

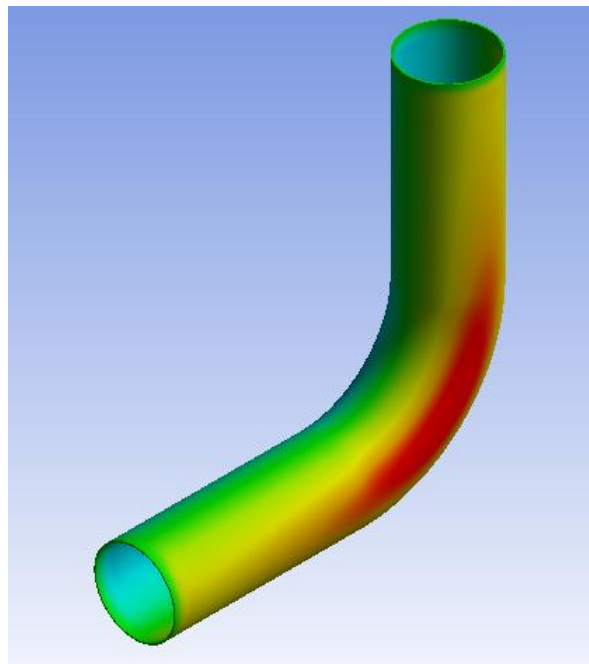


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Κατασκευαστικός Σχεδιασμός Σωληνώσεων
και άλλων Εξαρτημάτων από Σύνθετα Υλικά*

Κουραμπάς Μάριος



Επιβλέπων: Καθηγητής Ν. Τσούβαλης

Αθήνα, Ιούνιος 2023

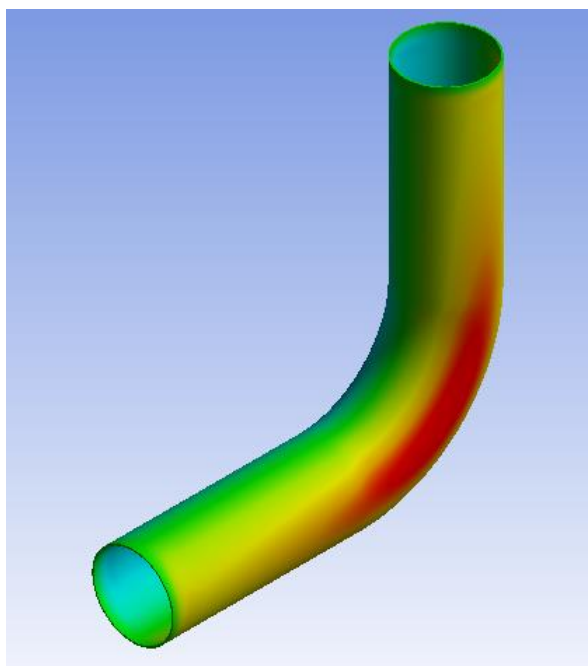


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Κατασκευαστικός Σχεδιασμός Σωληνώσεων
και άλλων Εξαρτημάτων από Σύνθετα Υλικά*

Κουραμπάς Μάριος



Επιβλέπων: Καθηγητής Ν. Τσούβαλης

Τριμελής Επιτροπή

Ν. Τσούβαλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Λ.Καϊκτσής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Α. Ζερβάκη
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2023

.....
Μάριος Ι. Κουραμπάς

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Κουραμπάς Μάριος 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η διπλωματική εργασία διεξήχθη στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρώτον, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμηση μου απέναντι στον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθηγητή κ. Νικόλαο Τσούβαλη, ο οποίος με υποστήριξε και έδειξε τεράστια υπομονή καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Παρόλο τον φόρτο εργασίας του, πάντα μου έδινε άμεσες απαντήσεις στα διάφορα δύσκολα θέματα που προέκυπταν.

Δεύτερον, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ηλία Μπιλάλη, που με βοηθούσε άμεσα σε θέματα ειδικά με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τεχνικό τμήμα της εταιρείας B&T Composites, που πρόκειται για μία από τις καλύτερες εταιρείες στο κομμάτι των σύνθετων υλικών στην Ελλάδα, για τις χρήσιμες πληροφορίες που μας παρείχαν ελεύθερα. Η εν λόγω εταιρεία συνεργάζεται με το εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας πάνω σε διάφορα ερευνητικά θέματα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, την κοπέλα μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, δίνοντας μου κίνητρο όταν το είχα χάσει.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύνθετα υλικά, χάρη στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι των συμβατικών υλικών, με κυριότερα, το χαμηλό τους βάρος και συνακόλουθα τους υψηλούς λόγους αντοχής και ακαμψίας προς βάρος (υψηλές ειδικές ιδιότητες), βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή σε κλάδους όπως η αεροπορική βιομηχανία, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυπηγική.

Πλέον, η εισαγωγή σύνθετων υλικών γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Ειδικότερα, στον κλάδο της ναυπηγικής, η τοποθέτηση δικτύων (σωλήνες, γωνιές κλπ) από σύνθετα υλικά πέρα από τις προαναφερθείσες καλές ιδιότητες αυτών, προσφέρει, υψηλή αντοχή σε διάβρωση και κόπωση, πλεονεκτήματα τα οποία συνεπάγονται μειωμένα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας συγκριτικά με τα χρησιμοποιηθέντα δίκτυα από χάλυβα ή κράμα χάλυβα με νικέλιο, σίδηρο ή αλουμίνιο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς σωληνώσεων και γωνιών από σύνθετα υλικά μέσα από την ανάπτυξη μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ). Τα τελευταία, βοηθούν στην ακριβή προσομοίωση του τρόπου συμπεριφοράς των κατασκευών, βασιζόμενα στις αρχές της μηχανικής, ενώ παράλληλα αποτελούν μια αποτελεσματική λύση στις περιπτώσεις όπου η διεξαγωγή πειραμάτων δεν είναι εφικτή. Ακόμη, βασικό πλεονέκτημα των ΠΣ είναι η αξιοποίηση των αριθμητικών μεθόδων που δίνουν «γρήγορες λύσεις» με τη βοήθεια υπολογιστή σε γεωμετρίες και υλικά όπου η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων θα ήταν αδύνατη. Για λόγους επαλήθευσης εγκυρότητας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, λήφθηκε μέριμνα ώστε να επαληθεύονται στην πλειοψηφία τους από αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού. Στα πρώτα στάδια της μελέτης, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναπτυσσόμενων μοντέλων ΠΣ με εκείνα της διεθνούς βιβλιογραφίας όπου, πέραν των αναλυτικών μεθόδων, τα αποτελέσματα ελέγχονται και από διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα της εκάστοτε βιβλιογραφικής αναφοράς.

Λέξεις Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, σύνθετα υλικά, σωλήνας, γωνιά, μέθοδος
κλειδιά: περιέλιξης ινών

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	2
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	2
1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	4
1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ	8
1.4 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	11
2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΩΛΗΝΩΝ ΜΕ Π.Σ.	11
2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΜΕ LAYERED SHELL ELEMENTS	11
2.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΜΕ LAYERED SOLID ELEMENTS.....	18
2.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΣ	23
2.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	23
2.2.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	31
2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	34
2.3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΣ	34
2.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	38
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	38
3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΩΛΗΝΩΝ	38
3.1.1. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΙΝΩΝ-ΡΗΤΙΝΗΣ	38
3.1.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	38
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	46
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΩΝΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	46
4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΓΩΝΙΩΝ	46
4.1.1. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΙΝΩΝ-ΡΗΤΙΝΗΣ	46
4.1.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	46
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΩΝΙΩΝ	48
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

Για ένα σύστημα ο όρος «σύνθετο» σημαίνει ότι αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Γενικεύοντας τον προαναφερθέντα ορισμό, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Ειδικότερα, στην επιστήμη των υλικών, ως σύνθετο χαρακτηρίζεται ένα υλικό του οποίου τα συνιστώσα στοιχεία έχουν αισθητά διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα και το παράγωγο υλικό να έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από αυτές των επιμέρους στοιχείων του. Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων υλικών θα πρέπει οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη του να είναι σημαντικά διαφορετικές από των υπολοίπων (≥ 5 φορές) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα όλων των μερών να μην είναι πολύ μικρή ($>10\%$) (Τσούβαλης, 1998).

Στη γενική περίπτωση, κάθε σύνθετο υλικό αποτελείται από δύο συστατικά μέρη. Το ένα από αυτά, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Ένα από τα συνηθέστερα συστατικά ενίσχυσης ενός σύνθετου υλικού, είναι οι ενισχυτικές ίνες (Reinforcing Fibers). Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Το πλεονέκτημα του συνδυασμού δύο διαφορετικών υλικών για τη σχεδίαση ενός σύνθετου υλικού, είναι ότι το τελικό αποτέλεσμα (δηλαδή, το σύνθετο υλικό) διαθέτει σημαντικά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών μερών του. Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημα των ινωδών σύνθετων υλικών (Fiber Reinforced Plastics), είναι η δυνατότητα διευθέτησης των ινών στις διευθύνσεις των επιβαλλόμενων φορτίσεων, γεγονός που προσδίδει ευελιξία στη σχεδίαση μιας κατασκευής. Ακόμη, όσον αφορά τους τρόπους αστοχίας, σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά (όπως λόγου χάρη ο χάλυβας, το αλουμίνιο κ.α.), όπου η δημιουργία και η προοδευτική διάδοση μιας ρωγμής μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση του υλικού, η αστοχία μιας ενισχυτικής ίνας ενός σύνθετου υλικού, δεν συνεπάγεται απαραίτητα την ολική αστοχία του υλικού (Κεραμίδης, 2020).

Τα κύρια πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι η ευελιξία στη σχεδίαση μιας κατασκευής, η αντίσταση σε διάβρωση, η ελαχιστοποίηση του θορύβου κατά τη λειτουργία, η καλή συμπεριφορά, η αντίσταση σε κόπωση, το μειωμένο κόστος συντήρησης και το χαμηλό τους βάρος. Ως προς την κατασκευή σκαφών, η εξοικονόμηση βάρους μεταφράζεται ως αύξηση της διαθέσιμης μεταφορικής ικανότητας, μείωση του λειτουργικού κόστους αλλά και της αδράνειας της κατασκευής, ενώ παράλληλα συνεπάγεται καλύτερη ευστάθεια και πλευστότητα του πλοίου. Λόγω των αρκετών πλεονεκτημάτων που αναφέραμε και προηγουμένως, τόσο σκάφη αναψυχής (σχήμα 1.1) όσο και πολεμικά πλοία (σχήμα 2.2)

αρχίζουν να κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά όπου μειώνεται αρκετά η μαγνητική και ακουστική τους υπογραφή.



Σχήμα 1.1: Υπερπολυτελές Γιοτ κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά



Σχήμα 1.2: Ρωσικό Ναρκοθηρευτικό κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά

Επιπλέον, εξαιτίας των προαναφερθέντων καλών χαρακτηριστικών τους και κυρίως χάριν των υψηλών λόγων αντοχής προς βάρος (high strength to weight ratio) και ακαμψίας προς βάρος (high stiffness to weight ratio), αλλά και της ευελιξίας που παρέχουν στον σχεδιαστή να προσαρμόσει τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής προκειμένου να πετύχει συγκεκριμένα επίπεδα αποδόσεων, τα ΣΥ κερδίζουν συνεχώς έδαφος σε μία μεγάλη ποικιλία θαλασσίων εφαρμογών. Τέλος, στο σχήμα 1.3 απεικονίζεται μια ποικιλία κατασκευών από σύνθετα υλικά σε υποβρύχια τύπου 214 του ελληνικού πολεμικού ναυτικού.



Σχήμα 1.3: Υποβρύχιο τ.214 με καλύμματα από GRP

1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η δυνατότητα εξοικονόμησης βάρους και ειδικά η αντοχή στη διάβρωση, συνδυαστικά με το χαμηλό κόστος, καθιστά τους σωλήνες από σύνθετα υλικά μια ελκυστική επιλογή για τους σχεδιαστές των σωληνώσεων των πλοίων, αλλά και για του πλοιοκτήτες καθώς μειώνεται το τελικό κόστος του πλοίου και το κόστος συντηρήσεων.

Σε σχέση με τις προαναφερθείσες εφαρμογές των σύνθετων υλικών στον τομέα της ναυπηγικής, η κατασκευή σωληνώσεων αποτελεί μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογία, των τελευταίων είκοσι ετών. Εντούτοις, παρά την συνεχή εξέλιξη και διερεύνηση των σύνθετων υλικών με την πάροδο του χρόνου, η αποτελεσματική σχεδίαση ενός σύνθετου σωλήνα προϋποθέτει την βαθύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς και των τρόπων αστοχίας των εν λόγω κατασκευών. Ακόμη και ο χαρακτηρισμός των μηχανικών ιδιοτήτων ενός σύνθετου υλικού αποτελεί μία επίπονη διαδικασία, δεδομένης της ιδιαίτερης φύσης των συγκεκριμένων υλικών, που απαιτεί αρκετές ώρες διεξαγωγής πειραματικών εργασιών στο εργαστήριο. Επιπρόσθετα, η παραγωγή ενός σωλήνα από σύνθετα υλικά, πέραν του καθορισμού της γεωμετρίας, προϋποθέτει και την ιδανική ακολουθία στρώσεων και τον προσανατολισμό των ινών της κάθε στρώσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συνδυασμοί διευθέτησης των στρώσεων για την κατασκευή της τελικής ακολουθίας στρώσεων είναι άπειροι. Επομένως, όλες οι παραπάνω λεπτομέρειες πρέπει να αποσαφηνιστούν με ακρίβεια μέσω παραμετρικής ανάλυσης, προκειμένου να αξιοποιηθούν οι βέλτιστες αντοχές του κάθε σωλήνα και γωνιάς ανάλογα με τη διάστασή τους.

Ο συνηθέστερος τρόπος αντιμετώπισης της έλλειψης γνώσης σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών, ήταν μέσω πειραμάτων και εμπειρικών δεδομένων. Ωστόσο, το υψηλό κόστος ελέγχου όλων των δυνατών περιπτώσεων σχεδίασης, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες δυνατότητες και τα διαθέσιμα δεδομένα για πειράματα μεγάλης κλίμακας, αποτελούν συχνό εμπόδιο της ερευνητικής διαδικασίας. Για τον σκοπό αυτόν, τα τελευταία χρόνια δόθηκε έμφαση στον τομέα της υπολογιστικής προσομοίωσης, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη προγραμμάτων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, όπως το ANSYS.

Τυπικές σωλήνες και γωνιές από σύνθετα υλικά μπορούμε να δούμε στα σχήματα 1.4 και 1.5.



Σχήμα 1.4: Σωλήνες Σύνθετου Υλικού



Σχήμα 1.5: Γωνιές Σύνθετου Υλικού

Τυπικές διαστάσεις σωληνώσεων και γωνιών που επικρατούν στο διεθνές εμπόριο την τρέχουσα περίοδο παρουσιάζονται στα σχήματα και 1.6 και 1.7 αντίστοιχα(SUPERLIT). Όπου το σχήμα 1.8 δίνει μια καλύτερη εξήγηση των διαστάσεων των γωνιών που θα χρησιμοποιήσουμε και στα επόμενα κεφάλαια.

GRP Pipe Diameters		
SUPERLIT GRP pipes and joints are manufactured with the standard sizes below. Intermediate diameter manufacturing is possible on the request of the customer.		
Pipe Nominal Diameter (mm)	Pipe Nominal Diameter (in)	Pipe Nominal External Diameter (mm)
300	12	324
350	14	376,4
400	16	427,3
450	18	475,8
500	20	530,3
600	24	633
700	28	718,5
800	32	820,5
900	36	924
1000	40	1026,5
1100	44	1125,5
1200	48	1229
1300	52	1331,5
1400	56	1433,5
1500	60	1536,5
1600	64	1638,5
1700	68	1739,5
1800	72	1841,5
1900	76	1944,5
2000	80	2046
2100	84	2148,5
2200	88	2250,5
2300	92	2354
2400	96	2454
2500	100	2553,5
2600	104	2657,5
2700	108	2758,5
2800	112	2858,5
2900	116	2962,5
3000	120	3065
3100	124	3166,5
3200	128	3269
3300	132	3370,5
3400	136	3473
3500	140	3574,5
3600	144	3676,5
3700	148	3778,5
3800	152	3880,5
3900	156	3982,5
4000	160	4085

Σχήμα 1.6: Διαστάσεις Σωληνώσεων από Σύνθετα Υλικά (SUPERLIT)

DN	R	11,25° L	22,5° L	30° L	45° L	60° L	90° L
300	450	275	300	325	400	450	650
350	525	275	300	325	425	500	700
400	600	325	350	375	475	550	800
450	675	325	375	400	525	625	950
500	750	325	375	400	525	625	950
600	900	325	400	450	600	700	1075
700	1050	400	425	475	650	775	1200
800	1170	400	450	525	700	850	1350
900	1200	400	475	550	725	875	1400
1000	1270	425	500	575	750	925	1450
1100	1320	475	525	600	800	1000	1550
1200	1370	475	525	600	825	1025	1600
1300	1420	500	550	650	875	1075	1650
1400	1470	500	575	675	900	1100	1700
1500	1570	550	650	725	1025	1250	1900
1600	1670	600	675	800	1100	1300	2000
1700	1770	675	775	850	1200	1400	2200
1800	1870	675	775	850	1200	1400	2200
1900	1970	700	800	900	1300	1500	2400
2000	2070	700	800	900	1300	1500	2400
2100	2170	775	875	950	1400	1600	2600
2200	2270	775	875	950	1400	1600	2600
2300	2370	800	900	1000	1500	1700	2800
2400	2470	800	900	1000	1500	1700	2800
2500	2600	1000	1100	1200	1700	1900	3000
2600	2700	1000	1100	1200	1700	1900	3000
2700	2800	1100	1200	1300	1800	2000	3200
2800	2900	1100	1200	1300	1800	2000	3200
2900	3000	1200	1300	1400	1900	2100	3400
3000	3100	1200	1300	1400	1900	2100	3400
3100	3200	1300	1400	1500	2000	2200	3600
3200	3300	1300	1400	1600	2000	2200	3600
3300	3400	1400	1500	1700	2100	2300	3800
3400	3500	1400	1500	1700	2100	2300	3800
3500	3600	1500	1600	1800	2200	2400	4000
3600	3700	1500	1600	1800	2200	2400	4000
3700	3800	1600	1700	1900	2300	2500	4200
3800	3900	1600	1700	1900	2300	2500	4200
3900	4000	1700	1800	2000	2400	2600	4400
4000	4100	1700	1800	2000	2400	2600	4400

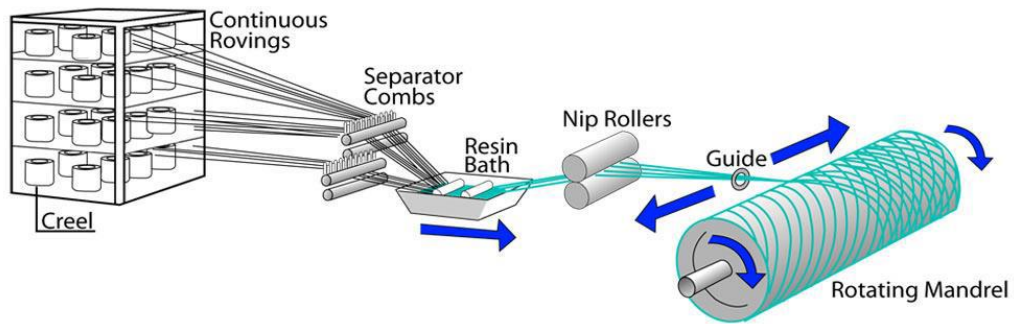
Σχήμα 1.7: Διαστάσεις Γωνιών από Σύνθετα Υλικά (SUPELIT)



Σχήμα 1.8: Ανάλυση Διαστάσεων Γωνιών από Σύνθετα Υλικά

1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κατασκευής σωληνώσεων, γωνιών και άλλων fittings από σύνθετα υλικά, είναι η μέθοδος περιέλιξης ινών (Filament Winding). Με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να κατασκευαστούν οικονομικά και με υψηλά επίπεδα ποιότητας κατασκευές εκ περιστροφής συμμετρικές. Η κατασκευή διαμορφώνεται με περιέλιξη ενισχυτικών ινών γύρω από ένα περιστρεφόμενο αξονικό καλούπι (mandrel) το οποίο καθορίζει την εσωτερική της γεωμετρία, ενώ η διαδικασία (της περιέλιξης) τερματίζεται όταν επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος της κατασκευής. Οι ίνες είναι σε μορφή συνεχόμενων πλεξίδων νήματος (rovings), οι οποίες συνήθως τυλίγονται πολλές μαζί δημιουργώντας μία ζώνη ινών (λωρίδα – band) και είτε διαποτίζονται με ρητίνη αμέσως πριν τυλιχτούν στο καλούπι, είτε είναι προεμποτισμένες σε μερικά στερεοποιημένη ρητίνη (dry winding). Η περιστροφή του καλουπιού γίνεται με μηχανικό τρόπο, μέσω της σύνδεσης των άκρων του με περιστρεφόμενο κινητήρα και με τη βοήθεια υπολογιστή ο οποίος ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού και της κίνησης του φορείου εναπόθεσης ινών (carriage). Η σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας της δημιουργίας μιας κατασκευής, απεικονίζεται στο σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Μέθοδος Περιέλιξης Ινών (Τσούβαλης, 1998).

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η σκλήρυνση λαμβάνει χώρα είτε πάνω στο καλούπι, είτε με εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας, είτε σε φούρνους υψηλών θερμοκρασιών. Επιπλέον, τα αξονοσυμμετρικά καλούπια πρέπει να είναι κατασκευασμένα ώστε να αντέχουν τα θλιπτικά φορτία και τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη σκλήρυνση. Προκειμένου να εξασφαλίζεται η εύκολη αφαίρεση τους, αλλά και η ελαχιστοποίηση του κόστους, όπου αυτό είναι δυνατό, έχουν αναπτυχθεί διαφόρων ειδών καλούπια όπως, διαλυτά καλούπια (soluble mandrels) κατασκευασμένα από άμμο και πολυβινυλική αλκοόλη (polyvinyl alcohol) ή καλούπια με αναπόσπαστες μεταλλικές επενδύσεις (περίπτωση κατασκευής δοχείων πίεσης).

Πέραν του υψηλού κόστους (το οποίο απαιτείται κατά κύριο λόγο για την κατασκευή του αξονικού καλουπιού), ανάμεσα στους κυριότερους περιορισμούς της μεθόδου συγκαταλέγονται και η αδυναμία περιέλιξης επιφανειών με ανάποδη καμπυλότητα, η δυσκολία περιέλιξης σε γωνίες κοντά στον άξονα περιστροφής και η μη ικανοποιητική ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Τέλος, η μέθοδος διαθέτει, επίσης, περιορισμό ως προς το μέγεθος των παραγόμενων αντικειμένων, ενώ η αύξηση του μεγέθους των κατασκευών συνοδεύεται από αύξηση του κόστους παραγωγής, παράγοντες οι οποίοι πρέπει να συνυπολογίζονται κατά την εκπόνηση της τεχνικοοικονομικής μελέτης μιας πολύπλοκης κατασκευής.

1.4 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο δομικό σχεδιασμό σωληνώσεων και γωνιών από σύνθετα υλικά με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα του ANSYS, χάρη στις ικανότητες του να μοντελοποιεί με ακρίβεια την συμπεριφορά του σύνθετων υλικών στις αναλύσεις που απαιτούνται για την σχεδίαση του. Έναυσμα ήταν, το ενδιαφέρον της ελληνικής εταιρείας B&T Composites όσον αφορά στην αντοχή σωληνώσεων και γωνιών από σύνθετα υλικά. Επομένως, με δεδομένο το συγκεκριμένο σύνθετο υλικό (ίνες γυαλιού με βινυλεστερική ρητίνη) που χρησιμοποιούν, τις διαστάσεις καθώς και τις φορτίσεις (εσωτερική ομοιόμορφη πίεση) που ενδιαφέρει την εν λόγω εταιρεία, εκτελέστηκε παραμετρική ανάλυση μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός ήταν, η εύρεση του ελάχιστου πάχους του πολύστρωτου (του πάχους του σωλήνα και της γωνιάς) ανάλογα τις διαστάσεις τους, την φόρτιση που υποβάλλονται και για συγκεκριμένο επιθυμητό συντελεστή ασφαλείας. Τέλος, λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας πειραματικών δεδομένων, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία της υπολογιστικής μεθόδου, λήφθηκε μέριμνα ώστε τα αποτελέσματα να επαληθεύονται από αναλυτικές και εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού, όπου αυτό ήταν εφικτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

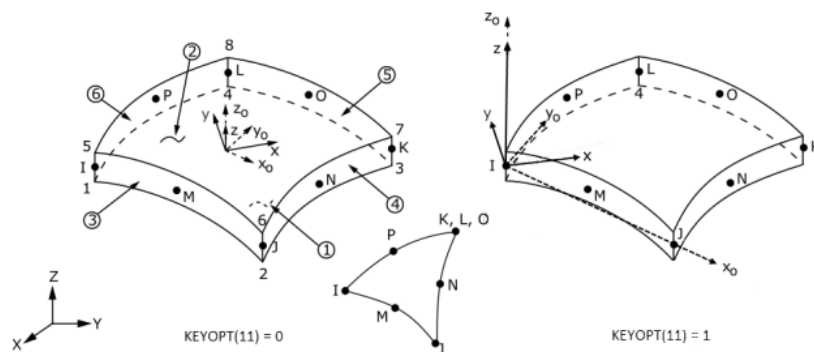
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΩΛΗΝΩΝ ΜΕ Π.Σ.

2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΑΚΩΝ ΜΕ LAYERED SHELL ELEMENTS

Πριν ξεκινήσουμε τη μοντελοποίηση του σωλήνα και της γωνιάς, έπρεπε να εξοικειωθούμε στη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, και πιο ειδικά στο πακέτο των σύνθετων υλικών. Γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκε ως αρχική γεωμετρία μία πλάκα, καθώς από τη βιβλιογραφία υπάρχουν απλές εξισώσεις, υπολογισμού βέλους κάμψης, τάσεων κλπ, με τις οποίες τα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τα πεπερασμένα στοιχεία.

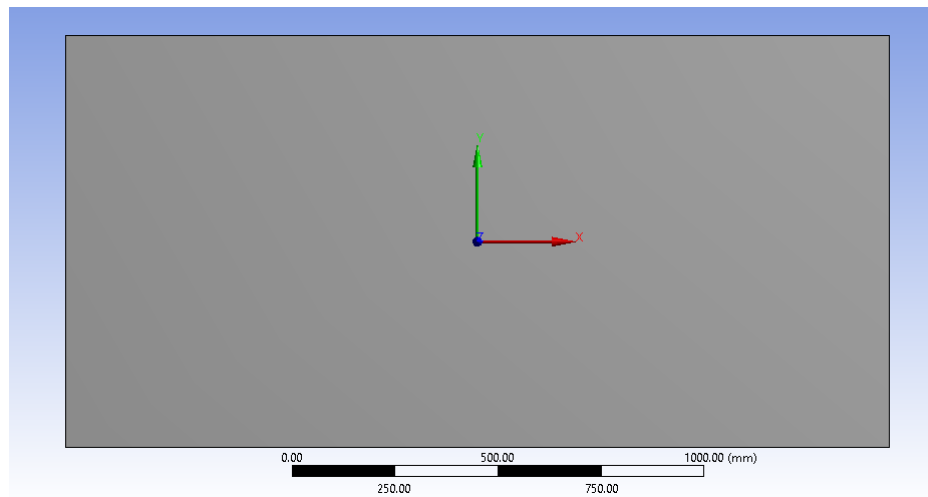
Η μοντελοποίηση πλακών από σύνθετο υλικό πραγματοποιήθηκε με αποκλειστική χρήση των οκτακομβικών στοιχείων (8-node elements) κελύφους, Shell 281, βλέπε σχήμα 2.1, κυρίως λόγω των ικανοτήτων των εν λόγω στοιχείων να μοντελοποιήσουν την ακολουθία στρώσεων ενός σύνθετου υλικού, αποδίδοντας στην κατασκευή ορθοτροπικές ιδιότητες. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των συγκεκριμένων στοιχείων, σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία που προσφέρονται για μοντελοποίηση κατασκευών από σύνθετα υλικά, είναι το αισθητά χαμηλότερο υπολογιστικό τους κόστος, χαρακτηριστικό χρήσιμο ιδίως σε περιπτώσεις και αναλύσεις όπου απαιτείται πυκνωση του πλέγματος.



Σχήμα 2.1: Οκτακομβικά στοιχεία SHELL 281

Καθορισμός της γεωμετρίας

Η επιλογή των παραμέτρων της πλάκας (μήκος, πλάτος, πάχος) έγινε τυχαία. Συγκεκριμένα το μήκος ορίστηκε στα δύο μέτρα, το πλάτος στο ένα μέτρο και το πάχος στα 12 mm όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση Γεωμετρίας Μοντέλου Πλάκας

Όσον αφορά στον προσανατολισμό του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, ο x-άξονας επιλέχθηκε ώστε να αποτελεί τον διαμήκη άξονα της κατασκευής, ο y-άξονας να αποτελεί τον εγκάρσιο άξονα της κατασκευής και ο z-άξονας είναι κάθετος στο επίπεδο xy και αντιπροσωπεύει το πάχος της πλάκας.

Ορισμός ιδιοτήτων και πλέγματος

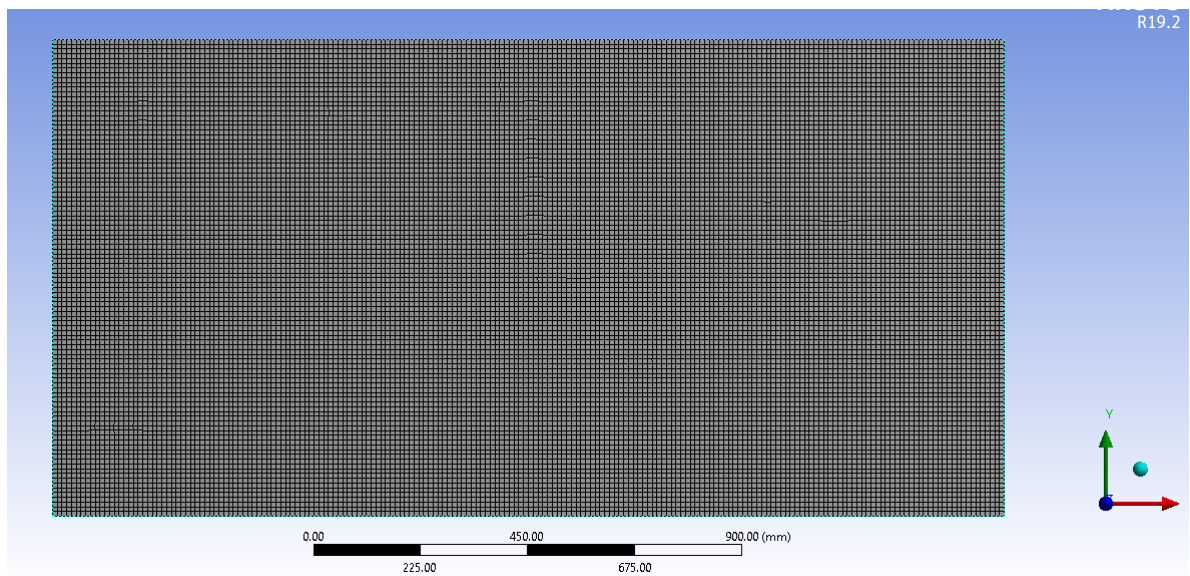
Μετά την επιλογή του είδους των στοιχείων (Shell 281 elements) της πλάκας στο μοντέλο του ANSYS, επιλέχθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες και αντοχές του σύνθετου υλικού. Επειδή η μοντελοποίηση της πλάκας γίνεται αποκλειστικά και μόνο για θέματα εξοικείωσης με το πακέτο σύνθετων υλικών του ANSYS, επιλέχθηκε από την βιβλιοθήκη του ANSYS το υλικό Epoxy Carbon UD (230 GPa) Wet με μηχανικές ιδιότητες ως παρατίθενται στον πίνακα 2.1, όπου E_1, ν, G, S_T, S_c και τ αναφέρονται στο μέτρο ελαστικότητας, στον λόγο poisson, στο μέτρο διάτμησης, στην αντοχή στον εφελκυσμό, στην αντοχή στην θλίψη και αντοχή στην διάτμηση αντίστοιχα όπου οι δείκτες υποδηλώνουν την διεύθυνση αναφοράς.

Πίνακας 2.1: Μηχανικές Ιδιότητες και Αντοχές Σύνθετου Υλικού Epoxy Carbon UD (230GPa) Wet

	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}	G_{23} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{12} (GPa)
Epoxy Carbon UD Wet	123.3	7.78	7.78	0.42	0.27	0.27	3.08	5	5
	S_{1T} (MPa)	S_{2T} (MPa)	S_{3T} (MPa)	S_{1C} (MPa)	S_{2C} (GPa)	S_{3C} (GPa)	τ_{23} (MPa)	τ_{13} (MPa)	τ_{12} (MPa)
	1632	34	34	704	68	68	80	55	80

Αφού επιλέχθηκαν οι ιδιότητες του υλικού, το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία του πλέγματος (mesh) της πλάκας. Το ANSYS δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει είτε τον αριθμό των υποδιαίρέσεων (element divisions), είτε το μήκος κάθε στοιχείου με

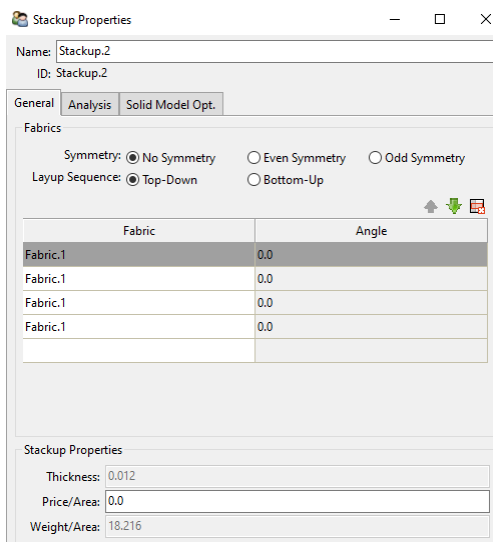
ισοδύναμο τρόπο. Γενικά είναι επιθυμητό να κατασκευάζονται στοιχεία με ανάλογες διαστάσεις, διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος τα προκύπτοντα αποτελέσματα να είναι παραπλανητικά. Επομένως, οι υποδιαιρέσεις των γραμμών στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση ορίζονται με βάση αυτό το κριτήριο. Ως ικανοποιητικό, ορίζεται ένα πλέγμα στο οποίο η εφαρμογή περαιτέρω πύκνωσης δεν οδηγεί σε αισθητή απόκλιση των αποτελεσμάτων. Φυσικά, όσο η πύκνωση του πλέγματος αυξάνει, αυξάνεται και το υπολογιστικό κόστος. Στο σχήμα 2.3, παρουσιάζεται η εικόνα ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, με ικανοποιητικό πλέγμα για τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν, με διαστάσεις στοιχείων 5mmX5mm και 400 στοιχεία κατά το διάμηκες (x-άξονα) και 200 κατά το εγκάρσιο(y-άξονα), οπότε συνολικά 80000 στοιχεία



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση Πλέγματος Μοντέλου Πλάκας

Ορισμός αριθμού και προσανατολισμού στρώσεων

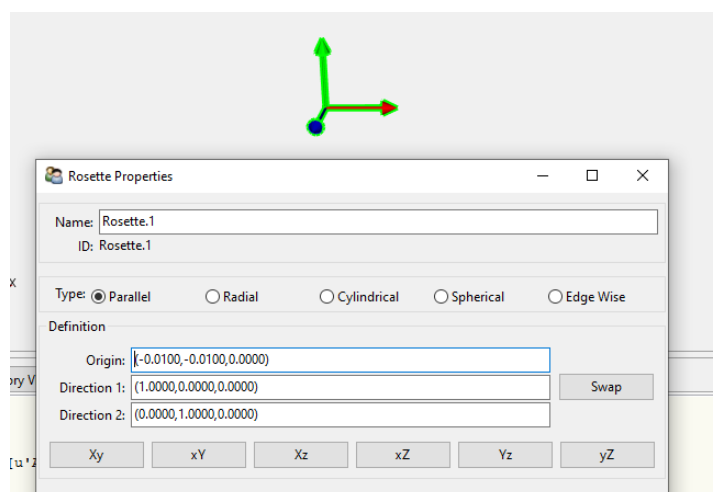
Αφού έχουμε δημιουργήσει το πλέγμα του μοντέλου με τις κατάλληλες διαστάσεις των στοιχείων, εισάγουμε τις ίνες και ρητίνη που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε σε κάθε στρώση του μοντέλου μας. Χρησιμοποιήσουμε την επιλογή «Stack up» όπου είναι μια διαδικασία εύκολης επιλογής αριθμού στρώσεων, γωνία σε κάθε στρώση, ίνα και ρητίνη, άρα γίνεται πιο εύκολη η παραμετρική ανάλυση που θα δούμε πιο κάτω καθώς απαιτούνται πολλές αλλαγές στις γωνίες προσανατολισμού ανά στρώση (σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4: StackUp Sequence Πολύστρωτου

Αυτή η διαδικασία, δηλαδή του ορισμού των αριθμών των στρώσεων, την γωνία κάθε στρώσης επιλέγονται από το πακέτο ACP-PRE. Στο σχήμα 2.4 απεικονίζεται η διαδικασία “Stack up” του πακέτου ACP-PRE του ANSYS. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ένα πολύστρωτο τεσσάρων στρώσεων με ίδιες ίνες-ρητίνη σε κάθε στρώση και μηδέν μοίρες προσανατολισμό ως προς την διαμήκη διεύθυνση της πλάκας (θα αναλύσουμε πιο κάτω τον ορισμό του προσανατολισμού).

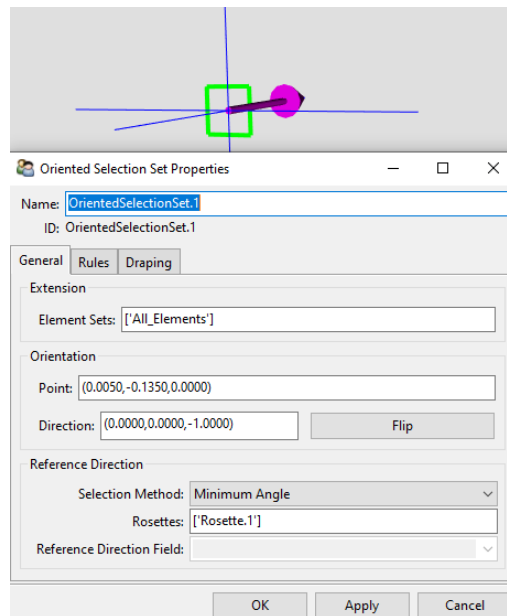
Αφού έχουμε ορίσει το “Stack up” του πολύστρωτου, επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του τοπικού συστήματος συντεταγμένων των στοιχείων του πλέγματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Ο κόκκινος άξονας είναι παράλληλος με την διεύθυνση του διαμήκη άξονα της πλάκας, ο πράσινος άξονας είναι κάθετος στον κόκκινο και ο μπλε είναι παράλληλος με το πάχος της πλάκας.



Σχήμα 2.5: Σύστημα Συντεταγμένων Πολύστρωτου

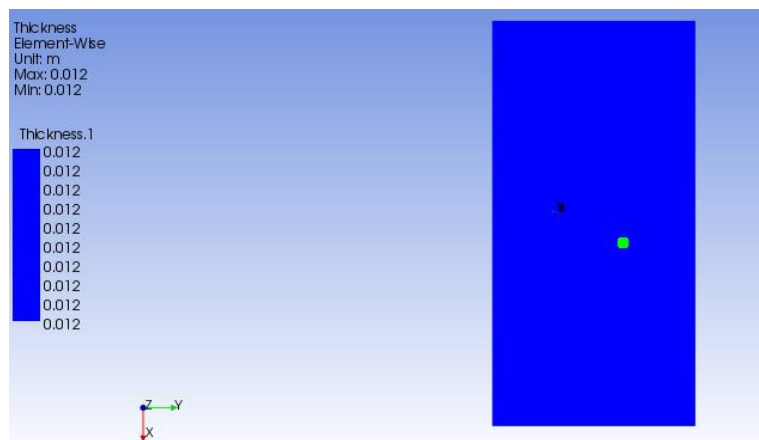
Άρα από την επιλογή «Rosettes» στο πακέτο ACP-PRE, εκτός από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων όπως αναφέραμε, ορίστηκε και η μηδενική γωνία προσανατολισμού των

ινών. Οπότε απομένει ο ορισμός της θετικής φοράς όπου επιτυγχάνεται με την κατάλληλη τοποθέτηση του σημείου στο Oriented Selection Set, όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.6



Σχήμα 2.6: Διεύθυνση Θετικής Φοράς Πολύστρωτου

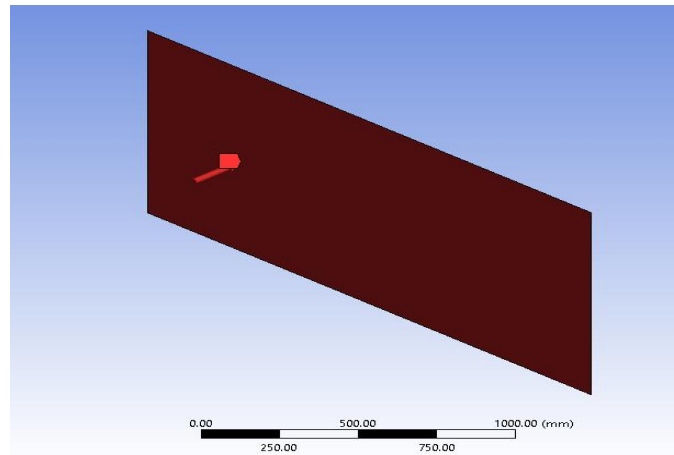
Αφού έχουμε ολοκληρώσει όλα τα ανωτέρω βήματα, είμαστε έτοιμοι να εισάγουμε τις φορτίσεις, τις συνοριακές συνθήκες της πλάκας καθώς και τα ζητούμενα αποτελέσματα. Πριν όμως κλείσουμε το πακέτο ACP PRE, μπορούμε να εκτελέσουμε έναν έλεγχο πάχους του πολύστρωτου έτσι ώστε να βεβαιωθούμε πως δεν έχει γίνει κάποιο λάθος. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή thickness και το αποτέλεσμα το βλέπουμε στο σχήμα 2.7. Ουσιαστικά ελέγχουμε ότι το συνολικό πάχος του πολύστρωτου σε κάθε σημείο είναι το ίδιο και έχουμε εκτελέσει όλα τα βήματα σωστά.



Σχήμα 2.7: Πάχος Πολύστρωτου

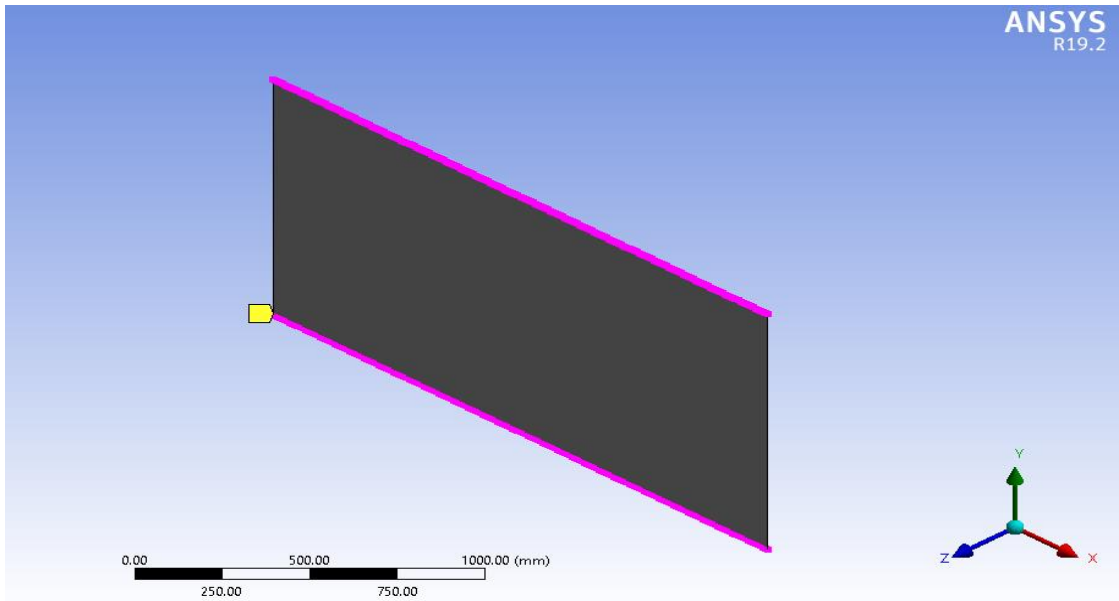
Ορισμός φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών

Η φόρτιση που ασκείται στην πλάκα είναι ομοιόμορφη πλάγια πίεση. Συγκεκριμένα η τιμή της πίεσης ισούται με 1 bar, ήτοι 0,1MPa και ασκείται στη μία από τις δύο επιφάνειες της, όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.8.

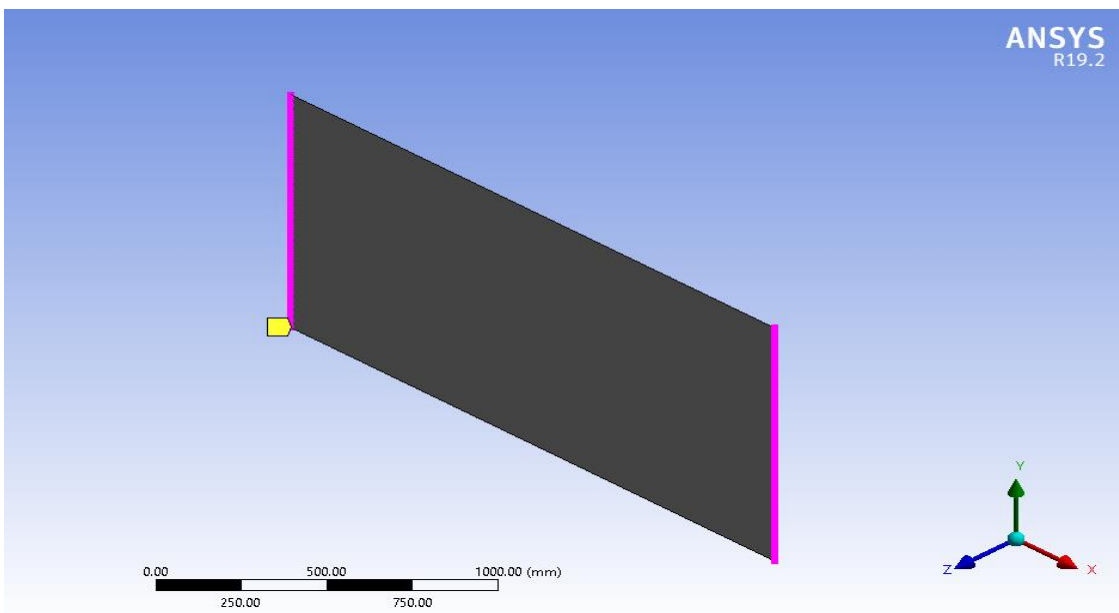


Σχήμα 2.8: Ομοιόμορφη Πλάγια Φόρτιση Πλάκας

Τώρα όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις. Η πρώτη με συνθήκες απλής έδρασης σε όλες τις πλευρές της πλάκας και η δεύτερη με συνθήκες πάκτωσης ομοίως σε όλες τις πλευρές της πλάκας. Επομένως, στην πρώτη περίπτωση που οι συνοριακές συνθήκες αφορούσαν απλή έδραση, η μετατόπιση των κόμβων των μεγάλων πλευρών (σχήμα 2.9) περιορίστηκε κατά τον z-άξονα και η περιστροφή τους κατά τον y-άξονα, ενώ η μετατόπιση και η περιστροφή των κόμβων των μικρών πλευρών (σχήμα 2.10) περιορίστηκε κατά τον z-άξονα και τον x-άξονα αντίστοιχα. Όσον αφορά τις συνθήκες πάκτωσης, η μετατόπιση και η περιστροφή των κόμβων των μεγάλων πλευρών (σχήμα 2.9) και των μικρών πλευρών (σχήμα 2.10) περιορίστηκαν ως προς όλες τις κατευθύνσεις. Τόσο σε συνθήκες απλής έδρασης όσο σε συνθήκες πάκτωσης, ο μεσαίος κόμβος της πλάκας περιορίζεται στις x και y κατευθύνσεις, διότι κατόπιν δοκιμών με αυτόν τον τρόπο λαμβάνουμε αποτελέσματα με μικρότερη απόκλιση συγκριτικά με τα αποτελέσματα των θεωρητικών εξισώσεων.



Σχήμα 2.9: Κόμβοι Μεγάλων Πλευρών Πλάκας

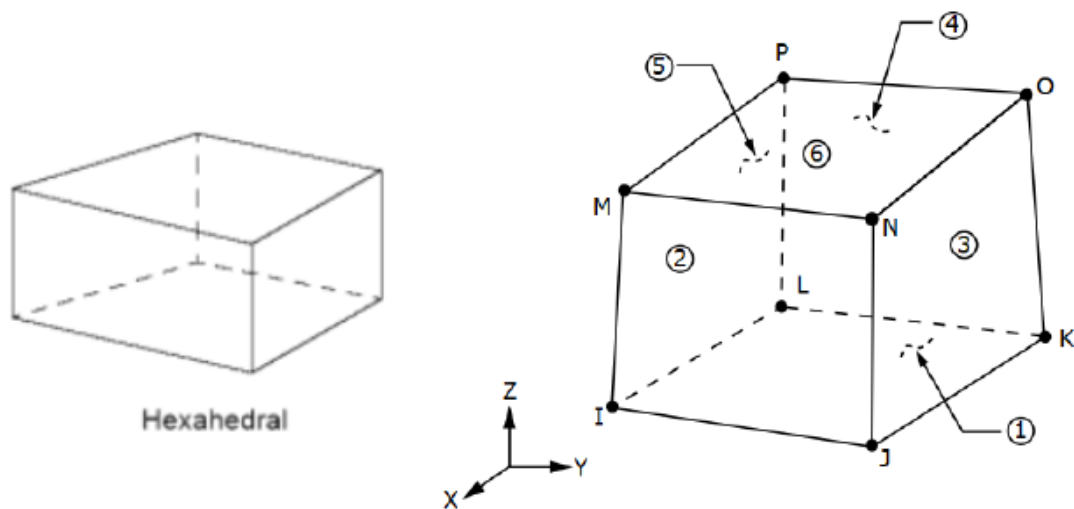


Σχήμα 2.10: Κόμβοι Μικρών Πλευρών Πλάκας

2.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΜΕ LAYERED SOLID ELEMENTS

Έχοντας εξοικειωθεί αρκετά με το κομμάτι των σύνθετων υλικών των πεπερασμένων στοιχείων από τις διάφορες δοκιμές της πλάκας, προχωράμε στη μοντελοποίηση του σωλήνα, γεωμετρία η οποία μας ενδιαφέρει στην παρούσα διπλωματική καθώς και αυτή της γωνιάς.

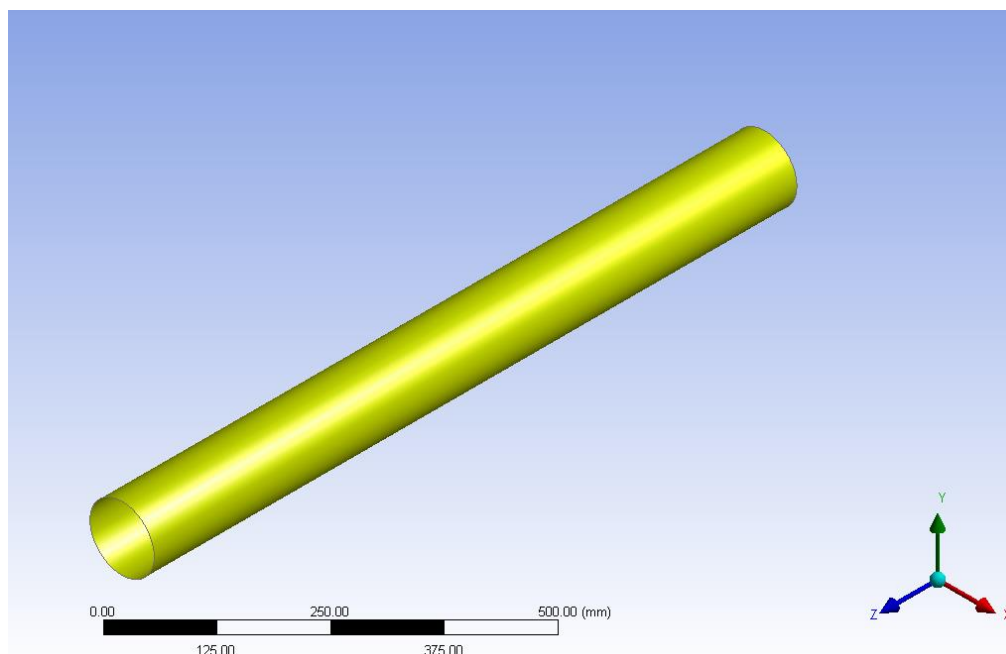
Το πρόγραμμα σύνθετων υλικών του ANSYS (ACP-PRE) δεν μας επέτρεπε την εισαγωγή σε αυτό στοιχεία SOLID οπότε η αρχική μοντελοποίηση του σωλήνα εκτελέστηκε με στοιχεία SHELL 281 όπως έγινε στην μοντελοποίηση πλακών. Ωστόσο πραγματοποιήθηκε εξαγωγή, με την εντολή “Solid Models”, από το πακέτο ACP-PRE στοιχείων SOLID και συγκεκριμένα, οκτακομβικά στοιχεία (8-node elements) εξαεδρικά, SOLID 185, σχήμα 2.11. Τα εν λόγω στοιχεία ορίζονται από οκτώ κόμβους και έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο με μεγάλες ικανότητες παραμόρφωσης. Ουσιαστικά η επιλογή “Solid Models” μας επιτρέπει την μετατροπή στοιχείων SHELL σε SOLID. Οπότε η τελική ανάλυση και η εξαγωγή αποτελεσμάτων επιτεύχθηκε με στοιχεία SOLID



Σχήμα 2.11: Οκτακομβικά στοιχεία SOLID 185

Καθορισμός της γεωμετρίας

Στην περίπτωση του σωλήνα από σύνθετο υλικό, οι εξισώσεις υπολογισμού τάσεων και άλλων χρήσιμων στοιχείων δεν είναι τόσο απλές συγκριτικά με τις αντίστοιχες για πλάκες. Οι εν λόγω εξισώσεις για σωλήνα από σύνθετο υλικό, απαιτούν σημαντικό χρόνο εκτέλεσης. Οπότε η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των πεπερασμένων στοιχείων θα ελεγχθεί με αντίστοιχα αποτελέσματα από διάφορες μελέτες που συγκριτικά ο απαιτούμενος χρόνος για την εξαγωγή αποτελεσμάτων είναι μικρότερος. Άρα στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν επιλέγεται τυχαία γεωμετρία αλλά αντίστοιχη των υπό σύγκριση μελετών (M. H. Elgohary et al-2021). Άρα επιλέγεται σωλήνας με εσωτερική ακτίνα τα 50 χιλιοστά και μήκος το ένα μέτρο. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, μέχρι το πακέτο ACP-PRE, δουλεύουμε με στοιχεία SHELL, άρα αρχικά δεν καθορίζουμε πάχος. Γεωμετρία του σωλήνα μπορούμε να δούμε στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Γεωμετρία Σωλήνα

Ορισμός ιδιοτήτων και πλέγματος

Οι ιδιότητες ιών-ρητίνης που επιλέχθηκαν για την αρχική μοντελοποίηση του σωλήνα παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα 2.2 όπου E , ν , και G αναφέρονται στο μέτρο ελαστικότητας, στον λόγο poisson και στο μέτρο διάτμησης αντίστοιχα όπου οι δείκτες υποδηλώνουν την διεύθυνση αναφοράς.

Πίνακας 2.2: Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετου Υλικού Σωλήνα

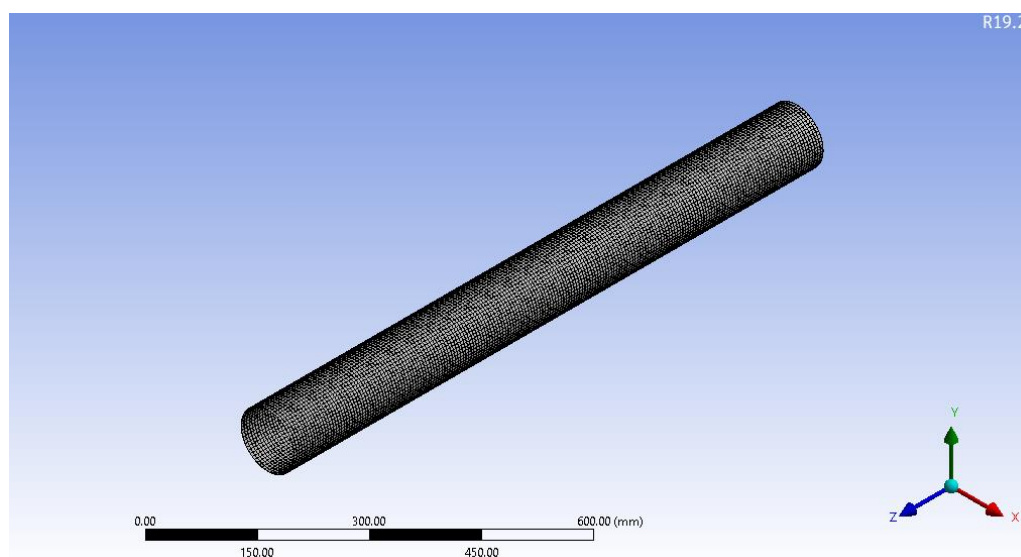
	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}	G_{23} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{12} (GPa)
Σ.Υ									
Γραφίτης	155	12.1	12.1	0.458	0.248	0.248	3.2	4.4	4.4
Πολυεστέρας									

Οι μηχανικές αντοχές του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του σωλήνα αναγράφονται στον πίνακα 2.3 όπου S_T , S_c και τ αναφέρονται στην αντοχή στον εφελκυσμό, στην αντοχή στην θλίψη και αντοχή στην διάτμηση αντίστοιχα όπου οι δείκτες υποδηλώνουν την διεύθυνση αναφοράς.

Πίνακας 2.3: Αντοχές Σύνθετου Υλικού Σωλήνα

	S1T (MPa)	S2T (MPa)	S3T (MPa)	S1C (MPa)	S2C (GPa)	S3C (GPa)	τ23 (MPa)	τ13 (MPa)	τ12 (MPa)
Σ.Υ Γραφίτης Πολυεστέρας	1500	50	50	1250	200	200	100	30	30

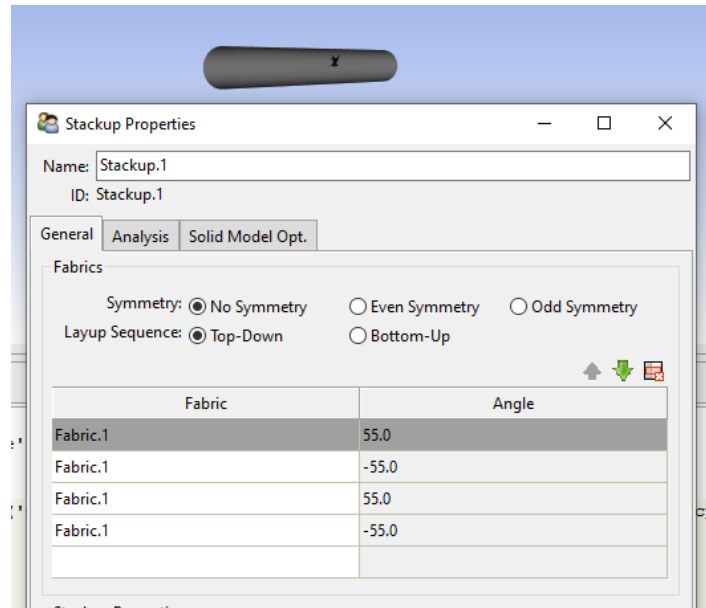
Ο Η.Μπιλάλης (2016) ακολούθησε μια συγκεκριμένη πολιτική για τη δημιουργία του πέλματος, όπου όρισε κατάλληλα τα μήκη και πλάτη των στοιχείων για να δημιουργηθούν τελικά τετραγωνικά στοιχεία. Αυτή ακριβώς η πολιτική ακολουθήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τώρα όσον αφορά το μέγεθος της πλευράς κάθε στοιχείου, αυτό ορίστηκε στα 5 mm γιατί από εκεί και κάτω είχαμε μεγάλες καθυστερήσεις στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων καθώς και ίδια αποτελέσματα. Οπότε επιλέχθηκαν στοιχεία τετραγωνικών διαστάσεων 5mmX5mm με 200 υποδιαιρέσεις κατά το διάμηκες και 63 κατά την περιφέρεια, άρα συνολικά τα στοιχεία είναι 12600. . Το σχήμα 2.13 απεικονίζει το πλέγμα του σωλήνα με τετραγωνικές πλευρές στοιχείων.



Σχήμα 2.13: Πλέγμα Σωλήνα

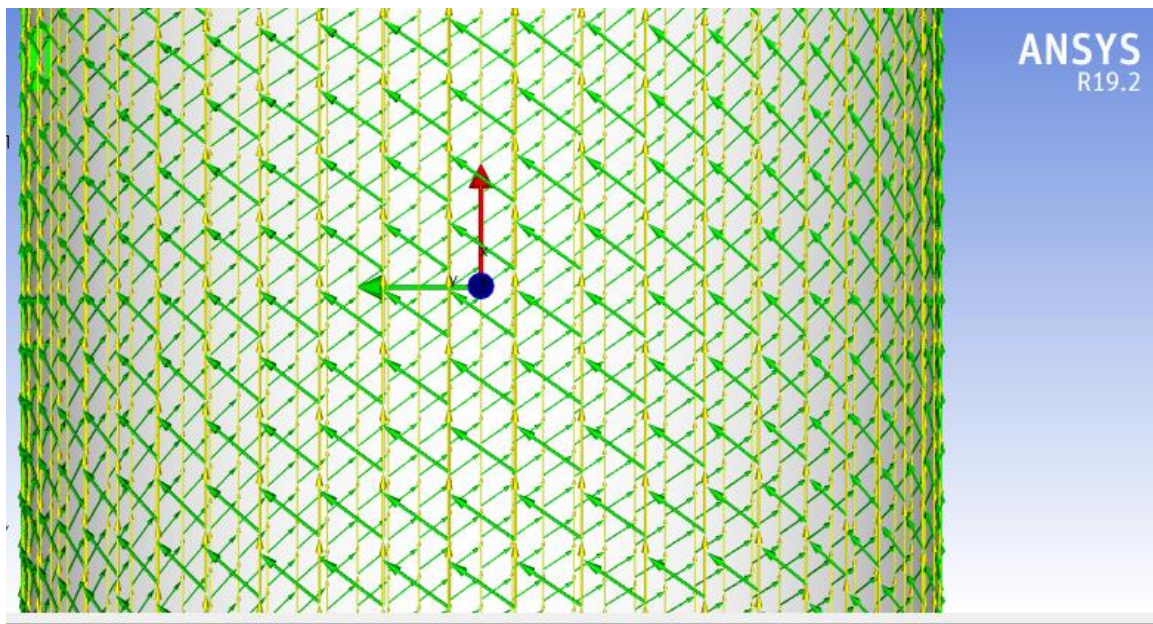
Ορισμός αριθμού και προσανατολισμού στρώσεων

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με της παραγράφου 2.1.1 Εξετάσαμε δύο περιπτώσεις αλληλουχίας στρώσεων. Συγκεκριμένα στρώσεις [+55/-55/+55/-55] και [+55/+30/-30/-55] όπως φαίνεται για το πρώτο πολύστρωτο στο σχήμα 2.14. Το πάχος κάθε στρώσης ορίστηκε στα 0,5mm, οπότε το συνολικό πάχος του πολύστρωτου θα είναι στα 2mm για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 2.14: Πολύστρωτο Σωλήνα [+55/-55/+55/-55]

Αξίζει να σημειωθεί πως ακολουθήσαμε ίδιες τοπικές συντεταγμένες (Rossetes) με αυτές της πλάκας και αποφύγαμε τις κυλινδρικές, διότι βολεύει στην προσαρμογή των προσανατολισμών των ινών και αντίστοιχα στην αλλαγή τους αν το επιθυμούμε. Οπότε με αυτόν τον τρόπο η μηδενική γωνία προσανατολισμού θα είναι παράλληλη με τον διαμήκη άξονα του σωλήνα και π.χ. η γωνία +55 θα είναι στραμμένη 55 μοίρες αριστερά από τον διαμήκη άξονα όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2.15, όπου με βάση την θεωρία ορίζεται η θετική φορά διεύθυνσεως.

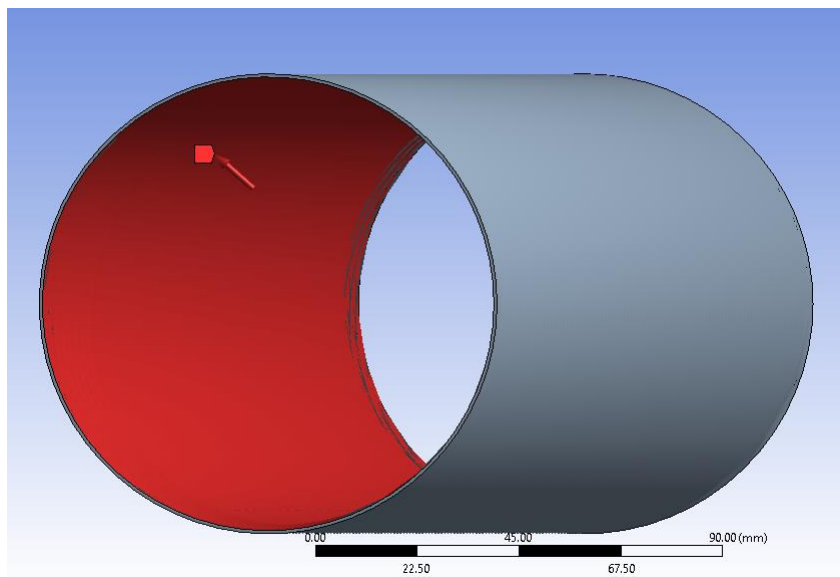


Σχήμα 2.15: Προσανατολισμός αναφοράς (μηδενικού προσανατολισμού, κίτρινα βέλη) και γωνία ινών +55 μοιρών (πράσινα βέλη)

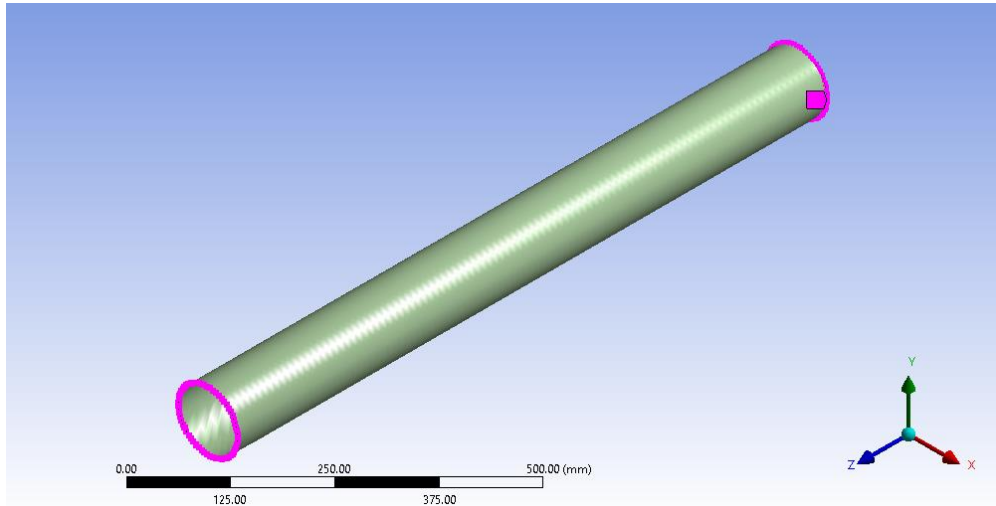
Ακόμα ένα άλλο σημείο που αξίζει να σημειωθεί είναι ο τρόπος εξαγωγής των στοιχείων σε solid elements. Όπως είδαμε και σε παραπάνω παραγράφους, αναφερόμαστε στην επιλογή «Solid Models», η οποία μας δίνει διάφορους τρόπους εξαγωγής στοιχείων. Ανάμεσα στους διάφορους τρόπους, επιλέχθηκε ο μονολιθικός τρόπος διότι θέλουμε να ελέγξουμε σε οποιοδήποτε σημείο κατά το πάχος και μήκος του σωλήνα τις τάσεις και γενικά την συμπεριφορά. Οπότε ο μονολιθικός τρόπος εξαγωγής μας βοηθάει για το συγκεκριμένο πρόβλημα όπου θέλουμε να ελέγχουμε σε οποιοδήποτε σημείο κατά το πάχος τις τάσεις, μετατοπίσεις κ.ά.. Ενώ εάν επιλεγόταν έτερος τρόπος, θα λαμβάναμε την μέση τιμή και όχι ακριβή τιμή σε οποιοδήποτε σημείο του πάχους που θα επιθυμούσαμε.

Ορισμός φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών

Η φόρτιση που ασκείται στον σωλήνα είναι ομοιόμορφη εσωτερική πίεση. Η τιμή της πίεσης ισούται με 100 bar, ήτοι 1MPa όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2.16. Θεωρείται πως ο σωλήνας έχει αρκετό βάρος στα άκρα του, ίσως από το υπόλοιπο δίκτυο είτε από κάποια στηρίγματα, οπότε στα άκρα του και συγκεκριμένα στα πρόσωπα/δακτύλιους εφαρμόζουμε συνθήκες πάκτωσης, δηλαδή επιλέγουμε όλους του κόμβους του προσώπου και περιορίζουμε κινήσεις ως προς τον y-άξονα και z-άξονα στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων (σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.16: Ομοιόμορφη εσωτερική πίεση Σωλήνα



Σχήμα 2.17: Κόμβοι δακτυλίων (άκρων) σωλήνα

2.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΣ

2.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τον έλεγχο αξιοπιστίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της πλάκας, εκτελέστηκε σύγκριση με τα αποτελέσματα από αναλυτικές μεθόδους .

Για συνοριακές συνθήκες απλής έδρασης σε όλες τις πλευρές της πλάκας σε συνδυασμό με κατανεμημένη πλάγια πίεση, το βέλος κάμψης μπορεί να υπολογιστεί για συγκεκριμένη θέση στην πλάκα ως εξής (Κυριακόπουλος-1989, Καρυαμπάς-1992):

$$w(x, y) = \frac{16 \cdot p_0}{\pi^6} \cdot \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\frac{1}{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)}{D_{11} \cdot \left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2 \cdot (D_{11} + 2 \cdot D_{22}) \cdot \left(\frac{m}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{n}{b}\right)^2 + D_{22} \cdot \left(\frac{n}{b}\right)^4} \quad (2.1)$$

όπου

p_0 = επιβαλλόμενη, ομοιόμορφα κατανεμημένη πλάγια πίεση, σε N/m²

a = μεγαλύτερη πλευρά της πολύστρωτης πλάκας, σε m

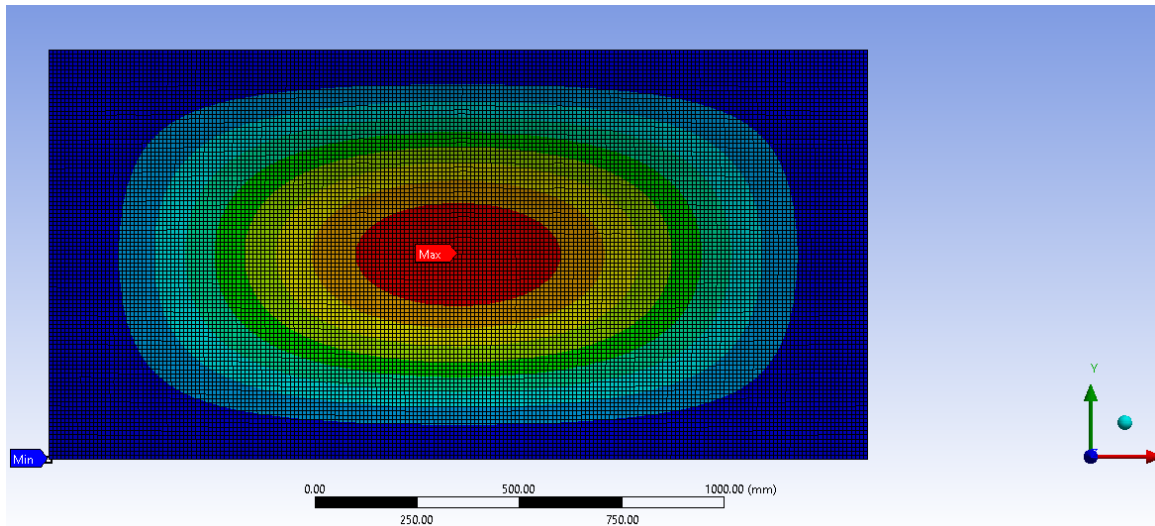
b = μικρότερη πλευρά της πολύστρωτης πλάκας, σε m

$m = \cos\theta$ (θ : γωνία προσανατολισμού στρώσης)

$n = \sin\theta$

D = μητρώο καμπτικής δυσκαμψίας

Ο υπολογισμός του βέλους κάμψης της εξίσωσης 2.1 επιτεύχθηκε με χρήση MATLAB, όπως παρατίθεται στο παράρτημα Α. Ενώ το αντίστοιχο αποτέλεσμα των Πεπερασμένων Στοιχείων μπορούμε να το δούμε στο σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18: Κατανομή βέλους κάμψης σε πλάκα με συνοριακές συνθήκες απλής έδρασης

Αναφορικά με τις τάσεις, οι σ_1 και σ_2 στο κέντρο μιας απλά εδρασμένης πλάκας (σημείο όπου οι τάσεις είναι μέγιστες) δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις, όπου η διεύθυνση 1 είναι παράλληλη στην μεγάλη πλευρά της πλάκας και η διεύθυνση 2 παράλληλη στην μικρή πλευρά της πλάκας (Κυριακόπουλος-1989, Καρυαμπάς-1992):

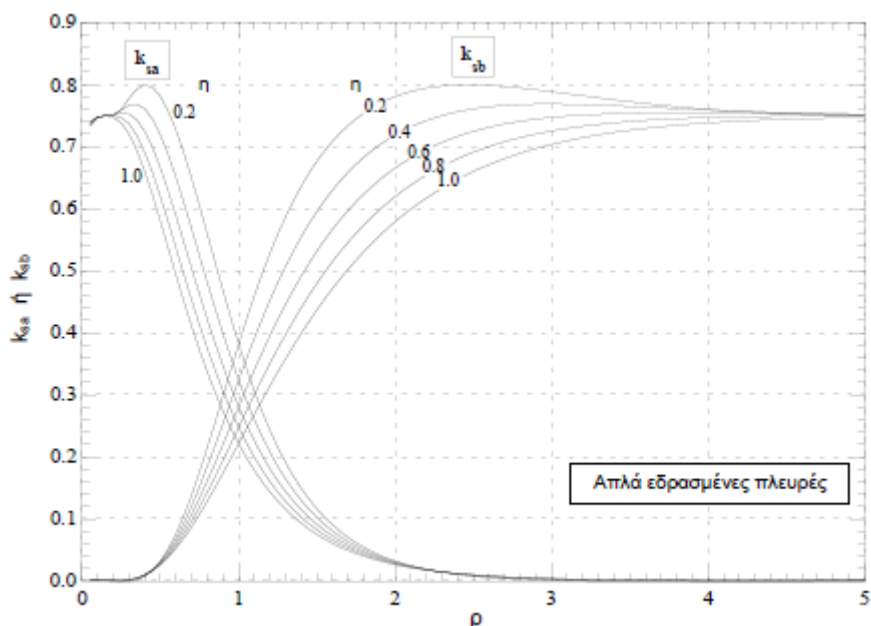
$$\sigma_1 = \frac{p_0}{t^2} \cdot (a^2 \cdot k_{sa} + \nu_{12} \cdot b^2 \cdot k_{sb}) \quad (2.2)$$

$$\sigma_2 = \frac{p_0}{t^2} \cdot (\nu_{12} \cdot a^2 \cdot k_{sa} + b^2 \cdot k_{sb}) \quad (2.3)$$

όπου a είναι η μεγάλη πλευρά του πολύστρωτου, b η μικρή πλευρά του πολύστρωτου, ν_{12} ο λόγος poisson στο επίπεδο 1-2 και οι συντελεστές τάσεις k_{sa} και k_{sb} υπολογίζονται με βάση το σχήμα 2.19, αφού πρώτα έχει υπολογιστεί ο φαινόμενος λόγος πλευρών (εξίσωση 2.4) και ο γενικευμένος λόγος ορθοτροπικότητας (εξίσωση 2.5)

$$\rho = \frac{a}{b} \cdot \sqrt[4]{\frac{E_2}{E_1}} \quad (2.4)$$

$$\eta = \frac{\nu_{12} \cdot E_2 + 2 \cdot G_{12} \cdot (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})}{\sqrt{E_1 \cdot E_2}} \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.19: Υπολογισμός συντελεστών k_{sa} και k_{sb} για απλά εδρασμένες πλευρές

Πολύ προσοχή στις εξισώσεις (2.2) έως (2.5) επειδή ισχύουν μόνο για ομογενείς ορθοτροπικές πλάκες, όταν δοκιμάσαμε συμμετρικές ειδικά ορθοτροπικές πολύστρωτες πλάκες έπρεπε να εισάγουμε τις ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες, που δίνονται από τις σχέσεις:

$$E_1 = \frac{A_{11} \cdot (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})}{t} \quad (2.6)$$

$$E_2 = \frac{A_{22} \cdot (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21})}{t} \quad (2.7)$$

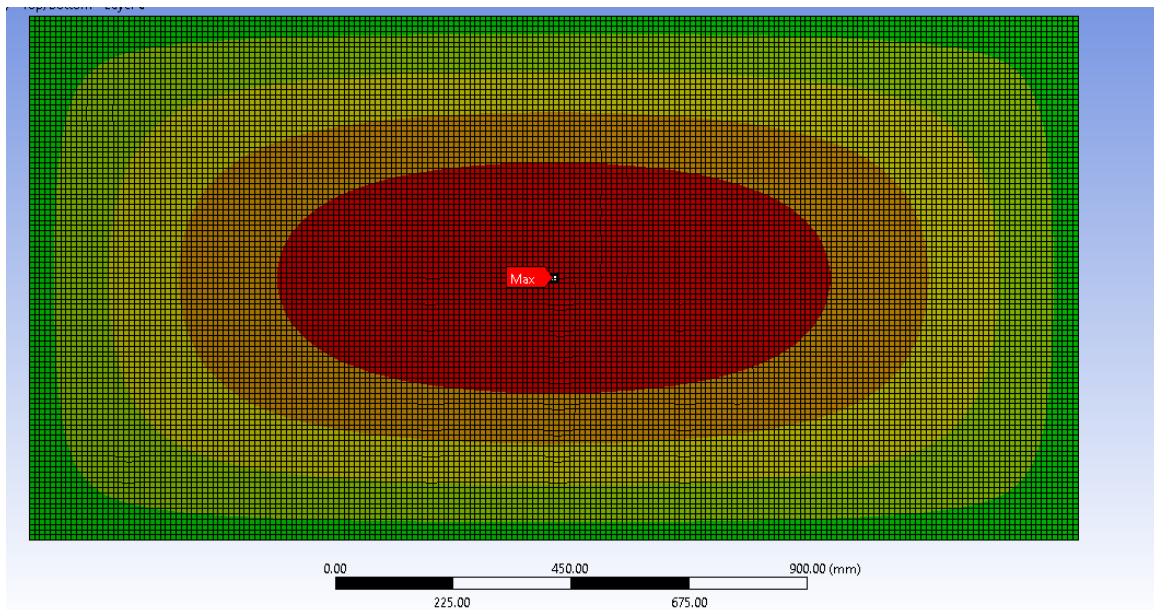
$$\nu_{12} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (2.8)$$

$$\nu_{21} = \frac{A_{12}}{A_{11}} \quad (2.9)$$

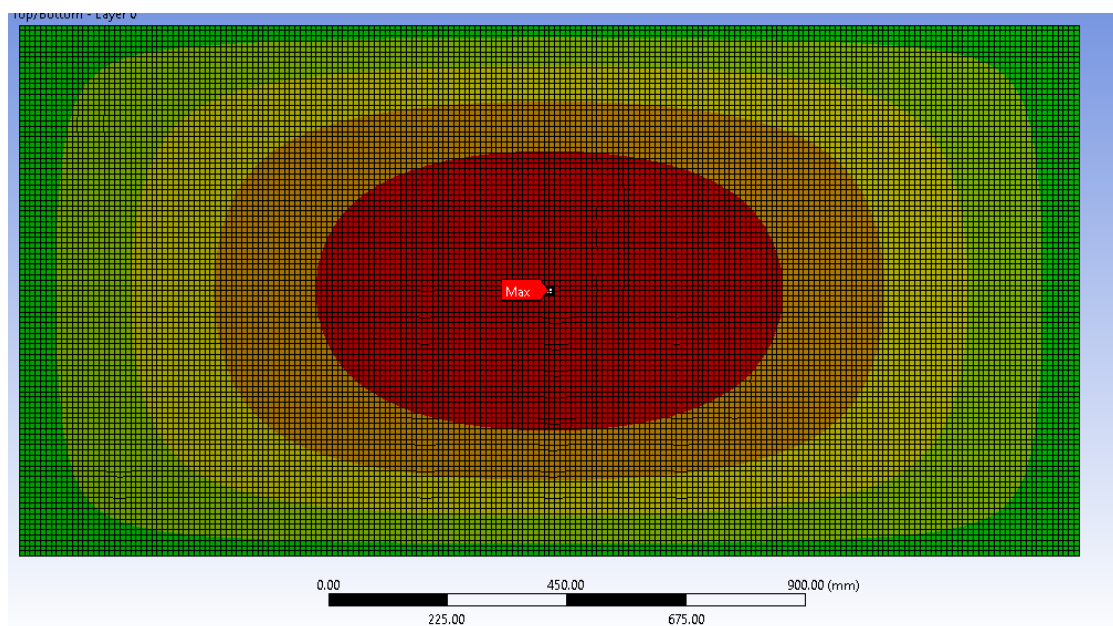
όπου

A = μητρώο εκτατικής δυσκαμψίας

Οι παραπάνω τάσεις υπολογίστηκαν με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, αντιπροσωπεύουν τις τάσεις στην στρώση που είναι πιο κοντά στην επιφάνεια που επιβάλλεται η ομοιόμορφα κατανεμημένη πλάγια πίεση και συγκεκριμένα στο σημείο της στρώσης που βρίσκεται πιο κοντά στην θλιβόμενη επιφάνεια και μπορούμε να τις δούμε στα σχήματα 2.20 και 2.21 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.20: Κατανομή τάσης σ_1 για απλά εδρασμένες πλευρές



Σχήμα 2.21: Κατανομή τάσης σ_2 για απλά εδρασμένες πλευρές

Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και των εξισώσεων της βιβλιογραφίας παρατίθενται στον πίνακα 2.4

Πίνακας 2.4: Συγκριτικά Αποτελέσματα τάσεων για την περίπτωση εδρασμένης πλάκας (σε MPa)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (ΕΔΡΑΣΜΕΝΕΣ ΠΛΕΥΡΕΣ)						
	COMPOSITE [0 90 90 0]			COMPOSITE [0 0 0 0]		
	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	ANSYS	% ΔΙΑΦΟΡΑ	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	ANSYS	% ΔΙΑΦΟΡΑ
Βέλος Κάμψης [mm]	320.9	321.2	0.1	524.9	525.3	0.075
P	2			1.0023		
H	0.1839			0.3891		
kw (από διάγραμμα)						
σ1 [MPa]	134.2	135.0	0.58	948.9	948.9	0.003
σ2 [MPa]	552.4	552.7	0.06	237.4	237.7	0.15
ksa	0.042			0.32		
ksb	0.789			0.32		

Τα ανωτέρω αποτελέσματα αναφέρονται σε δύο πολύστρωτα τεσσάρων στρώσεων το κάθε ένα. Το πρώτο [0/+90/+90/0] και το δεύτερο [0/0/0/0]. Όπως παρατηρούμε και από τον ανωτέρω πίνακα, η διαφορά μεταξύ αποτελεσμάτων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και των αναλυτικών μεθόδων είναι κάτω του 1%, οπότε τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων της πλάκας κρίνονται αξιόπιστα.

Στην περίπτωση πακτωμένων πλακών, ο αναλυτικός υπολογισμός του μέγιστου βέλους κάμψης έγινε με την κάτωθι εξίσωση:

$$w = k_w \cdot \frac{12 \cdot (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}) \cdot p_0 \cdot b^4}{E_2 \cdot t^3 \cdot 10^3} \quad (2.10)$$

Όπου

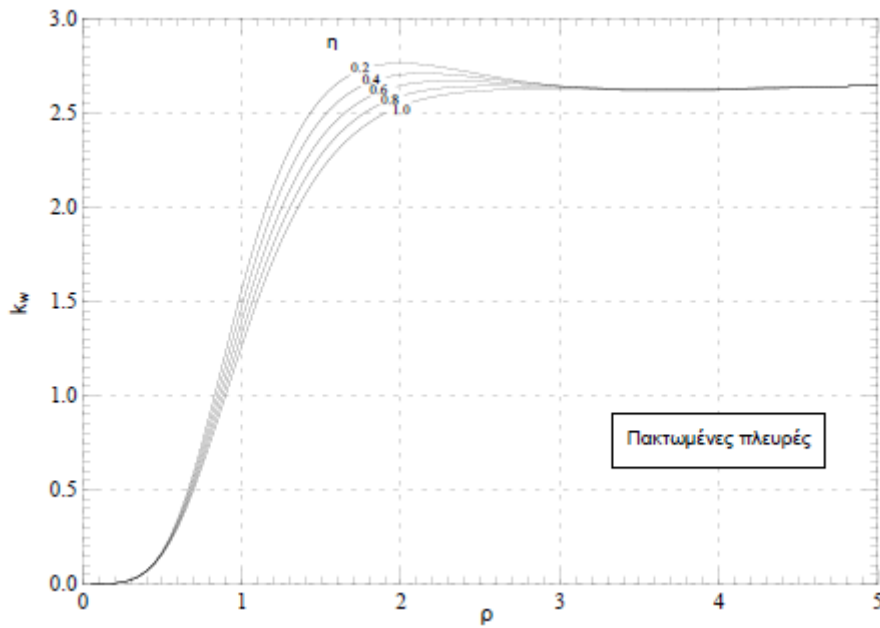
k_w = συντελεστής κάμψης και υπολογίζεται με βάση το σχήμα 2.22.

p_0 = επιβαλλόμενη, ομοιόμορφα κατανεμημένη πλάγια πίεση, σε N/m²

b = μικρότερη πλευρά της πολύστρωτης πλάκας

E_2 = μέτρο ελαστικότητας της πλάκας σε διεύθυνση παράλληλη με την πλευρά b , σε N/m²

t = πάχος της πολύστρωτης πλάκας, σε m



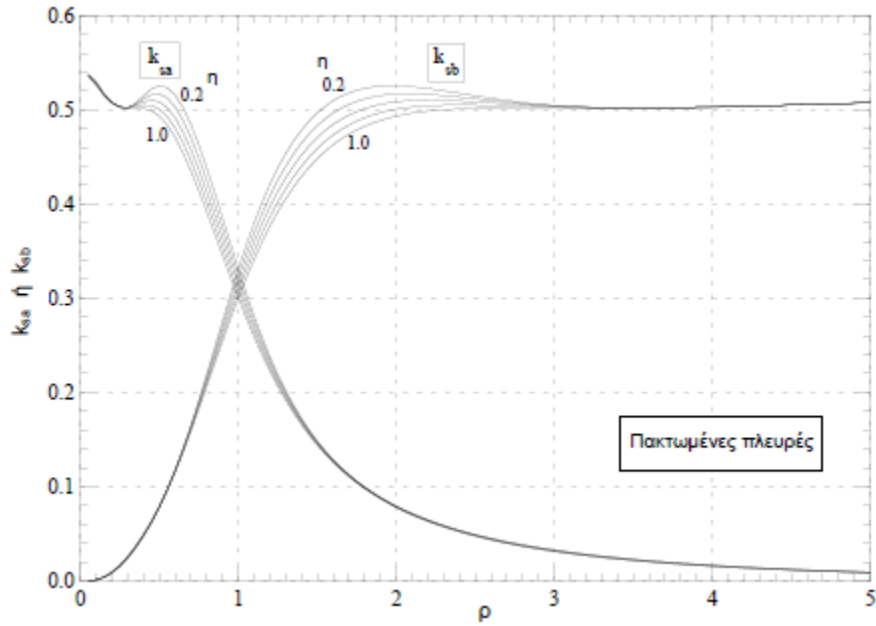
Σχήμα 2.22: Υπολογισμός συντελεστή k_w για απλά πακτωμένες πλευρές

Στην περίπτωση πακτωμένων πλακών, η τάση σ_1 στο μέσο της μικρής πλευράς και η τάση σ_2 στο μέσο της μεγάλης πλευράς (σημεία όπου οι αντίστοιχες τάσεις γίνονται μέγιστες για αυτές τις συνοριακές συνθήκες) δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_1 = \frac{p_0 \cdot a^2}{t^2} \cdot k_{sa} \quad (2.11)$$

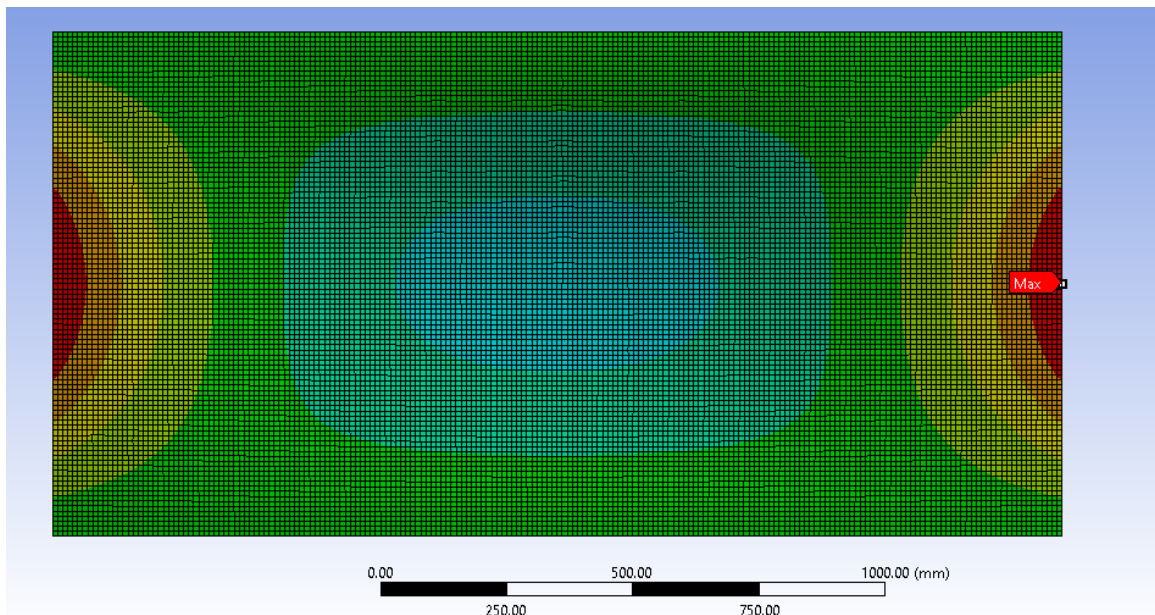
$$\sigma_2 = \frac{p_0 \cdot b^2}{t^2} \cdot k_{sb} \quad (2.12)$$

όπου οι συντελεστές τάσεις k_{sa} και k_{sb} υπολογίζονται με βάση το σχήμα 2.23.

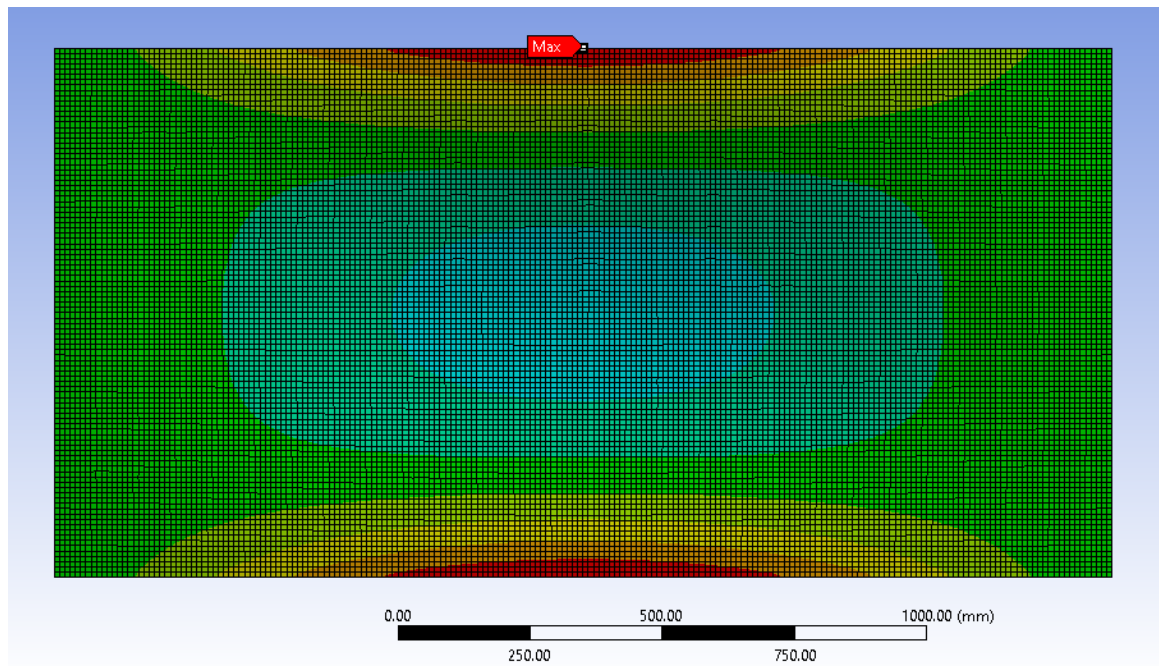


Σχήμα 2.23: Υπολογισμός συντελεστών k_{sa} και k_{sb} για απλά πακτωμένες πλευρές

Οι παραπάνω τάσεις υπολογίστηκαν με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, αντιπροσωπεύουν τις τάσεις στην στρώση που είναι πιο κοντά στην επιφάνεια που επιβάλλεται η πλάγια ομοιόμορφη δύναμη και μπορούμε να τις δούμε στα σχήματα 2.24 και 2.25 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.24: Τάση σ_1 για πακτωμένες πλευρές



Σχήμα 2.25: Τάση σ_2 για πακτωμένες πλευρές

Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε δύο πολύστρωτα τεσσάρων στρώσεων το κάθε ένα και παρατίθενται στον πίνακα 2.5. Το πρώτο [0/+90/+90/0] και το δεύτερο [0/0/0/0]. Όπως παρατηρούμε και από τον ανωτέρω πίνακα, η διαφορά μεταξύ αποτελεσμάτων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και των αναλυτικών μεθόδων είναι κάτω του 1%, οπότε τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων της πλάκας κρίνονται αξιόπιστα.

Πίνακας 2.5: Συγκριτικά Αποτελέσματα για την περίπτωση πακτωμένης πλάκας

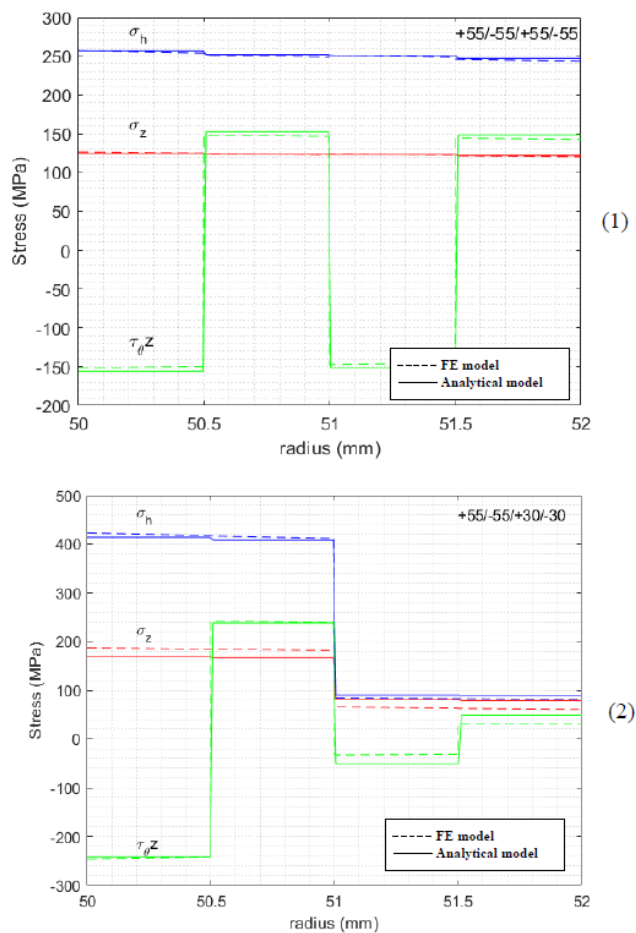
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (ΠΑΚΤΩΜΕΝΕΣ ΠΛΕΥΡΕΣ)

	COMPOSITE [0 90 90 0]			COMPOSITE [0 0 0 0]		
	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	ANSYS	% ΔΙΑΦΟΡΑ	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	ANSYS	% ΔΙΑΦΟΡΑ
Βέλος Κάμψης [mm]	29.07	29.11	0.106	133.27	132.53	0.559
ρ	2			1.0023		
η	0.1839			0.3983		
kw (από διάγραμμα)	2.757			1.5		
σ_1 [MPa]	116.67	116.11	0.488	888.89	891.48	0.291
σ_2 [MPa]	547.92	551.12	0.578	222.22	220.8	0.644
ksa	0.042			0.32		
ksb	0.789			0.32		

2.2.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 2.1.2, η σύγκριση των αποτελεσμάτων του σωλήνα με πεπερασμένα στοιχεία με αποτελέσματα από αναλυτικές μεθόδους απαιτεί αρκετό χρόνο και ενδέχεται να υπάρξουν αρκετά λάθη λόγω της πολυπλοκότητας των εξισώσεων. Γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκε ο τρόπος σύγκρισης των αποτελεσμάτων με άλλα από την βιβλιογραφία.

Ο Μ. Η. Elgohary και άλλοι (2021) στην τεχνική τους έκθεση μας παρουσιάζουν αποτελέσματα για περιφερειακή (σ_h), αξονική (σ_z) και διατμητική τάση ($\tau_{\theta z}$) κατά το πάχος του μοντέλου του κυλίνδρου που μελετούν. Τα δεδομένα της μελέτης τους έχουν αναφερθεί αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.2. Τα αποτελέσματα τους τα απεικονίζουν στο σχήμα 2.26, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το πολύστρωτο [+55/-55/+55/-55] και [+55/+30/-30/-55] αντίστοιχα και τα αναλύουμε στην συνέχεια.



Σχήμα 2.26: Περιφερειακή, Αξονική και Διατμητική Τάση Μελέτης

Αυτό που παρατηρούμε στο ανωτέρω σχήμα καθώς το αναφέρουν και στην μελέτη τους, τα βήματα που ακολούθησαν για να απεικονίσουν τις τάσεις στα ανωτέρω διαγραμμάτων έγινε ως εξής: σε κάθε στρώση λάμβαναν τρεις τιμές. Συγκεκριμένα, τάσεις στο κάτω, στο μεσαίο και στο άνω άκρο της στρώσης. Αυτό εκτελέστηκε για κάθε μία από τις τέσσερις στρώσεις και τα αποτελέσματα φαίνονται στο ανωτέρω σχήμα. Γι' αυτό τον λόγο π.χ.

παρατηρούμε σκαλοπάτι στην διατμητική τάση σε ακτίνα 50,5mm στο πολύστρωτο [+55/-55/+55/-55]. Λόγου χάρη, η τάση του άνω άκρου της πρώτης στρώσης ισούται περίπου με -150MPa, ενώ η αμέσως επόμενη τάση, είναι η τάση του κάτω άκρου της δεύτερης στρώσης που ισούται περίπου με +150MPa, οπότε με αυτό τον τρόπο δημιουργείται το σκαλοπάτι που βλέπουμε στο διάγραμμα.

Για να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τους ανωτέρω ερευνητές, εφαρμόσαμε στο δικό μας μοντέλο τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες και αντοχές ίνας-ρητίνης, συγκεκριμένα τον γραφίτη πολυεστέρα που αναφέραμε στην παράγραφο 2.1.2. Επιπλέον, δημιουργήσαμε την ίδια γεωμετρία, στρώσεις, πάχος στρώσεων και προσανατολισμούς όπως ακριβώς αναφέραμε στην μοντελοποίηση του σωλήνα στην παράγραφο 2.1.2. Επιπλέον όπως έχουμε ήδη αναφέρει, για τον υπολογισμό των τάσεων σε οποιοδήποτε σημείο κατά το πάχος και μήκος, χρησιμοποιήθηκε μονολιθική μέθοδος εξαγωγή solid στοιχείων όπως έχουμε αναφέρει αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.2. Συγκριτικά αποτελέσματα παρατίθενται στους πίνακες 2.6 και 2.7 για τα δύο πολύστρωτα αντίστοιχα. Παρατηρούμε πως η διαφορά των περιφερειακών, αξονικών και διατμητικών τάσεων παραμένει κάτω από 1% σε κάθε σημείο του πάχους. Οπότε αυτό μας επιβεβαιώνει πως το μοντέλο του σωλήνα με πεπερασμένα στοιχεία που έχουμε αναπτύξει είναι αξιόπιστο.

Πίνακας 2.6: Συγκριτικά Αποτελέσματα τάσεων για Πολύστρωτο [+55/-55/+55/-55]

Πολύστρωτο [+55/-55/+55/-55]

	50	50.5	50.5	51	51	51.5	51.5	52
Περιφερειακή Τάση Μοντέλου Μελέτης (MPa)	256	254	253	249	248	247.5	247	244
Περιφερειακή Τάση Μοντέλου Πτυχιακής (MPa)	256	252.6	252	249.8	247	247	247	244.2
ΔΙΑΦΟΡΑ (%)	0	0.551	0.395	0.321	0.403	0.202	0	0.082
Αξονική Τάση Μοντέλου Μελέτης (MPa)	126	124	123	122	122	121.5	120.5	120
Αξονική Τάση Μοντέλου Πτυχιακής (MPa)	125.2	123.8	122	122	121.5	121.1	120.05	119.8
ΔΙΑΦΟΡΑ (%)	0.635	0.161	0.813	0	0.41	0.329	0.373	0.167
Διατμητική Τάση Μοντέλου Μελέτης (MPa)	-152	-150	149	147	149	147	147	142
Διατμητική Τάση Μοντέλου Πτυχιακής (MPa)	-153	-149	148	147	149	147	148	142.6
ΔΙΑΦΟΡΑ (%)	0.658	0.667	0.671	0	0	0	0.68	0.422

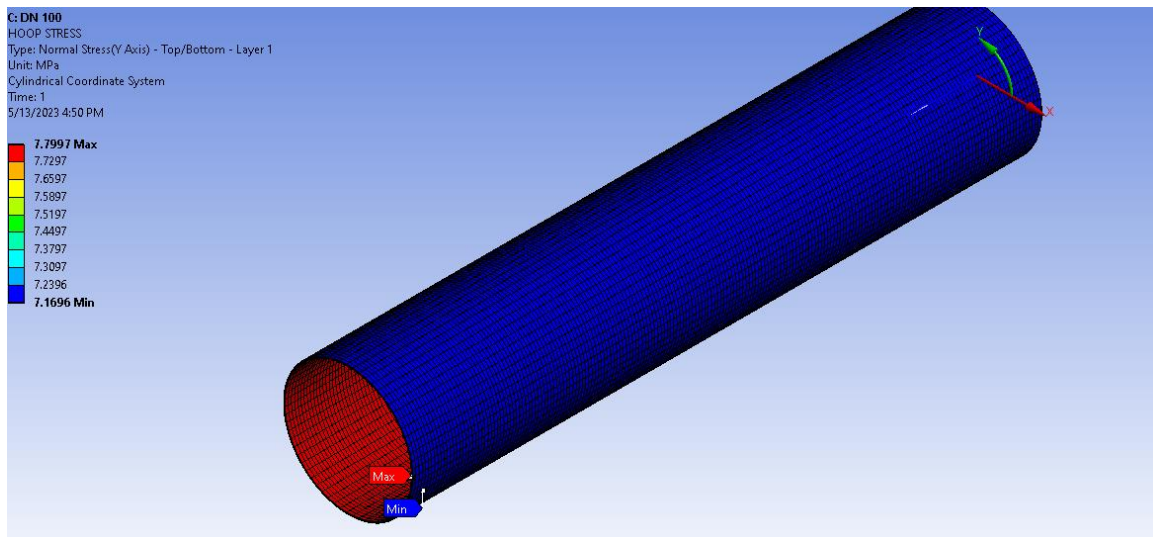
Πίνακας 2.7: Συγκριτικά Αποτελέσματα για Πολύστρωτο [+55/-30/+30/-55]

Πολύστρωτο [55/+30/-30/-55]

Ακτίνα (mm)	50	50.5	50.5	51	51	51.5	51.5	52
Περιφερειακή Τάση Μοντέλου Μελέτης (MPa)	421	420	100	101	101	101.5	400	400
Περιφερειακή Τάση Μοντέλου Πτυχιακής (MPa)	420	420	99	100.5	100.5	101	399	399
ΔΙΑΦΟΡΑ (%)	<u>0.237</u>	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>0.495</u>	<u>0.495</u>	<u>0.493</u>	<u>0.25</u>	<u>0.25</u>
Αξονική Τάση Μοντέλου Μελέτης (MPa)	184	60	60	60	60	60	180	179
Αξονική Τάση Μοντέλου Πτυχιακής (MPa)	183.1	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	179	178
ΔΙΑΦΟΡΑ (%)	<u>0.489</u>	<u>0.833</u>	<u>0.833</u>	<u>0.833</u>	<u>0.833</u>	<u>0.833</u>	<u>0.556</u>	<u>0.559</u>
Διατμητική Τάση Μοντέλου Μελέτης (MPa)	-250	-250	25	25	-25	-25	236	236
Διατμητική Τάση Μοντέλου Πτυχιακής (MPa)	-249	-249	24.8	24.8	-24.8	-24.8	235.4	235.4
ΔΙΑΦΟΡΑ (%)	<u>0.4</u>	<u>0.4</u>	<u>0.8</u>	<u>0.8</u>	<u>0.8</u>	<u>0.8</u>	<u>0.254</u>	<u>0.254</u>

Στους ανωτέρω πίνακες, οι τάσεις που λάβαμε από τα διαγράμματα της μελέτης αναφέρονται ως τάσεις μοντέλου μελέτης. Ενώ οι τάσεις που λήφθηκαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναφέρονται ως τάσεις μοντέλου πτυχιακής. Επίσης σημαντικό σημείο είναι οι τιμές για ίδια τιμή ακτίνας. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η μία τιμή αντιπροσωπεύει την τάση του άνω σημείου μιας στρώσης και η έτερη τιμή του κάτω σημείου της αμέσως επόμενης στρώσης.

Σημείο προσοχής είναι επειδή συγκρίνουμε περιφερειακές, αξονικές και διατμητικές τάσεις του σωλήνα, επιλέγουμε για λύση το κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων και όχι το σύστημα λύσης που υπολογίζει τις τάσεις στην διεύθυνση των ινών. Οπότε για τον υπολογισμό της περιφερειακής τάσης επιλέγουμε γ-άξονα (σχήμα 2.27) των κυλινδρικών συντεταγμένων, ενώ για τις αξονικές τάσεις και τις διατμητικές τάσεις τον z-άξονα και το yz-επίπεδο αντίστοιχα.

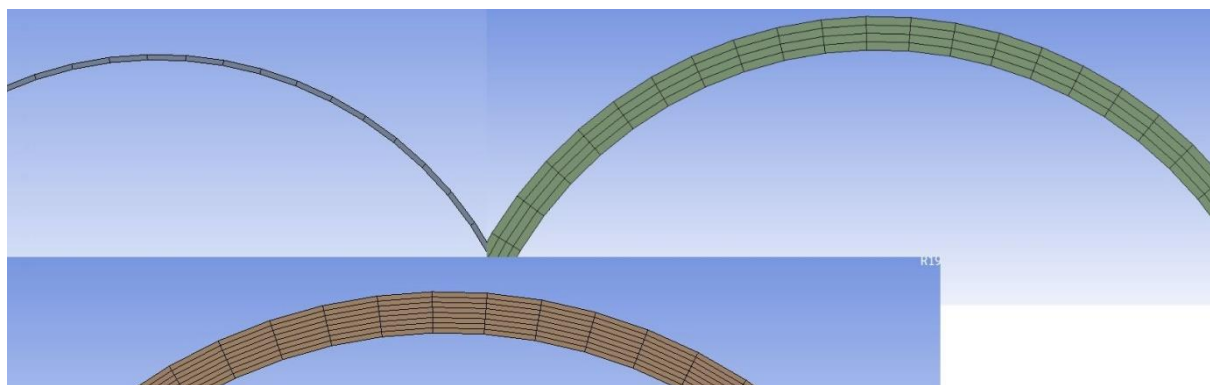


Σχήμα 2.27: Περιφερειακή Τάση Μοντέλου Σωλήνα

2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

2.3.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΣ

Έχοντας ελέγξει το μοντέλο του σωλήνα ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του, το επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε την βέλτιστη τιμή του πάχους των στοιχείων και άρα τον αριθμό τους κατά το πάχος του κυλίνδρου. Οπότε εκτελέσαμε τρεις δοκιμές στο μοντέλο της παραγράφου 2.1.2, η μία με ένα στοιχείο κατά το πάχος, η δεύτερη με τέσσερα στοιχεία κατά το πάχος και η τελευταία με οκτώ στοιχεία κατά το πάχος, όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 2.28 πάνω αριστερά, πάνω δεξιά και κάτω αντίστοιχα. Ο σκοπός ήταν να ελέγξουμε τις αποκλίσεις μεταξύ των περιφερειακών, αξονικών και διατμητικών τάσεων καθώς επίσης και τον χρόνο απαίτησης εκτέλεσης της λύσης του κάθε προβλήματος. Άρα να καταλήξουμε στον βέλτιστο αριθμό στοιχείων κατά το πάχος που θα προκύψει από τον συνδυασμό της μικρής απόκλισης μεταξύ των τιμών των τάσεων καθώς και του χρόνου εκτέλεσης της λύσης. Αυτό επειδή στην παραμετρική επίλυση του σωλήνα αλλά και της γωνιάς που μας ενδιαφέρει, λόγω των πολλών δοκιμών, ο παράγοντας χρόνος θα παίζει σημαντικό ρόλο.



Σχήμα 2.28: Ένα, Τέσσερα και Οκτώ Στοιχεία κατά το πάχος του σωλήνα

Κατόπιν εκτέλεσης των ανωτέρων δοκιμών, τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 2.8. Ουσιαστικά παρατηρούμε περίπου ίδιες τιμές τάσεων στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις με μηδενικές αποκλίσεις και ταυτόχρονα μικρότερο χρόνο εκτέλεσης στην περίπτωση του ενός στοιχείου κατά το πάχος. Ο χρόνος εκτέλεσης προφανώς και έχει να κάνει με τις δυνατότητες του υπολογιστή μας, ωστόσο με άλλον δυνατοτήτων υπολογιστή οι διαφορές των χρόνων στις τρεις περιπτώσεις θα ήταν ανάλογη, άρα πάλι θα ήταν μικρότερος στην περίπτωση του ενός στοιχείου κατά το πάχος. Οπότε προφανώς και η επιλογή μας για την τελική μοντελοποίηση του σωλήνα και της γωνιάς ενδιαφέροντος θα είναι του ενός στοιχείου κατά το πάχος.

Πίνακας 2.8: Συγκριτικά Αποτελέσματα Στοιχείων κατά το πάχος για Πολύστρωτο [+55/+55/-55/+55]

ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΑΧΟΣ [+55/-55/+55/-55]									ΧΡΟΝΟΣ (sec)
Ακτίνα (mm)	50	50.5	50.5	51	51	51.5	51.5	52	
ΤΕΣΣΕΡΑ (4) ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΑΧΟΣ									
Περιφερειακή Τάση (MPa)	256	252.6	252	249.8	247	247	247	244.2	
Αξονική Τάση (MPa)	114	113	113	112	112	112.5	110	110.8	70
Διατμητική Τάση (MPa)	153	-149	148	147	149	-147	148	144	
ΟΧΤΩ (8) ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΑΧΟΣ									
Περιφερειακή Τάση (MPa)	255	253	252	249	247	247	247	243	
Αξονική Τάση (MPa)	114	113	113	112	112	112.5	110	111	90
Διατμητική Τάση (MPa)	153	-149	148	147	149	-147	148	144	
ΕΝΑ (1) ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΑΧΟΣ									
Περιφερειακή Τάση (MPa)	256	253	253	249	249	245	245	242	
Αξονική Τάση (MPa)	115	114	114	112	112	111	111	109	50
Διατμητική Τάση (MPa)	153	-151	151	149	149	147	147	145	

2.3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Μία τελευταία εκκρεμότητα πριν την τελική μοντελοποίηση του σωλήνα και της γωνιάς είναι ο καθορισμός της επίδρασης του αριθμού των στρώσεων σε συγκεκριμένο πάχος πολύστρωτου, όπου ο έλεγχος έλαβε χώρα για το μοντέλο του παραδείγματος 2.1.2. Δηλαδή με λίγα λόγια, αν ένα πολύστρωτο με συγκεκριμένο πάχος κατασκευάζεται με δέκα, είκοσι ή τριάντα στρώσεις οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τις τάσεις που αναπτύσσονται στις διευθύνσεις των ινών αλλά και στην αντοχή του πολύστρωτου, δηλαδή στον συντελεστή ασφαλείας. Αυτό μας ενδιαφέρει πάρα πολύ να το καθορίσουμε πριν προχωρήσουμε στην τελική μοντελοποίηση σωλήνα και γωνιάς διότι η παραμετρική ανάλυση που θα προβούμε θα κρατάει σταθερό τον αριθμό των στρώσεων και θα επιφέρουμε μείωση στο πάχος κάθε στρώσης, ώστε να βρούμε το βέλτιστο συνολικό πάχος του πολύστρωτου. Γι' αυτό τον λόγο, πρέπει να καθορίσουμε από ποιον αριθμό στρώσεων και μετά δεν έχουμε αλλαγή στα αποτελέσματα των τάσεων και αντοχής, ώστε αυτό τον αριθμό να τον χρησιμοποιήσουμε στην παραμετρική μας ανάλυση. Ο πίνακας 2.9 αναπαριστά τα αποτελέσματα τάσεων (περιφερειακής, αξονικής και διατμητικής) καθώς και συντελεστή ασφαλείας και χρόνου εκτέλεσης της λύσης για κάθε περίπτωση έναντι των αριθμό των στρώσεων κατά το πάχος. Ο συντελεστής ασφαλείας ισούται με την μικρότερη τιμή ανάμεσα στο αποτέλεσμα των εξισώσεων 2.13 και 2.14.

Το κριτήριο αστοχίας που επιλέχθηκε είναι το Hashin, επειδή για την γεωμετρία του κυλίνδρου έχει αποδειχθεί πιο αξιόπιστο συγκριτικά με τα κριτήρια μέγιστης τάσης και Tsai-Hill. Από διάφορους ελέγχους που εκτελέσαμε, παρατηρήσαμε πως το κριτήριο Hashin μας δίνει χαμηλότερες τιμές συγκριτικά από τα άλλα κριτήρια. Άρα είναι πιο ασφαλές να το λάβουμε υπόψη στον καθορισμό του συντελεστή ασφαλείας. Επίσης το κριτήριο Hashin μας καθορίζει δύο τρόπους αστοχίας. Πρώτον, αστοχία των ινών (fiber), δηλαδή αστοχία στην διεύθυνση των ινών και αστοχία της ρητίνης (matrix), δηλαδή αστοχία κάθετα στην διεύθυνση των ινών, όπως μπορούμε να δούμε στις εξισώσεις 2.13 και 2.14 αντίστοιχα. Όπου τάση στην διεύθυνση των ινών (σ_{11}), αντοχή στην εν λόγω διεύθυνση (X_t), διατμητική τάση στο επίπεδο 1-2 (τ_{12}), αντοχή στο αντίστοιχο επίπεδο, τάση στην διεύθυνση κάθετα στις ίνες (σ_{22}) και η αντοχή στην συγκεκριμένη διεύθυνση (Y_t).

$$f_f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \quad (2.13)$$

$$f_m = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \quad (2.14)$$

Τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση είναι από τρία σημεία κατά το πάχος, στην εσωτερική διάμετρο στο μεσαίο σημείο και στην εξωτερική διάμετρο. Όπως μπορούμε να καταλάβουμε διαβάζοντας τον κάτωθι πίνακα, δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιήσουμε

παραπάνω από δέκα στρώσεις καθώς τα αποτελέσματα είναι σχεδόν τα ίδια και ο χρόνος εκτέλεσης αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνονται οι στρώσεις παραπάνω από δέκα. Οπότε ο συνολικός αριθμός των δέκα στρώσεων επιλέγεται για την παραμετρική μας ανάλυση στην οποία θα αναφερθούμε λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 2.9: Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ διαφορετικών αριθμών στρώσεων

	ΚΑΤΩ ΣΗΜΕΙΟ	ΜΕΣΑΙΟ ΣΗΜΕΙΟ	ΑΝΩ ΣΗΜΕΙΟ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΧΡΟΝΟΣ (sec)
Ακτίνα (mm)	50	55	60		
ΔΕΚΑ (10) ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΑΧΟΣ					
Περιφερειακή Τάση (MPa)	5.865	4.1	4.2		
Αξονική Τάση (MPa)	0.42	0.001	-0.34	20.887	50
Διατμητική Τάση (MPa)	-2.36	-2.02	1.72		
ΕΙΚΟΣΙ (20) ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΑΧΟΣ					
Περιφερειακή Τάση (MPa)	5.863	4.1	4.2		
Αξονική Τάση (MPa)	0.41	0.0009	-0.34	20.885	120
Διατμητική Τάση (MPa)	-2.3	-2.01	1.72		
ΤΡΙΑΝΤΑ (30) ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΑΧΟΣ					
Περιφερειακή Τάση (MPa)	5.862	4.1	4.2		
Αξονική Τάση (MPa)	0.41	0.001	-0.34	20.885	200
Διατμητική Τάση (MPa)	-2.3	-2.01	1.73		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΩΛΗΝΩΝ

3.1.1. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΙΝΩΝ-ΡΗΤΙΝΗΣ

Έχοντας διασφαλίσει την αξιοπιστία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων όπως αναλυτικά δείξαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχοντας κατανοήσει την επίδραση του πάχους και τον αριθμό των στρώσεων, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην κατασκευαστική μελέτη του σωλήνα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Καταρχάς, πρέπει να ορίσουμε τις ιδιότητες και μηχανικές αντοχές των ινών-ρητίνης. Η κατασκευαστική εταιρεία B&T Composites χρησιμοποιεί ίνες γυαλιού και βινυλεστερική ρητίνη. Τις ιδιότητες τους τις αντήσαμε από την βάση δεδομένων του εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, καθώς η κατασκευαστική εταιρεία B&T Composites δεν διαθέτει όλα τα στοιχεία που ζητήσαμε. Οι μηχανικές ιδιότητες τους καθώς και η αντοχή τους παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Μηχανικές Ιδιότητες και Αντοχές ινών γυαλιού με βινυλεστερική ρητίνη

	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	E ₃ (GPa)	V ₂₃	V ₁₃	V ₁₂	G ₂₃ (GPa)	G ₁₃ (GPa)	G ₁₂ (GPa)
Ίνες Γυαλιού με Βινυλεστερική Ρητίνη	44.48	13.88	13.88	0.382	0.32	0.32	5.021	4.064	4.064
	S _{1T} (MPa)	S _{2T} (MPa)	S _{3T} (MPa)	S _{1C} (MPa)	S _{2C} (GPa)	S _{3C} (GPa)	τ ₂₃ (MPa)	τ ₁₃ (MPa)	τ ₁₂ (MPa)
	1200	71.65	71.65	1200	71.65	71.65	12.49	24.98	24.98

3.1.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

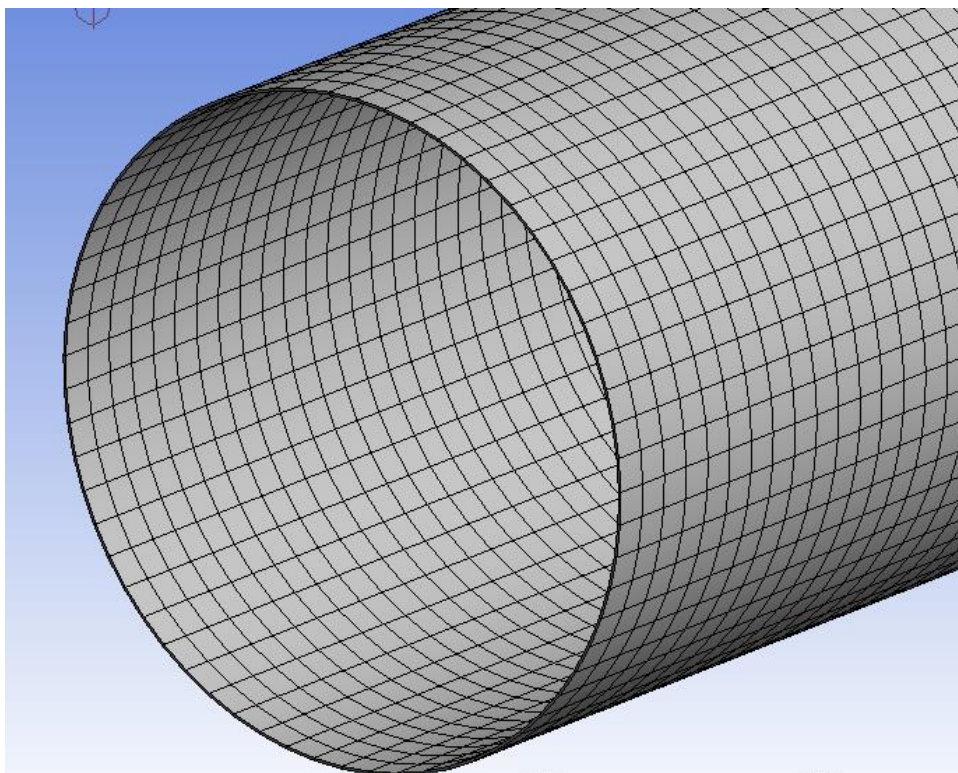
Η επιλογή των διαστάσεων των σωλήνων όπου θα εφαρμόσουμε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθορίστηκε αποκλειστικά και μόνο από τις ανάγκες της εταιρείας. Η παραμετρική ανάλυση θα λάβει χώρα σε τρεις σωλήνες με κοινό μήκος σωλήνα ίσο με 1 m, όμως διαφορετικές εσωτερικές διαμέτρους, συγκεκριμένα 100, 150 και 200 mm αντίστοιχα.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ

Επιλογή στοιχείων και ορισμός πλέγματος

Επιλέχθηκαν ίδια στοιχεία με αυτά του σωλήνα που περιγράφονται αναλυτικά στο εδάφιο 2.1.2.

Όσον αφορά στην μέθοδο επιλογής πλέγματος, ακολουθήσαμε ακριβώς την ίδια με αυτή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.1.2. Δημιουργήσαμε τετραγωνικά στοιχεία, ορίζοντας το πλάτος τους στα 5 mm, και ορίζοντας 200 τομές κατά το μήκος των 1000 mm του σωλήνα. Υπενθυμίζουμε, όπως έχουμε αναφέρει αναλυτικά στο κεφάλαιο 2, επιλεχθέν πλάτος μικρότερο των 5 mm δεν θα επέφερε καμία αλλαγή στο αποτέλεσμα παρά μόνο θα επιβάρυνε τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Το εν λόγω πλέγμα του σωλήνα φαίνεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1: Πλέγμα Σωλήνα με τετραγωνικά στοιχεία πέντε χιλιοστών

Ορισμός αριθμού και προσανατολισμού στρώσεων

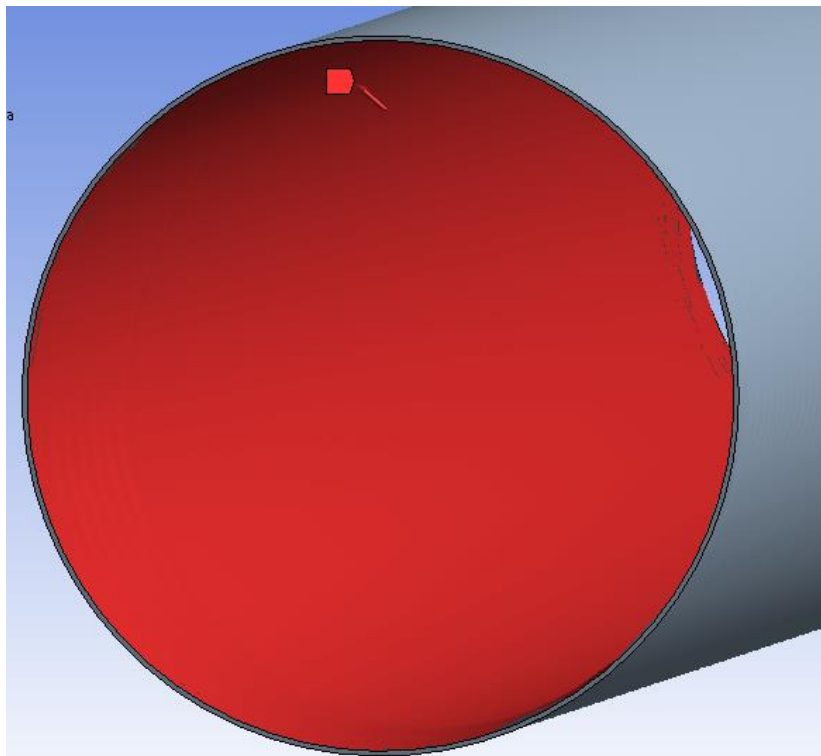
Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του αριθμού των στρώσεων και του προσανατολισμού τους. Όπως δείξαμε στο κεφάλαιο 2, η επίδραση του αριθμού των στρώσεων είναι μηδαμινή στις τιμές των αποτελεσμάτων. Γι' αυτό τον λόγο, επιλέγουμε να δουλεύουμε πάντα με δέκα στρώσεις και σε κάθε περίπτωση να αλλάζουμε το πάχος της κάθε στρώσης. Τώρα όσον

αφορά τον προσανατολισμό των στρώσεων, η εταιρεία B&T Composites, μας ενημέρωσε πως το εύρος προσανατολισμού στρώσεων που δουλεύει ξεκινάει από γωνία προσανατολισμού 55° και τελειώνει σε γωνία προσανατολισμού 85° . Οπότε η ανάλυση μας επιλέχθηκε να γίνει για τις δύο ακραίες γωνίες μοιρών.

Τοπικές συντεταγμένες και μέθοδο εξαγωγής στοιχείων επιλέγουμε τα ίδια ακριβώς με την μοντελοποίηση του σωλήνα του 2^{ου} κεφαλαίου.

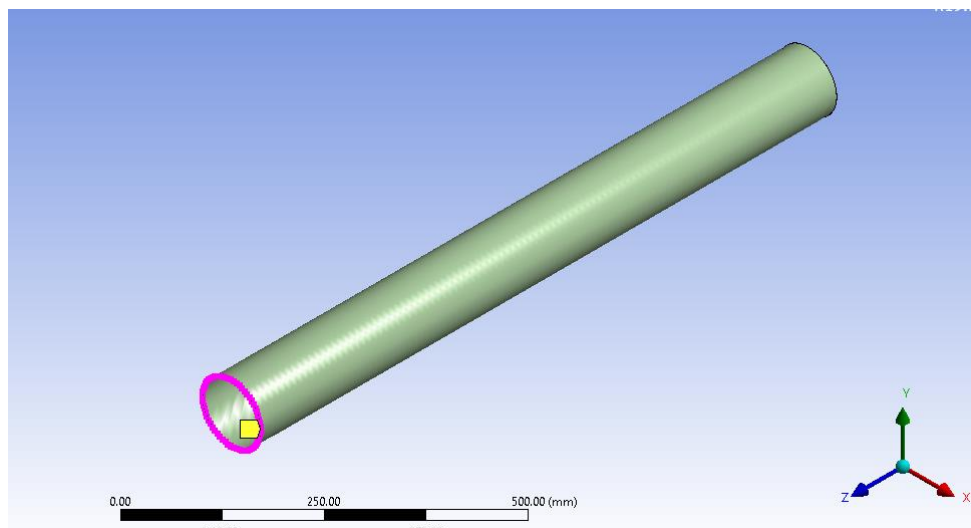
Ορισμός φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών

Σε κάθε διαφορετικό σωλήνα από άποψη εσωτερικής διαμέτρου καθώς το μήκος παραμένει σταθερό, η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί για τέσσερις διαφορετικές εσωτερικές ομοιόμορφες πιέσεις, οι οποίες ενδιαφέρουν την εταιρεία B&T Composites, κυρίως λόγω εφαρμογής των σωλήνων. Πρόκειται για τιμές των 6, 10, 16 και 20 bar εσωτερικής ομοιόμορφης πίεσης. Οπότε για κάθε ξεχωριστή διάμετρο σωλήνα, θα υπολογίσουμε τον ελάχιστο αριθμό συνολικού πάχους πολύστρωτου για τις τέσσερις διαφορετικές πιέσεις ξεχωριστά, ώστε να επιτυγχάνεται ένας συγκεκριμένος αριθμός συντελεστή ασφαλείας που θα εξηγήσουμε στην συνέχεια.



Σχήμα 3.2: Ομοιόμορφη εσωτερική πίεση σωλήνα

Αντίθετα με τη μοντελοποίηση του σωλήνα του 2^{ου} κεφαλαίου, εδώ όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες επιλέγεται περιορισμός ως προς τον y -άξονα και z -άξονα των κόμβων ενός άκρου του σωλήνα όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Συνοριακές συνθήκες σωλήνα

Οι εν λόγω συνοριακές συνθήκες επιλέχθηκαν ώστε να ελέγχουμε την μετατόπιση των στοιχείων του ελεύθερου άκρου θεωρώντας το ένα άκρο κοντά σε στήριγμα, όπου περιορίζεται η μετατόπιση του στις τρεις διευθύνσεις και το άλλο άκρο ελεύθερο προς μετατόπιση.

Αποτελέσματα

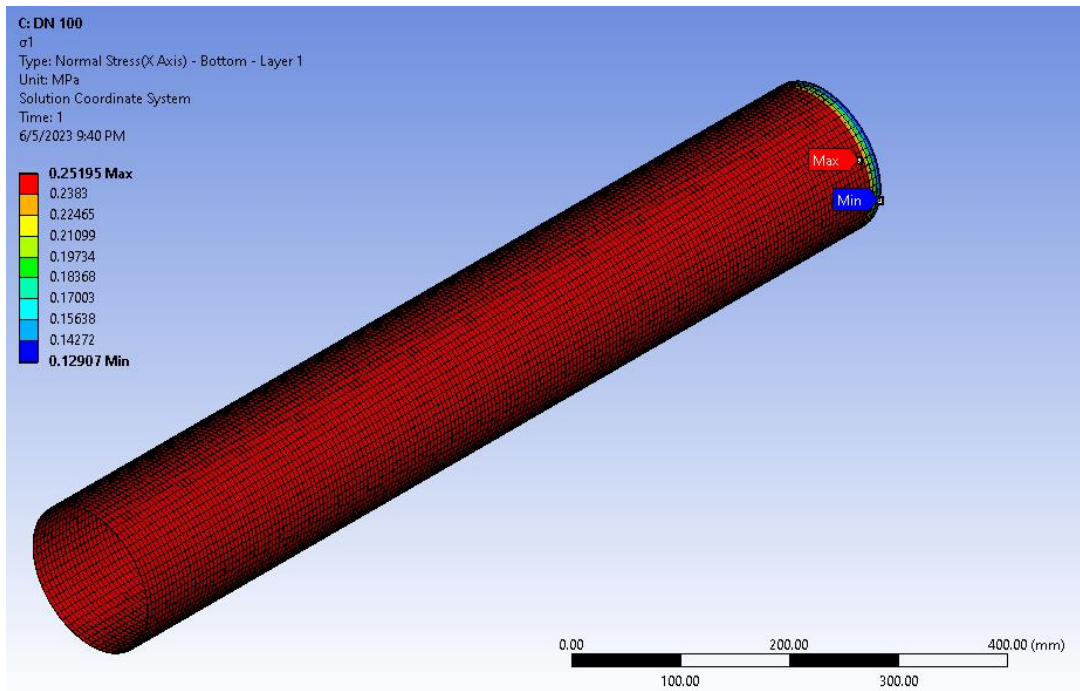
Όσο αυξάνουμε την γωνία προσανατολισμού, το κριτήριο αστοχίας σύνθετων υλικών Hashin, μας δίνει όλο και αυξημένο συντελεστή ασφαλείας όπως μπορούμε να δούμε ενδεικτικά για σωλήνα με εσωτερική διάμετρο 100mm, συνολικού πάχους πολύστρωτου 10mm που υποβάλλεται σε εσωτερική ομοιόμορφη πίεση 10bar (πίνακας 3.2). Επίσης παρατηρούμε πως σε όλο το εύρος των γωνιών προσανατολισμού, η αστοχία λαμβάνει χώρα στην πρώτη στρώση (εσωτερική), στην κάτω θέση (προς το εσωτερικό) και στην διεύθυνση των ινών.

Πίνακας 3.2: Συμπεριφορά σε διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού

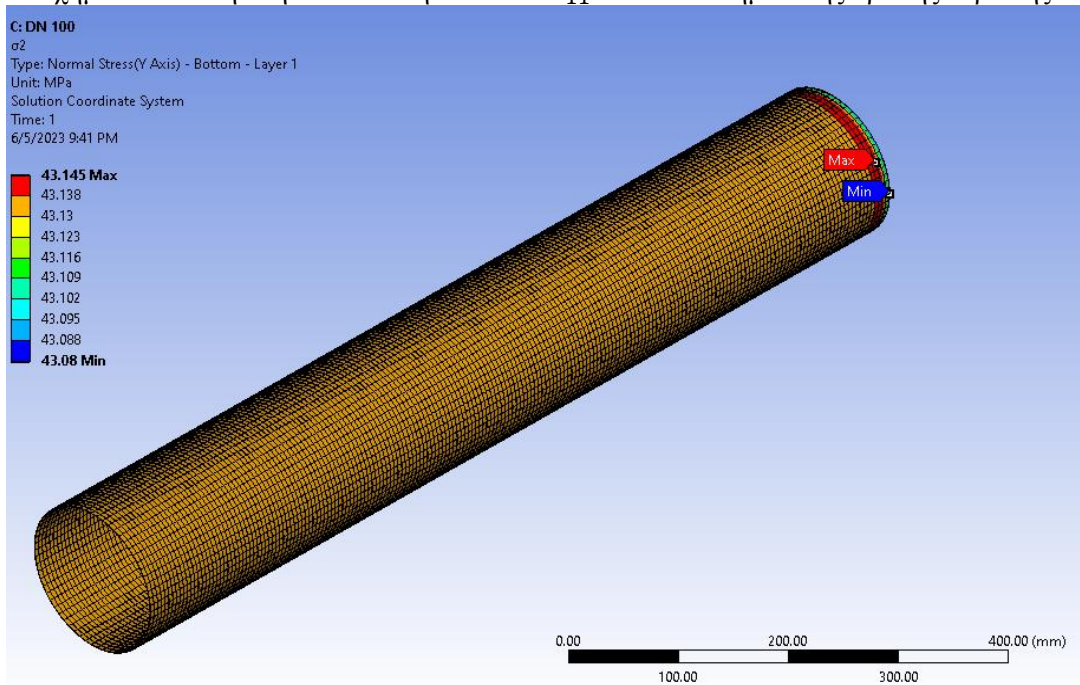
	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΣΤΡΩΣΗ	ΑΣΤΟΧΙΑ	ΘΕΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (ΣΤΗΝ ΣΤΡΩΣΗ)
[+55]₁₀	22.8	1	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΙΝΩΝ	ΚΑΤΩ
[+65]₁₀	44.3	1	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΙΝΩΝ	ΚΑΤΩ
[+75]₁₀	97.8	1	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΙΝΩΝ	ΚΑΤΩ
[+85]₁₀	251.3	1	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΙΝΩΝ	ΚΑΤΩ

Εδώ αξίζει να σημειωθεί, πως σε κάθε δοκιμή, το αποτέλεσμα του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά την τιμή του κριτηρίου Hashin επιβεβαιωνόταν από τους αντίστοιχους ανωτέρω τύπους αναλυτικά. Οπότε μαζί με τον συντελεστή ασφαλείας του

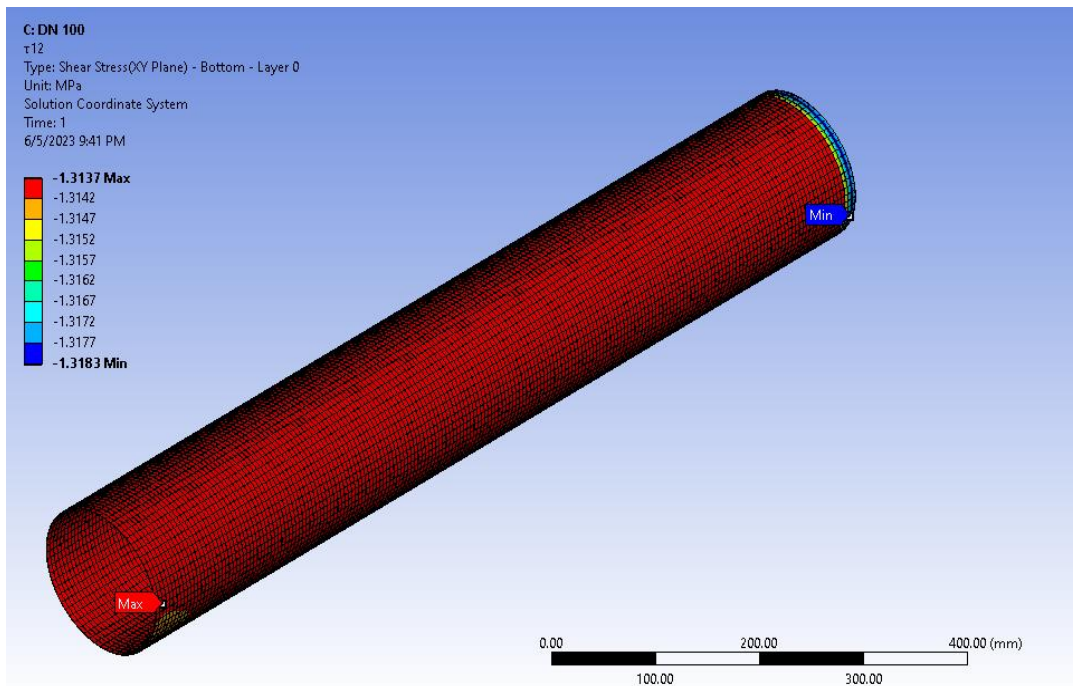
κριτηρίου Hashin, υπολογίζαμε τις τάσεις κατά την διεύθυνση των ινών, κάθετα στις ίνες και διαμητική τάση στους τοπικούς x και y άξονες, όπως βλέπουμε στα σχήματα 3.4, 3.5 και 3.6 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4: Τάση στην διεύθυνση των ινών σ_{11} στο κάτω σημείο της πρώτης στρώσης

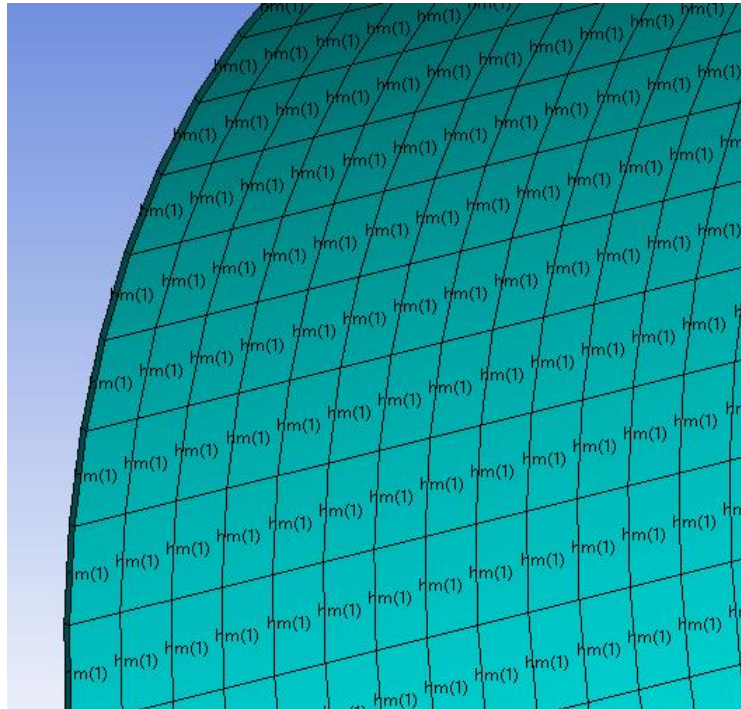


Σχήμα 3.5: Τάση κάθετη στην διεύθυνση των ινών σ_{22} στο κάτω σημείο της πρώτης στρώσης



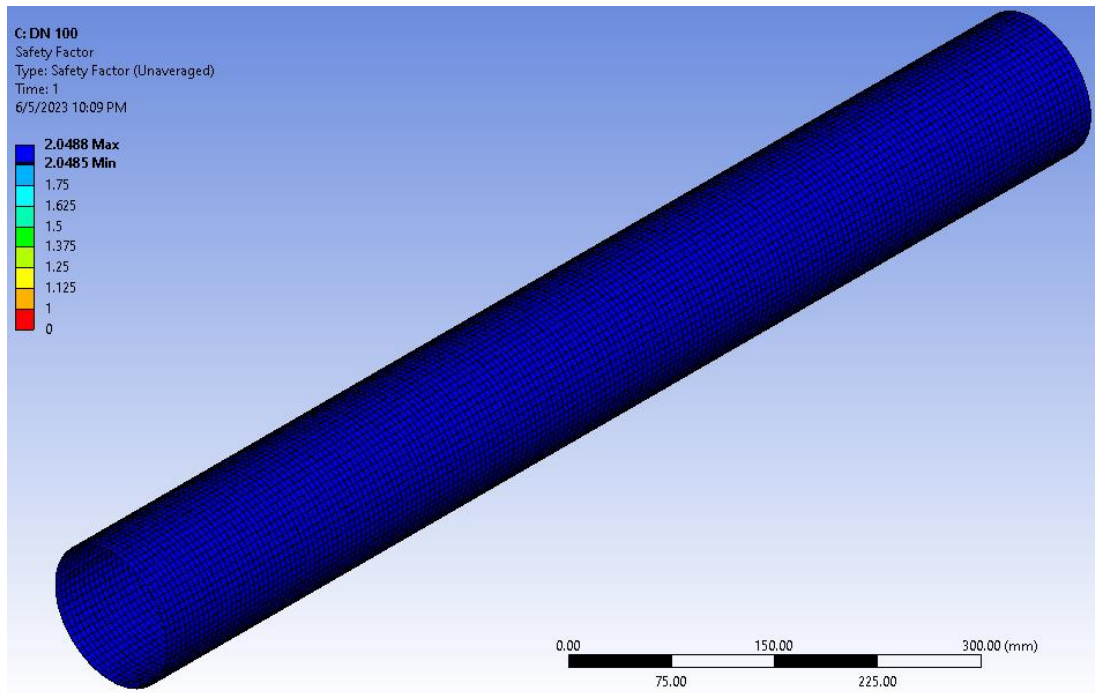
Σχήμα 3.6: Διατμητική τάση επιπέδου αξόνων παράλληλα και κάθετα με τις ίνες τ_{12} στο κάτω σημείο της πρώτης στρώσης

Μέσα από την παραμετρική ανάλυση που εκτελέσαμε και από διάφορες δοκιμές παρατηρήσαμε επίσης πως από τις 43° γωνίας προσανατολισμού και μετά η αστοχία εμφανίζεται κάθετα στην διεύθυνση των ινών. Άρα στο εύρος γωνιών προσανατολισμού που μας ενδιαφέρει, θα έχουμε αστοχία κάθετα στην διεύθυνση των ινών. Σε κάθε περίπτωση, η στρώση που αστοχεί είναι η εσωτερική στρώση του σωλήνα. (σχήμα 3.7)



Σχήμα 3.7: Αστοχία σωλήνα κάθετα στην διεύθυνση ινών και στην πρώτη στρώση

Οπότε με βάση το κριτήριο αστοχία σύνθετων υλικών Hashin, υπολογίζουμε το ελάχιστο συνολικό πάχος πολύστρωτου για κάθε διαφορετική εσωτερική διάμετρο σωλήνα και εσωτερική πίεση, έτσι ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να ισούται με δύο. Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 3.3. Η παραμετρική ανάλυση επιλέχθηκε για τα όρια των γωνιών προσανατολισμού που μας έδινε η εταιρεία B&T Composites, δηλαδή για γωνίες από 55° έως 85° . Αποδείξαμε πως για τον σωλήνα με τις συγκεκριμένες φορτίσεις και συννοριακές συνθήκες, όσο αυξάνεται η γωνία προσανατολισμού τόσο μεγαλώνει ο συντελεστής ασφαλείας, με αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού πάχους πολύστρωτου. Ωστόσο μπορεί για συγκεκριμένες εφαρμογές, να θέλουμε να ενισχύσουμε την αντοχή στην διεύθυνση κάθετα στις ίνες, όπου αυτό μπορούμε να το πετύχουμε τοποθετώντας ίνες με γωνία προσανατολισμού όσο μικρότερη γίνεται, άρα στην περίπτωση μας κοντά στις 55° . Οπότε, οι πληροφορίες για το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος πολύστρωτου στις 55° θα φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα αποτελέσματος φαίνεται στο σχήμα 3.8, όπου παρουσιάζεται ο συντελεστής ασφαλείας του πολύστρωτου $[+85]_{10}$ με συνολικό πάχος πολύστρωτου 2.08mm. Σύμφωνα με τον πίνακα 3.3 παρατηρούμε καλύτερη συμπεριφορά του πολύστρωτου $[+85]_{10}$ έναντι του $[+55]_{10}$ ως προς την απαίτηση του συνολικού πάχους για ίδια τιμή συντελεστή ασφαλείας ίση με 2. Επίσης, για κάθε περίπτωση φόρτισης και γωνίας προσανατολισμού, παρατηρούμε μεγαλύτερη απαίτηση σε πάχος πολύστρωτου όσο αυξάνεται η διάμετρος του σωλήνα. Αξίζει να σημειωθεί πως πρακτικά τα πάχη που βρίσκονται κάτω από το 1mm, θα δημιουργήσουν άλλα προβλήματα όπως φθορά στην μεταφορά του σωλήνα, οπότε προτείνεται για κάθε περίπτωση, το συνολικό πάχος κατασκευής να υπερβαίνει το 1mm.



Σχήμα 3.8: Συντελεστής ασφαλείας κριτηρίου Hashin(matrix) σε πολύστρωτο $[+85]_{10}$ με συνολικό πάχος πολύστρωτου 2.08mm

Πίνακας 3.3: Πάχος Πολύστρωτου για Συντελεστή Ασφαλείας ίσο ή μεγαλύτερο του δύο

ΣΩΛΗΝΑΣ

[+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55]						
DN 100			DN 150		DN 200	
ΠΙΕΣΗ [bar]	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ [mm]	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ [mm]	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ [mm]
6	2.1	0.9	2.01	1.3	2.03	1.7
10	2	1.4	2	2.1	2	2.8
16	2	2.2	2.08	3.5	2	4.4
20	2	2.82	2	4.2	2	5.6
[+85/-85/+85/-85/+85/-85/+85/-85/+85/-85]						
6	2.04	0.08	2	0.11	2.07	0.15
10	2	0.12	2	0.18	2.07	0.25
16	2.08	0.2	2.08	0.3	2	0.38
20	2	0.24	2	0.36	2.07	0.5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΩΝΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

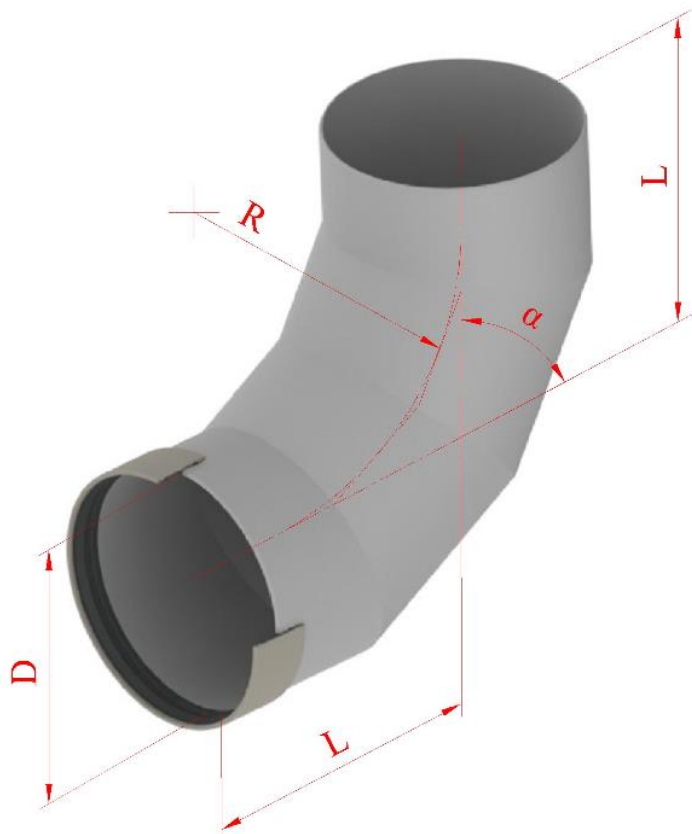
4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΓΩΝΙΩΝ

4.1.1. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΙΝΩΝ-ΡΗΤΙΝΗΣ

Οι ίνες και η ρητίνη που θα χρησιμοποιήσουμε για τις γωνιές θα είναι οι ίδιες ακριβώς με αυτές των σωλήνων. Οπότε οι μηχανικές ιδιότητες και αντοχές θα είναι ίδιες με της παραγράφου 3.1.1.

4.1.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Η επιλογή των διαστάσεων έγινε κατόπιν συνεννόησης με την εταιρεία B&T Composites, και επιλέχθηκαν οι τρεις μικρότερες από πλευράς εσωτερικής διαμέτρου γωνιές, οι οποίες χρησιμοποιούνται περισσότερο στο εμπόριο. Για την μοντελοποίηση της γωνιάς, δεν χρειαζόμαστε μόνο την εσωτερική διάμετρο αλλά και την ακτίνα και το μήκος, το οποίο ισούται με την οριζόντια και κάθετη απόσταση των κέντρων των ακραίων δακτυλίων όπως βλέπουμε και στο σχήμα 4.1(SUPERLIT).



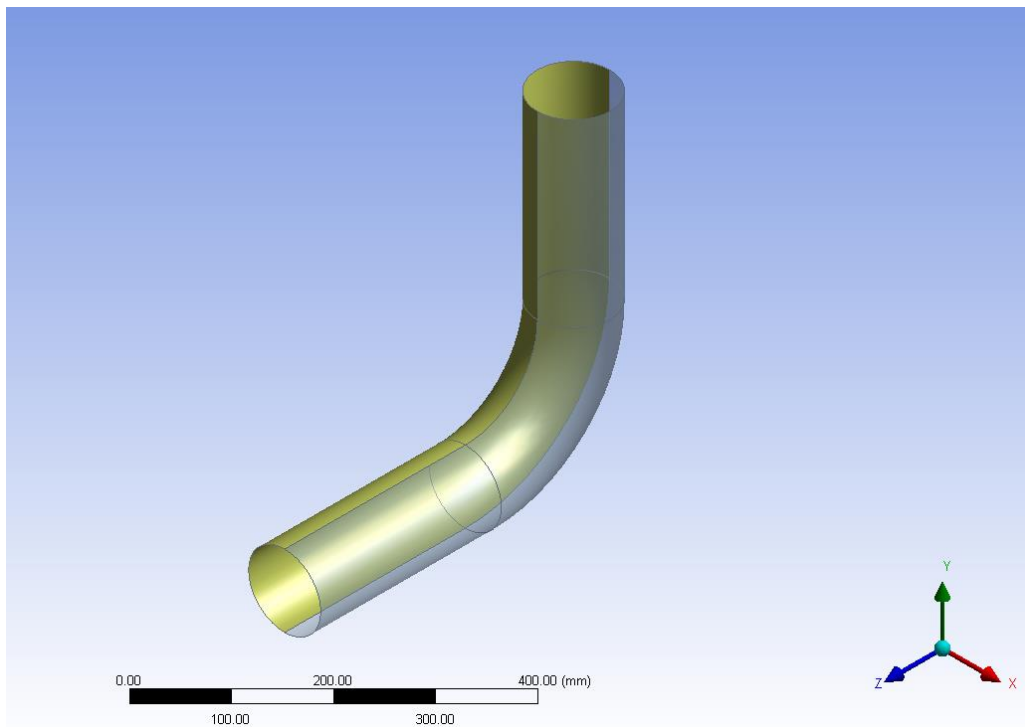
Σχήμα4.1: Περιγραφή διαστάσεων γωνιάς

Οπότε οι διαστάσεις που μοντελοποιήσαμε βάσει των τριών μικρότερων εσωτερικών διαμέτρων παρατίθενται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις Γωνιών

DN [mm]	R [mm]	L [mm]
100	150	200
150	225	300
200	300	400

Αξίζει να σημειωθούν τα κάτωθι, οι ανωτέρω διαστάσεις αναφέρονται σε εμπορικούς τύπους γωνιών, δηλαδή έτσι όπως τίθενται προς παραγωγή. Όμως, για να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματά μας από τις συνοριακές συνθήκες που θα δούμε παρακάτω, αποφασίστηκε να μεγαλώσουμε τα ευθύγραμμα κυλινδρικά μέρη κατά 250mm και στις δύο πλευρές. Επίσης, για λόγους προσανατολισμού γωνιών, που θα εξηγήσουμε σε επόμενη παράγραφο, εκτελέσαμε μια τομή της γωνιάς, δηλαδή να κόβει την γωνιά συμμετρικά κατά το διάμηκες (στο επίπεδο που ορίζεται από τους y και z άξονες). Οπότε η τελική γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 4.2.



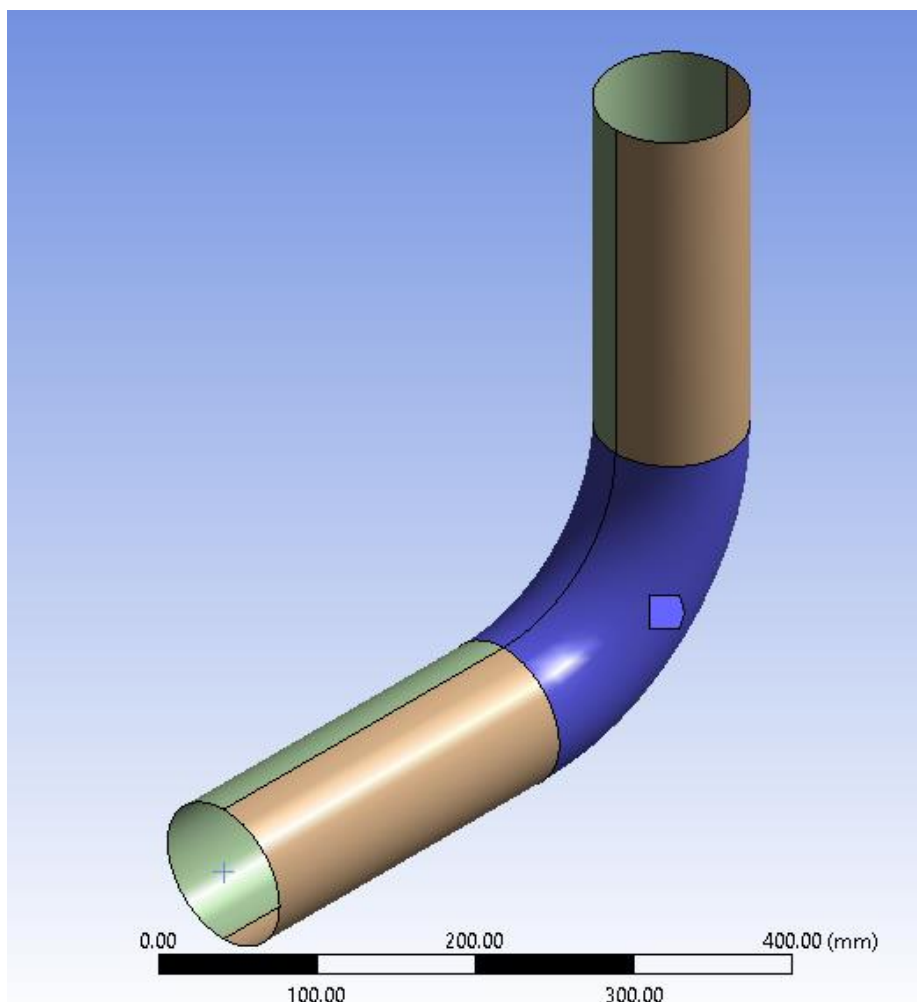
Σχήμα 4.2: Γεωμετρία γωνιάς με αυξημένα τα κυλινδρικά άκρα και τομή κατά το διάμηκες

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΩΝΙΩΝ

Επιλογή στοιχείων και ορισμός πλέγματος

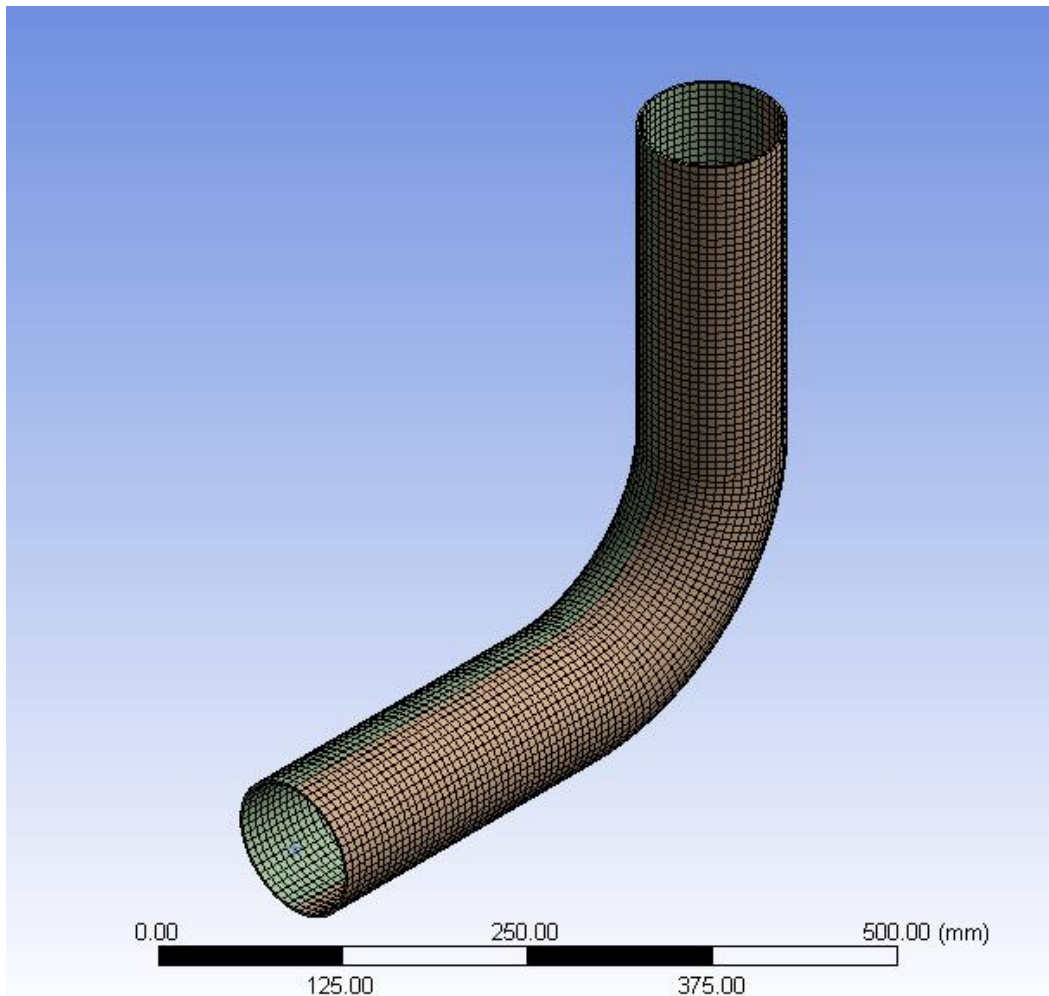
Τα στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε είναι τα ίδια, δοκιμασμένα με αξιόπιστη συμπεριφορά, στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε για την μοντελοποίηση του σωλήνα στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Τώρα όσον αφορά το πλέγμα, ο στόχος είναι πάλι όπως και στον σωλήνα η επίτευξη τετραγωνικών στοιχείων με πλευρές στα πέντε χιλιοστά. Οπότε επιλέγουμε ξεχωριστά τα κυλινδρικά κομμάτια και την γωνιά, όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.3, και εφαρμόζουμε την ανωτέρω μέθοδο, χωρίζοντας κατάλληλα τις υποδιαιρέσεις κατά το διάμηκες και εγκάρσιο.



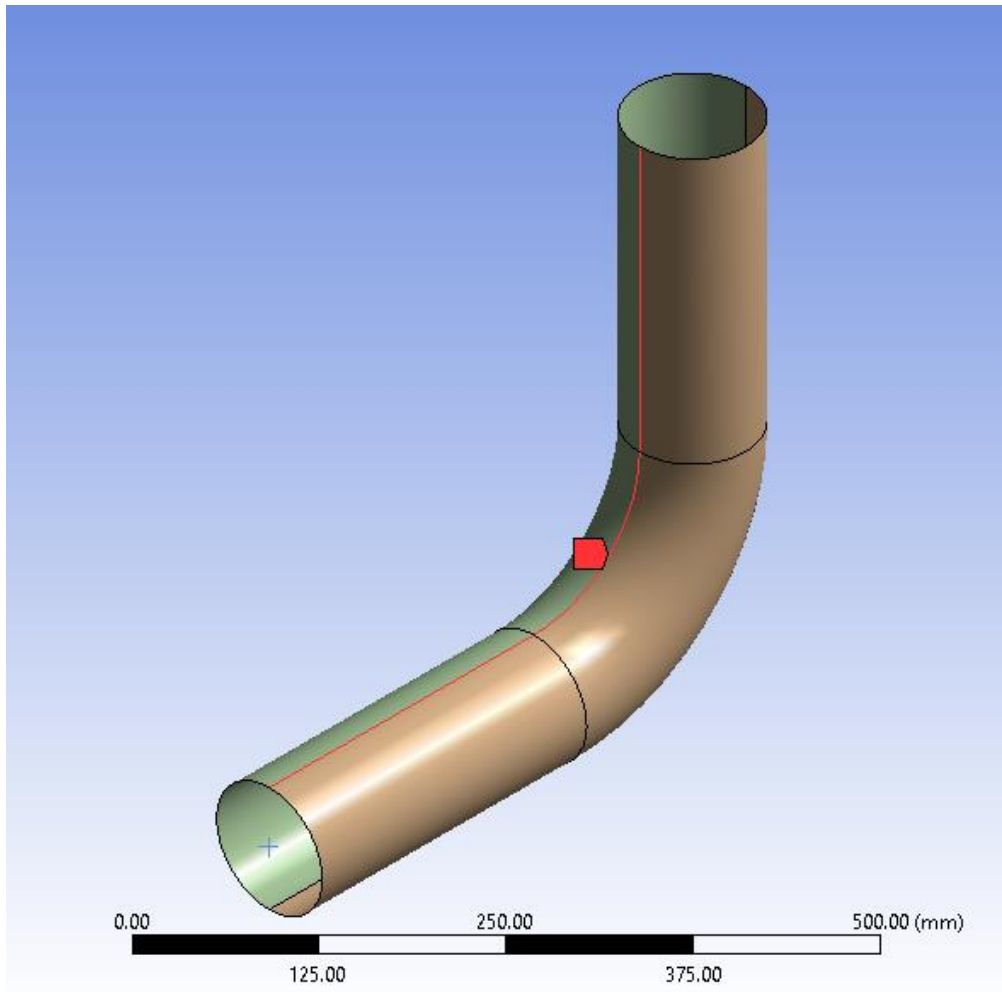
Σχήμα4.3: Ορισμός πλέγματος σε κυλινδρικά και καμπύλη επιφάνειες της γωνιάς

Και το τελικό πλέγμα της γωνιάς φαίνεται με τα τετραγωνικά στοιχεία και τις ομοιόμορφη συνέχεια από το ένα στο άλλο στο σχήμα 4.4 με διαστάσεις στοιχείων 5mmX5mm συνολικού αριθμού 6240.



Σχήμα4.4: Τελικό πλέγμα γωνιάς

Αξίζει να σημειωθεί πως από την τομή που κάναμε κατά το διάμηκες (στο επίπεδο που ορίζεται από τους y και z άξονες), επιλέξαμε το άνω χείλος της ώστε να το χρησιμοποιήσουμε στην συνέχεια για τον ορθό καθορισμό του προσανατολισμού (σχήμα 4.5)



Σχήμα4.5: Άνω χείλος τομής

Ορισμός αριθμού και προσανατολισμού στρώσεων

Ο αριθμός των στρώσεων θα είναι ίδιος με αυτόν στους σωλήνες. Δηλαδή θα έχουμε πάντα δέκα στρώσεις και θα αλλάζουμε το πάχος της κάθε στρώσης. Όπως έχουμε αποδείξει στο κεφάλαιο 2, αυτό δεν επιφέρει καμία επίδραση στα αποτελέσματα. Επίσης, όπως και στον σωλήνα, έτσι και στην γωνιά, η μοντελοποίηση θα λάβει χώρα για τις δύο ακραίες γωνίες προσανατολισμού που μπορεί να εφαρμόσει η εταιρεία B&T Composites, δηλαδή στις 55° και 85° γωνίας προσανατολισμού.

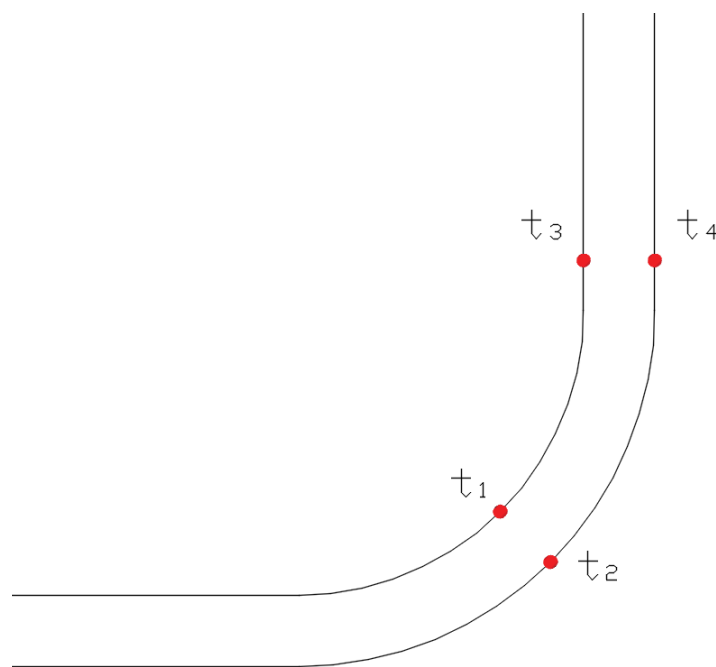
Στην γωνιά, το δύσκολο σημείο ήταν ο σωστός ορισμός των τοπικών συστημάτων συντεταγμένων και άρα του προσανατολισμού των ινών. Γι' αυτό τον λόγο, με βάση την τομή κατά το διάμηκες και την επιλογή του άνω χείλους της τομής, επιτεύχθηκε ο σωστός προσανατολισμός των ινών, καθώς η γωνία μηδενικού προσανατολισμού θα ακολουθεί την διεύθυνση του άνω χείλους της τομής.

Επίσης κάτι άλλο εξίσου σημαντικό, είναι πως πρακτικά, η εφαρμογή του υλικού στην γωνιά με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών θα επέφερε σχεδόν διπλάσιο πάχος στο κοίλο (t_1)

σημείο της γωνιάς συγκριτικά με το κυρτό (t_2) και μεγαλύτερο πάχος του κοίλου της καμπύλης συγκριτικά με το πάχος της κυλινδρικής διατομής(t_3 και t_4) καθώς το πάχος στο κυλινδρικό τμήμα της γωνιάς ισούται με τον μέσο όρο των παχών του κυρτού και κοίλου της γωνιάς(B&T Composites). Στην μοντελοποίηση της γωνιάς στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, αυτά τα πάχη δεν εφαρμόστηκαν. Επιλέχθηκε κοινό πάχος μοντελοποίησης, δηλαδή ίδιο πάχος στο κυρτό, κοίλο της γωνιάς και στην κυλινδρική διατομή. Άρα στην τελική ανάλυση, το συνολικό πάχος πολύστρωτου που επιφέρει συντελεστή ασφαλείας ίσο με δύο, θα είναι το πάχος του κυρτού της καμπύλης, το μικρότερο πάχος δηλαδή. Για να γίνει πιο κατανοητό, παραθέτουμε τις εξισώσεις 4.1 και 4.2 καθώς και το σχήμα 4.6. Άρα μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές, αν επιλεγθεί κατά σχεδόν μιάμιση φορές μεγαλύτερο το πάχος της κυλινδρικής διατομής έτσι ώστε το πάχος στο κοίλο της γωνιάς να επιφέρει τουλάχιστον συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2.

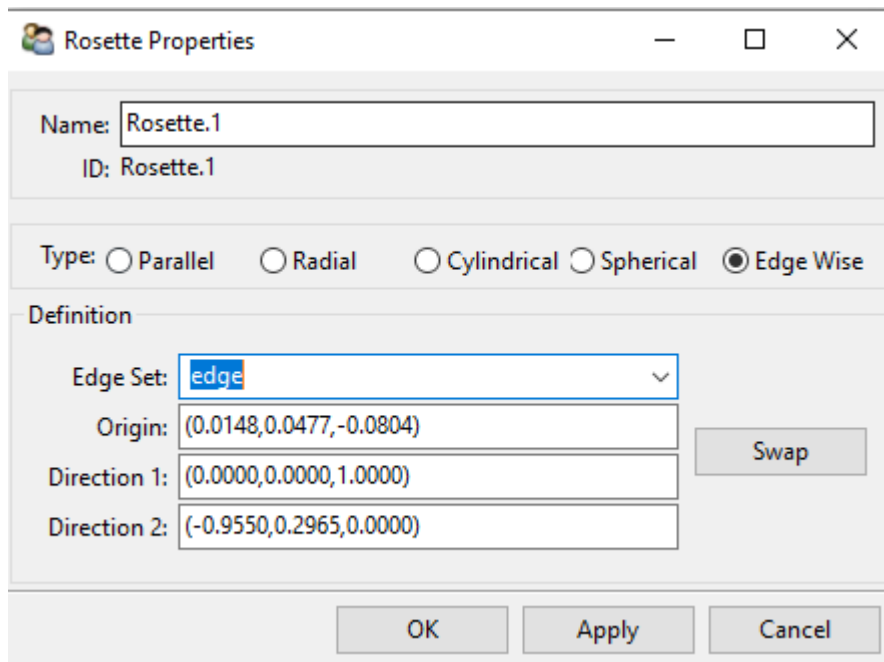
$$t_1 = 2 \cdot t_2 \quad (4.1)$$

$$t_3 = t_4 = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{2 \cdot t_2 + t_2}{2} = 1,5 \cdot t_2 \quad (4.2)$$

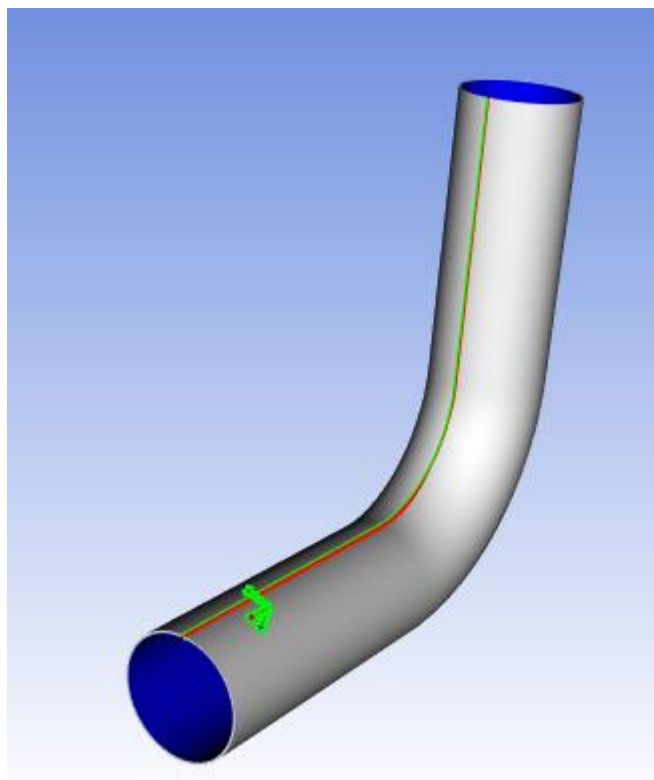


Σχήμα 4.6: Διαφορετικά πάχη γωνιάς

Για τον ορισμό του προσανατολισμού, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή “edge wize” (σχήμα 4.7) και θέσαμε σαν “edge set” το χείλος της τομής όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.



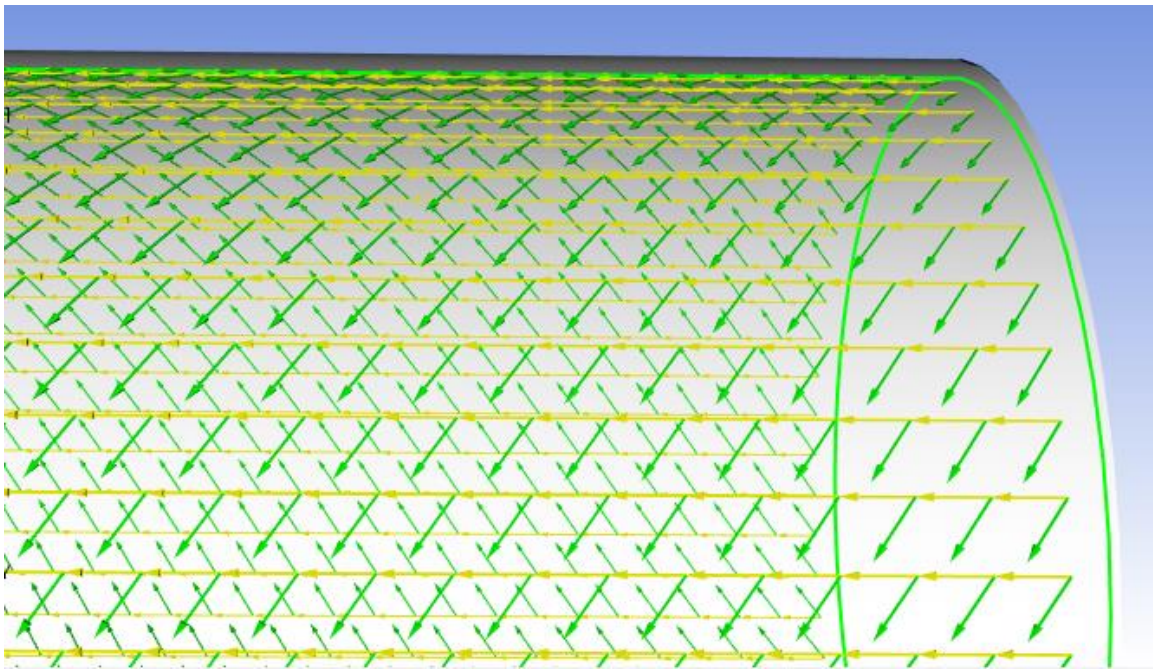
Σχήμα 4.7: Ορισμός τοπικού συστήματος συντεταγμένων με βάση το χείλος



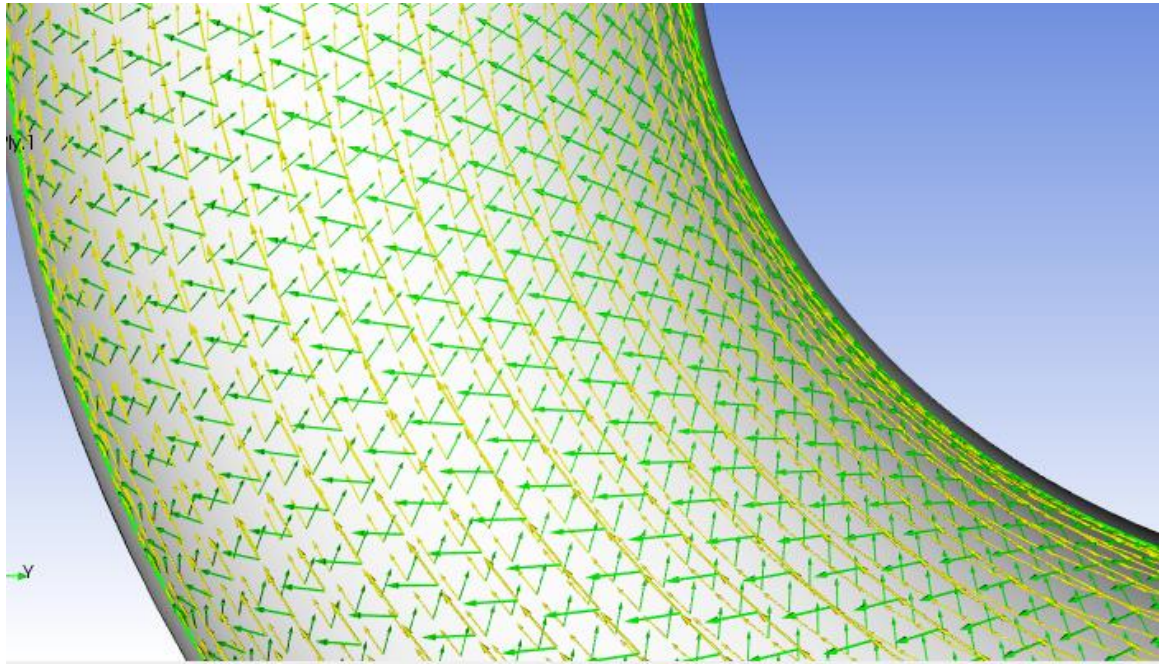
Σχήμα4.8: Άνω χείλος τομής (Κόκκινο χρώμα)

Με αυτόν τον τρόπο, καταφέραμε να ορίσουμε σωστά τον προσανατολισμό στις 0° γωνίας, και με βάση αυτόν, αντιωρολογιακά τις θετικές μοίρες γωνίας προσανατολισμού ινών. Όπου στο σχήμα 4.9, παρατηρούμε την μηδενική γωνία αναφοράς (κίτρινα βελάκια)

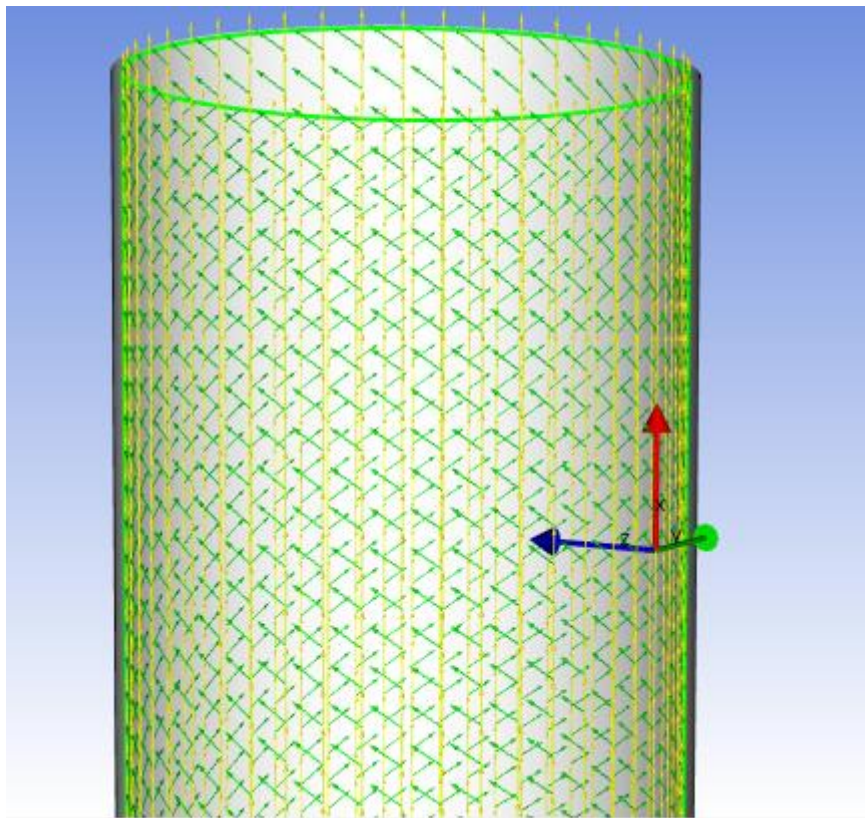
και την τυχαία γωνία ογδόντα πέντε μοιρών (αντιωρολογιακά από την γωνία αναφοράς). Επίσης στο σχήμα 4.10, παρατηρούμε την γωνία αναφοράς και την γωνία των ιών στο τμήμα της καμπύλης της γωνιάς. Στο σχήμα 4.11, παρατηρούμε τις εν λόγω γωνίες στο τέλος τις γωνιάς. Οπότε παρατηρώντας τα τρία ακόλουθα σχήματα, έχουμε πλήρη εικόνα πως συμπεριφέρεται η γωνία αναφοράς προσανατολισμού και η γωνία προσανατολισμού των ιών.



Σχήμα 4.9: Γωνία αναφοράς και θετική γωνία ιών στην αρχή της γωνιάς



Σχήμα 4.10: Γωνία αναφοράς και θετική γωνία ιών στο καμπύλο τμήμα της γωνιάς

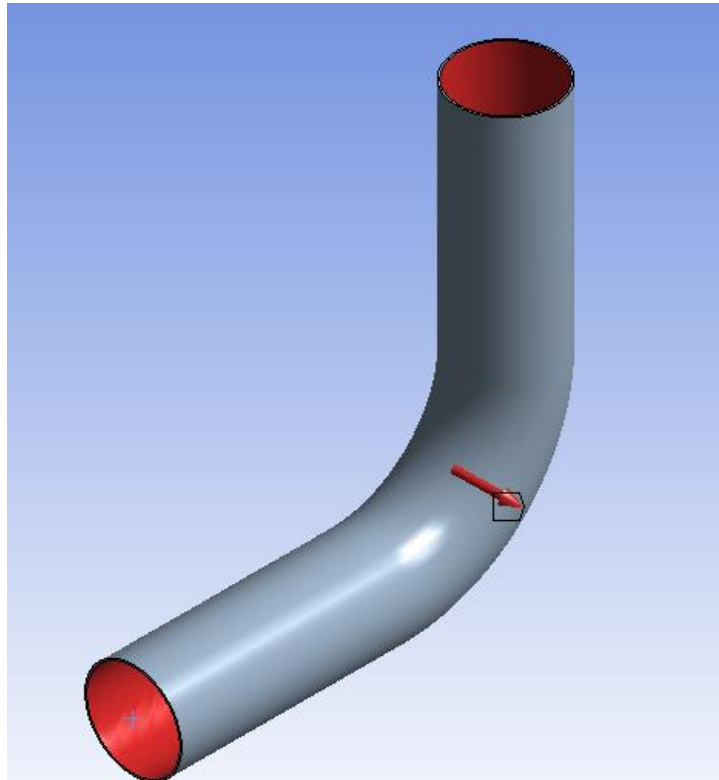


Σχήμα 4.11: Γωνία αναφοράς και θετική γωνία ιών στο τέλος της γωνιάς

Ορισμός φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών

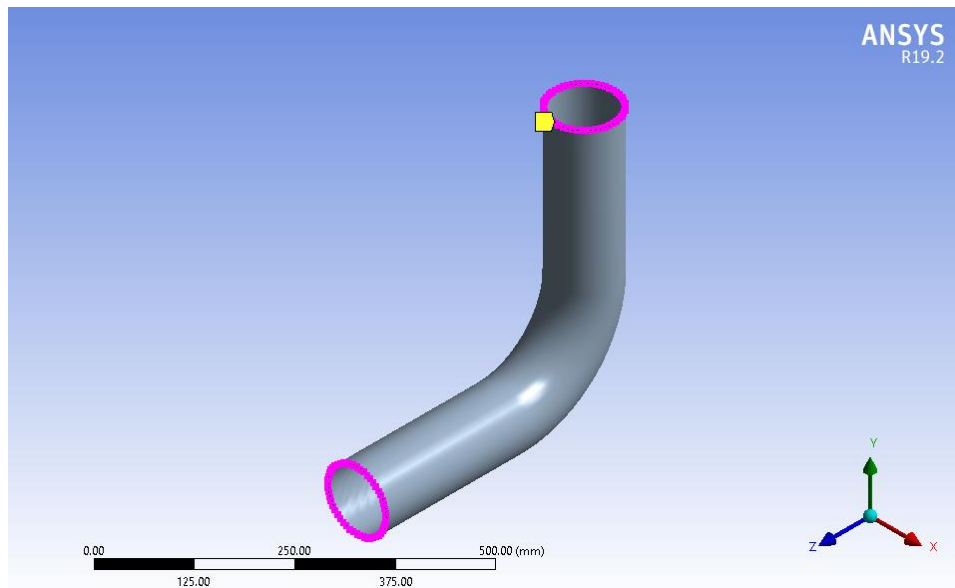
Όπως και στους σωλήνες, η φόρτιση στην γωνιά θα είναι ομοιόμορφη εσωτερική πίεση 6, 10, 16 και 20 bar εφαρμοσμένη στην εσωτερική διάμετρο της γωνιάς όπως φαίνεται και στο

σχήμα 4.12 (κόκκινο χρώμα). Όπου αυτές οι τιμές επιλέχθηκαν λόγω ενδιαφέροντος της εταιρείας B&T Composites.



Σχήμα 4.12: Ομοιόμορφη κατανεμημένη πίεση στο εσωτερικό την γωνιάς

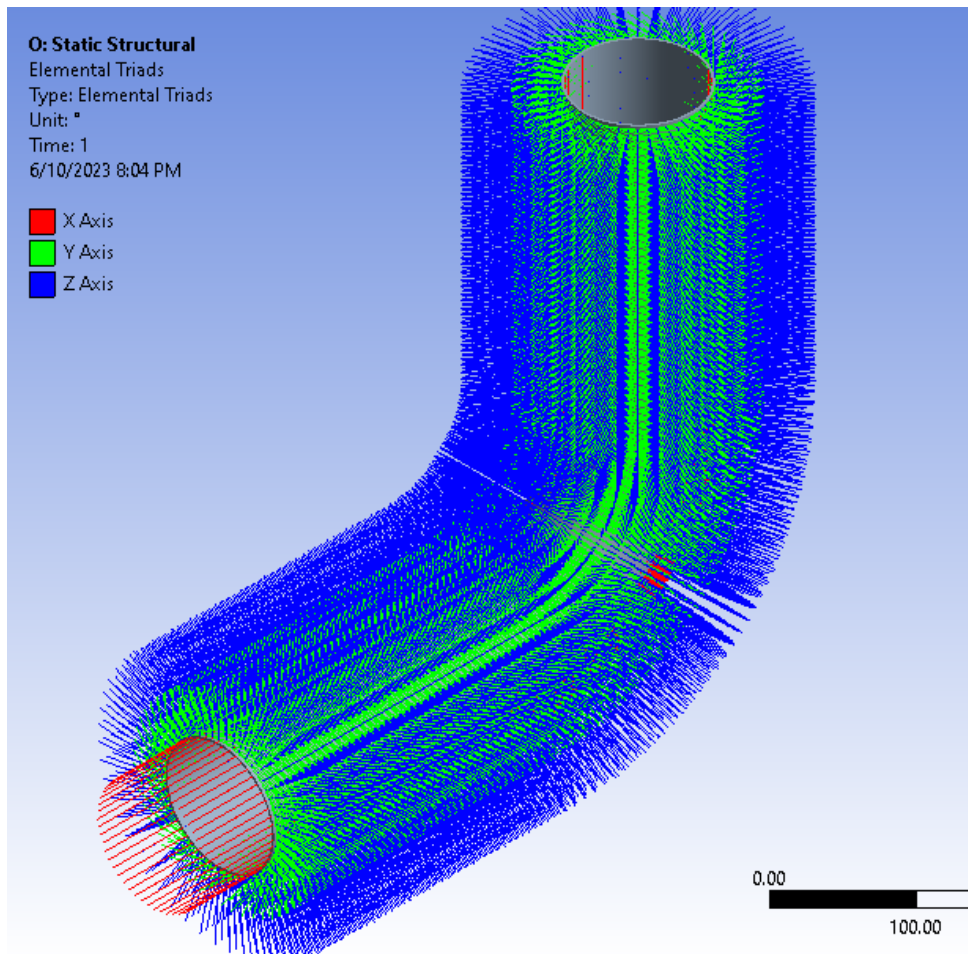
Αντίθετα με την μοντελοποίηση του σωλήνα του 3^{ου} κεφαλαίου, εδώ όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες επιλέγεται περιορισμός ως προς τους x-y-z άξονες των κόμβων και των δύο άκρων της γωνιάς όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.13. Πρακτικά, αυτό επιτυγχάνεται με το βάρος του δικτύου μετά και πριν την γωνία, που περιορίζει την κίνηση στα άκρα της. Οπότε αν λάβουμε αυτή την θεώρηση υπόψη, τα άκρα της γωνιάς μπορούν να θεωρηθούν πακτωμένα. Επίσης, για να είμαστε σίγουροι για τα αποτελέσματα, επιμηκώναμε τα άκρα κατά 250mm και στις δύο πλευρές έτσι ώστε οι συνοριακές συνθήκες να μην επηρεάσουν τα αποτελέσματα στην γωνιά.



Σχήμα 4.13: Κόμβοι άκρων γωνίας

Επιλογή κριτηρίου αστοχίας σύνθετων υλικών και αποτελέσματα

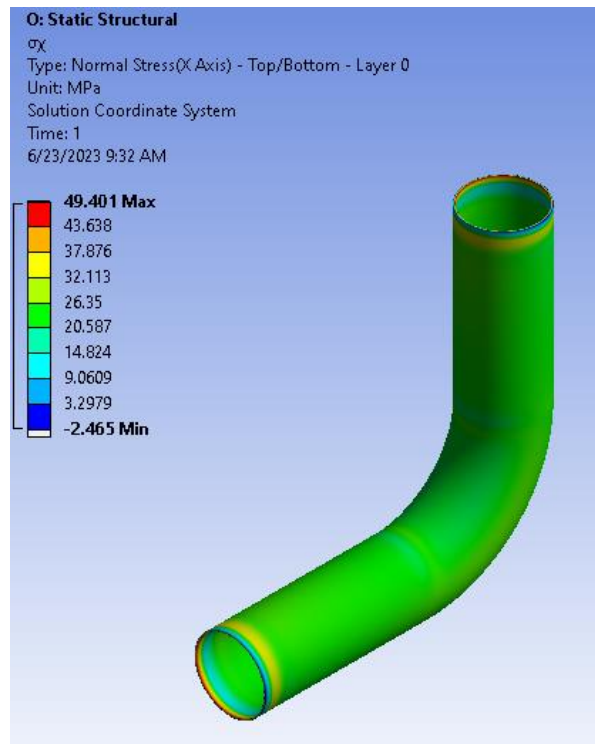
Για την συγκεκριμένη γεωμετρία της γωνίας, ειδικά στο καμπυλωτό κομμάτι, για να ελέγξουμε ότι τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων έχουν οριστεί ορθά, τα «elemental triads» όπως φαίνονται στο σχήμα 4.14 μας βοήθησαν. Ουσιαστικά, παρατηρούμε σε κάθε στοιχείο τις τοπικές του συντεταγμένες και ελέγχουμε αν έχουν οριστεί σωστά. Αφού διαπιστώσαμε πως έχουν οριστεί σωστά, προχωρήσαμε στην εξαγωγή αποτελεσμάτων.



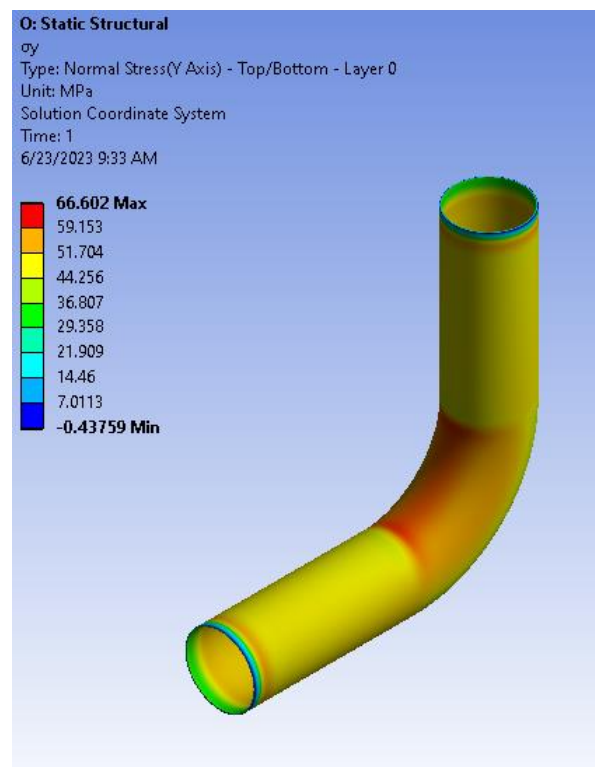
Σχήμα 4.14: Τοπικές συντεταγμένες στοιχείων γωνιάς

Όπως στον σωλήνα στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι και στην γωνιά επιλέγουμε ως κριτήριο αστοχίας σύνθετων υλικών, το κριτήριο Hashin. Οπότε με βάση το κριτήριο αστοχίας σύνθετων υλικών Hashin, υπολογίζουμε το ελάχιστο συνολικό πάχος πολύστρωτου για κάθε διαφορετικό συνδυασμό διαστάσεων, όπως αναφέραμε στον πίνακα 4.1., έτσι ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να ισούται με 2. Πάλι όπως έγινε και στον σωλήνα, τα αποτελέσματα του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά το κριτήριο του Hashin, επιβεβαιώθηκαν με τις εξισώσεις 3.1 και 3.2 του κεφαλαίου 3, υπολογίζοντας πρώτα τις τάσεις ως ακολουθούν στα σχήματα 4.15, 4.16 και 4.17. Τα εν λόγω σχήματα αναπαριστούν ενδεικτικά γωνιά διαμέτρου 100mm. Δηλαδή τις τάσεις παράλληλα με τις διευθύνσεις των ινών, κάθετα στις διευθύνσεις των ινών και την διαμητική τάση που ορίζεται στο παράλληλο και κάθετο επίπεδο με την διεύθυνση των ινών.

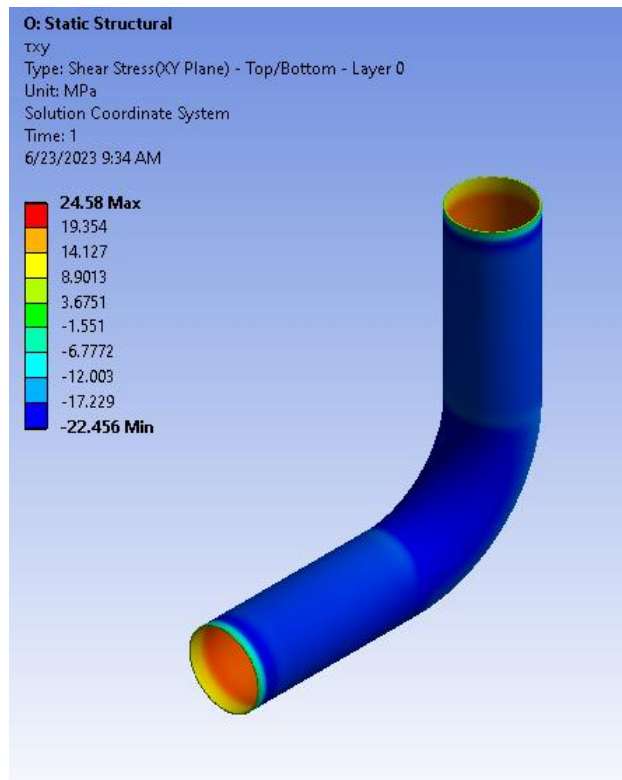
Τα εν λόγω σχήματα αναφέρονται στις περιπτώσεις γωνιάς εσωτερικής διαμέτρου 100mm



Σχήμα 4.15: Τάση στην διεύθυνση των ινών σ_{11} στο κάτω σημείο της πρώτης στρώσης



Σχήμα 4.16: Τάση κάθετη στην διεύθυνση των ινών σ_{22} στο κάτω σημείο της πρώτης στρώσης

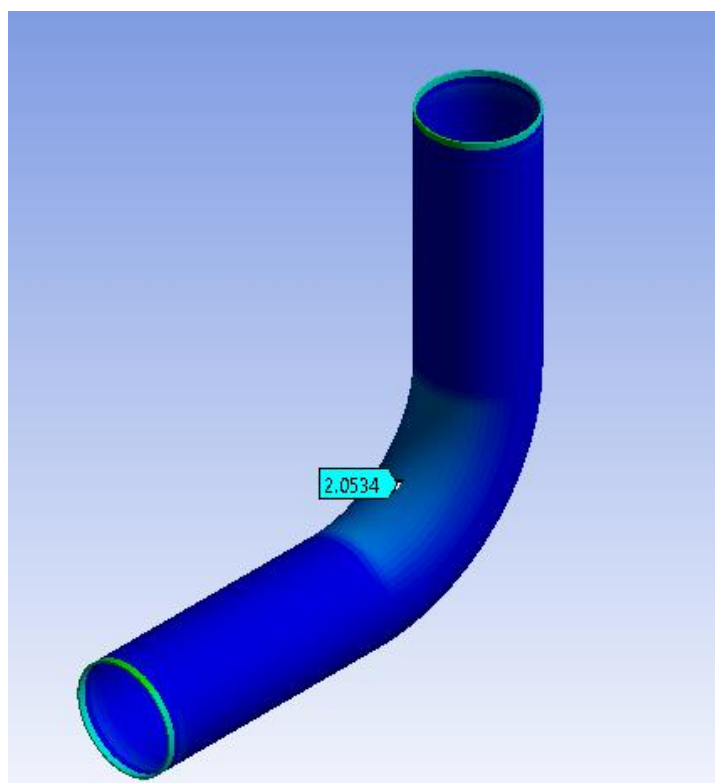


Σχήμα 4.17: Διατμητική τάση επιπέδων παράλληλα και κάθετα με τις ίνες τ_{12} στο κάτω σημείο της πρώτης στρώσης

Τα αναλυτικά αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 4.2. Η παραμετρική ανάλυση επιλέχθηκε για τα όρια των γωνιών προσανατολισμού που μας έδινε η εταιρεία B&T Composites, δηλαδή για γωνίες 55° έως 85°. Τα αποτελέσματα πάρθηκαν από το καμπύλο τμήμα της γωνιάς και όχι από τα κυλινδρικά τμήματα. Γι' αυτό τον λόγο άλλωστε επιμηκώναμε τα κυλινδρικά τμήματα, έτσι ώστε οι συνοριακές συνθήκες να μην μας επηρεάσουν τα αποτελέσματα στο καμπύλο σχήμα της γωνιάς που μας ενδιαφέρει. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα αποτελέσματος φαίνεται στο σχήμα 4.16, όπου παρουσιάζεται ο συντελεστής ασφαλείας του πολύστρωτου [+55]₁₀ με συνολικό πάχος πολύστρωτου 2.00 mm. Ο συντελεστής ασφαλείας στο πιο επιβαρυνμένο από άποψη τάσεων σημείο, όπως βλέπουμε και στο σχήμα 4.18 ισούται με 2.1.

Πίνακας 4.2: Πάχος Πολύστρωτου Γωνιάς για Συντελεστή Ασφαλείας ίσο ή μεγαλύτερο του δύο

ΓΩΝΙΑ						
[+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55]						
DN 100			DN 150		DN 200	
ΠΙΕΣΗ [bar]	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ [mm]	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ [mm]	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ [mm]
6	2	0.7	2	0.9	2	1.2
10	2.05	1	2	1.4	2	1.9
16	2.1	1.6	2	2.2	2	3
20	2.01	2	2.05	3	2.05	4
[+85/-85/+85/-85/+85/-85/+85/-85/+85/-85]						
6	2.1	0.5	2	0.7	2.1	1
10	2.1	0.8	2.04	1.1	2	1.4
16	2	1.3	2	1.7	2	2.2
20	2.05	1.6	2	2.2	2	2.8



Σχήμα 4.18: Συντελεστής ασφαλείας κριτηρίου Hashin σε πολύστρωτο [+55]₁₀ με συνολικό πάχος πολύστρωτου 2.00mm

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη παράγραφο, το πάχος μοντελοποίησης είναι κοινό για όλα τα σημεία σε σχέση με το πρακτικό πάχος που διαφέρει. Στην πράξη, το πάχος στο κυρτό της καμπύλης θα ήταν το μισό του κοίλου και το κοίλο με την σειρά του μεγαλύτερο από τα πάχη στο κυλινδρικό τμήμα. Όμως στην πράξη, ορίζουμε ακριβώς το πάχος που θα

έχει το κυλινδρικό τμήμα και όχι το κυρτό ή κοίλο της γωνιάς. Οπότε, ας οριστεί μιάμιση φορές πάνω από το πάχος πολύστρωτου που παρουσιάζουμε στον πίνακα 4.2 που επιτυγχάνεται συντελεστής ασφαλείας ίσος με δύο. Άρα αν το πάχος στο κυλινδρικό τμήμα οριστεί ίσο με μιάμιση φορές, με την μείωση του πάχους λόγω της γεωμετρίας της γωνιάς, θα παραμείνουμε εντός ορίων όπως αποδείξαμε νωρίτερα. (και ως προς πάχος πολύστρωτου και ως προς συντελεστή ασφαλείας στο κυρτό και κοίλο της γωνιάς)

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.2 παρατηρούμε καλύτερη συμπεριφορά του πολύστρωτου $[\pm 85]_{10}$ έναντι του $[\pm 55]_{10}$ ως προς την απαίτηση του συνολικού πάχους για ίδια τιμή συντελεστή ασφαλείας ίση με 2. Επίσης, για κάθε περίπτωση φόρτισης και γωνιάς προσανατολισμού, παρατηρούμε μεγαλύτερη απαίτηση σε πάχος πολύστρωτου όσο αυξάνεται η διάμετρος του σωλήνα. Αξίζει να σημειωθεί πως πρακτικά τα πάχη που βρίσκονται κάτω από το 1mm, θα δημιουργήσουν άλλα προβλήματα όπως φθορά στην μεταφορά του σωλήνα, οπότε προτείνεται για κάθε περίπτωση, το συνολικό πάχος κατασκευής να υπερβαίνει το 1mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι ο υπολογισμός του ελάχιστου πάχους πολύστρωτου, λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή ασφαλείας ίσο με δύο, για σωλήνες και γωνίες διαφορετικών διαστάσεων, οι οποίες υποβάλλονται σε διαφορετικές ομοιόμορφες εσωτερικές πιέσεις. Πριν ξεκινήσουμε να δουλεύουμε με τις εν λόγω γεωμετρίες, έπρεπε να επιτευχθεί εξοικείωση με τα σύνθετα υλικά στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων του ANSYS. Αυτό αρχικά επετεύχθη, δουλεύοντας με πιο γνώριμες γεωμετρίες για τις οποίες για λόγου χάρη, τάσεις βέλη κάμψης και άλλα στοιχεία υπολογίζονται σχετικά εύκολα με μαθηματικές εξισώσεις. Αυτό ήταν πολύ σημαντικό, διότι μπορούσαμε άμεσα να επιβεβαιώσουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, συγκρίνοντάς τα με τα αντίστοιχα των θεωρητικών εξισώσεων. Εν συνεχεία, προχωρώντας στην μελέτη των γεωμετριών ενδιαφέροντος, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων επετεύχθη, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μας με αντίστοιχες δημοσιευμένες μελέτες.

Κάθε βήμα που ακολουθήσαμε δικαιολογείται πλήρως. Και στους σωλήνες και στις γωνίες, το κριτήριο αστοχίας σύνθετων υλικών που λάβαμε υπόψη είναι το κριτήριο Hashin, όπως εξηγήσαμε και στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Οι ίνες-ρητίνη, οι διαστάσεις και οι γωνίες προσανατολισμού επιλέχθηκαν λόγω ενδιαφέροντος της συνεργαζόμενης εταιρείας B&T Composites, έτσι ώστε τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας να αξιοποιηθούν άμεσα στην πράξη και όχι μόνο ακαδημαϊκά.

Σημαντικά σημεία ενδιαφέροντος αφορούν κυρίως στην γεωμετρία της γωνιάς, που πρώτον, χρειάστηκε να εκτελέσουμε μια τομή κατά το διάμηκες έτσι ώστε να οριστεί σωστά ο προσανατολισμός των ινών. Δεύτερον, αναγκαστήκαμε να αυξήσουμε κατά κάποιο συγκεκριμένο μήκος τα κυλινδρικά τμήματα της γωνιάς, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που λαμβάναμε στο καμπύλο τμήμα, να μην επηρεάζοντουσαν από τις συνοριακές συνθήκες. Τρίτον, θεωρήσαμε κοινό πάχος σε όλη την γεωμετρία της γωνιάς, παρόλο που την πράξη δεν ισχύει και αυτό οδηγεί σε συγκεκριμένη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων όπως αναφέρουμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4. Επίσης, αποδείξαμε και για τις δύο γεωμετρίες, πως όσο αυξάνεται η γωνία προσανατολισμού των ινών, τόσο καλύτερα αποτελέσματα παίρνουμε, δηλαδή μικρότερες τάσεις κλπ με συνέπεια μικρότερη ανάγκη συνολικού πολύστρωτου πάχους. Γι' αυτό τον λόγο, στα αποτελέσματα, παραθέτουμε την μέγιστη γωνία περιέλιξης ινών που μπορεί να εκτελέσει η εταιρεία B&T Composites, που είναι οι ογδόντα πέντε μοίρες, αλλά και την μικρότερη γωνία, που είναι οι πενήντα πέντε μοίρες για λόγους σύγκρισης και για λόγους διαφορετικής ενίσχυσης, δηλαδή για ενίσχυση κάθετα στις ίνες, όπως έχουμε εξηγήσει αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

Τα αποτελέσματα μας είναι αξιόπιστα και με ικανοποιητικό συντελεστή ασφαλείας. Κάτι που αφορά μελλοντική μελέτη και θα ολοκλήρωνε επιτυχώς την μελέτη μας, θα ήταν η κατασκευή αυτών των διάφορων γεωμετριών που μελετήσαμε, στα πάχη που παραθέτουμε

και η εκτέλεση υδροστατικού ελέγχου στις πιέσεις ενδιαφέροντος, ώστε να αποδειχθούν στην πράξη πως αντέχουν. Επίσης, μπορεί να γίνει αντίστοιχη μελέτη για γεωμετρίες όπως 'ταυ' και σωλήνες με φλάντζες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τσούβαλης, Ν. (2022). Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά.

Καρναμπάς, Γ. (1992), Κάμψη και Λυγισμός Πακτωμένων Πλακών από Σύνθετα Υλικά με Βάση την Κλασική Θεωρία Επιστρώσεων, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 1992.

Κυριακόπουλος, Γ. (1989), Κάμψη και Λυγισμός Σύνθετων Ελασμάτων με Βάση την Κλασική Θεωρία Επιστρώσεων, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούνιος 1989.

Barbero, E. J. (2010). Introduction to Composite Materials Design, Second Edition.
<http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Bilalis E. Diploma Thesis (2016). Experimental and Numerical Study of Composite Shafts.

B&T Composites. Available: <http://www.btcomposites.gr/>.(10-05-2023)

H. Bakaiyan *, H. Hosseini, E. Ameri, Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations Composite Structures 88 (2009) 532–541

Ismail Yasin Sülü and Semsettin Temiz, STRESS ANALYSES OF MULTI-LAYERED COMPOSITE PIPES SUBJECTED TO INTERNAL PRESSURE, Academic Journal of Science,(2015)

M. H. Elgohary et al, Stress analysis of multi-layered composite cylinders subjected to various loadings, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (2021)

M.Xia, H.Takayanagi, K.Kemmochi, Analysis of multi-layerd filament-wound composite pipes under internal pressure, Composite Structures 53 (2001) 483-491

Peters, S., 2011. Composite Filament Winding. Materials Park, Ohio: ASM International.

SUPERLIT. Available at: [https:// www.superlit.com/en/products-and-services/grp-fittings/](https://www.superlit.com/en/products-and-services/grp-fittings/) (10-06-2023)

Wikipedia. 2005a. Filament winding [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Filament_winding&action=history [Accessed 19/8/2017].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

```
% *****  
% MATERIAL PROPERTIES  
% *****  
E1=14*10^9;  
E2=3.5*10^9;  
v12=0.4;  
v21=(E2*v12)/E1;  
G12=4.2*10^9;  
theta=[90 0 90];  
% *****  
% LAYER NUMBER  
% *****  
k=3;  
% *****  
% THICKNESS  
% *****  
t=0.5*10^-3; % in meter  
% *****  
% Q VALUES  
% *****  
Q11=E1/(1-v12*v21);  
Q12=v12*E2/(1-v12*v21);  
Q22=E2/(1-v12*v21);  
Q66=G12;  
% D VALUES  
A11=0;  
A12=0;  
A16=0;  
A22=0;  
A26=0;  
A66=0;  
  
D11=0;  
D12=0;  
D16=0;  
D22=0;  
D26=0;  
D66=0;  
  
for i=1:k  
    deg=(theta(i)*pi/180);  
    m=cos(deg);  
    n=sin(deg);  
    % *****  
    % CALCULATION Q BAR VALUES  
    % *****  
    Qbar11=Q11*m^4+2*(Q12+2*Q66)*m^2*n^2+Q22*n^4  
    Qbar12=(Q11+Q22-4*Q66)*m^2*n^2+Q12*(m^4+n^4);
```



```

%Qbar16=-m*n^3*Q22+m^3*n*Q11-m*n*(m^2-n^2)*(Q12+2*Q66);

Qbar22=Q11*n^4+2*(Q12+2*Q66)*m^2*n^2+Q22*m^4;

%Qbar26=-m^3*n*Q22+m*n^3*Q11+m*n*(m^2-n^2)*(Q12+2*Q66);

Qbar66=(Q11+Q22-2*Q12)*m^2*n^2+Q66*(m^2-n^2)^2;

% *****
% CALCULATION D BAR VALUES
% *****

D11storage=Qbar11*(((t*(k-2*i)/2))^3-((t*(k-2*(i-1))/2))^3)/3;
D12storage=Qbar12*(((t*(k-2*i)/2))^3-((t*(k-2*(i-1))/2))^3)/3;
%D16storage=Qbar16*(((t*(k-2*i)/2))^3-((t*(k-2*(i-1))/2))^3)/3;
D22storage=Qbar22*(((t*(k-2*i)/2))^3-((t*(k-2*(i-1))/2))^3)/3;
%D26storage=Qbar26*(((t*(k-2*i)/2))^3-((t*(k-2*(i-1))/2))^3)/3;
D66storage=Qbar66*(((t*(k-2*i)/2))^3-((t*(k-2*(i-1))/2))^3)/3;
D11=D11+D11storage;
D12=D12+D12storage;
%D16=D16+D16storage;
D22=D22+D22storage;
%D26=D26+D26storage;
D66=D66+D66storage;
% *****
% CALCULATION A BAR VALUES
% *****
A11storage=Qbar11*((t*(k-2*i)/2)-(t*(k-2*(i-1))/2));
A12storage=Qbar12*(((t*(k-2*i)/2)-(t*(k-2*(i-1))/2)));
A22storage=Qbar22*(((t*(k-2*i)/2)-(t*(k-2*(i-1))/2)));
A66storage=Qbar66*(((t*(k-2*i)/2)-(t*(k-2*(i-1))/2)));
A11=A11+A11storage;
A12=A12+A12storage;
A22=A22+A22storage;
A66=A66+A66storage;
end

```