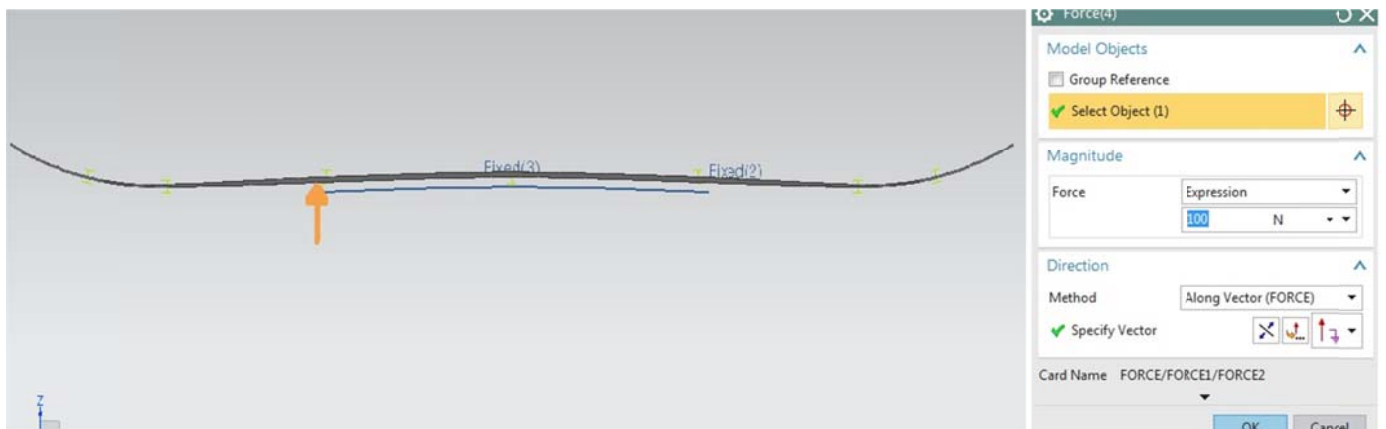
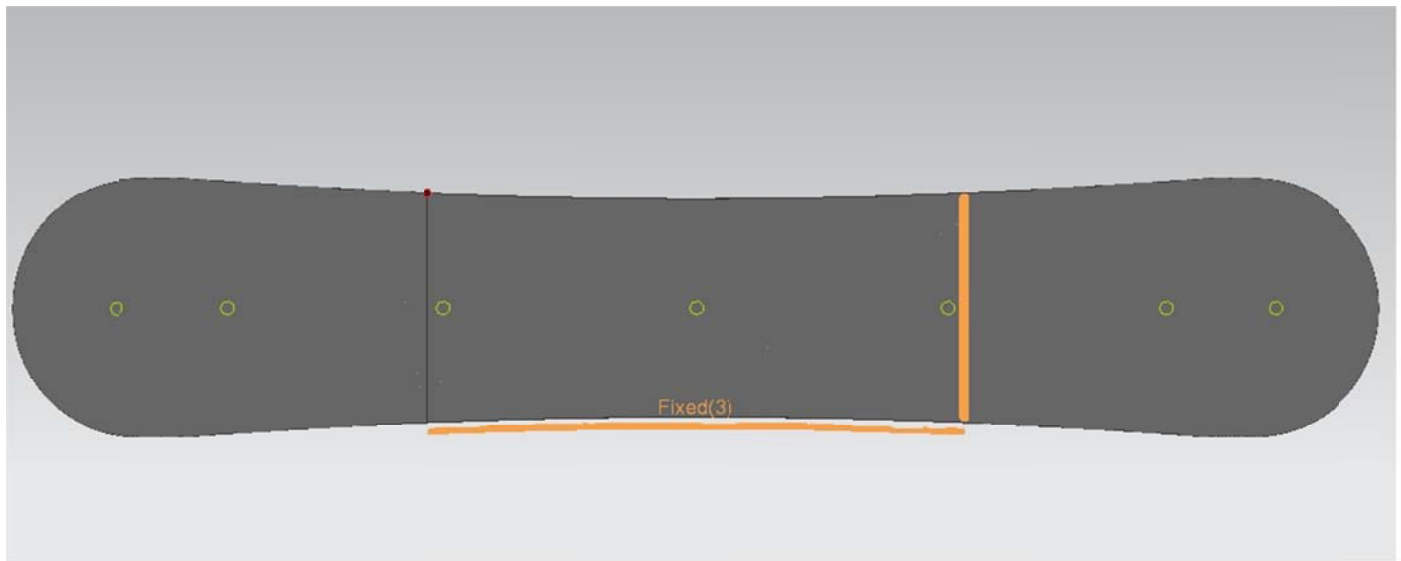


Εικόνα 4.14 Τέστ στρέψης

Στη σχετική βιβλιογραφία η διαδικασία μέτρησης των παραμορφώσεων λόγω στρεπτικών δυνάμεων παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα με την μετατόπιση και περιστροφή της σανίδας να περιορίζεται στη μέση της και τις στρεπτικές δυνάμεις να ασκούνται στο τέλος της ενεργής ακμής.



Ωστόσο στην παρούσα προσομοίωση θεωρήθηκε σκόπιμο ο περιορισμός της κίνησης της σανίδας να γίνει στο σημείο όπου τοποθετείται η μία δέστρα και οι δυνάμεις να ασκούνται στο σημείο όπου τοποθετείται η άλλη. Ο λόγος για την συγκεκριμένη αλλαγή είναι ότι κατά τη διάρκεια στροφής όπου εφαρμόζονται στρεπτικές τάσεις στη σανίδα, οι δυνάμεις ασκούνται κυρίως από τα πόδια του αναβάτη και άρα οι παραμορφώσεις λόγω αυτών περιορίζονται κυρίως σε αυτήν την περιοχή της χιονοσανίδας. Επιπλέον στην ιδανική κατάσταση όπου χαράσσεται η «τέλεια» στροφή, ο αθλητής περιορίζει κατά το δυνατό με τα πόδια του τη μετατόπιση της μιας ακμής της σανίδας για πιο σταθερή πορεία. Έτσι στη συγκεκριμένη προσομοίωση πέρα από την πάκτωση στην περιοχή της μίας δέστρας προστέθηκε και ο περιορισμός που αφορά την μη μετατόπιση της μίας ακμής προς όλες τις κατευθύνσεις. Το φορτίο που χρησιμοποιήθηκε είναι 100 N.



Εικόνα 4.15 Εισαγωγή αρχικών συνθηκών για στρέψη

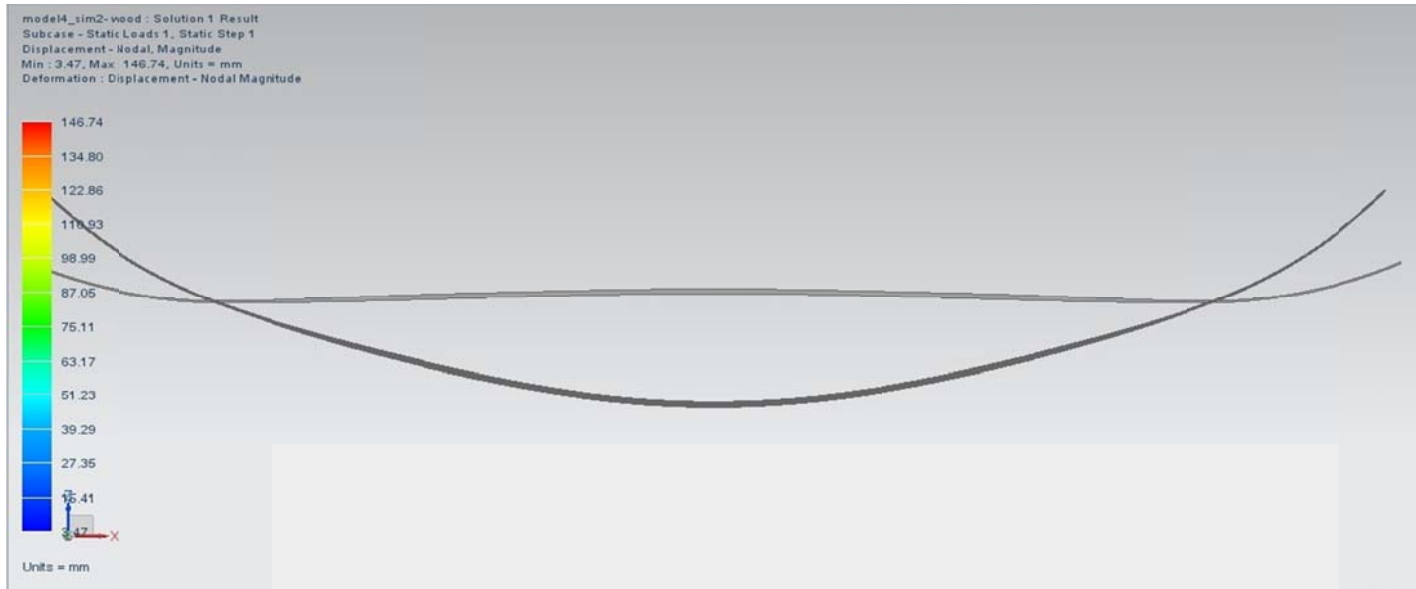
4.6 Αποτελέσματα μοντέλων

4.6.1 Μόνιμες ενισχύσεις

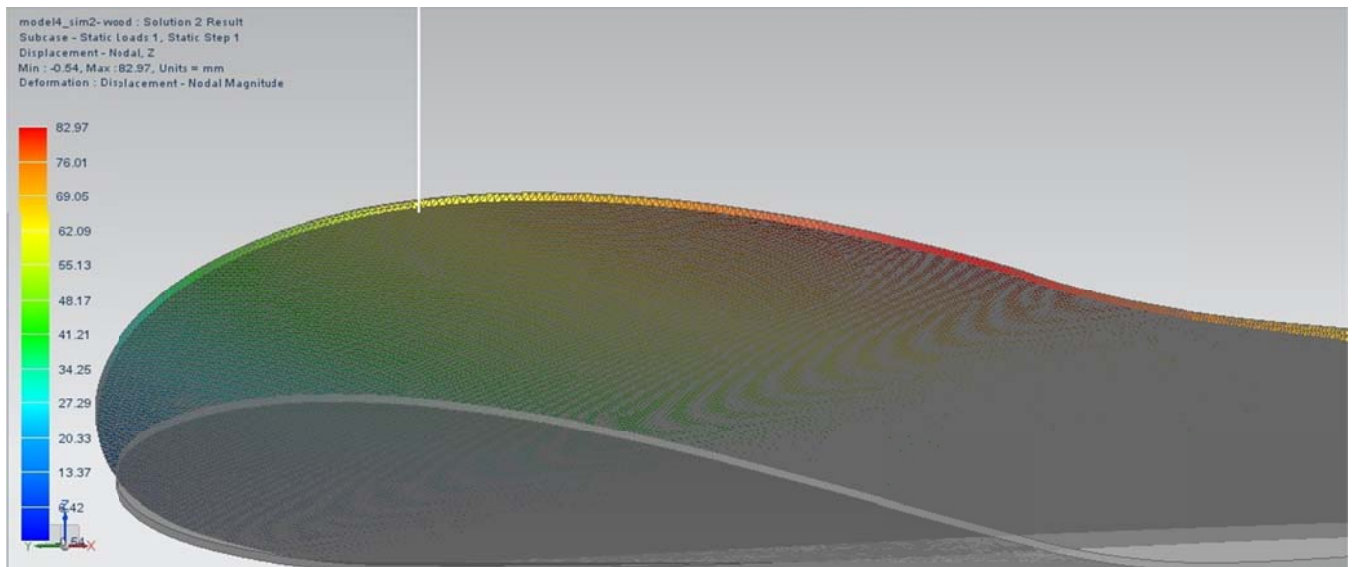
Μοντέλο 1

Η πρώτη δοκιμή προσομοιώθηκε η συμπεριφορά μόνο του πυρήνα ξύλου για να μπορεί στη συνέχεια να υπάρχει σύγκριση της επίδρασης των υαλονημάτων και ανθρακονημάτων στην συμπεριφορά της σανίδας. Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και το μοντέλο πριν την παραμόρφωση. Στην πρώτη, η μέγιστη μετατόπιση

εμφανίζεται όπως αναμενόταν στο κέντρο της σανίδας με τιμή 146.74 mm, ενώ στη δεύτερη η ακμή στην οποία ασκείται η δύναμη ανασηκώνεται κατά 83 mm.



Εικόνα 4.16 Μοντέλο 1: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

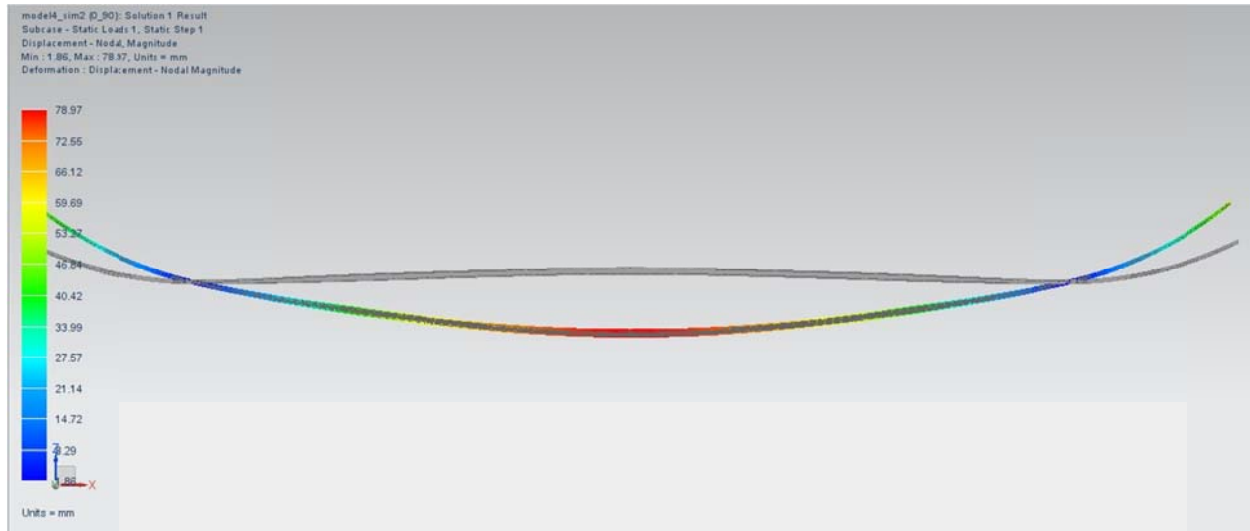


Εικόνα 4.17 Μοντέλο 1: Αποτέλεσμα στρέψης

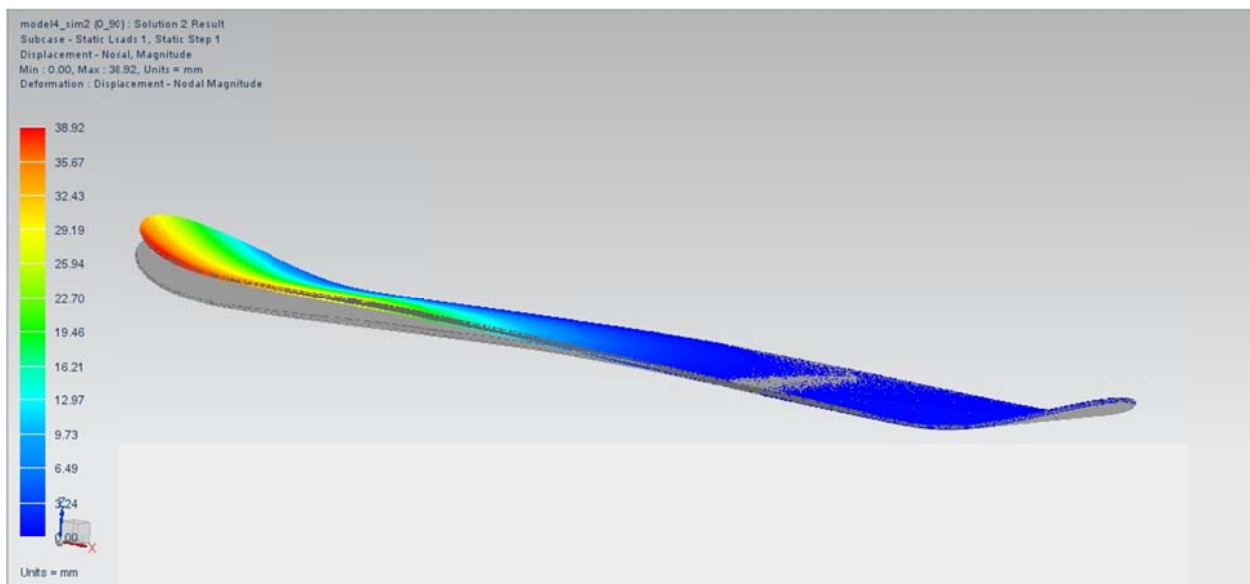
Μοντέλο 2

Σε αυτήν την περίπτωση μελετήθηκε η κατασκευή που προτιμάται από τους περισσότερους κατασκευαστές για σχετικά ελαστικές σανίδες κυρίως αρχαρίων. Πάνω και κάτω από τον

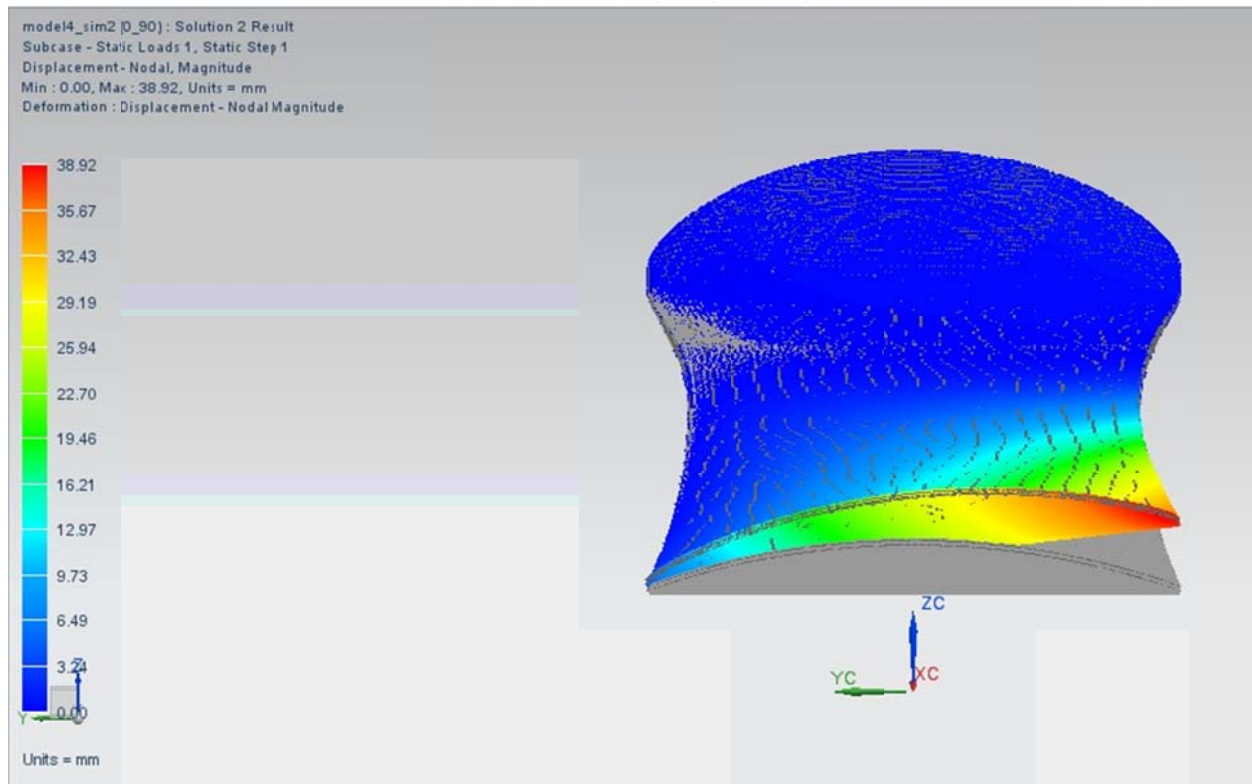
πυρήνα ξύλου υπάρχουν δύο στρώσεις μονοδιευθυντικών υαλοφασμάτων (e-glass) με προσανατολισμό ως προς τον διαμήκη άξονα 0° και 90° . Όπως φαίνεται στις εικόνες οι μετατοπίσεις περιορίζονται σημαντικά με την μέγιστη στην πρώτη περίπτωση να φτάνει τα 78.97 mm, ενώ στη δεύτερη τα 38.92 mm.



Εικόνα 4.18 Μοντέλο 2: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



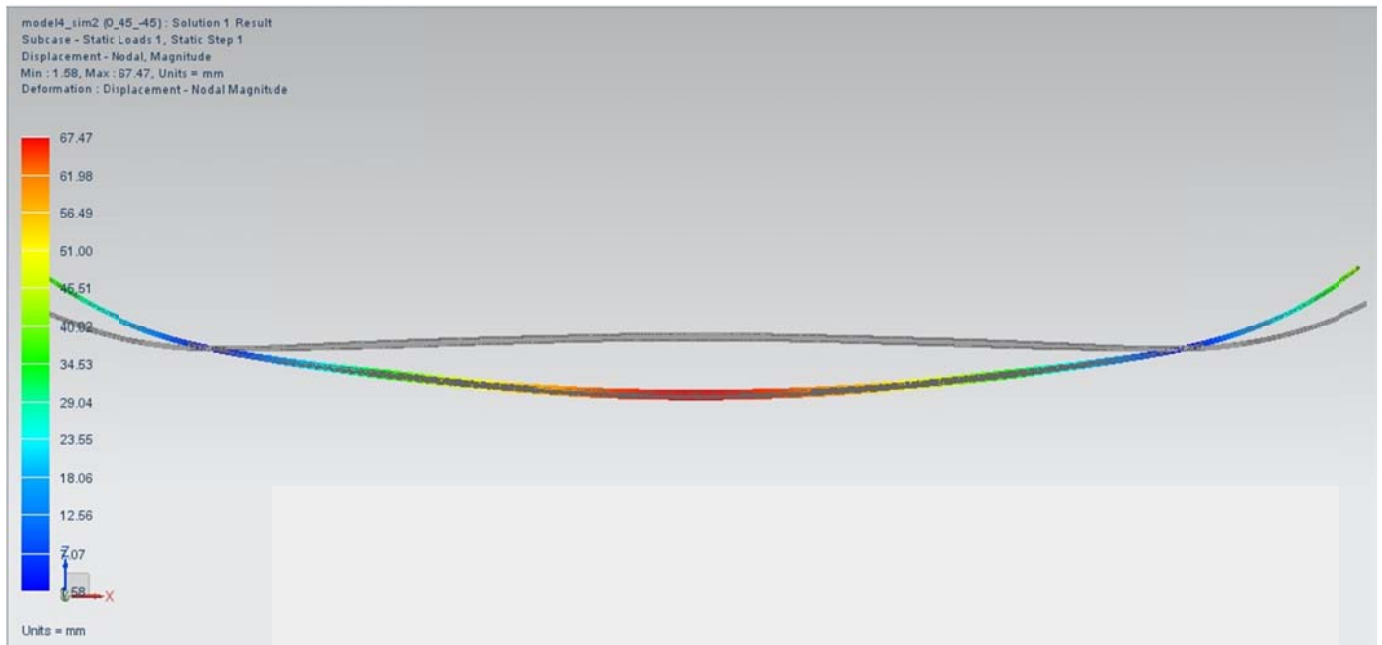
Εικόνα 4.19 Μοντέλο 2: Αποτέλεσμα στρέψης



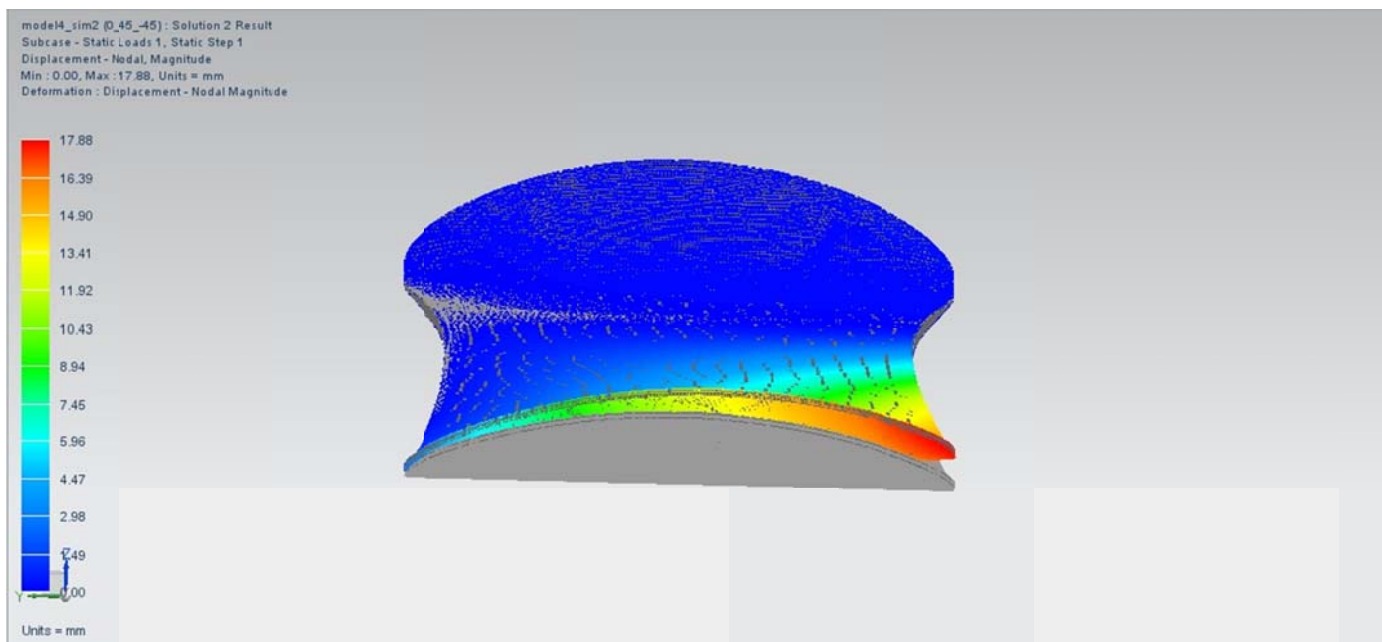
Εικόνα 4.20 Μοντέλο 2: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Μοντέλο 3

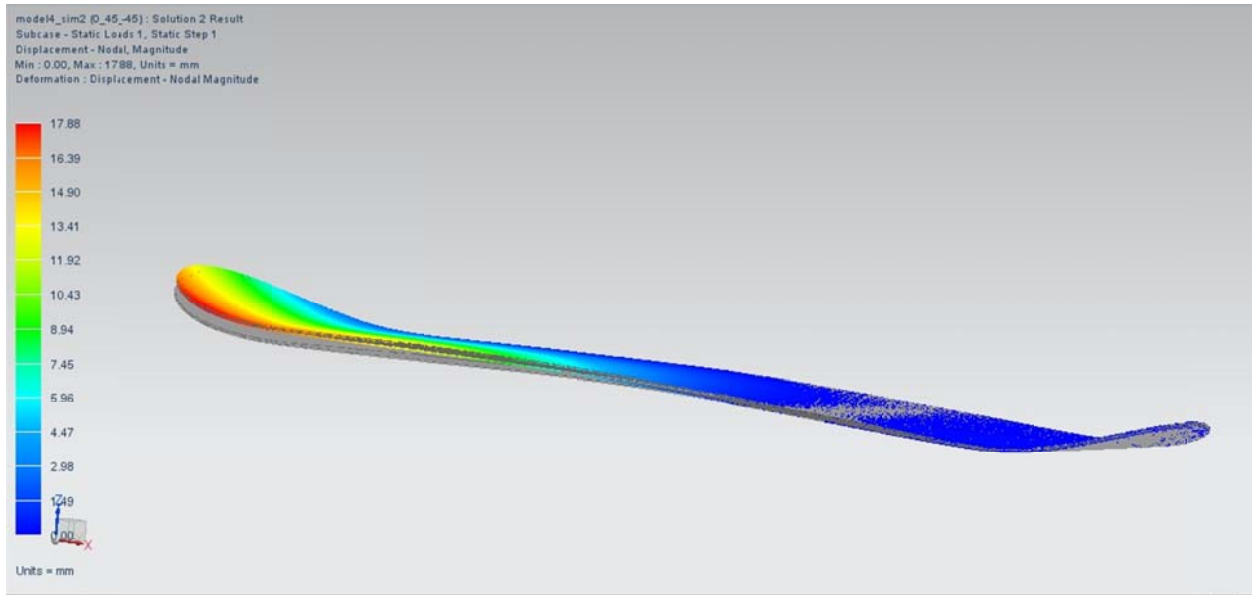
Συνήθης πρακτική για την παραγωγή σανίδων με αρκετά αυξημένη ακαμψία σε στρέψη που όμως να διατηρεί σε μεγάλο βαθμό την ελαστικότητα της σε κάμψη τριών σημείων, είναι η χρήση τριών στρώσεων αντί για δύο, με προσανατολισμό [0 / 45 / -45] αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα η επίδραση στην δεύτερη προσομοίωση είναι αισθητά πιο σημαντική από ότι στην πρώτη. Η μέγιστη μετατόπιση κάμψης είναι 67.5 mm ενώ για τη στρέψη περιορίζεται σε 17.9 mm .



Εικόνα 4.21 Μοντέλο 3: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



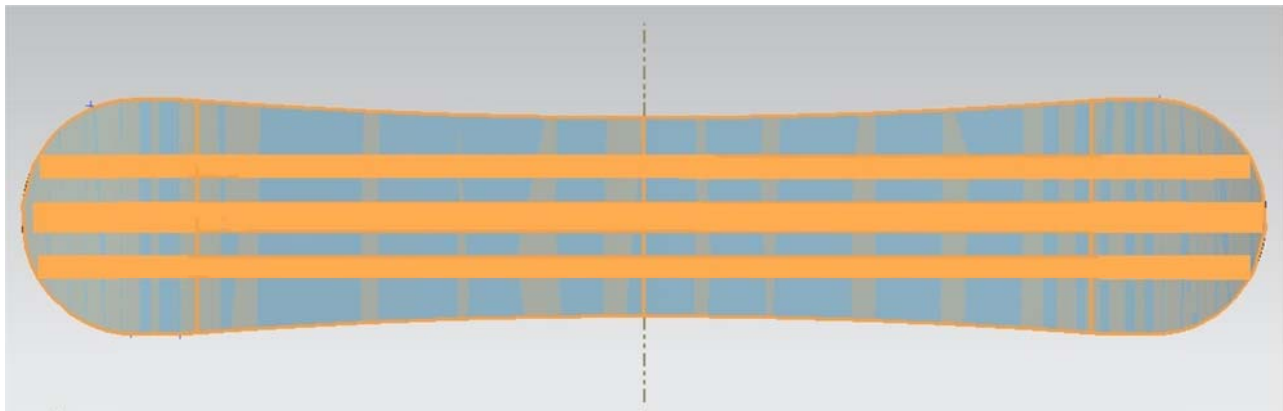
Εικόνα 4.22 Μοντέλο 3: Αποτέλεσμα στρέψης



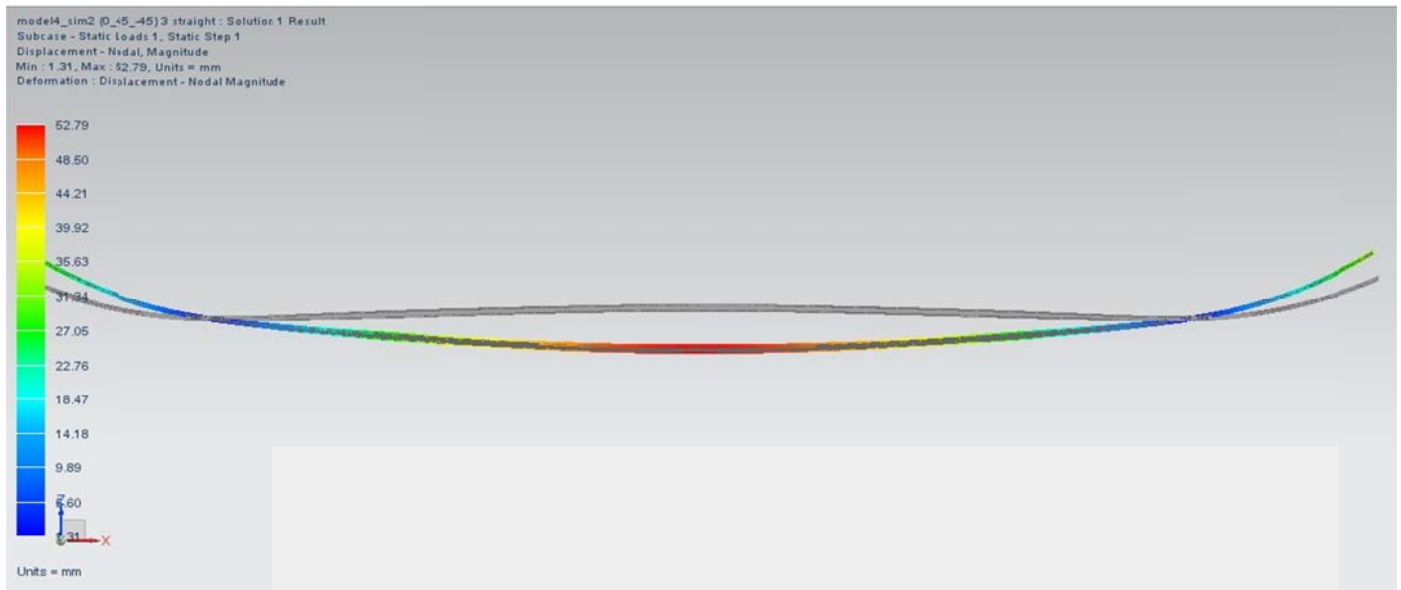
Εικόνα 4.23 Μοντέλο 3: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Μοντέλο 4

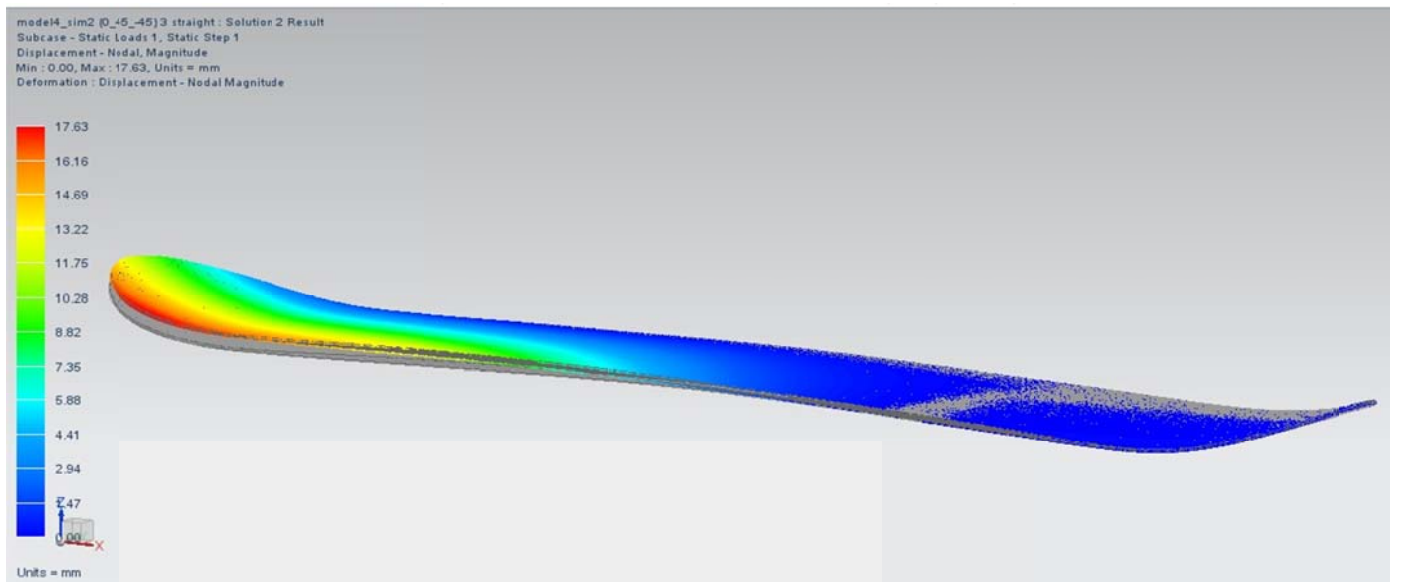
Για ακόμη μεγαλύτερη ακαμψία χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα λωρίδες σύνθετων με ενίσχυση ινών από ανθρακονήματα σε συνδιασμό με τα υαλονήματα προσανατολισμού [0 / 45 / -45]. Στην πρώτη τέτοια εφαρμογή επιλέχθηκε η χρήση 3 τέτοιων μονοδιευθυντικών λωρίδων με πλάτος 25 mm κατά μήκος της σανίδας που τοποθετήθηκαν στην επάνω μεριά της. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της μετατόπισης λόγω κάμψης στα 52.8 mm, ενώ αυτή στην περίπτωση της στρέψης παραμένει σχεδόν ίδια με πριν στα 17.65 mm.



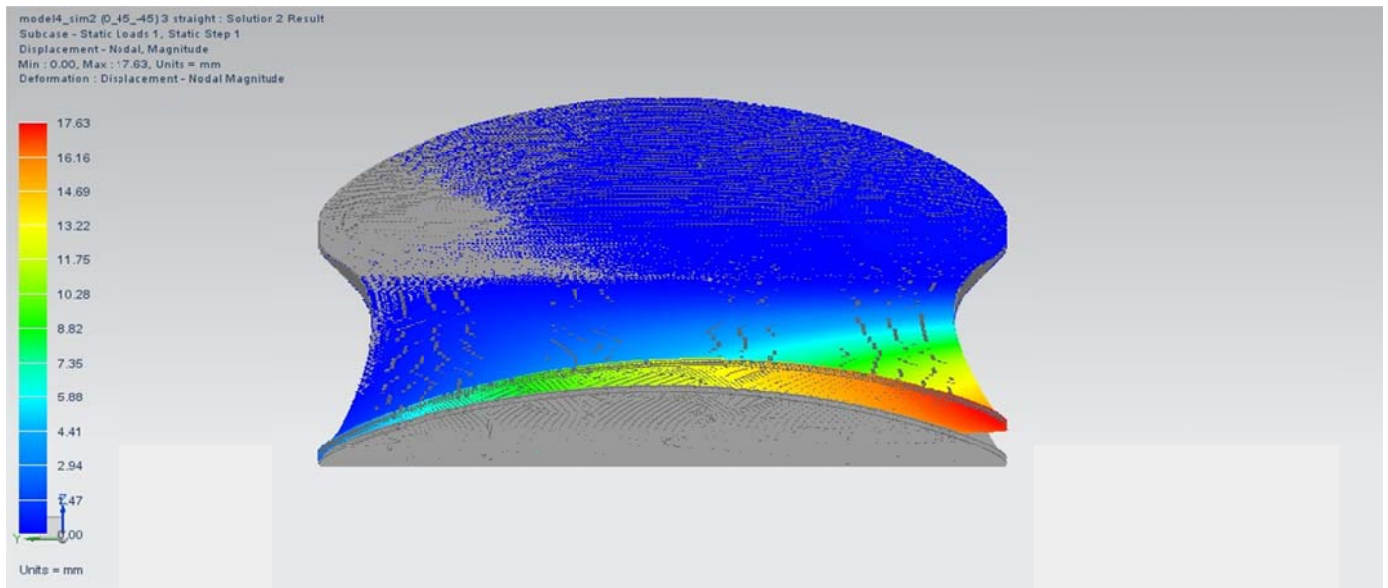
Εικόνα 4.24 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 4



Εικόνα 4.25 Μοντέλο 4: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



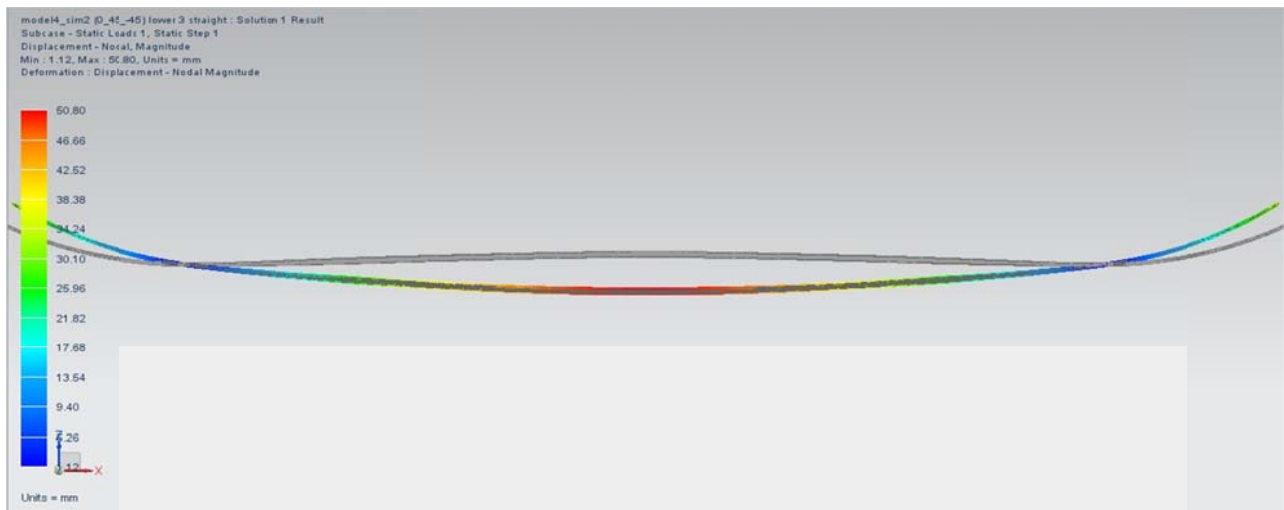
Εικόνα 4.26 Μοντέλο 4: Αποτέλεσμα στρέψης



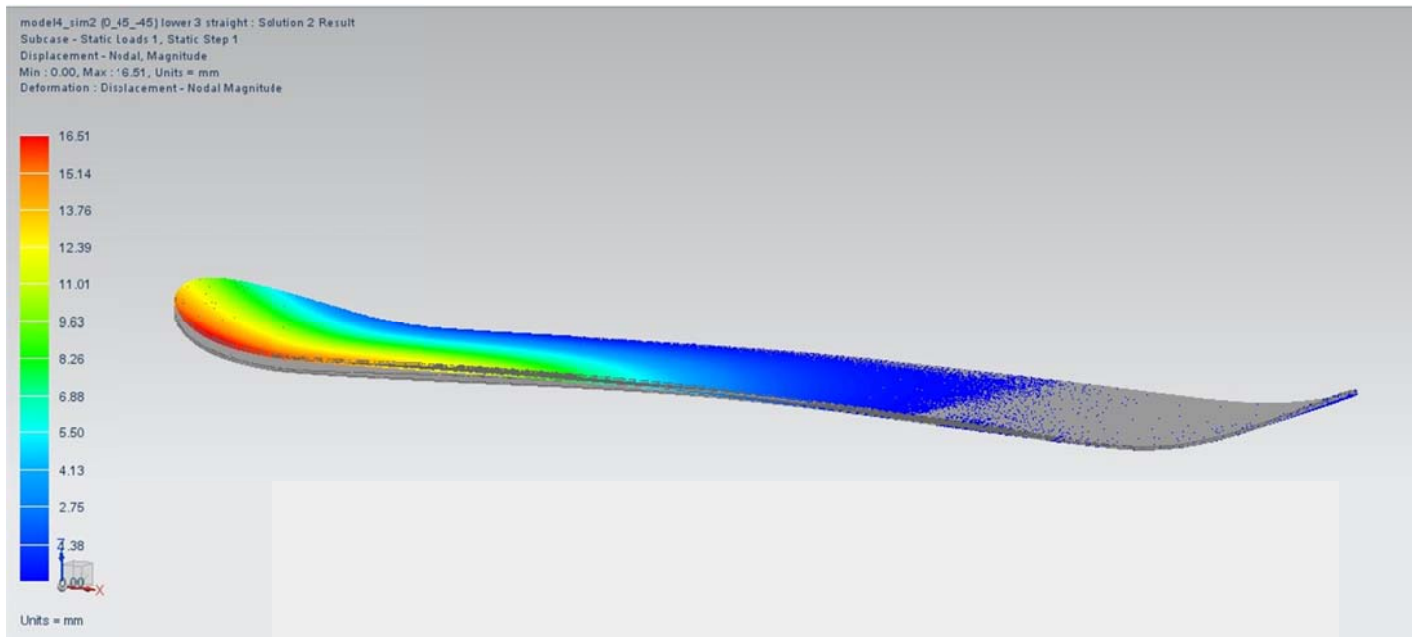
Εικόνα 4.27 Μοντέλο 4: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Μοντέλο 5

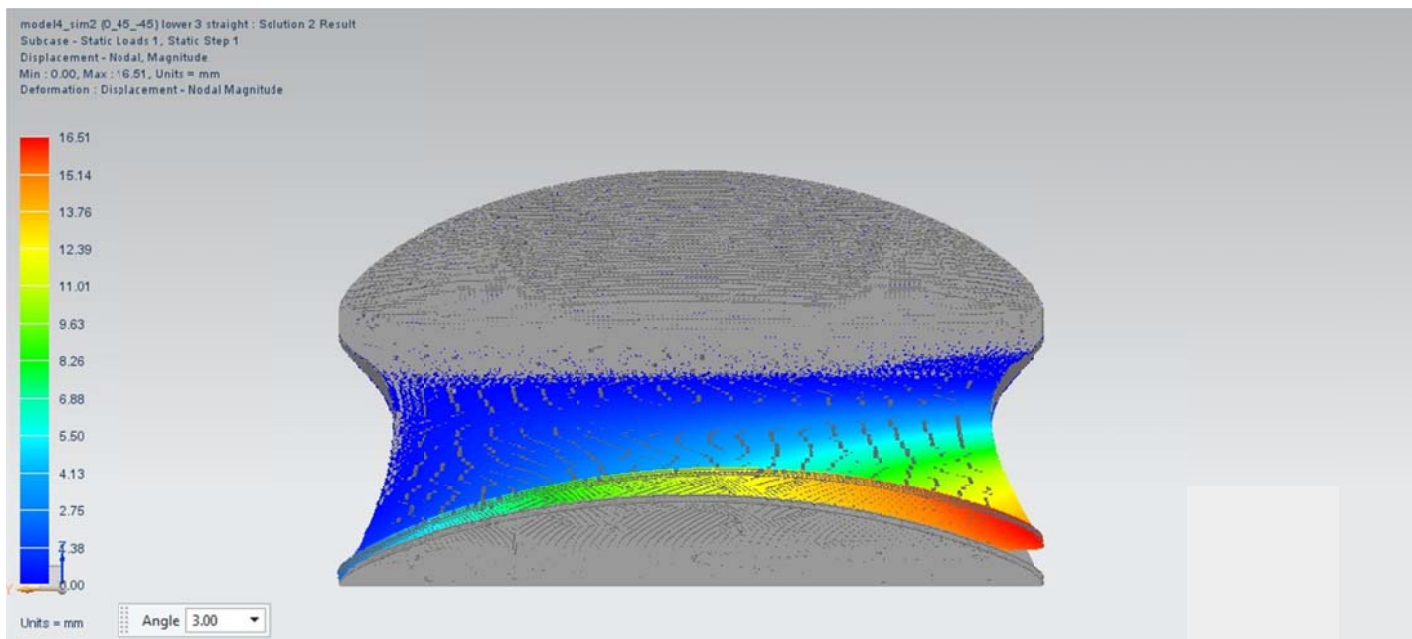
Τα υλικά σε αυτό το μοντέλο είναι τα ίδια με το προηγούμενο με τη διαφορά ότι οι τρεις λωρίδες ανθρακονημάτων τοποθετήθηκαν αυτή τη φορά στην κάτω μεριά της σανίδας με σκοπό να εξακριβωθεί εάν η αλλαγή αυτή επηρεάζει την ελαστικότητα της σανίδας. Διαπιστώθηκε μικρή αύξηση της ακαμψίας σε κάμψη με την μέγιστη μετατόπιση να φτάνει τα 50.8 mm ενώ η αύξηση της ακαμψίας σε στρέψη εμφανίζεται μεγαλύτερη με μέγιστη τιμή μετατόπισης 16.5 mm.



Εικόνα 4.28 Μοντέλο 5: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



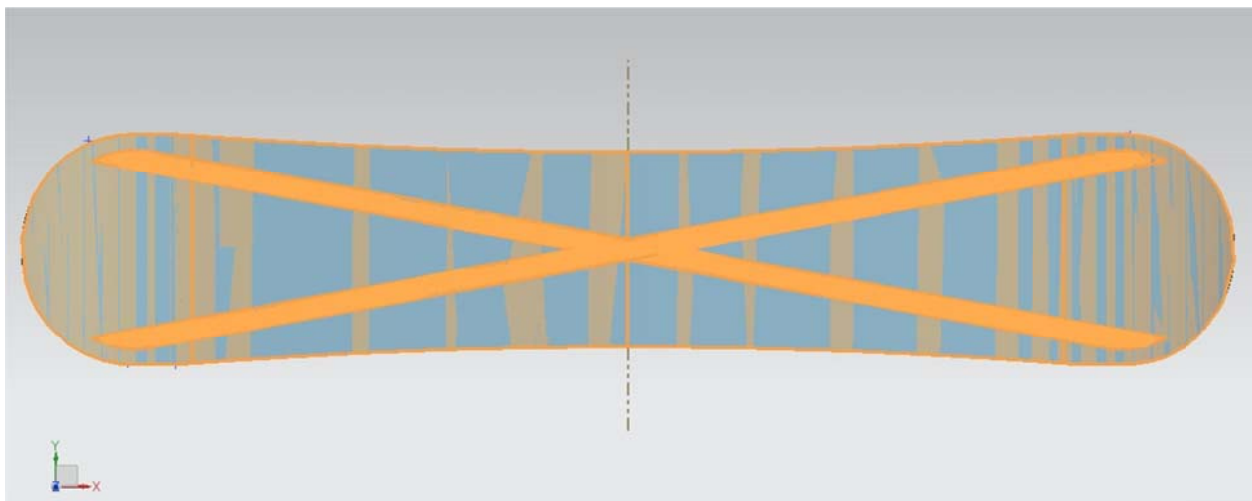
Εικόνα 4.29 Μοντέλο 5: Αποτέλεσμα στρέψης



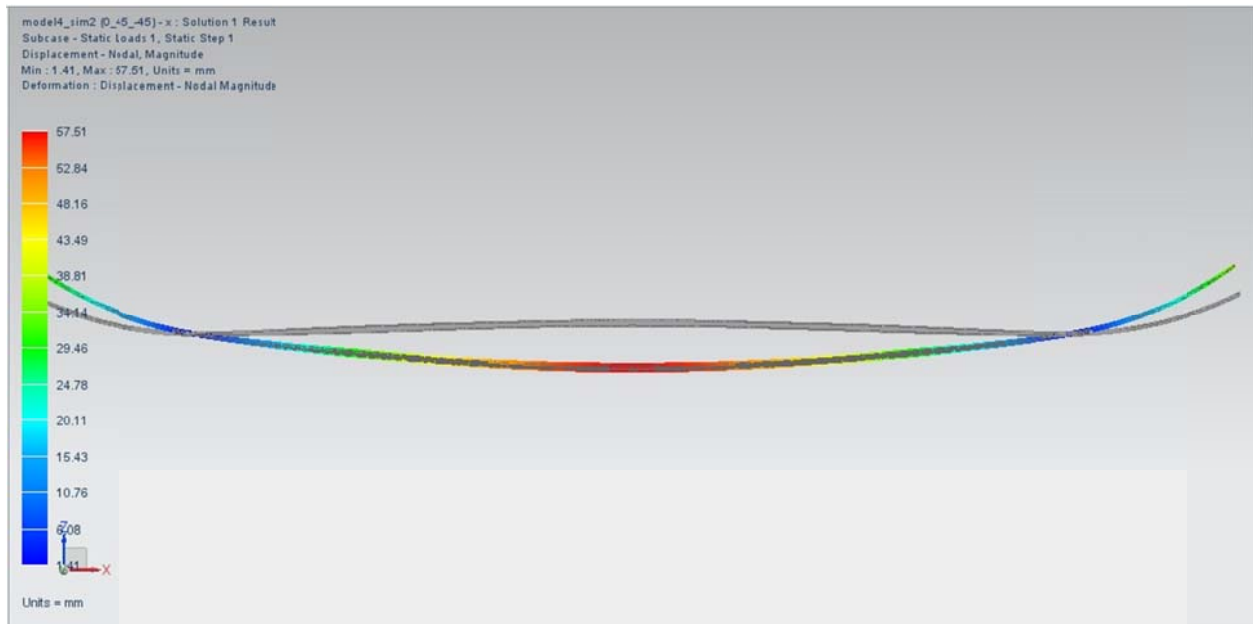
Εικόνα 4.30 Μοντέλο 5: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Μοντέλο 6

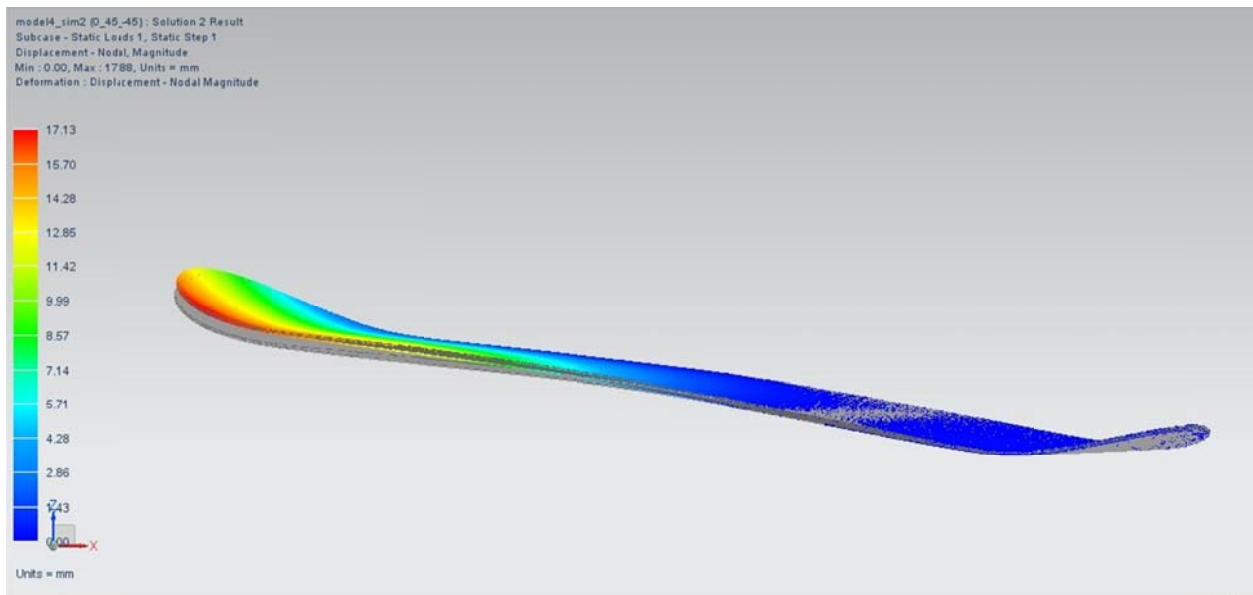
Οι λωρίδες ανθρακονημάτων τοποθετούνται διαγώνια στην επάνω πλευρά της σανίδας. Οι στρώσεις πάνω και κάτω από τον πυρήνα ξύλου παραμένουν οι ίδιες με προσανατολισμό [0/45/-45]. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός ενδείκνυται για μια σανίδα αρκετά σε κάμψη, αλλά με υψηλότερη ακαμψία σε στρέψη, αφού οι μέγιστες μετατοπίσεις που παρατηρούνται είναι 57.5 και 17.1 mm αντίστοιχα.



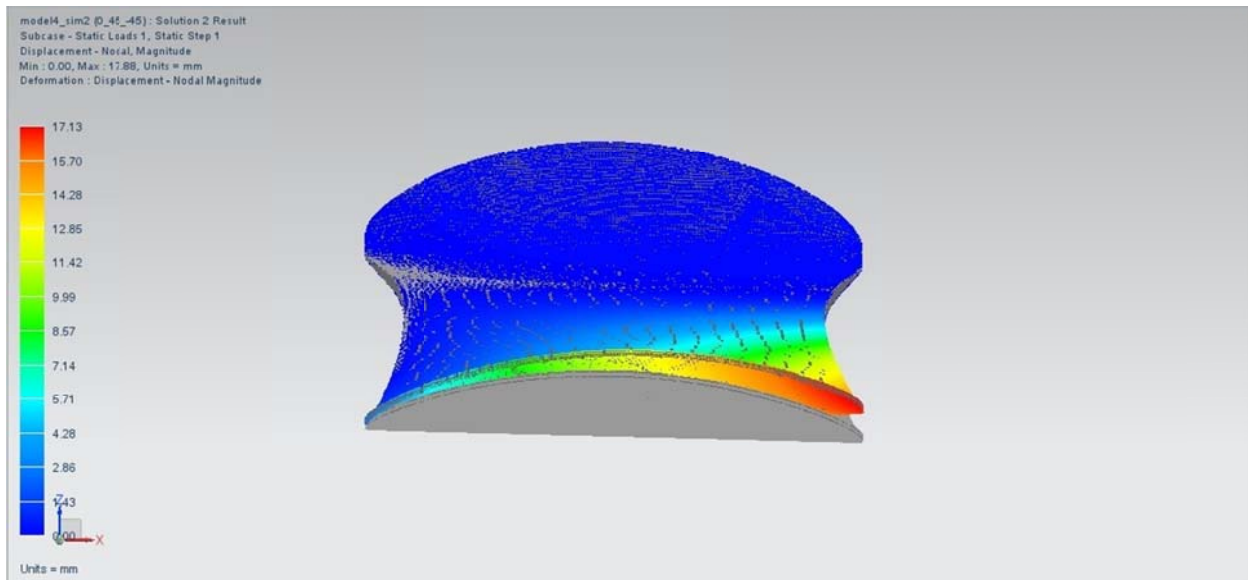
Εικόνα 4.31 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 6



Εικόνα 4.32 Μοντέλο 6: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



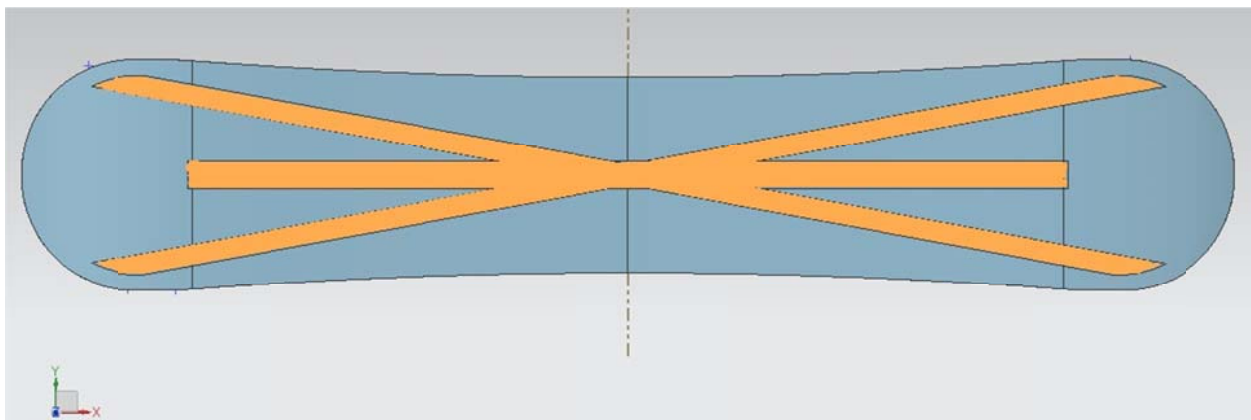
Εικόνα 4.33 Μοντέλο 6: Αποτέλεσμα στρέψης



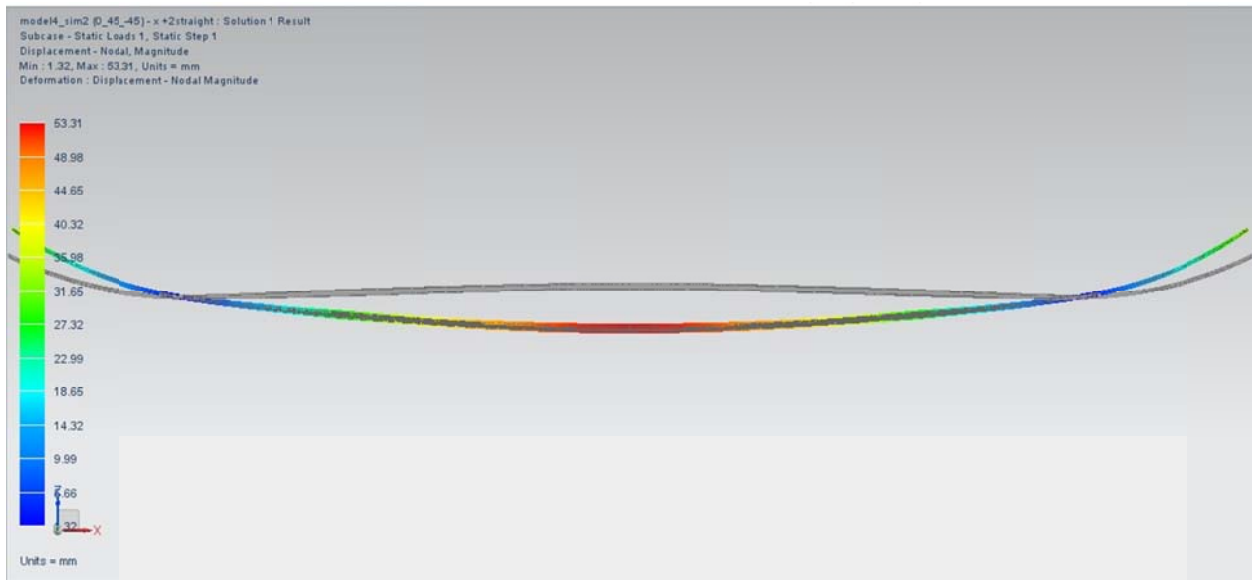
Εικόνα 4.34 Μοντέλο 6: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Μοντέλο 7

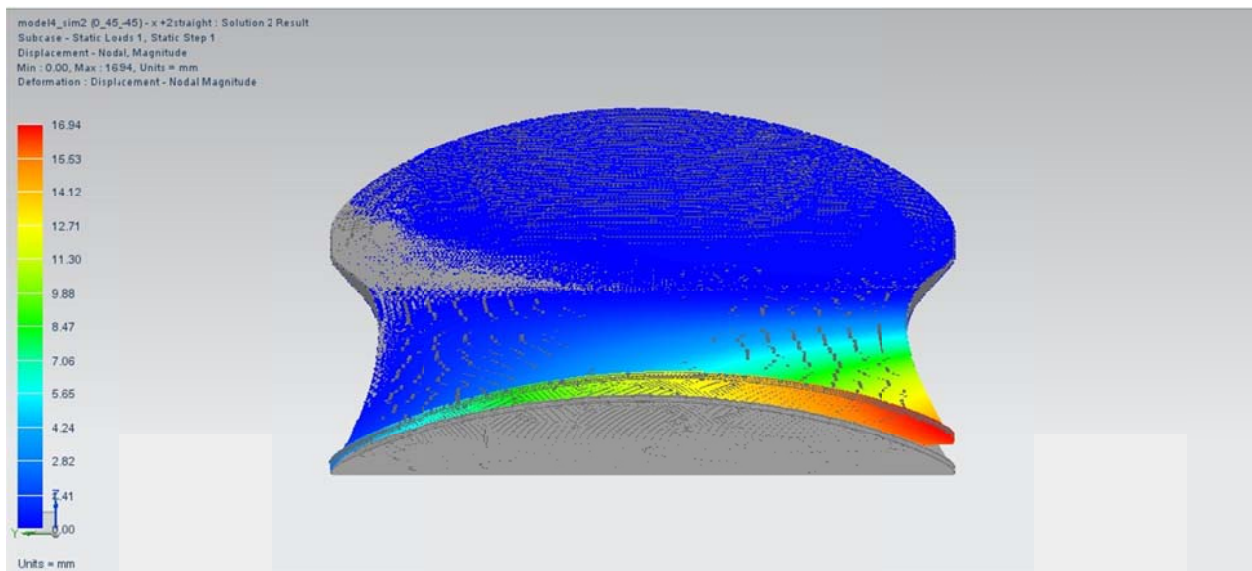
Μια ακόμα δοκιμή έγινε με συνδυασμό της σχεδίασης του μοντέλου 6 και την προσθήκη μίας αντίστοιχης κεντρικής λωρίδας. Ο προσανατολισμός των ινών όπως αναφέρθηκε και προηγουμένα είναι πάντα παράλληλος με τον διαμήκη άξονα της λωρίδας. Τα μεγέθη των μετατοπίσεων που παίρνουμε από τις προσομοιώσεις είναι 53.31 και 16.94 για κάμψη και στρέψη αντίστοιχα.



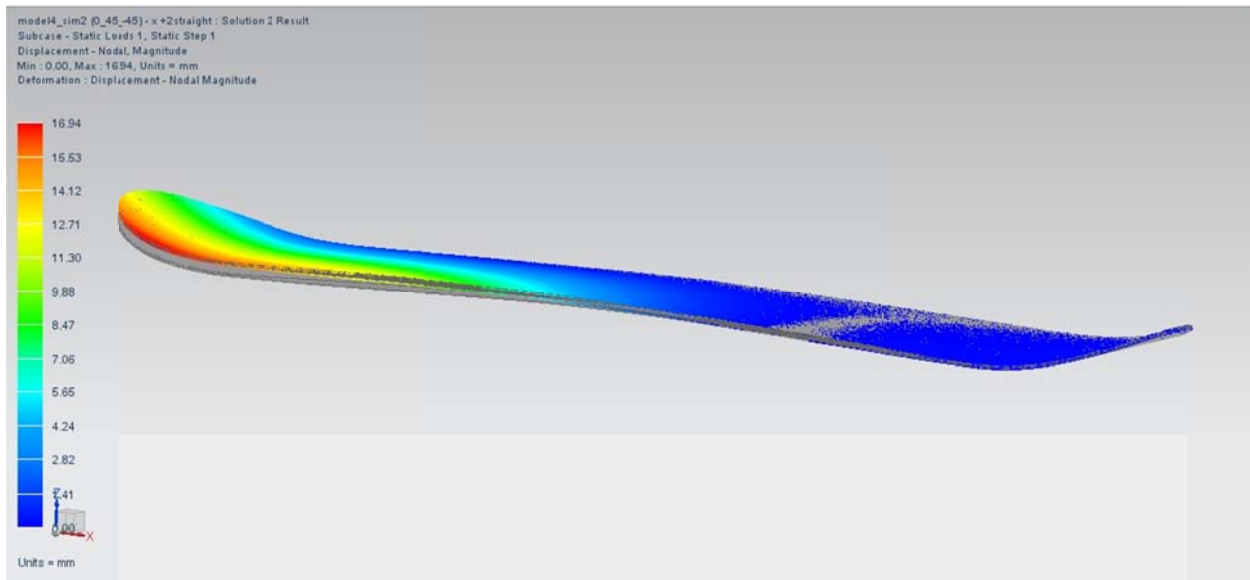
Εικόνα 4.35 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 7



Εικόνα 4.36 Μοντέλο 7: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



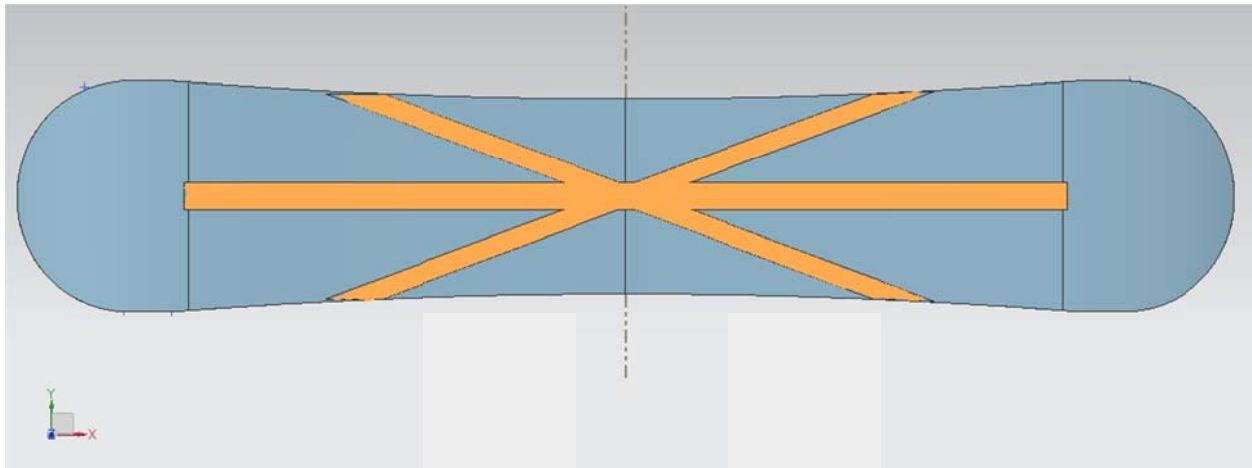
Εικόνα 4.37 Μοντέλο 7: Αποτέλεσμα στρέψης



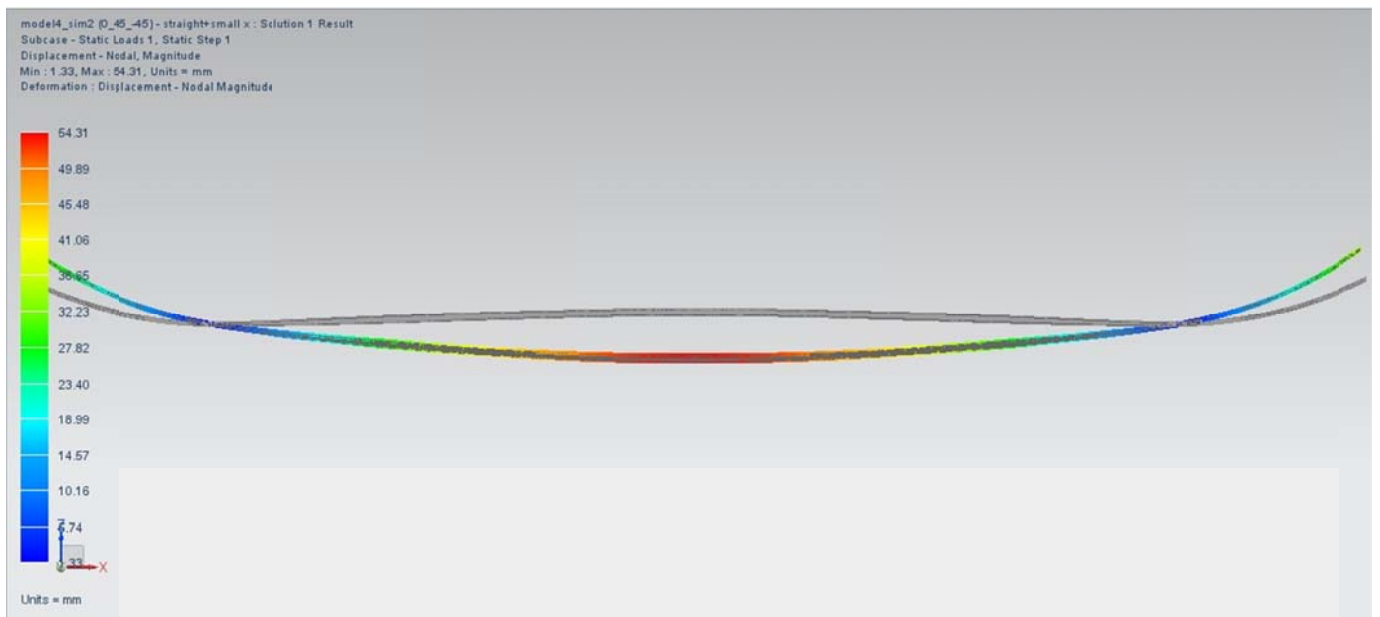
Εικόνα 4.38 Μοντέλο 7: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Μοντέλο 8

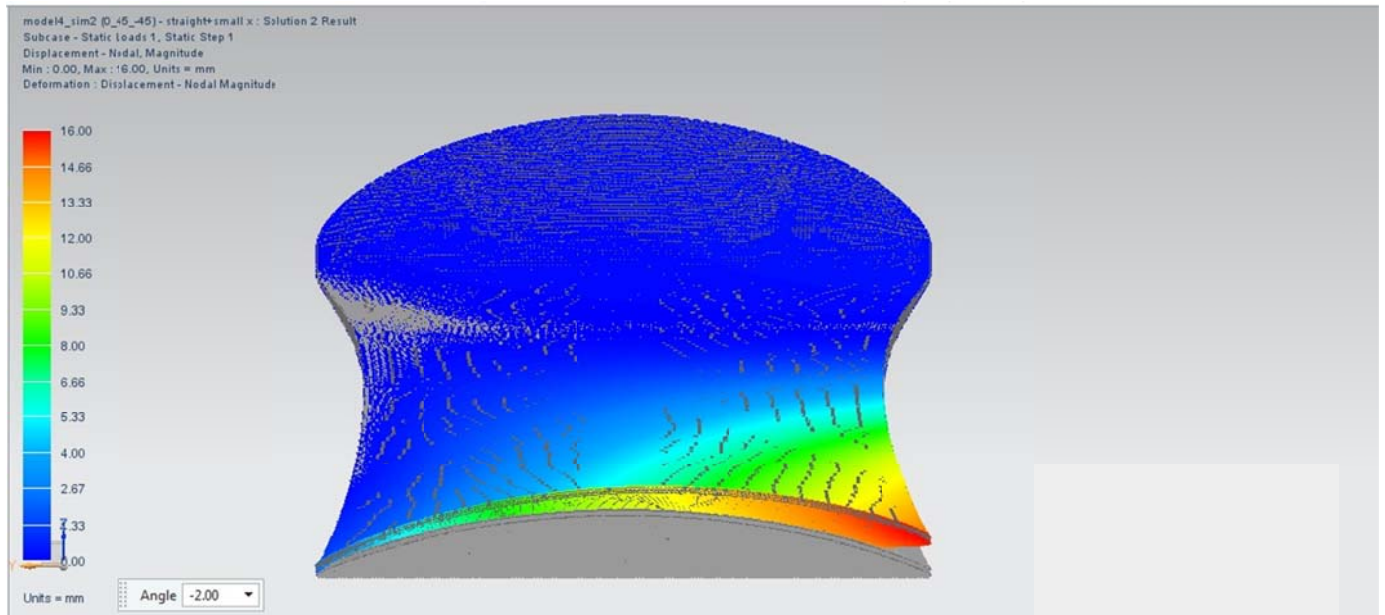
Με το σκεπτικό ότι οι δυνάμεις που δέχεται η σανίδα από τον αθλητή ξεκινούν από τις περιοχές που βιδώνονται οι δέστρες, σχεδιάστηκε μια παραλλαγή του προηγούμενου μοντέλου με τις διαγώνιες λωρίδες να περιορίζονται μεταξύ αυτών των περιοχών. Αυτό είχε σαν συνέπεια σχετικά μικρή μείωση της ακαμψίας στην πρώτη προσομοίωση και σημαντικότερη αύξηση της ακαμψίας σε συνθήκες στρέψης. Οι μέγιστες μετατοπίσεις 54.31 και 16.00 mm.



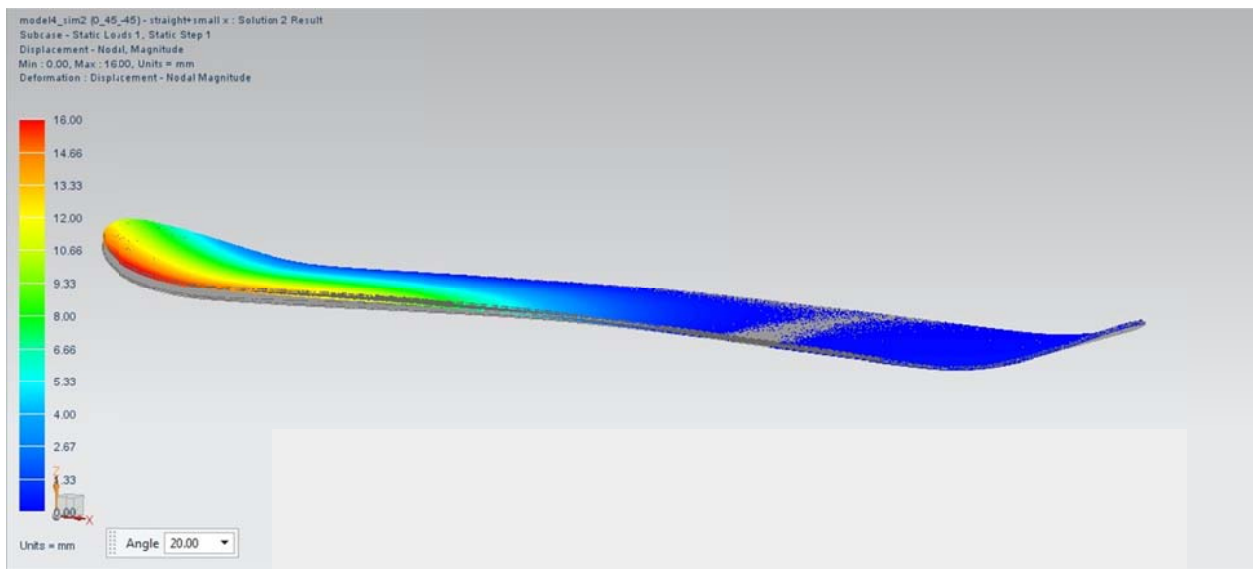
Εικόνα 4.39 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 8



Εικόνα 4.40 Μοντέλο 8: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



Εικόνα 4.41 Μοντέλο 8: Αποτέλεσμα στρέψης

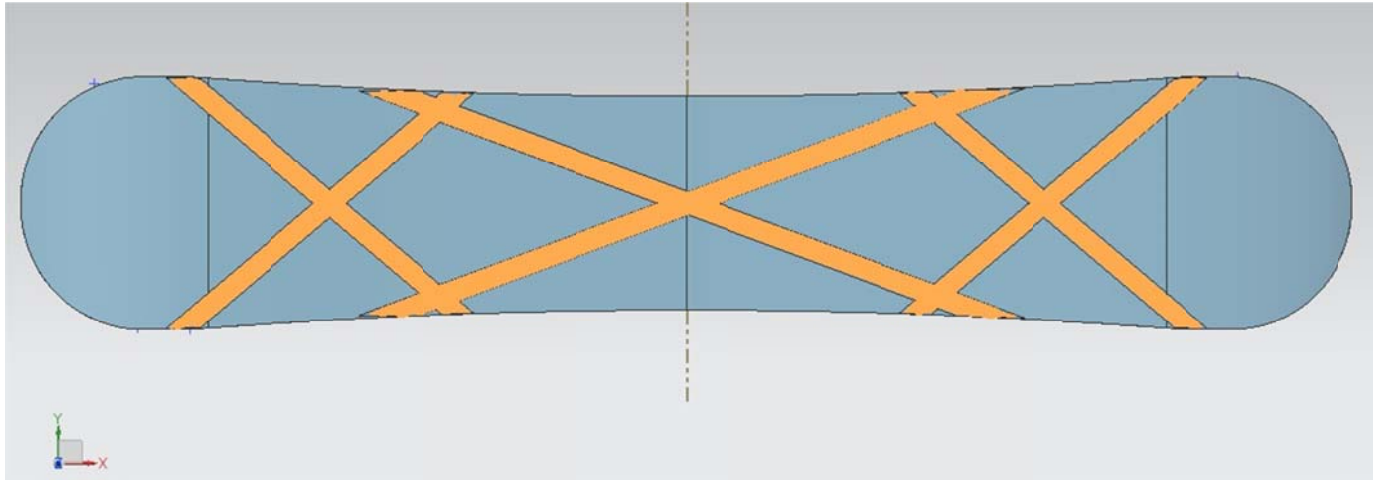


Εικόνα 4.42 Μοντέλο 8: Αποτέλεσμα στρέψης 2

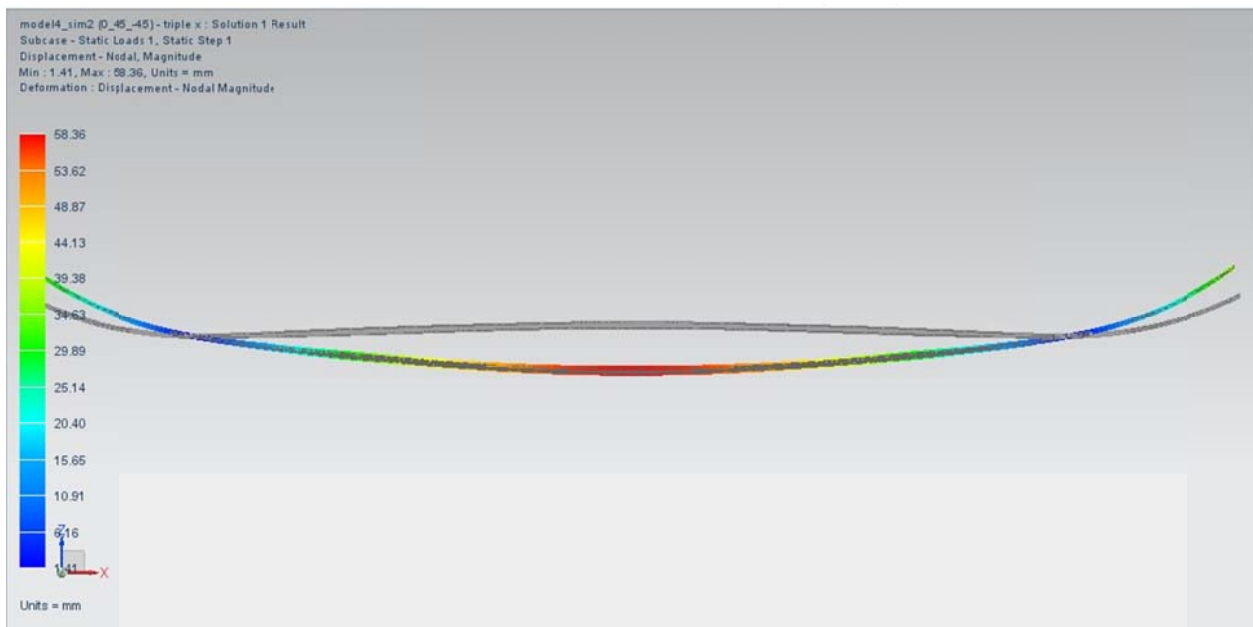
Μοντέλο 9

Στην τελευταία περίπτωση που μελετήθηκε σχεδιάστηκαν 3 ζεύγη διαγώνιων ενισχύσεων που σχηματίζουν μεταξύ τους Χ όπως φαίνεται στην εικόνα. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκουμε

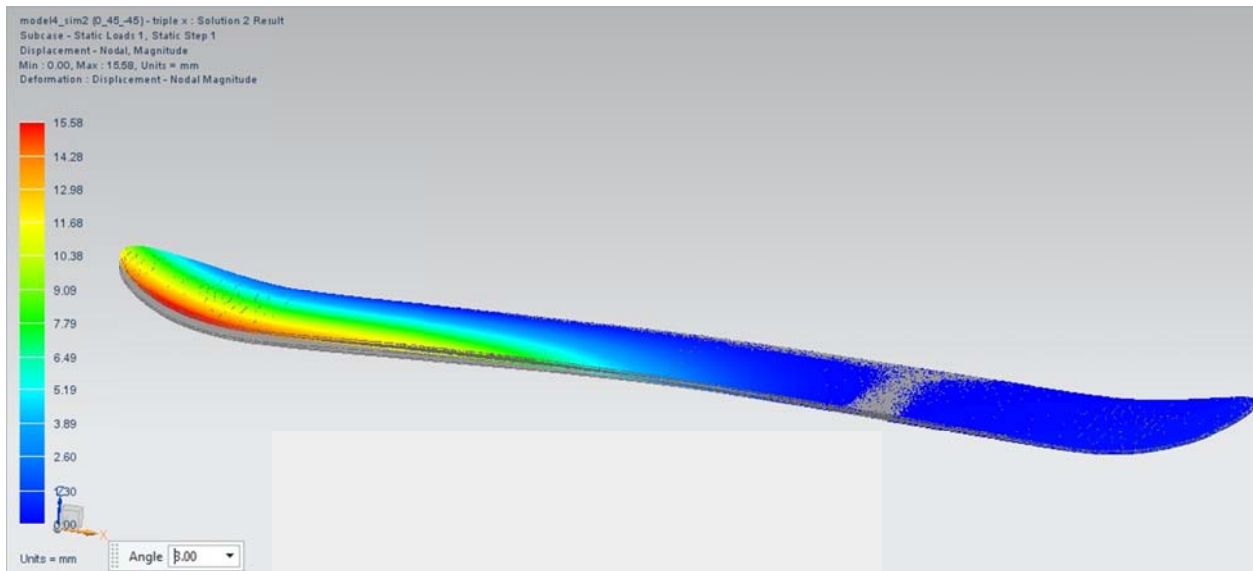
αύξηση της ακαμψίας σε στρέψη χωρίς να επηρεαστεί σημαντικά η συμπεριφορά σε κάμψη. Πράγματι συνέπεια της έλλειψης ινών ενίσχυσης κατά των διαμήκη άξονα της σανίδας είναι η μετατόπιση στην πρώτη δοκιμή να φτάνει τα 58.36 mm. Αντίστοιχα η αυξημένη διαγώνια ενίσχυση περιορίζει τη μετατόπιση στα 15.50 mm.



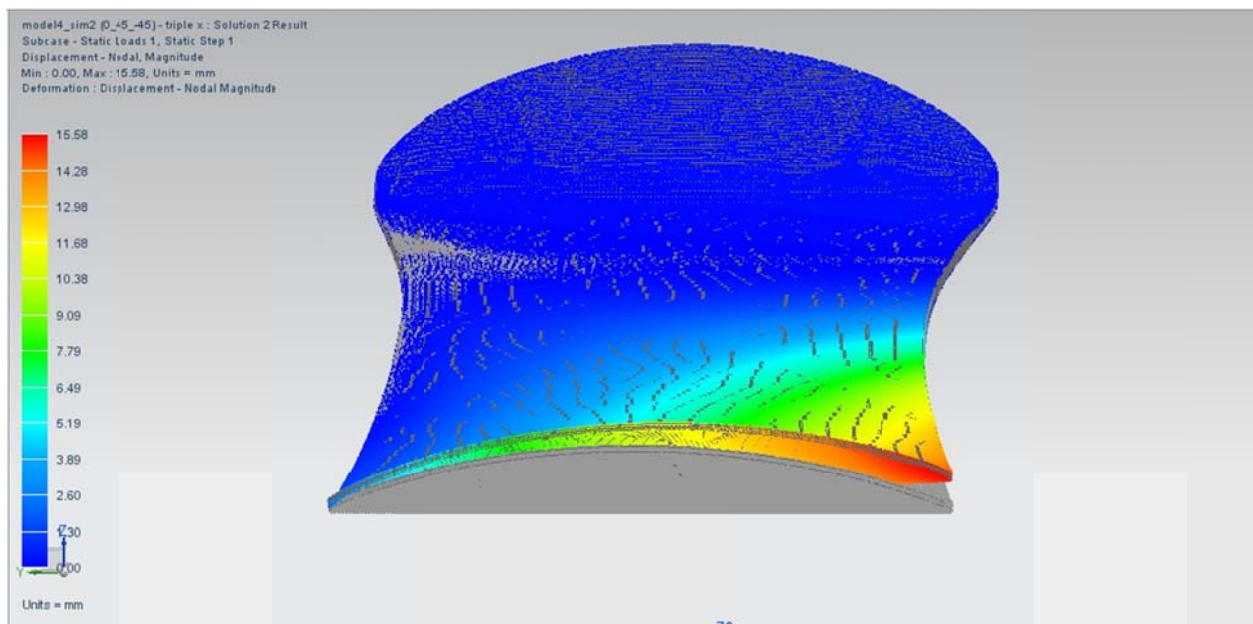
Εικόνα 4.43 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 9



Εικόνα 4.44 Μοντέλο 9: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη



Εικόνα 4.45 Μοντέλο 9: Αποτέλεσμα στρέψης



Εικόνα 4.46 Μοντέλο 9: Αποτέλεσμα στρέψης 2

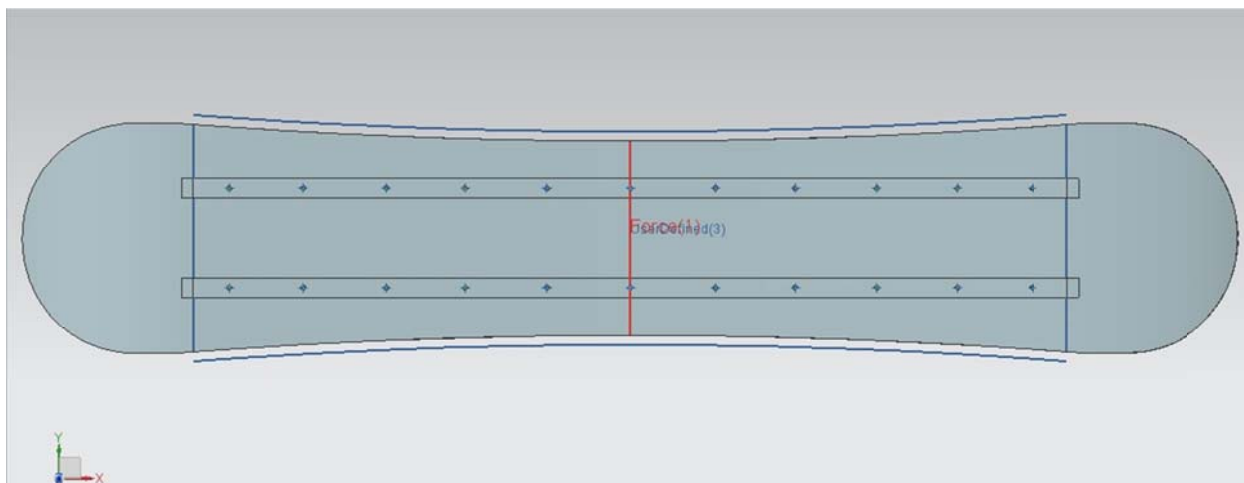
4.6.2 Αφαιρούμενες ενισχύσεις

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας μελετάται η περίπτωση σχεδιασμού χιονοσανίδας με αφαιρούμενες λωρίδες ενίσχυσης από σύνθετα υλικά. Οι λωρίδες αντί να κολληθούν πάνω

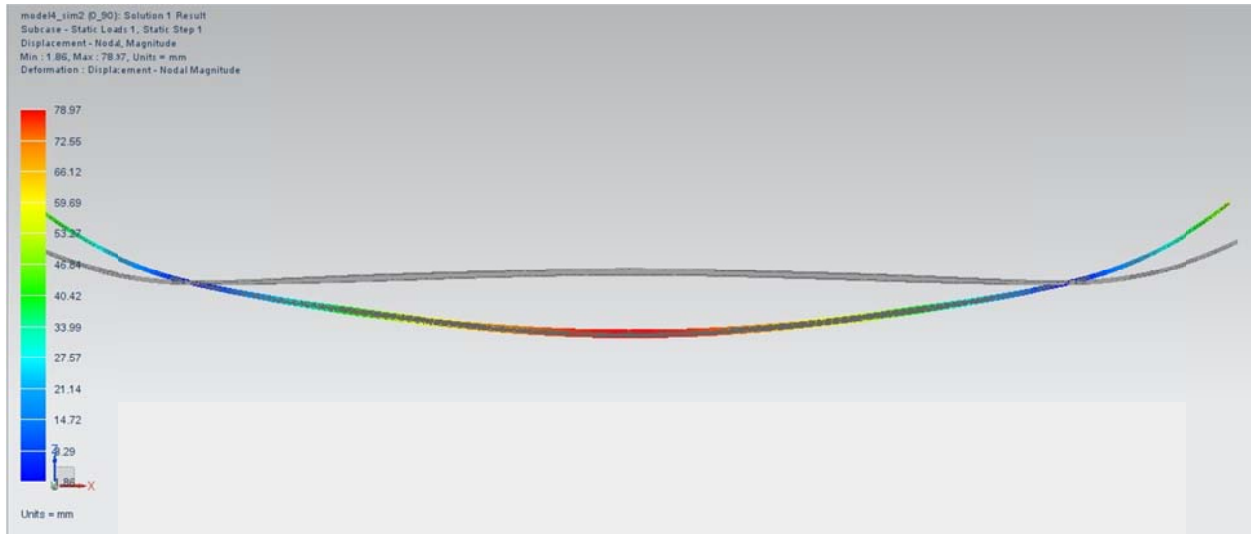
στη σανίδα κατά την κατασκευή της βιδώνονται σε συγκεκριμένα σημεία πάνω σε αυτή, ώστε ο αθλητής να μπορεί να αλλάξει τη σκληρότητα κατά βούληση ανάλογα με την επιφάνεια του χιονιού και το είδος κατάβασης που επιθυμεί. Σκοπός είναι να προσδιοριστεί αν είναι δυνατή η μεταβολή της συμπεριφοράς της χιονοσανίδας με αυτόν τον τρόπο και σε ποιο βαθμό.

Μοντέλο A

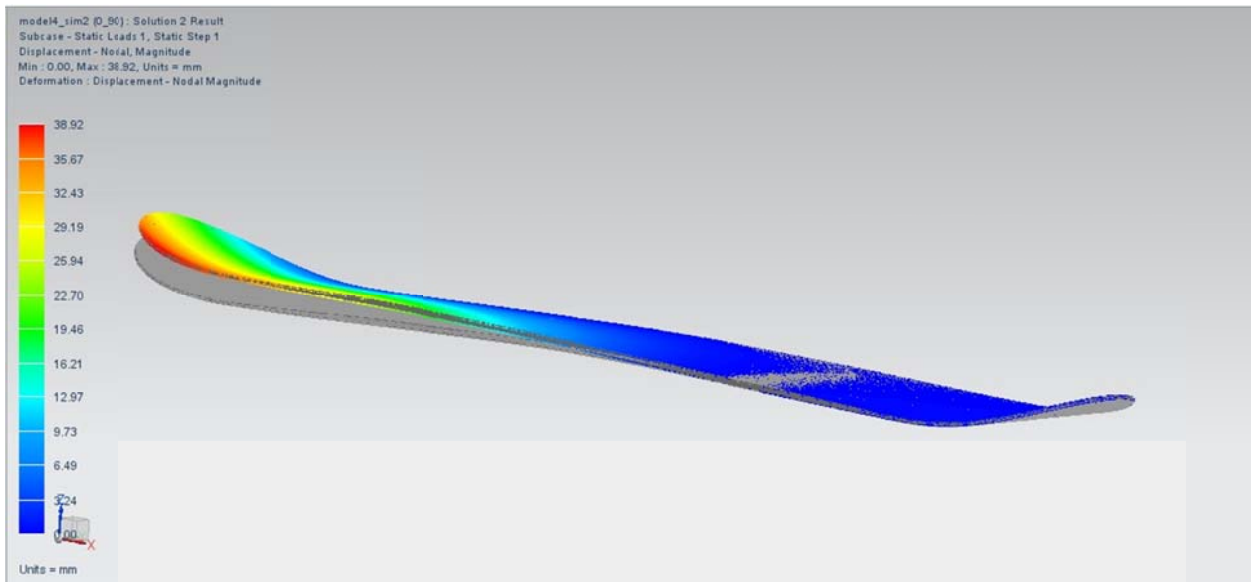
Για την δυνατότητα χρήσης αφαιρούμενων ενισχύσεων σε μία αρχικά αρκετά ελαστική σανίδα, επιλέχθηκε η περίπτωση του μοντέλου 2 της προηγούμενης ενότητας. Δημιουργήθηκαν οι υποδοχές στις οποίες θα βιδωθούν οι ενισχύσεις και τα ξεχωριστά σώματα δύο ευθείων λωρίδων ενίσχυσης. Έγινε αρχικά δοκιμή για τη συμπεριφορά χωρίς τις λωρίδες με τα αποτελέσματα να κινούνται στα επίπεδα του μοντέλου 2 όπως αναμενόταν, δηλαδή 79 και 39mm αντίστοιχα. Μετά την εισαγωγή στο σχεδιασμό των ενισχύσεων και των περιορισμών που περιγράφουν τη σύνδεσή τους μέσω βιδών στο σώμα της σανίδας επαναλήφθηκε η δοκιμή και το πρόγραμμα επέστρεψε τα αποτελέσματα που φαίνονται στα επόμενες εικόνες. Οι μέγιστες μετατοπίσεις εμφανίζονται περιορισμένες στα 67.40 και 24.46 mm.



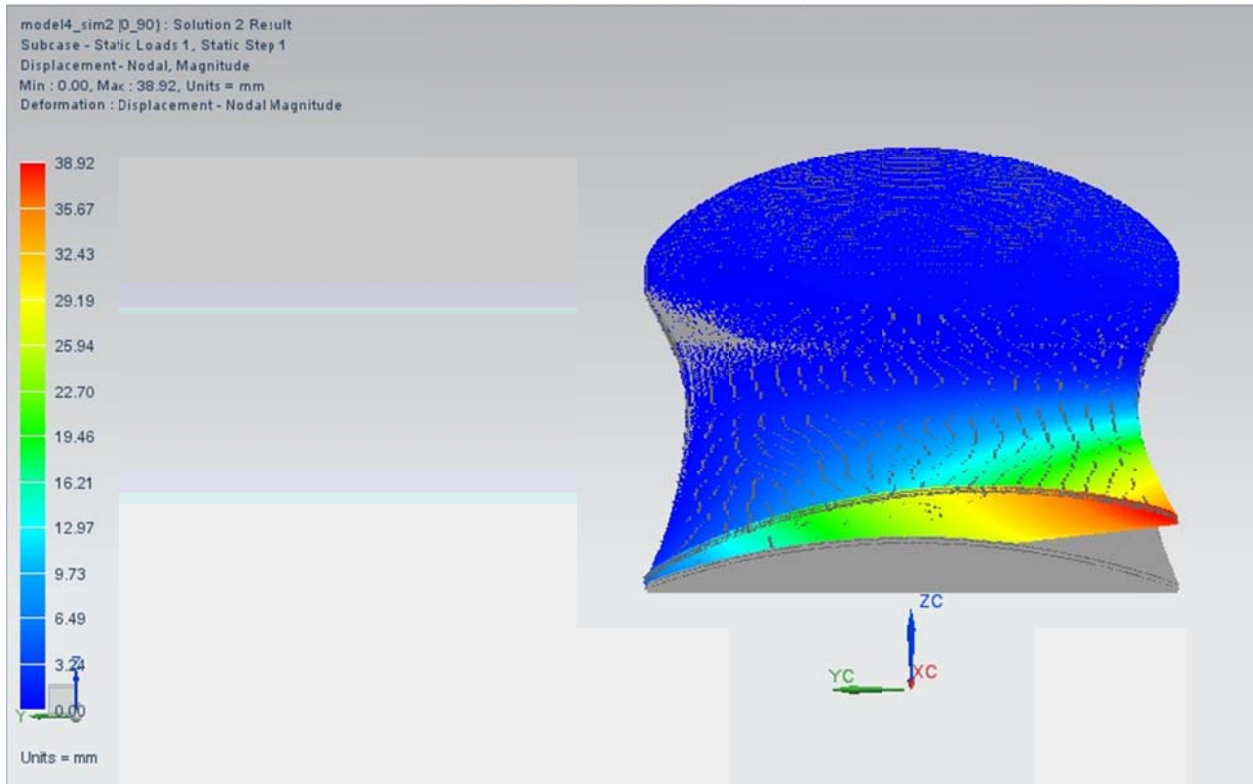
Εικόνα 4.47 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου A



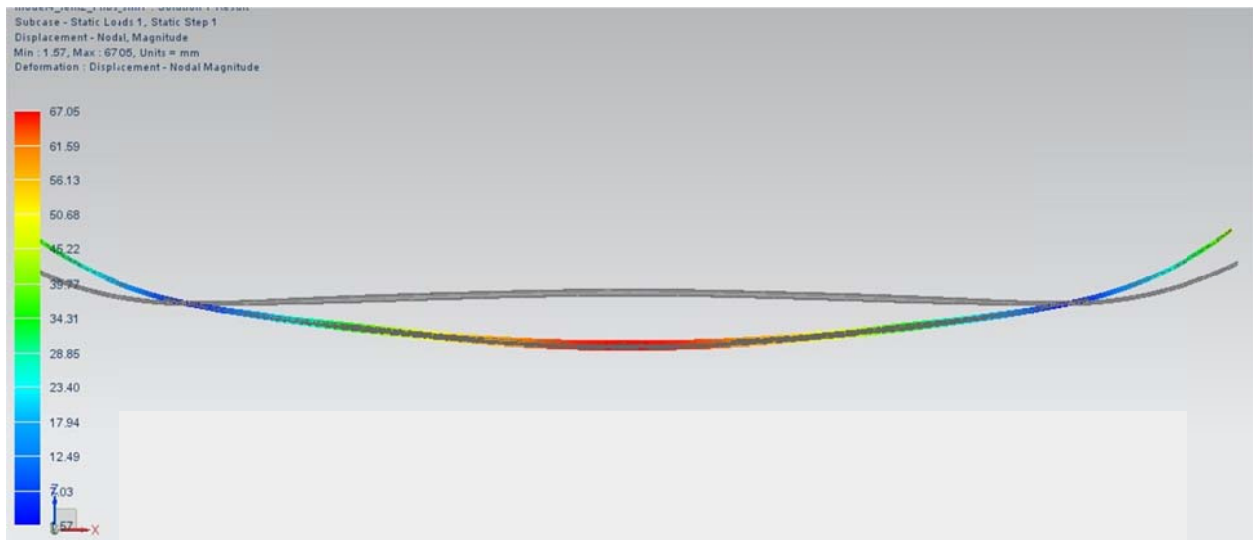
Εικόνα 4.48 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα κάμψης χωρίς ενισχύσεις πλάγια όψη



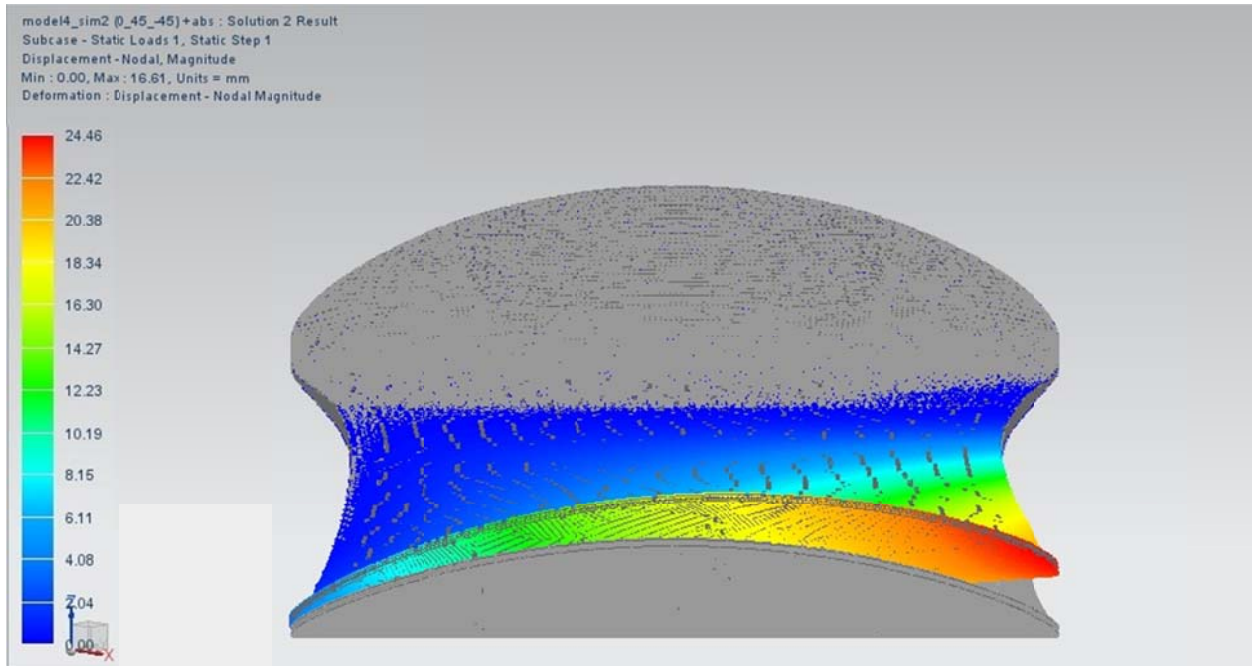
Εικόνα 4.49 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα στρέψης χωρίς ενισχύσεις



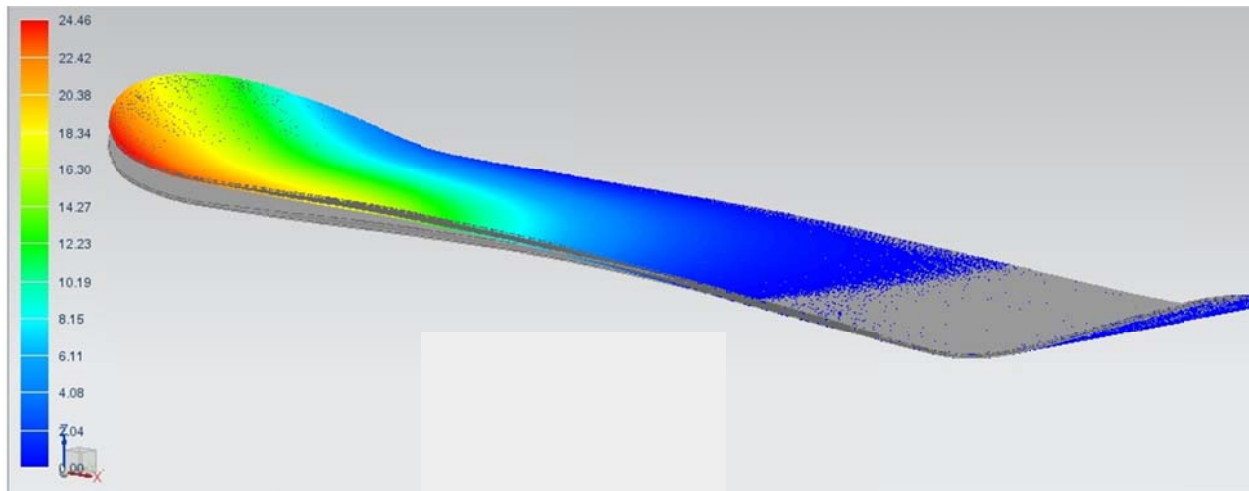
Εικόνα 4.50 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα στρέψης χωρίς ενισχύσεις 2



Εικόνα 4.51 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα κάμψης με ενισχύσεις πλάγια όψη



Εικόνα 4.52 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα στρέψης με ενισχύσεις

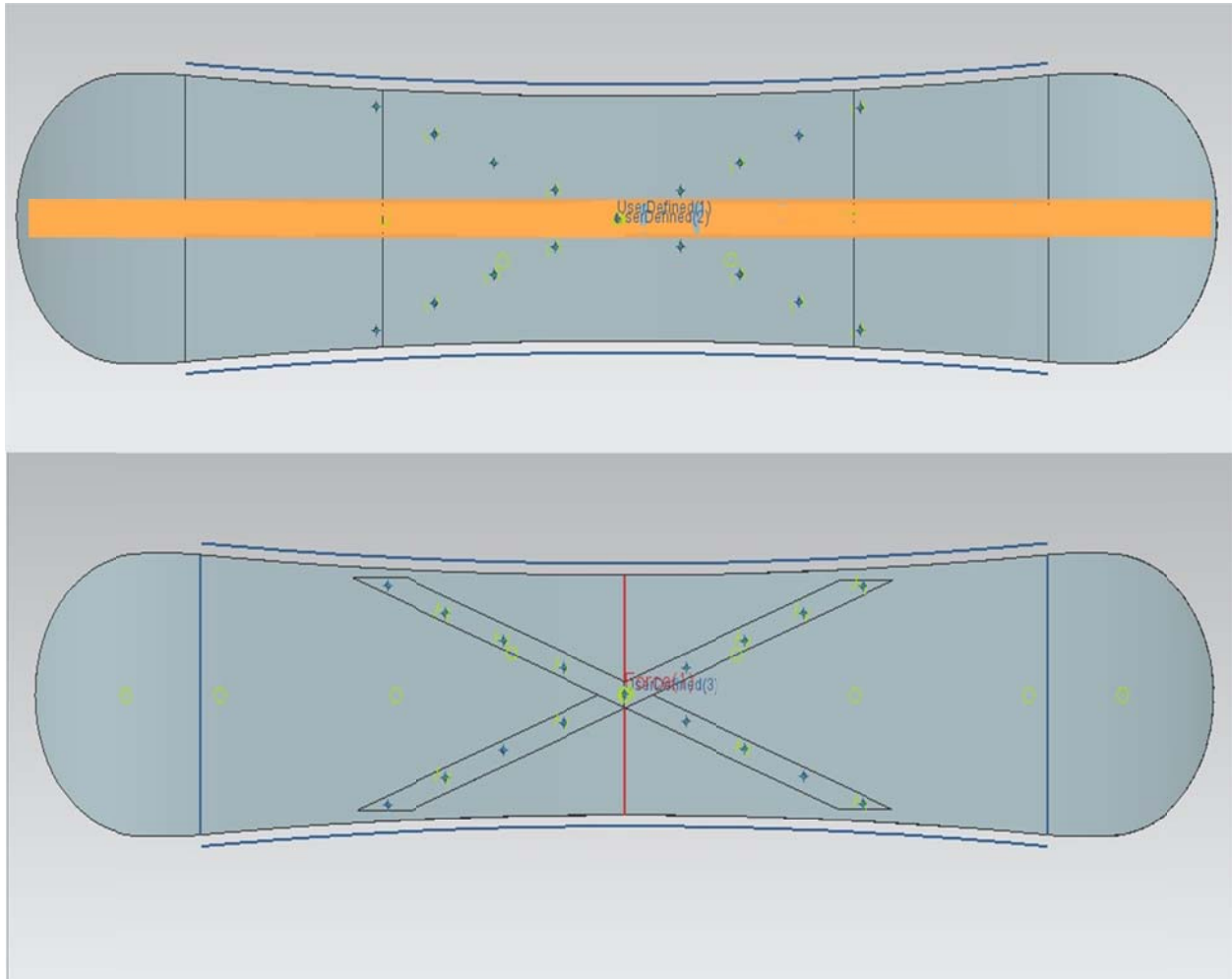


Εικόνα 4.53 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα στρέψης με ενισχύσεις 2

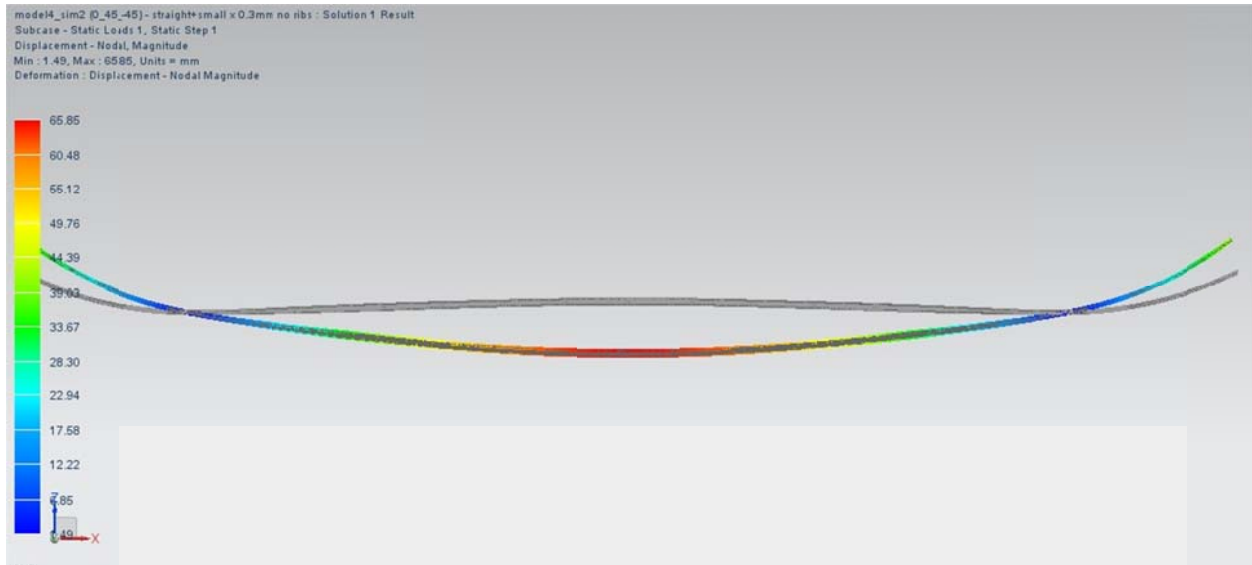
Μοντέλο B

Η πιθανότητα της περαιτέρω ενίσχυσης μιας σανίδας μέτριας σκληρότητας διερευνήθηκε μέσω μιας σανίδας αντίστοιχης αυτής του μοντέλου 3 της προηγούμενης ενότητας, δηλαδή με τρεις στρώσεις υαλοϋφάσματος προσανατολισμού (0/45/-45) πάνω και κάτω από τη σανίδα

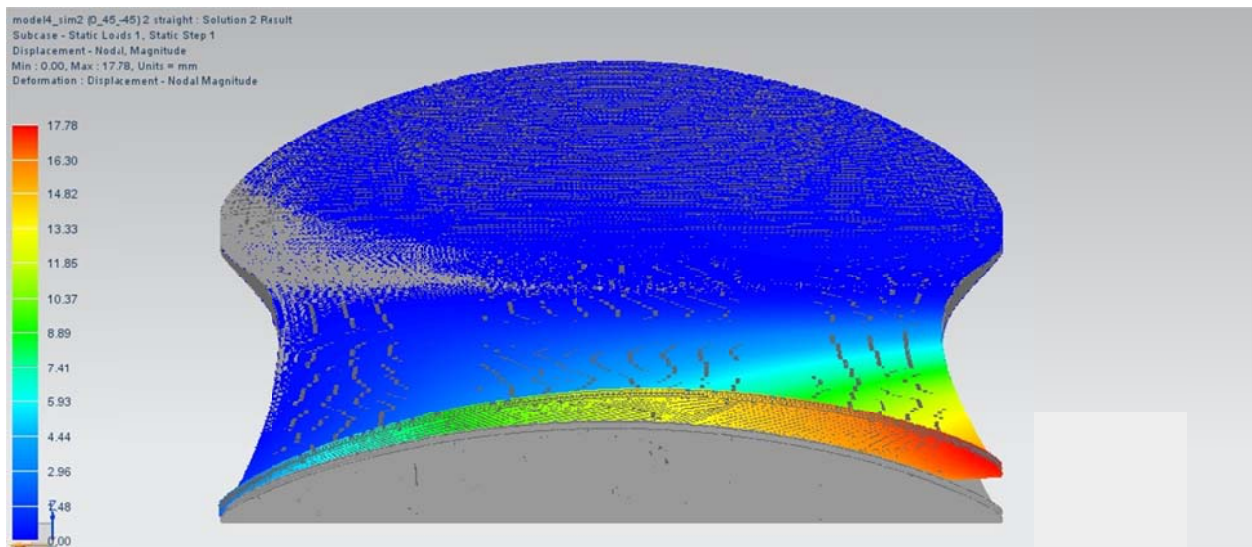
και μια επιπλέον κεντρική λωρίδα με ίνες άνθρακα στο κάτω μέρος. Η αφαιρούμενες ενισχύσεις σχεδιάστηκαν σε μορφή Χ ανάμεσα στις περιοχές στερέωσης των δεστών και δημιουργήθηκαν οι αναγκαίες υποδοχές στη σανίδα για να τοποθετηθούν οι βίδες. Η πρώτη επίλυση χωρίς τις ενισχύσεις έδωσε μέγιστες τιμές μετατοπίσεων 65.85 και 17.78 mm. Όταν ορίστηκαν τα δεδομένα για τη σύνδεση των ενισχύσεων στη σανίδα το πρόγραμμα υπολόγισε ότι οι μετατοπίσεις μειώνονται σε 61.42 και 16.92 αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στις εικόνες.



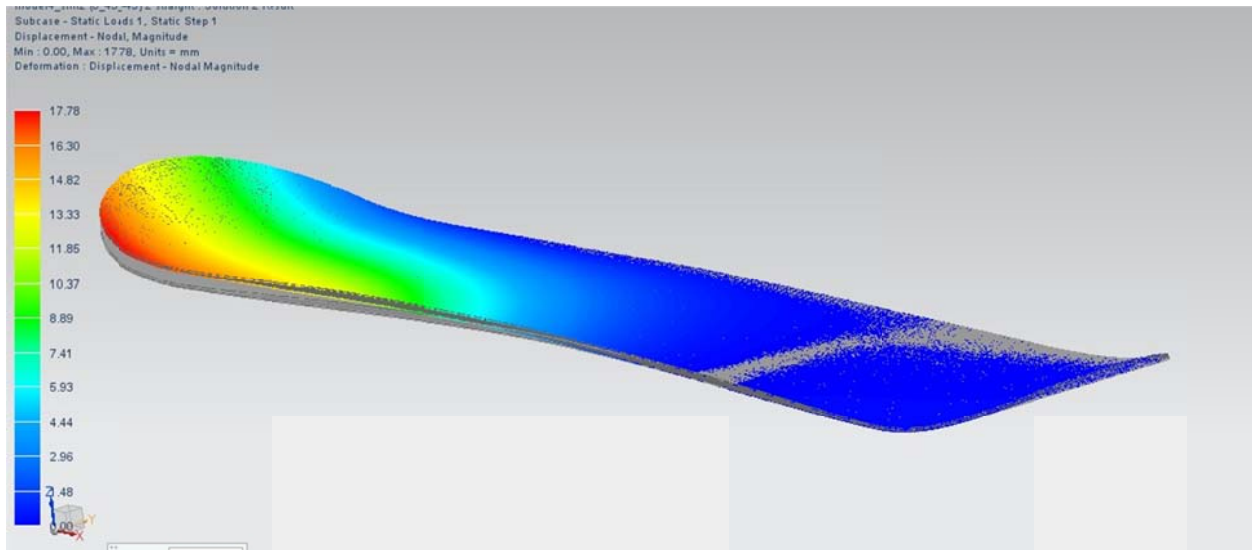
Εικόνα 4.53 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου Β



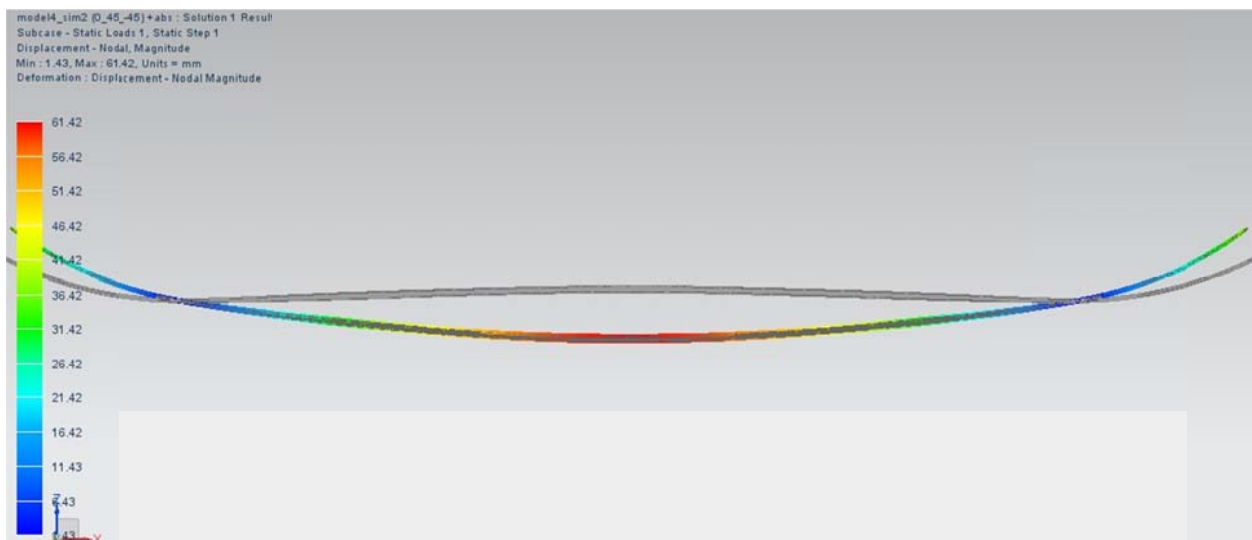
Εικόνα 4.54 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα κάμψης χωρίς ενισχύσεις πλάγια όψη



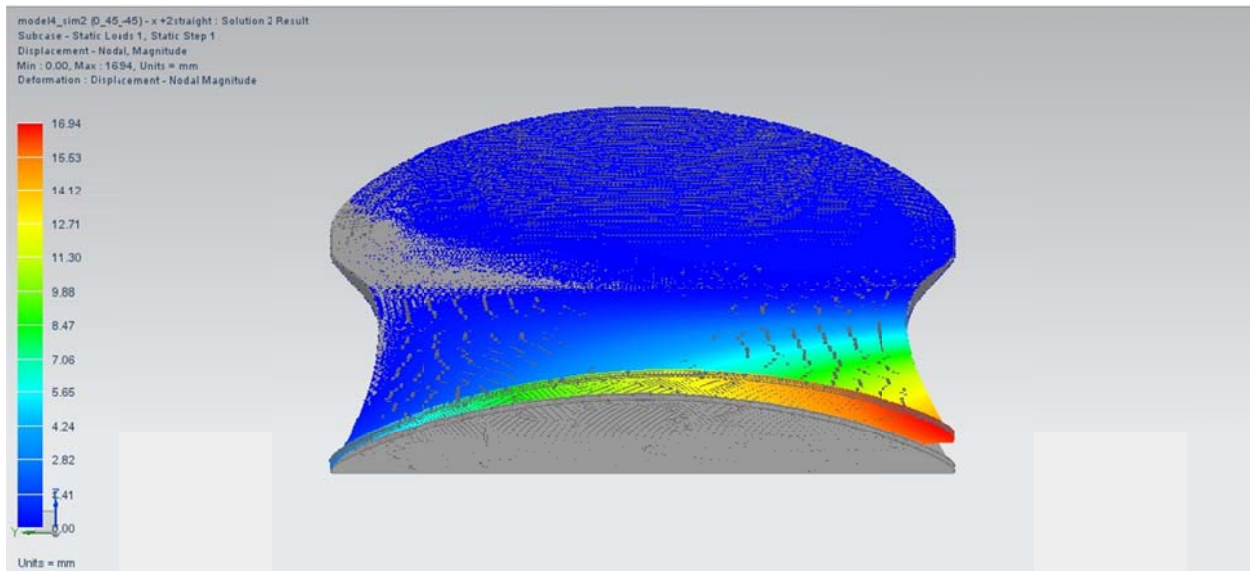
Εικόνα 4.55 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα στρέψης χωρίς ενισχύσεις



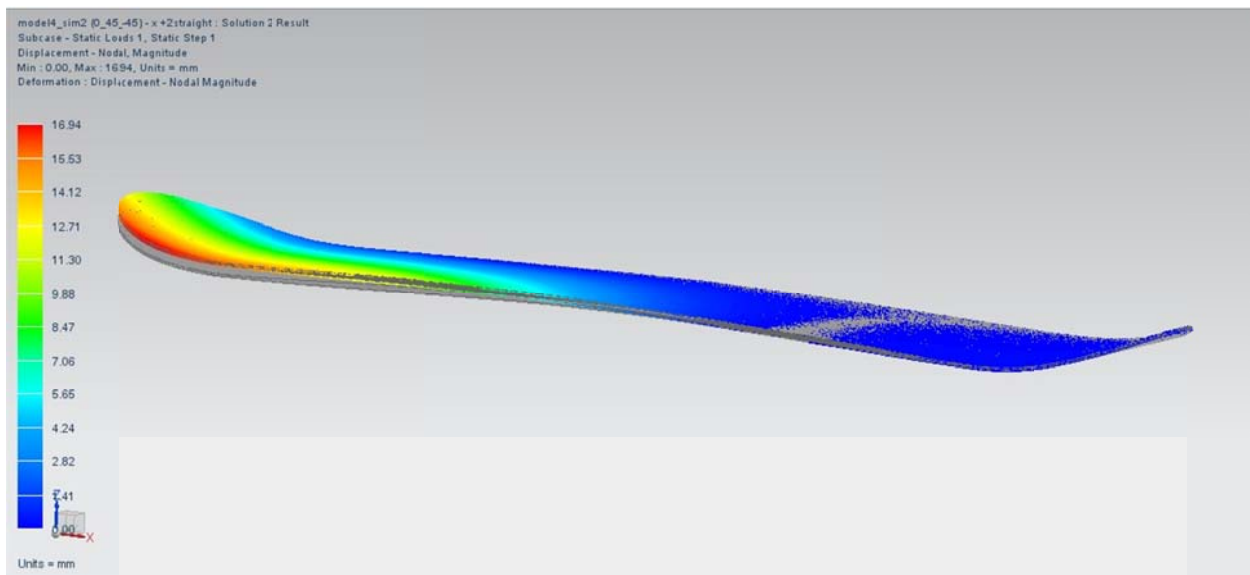
Εικόνα 4.56 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα στρέψης χωρίς ενισχύσεις 2



Εικόνα 4.56 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα κάμψης με ενισχύσεις πλάγια όψη



Εικόνα 4.57 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα στρέψης με ενισχύσεις



Εικόνα 4.58 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα στρέψης με ενισχύσεις 2

4.7 Συμπεράσματα

Σε ότι αφορά τις προσομοιώσεις για σανίδες με μόνιμη ενίσχυση παρατηρούμε ότι ανάλογα με την θέση των λωρίδων από ανθρακόνημα επηρεάζεται η ελαστικότητα της κάθε χιονοσανίδας χωρίς όμως η αύξηση της ακαμψίας για τις δύο δοκιμές να είναι ανάλογη. Αυτό φαίνεται καθαρά από τα μοντέλα 4 και 9, όπου στην πρώτη περίπτωση παρουσιάζεται πολύ μειωμένη ελαστικότητα στην κάμψη τριών σημείων ενώ αρκετά μεγαλύτερη στο τεστ της στρέψης. Αντίθετα στην περίπτωση του μοντέλου 9 τα αποτελέσματα είναι αντεστραμμένα με την ακαμψία σε στρέψη να είναι η μέγιστη ανάμεσα σε όλα τα μοντέλα και αυτή η σε κάμψη να είναι σχετικά μικρή. Είναι συνεπώς δυνατό με την κατάλληλη τοποθέτηση των ενισχύσεων να κατασκευαστεί μια χιονοσανίδα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για κάθε αναβάτη, αφού η χρυσή αναλογία μεταξύ των δύο μεγεθών που μελετάμε είναι καθαρά υποκειμενική και εξαρτάται μόνο από τον κάθε αναβάτη. Επίσης ένα μεγάλο πλεονέκτημα της επιλεγμένης τοποθέτησης σύνθετων στην κατασκευή χιονοσανίδων είναι ότι τα υπόλοιπα στάδια της παραγωγής μένουν σταθερά και με μια μικρή αλλαγή στον προσανατολισμό και το πλήθος των λωρίδων ενίσχυσης μπορεί να παραχθεί ένα ριζικά διαφορετικό προϊόν.

Για την περίπτωση των αφαιρούμενων ενισχύσεων τα αποτελέσματα είναι σε πρώτο στάδιο ενθαρρυντικά καθώς η τοποθέτηση βιδωτών λωρίδων αλλάζουν τη συμπεριφορά της σανίδας σε σημαντικό βαθμό χωρίς όμως να φτάνουν τα επίπεδα των μόνιμων ενισχύσεων. Βέβαια η πραγματικά καλή συμπεριφορά μιας τέτοιας κατασκευής πρέπει να ελεγχθεί μέσα από ένα πρωτότυπο μοντέλο.

Παράρτημα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Κεφάλαιο 1

Εικόνα 1.1 Ενδεικτική τομή σανίδας

Εικόνα 1.2 Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά χιονοσανίδας

Εικόνα 1.3 Είδη Προφίλ χιονοσανίδων

Εικόνα 1.4 Στάδιο προετοιμασίας χιονοσανίδας για πρεσάρισμα

Εικόνα 1.5 Πρεσάρισμα με αντλία κενού

Εικόνα 1.6 Πρεσάρισμα σε πρέσσα αέρα

Εικόνα 1.7 Διαδικασία αποβολής επιπλέον υλικού μετά το πρεσάρισμα

Εικόνα 1.8 Εμπειρική δοκιμή ελαστικότητας σε κάμψη

Εικόνα 1.9 Εμπειρική δοκιμή ελαστικότητας σε στρέψη

Εικόνα 1.10 Σανίδες αγωνιστικής χιονοδρομίας

Κεφάλαιο 2

Εικόνα 2.1 Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

Εικόνα 2.2 Μοντελοποίηση όγκων

Εικόνα 2.3 Μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης

Εικόνα 2.4 Μέθοδος αποσύζευξης γεωμετρίας

Εικόνα 2.5 Μέθοδος βάσει πλέγματος

Εικόνα 2.6 Αναπαράσταση τετραδικού δέντρου

Εικόνα 2.7 Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree

Εικόνα 2.8 Υποδιαίρεση τριγώνου και τετράεδρου

Εικόνα 2.9 Μετατροπή τριγώνου και τετραγώνου σε bricks

Εικόνα 2.10 Τροποποίηση μη συμβατικών πλεγμάτων

Κεφάλαιο 3

Εικόνα 3.1 Πίνακας ιδιοτήτων υαλονημάτων

Εικόνα 3.2 Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου E

Εικόνα 3.3 Διαδικασίες παραγωγής ινών άνθρακα rap και pitch

Εικόνα 3.4 Τύποι διάταξης ινών

Εικόνα 3.5 Τυπικές πλέξεις ύφανσης

Εικόνα 3.6 Κωδικός πλάκας σε πολύστρωμα διαφορετικού προσανατολισμού ινών

Εικόνα 3.7 Κωδικός πλάκας συμμετρικού πολυστρώματος

Εικόνα 3.8 Κωδικοποίηση συμμετρικών σετ στρωμάτων

Κεφάλαιο 4

Εικόνα 4.1 Πλάγια όψη μοντέλου

Εικόνα 4.2 Κάτοψη μοντέλου

Εικόνα 4.3 Εισαγωγή ιδιοτήτων ξύλου

Εικόνα 4.4 Εισαγωγή ιδιοτήτων υαλοϋφάσματος

Εικόνα 4.5 Εισαγωγή ιδιοτήτων εποξικής ρητίνης

Εικόνα 4.6 Δημιουργία σύνθετου με μήτρα εποξική ρητίνη και ίνες υαλοϋφάσματος

Εικόνα 4.7 Εισαγωγή ιδιοτήτων υφάσματος ανθρακονημάτων

Εικόνα 4.8 Εισαγωγή χαρακτηριστικών αντοχής υφάσματος ανθρακονημάτων

Εικόνα 4.9 Δημιουργία δισδιάστατου πλέγματος

Εικόνα 4.10 Δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος

Εικόνα 4.11 Ορισμός συνθηκών σύνδεσης

Εικόνα 4.12 Τεστ κάμψης τριών σημείων

Εικόνα 4.13 Εισαγωγή αρχικών συνθηκών για την κάμψη τριών σημείων

Εικόνα 4.14 Τεστ στρέψης

Εικόνα 4.15 Εισαγωγή αρχικών συνθηκών για στρέψη

Εικόνα 4.16 Μοντέλο 1: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.17 Μοντέλο 1: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.18 Μοντέλο 2: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.19 Μοντέλο 2: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.20 Μοντέλο 2: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.21 Μοντέλο 3: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.22 Μοντέλο 3: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.23 Μοντέλο 3: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.24 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 4

Εικόνα 4.25 Μοντέλο 4: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.26 Μοντέλο 4: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.27 Μοντέλο 4: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.28 Μοντέλο 5: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.29 Μοντέλο 5: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.30 Μοντέλο 5: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.31 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 6

Εικόνα 4.32 Μοντέλο 6: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.33 Μοντέλο 6: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.34 Μοντέλο 6: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.35 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 7

Εικόνα 4.36 Μοντέλο 7: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.37 Μοντέλο 7: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.38 Μοντέλο 7: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.39 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 8

Εικόνα 4.40 Μοντέλο 8: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.41 Μοντέλο 8: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.42 Μοντέλο 8: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.43 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου 9

Εικόνα 4.44 Μοντέλο 9: Αποτέλεσμα κάμψης πλάγια όψη

Εικόνα 4.45 Μοντέλο 8: Αποτέλεσμα στρέψης

Εικόνα 4.46 Μοντέλο 9: Αποτέλεσμα στρέψης 2

Εικόνα 4.47 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου A

Εικόνα 4.48 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα κάμψης χωρίς ενισχύσεις πλάγια όψη

Εικόνα 4.49 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα στρέψης χωρίς ενισχύσεις

Εικόνα 4.50 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα στρέψης χωρίς ενισχύσεις 2

Εικόνα 4.51 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα κάμψης με ενισχύσεις πλάγια όψη

Εικόνα 4.52 Μοντέλο A: Αποτέλεσμα στρέψης με ενισχύσεις

Εικόνα 4.53 Λωρίδες ενίσχυσης μοντέλου B

Εικόνα 4.54 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα κάμψης χωρίς ενισχύσεις πλάγια όψη

Εικόνα 4.55 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα στρέψης χωρίς ενισχύσεις

Εικόνα 4.56 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα κάμψης με ενισχύσεις πλάγια όψη

Εικόνα 4.57 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα στρέψης με ενισχύσεις

Εικόνα 4.58 Μοντέλο Β: Αποτέλεσμα στρέψης με ενισχύσεις 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ Γ. Ι., ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ Ε. Ε., 1994, Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
2. ΓΚΟΤΣΗΣ Π. Κ., 2005, ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ
3. ΠΑΝΤΕΛΗΣ Δ. Ι. ,2008, ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ
4. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ Γ. , ΜΟΥΖΑΚΗΣ Δ., 2007, ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ
5. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Χ. , 2009, ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ – ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ
6. ΔΕΡΒΟΣ Κ. Θ., ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ Π. ,2009 , ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ
7. ΓΚΟΤΣΗΣ Α. Δ., 2007, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ
8. ΜΠΕΛΤΣΙΟΣ Κ., 2003, ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
9. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ Δ., ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Aleksandar Subic, Patrick Clifton, Jordi Beneyto-Ferre, Arnaud LeFlohic, Yoshiki Sato, Victor Pichon ANALYSIS OF SNOWBOARD STIFFNESS AND CAMBER PROPERTIES FOR DIFFERENT RIDING STYLES, The ENGINEERING OF Sport- vol.1 pp 319-327
2. Aleksandar Subic, Patrick Clifton, Jordi Beneyto-Ferre, Arnaud LeFlohic, Yoshiki Sato, Victor Pichon INVESTIGATION OF SNOWBOARD STIFFNESS AND CAMBER CHARACTERISTICS FOR DIFFERENT RIDING STYLES , Sports eng (2009) pp 93-101
3. Keith W. Buffinton, Steven B. Shooter, Ira J. Thorpe and Jason J. Krywicki ,LABORATORY, COMPUTATIONAL AND FIELD STUDIES OF SNOWBOARD DYNAMICS , Sports Engineering(2003) pp 129-138
4. Gary C. Foss, Bard Glenne, REDUCING ON-SNOW VIBRATIONS OF SKIS AND SNOWBOARDS, Sound and Vibration (December 2007) pp 22-26

5. Patrick Clifton, Aleksandar Subic, Adrian Mouritz SNOWBOARD STIFFNESS PREDICTION MODEL FOR ANY COMPOSITE SANDWICH CONSTRUCTION, Procedia Engineering 2 (2010) pp 3163- 3169
6. Aleksandar Subic, Patrick Clifton and Jordi Beneyto-Ferre , IDENTIFICATION OF INNOVATION OPPORTUNITIES FOR SNOWBOARD DESIGN THROUGH BENCHMARKING , Sports Technology , 2008 pp 65-75
7. Franz Konstantin Fuss, Ben Cazzolato, Ashley Shepherd, Jason Harding, VIBRATION OF SNOWBOARD DECKS , Procedia Engineering 2 , 2010, pp 2863- 2867
8. Subic A., Materials in Sports Equipment Volume 2 , Woodhead Publishing in Materials

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

1. <http://www.conradfp.com/pdf/ch4-Mechanical-Properties-of-Wood.pdf>
2. <http://pebblepad.com.au/>
3. <http://www.vectorply.com/ri-laminateprop.html>
4. <http://shop1.r-g.de/item/191830-127>