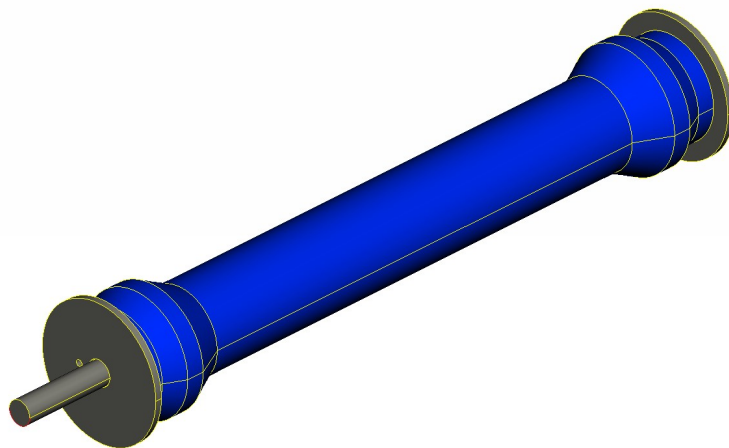




Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Πολυτεχνική Σχολή

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΜΒΟΛΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΑΠΟ
ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ



ΚΟΥΤΣΟΥΠΑΚΗΣ ΙΩΣΗΦ

ΑΕΜ: 1956

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΓΙΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	8
2.1 Εισαγωγή – Ορισμός.....	8
2.2 Δομή σύνθετων υλικών	9
2.2.1 Συστατικά υλικά.....	10
2.2.2 Διαδικασίες συνδυασμού ινών και μήτρας.....	12
2.3 Περιγραφή πρώτων υλών παρούσας μελέτης.....	12
2.4 Κύριες διευθύνσεις σύνθετου υλικού.....	13
2.5 Θεμελιώδεις εξισώσεις - Classical lamination theory	16
2.6 Κριτήριο αστοχίας (Failure Criterion).....	18
2.7 Πρακτικές σχεδιασμού	19
3 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΜΒΟΛΑ	21
3.1 Εισαγωγή – Ορισμός.....	21
3.2 Εφαρμογές.....	22
3.3 Μέθοδος κατασκευής με περιέλιξη νήματος (Filament Winding).....	24
4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	25
4.1 Εισαγωγή – Ορισμός.....	25
4.2 Περιγραφή της μεθόδου	25
4.3 Διακριτοποίηση της γεωμετρίας.....	28
4.3.1 Βασικά είδη πεπερασμένων στοιχείων.....	29
4.3.2 Σχηματισμός πλέγματος (Meshing).....	31
4.4 Μοντελοποίηση υδραυλικού εμβόλου από σύνθετο υλικό	33
4.4.1 Εισαγωγή αρχείου CAD – Απλοποίηση γεωμετρίας.....	35
4.4.2 Δημιουργία πλέγματος του εμβόλου	36

4.4.3	Ορισμός ιδιοτήτων και υλικών.....	38
4.4.4	Ορισμός οριακών συνθηκών και φορτίσεων.....	40
4.5	Αρχικό μοντέλο – Αριθμητική επίλυση	41
4.5.1	Ανάλυση τροπών και αστοχίας υλικού με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)	41
4.6	Βελτιστοποίηση του σύνθετου υλικού	43
4.7	Έμβολο ομαλής μετάβασης – Αριθμητική επίλυση	47
4.8	Ενίσχυση σύνθετου υλικού	53
4.9	Μοντελοποίηση υδραυλικού εμβόλου – Μοντέλο στερεών στοιχείων.....	56
4.9.1	Ορισμός υλικών και ιδιοτήτων.....	57
4.9.2	Δημιουργία τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων	57
5	ΈΜΒΟΛΟ ΣΥΓΚΡΑΤΙΣΗΣ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ.....	65
5.1	Απλό μοντέλο δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων - Αριθμητική Επίλυση.....	65
5.2	Απλό μοντέλο τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων - Αριθμητική Επίλυση	71
5.3	Πλήρες μοντέλο στερεών πεπερασμένων στοιχείων - Αριθμητική Επίλυση	73
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	78
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	79
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	80

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματεύεται την αριθμητική ανάλυση και το βέλτιστο σχεδιασμό υδραυλικών εμβόλων υψηλής πίεσης από ανθρακονήματα. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί τύπου υδραυλικού εμβόλου, ένα απευθείας περιέλιξης τού σύνθετου υλικού επάνω στα μεταλλικά μέρη του εμβόλου και ένα μετέπειτα σύσφιξης των μεταλλικών τμημάτων με τη χρήση ράβδων (heavy duty).

Σε πρώτη φάση, έγινε μία εισαγωγή στα σύνθετα υλικά, καθώς και στις ιδιαιτερότητες που διέπουν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Τονίστηκε η σημαντική εξοικονόμηση του βάρους που αυτά μπορούν να προσφέρουν σε μία κατασκευή, με τιμές που ανέρχονται στο 60% έως και 70% ανάλογα με το συμβατικό υλικό που αυτά αντικαθιστούν. Επίσης, παρουσιάστηκαν πρακτικές εφαρμογές των υδραυλικών εμβόλων, κάνοντας έτσι αισθητή τη σημασία ελάττωσης του βάρους τους. Έγινε παρουσίαση και εφαρμογή ορισμένων πρακτικών σωστού σχεδιασμού τέτοιων σύνθετων υλικών, που είναι ενισχυμένα με συνεχείς ίνες άνθρακα.

Έπειτα, με τη βοήθεια των λογισμικών CAE, ANSA και META καθώς και του επιλύτη NASTRAN, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση και αριθμητική ανάλυση των προαναφερθέντων εμβόλων, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε στατική ανάλυση. Έγινε επιπλέον χρήση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης, με τη χρήση του λογισμικού MATLAB της εταιρίας MathWorks, οδηγώντας σημαντική βελτίωση της απόδοσης, από 25 έως 30%.

Η ανάλυση έγινε τόσο σε μοντέλα δισδιάστατων, όσο και τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζοντας μια απόκλιση από 0.5% έως 11.5% στα αποτελέσματα, ανάλογα με το μοντέλο, οδηγώντας τελικά σε δύο τύπους εμβόλου κατασκευασμένου από σύνθετο υλικό τα οποία αντέχουν πιέσεις έως και πριν τα 228.03 bar και τα 366.56 bar αντίστοιχα με συντελεστή ασφαλείας 1, ενώ μπορούν να λειτουργήσουν στα 152.02 bar και 244.48 bar αντίστοιχα με συντελεστή ασφαλείας 1.5. Και στις δύο περιπτώσεις, οι πιέσεις αυτές αφορούν μόνο ορισμένες κομβικές περιοχές συγκέντρωσης των τροπών, ενώ στο υπόλοιπο έμβολο, ο δείκτης ασφαλείας είναι αρκετά μεγαλύτερος, φτάνοντας έως και το 2.5 για το μεγαλύτερο μήκος του εμβόλου, αφήνοντας έτσι μεγάλο περιθώριο για περεταίρω βελτιστοποίηση και υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας.

ABSTRACT

The present thesis is done in purpose of achieving the best design for high pressure hydraulic cylinders consisting of carbon fibers, as well as the numerical analysis of such models. Two different types of hydraulic cylinders were examined, one of which is constructed by directly winding the carbon fibers onto the metal end caps and one that has the end caps attached to it with the use of metal rods (heavy duty).

In the first section, there has been an introduction to composite materials, as well as to the particularities that govern their mechanical attributes. Emphasis was given on the significant decrease in weight that these materials can provide in a construct, with values that range as high as 60% and 70% depending on the conventional material that they replace. Also, practical applications of such hydraulic cylinders were presented, making even more notable the significance of weight reduction. An introduction to and application of certain practices of proper design of such composite materials, reinforced with continuous carbon fibers was made.

Thereafter, with the use of the CAE software, ANSA and META as well as the NASTRAN solver, modeling and numerical analysis of said hydraulic cylinders was achieved, using the finite element method for a static analysis. Also, application of an optimization algorithm using the MATLAB software of MathWorks was done, leading to a significant increase in performance, ranging from 25% to 30%.

The analysis was made for two and three dimensional finite element models, presenting a divergence of 0.5% to 11.5% in the end results, depending on the model, resulting in two different types of hydraulic cylinders made from composite materials, which can withstand the operating pressure of 228.03 bar and the 366.56 bar respectively with a safety factor of 1, while they can operate at 152.02 bar and 244.48 bar respectively with a safety factor of 1.5. In both cases, these pressure values concern only certain areas of strain concentration, while for the rest of the cylinder, the safety factor as high as 2.5, leaving a significant margin for further optimization and higher operating pressures.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Γιαγκόπουλο Δημήτριο για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης και τους υποψήφιους διδάκτορες Σεβεντεκίδη Παναγιώτη και Ζαχαράκη Ηλία, για τις πολύτιμες συμβουλές τους και την υποστήριξη που μου προσέφεραν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, για τη στήριξη και την υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, διεργασίες που απαιτούν τη διαχείριση μεγάλων φορτίων και δυνάμεων, πραγματοποιούνται με τη βοήθεια μηχανών. Ο ανθρώπινος παράγοντας, παραμερίζεται σταδιακά από το κομμάτι της χειρονακτικής εργασίας και κατευθύνεται προς το σχεδιασμό, την κατασκευή και, τελικά, τη χρήση τέτοιων μηχανών και εργαλείων, όπου αυτό απαιτείται. Συνεπώς, αποτελεί ίσως τον πιο κρίσιμο παράγοντα, ο σωστός σχεδιασμός και μελέτη των μηχανών αυτών, προκειμένου να είναι λειτουργικές, ασφαλείς και αξιόπιστες. Υπολογιστικές και αριθμητικές μέθοδοι, όπως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιούνται εκτενώς κατά το σχεδιασμό αυτών των μηχανημάτων, καθώς και για τη μελέτη τη συμπεριφοράς και της δομικής τους ακεραιότητας κατά τη λειτουργία τους.

Σε πολλούς κλάδους, όπως η αεροναυπηγική, η διαστημική βιομηχανία, η ναυτιλία, η βαριά βιομηχανία και ακόμη και σε πτυχές της καθημερινής ζωής, όπως κατά τη χρήση μηχανοκίνητων οχημάτων, χρησιμοποιούνται εκτενώς υδραυλικά έμβολα. Τα έμβολα αυτά, χειρίζονται μεγάλα φορτία και συνεπώς λειτουργούν κάτω από υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Οποιαδήποτε αστοχία τους, μπορεί να οδηγήσει από υλικές ζημιές, όπως η καταστροφή ενός μηχανήματος, μέχρι και στην απώλεια της ανθρώπινης ζωής. Είναι λοιπόν κρίσιμος, ο σωστός σχεδιασμός και η μελέτη της λειτουργίας αυτών, καθώς και η συνεχής εξέλιξη τους, προς κατασκευές που είναι ανθεκτικότερες και πιο αξιόπιστες.

Η παρούσα εργασία, πραγματεύεται το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση δύο τέτοιου είδους υδραυλικών εμβόλων, κατασκευασμένα από πολυμερή ενισχυμένα με ανθρακονήματα (Carbon Fiber Reinforced Polymers – CFRPs). Ποιο συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα μελέτη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά, καθώς και τις αρχές που διέπουν το σχεδιασμό τους και τις ιδιότητες τους. Γίνεται αναφορά στις διαδικασίες συνδυασμού των συστατικών τους υλικών, καθώς και στις ιδιότητες των πρώτων υλών της παρούσας μελέτης. Παρουσιάζεται επίσης το θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από τον ορισμό των ιδιοτήτων τους, καθώς και η θεωρία των κριτηρίων αστοχίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο αντικείμενο που μελετάται, δηλαδή το υδραυλικό έμβολο, παρουσιάζονται ορισμένα ιστορικά στοιχεία για αυτό, καθώς και ορισμένες από τις εφαρμογές του. Επίσης, εξηγείται η μέθοδος κατασκευής τέτοιων εμβόλων από σύνθετα υλικά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) και εξηγείται ο τρόπος εφαρμογής της, από το σχηματισμό του πλέγματος και το χωρισμό ενός αντικειμένου σε πεπερασμένα στοιχεία, μέχρι και την ερμηνεία των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση. Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιείται η ανάλυση εμβόλων απευθείας περιέλιξης επάνω σε μεταλλικά εξαρτήματα. Γίνεται βελτιστοποίηση της δομής του σύνθετου υλικού με τη χρήση ενός αλγορίθμου, και γίνεται φανερή η

σημασία της γενικότερης γεωμετρίας του σύνθετου υλικού. Τονίζεται επίσης, η διαφορά μεταξύ των μοντέλων δισδιάστατων και τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για ένα υδραυλικό έμβολο βαρέων εργασιών (heavy duty). Ομοίως με το τέταρτο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εν λόγω μελέτη αλλά και σχόλια για την κατασκευή μοντέλων εμβόλων με μεγαλύτερες αντοχές και καλύτερη δομή στο μέλλον.

2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

2.1 Εισαγωγή – Ορισμός

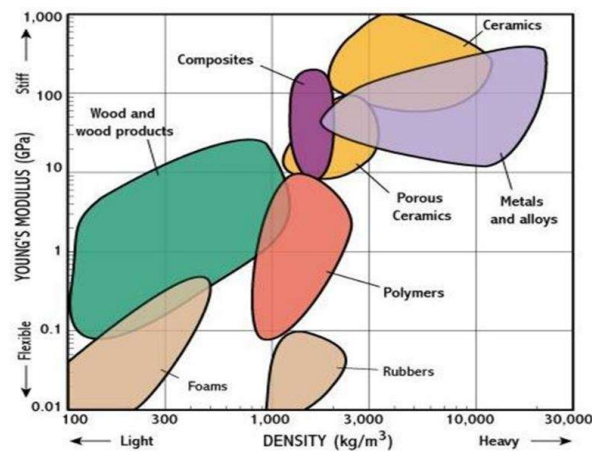
Η χρήση υδραυλικών εμβόλων παρατηρείται σε διάφορους κλάδους. Από την υποβοήθηση της κίνησης ενός οχήματος έως και τη λειτουργία των θυρών μιας διαστημική άκατου, τα υδραυλικά έμβολα αποτελούν ίσως τη βέλτιστη μέθοδο παροχής γραμμικής κίνησης. Τα έμβολα αυτά χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση μεγάλων φορτίων, οπότε συνεπάγονται υψηλές πιέσεις, οδηγώντας έτσι σε κατασκευές μεγάλου βάρους και όγκου για την απόκτηση της απαιτούμενης αντοχής όταν το έμβολο είναι κατασκευασμένο από κάποιο συμβατικό υλικό, όπως χάλυβα ή αλουμίνιο. Αυξημένο βάρος συνεπάγεται αυξημένη κατανάλωση, και ειδικά στις περιπτώσεις των εναέριων και διαστημικών σκαφών, πιθανώς απαγορευτικές δομές. Φαίνεται λοιπόν, πως είναι απαραίτητη η χρήση ελαφρύτερων υλικών για τα υδραυλικά έμβολα, χωρίς όμως να υπάρξει μείωση της αντοχής τους στη πίεση. Το πρόβλημα αυτό επιλύουν τα σύνθετα υλικά.

Ως σύνθετο υλικό (Composite Material) μπορεί να οριστεί οποιοδήποτε υλικό το οποίο αποτελείται από συνδυασμό δύο ή περισσότερων διακριτών συστατικών υλικών, με διαφορετικές ιδιότητες το καθένα και με διακριτά όρια μεταξύ τους [1]. Τουλάχιστον ένα από τα συστατικά αυτά υλικά, έχει εξαιρετική αντοχή και στιβαρότητα και τουλάχιστον ένα από τα υπόλοιπα έχει αρκετά μεγαλύτερη ελαστικότητα και ολκιμότητα. Το τελικό σύνθετο υλικό που προκύπτει, έχει βελτιωμένες ιδιότητες σε σύγκριση με αυτές των συστατικών του (υψηλή στιβαρότητα, αντοχή, ολκιμότητα και ελαστικότητα) καθώς εκμεταλλεύεται τις βέλτιστες ιδιότητες τους, μέσω ενός μηχανισμού κατανομής των φορτίων μεταξύ τους. Υπάρχουν ακόμη και περιπτώσεις όπου το νέο υλικό κατέχει ιδιότητες που δεν έχει κανένα από τα συστατικά που το αποτελούν [2]. Ορισμένες από τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι:

- Αντοχή
- Στιβαρότητα
- Αντοχή στη διάβρωση
- Θερμοκρασιακά εξαρτημένη συμπεριφορά
- Θερμική μόνωση/αγωγιμότητα
- Βελτιωμένος λόγος αντοχής/βάρους
- Αντοχή στη φθορά
- Ηχομόνωση
- Ελκυστικότητα

Αυτό που καθιστά συνήθως δελεαστική τη χρήση σύνθετων υλικών, είναι η αναλογία αντοχής και βάρους και στιβαρότητας βάρους που μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο τρόπο κατασκευής. Για παράδειγμα, σε μια κατασκευή, ανάλογα με τη δομή του συνθετικού υλικού, μπορεί να επιτευχθεί ελάττωση του βάρους μέχρι και 70% σε σχέση με μια αντίστοιχη κατασκευή από χάλυβα, και ως 60%

σε σχέση με μία αλουμινίου, πράγμα το οποίο συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμων. Στην Εικόνα 2.1 δίδεται το διάγραμμα επιλογής υλικού, ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της πυκνότητας του υλικού.

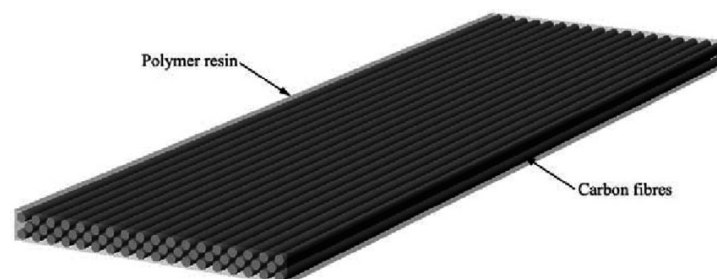


Εικόνα 2.1 Διάγραμμα επιλογής υλικού {1}.

Φυσικά, δεν είναι δυνατό να βελτιστοποιηθούν όλες αυτές οι ιδιότητες ταυτόχρονα και συνήθως δεν υπάρχει και αυτή η απαίτηση, ενώ μπορεί να υπάρξει και αντίθεση μεταξύ κάποιων ιδιοτήτων, όπως είναι η θερμική αγωγιμότητα και η θερμική μόνωση. Στόχος είναι κατασκευή ενός υλικού που έχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για μια συγκεκριμένη διεργασία [2].

2.2 Δομή σύνθετων υλικών

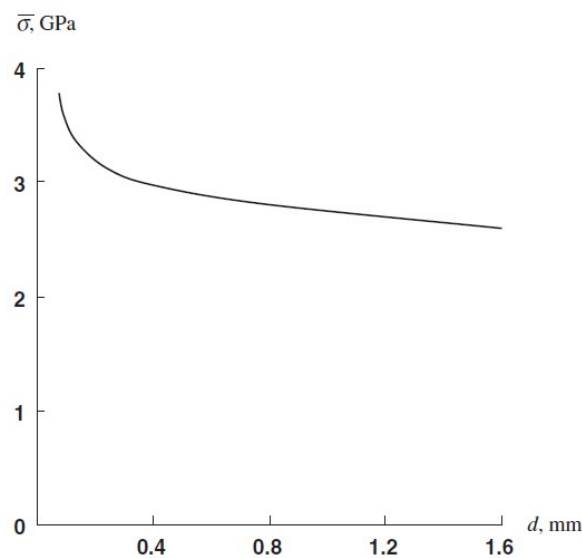
Ένα σύνθετο υλικό μπορεί να αποτελείται από ίνες ή σωματίδια διασκορπισμένα μέσα σε μια μήτρα (τυχαία ή διατεταγμένα) ή από στρώσεις διάφορων υλικών στοιβαγμένες η μία πάνω στην άλλη, ή και συνδυασμό ορισμένων ή όλων των τύπων. Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η περίπτωση πολυμερούς υλικού που ενισχύεται από ομοκατευθυνόμενες ίνες. Μία στρώση ενός τέτοιου είδους σύνθετου υλικού, αποτελείται από συνεχείς ίνες, τοποθετημένες παράλληλα προς μία διεύθυνση και ενωμένες μεταξύ τους μέσω μιας μήτρας, όπως μία ρητίνη. Η δομή ενός τέτοιου σύνθετου υλικού, δίδεται γραφικά στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Δομή σύνθετου υλικού ενισχυμένου με ανθρακονήματα {1}.

2.2.1 Συστατικά υλικά

Οι ίνες κατασκευάζονται από κάποιο ανθεκτικό υλικό όπως γυαλί (S-Glass/E-Glass), αραμίδιο, κάποιο μέταλλο (όπως χάλυβας), βόριο, άνθρακα, Kevlar® κ.α. Ένα υλικό, είναι από τη φύση του πιο ανθεκτικό με τη μορφή ίνας, παρά σε “συμπαγή” μορφή, καθώς η διατομή του έχει σχεδόν το μέγεθος των κρυστάλλων που το αποτελούν. Στην Εικόνα 2.3 δίδεται ένα τέτοιο παράδειγμα, όπου παρουσιάζεται η αντοχή σύρματος χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα συναρτήσει της διαμέτρου του. Επιπλέον, σε ένα υλικό σε “συμπαγή” μορφή, υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο για ατέλειες, ρωγμές και μετατοπίσεις. Στο τελικό σύνθετο υλικό, οι ίνες θα προσδώσουν την υψηλή αντοχή και στιβαρότητα που απαιτείται.



Εικόνα 2.3 Εξάρτηση αντοχής $\bar{\sigma}$ σύρματος χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα από τη διάμετρο d {2}.

Πέραν ορισμένων εξαιρέσεων όπως των μεταλλικών ινών, μεμονωμένες ίνες, όντας λεπτές και ευαίσθητες στις καταπονήσεις, δεν χρησιμοποιούνται κατευθείαν στη διαδικασία κατασκευής, αλλά με τη μορφή tow/roving (νήματος), yarn (λεπού νήματος) ή fabric (υφάσματος) [3]. Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ένα τέτοιο tow ανθρακονήματος, καθώς και ύφασμα από ανθρακόνημα. Τα ομοκατευθυνόμενα νήματα (unidirectional tows) αποτελούνται από έναν αριθμό χιλιάδων παράλληλων ινών, και χρησιμοποιούνται δύο κύριες διακρίσεις για τον ορισμό του μεγέθους τους, ο αριθμός K που δίνει τον αριθμό των ινών στο νήμα (π.χ. ένα νήμα 3K περιέχει 3000 ίνες) και τον αριθμό tex που ορίζει τη μάζα σε γραμμάρια ανά 1000 m του νήματος. Ένα yarn, αποτελεί ένα λεπτότερο νήμα (συνήθως περιέχει μερικές εκατοντάδες ίνες) το οποίο περιστρέφεται ελαφρώς περί τον άξονα του, ώστε να αποκτήσει την απαιτούμενη αντοχή για την επεξεργασία του. Το μέγεθος του μετριέται με τον αριθμό tex ή τον αριθμό den, όπου $1 \text{ tex} = 9 \text{ den}$. Τα υφάσματα κατασκευάζονται με την πλέξη νήματος σε διάφορα μοτίβα.



Εικόνα 2.4 Νήμα (Tow/Roving) (αριστερά) {4} και ύφασμα (Fabric) (δεξιά) άνθρακα {5}.

Η μήτρα είναι ένα υλικό με αρκετά μικρότερη αντοχή και στιβαρότητα από τις ίνες. Σκοπός της είναι να δέσει μεταξύ τους τις ίνες, οδηγώντας έτσι στην τελική μορφή του σύνθετου υλικού, και να λειτουργεί ως ένας μηχανισμός ομοιόμορφης κατανομής των φορτίων μεταξύ των ινών. Επιπλέον, προσφέρει μια εξομάλυνση των τάσεων, και προστατεύει τις ίνες κατά τις διεργασίες επεξεργασίας του αντικειμένου. Οι θετικές αυτές επιδράσεις της μήτρας όμως, δεν εμφανίζονται στο τελικό σύνθετο υλικό αν δεν υπάρξει καλή σύνδεση μεταξύ αυτής των ινών. Η μήτρα μπορεί να είναι κάποιο πολυμερές όπως θερμοσκληραινόμενη ρητίνη (εποξειδική, πολυεστερική, πολυαμιδίου κ.α.), θερμοπλαστική ρητίνη, κάποιο μέταλλο (αλουμίνιο ή χάλυβας), κεραμική ή άνθρακας.

Για κάθε στρώση, οι ποσότητες των ινών και της μήτρας που την αποτελούν, ορίζονται από τα κλάσματα όγκου, v , και μάζας, m , αντίστοιχα:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c}, \quad v_m = \frac{V_m}{V_c} \quad 2.1$$

$$m_f = \frac{M_f}{M_c}, \quad m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad 2.2$$

όπου V και M είναι ο όγκος και η μάζα. Οι δείκτες f , m αντιστοιχούν στις ίνες και τη μήτρα αντίστοιχα και ο δείκτης c στο σύνθετο υλικό. Προφανώς θα ισχύει ότι:

$$v_f + v_m = 1 \quad \text{και} \quad m_f + m_m = 1 \quad 2.3$$

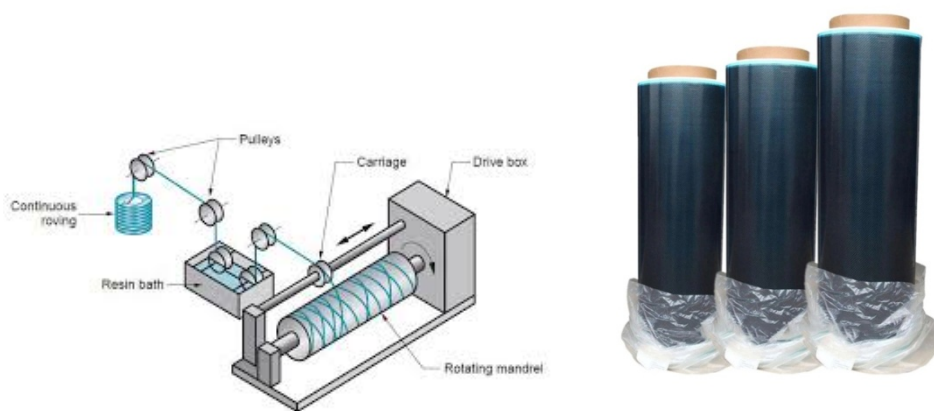
Επιπλέον, για τα κλάσματα όγκου και μάζας ισχύουν οι σχέσεις:

$$v_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} m_f \quad \text{και} \quad v_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} m_m \quad 2.4$$

όπου ρ_c , ρ_f και ρ_m οι πυκνότητες του σύνθετου υλικού, των ινών και της μήτρας αντίστοιχα.

2.2.2 Διαδικασίες συνδυασμού ινών και μήτρας

Υπάρχουν δύο κύριες διαδικασίες συνδυασμού των ινών και της μήτρας. Η πρώτη είναι η λεγόμενη “υγρή” διαδικασία, δηλαδή ο εμποτισμός ενός ινώδους υλικού (νήμα, ύφασμα) και η απευθείας χρήση τους για την κατασκευή του σύνθετου υλικού, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Αντίθετα, κατά τη δεύτερη, τη λεγόμενη “ξηρή” ή “προεμποτισμένη” (Prepreg) διαδικασία, το ινώδες υλικό εμποτίζεται και στη συνέχεια ξηραίνεται και αποθηκεύεται για μετέπειτα χρήση. Η αποθήκευση γίνεται σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία για την αποφυγή του ανεπιθύμητου πολυμερισμού της μήτρας [3]. Στην Εικόνα 2.5 επεξηγείται γραφικά η υγρή διαδικασία (αριστερά) και δίδεται εικόνα του υλικού της προεμποτισμένης διαδικασίας (δεξιά).



Εικόνα 2.5 Υγρή διαδικασία (αριστερά) {6} και υλικό ξηρής ή προεμποτισμένης διαδικασίας (Prepreg) (δεξιά) {5}.

2.3 Περιγραφή πρώτων υλών παρούσας μελέτης

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η περίπτωση των εμβόλων από πολυμερές ενισχυμένο με ανθρακονήματα (CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer). Τα έμβολα αυτά κατασκευάζονται από συνεχείς ίνες άνθρακα, παρατεταγμένες παράλληλα σε μία διεύθυνση, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους μέσω μίας εποξειδικής ρητίνης. Τα συστατικά υλικά είναι τα εξής:

- Ίνα: Toray T700S
- Ρητίνη: EPIKOTE 828LVEL
- Σκληρυντής: EPIKURE Curing Agent 866
- Καταλύτης: EPIKURE Catalyst 101

Η Toray T700S, αποτελεί μια ίνα με εξαιρετικά χαρακτηριστικά κατεργασίας για χρήση με τη μέθοδο περιέλιξης νήματος. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, όπως στα δοχεία υψηλής πίεσης ή τα υδραυλικά έμβολα

Η EPIKOTE 828LVEL, αποτελεί μια υγρή εποξειδική ρητίνη μέτριου ιξώδους. Αποτελείται από διφαινολική ρητίνη Α και επιγλωρυδρίνη και δεν περιέχει διαλυτικές ουσίες. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η χαμηλή περιεκτικότητα της σε υδρολύσιμο χλωρίδιο. Χρησιμοποιείται στη μέθοδο περιέλιξης με νήμα, και προσφέρει υψηλή μηχανική συμπεριφορά και καλή χημική αντίσταση στο σύνθετο υλικό. Για τη σκλήρυνση της μήτρας χρησιμοποιείται ο σκληρυντικός παράγοντας EPIKURE Curing Agent 866, ενώ χρησιμοποιείται και ο καταλύτης EPIKURE Catalyst 101 για την υποβοήθηση της διαδικασίας σκλήρυνσης. Τα συστατικά της μήτρας καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτής και των ινών είναι τα εξής:

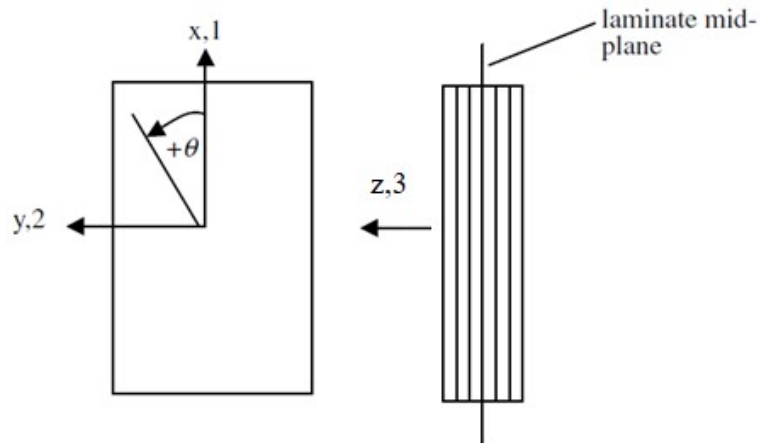
Πίνακας 2.1 Ιδιότητες μήτρας και ίνας.

Μήτρα	Ίνα
EPIKOTE 828LVEL EPIKURE Curing Agent 866 EPIKURE Catalyst 101	Toray T700S
	$E_1^f = 230000 \text{ MPa}$
	$E_2^f = 17125 \text{ MPa}$
	$\nu_{12}^f = 0,23^*$
$E^m = 3000 \text{ MPa}$	$\nu_{23}^f = 0,29^*$
$\nu^m = 0,35^*$	$G_{23}^f = 14314^*$
$\rho^m = 1,03174e-9 \text{ ton/mm}^3$	$\rho^f = 0,3174e-9 \text{ ton/mm}^3$

όπου E, G το μέτρο ελαστικότητας και διάτμησης αντίστοιχα, ν ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα. Οι δείκτες m, f συμβολίζουν τη μήτρα (matrix) και τις ίνες (fibers) αντίστοιχα.

2.4 Κύριες διευθύνσεις σύνθετου υλικού

Η τελική μορφή ενός σύνθετου υλικού, επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση στρώσεων διαδοχικά η μία επάνω στην άλλη, μέχρι την απόκτηση του τελικού σχήματος και πάχους του αντικειμένου. Καθώς οι στρώσεις ενός σύνθετου υλικού, δεν είναι πάντα παράλληλες προς τον ίδιο άξονα, για κάθε στρώση ορίζεται μία γωνία θ , η οποία ορίζει την διεύθυνση των ινών της εκάστοτε στρώσης ως προς το άξονα αναφοράς του υλικού. Στην Εικόνα 2.6 εξηγείται σχηματικά ο ορισμός αυτής της γωνίας θ . Εκτός από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, η επιλογή της αλληλουχίας των στρώσεων, καθώς και η επιλογή της κατάλληλης γωνίας θ για κάθε στρώση, αποτελούν τους παράγοντες που θα καθορίσουν τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού.



Εικόνα 2.6 Άξονες αναφοράς (x ή 1, y ή 2, z ή 3) και γωνία θ του σύνθετου υλικού {3}.

Για μία αλληλουχία στρώσεων από ένα σύνθετο υλικό χρησιμοποιείται ο εξής συμβολισμός για τον ορισμό των στρώσεων που την αποτελούν [4]:

$$[\theta_1/\theta_2/\theta_3\dots/\theta_n]$$

όπου $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ οι γωνίες περιέλιξης της κάθε στρώσης και

$$-90 \leq \theta \leq 90$$

Επιπλέον, αν η δομή είναι συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδο, ο συμβολισμός απλοποιείται ως εξής:

$$[\theta_1/\theta_2/\theta_2/\theta_1] \rightarrow [\theta_1/\theta_2]_s$$

Αν η μεσαία στρώση δεν επαναλαμβάνεται, τότε ο συμβολισμός έχει ως εξής:

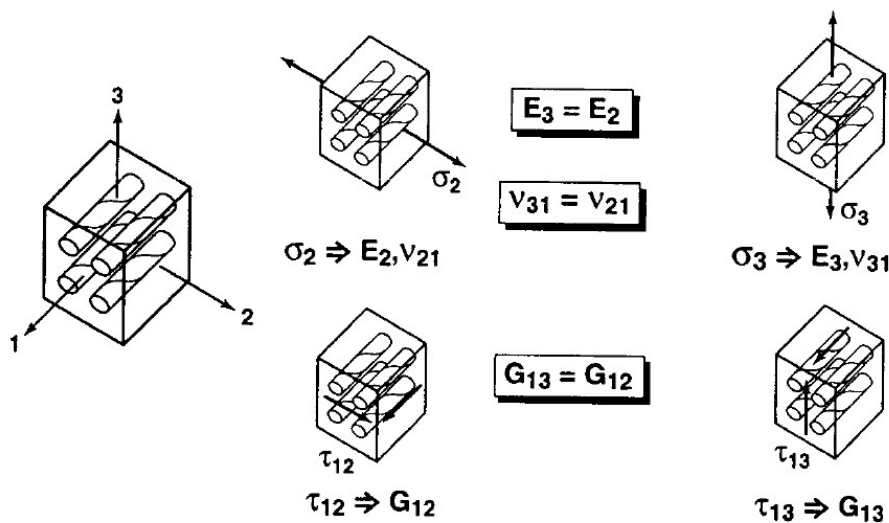
$$[\theta_1/\theta_2/\theta_1] \rightarrow [\theta_1/\bar{\theta}_2]_s$$

Η εξάρτηση των ιδιοτήτων ενός σύνθετου υλικού, τόσο από τα συστατικά του υλικά, όσο και από το συνδυασμό αυτών, οδηγεί στο διαχωρισμό της ανάλυσης της μηχανικής του σε δύο μέρη, τη μικρομηχανική και τη μακρομηχανική. Η μικρομηχανική μελετά τις ιδιότητες των συστατικών υλικών που αποτελούν το σύνθετο υλικό, και πώς αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για την εμφάνιση των κατάλληλων ιδιοτήτων. Η μακρομηχανική είναι η μελέτη του σύνθετου υλικού ως ομογενές, και οι ιδιότητες των συστατικών υλικών του υπολογίζονται ως μέσοι όροι των αντίστοιχων μακροσκοπικών ιδιοτήτων του.

Καθώς οι ίνες και η μήτρα έχουν πολύ διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας, και συνεπώς αντοχή και στιβαρότητα, το σύνθετο υλικό έχει διαφορετικές ιδιότητες στις διάφορες διευθύνσεις του που εξαρτάται από την τοποθέτηση των ινών, οπότε γενικά θα είναι ανομοιογενές και ανισοτροπικό. ή, στις περισσότερες περιπτώσεις, ορθοτροπικό, έχοντας τρία κάθετα επίπεδα συμμετρίας, το καθένα κάθετα σε καθεμία από τις κύριες διευθύνσεις [2]. Οι κύριες διευθύνσεις αυτές θα είναι ουσιαστικά τρεις, με τη μία να ορίζεται κατά μήκος των ινών (διεύθυνση x ή 1) και τις άλλες δύο εγκάρσια σε

αυτή (διευθύνσεις y ή 2 και z ή 3). Προφανώς στη διαμήκη διεύθυνση, το σύνθετο υλικό μπορεί να παραλάβει και τη μεγαλύτερη καταπόνηση.

Περαιτέρω, ένα σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από ομοκατευθυνόμενες ίνες, μπορεί να θεωρηθεί εγκάρσια ισοτροπικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στις διευθύνσεις 2 και 3, τα μέτρα ελαστικότητας μετρούνται με τον ίδιο τρόπο, οπότε θα είναι και ίσα μεταξύ τους. Ομοίως, θα είναι ίσοι και οι αντίστοιχοι λόγου Poisson. Επιπλέον, καθώς η διάτμηση στο επίπεδο 12 θα έχει ως αποτέλεσμα τις ίδιες τροπές με τη διάτμηση στο επίπεδο 13, θα είναι ίσα και τα αντίστοιχα μέτρα διάτμησης [2]. Με τη βοήθεια της Εικόνα 2.7, εξηγείται καλύτερα η ορθοτροπική συμπεριφορά ενός σύνθετου υλικού, καθώς και η παραδοχή αυτή της εγκάρσιας ισοτροπικότητας. Με τα γράμματα σ και τ συμβολίζονται οι αξονικές και οι διατμητικές τάσεις αντίστοιχα. Τα E , G συμβολίζουν το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης αντίστοιχα. Τέλος, το γράμμα ν συμβολίζει το λόγο Poisson, ενώ οι δείκτες 1, 2 και 3, τις κύριες διευθύνσεις. Η επεξήγηση γίνεται βάση ενός στοιχείου αντιπροσωπευτικού όγκου (Representative Volume Element / RVE). Το στοιχείο αυτό, θεωρείται ότι έχει ένα επαρκή αριθμό ινών στον όγκο του, οπότε μπορούν να ληφθούν από αυτό αντιπροσωπευτικές μετρήσεις.



Εικόνα 2.7 Συμμετρία μιας στρώσης με ομοκατευθυνόμενες ίνες {7}.

Η συμμετρία αυτή, ισχύει ακόμη και αν οι ίνες είναι τυχαία κατανεμημένες εντός του αντιπροσωπευτικού στοιχείου, εφόσον φυσικά είναι κατανεμημένες στην ίδια διεύθυνση.

Αναλόγως λοιπόν με την διεύθυνση όπου λαμβάνονται οι μετρήσεις, ένα σύνθετο υλικό παρουσιάζει διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας σε καθεμία από αυτές. Η ιδιότητα αυτή των σύνθετων υλικών είναι που καθιστά εφικτή την κατασκευή τους με συγκεκριμένες ιδιότητες, και καθώς τα σύνθετα υλικά δεν υφίστανται ελεύθερα στη φύση πριν τη δημιουργία ενός αντικειμένου από αυτά, η

κατασκευή γίνεται με στόχο την επίτευξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων. Αυτό σημαίνει πως ενώ ένα συμβατικό ισοτροπικό υλικό, θα έχει πλεονάζουσα αντοχή σε οποιαδήποτε διεύθυνση πλην της διεύθυνσης όπου υφίσταται τη μέγιστη καταπόνηση, ένα σύνθετο υλικό έχει ακριβώς την απαιτούμενη αντοχή σε κάθε διεύθυνση.

2.5 Θεμελιώδεις εξισώσεις - Classical lamination theory

Καθώς τα σύνθετα υλικά είναι γενικά ανισοτροπικά, οι τάσεις και οι τροπές που διέπουν την παραμόρφωση τους είναι οι εξής:

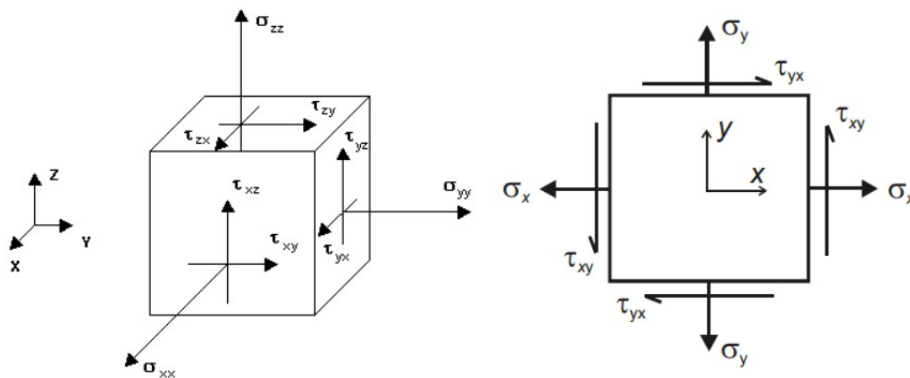
$$[\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]$$

ως το διάνυσμα των τάσεων και

$$[\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]$$

ως το διάνυσμα των τροπών αντίστοιχα.

Με το γράμμα σ συμβολίζονται οι αξονικές (normal) τάσεις ενώ με το γράμμα τ , οι διατμητικές (shear). Οι δείκτες x, y, z καθώς και οι συνδυασμοί τους (xx, xy, yz κ.ο.κ), ορίζουν τους άξονες και τα επίπεδα εφαρμογής των τάσεων αντίστοιχα. Στην Εικόνα 2.8 παρουσιάζονται οι γενικές εντατικές καταστάσεις για ένα τρισδιάστατο και ένα δισδιάστατο σώμα αντίστοιχα.



Εικόνα 2.8 Αξονικές και διατμητικές τάσεις τρισδιάστατου και δισδιάστατου σώματος {8},{9}.

Οι τάσεις και οι τροπές συνδέονται μεταξύ τους βάσει των γενικευμένων εξισώσεων τάσης-τροπής, δηλαδή βάσει του νόμου του Hooke. Έτσι, για μία στρώση ενός σύνθετου υλικού, οι εξισώσεις αυτές σε μητρική μορφή είναι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} & E_{15} & E_{16} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} & E_{25} & E_{26} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} & E_{35} & E_{36} \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} & E_{45} & E_{46} \\ E_{51} & E_{52} & E_{53} & E_{54} & E_{55} & E_{56} \\ E_{61} & E_{62} & E_{63} & E_{64} & E_{65} & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad 2.5$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Μετά από απλοποιήσεις λόγω συμμετρίας και ορθοτροπικότητας, το μητρώο τάσεων-τροπών λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & 0 & 0 & 0 \\ E_{12} & E_{22} & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ E_{13} & E_{23} & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad 2.6$$

Επιπλέον, με τη χρήση του τανυστή συμβατότητας [S], μπορούν να οριστούν οι τροπές συναρτήσεων των τάσεων ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad 2.7$$

όπου $[S]=[E]^{-1}$

Για το σύνθετο υλικό στο σύνολο του, δηλαδή ως άθροισμα όλων του των στρώσεων, μπορεί να βρεθεί ένας άξονας, ως προς τον οποίο αυτό είναι ορθοτροπικό. Έτσι η συμπεριφορά του μπορεί να περιγραφεί βάσει των εξισώσεων τάσης-τροπής ως:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad 2.8$$

Οι παραδοχές που γίνονται είναι ότι στο συνολικό σύνθετο υλικό και, συνήθως στις στρώσεις, ο συνδυασμός ινών και μήτρας μπορεί να θεωρηθεί ομογενές υλικό με αλλοιωμένες ιδιότητες, οι επίπεδες τομές παραμένουν επίπεδες και μετά την παραμόρφωση του υλικού και οι ένωση τόσο μεταξύ των στρώσεων όσο και της ίδιας της ίνας και της μήτρας είναι τέλεια [4].

2.6 Κριτήριο αστοχίας (Failure Criterion)

Υπάρχει μία πληθώρα κριτηρίων αστοχίας, όπως βάση της ενέργειας, των τροπών ή των τάσεων. Ενδεικτικά, ορισμένα από αυτά είναι τα κριτήρια αστοχίας Tsai – Hill, Tsai – Wu , Puck, Hoffman, Hashin, Max Stress, Max Strain. Το καθένα από τα κριτήρια αυτά, αν και έχει γενική χρήση, ανταποκρίνεται καλύτερα σε ορισμένα είδη προβλημάτων. Η εκλογή του κατάλληλου κριτηρίου για την ανάλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος, εξαρτάται από την κρίση του εκάστοτε μελετητή, καθώς και από τα παρεχόμενα δεδομένα.

Ένα αντικείμενο από κάποιο σύνθετο υλικό μπορεί να αστοχήσει εάν ασκηθεί επάνω του επαρκώς μεγάλο φορτίο. Η αστοχία αυτή μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους, οι πιο συνήθεις από τους οποίους είναι ο σχηματισμός ρωγμών στη μήτρα, στο εγκάρσιο επίπεδο μεταξύ των ινών, η αποκόλληση των στρώσεων και, αν το φορτίο είναι επαρκώς μεγάλο, ακόμα και θραύση των ινών. Στην παρούσα μελέτη, θεωρείται ότι το σύνθετο υλικό αστοχεί, όταν αστοχήσει οποιαδήποτε από τις στρώσεις που το αποτελούν (First Ply Failure). Κάθε στρώση θεωρείται ομογενής και αστοχεί κάτω από συγκεκριμένες φορτίσεις.

Για μία ομοαξονική στρώση υπάρχουν οι ακόλουθες πέντε κρίσιμες φορτίσεις:

- Εφελκυσμός κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών ως X^t .
- Συμπίεση κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών ως X^c .
- Εφελκυσμός εγκάρσια στη διεύθυνση των ινών ως Y^t .
- Συμπίεση εγκάρσια στη διεύθυνση των ινών ως Y^c .
- Διάτμηση μεταξύ των δύο διευθύνσεων ως S .

Όπου τα t, c , ορίζουν τον εφελκυσμό και τη συμπίεση αντίστοιχα.

Οι τιμές των οριακών αυτών φορτίσεων αποκτήθηκαν πειραματικά και στην ουσία μέσα σε αυτές περιλαμβάνονται η περίπτωση αστοχίας των ινών λόγω ρωγμών στη μήτρα και η περίπτωση αστοχίας των ινών λόγω της διεπαφής μήτρας και ινών, αποτελώντας έτσι ένα μακροσκοπικό μέγεθος που καθορίζει το πότε αστοχεί μια στρώση [4].

Για τον έλεγχο της ακεραιότητας του εμβόλου, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας μεγίστων τροπών (Max Strain Failure Criterion). Βάση του κριτηρίου αυτού, οι τροπές στις κύριες διευθύνσεις μιας στρώσης συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές τους ως εξής:

$$\varepsilon_x < X^t \text{ ή } X^c \text{ εάν το φορτίο είναι εφελκυσμός ή συμπίεση}$$

$$\varepsilon_y < Y^t \text{ ή } Y^c \text{ εάν το φορτίο είναι εφελκυσμός ή συμπίεση}$$

$$|\gamma_{xy}| < S_{xy} \text{ εάν πρόκειται για διάτμηση}$$

Για την περίπτωση των σύνθετων υλικών όπου το πάχος είναι συγκρίσιμο με τις άλλες δύο διαστάσεις, οπότε χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα στοιχεία, ισχύουν επιπλέον οι εξής σχέσεις:

$$\varepsilon_z < Z^t \text{ ή } Z^c \text{ εάν το φορτίο είναι εφελκυσμός ή συμπίεση}$$

$$|\gamma_{xz}| < S_{xz} \text{ εάν πρόκειται για διάτμηση}$$

$$|\gamma_{yz}| < S_{yz} \text{ εάν πρόκειται για διάτμηση}$$

και καθώς το σύνθετο υλικό θεωρείται ορθοτροπικό, θα ισχύει ότι:

$$Y^t = Z^t \text{ και } Y^c = Z^c$$

Αρχικά υπολογίζονται οι τροπές που δημιουργούνται στο σύνθετο υλικό και στη συνέχεια, αυτές ανάγονται στις κύριες διευθύνσεις της κάθε στρώσης βάση του Classical lamination theory. Αν οποιαδήποτε από τις τιμές των ασκούμενων τροπών σε μια στρώση ξεπερνάει την αντίστοιχη οριακή, θεωρείται ότι η στρώση αστοχεί και καθώς θεωρείται πως το υλικό αστοχεί με την πρώτη αστοχία στρώσης, θα καταρρέει και η δομή του σύνθετου υλικού.

2.7 Πρακτικές σχεδιασμού

Όσον αφορά αυτή την αλληλουχία και τον αριθμό των στρώσεων που απαιτούνται για την κατασκευή της βέλτιστης δομής, χρησιμοποιούνται ορισμένες βασικές αρχές σωστού σχεδιασμού.

- Συμμετρία: Αν είναι εφικτό, θα πρέπει οι στρώσεις να είναι συμμετρικές ως προς το μεσαίο τους επίπεδο. Αυτό αποσυμπλέκει τα αξονικά και τα καμπτικά φορτία (Membrane-Bending loads) ([4],[5]).
- Ισορροπία: Κάθε στρώση θα πρέπει να εξισορροπείται από μια στρώση ίδιας γωνίας αλλά αντίθετου πρόσημου σε κάποιο σημείο της κατασκευής. Επιτυγχάνεται έτσι η εξουδετέρωση των φορτίων κάμψης και λυγισμού [4].

- Συνάφεια: Η διαδοχική τοποθέτηση στρώσεων με ίδια γωνία πλέξης πρέπει να αποφεύγεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι γίνεται εύκολα η διάδοση ρωγμών ή αποκόλλησεων από τη μία στρώση στην άλλη [5].
- Αποπροσανατολισμός: Δύο διαδοχικές στρώσεις δεν πρέπει να έχουν γωνίες που διαφέρουν περισσότερο από 45° [5].
- Κανόνας του 10%: Τουλάχιστον το 10% των συνολικών στρώσεων θα πρέπει να τοποθετείται σε μία από τις κύριες διευθύνσεις (0° , $\pm 45^\circ$, 90°), ώστε να εξουδετερώνονται τα δευτερεύοντα φορτία. Τα φορτία αυτά, έχουν μικρό μέγεθος, αλλά στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αρκετές στρώσεις σε κάποια από τις κύριες διευθύνσεις, μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία [4].
- Για τη βελτίωση της αντοχής σε κάμψη και λυγισμό, δεν πρέπει να τοποθετούνται στρώσεις των 0° στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό της δομής. Αντίστοιχα, τοποθέτηση στρώσεων των $\pm 45^\circ$ στο εξωτερικό οδηγεί σε μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση και ανοχή καταπονήσεων γενικότερα [5].
- Η πλειονότητα των στρώσεων θα πρέπει να είναι στις $\pm 45^\circ$ καθώς έτσι βελτιώνεται η αντοχή σε διάτμηση και η στιβαρότητα της δομής [4].

Επιπλέον, όσον αφορά την μεταβολή του πάχους, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές (ply drop techniques) που βοηθούν αφενός στην αποφυγή της αποκόλλησης των στρώσεων (delamination) και αφετέρου, στο σχεδιασμό δομών που μπορούν να κατασκευαστούν στην πράξη.

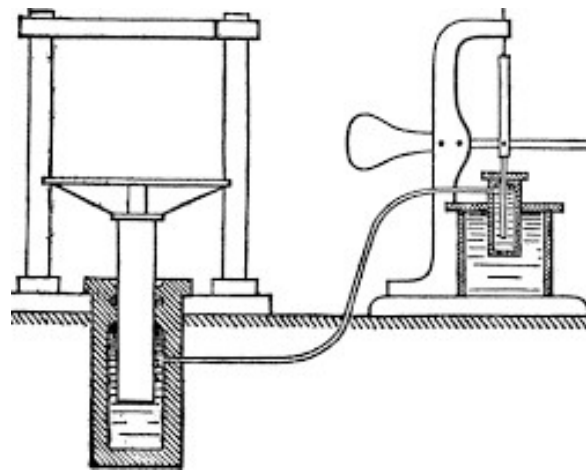
- Πρέπει να αποφεύγονται οι τοποθετήσεις στρώσεων για μεταβολή του πάχους στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της δομής, καθώς οι στρώσεις στην εσωτερική και στην εξωτερική επιφάνεια πρέπει να είναι συνεχείς και να μη διακόπτονται. Αποφεύγεται έτσι ο κίνδυνος αποκόλλησης των στρώσεων [4].
- Για περισσότερες από μία τοποθετήσεις στρώσεων για μεταβολή του πάχους, αυτές θα πρέπει να γίνονται συμμετρικά ως προς το μεσαίο επίπεδο της δομής [4].
- Ένα μεμονωμένο βήμα μεταβολής του πάχους, δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0,5 mm, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι τάσεις μεταξύ των στρώσεων [4].
- Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πτώσεων στρώσεων πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 – 15 φορές της μεταβολής του πάχους που μεταβλήθηκε για την αποφυγή επιδείνωσης των τάσεων στις περιοχές αυτές [4].

Οι αρχές αυτές δεν θα πρέπει να ακολουθούνται αυστηρά, αλλά να λειτουργούν ως μια μορφή καθοδήγησης προς τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του αντικειμένου.

3 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΜΒΟΛΑ

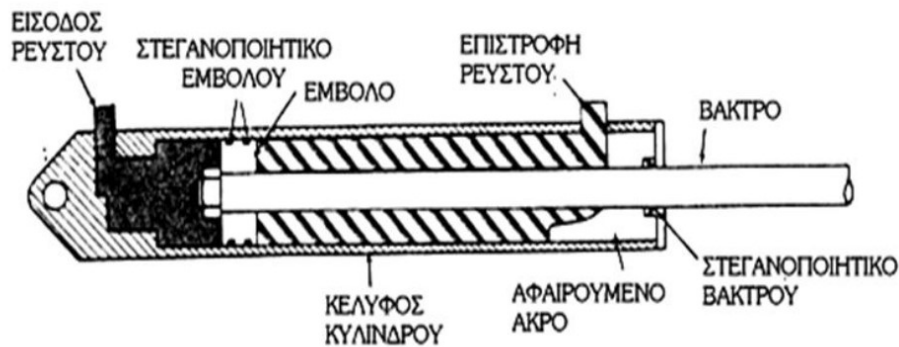
3.1 Εισαγωγή – Ορισμός

Η χρήση ενός ρευστού για την παραγωγή έργου δεν είναι καινούρια πρακτική. Αντιθέτως, χρησιμοποιείται από τα αρχαία χρόνια, αρχικά με τη χρήση του νερού στην περιστροφή τροχών ή την κίνηση μοχλών. Ενώ οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία των υδραυλικών εμβόλων είχαν μελετηθεί αρκετά χρόνια πριν από επιστήμονες όπως τον Blaise Pascal και τον Daniel Bernoulli, ο πρώτος υδραυλικός κύλινδρος, εφευρέθηκε από τον εφευρέτη και κλειδαρά Joseph Bramah, το 1795. Ο Bramah, εφηύρε τον κύλινδρο αυτό, ή αλλιώς την “υδροστατική μηχανή” του, με σκοπό την εφαρμογή της σε μία άλλη πατέντα του, μια απαραβίαστη κλειδαριά. Χρησιμοποίησε δύο κυλίνδρους, ο ένας μικρότερος από τον άλλο, γεμάτους με ρευστό και συνδεδεμένους μεταξύ τους. Στην Εικόνα 3.1 περιγράφεται η υδραυλική αυτή μηχανή.



Εικόνα 3.1 Υδραυλική μηχανή του Bramah {10}.

Φυσικά, με την πάροδο των χρόνων, οι υδραυλικοί κύλινδροι εξελίχθηκαν, με τη χρήση νέων υλικών, όπως είναι και τα σύνθετα, καθώς και με τη χρήση νέων ρευστών, μεθόδων στήριξης κ.α., μέχρι την δημιουργία αυτού που σήμερα χαρακτηρίζουμε ως υδραυλικό έμβολο. Ως υδραυλικό έμβολο χαρακτηρίζεται ένας σωλήνας, κλειστός και από τις δύο πλευρές του, με μια ράβδο να προεξέχει από μία από τις δύο πλευρές. Στο εσωτερικό του σωλήνα, ένα πιστόνι συνδέεται στη ράβδο, και διαχωρίζει την εσωτερική περιοχή γύρω από τη ράβδο από την εσωτερική περιοχή μεταξύ ράβδου και πώματος. Η χρήση του είναι η δημιουργία μηχανικού έργου σε γραμμική κίνηση, μέσω ενός συμπιεσμένου ρευστού. Η ράβδος συνδέεται εξωτερικά με το τμήμα μιας μηχανής όπου απαιτείται κίνηση. Στην Εικόνα 3.2 γίνεται επιγραμματικά περιγραφή των εξαρτημάτων ενός τυπικού υδραυλικού εμβόλου.



Εικόνα 3.2 Περιγραφή ενός τυπικού υδραυλικού εμβόλου {11}.

3.2 Εφαρμογές

Τα υδραυλικά έμβολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιαδήποτε εφαρμογή που απαιτείται γραμμική κίνηση. Χρησιμοποιούνται ευρέως στο βιομηχανικό κλάδο, με εφαρμογές όπως πρέσες, συμπιεστές, χύτευση με έγχυση κ.α. Αποτελούν επίσης αναπόσπαστο κομμάτι πολλών μηχανοκίνητων οχημάτων όπως φορτηγά οχήματα, ανυψωτικά, κλαρκ, εκσκαφείς, γκρέιντερ κ.α., για την κίνηση των καρότσων, μπράτσων. Επιπλέον, τα υδραυλικά έμβολα είναι αυτά που διευκολύνουν την οδήγηση με την εφαρμογή των υδραυλικών τιμονιών και φρένων. Ακόμη και στον τομέα της ναυτιλίας, παρατηρούνται έμβολα σε πολλά τμήματα των καραβιών, όπως για την κίνηση καταπακτών, για την ανύψωση τμημάτων, για την υποβοήθηση της οδήγησης τους κ.α. Τέλος, πρακτικά όλα τα αεροσκάφη και οι διαστημικές άκατοι χρησιμοποιούν κάποιου είδους υδραυλικό σύστημα όπως φρένα, υποβοήθηση χειρισμού, λειτουργία μηχανισμού προσγείωσης, λειτουργία φτερών, προωθητών, σπόιλερ, λειτουργία θυρών και καταπακτών. Ορισμένες τέτοιες εφαρμογές των εμβόλων, φαίνονται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3 Εφαρμογές υδραυλικών εμβόλων α) σε υδραυλική πρέσα {12}, β) σε σύστημα προσγείωσης αεροπλάνου {13} και γ) σε σύστημα ανύψωσης καρότσας φορτηγού οχήματος {14}.

Παλιότερα, τα έμβολα αυτά κατασκευάζονταν από χάλυβες με υψηλή αντοχή ή από μέταλλα χαμηλότερης πυκνότητας, όπου το βάρος ήταν κρίσιμο. Οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση σύνθετων

υλικών έναντι των συμβατικών για την κατασκευή υδραυλικών εμβόλων, αφορούν τα πλεονεκτήματα και τις ιδιότητες που εμφανίζουν τα σύνθετα υλικά. Αρχικά, έχουν αρκετά μεγαλύτερο λόγο αντοχής-βάρους σε σχέση με τα συμβατικά υλικά, πράγμα που οδηγεί σε πολύ ελαφρύτερες κατασκευές. Η ελάττωση αυτή του βάρους, έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση σε καύσιμο/ηλεκτρισμό. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην κόπωση, σε σχέση με τα ελαφρά κράματα μετάλλων όπως του τιτανίου, του αλουμινίου ή του μαγνησίου. Παρουσιάζουν επίσης υψηλή αντοχή στη διάβρωση, που συνεπάγεται μικρότερα κόστη συντήρησης. Στην Εικόνα 3.4 και στην Εικόνα 3.5, δίνονται μερικά τυπικά έμβολα και ένα έμβολο βαρέων εργασιών αντίστοιχα, από σύνθετο υλικό πολυμερούς ενισχυμένου από συνεχείς ίνες, της σειράς Lightraulics της εταιρίας Parker.



Εικόνα 3.4 Υδραυλικά έμβολα από σύνθετο υλικό της σειράς Lightraulics της Parker {15}.

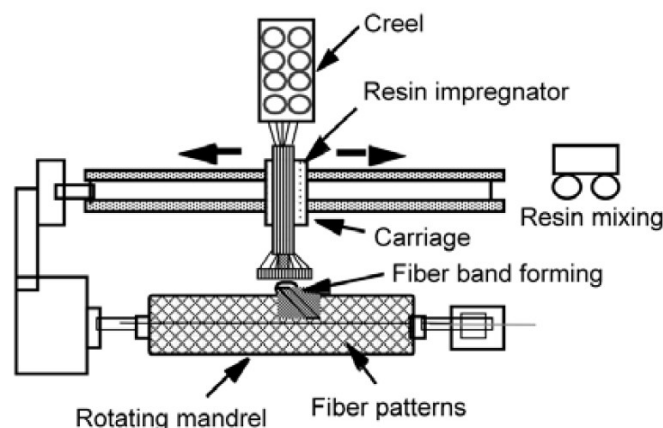


Εικόνα 3.5 Υδραυλικό έμβολο από σύνθετο υλικό, συγκράτησης με ράβδους της σειράς Lightraulics της Parker {15}.

3.3 Μέθοδος κατασκευής με περιέλιξη νήματος (Filament Winding)

Τα έμβολα αυτά, κατασκευάζονται με τη μέθοδο περιέλιξης νήματος (Filament Winding). Η μέθοδος της περιέλιξης νήματος χρησιμοποιούσε απλές τεχνικές χαμηλής τεχνολογίας για χρόνια, και σε κάθε ένα από τα στάδια της κατασκευής ενός αντικειμένου, απαιτούταν χειρονακτική εργασία. Η εξέλιξη της μεθόδου με τη χρήση μηχανών που οι αντίστοιχες διαδικασίες πραγματοποιούνται αυτόματα, ήταν επαναστατική. Φυσικά, οι μηχανές αυτές δεν ήταν ιδιαίτερα φιλικές προς τον χρήστη, καθώς για κάθε διαφορετικό αντικείμενο, απαιτούταν αλλαγές στις αλυσίδες και στα δόντια των τροχών που κινούν τα διάφορα μέρη της μηχανής, το οποίο συνεπάγεται και χρονοβόρους υπολογισμούς, ενώ η αλλαγή της διαμέτρου για ένα αντικείμενο ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα. Η μέθοδος εξελίχθηκε περαιτέρω σταδιακά, αρχικά με τη χρήση μηχανικών μέσων (όπως πλάκες με διαφορετικά χρώματα, ώστε ακολουθώντας κάποιο μοτίβο, να αλλάζει η γωνία της περιέλιξης αυτόματα), ενώ αυτοματοποιήθηκε πλήρως με την εξέλιξη και χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, και των λογισμικών ψηφιακού σχηματισμού μοτίβων περιέλιξης [5].

Η μέθοδος αυτή είναι πλέον μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, κατά την οποία ίνες διέρχονται μέσα από ένα λουτρό υγρής ρητίνης και τυλίγονται σε έναν περιστρεφόμενο άξονα ή μήτρα. Η μέθοδος αυτή είναι η προαναφερθείσα “υγρή” διαδικασία. Οι ίνες τυλίγονται υπό διαφορετικές γωνίες, προκειμένου να προσδώσουν αντοχή και στιβαρότητα σε πολλές διευθύνσεις, και σχηματίζονται έτσι οι στρώσεις του αντικειμένου. Μετά το πέρας του σχηματισμού του αντικειμένου και την απόκτηση του κατάλληλου πάχους, αυτό αφήνεται να σκληρύνει, και στη συνέχεια μπορεί να αφαιρεθεί η μήτρα ή να παραμείνει στο εσωτερικό του αντικειμένου, λειτουργώντας ως ένα εσωτερικό τμήμα μόνωσης και ενίσχυσης. Με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γίνεται πλέον αυτοματοποιημένα η μεταβολή της γωνίας τύλιξης, έτσι ώστε να μεταβάλλεται εύκολα η γωνία μεταξύ των στρώσεων, και να επιτευχθούν οι απαραίτητες ιδιότητες του αντικειμένου. Στην Εικόνα 3.6 παρατίθεται σχηματικά μια διάταξη μηχανής περιέλιξης νήματος.



Εικόνα 3.6 Βασικό σύστημα περιέλιξης νήματος [16].

4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή – Ορισμός

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) είναι μια αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την προσεγγιστική επίλυση σύνθετων προβλημάτων της μηχανικής. Η βασική ιδέα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η αντικατάσταση ενός πολύπλοκου προβλήματος με άλλα απλούστερα και αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου επίλυσης διαφορικών εξισώσεων με τη χρήση μητρικών μεθόδων.

Χρήση της μεθόδου αυτής παρατηρείται αρκετούς αιώνες παλιότερα, όπου οι πρώτοι γεωμέτρεις χρησιμοποίησαν “πεπερασμένα στοιχεία” για την εκτίμηση της περιφέρειας ενός κύκλου, προσεγγίζοντας τη με τη χρήση πολυγώνων. Ως “πεπερασμένα στοιχεία” θεωρήθηκαν οι πλευρές των πολυγώνων. Θεωρώντας ένα πολύγωνο εγγεγραμμένο και ένα περιγεγραμμένο αποκτάται ένα κάτω και ένα άνω όριο της περιμέτρου αντίστοιχα [7].

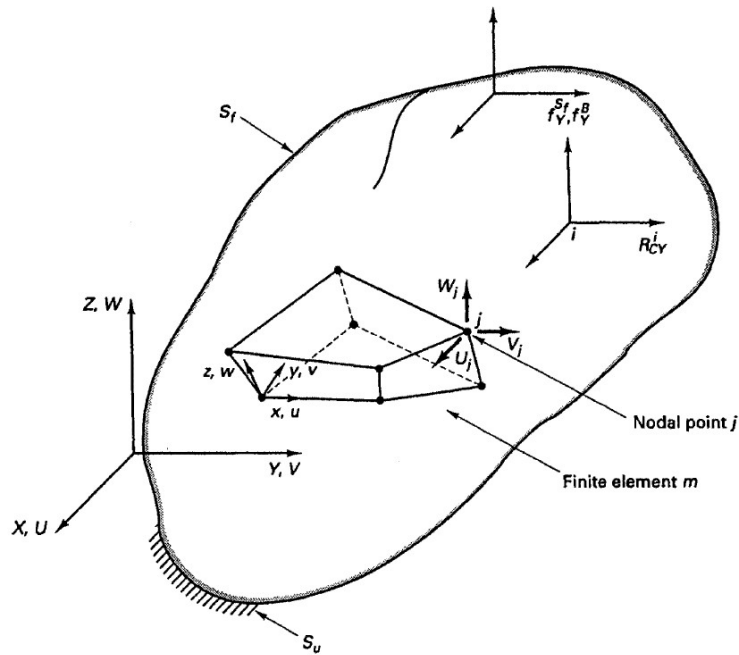
Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε περί το τέλος του Β΄ παγκοσμίου πολέμου, ουσιαστική όμως βελτίωση και ανάπτυξη της σημειώθηκε μετά την εξέλιξη του ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος διευκόλυνε την επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων που διέπουν ένα πρόβλημα μηχανικής. Έτσι η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε ραγδαία, παράλληλα με την ανάπτυξη των υπολογιστών. Όπως συμβαίνει συχνά με τις πρωτότυπες εξελίξεις, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί μια ακριβής “ημερομηνία εφεύρεσης”. Οι βασικές ιδέες της μεθόδου, όπως αυτή είναι σήμερα, παρουσιάστηκαν στις δημοσιεύσεις των M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, και L. J. Topp και των I. Αργύρη και S. Kelsey, ενώ η ονομασία πεπερασμένο στοιχείο επινοήθηκε από τον R. W. Clough ([7],[8]).

4.2 Περιγραφή της μεθόδου

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση φυσικών προβλημάτων της μηχανικής. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητη η ερμηνεία του φυσικού προβλήματος με ένα μαθηματικό μοντέλο και απαιτούνται κάποιες παραδοχές, οι οποίες οδηγούν στις διαφορικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα. Καθώς η επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελεί μια αριθμητική διαδικασία, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η ακρίβεια της και να βελτιωθούν οι παράμετροι επίλυσης της όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Είναι σημαντικό να τονισθεί πως η μέθοδος επιλύει το μαθηματικό μοντέλο που υιοθετείται, οπότε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και η απεικόνιση του φυσικού προβλήματος εξαρτώνται από την πληρότητα του μοντέλου αυτού και την αντανάκλαση του στην πραγματικότητα.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το μοντέλο ενός συνεχούς μέσου που μελετάται, χωρίζεται ως ένα άθροισμα μικρότερων, διακριτών στοιχείων (elements) που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά θεωρείται πως συνδέονται μεταξύ τους σε συγκεκριμένα

σημεία που ονομάζονται κόμβοι (nodes), οι οποίοι βρίσκονται στο σύνορο των στοιχείων, όπου γίνεται η ένωση με τα γειτονικά στοιχεία. Ο υπολογισμός της μετατόπισης (και των παραγώγων της) του κάθε πεπερασμένου στοιχείου, γίνεται μέσω της έκφρασης της ως συνάρτηση των αντίστοιχων μεταβλητών στους κόμβους του κάθε στοιχείου. Με τον υπολογισμό των μεταβλητών αυτών στους κόμβους, γίνεται και η εκτίμηση της μετατόπισης του κάθε στοιχείου και, συνεπώς, του συνεχούς μέσου ως συνόλου αυτών. Στην Εικόνα 4.1 δίδεται η γενική περίπτωση ενός τρισδιάστατου στερεού σώματος, με ένα τρισδιάστατο πεπερασμένο στοιχείο.



Εικόνα 4.1 Γενική περίπτωση τρισδιάστατου σώματος με ένα τρισδιάστατο στοιχείο οκτώ κόμβων {17}.

Για κάθε έναν από τους οκτώ κόμβους του πεπερασμένου στοιχείου, ορίζονται τα διανύσματα μετατόπισης U , ταχύτητας \dot{U} και επιτάχυνσης \ddot{U} . Από τις ιδιότητες του στερεού, ορίζεται επίσης η μάζα M , ο δείκτης στιβαρότητας K και η απόσβεση C που αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο. Τέλος, η εξωτερική διέγερση σε κάθε κόμβο ορίζεται ως P .

Καθώς το στοιχείο αυτό έχει οκτώ κόμβους, μπορούν να σχηματιστούν τα μητρώα Μάζας $[M]$, στιβαρότητας $[K]$ και απόσβεσης $[C]$ για το σύνολο του. Τα μητρώα αυτά, θα είναι συμμετρικοί πίνακες 8×8 , όσοι είναι δηλαδή και οι κόμβοι του στοιχείου. Ορίζονται αντίστοιχα τα μητρώα μετατόπισης \underline{U} , ταχύτητας $\underline{\dot{U}}$ και επιτάχυνσης $\underline{\ddot{U}}$. Τα μητρώα αυτά θα είναι ουσιαστικά διανύσματα, δηλαδή πίνακες 8 γραμμών και 1 στήλης. Τέλος, ορίζεται το μητρώο των εξωτερικών διεγέρσεων ως \underline{P} , το οποίο αποτελεί επίσης διάνυσμα μήκους όσου είναι και ο αριθμός των κόμβων. Η γενική εξίσωση κίνησης που προκύπτει θα έχει τη μορφή:

$$[M] \cdot \ddot{U} + [C] \cdot \dot{U} + [K] \cdot U = P \quad 4.1$$

Φυσικά, στην περίπτωση που η εξωτερική διέγερση είναι μηδενική, θα ισχύει η εξίσωση:

$$[M] \cdot \ddot{U} + [C] \cdot \dot{U} + [K] \cdot U = 0 \quad 4.2$$

Η επίλυση ενός γενικού προβλήματος συνεχούς μέσου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί πάντα μια σταδιακή διαδικασία [7]. Όσον αφορά τα στατικά δομικά προβλήματα, η διαδικασία αυτή είναι η ακόλουθη:

1. Διακριτοποίηση της δομής.

Το πρώτο βήμα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η υποδιαίρεση της δομής ή της περιοχής επίλυσης σε στοιχεία. Συνεπώς, η δομή διακριτοποιείται με κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία, ο αριθμός, ο τύπος και το μέγεθος των οποίων πρέπει να αποφασιστεί.

2. Επιλογή κατάλληλου μοντέλου παρεμβολής ή μετατόπισης.

Καθώς η επίλυση της μετατόπισης μια πολύπλοκης δομής σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς, υποθέτουμε μια κατάλληλη λύση εντός ενός στοιχείου για την εκτίμηση της άγνωστης λύσης. Η λύση που υποτέθηκε πρέπει να είναι απλή από υπολογιστικής άποψης, αλλά να μπορεί να ικανοποιήσει συγκεκριμένες απαιτήσεις σύγκλισης. Γενικά, η λύση ή το μοντέλο παρεμβολής έχει τη μορφή πολυωνύμου.

3. Παραγωγή μητρώων στιβαρότητας και διανυσμάτων του φορτίου.

Το μητρώο στιβαρότητας $[K^{(e)}]$ και το διάνυσμα φορτίου $[P^{(e)}]$ ενός στοιχείου e , υπολογίζονται από το θεωρητικό μοντέλο μετατοπίσεων, μέσω των εξισώσεων ισορροπίας ή της κατάλληλης αρχής μεταβλητότητας.

4. Συνδυασμός των εξισώσεων των στοιχείων για την εξαγωγή των συνολικών εξισώσεων ισορροπίας.

Καθώς η δομή αποτελείται από πολλά πεπερασμένα στοιχεία, τα μεμονωμένα μητρώα στιβαρότητας και διανύσματα φορτίου πρέπει να συνδυαστούν με κατάλληλο τρόπο και οι ολικές εξισώσεις ισορροπίας πρέπει να διατυπωθούν ως εξής:

$$[K] \cdot \bar{U} = \bar{P} \quad 4.3$$

όπου $[K]$ είναι το ολικό μητρώο στιβαρότητας, \bar{U} είναι το διάνυσμα των κομβικών μετατοπίσεων, και \bar{P} είναι το διάνυσμα των κομβικών δυνάμεων για τη συνολική κατασκευή. Η εξίσωση αυτή αποτελεί

μια απλοποιημένη μορφή της γενικής εξίσωσης κίνησης 4.1. Οι όροι της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, δεν συμπεριλαμβάνονται, καθώς στην περίπτωση της φόρτισης από εσωτερική πίεση, αυτή μπορεί να θεωρηθεί στατική, οπότε η ταχύτητα και η επιτάχυνση θα είναι ουσιαστικά μηδενικές.

5. Επίλυση ως προς τις άγνωστες μετατοπίσεις των κόμβων.

Οι ολικές εξισώσεις ισορροπίας πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να ληφθούν υπόψη οι οριακές συνθήκες, μετά την εφαρμογή των οποίων, οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$[K] \cdot \vec{U} = \vec{P} \quad 4.4$$

Σε γραμμικά προβλήματα, το διάνυσμα \vec{U} μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, ενώ, σε μη γραμμικά, η λύση εκτιμάται με μια σειρά βημάτων, όπου το καθένα περιλαμβάνει την τροποποίηση του μητρώου στιβαρότητας $[K]$ και /ή του διανύσματος \vec{P} .

6. Υπολογισμός των τροπών και τάσεων των στοιχείων.

Από τις γνωστές κομβικές μετατοπίσεις \vec{U} , γίνεται ο υπολογισμός των τροπών και των τάσεων, με τη χρήση των απαραίτητων εξισώσεων της μηχανικής στερεού ή των κατασκευών. Επιτυγχάνεται έτσι η επίλυση των εξισώσεων 2.7, 2.8 οι οποίες μας απασχολούν στην παρούσα εργασία.

4.3 Διακριτοποίηση της γεωμετρίας

Το πρώτο βήμα προς την επίλυση ενός προβλήματος μηχανικής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η διαίρεση του ακανόνιστου συνεχούς μέσου σε μικρότερα τμήματα, τα πεπερασμένα στοιχεία, ώστε οι διάφορες κινήσεις του στο χώρο, δηλαδή οι βαθμοί ελευθερίας του, να εκφραστούν ως προς τις κινήσεις των στοιχείων που το αποτελούν. Επιτυγχάνεται έτσι η μετατροπή ενός προβλήματος n-βαθμών ελευθερίας σε n-προβλήματα του ενός βαθμού ελευθερίας.

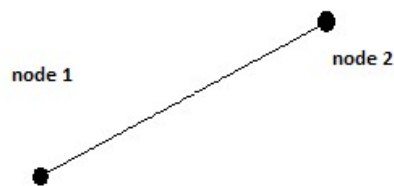
Για τη διαίρεση ενός αντικειμένου σε πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να ακολουθηθούν διάφορες μέθοδοι, πλήρως αυτοματοποιημένες, ή μερικώς, οι οποίες οδηγούν και σε διαφορετικό αριθμό και είδος πεπερασμένων στοιχείων. Προφανώς, όσο μικρότερα είναι τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν, τόσο περισσότερα απαιτούνται για την περιγραφή μιας γεωμετρίας και τόσο καλύτερα θα ανταποκρίνεται η λύση στην πραγματικότητα. Καθώς όμως αυξάνεται ο αριθμός τους, τόσο αυξάνεται ο χρόνος επίλυσης και η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται. Η επιλογή της μεθόδου και η διαδικασία της διακριτοποίησης εξαρτώνται από την εμπειρία και την κρίση του εκάστοτε μηχανικού, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ικανοποιητική προσέγγιση της λύσης σε ένα λογικό υπολογιστικό χρόνο.

Η αυτοματοποιημένη διαίρεση ενός αντικειμένου, δηλαδή, η λειτουργία αυτόματης δημιουργίας πλέγματος, βασίζεται σε ορισμένους αυτοματοποιημένους αλγορίθμους, όπως ο

Advancing front algorithm, ο αλγόριθμος Delaunay (Delaunay triangulation) κ.α. Με βάση τέτοιου είδους αλγορίθμους, έχει δημιουργηθεί μία πληθώρα από κώδικες δημιουργίας πλέγματος, όπως ο GHS3D, ο AFLR3, ο Netgen, ο Tetgen, ο Gmsh κ.α. Καθένας από αυτούς τους κώδικες ανταποκρίνεται καλύτερα σε ορισμένες κατηγορίες προβλημάτων ανάλυσης και φυσικά θα πρέπει να χρησιμοποιείται στις αντίστοιχες περιπτώσεις.

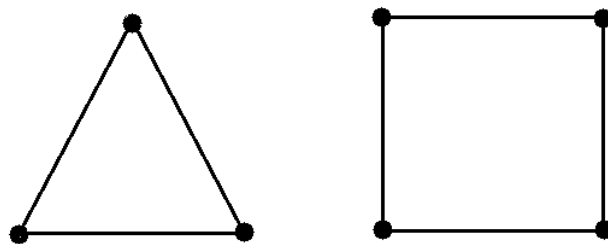
4.3.1 Βασικά είδη πεπερασμένων στοιχείων

Για την αναπαράσταση γεωμετριών όπου οι δύο διαστάσεις είναι αμελητέες σε σχέση με την τρίτη, όπως οι ράβδοι ή τα δικτυώματα, χρησιμοποιούνται τα μονοδιάστατα ή γραμμικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται με μία ακμή και με έναν κόμβο σε κάθε άκρο τους. Στην Εικόνα 4.2 δίδεται ένα μονοδιάστατο πεπερασμένο στοιχείο (ράβδος).



Εικόνα 4.2 Μονοδιάστατο πεπερασμένο στοιχείο.

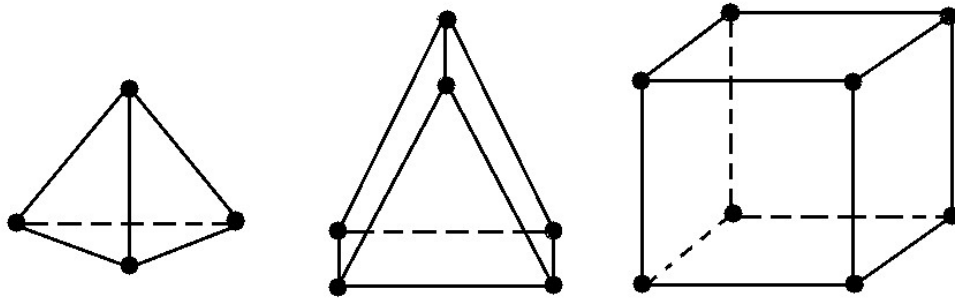
Για γεωμετρίες όπου η μία διάσταση είναι αμελητέα σε σχέση με τις άλλες δύο χρησιμοποιούνται στοιχεία δύο διαστάσεων για την αναπαράστασή τους. Το βασικότερο στοιχείο αυτού του είδους είναι το τριγωνικό (triangular), που αναπαριστάται με 3 ακμές και τρεις κόμβους στα σημεία τομής των ακμών αυτών. Χρησιμοποιείται επίσης το τετράπλευρο στοιχείο (quadrilateral) καθώς και οι ειδικές του περιπτώσεις όπως το τετράγωνο ή το παραλληλόγραμμο. Αντίστοιχα με τα τριγωνικά, τα στοιχεία αυτά περιγράφονται με τέσσερις ακμές και τέσσερις κόμβους. Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζονται τα δύο δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Ένα τετράπλευρο στοιχείο μπορεί να οριστεί και ως άθροισμα δύο ή τεσσάρων τριγωνικών στοιχείων.



Εικόνα 4.3 Δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.

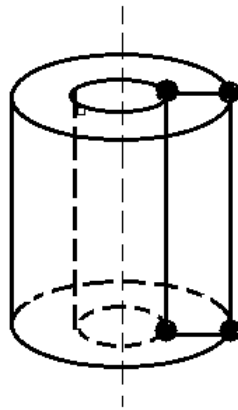
Τέλος για τις γεωμετρίες όπου και οι τρεις διαστάσεις έχουν μεγέθη συγκρίσιμα μεταξύ τους, χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα στοιχεία, όπως αυτό της

Εικόνα 4.1. Τα στοιχεία αυτά είναι το τετράεδρο (tetrahedron), το πεντάεδρο (pentahedron) και το εξάεδρο (hexahedron). Τα στοιχεία αυτά αναπαρίστανται με έξι, οκτώ και δώδεκα ακμές και τέσσερις, έξι και οκτώ κόμβους αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.4 παρατίθενται τα τρισδιάστατα αυτά στοιχεία. Ένα εξάεδρο μπορεί να οριστεί και ως άθροισμα πέντε τετραεδρικών στοιχείων.



Εικόνα 4.4 Τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.

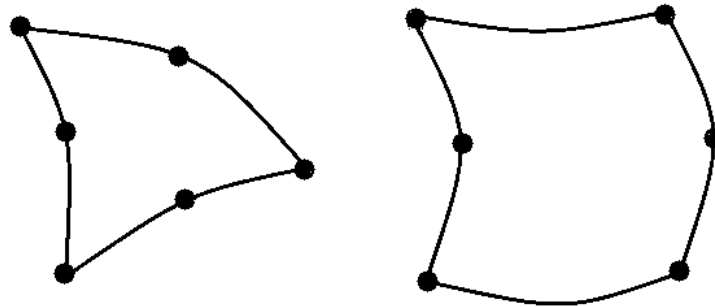
Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου ένα τρισδιάστατο σώμα μπορεί να περιγραφεί με τη χρήση μίας ή δύο χωρικών συντεταγμένων, για παράδειγμα λόγω συμμετρίας ως προς έναν άξονα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αξονοσυμμετρικά στοιχεία ή δακτυλιοειδή στοιχεία. Στην Εικόνα 4.5 δίδεται ένα τέτοιο αξονοσυμμετρικό στοιχείο.



Εικόνα 4.5 Αξονοσυμμετρικό στοιχείο.

Μια ειδική περίπτωση αποτελούν οι καμπύλες γεωμετρίες, οι οποίες μπορούν να περιγραφούν από στοιχεία με καμπυλωμένες πλευρές. Ενδεικτικά, δίδονται δύο τέτοια στοιχεία στην Εικόνα 4.6. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται και στοιχεία ανώτερης τάξης και αποτελούν ισοπαραμετρικά στοιχεία. Ο όρος ισοπαραμετρικά, αναφέρεται στη χρήση των συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων εντός του στοιχείου, για τον προσδιορισμό του γεωμετρικού του

σχήματος [9]. Για τη μοντελοποίηση των καμπύλων ορίων τους, προστίθενται κόμβοι στο εσωτερικό των πλευρών τους.



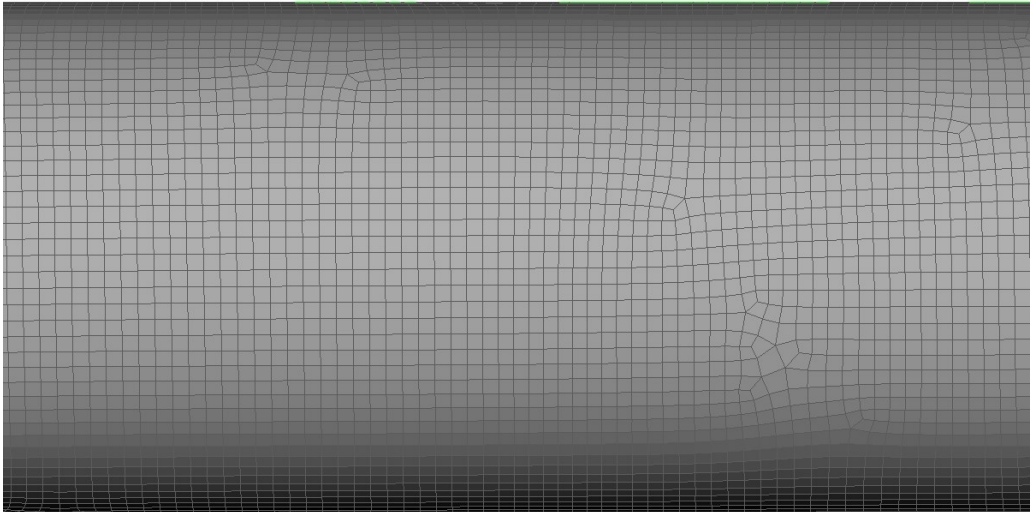
Εικόνα 4.6 Πεπερασμένα στοιχεία ανώτερης τάξης.

4.3.2 Σχηματισμός πλέγματος (Meshing)

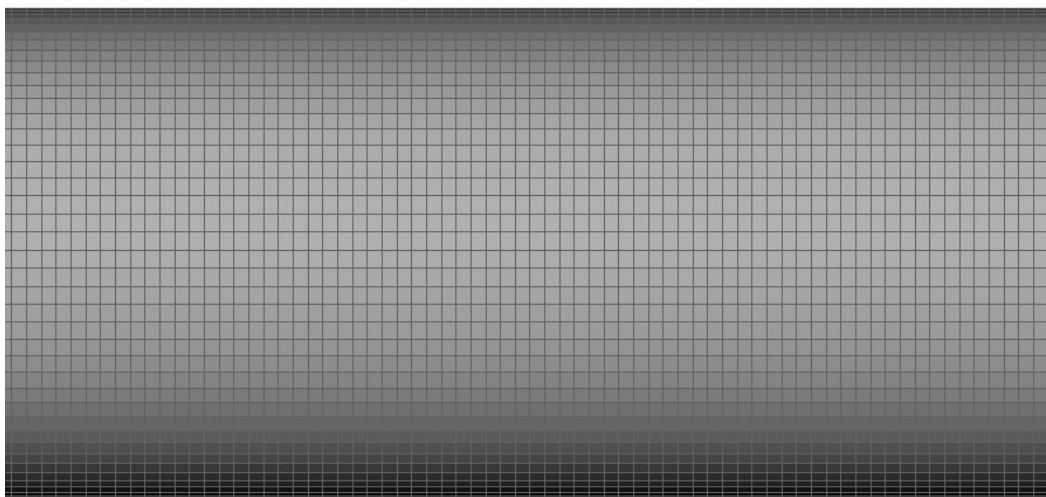
Μετά την επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση ενός αντικειμένου, επιλέγεται ο τρόπος σχηματισμού του πλέγματος. Ο σχηματισμός αυτός μπορεί να γίνει είτε αυτόματα ή χειροκίνητα.

Στην πρώτη περίπτωση, το πλέγμα σχηματίζεται από το λογισμικό με τη χρήση αυτοματοποιημένων αλγορίθμων, όπως αυτούς που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου 4.3, χωρίς παρέμβαση από το χρήστη.

Στη δεύτερη, ο χρήστης ορίζει τις παραμέτρους σχηματισμού του πλέγματος, για κάθε επιφάνεια ξεχωριστά. Στην πραγματικότητα, αυτό που συμβαίνει είναι ένας συνδυασμός των δύο μεθόδων, όπου γίνεται αρχικά σχηματισμός του πλέγματος αυτόματα από το λογισμικό, ενώ ο χρήστης επεμβαίνει μόνο σε περιοχές όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, επειδή η γεωμετρία είναι ιδιαίτερη, όπως γύρω από οπές, σε καμπυλότητες κ.α. Ειδικά στις περιπτώσεις όπου το αντικείμενο εισάγεται στο λογισμικό ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία με τη μορφή αρχείου CAD (που αποτελεί και την πλειονότητα των περιπτώσεων), η επέμβαση του χρήστη είναι σχεδόν πάντα απαραίτητη, καθώς μεταβολές στην ανάλυση και στις ανοχές μεταξύ των δύο λογισμικών ή και ο τρόπος που πραγματοποιείται η τοπολογία του σχεδίου, μπορεί να προκαλέσουν παραμόρφωση του αντικειμένου και ασυνέχειες. Τότε ο χρήστης θα πρέπει χειροκίνητα να επιδιορθώσει τη γεωμετρία, καθώς και ίσως να την απλοποιήσει. Στην Εικόνα 4.7 και την Εικόνα 4.8, παρουσιάζεται ένα αντικείμενο διαιρεμένο με αυτόματη δημιουργία πλέγματος και ένα με χειροκίνητη αντίστοιχα. Με σύγκριση των δύο εικόνων μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητό γιατί είναι απαραίτητη η επέμβαση του χρήστη στη δημιουργία πλέγματος.



Εικόνα 4.7 Αυτόματη δημιουργία πλέγματος.



Εικόνα 4.8 Χειροκίνητη δημιουργία πλέγματος

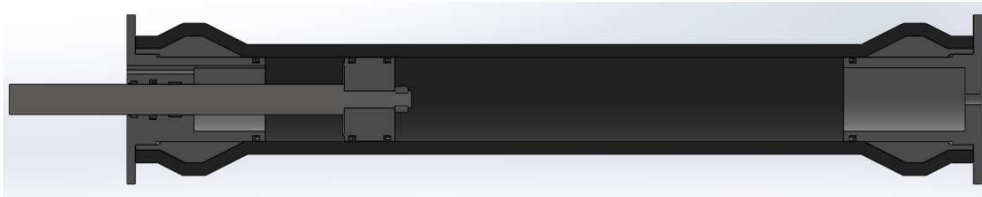
Από τον χρήστη επιλέγεται, όπως προαναφέρθηκε, το είδος και το μέγεθος των στοιχείων, καθώς και οι θέσεις των κόμβων. Αν η γεωμετρία είναι απλή και συνεχής, όπως μια επιφάνεια, ο αριθμός των στοιχείων μπορεί να είναι μικρός και το μέγεθος τους μεγάλο. Αντίθετα, όσο πιο πολύπλοκη είναι μια γεωμετρία, παραδείγματος χάρη, αν έχει καμπυλότητες, γωνίες, οπές, μεταβολές διατομών κ.α., απαιτούνται μικρότερα και περισσότερα στοιχεία και συνεπώς περισσότεροι κόμβοι. Από την εμπειρία και την κρίση του χρήστη, εξαρτάται ο βέλτιστος τρόπος σχηματισμού του πλέγματος και τελικά του αντικειμένου.

4.4 Μοντελοποίηση υδραυλικού εμβόλου από σύνθετο υλικό

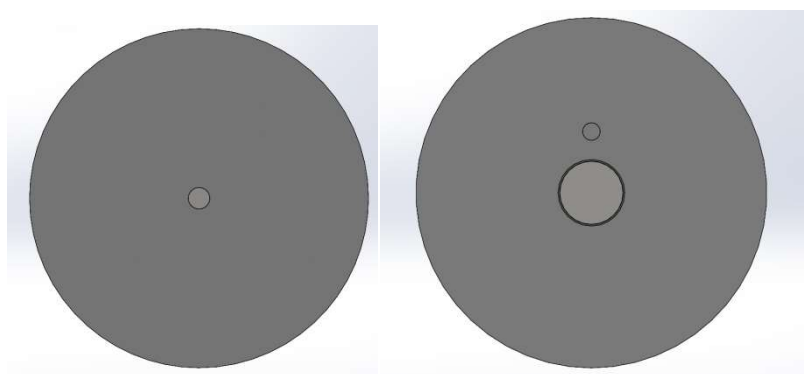
Η πρώτη γεωμετρία εμβόλου που μελετήθηκε ήταν αρκετά απλή, με αρκετά οξείες γωνίες στα σημεία της αλλαγής της διατομής του πάχους. Το υδραυλικό έμβολο σχεδιάστηκε αρχικά στο λογισμικό Inventor της Autodesk. Στις ακόλουθες εικόνες, παρουσιάζεται το πλήρες συναρμολόγημα του υδραυλικού αυτού εμβόλου.



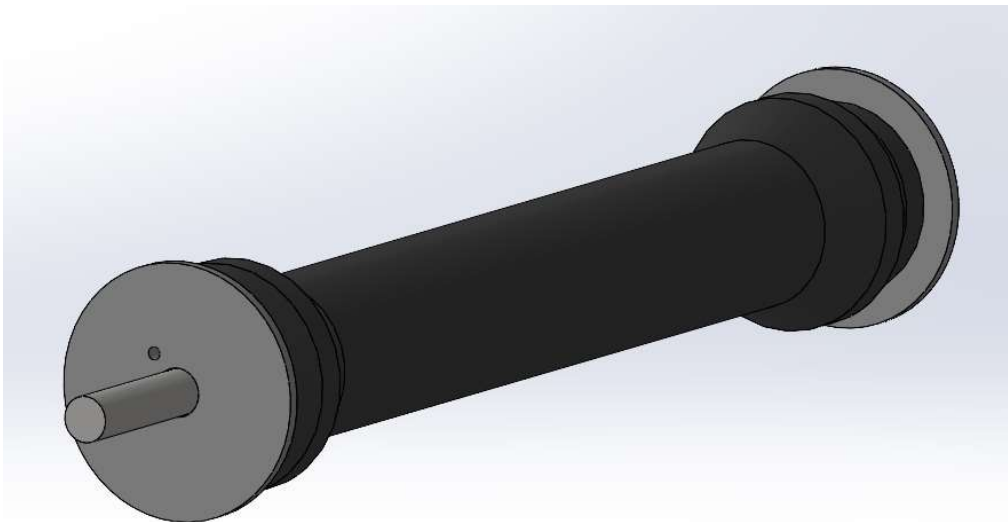
Εικόνα 4.9 Πρόοψη υδραυλικού εμβόλου από το λογισμικό CAD.



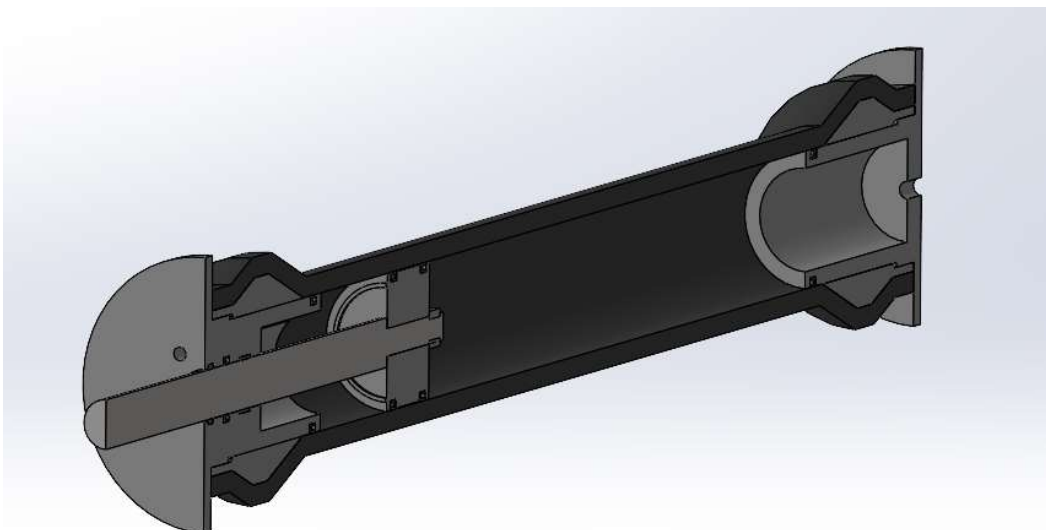
Εικόνα 4.10 Τομή πρόοψης κατά μήκος του εμβόλου.



Εικόνα 4.11 Πλάγιες όψεις του εμβόλου.



Εικόνα 4.12 Ισομετρική όψη του εμβόλου.



Εικόνα 4.13 Τομή ισομετρικής όψης.

Μετά το σχεδιασμό του, αυτό εισήχθη στο λογισμικό ANSA της BETA CAE Systems S.A. προκειμένου να γίνει η διακριτοποίηση του σε πεπερασμένα στοιχεία. Το ANSA είναι ένας προεξεργαστής (Pre-processor) και αποτελεί ένα λογισμικό CAE (Computer Aided Engineering), στο οποίο γίνεται η ανάλυση του αντικειμένου σε πεπερασμένα στοιχεία, με σκοπό την μετέπειτα εξαγωγή δεδομένων σχετικά με τις διάφορες φορτίσεις που αυτό υφίσταται.

4.4.1 Εισαγωγή αρχείου CAD – Απλοποίηση γεωμετρίας

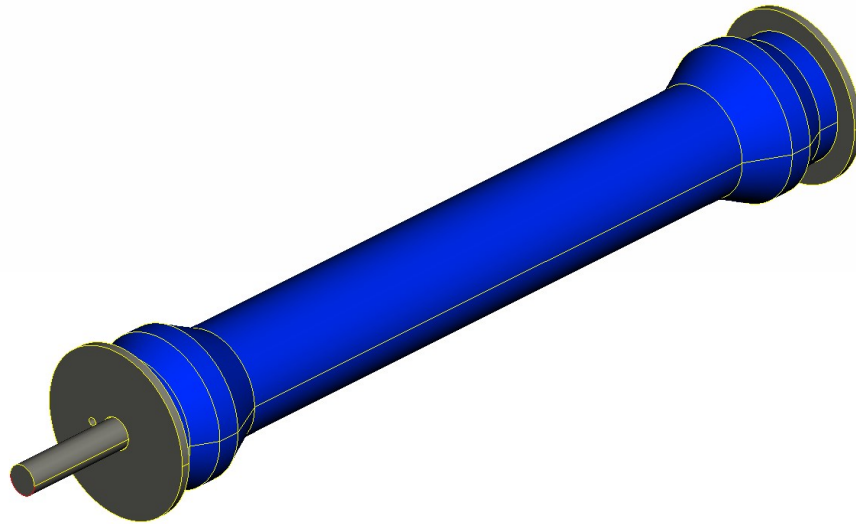
Το πρώτο μοντέλου που μελετήθηκε, αποτελείται από δισδιάστατα και τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Με τα δισδιάστατα στοιχεία (shell elements) σχηματίστηκε το πλέγμα στο σύνθετο υλικό. Η απλοποίηση αυτή γίνεται καθώς σε σχέση με τις συνολικές διαστάσεις του εμβόλου, το πάχος του σύνθετου υλικού είναι αρκετά μικρό.

Αρχικά, το μοντέλο εισάγεται στο λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων ως πλήρες συναρμολόγημα, δηλαδή ακριβώς όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.12. Ακολουθώντας, έγιναν ορισμένες απλοποιήσεις στο μοντέλο, καθώς ορισμένα εξαρτήματα του συναρμολογήματος, δεν ήταν απαραίτητα για τον ακριβή υπολογισμό των φορτίσεων και απλά θα κατανάλωναν περισσότερη υπολογιστική ισχύ, χωρίς να συνεισφέρουν ουσιαστικά στο τελικό αποτέλεσμα.

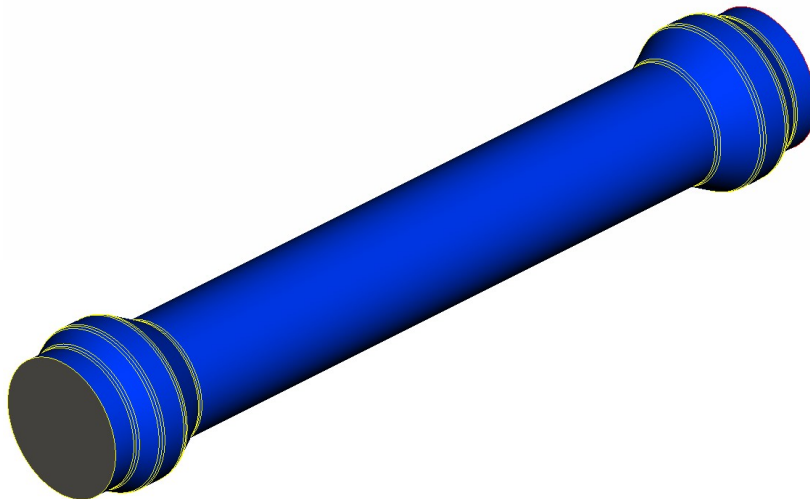
Επιπλέον, από το μοντέλο αφαιρέθηκαν όλες οι επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν το σύνθετο υλικό, πέραν της εσωτερικής επιφάνειας, η οποία θα αποτελέσει τη βάση για το σύνθετο υλικό. Η μελέτη έγινε για την περίπτωση φόρτισης από εσωτερική πίεση, όπου οι δυνάμεις ασκούνται σε βάθος ενός επαρκώς μεγάλου χρονικού διαστήματος, το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί στατικό, με την πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του κυλίνδρου και των μεταλλικών πωμάτων να αποτελούν τις πιο κρίσιμες φορτίσεις. Έτσι, το βάκτρο αφαιρέθηκε από το μοντέλο, καθώς δεν επηρεάζει την πίεση που ασκείται στα τοιχώματα και δεν ασκεί κάποια άλλη σημαντική δύναμη στο έμβολο.

Περαιτέρω, τα στεγανοποιητικά μέρη των πωμάτων (τσιμούχες, o-rings) αφαιρούνται, καθώς δεν επηρεάζουν ουσιαστικά τη φόρτιση, ενώ τα εξαρτήματα που αποτελούν τα μεταλλικά πώματα απλοποιήθηκαν, με τα πώματα να σχηματίζουν κλειστούς μεταλλικούς όγκους, διατομής όπως αυτής της εξωτερικής τους επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει επειδή τα μεταλλικά μέρη του πώματος συνδέονται μεταξύ τους με σπείρωμα, οπότε μπορούν να θεωρηθούν ένα σώμα, αφού το σπείρωμα είναι επαρκώς σφικτό, ενώ τα στεγανοποιητικά είναι μικρά, και δεν δημιουργούν σημαντικές δυνάμεις στο ανθρακόνημα.

Στην Εικόνα 4.14 και στην Εικόνα 4.15, παρουσιάζονται το πλήρες μοντέλο, όπως αυτό εισάγεται απευθείας από το λογισμικό CAD και το ίδιο μοντέλο αμέσως μετά την αφαίρεση των επιπλέον επιφανειών αντίστοιχα. Αν και φαινομενικά, δεν φαίνεται να έχει αφαιρεθεί σημαντικό μέρος από το αρχικό σχέδιο, η μοντελοποίηση και η διαίρεση σε πεπερασμένα στοιχεία των αντικειμένων αυτών θα είχε ως αποτέλεσμα την μεταβολή της διαδικασίας σχεδιασμού του πλέγματος σε μία πολύ πολυπλοκότερη, καθώς ορισμένα από τα αντικείμενα που αφαιρέθηκαν είναι εξαιρετικά μικρά, και θα απαιτούταν αρκετά λεπτό πλέγμα για τη σωστή μοντελοποίηση τους. Αυτό σε συνδυασμό με τον αρκετά μεγάλο αριθμό τους, θα επέφερε αρκετά μεγαλύτερο χρόνο και θα απαιτούσε μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, χωρίς να συνεισφέρει ουσιαστικά στα αποτελέσματα του προβλήματος.



Εικόνα 4.14 Τρισδιάστατο μοντέλο από το λογισμικό CAD.



Εικόνα 4.15 Μοντέλο μετά την αφαίρεση επιφανειών στο ANSA.

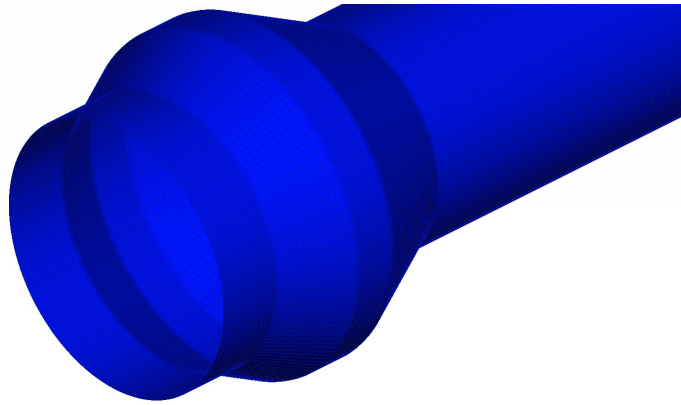
4.4.2 Δημιουργία πλέγματος του εμβόλου

Παρά το γεγονός ότι η γεωμετρία του εμβόλου είναι επί το πλείστον απλή, υπήρξαν ορισμένα σημεία κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του πλέγματος όπου απαιτούταν προσοχή, και όπως προαναφέρθηκε, χειροκίνητη δημιουργία του πλέγματος.

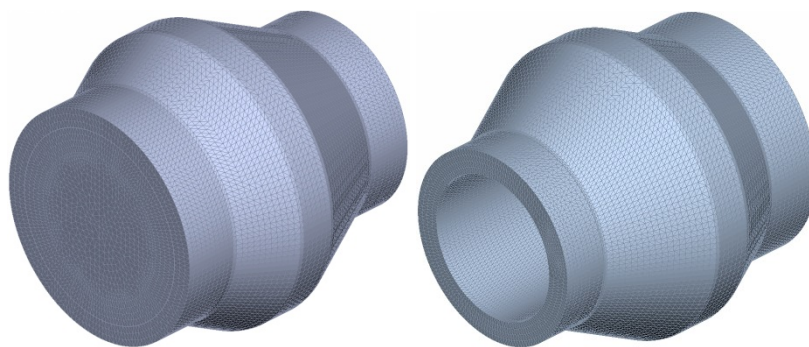
Αρχικά, αφαιρέθηκαν οι πλεονάζουσες ακμές, με σκοπό να διατηρηθούν μόνο οι απαραίτητες για την σωστή περιγραφή του εμβόλου από άποψη τοπολογίας. Έγινε έτσι πιο ‘καθαρή’ η γεωμετρία, ώστε κατά το σχηματισμό του πλέγματος τα πεπερασμένα στοιχεία να είναι τετράπλευρα κατά μήκος του σωλήνα. Αυτό ήταν απαραίτητο, καθώς στη συνέχεια, από το μερικώς δισδιάστατο

μοντέλο δημιουργήθηκε το αντίστοιχο πλήρως τρισδιάστατο, όπου για το σύνθετο υλικό, τα μόνα πεπερασμένα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα εξάεδρα.

Έπειτα, έγινε ο σχηματισμός του πλέγματος επάνω στις επιφάνειες του σύνθετου υλικού του εμβόλου και, εν συνεχεία, στις επιφάνειες των μεταλλικών του τμημάτων. Η επιλογή του μήκους των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε με σταδιακή αύξηση του μεγέθους τους, μέχρι το σημείο όπου δεν αλλοιώνονταν τα αποτελέσματα. Αυτό εξυπηρετεί στην ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης καθώς και της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος για την ανάλυση. Το τελικό μήκος που επιλέχθηκε για τα πεπερασμένα στοιχεία είναι 3 mm, τόσο για τα μεταλλικά μέρη, όσο και για το σύνθετο υλικό. Το πλέγμα αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.16 για το σύνθετο υλικό και στην Εικόνα 4.17 για τα μεταλλικά μέρη. Στην παρούσα φάση, τόσο το σύνθετο υλικό, όσο και τα μεταλλικά μέρη μοντελοποιούνται με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.



Εικόνα 4.16 Πλέγμα επιφάνειας του σωλήνα από σύνθετο υλικό.



Εικόνα 4.17 Πλέγμα επιφανειών των επιφανειών των μεταλλικών πομάτων του εμβόλου.

Ακολούθως, από τις επιφάνειες των μεταλλικών πωμάτων, σχηματίστηκαν δύο στερεά σώματα που αποτελούνται πλέον από τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Προκειμένου το πλέγμα μεταξύ του δισδιάστατου σύνθετου υλικού και των τρισδιάστατων πωμάτων να ταιριάζει, οπότε οι κόμβοι να συμπίπτουν, τα στοιχεία των πωμάτων που βρίσκονται στο εξωτερικό είναι εξάεδρα, ενώ στις μετωπικές επιφάνειες και στο εσωτερικό, υπάρχουν τόσο πεντάεδρα όσο και εξάεδρα.

4.4.3 Ορισμός ιδιοτήτων και υλικών

Τα μεταλλικά πώματα αποτελούνται από χάλυβα, οπότε ο ορισμός του υλικού και των ιδιοτήτων τους ήταν απλός, καθώς ο χάλυβας αποτελεί ένα συμβατικό, ιστροπικό και ομοιογενές υλικό, με γνωστές ιδιότητες. Αντίθετα, το σύνθετο υλικό αποτελείται από τις διάφορες στρώσεις του, οπότε ο ορισμός των ιδιοτήτων του ήταν αρκετά πιο περίπλοκος, όντας ανιστροπικό (ουσιαστικά ορθοτροπικό) και ανομοιογενές. Αρχικά, ορίστηκε ένα ορθοτροπικό υλικό, με ιδιότητες στις δύο διαστάσεις του. Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις ιδιότητες του υλικού αυτού. Οι ιδιότητες αυτές εξήχθησαν από πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε σωλήνα κατασκευασμένο από τα ίδια υλικά, όπως και το έμβολο της παρούσας μελέτης.

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες σύνθετου υλικού

E1 (MPa)	E2 (MPa)	ν	G12 (MPa)	G1Z (MPa)	G2Z (MPa)	ρ (ton/mm ³)
138945.1	6615.4	0.278	3387	3387.	2286.41	1.52E-9

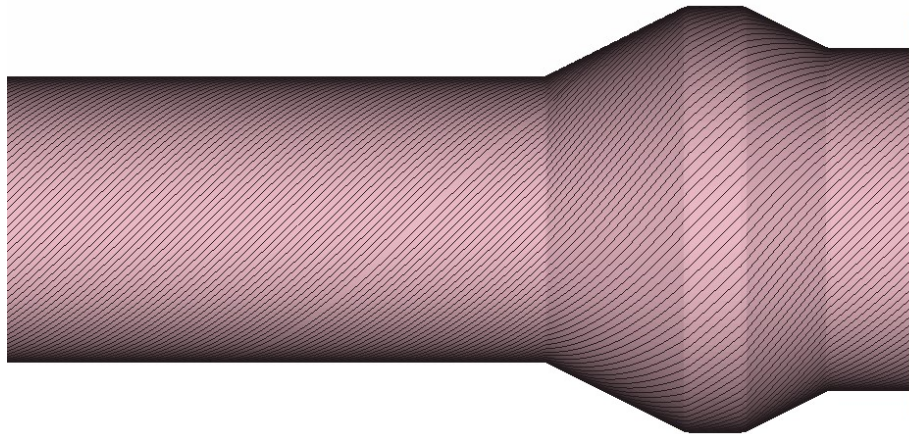
Όπου E, G το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης αντίστοιχα, ν ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα. Οι δείκτες 12, 1Z και 2Z συμβολίζουν τα επίπεδα διάτμησης.

Έπειτα, ακολούθησε ο ορισμός των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται το σύνθετο υλικό. Για την αρχική μελέτη ακολουθήθηκαν οι πρακτικές σωστού σχεδιασμού, όπως αυτές αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2 για την επιλογή των στρώσεων. Έτσι, η αρχική αλληλουχία των στρώσεων του σύνθετου υλικού είναι η εξής:

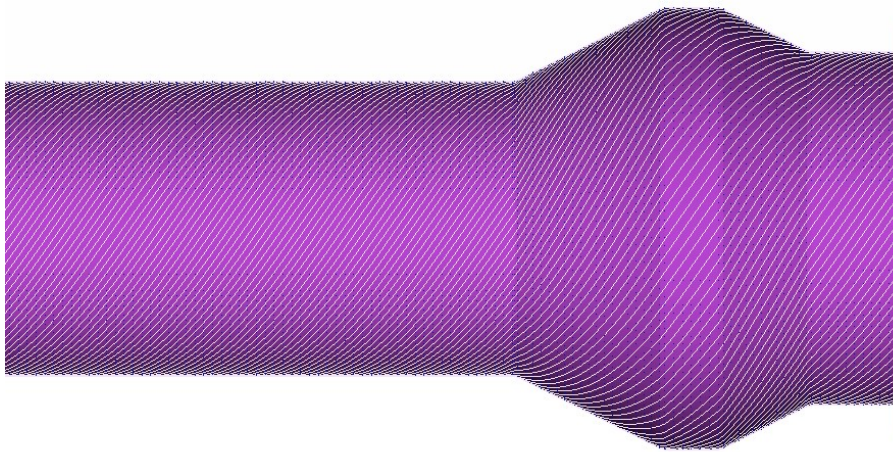
$$[\pm 55/\pm 45/\pm 45/\pm 85/\pm 85/\pm 45/\pm 45/\pm 55/\pm 55/\pm 45/\pm 45/\pm 85/85]_s$$

Το πάχος κάθε στρώσης είναι 0,2 mm, οπότε το συνολικό πάχος του σύνθετου υλικού είναι 10 mm.

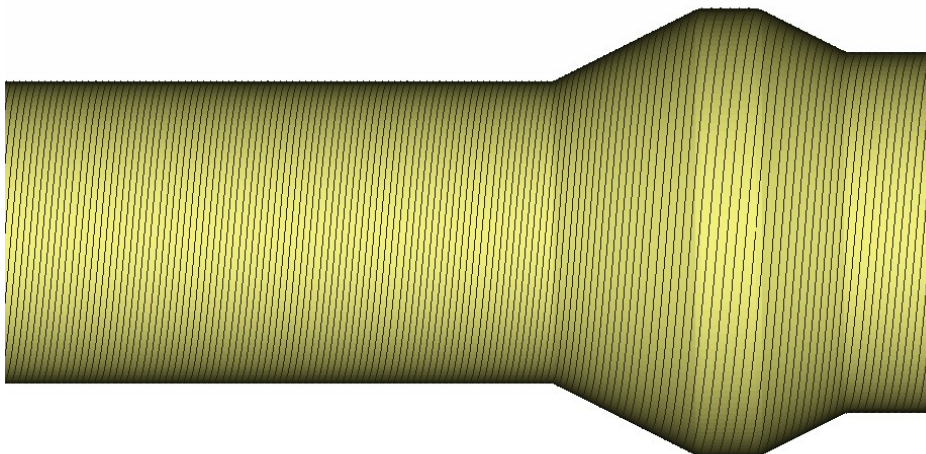
Αναφορικά, στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται οι στρώσεις των 45°, 55° και 85° της πλέξης του νήματος επάνω στον κύλινδρο του εμβόλου. Όπως προαναφέρθηκε, οι γωνίες αυτές ορίζονται ως προς το διαμήκη άξονα του αντικειμένου.



Εικόνα 4.18 Στρώση γωνίας 45° ως προς τη διαμήκη διεύθυνση.



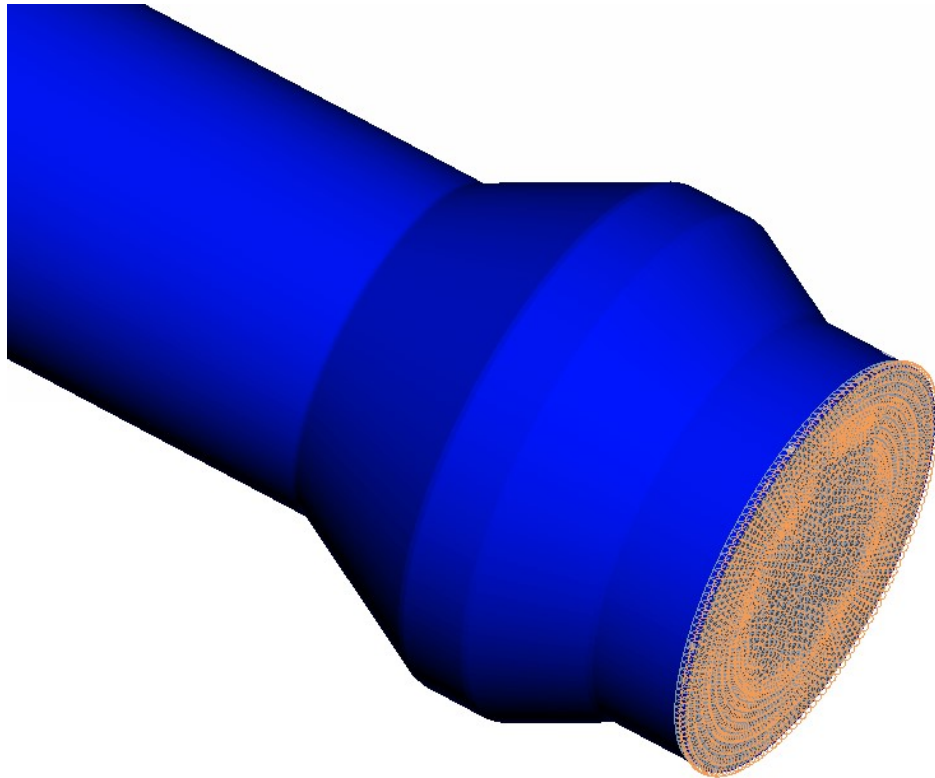
Εικόνα 4.19 Στρώση γωνίας 55° ως προς τη διαμήκη διεύθυνση.



Εικόνα 4.20 Στρώση γωνίας 85° ως προς τη διαμήκη διεύθυνση.

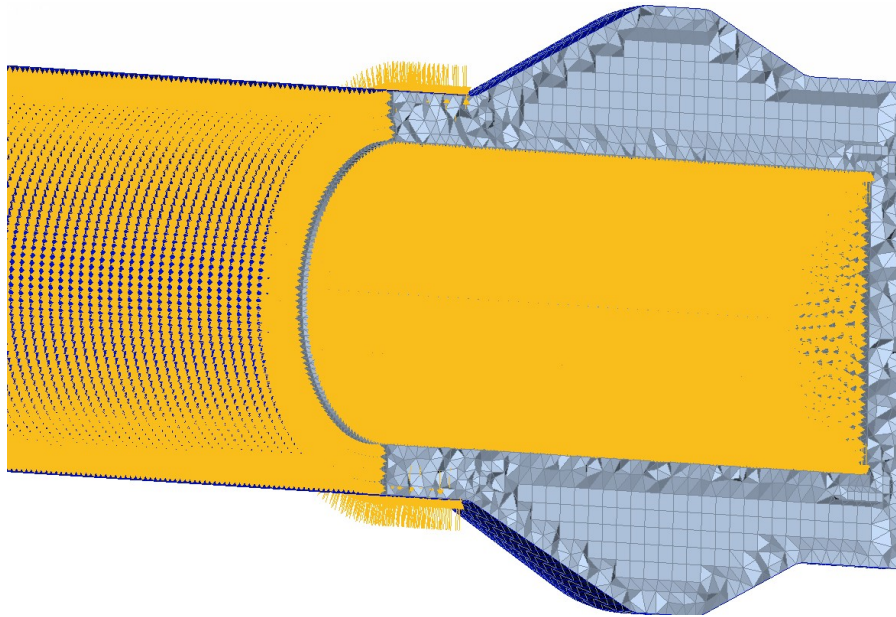
4.4.4 Ορισμός οριακών συνθηκών και φορτίσεων

Τελευταίο στάδιο της μοντελοποίησης του υδραυλικού εμβόλου με πεπερασμένα στοιχεία, είναι ο ορισμός των αρχικών συνθηκών που διέπουν την ανάλυση και των φορτίσεων που το καταπονούν. Αρχικά, ορίζεται πλήρης πάκτωση στη μια πλευρά του αντικειμένου, στο μεταλλικό πώμα. Η πάκτωση αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.21 και ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τη σύνδεση του εμβόλου με κάποιο μηχάνημα, ή τη στερεοποίηση του σε κάποια βάση (όπως στην περίπτωση μιας υδραυλικής πρέσας).



Εικόνα 4.21 Ορισμός οριακών συνθηκών – Πάκτωση

Ορίζεται τέλος, η πίεση που ασκείται στο εσωτερικό του υδραυλικού εμβόλου, λόγω του ρευστού με το οποίο λειτουργεί. Η πίεση αυτή ουσιαστικά αφορά τα τοιχώματα στον κορμό του εμβόλου, καθώς και τη μετωπική μεταλλική επιφάνεια στο εσωτερικό του εμβόλου. Στην Εικόνα 4.22 φαίνονται τα διανύσματα των φορτίσεων της εσωτερικής πίεσης. Η ανάλυση έγινε για μια φόρτιση εσωτερικής πίεσης των 200 bar.



Εικόνα 4.22 Φορτίο εσωτερικής πίεσης σε τομή του υδραυλικού εμβόλου

Στην εν λόγω γεωμετρία, η μετωπική επιφάνεια του μετάλλου στην οποία ασκείται η εσωτερική πίεση, αποτελείται από έναν δακτύλιο με εξωτερική διάμετρο 99.5 mm και εσωτερική 75 mm, έναν δακτύλιο με εσωτερική διάμετρο 99.5 mm και εξωτερική 100 mm και έναν κυκλικό δίσκο διαμέτρου 75 mm. Η πίεση που ασκείται στις κυλινδρικές επιφάνειες του μετάλλου, ουσιαστικά δεν συνεισφέρει στη φόρτιση στο σύνθετο υλικό, καθώς το μέταλλο είναι επαρκώς παχύ. Η επιφάνεια του σύνθετου υλικού στην οποία ασκείται η εσωτερική πίεση είναι κυλινδρική, με διάμετρο 100 mm και μήκος 738 mm.

4.5 Αρχικό μοντέλο – Αριθμητική επίλυση

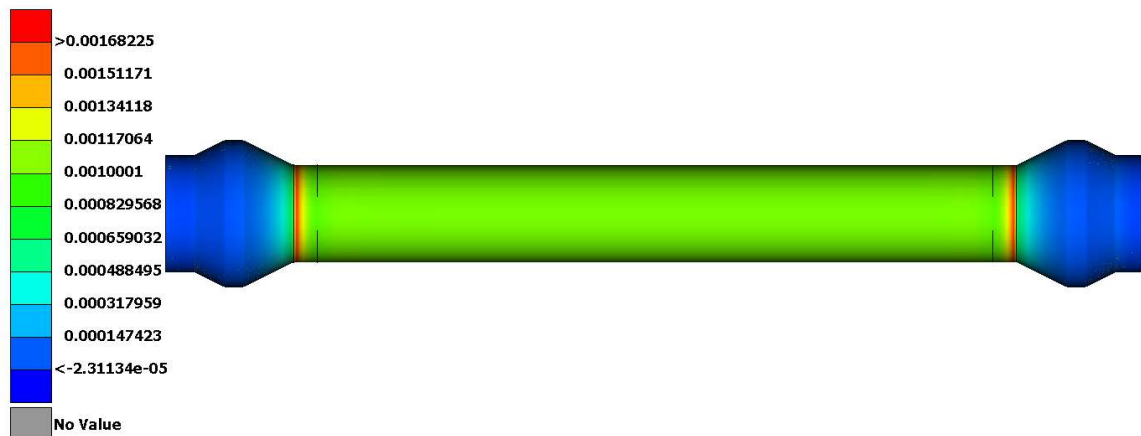
Η αριθμητική επίλυση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του επιλύτη (Solver) πεπερασμένων στοιχείων NASTRAN της εταιρίας MSC. Το NASTRAN διαβάζει έναν κώδικα που περιέχεται στο μοντέλο που δημιουργείται από τον προ-επεξεργαστή, το οποίο του ορίζει τις οριακές συνθήκες τις φορτίσεις που εξετάζονται, ενώ λαμβάνει και τα δεδομένα των ιδιοτήτων και της γεωμετρίας του αντικειμένου. Τελικά, παράγει ένα αρχείο με τα επιθυμητά αποτελέσματα, το οποίο στη συνέχεια εισάγεται σε έναν μετά-επεξεργαστή (post-processor). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ως μετά-επεξεργαστής στην παρούσα ανάλυση, είναι το πρόγραμμα META της εταιρίας BETA CAE Systems S.A., και μέσα από αυτό, γίνεται απεικόνιση των αποτελεσμάτων καθώς και παρουσίαση των ιδιομορφών του αντικειμένου.

4.5.1 Ανάλυση τροπών και αστοχίας υλικού με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

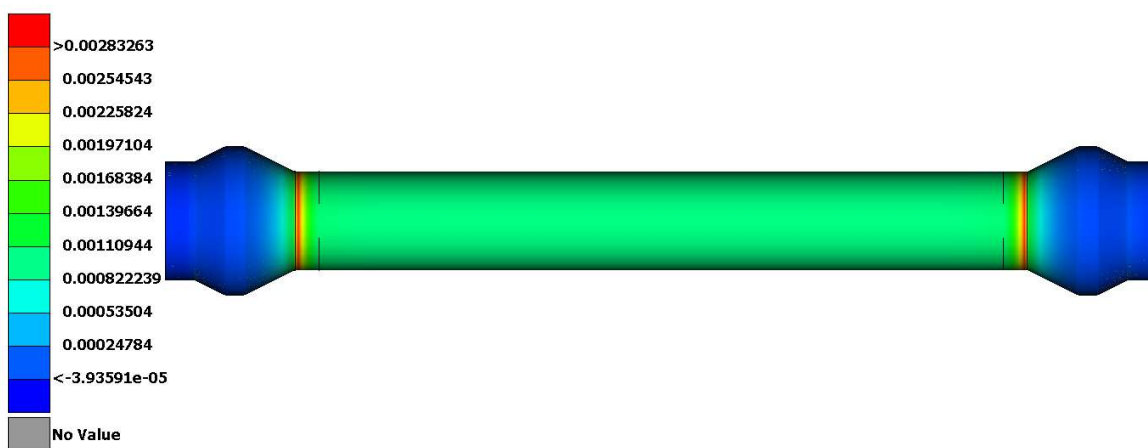
Το έμβολο από το σύνθετο υλικό θα παραμορφωθεί λόγω των τροπών που δημιουργούνται σε αυτό από την εσωτερική πίεση που εφαρμόζεται επάνω του. Όπως προαναφέρθηκε, η περίπτωση της

εσωτερικής πίεσης μελετάται ως στατικό πρόβλημα, ενώ το έμβολο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως πλήρως ελαστικό σώμα. Μετά την εφαρμογή της πίεσης, το έμβολο θα παραμορφωθεί ανάλογα με τη φόρτιση και θα παραμείνει σε εκείνη τη μορφή, μέχρι την αφαίρεση αυτής.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι τροπές στις κύριες διευθύνσεις των στρώσεων, καθώς και ο δείκτης αστοχίας βάση του κριτηρίου μεγίστων τροπών, για την περίπτωση φόρτισης που αναφέρθηκε. Ως τιμές των τροπών καθώς και του δείκτη αστοχίας λαμβάνονται οι μέγιστες από όλες τις στρώσεις.



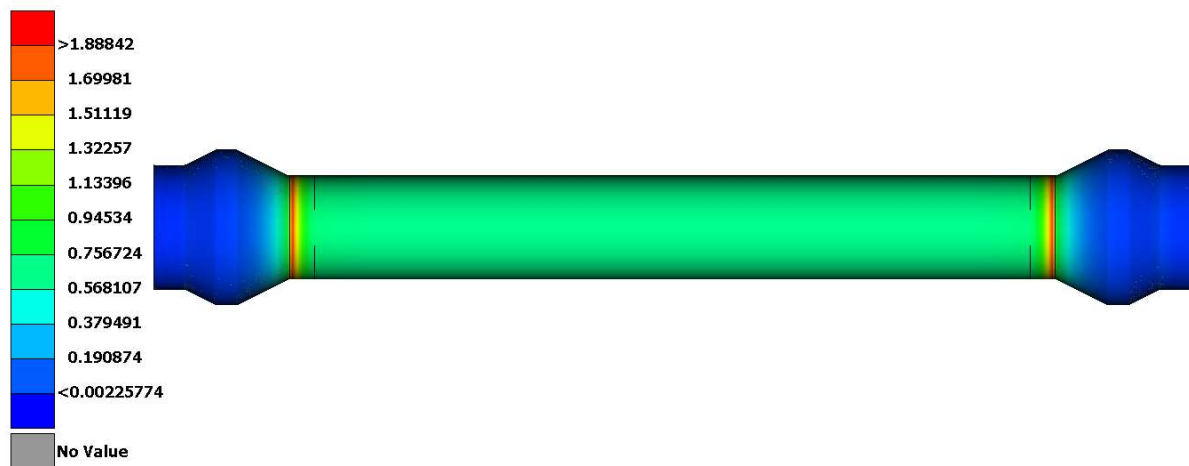
Εικόνα 4.23 Τροπές στον άξονα x (Normal-1) σε πίεση 200 bar.



Εικόνα 4.24 Τροπές στον άξονα y (Normal-2) σε πίεση 200 bar.



Εικόνα 4.25 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο xy (Shear-12) σε πίεση 200 bar.



Εικόνα 4.26 Δείκτης αστοχίας (Failure Index) σε πίεση 200 bar.

4.6 Βελτιστοποίηση του σύνθετου υλικού

Ο Πίνακας 4.2 περιέχει τις μέγιστες τιμές των τροπών, των τροπών και των δεικτών αστοχίας. Τα Normal-1, -2 είναι οι αξονικές τροπές στις διευθύνσεις κατά μήκος και εγκάρσια της ίνας αντίστοιχα, το Shear-12 είναι η διατμητική τροπή στο επίπεδο 12 και το Failure Index αφορά όλες τις στρώσεις και όλες τις διευθύνσεις. Οι τιμές, δίνονται κατά απόλυτη τιμή, καθώς το αρνητικό πρόσημο αφορά τη συμπίεση στις αξονικές τροπές και τη διάτμηση αντίθετα στις διατμητικές τροπές. Επιπλέον, για τον δείκτη αστοχίας γίνεται στρογγυλοποίηση στο τρίτο δεκαδικό, ενώ για τις τροπές στο πέμπτο, καθώς οι τιμές τους είναι αρκετά χαμηλές και σε πολλές περιπτώσεις δεν θα ήταν εμφανής η μεταβολή τους. Από τον πίνακα, γίνεται φανερό πως η μεγαλύτερη παραμόρφωση συμβαίνει στη διεύθυνση 2, της οποίας οι ιδιότητες κυριαρχούνται ουσιαστικά από τη μήτρα. Επιπλέον, από την Εικόνα 4.26, που δείχνει τον δείκτη αστοχίας για την περίπτωση των 200 bar, φαίνεται πως οι μεγαλύτερες φορτίσεις λαμβάνουν χώρα στο σημείο της ένωσης με το μέταλλο. Αυτό

είναι φυσιολογικό, καθώς οι διαφορετικές ιδιότητες των δύο υλικών έχουν μεγάλη επίδραση στην κατανομή των φορτίσεων.

Πίνακας 4.2 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας της αρχικής αλληλουχίας στρώσεων.

	200 bar
Normal-1 (-)	0.00168
Normal-2 (-)	0.00283
Shear-12 (-)	0.00284
Failure Index (-)	1.888

Γίνεται φανερό λοιπόν, πως το σύνθετο υλικό αστοχεί για αυτή την πίεση των 200 bar. Συνεπώς, απαιτείται περαιτέρω επέμβαση για τη βελτιστοποίηση της κατασκευής. Αυτό μπορεί να συμβεί, πέραν της πλήρους αλλαγής της κατασκευής του εμβόλου, με δύο τρόπους, την αλλαγή της αλληλουχίας και των γωνιών περιέλιξης των στρώσεων και την προσθήκη περισσότερων στρώσεων στο έμβολο.

Καθώς ο αριθμός των στρώσεων είναι μεγάλος, και οι πιθανοί συνδυασμοί γωνιών και η αλληλουχία αυτών ουσιαστικά άπειροι, η απόπειρα εύρεσης της βέλτιστης δομής θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα και δαπανηρή όσον αφορά την υπολογιστική ισχύ, αν αυτή πραγματοποιούταν χειροκίνητα. Επιπλέον, για κάθε διαφορετικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, θα απαιτούταν να επαναληφθεί αυτή η διαδικασία χειροκίνητα. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε ένας κώδικας βελτιστοποίησης στο λογισμικό MATLAB της εταιρίας MathWorks. Ο κώδικας αυτός βασίζεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης της προσομοιωμένης απόπτωσης (simulated annealing algorithm).

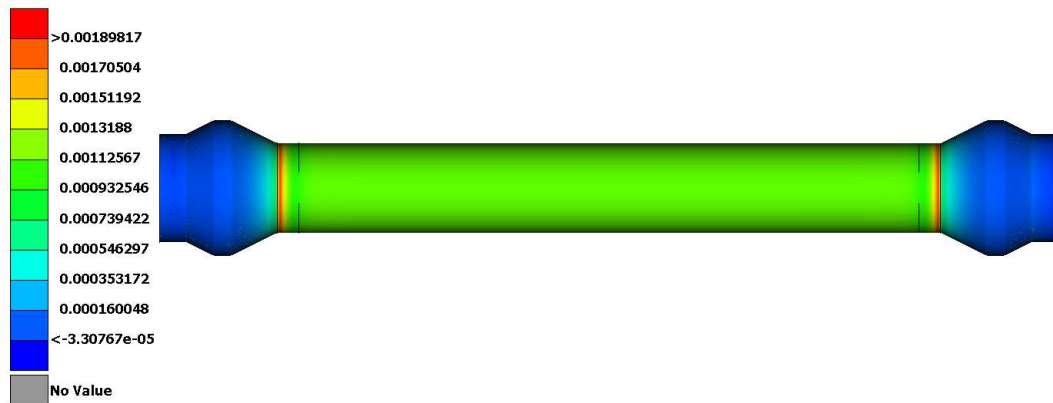
Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μία μέθοδο εύρεσης της γενικής βέλτιστης λύσης μίας συνάρτησης προσομοιώνοντας τη διαδικασία της απόπτωσης δηλαδή, τη θέρμανση και αργή ψύξη ενός υλικού με σκοπό την ελάττωση των ατελειών. Σε κάθε του επανάληψη, ο αλγόριθμος δημιουργεί τυχαία ένα καινούριο σημείο, του οποίου η απόσταση από το προηγούμενο βασίζεται σε μία κατανομή πιθανότητας με κλίμακα ανάλογη της θερμοκρασίας, διατηρώντας τα σημεία που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση, αλλά και ορισμένα που την μεγιστοποιούν, ώστε να μην παραμένει σε τοπικά ελάχιστα. Σταδιακά, ελαχιστοποιείται η θερμοκρασία, οπότε ο αλγόριθμος συγκλίνει στο γενικό ελάχιστο [16]. Στο στάδιο αυτό, εξετάζεται μόνο η αλλαγή της αλληλουχίας των στρώσεων, χωρίς να προστεθούν νέες στρώσεις στην κατασκευή.

Αρχικά, εισάγονται στον κώδικα οι γωνίες των στρώσεων. Καθώς η δομή είναι ισορροπημένη, δηλαδή για κάθε γωνία θ υπάρχει μία γωνία $-\theta$ εντός της αλληλουχίας των στρώσεων, με εξαίρεση τη μεσαία στρώση η οποία επαναλαμβάνεται, χρειάζεται να εισαχθούν μόνο 25 τιμές γωνιών, 24 γωνίες που υφίστανται και με θετικό και αρνητικό πρόσημο και η μέση στρώση που υφίσταται μόνο με θετικό. Θα μπορούσε να γίνει περεταίρω απλοποίηση λόγω της συμμετρίας ως προς το μέσο επίπεδο, αλλά αυτό θα περιόριζε τον αλγόριθμο σε συμμετρικές μόνο δομές, χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος λαμβάνει από ένα αρχείο τύπου f06 τις τιμές του δείκτη αστοχίας για ορισμένους κόμβους από τα πιο κρίσιμα σημεία του κυλίνδρου και τα εισάγει στο

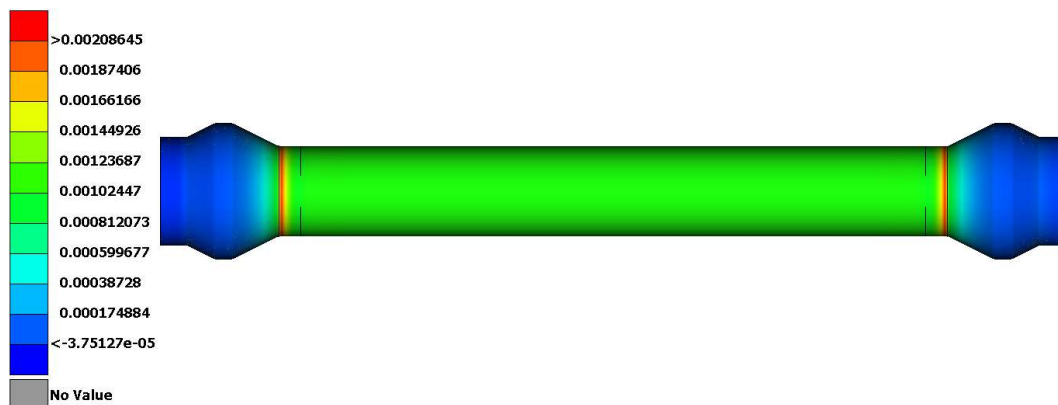
πρόγραμμα με σκοπό την ελαχιστοποίηση τους. Το αρχείο τύπου f06 είναι ένα αρχείο εξόδου, το οποίο δημιουργείται από την εκτέλεση του λογισμικού NASTRAN. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται συνεχώς, ελαχιστοποιώντας κάθε φορά τις τιμές των δεικτών αστοχίας, αλλάζοντας την αλληλουχία των στρώσεων κάθε φορά, μέχρι να φτάσει κάποιο ελάχιστο, οπότε και έχει βελτιστοποιηθεί η δομή. Τέλος, η νέα αλληλουχία των στρώσεων εισάγεται στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, και επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα. Η νέα δομή του σύνθετου υλικού, μετά την εφαρμογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης είναι η εξής:

$$[\pm 61/\pm 31/\pm 39/\pm 69/\pm 77/\pm 30/\pm 62/\pm 32/\pm 64/\pm 63/\pm 45/\pm 80/80/80/\pm 88/\pm 41/\pm 38/\pm 55/\pm 30/\pm 63/\pm 39/\pm 79/\pm 61/\pm 73/\pm 53/\pm 51].$$

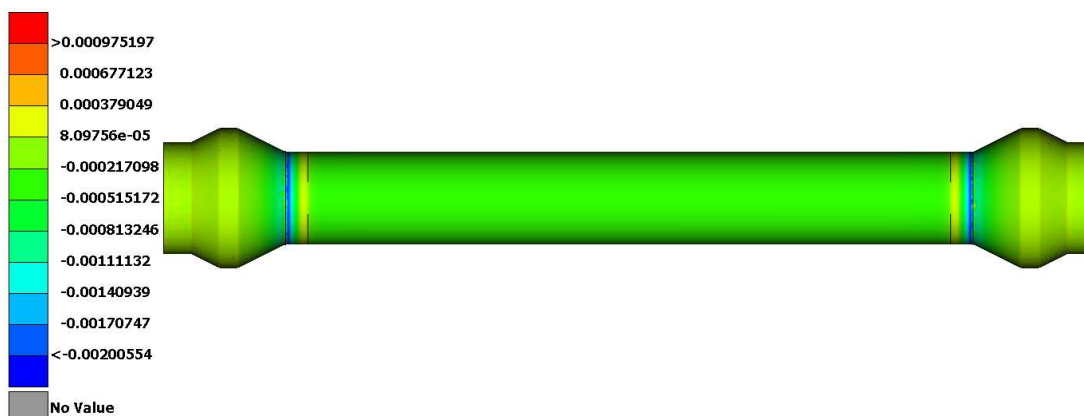
Με αυτή μόνο τη μεταβολή στη δομή του σύνθετου υλικού, επιτυγχάνεται ελάττωση του δείκτη αστοχίας. Στις ακόλουθες εικόνες, δίδονται οι τροπές και ο δείκτης αστοχίας για την εν λόγω αλληλουχία στρώσεων.



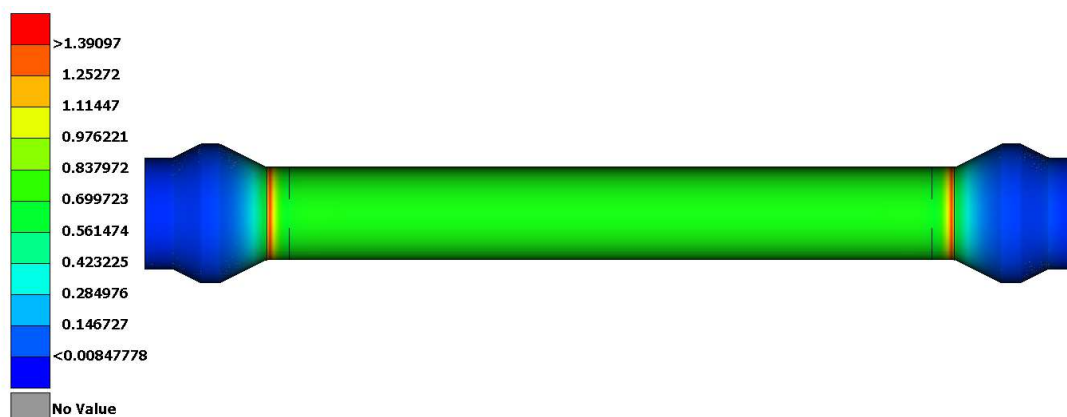
Εικόνα 4.27 Τροπές στον άξονα x (Normal-1) μετά τη βελτιστοποίηση.



Εικόνα 4.28 Τροπές στον άξονα y (Normal-2) μετά τη βελτιστοποίηση.



Εικόνα 4.29 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο xy (Shear-12) μετά τη βελτιστοποίηση.



Εικόνα 4.30 Δείκτης αστοχίας (Failure Index) μετά τη βελτιστοποίηση.

Στον πίνακα που ακολουθεί, δίδονται οι αντίστοιχες τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας για το σύνθετο υλικό μετά τη βελτιστοποίηση.

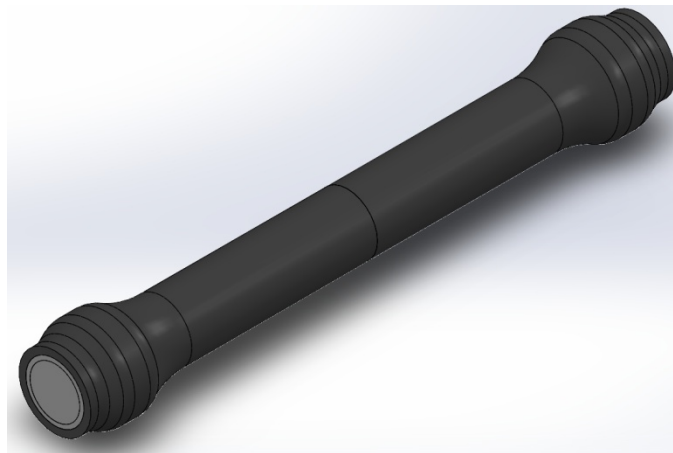
Πίνακας 4.3 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας μετά τη βελτιστοποίηση.

	200 bar
Normal-1 (-)	0.00181
Normal-2 (-)	0.00209
Shear-12 (-)	0.00201
Failure Index (-)	1.391

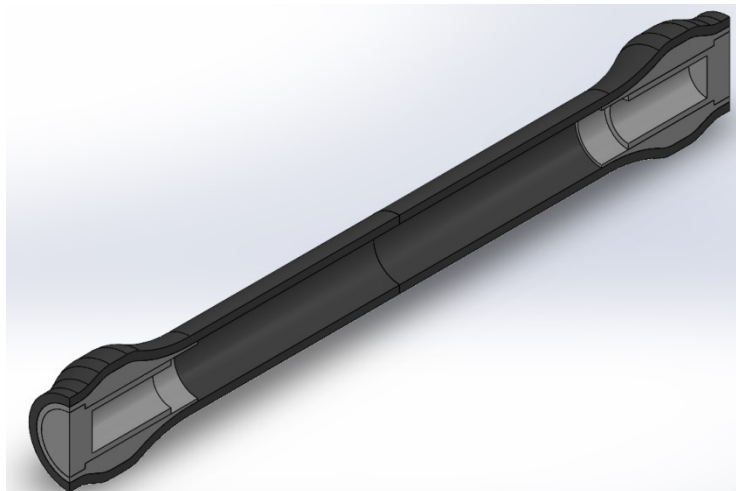
Είναι φανερό, πως ο κώδικας της βελτιστοποίησης έφτιαξε μία δομή που ελαττώνει την παραμόρφωση στη διεύθυνση 2 κατά περίπου 30%, καθώς αυτή είναι η πρώτη που αστοχεί. Φυσικά αυτή η αλλαγή της δομής είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθούν οι τροπές στη διεύθυνση 1, αλλά καθώς αυτές είναι πολύ χαμηλότερες από τα αντίστοιχα όρια, δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας. Καθώς όμως ο δείκτης αστοχίας είναι αρκετά μεγαλύτερος της μονάδας, είναι απαραίτητη περεταίρω βελτίωση, ώστε αυτός να μειωθεί σε ασφαλή επίπεδα λειτουργίας.

4.7 Έμβολο ομαλής μετάβασης – Αριθμητική επίλυση

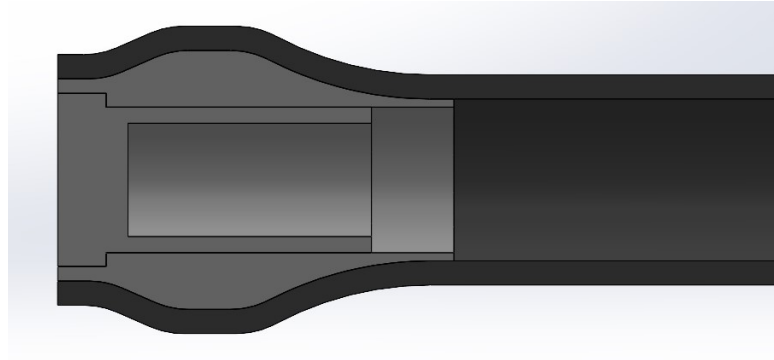
Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τον μετά-επεξεργαστή, γίνεται φανερό πως η απότομη μετάβαση της γεωμετρίας που ακολουθεί το μέταλλο, είναι πυρήνας συσσώρευσης φορτίσεων. Επομένως πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την ίδια περίπτωση φόρτισης των 200 bar, σε έμβολο με ποιο ομαλή μετάβαση στην αλλαγή των διατομών του, ενώ η δομή του σύνθετου υλικού, είναι η αρχική, πριν τον αλγόριθμο της βελτιστοποίησης. Στις ακόλουθες εικόνες δίδεται η γεωμετρία αυτού του νέου εμβόλου, όπως αυτή σχεδιάστηκε στο λογισμικό CAD. Καθώς η ανάλυση γίνεται με ορισμένες απλοποιήσεις και στατικά, τα κινούμενα μέρη του εμβόλου έχουν αφαιρεθεί, και έχει σχεδιαστεί μόνο ο κύλινδρος με τα μεταλλικά πόματα.



Εικόνα 4.31 Έμβολο ομαλής γεωμετρίας από το λογισμικό CAD.

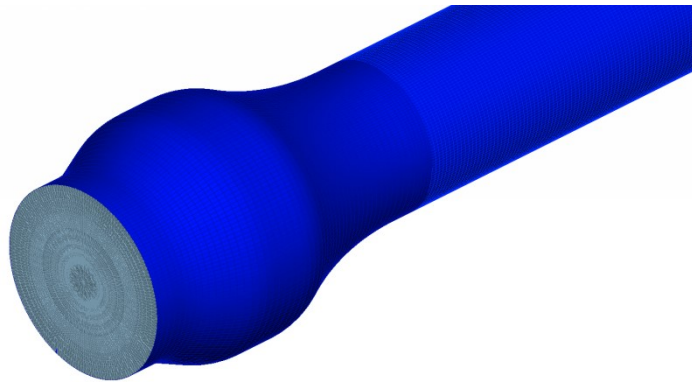


Εικόνα 4.32 Τομή εμβόλου ομαλής γεωμετρίας.

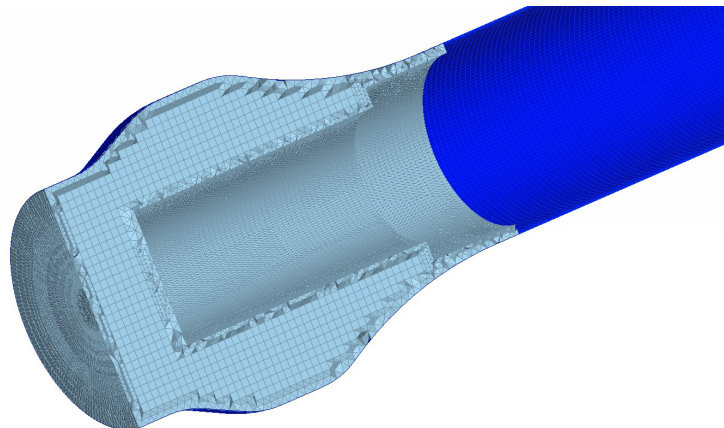


Εικόνα 4.33 Πλάγια τομή εμβόλου ομαλής γεωμετρίας.

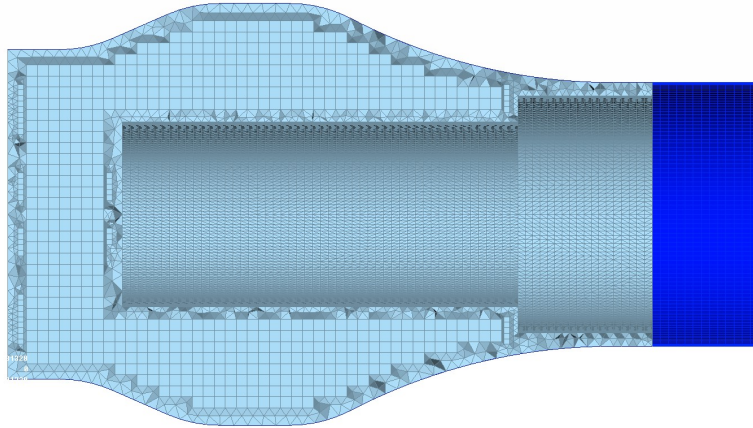
Ομοίως με την περίπτωση του αρχικού εμβόλου, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή της γεωμετρίας στο λογισμικό ANSA, όπου έγινε καθαρισμός της γεωμετρίας και χωρισμός της σε πεπερασμένα στοιχεία. Στις ακόλουθες εικόνες, δίδεται το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων μέσα από το λογισμικό.



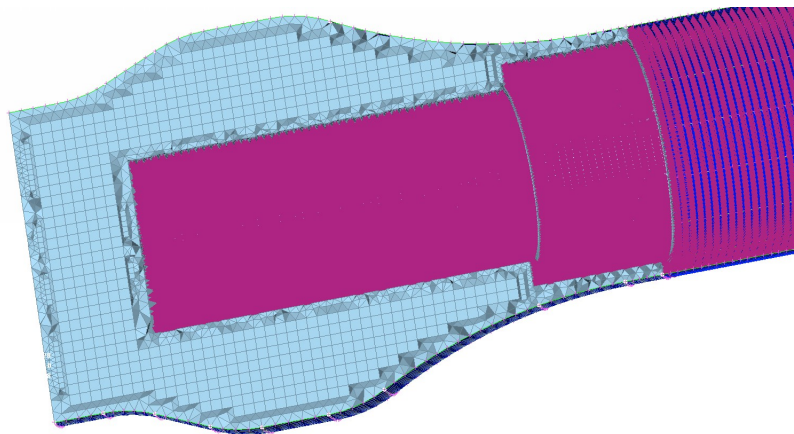
Εικόνα 4.34 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων υδραυλικού εμβόλου από το λογισμικό ANSA.



Εικόνα 4.35 Τομή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων υδραυλικού εμβόλου.



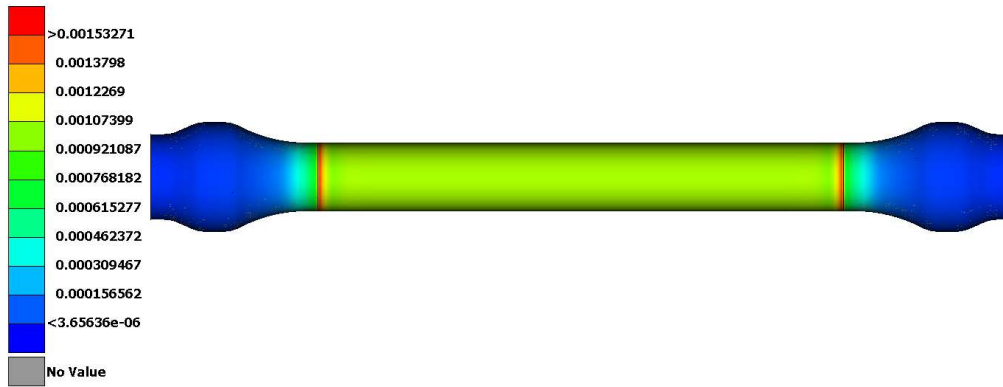
Εικόνα 4.36 Πλάγια τομή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων υδραυλικού εμβόλου.



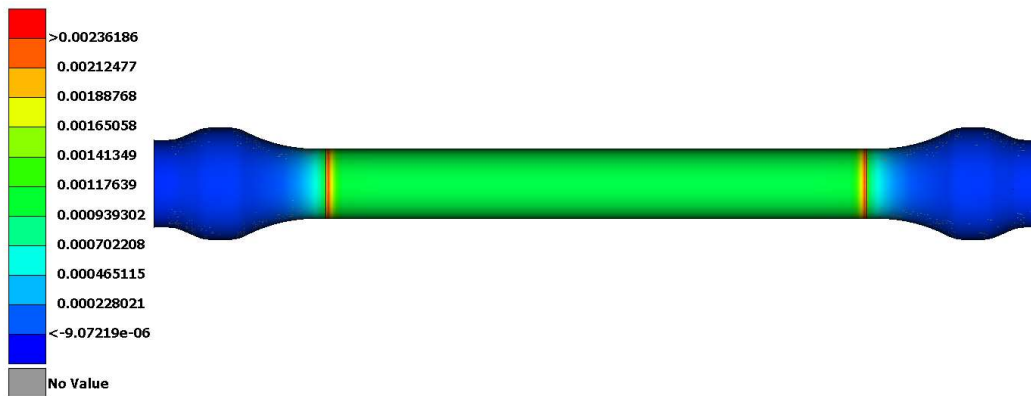
Εικόνα 4.37 Εσωτερική φόρτιση σύνθετου υλικού και μετάλλου.

Στο εν λόγω μοντέλο, καθώς έχει αλλάξει η μεταλλική επιφάνεια και προσκολλάται πλήρως στο σύνθετο υλικό, αλλάζει και η κατανομή της πίεσης. Επιπλέον, η μετωπική επιφάνεια του μεταλλικού πάματος αποτελείται από έναν δακτύλιο εσωτερικής διαμέτρου 90 mm εξωτερικής 100 mm, έναν δακτύλιο με εσωτερική διάμετρο 70 mm και εξωτερική 90 mm και τέλος έναν κυκλικό δίσκο διαμέτρου 70 mm. Τέλος, το σύνθετο υλικό είναι πλήρως προσκολλημένο στο μέταλλο και η επιφάνεια του στην οποία ασκείται η εσωτερική πίεση αποτελείται από κύλινδρο διαμέτρου 100 mm και μήκος 770 mm. Ομοίως με πριν, το ένα μεταλλικό πάμα είναι πακτωμένο, προσομοιάζοντας το σημείο σύνδεσης του εμβόλου με το μηχανήμα ή το σημείο στο οποίο λειτουργεί.

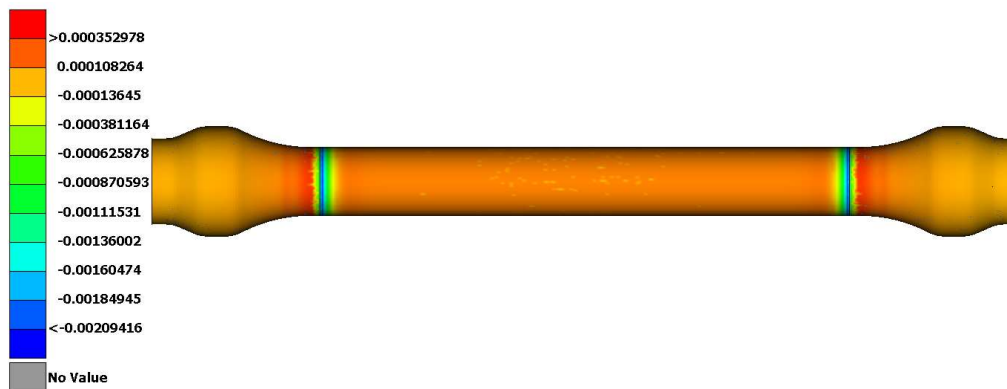
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του εν λόγω μοντέλου στη συνέχεια παρουσιάζονται με τη βοήθεια του μετά-επεξεργαστή. Στις ακόλουθες εικόνες, δίδονται οι αντίστοιχες τιμές των τρόπων και του δείκτη αστοχίας που προκύπτουν από την εσωτερική πίεση των 200 bar.



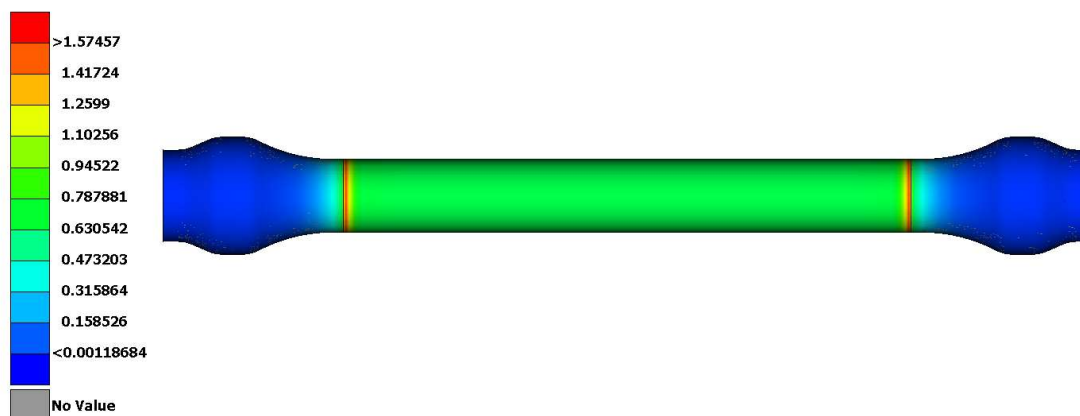
Εικόνα 4.38 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) της ομαλής γεωμετρίας



Εικόνα 4.39 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-2) της ομαλής γεωμετρίας



Εικόνα 4.40 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο 12 (Shear-12) για την ομαλή γεωμετρία



Εικόνα 4.41 Δείκτης αστοχίας για την ομαλή γεωμετρία.

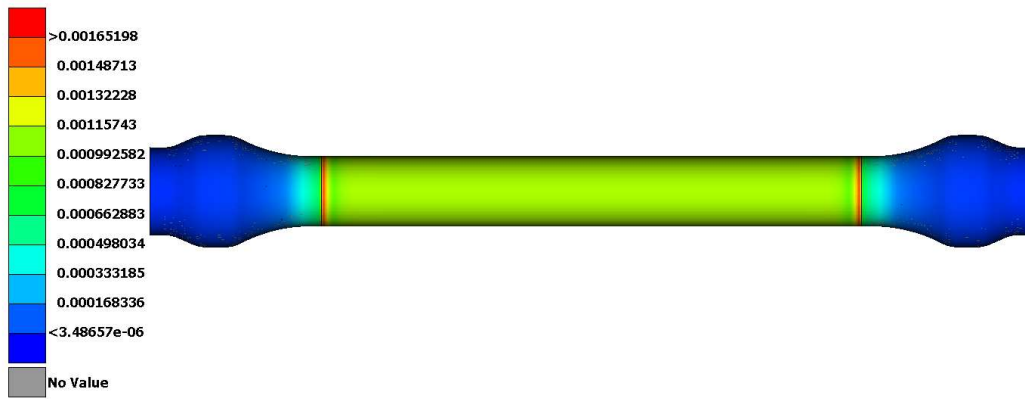
Στον ακόλουθο πίνακα, δίδονται οι μέγιστες τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας για το εν λόγω έμβολο. Ομοίως με πριν, λαμβάνονται οι μέγιστες τιμές μεταξύ των στρώσεων.

Πίνακας 4.4 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας της ομαλής γεωμετρίας.

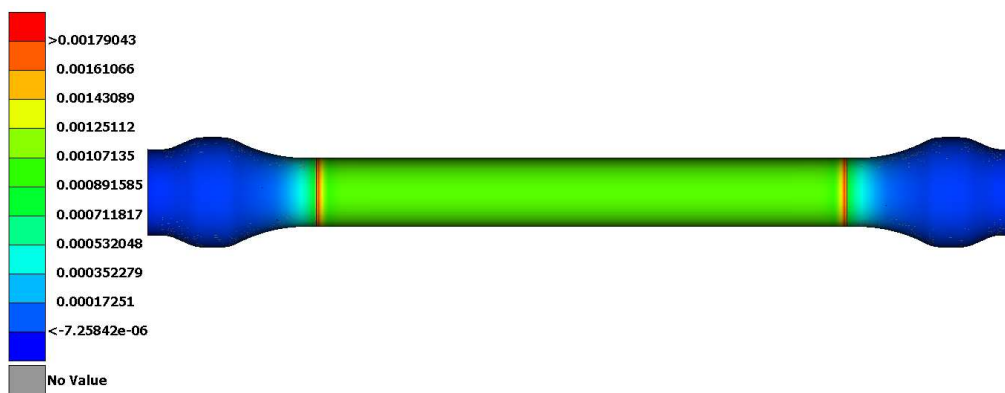
	200 bar
Normal-1 (-)	0.00153
Normal-2 (-)	0.00236
Shear-12 (-)	0.00209
Failure Index (-)	1.574

Είναι φανερό πως πέραν της διατμητικής παραμόρφωσης, που είναι ούτος ή άλλος εντός του ορίου, οι τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του αρχικού εμβόλου πριν την βελτιστοποίηση των γωνιών πλέξης του σύνθετου υλικού είναι χαμηλότερες.

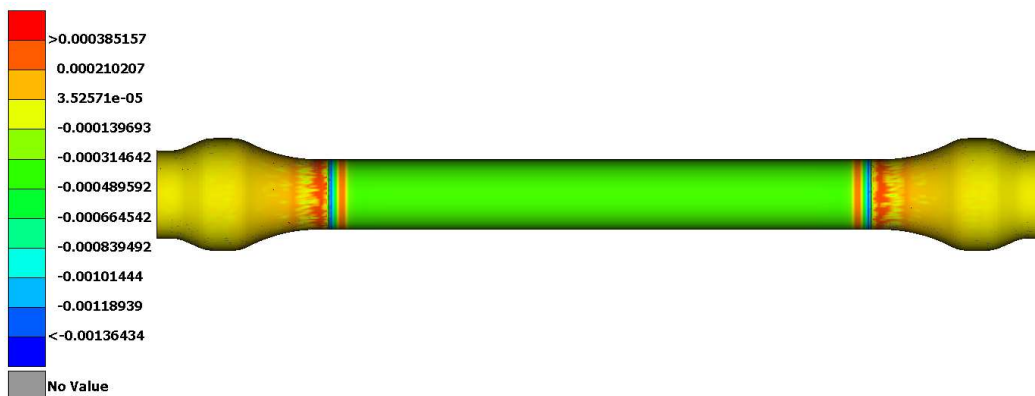
Ο δείκτης αστοχίας όμως εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερος της μονάδας, οπότε χρησιμοποιήθηκε ξανά η αλληλουχία των στρώσεων που παρήγαγε προηγουμένως ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα των τροπών και του δείκτη αστοχίας για το παρόν έμβολο με τη βελτιστοποιημένη δομή, δίδονται στις ακόλουθες εικόνες.



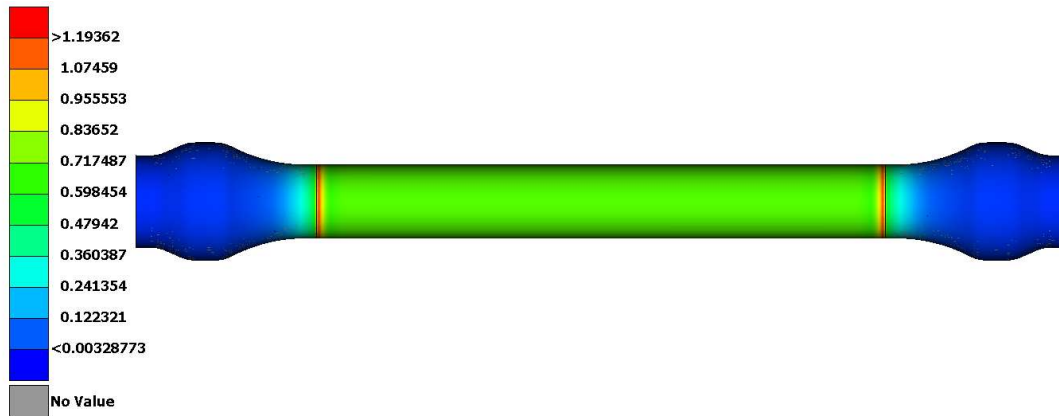
Εικόνα 4.42 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) με τη βελτιστοποιημένη δομή.



Εικόνα 4.43 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση y (Normal-2) με τη βελτιστοποιημένη δομή.



Εικόνα 4.44 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο 12 (Shear-12) με τη βελτιστοποιημένη δομή.



Εικόνα 4.45 Δείκτης αστοχίας για τη βελτιστοποιημένη δομή

Ακολούθως, δίδονται οι τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας για την παρούσα δομή του σύνθετου υλικού.

Πίνακας 4.5 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας μετά τη βελτιστοποίηση της δομής.

	200 bar
Normal-1 (-)	0.00165
Normal-2 (-)	0.00171
Shear-12 (-)	0.00136
Failure Index (-)	1.193

Όπως και πριν, προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή στη διεύθυνση 2, ελαττώνεται η αντοχή στη διεύθυνση 1, οπότε οι τροπές ελαττώνονται και αυξάνονται αντίστοιχα.

4.8 Ενίσχυση σύνθετου υλικού

Καθώς ακόμη και για την ομαλή γεωμετρία, το σύνθετο υλικό αστοχεί κάτω από τη φόρτιση των 200 bar, έγινε ανάλυση για την ίδια περίπτωση φόρτισης, μετά την προσθήκη επιπλέον στρώσεων ως ενίσχυση.

Το μεγαλύτερο πάχος της ενίσχυσης, δηλαδή, οι περισσότερες στρώσεις, προστέθηκαν στην περιοχή όπου παρατηρείται ο μεγαλύτερος δείκτης αστοχίας. Καθώς στο υπόλοιπο έμβολο, ο δείκτης αστοχίας είναι αρκετά χαμηλότερος, προστέθηκε ενίσχυση μικρότερου πάχους κατά μήκος του, ελαττώνοντας έτσι το συνολικό βάρος του εμβόλου, ακολουθώντας πάντα τις πρακτικές σωστής μεταβολή της διατομής που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.7. Η δομή των στρώσεων, για την προσθήκη ενίσχυσης, μετά τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι η εξής:

[±63/±50/±52/±45/±81/±85/±60/±40/±66/±35/±63/±76/±77/±72/±75/±38/±62/±72/±31/±57/±40/±81/±78/±61/±46/±36/±67/±64/±70/±72/±43/±42/±40/±65/±87/±70/±40/±50/±63/±50/±32/±35/±68/±76/±47/±56/±50]

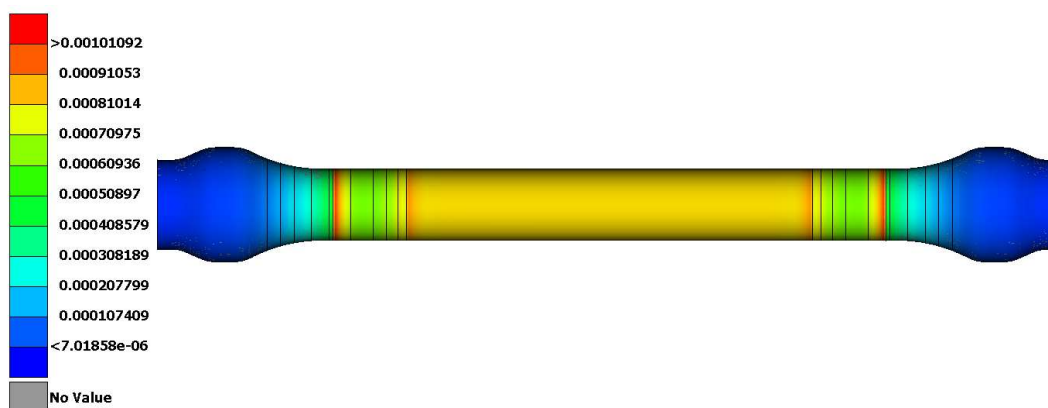
Για τις πρώτες δέκα στρώσεις το πάχος είναι 0.3 mm ενώ για τις επόμενες, μεταβάλλεται μεταξύ των 0.3 και των 0.2 mm ανά δύο, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος των 20 mm.

Για τη μείωση του πάχους του σύνθετου κατά μήκος του εμβόλου, αφαιρέθηκαν στρώσεις σταδιακά από την αρχική δομή, μέχρι το πάχος των 15 mm, το οποίο είναι το νέο συνολικό πάχος για τον κορμό του εμβόλου. Στις ακόλουθες εικόνες, δίδεται η δομή του εμβόλου από το μοντέλο δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων. Κάθε περιοχή με διαφορετικό χρώμα, αντιστοιχεί σε μια πλέξη με λιγότερες στρώσεις, με την πράσινη που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του εμβόλου να είναι η μικρότερη με πάχος 15 mm. Προφανώς, στο μοντέλο δύο διαστάσεων, η μεταβολή του πάχους δεν είναι ορατή. Τέλος οι οριακές συνθήκες είναι οι ίδιες με αυτές του μοντέλου πριν την προσθήκη ενίσχυσης, οπότε δεν παρουσιάζονται ξανά.

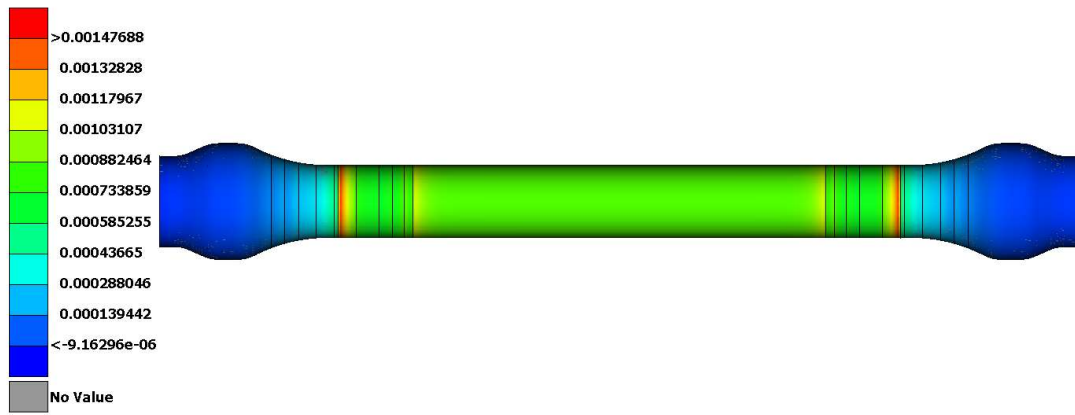


Εικόνα 4.46 Δομή σύνθετου υλικού μετά την προσθήκη ενίσχυσης.

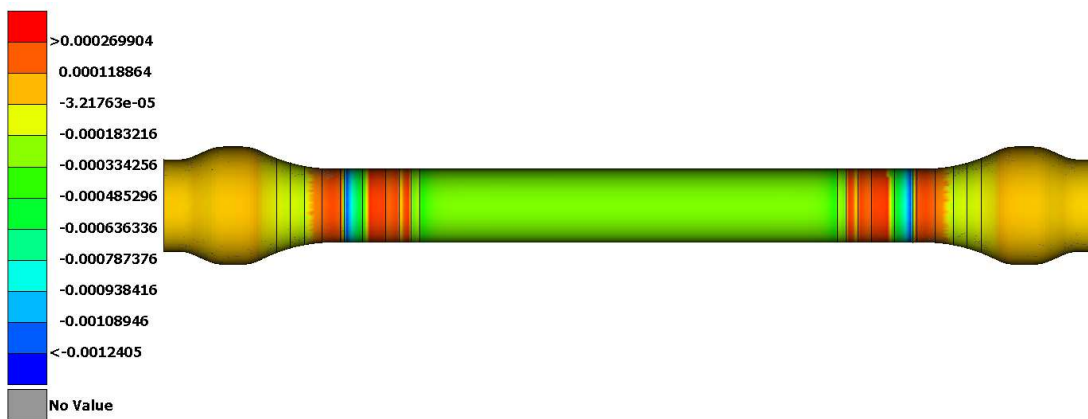
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του μοντέλου, παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες. Ομοίως με πριν, δίδονται οι τροπές στις κύριες διευθύνσεις, η διαμητική τροπή και ο δείκτης αστοχίας.



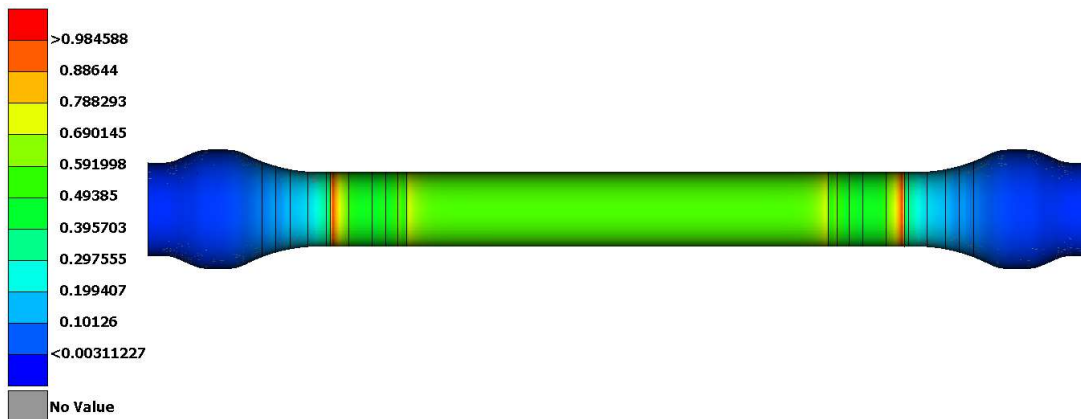
Εικόνα 4.47 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) για το μοντέλο με την επιπλέον ενίσχυση.



Εικόνα 4.48 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση y (Normal-2) για το μοντέλο με την επιπλέον ενίσχυση.



Εικόνα 4.49 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο 12 (Shear-12) για το μοντέλο με την επιπλέον ενίσχυση.



Εικόνα 4.50 Δείκτης αστοχίας για το μοντέλο με την επιπλέον ενίσχυση.

Στον παρακάτω πίνακα, δίδονται ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις οι μέγιστες τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας. Μετά την προσθήκη της ενίσχυσης, το σύνθετο υλικό αντέχει αν και οριακά την εσωτερική πίεση των 200 bar. Επιπλέον, ο Πίνακας 4.7 δίνει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και για τις πέντε διαφορετικές περιπτώσεις δομής σύνθετου υλικού μεταξύ των δύο εμβόλων. Τα έμβολα αριθμούνται από το αρχικό, πριν τη βελτιστοποίηση μέχρι το τελικό με την προσθήκη ενίσχυσης από 1 έως 5 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.6 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας της ενισχυμένης δομής.

	200 bar
Normal-1 (-)	0.00101
Normal-2 (-)	0.00148
Shear-12 (-)	0.00124
Failure Index (-)	0.985

Πίνακας 4.7 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας για τα πέντε μοντέλα δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

Έμβολο	1	2	3	4	5
Πίεση	200 bar	200 bar	200 bar	200 bar	200 bar
Norm-1	0.00168	0.00190	0.00153	0.00165	0.00101
Norm-2	0.00283	0.00209	0.00236	0.00171	0.00148
Sh-12	0.00284	0.00201	0.00209	0.00136	0.00124
F.I. (-)	1.888	1.391	1.574	1.193	0.985

Από τον πίνακα αυτό, γίνεται φανερό πως η ελάττωση των παραμορφώσεων στη διεύθυνση 2, συνεπάγεται την αύξηση τους στη διεύθυνση 1. Αυτό είναι λογικό, καθώς η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με την αλλαγή της γωνίας ορισμένων στρώσεων του σύνθετου υλικού, ώστε αυτές να συνεισφέρουν περισσότερο στη διεύθυνση εγκάρσια των ινών.

4.9 Μοντελοποίηση υδραυλικού εμβόλου – Μοντέλο στερεών στοιχείων

Παρά το γεγονός ότι, τα αρχικά έμβολα, χωρίς την ενίσχυση, είναι αρκετά λεπτά ώστε η ανάλυση τους να μπορεί να πραγματοποιηθεί ικανοποιητικά με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, παρατηρούνται ορισμένες διαφορές μεταξύ τους, καθώς τα τρισδιάστατα στοιχεία λαμβάνουν υπόψη και τα φαινόμενα στη διεύθυνση του πάχους. Επιπλέον, για το έμβολο με την πρόσθετη ενίσχυση, οι τιμές αυτές διαφέρουν αρκετά, καθώς το πάχος του είναι αρκετά μεγαλύτερο από το αρχικό, λόγω των επιπλέον στρώσεων. Γενικά, η οριακή τιμή του λόγου της εξωτερικής προς την εσωτερική διάμετρο, για τον οποίο τα μοντέλα με δισδιάστατα στοιχεία είναι ικανοποιητικά είναι το 1.2 [10]. Έτσι από τα έμβολα που αναλύθηκαν με δισδιάστατα στοιχεία, το έμβολο με το μικρότερο δείκτη αστοχίας πριν και μετά την προσθήκη ενίσχυσης, μοντελοποιούνται και με τρισδιάστατα στοιχεία, δηλαδή με στερεά στοιχεία (solid elements). Οι περιπτώσεις φόρτισης, καθώς και οι οριακές συνθήκες παραμένουν οι ίδιες.

4.9.1 Ορισμός υλικών και ιδιοτήτων

Όσον αφορά τα μεταλλικά μέρη, αυτά ήταν ήδη μοντελοποιημένα με στερεά στοιχεία, οπότε δεν χρειάστηκαν περαιτέρω επεξεργασία. Τόσο το υλικό από το οποίο αποτελούνται, όσο και οι ιδιότητες τους παρέμειναν ως είχαν. Αντίθετα, για το σύνθετο υλικό, καθώς πλέον τα δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία αντικαθίστανται με τρισδιάστατα, θα πρέπει να οριστούν οι ιδιότητες τους λαμβάνοντας υπόψη και την τρίτη διάσταση. Λόγω της εγκάρσιας ισοτροπικότητας που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4, το μέτρο ελαστικότητας E3 στην τρίτη διάσταση θα ισούται με το μέτρο ελαστικότητας E2. Επιπλέον, ορίζονται και οι λόγοι Poisson στις τρεις διευθύνσεις ως:

$$\nu_{12} = 0.278$$

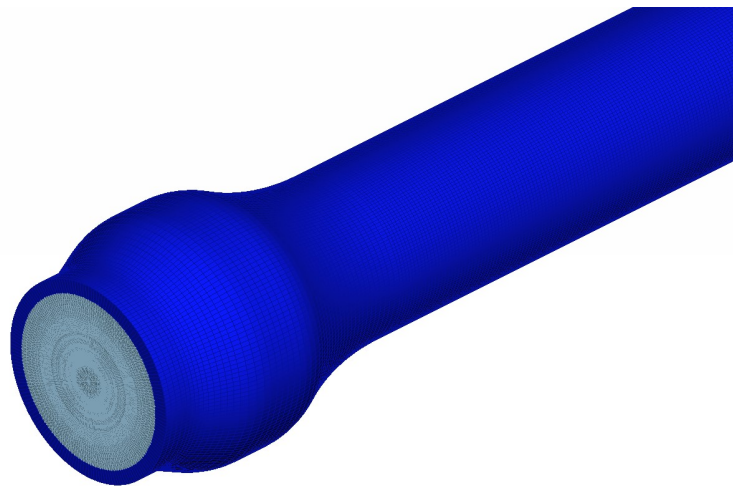
ομοίως με την περίπτωση των δύο διαστάσεων και

$$\nu_{23} = 0.45 \quad \text{και} \quad \nu_{31} = 0.013.$$

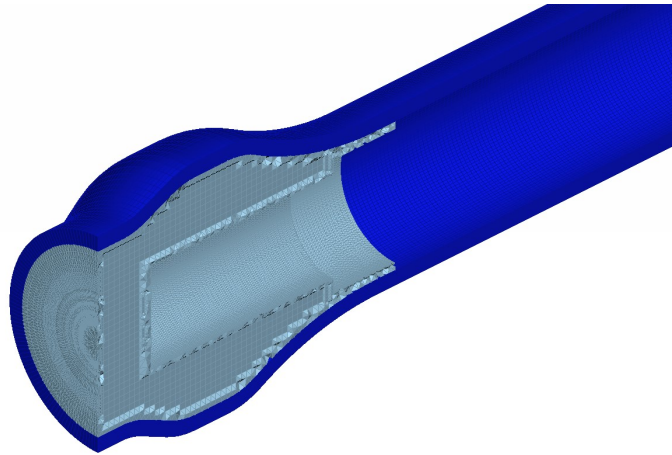
Τέλος, η αλληλουχία των στρώσεων για το εκάστοτε έμβολο, είναι η βέλτιστη που βρέθηκε από τα αντίστοιχα μοντέλα με τα στοιχεία δύο διαστάσεων.

4.9.2 Δημιουργία τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων

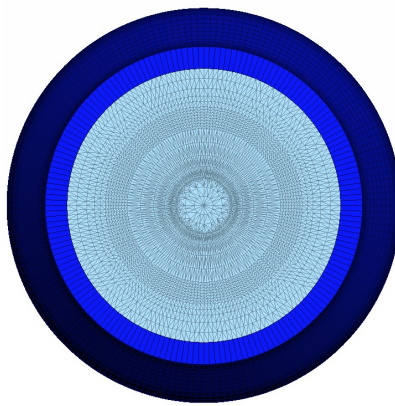
Καθώς το σύνθετο υλικό είναι ορθοτροπικό, για να είναι σωστά τα μοντέλα, αλλά και συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα των δισδιάστατων στοιχείων, έγινε σχηματισμός των στερεών πεπερασμένων στοιχείων, από τα αρχικά δισδιάστατα στοιχεία. Επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης, καθώς η διατήρηση του προσανατολισμού σε ένα μοντέλο με σύνθετα υλικά, είναι πολύ δύσκολος έως αδύνατος με οποιονδήποτε άλλο τρόπο. Έτσι για κάθε ένα στοιχείο δύο διαστάσεων, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο στοιχείο, με το μήκος της τρίτης διάστασης να είναι το άθροισμα του πάχους των στρώσεων. Ήταν έτσι εφικτή και η μεταβολή των ιδιοτήτων της δομής του σύνθετου υλικού, χωρίς να αλλάξει ο προσανατολισμός των στοιχείων. Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται τα στερεά μοντέλα των δύο εμβόλων από τον προ-επεξεργαστή.



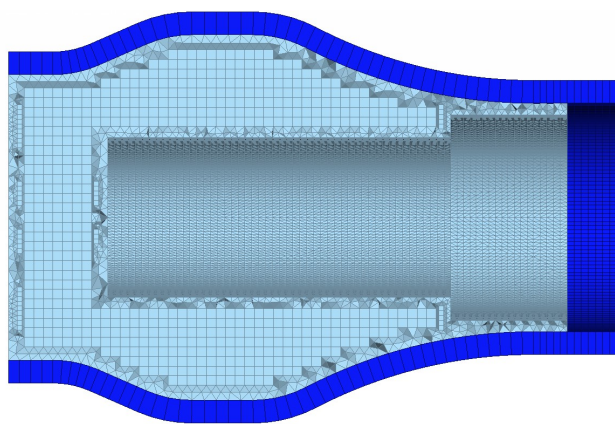
Εικόνα 4.51 Μοντέλο στερεών πεπερασμένων στοιχείων για τη βέλτιστη πλέξη σύνθετου υλικού.



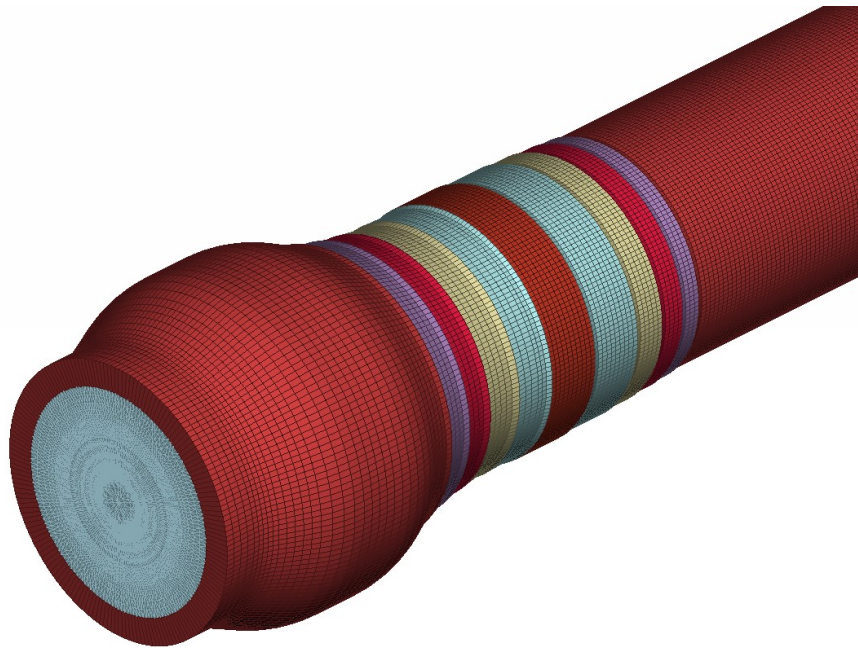
Εικόνα 4.52 Τομή μοντέλου στερεών πεπερασμένων στοιχείων για τη βέλτιστη πλέξη σύνθετου υλικού.



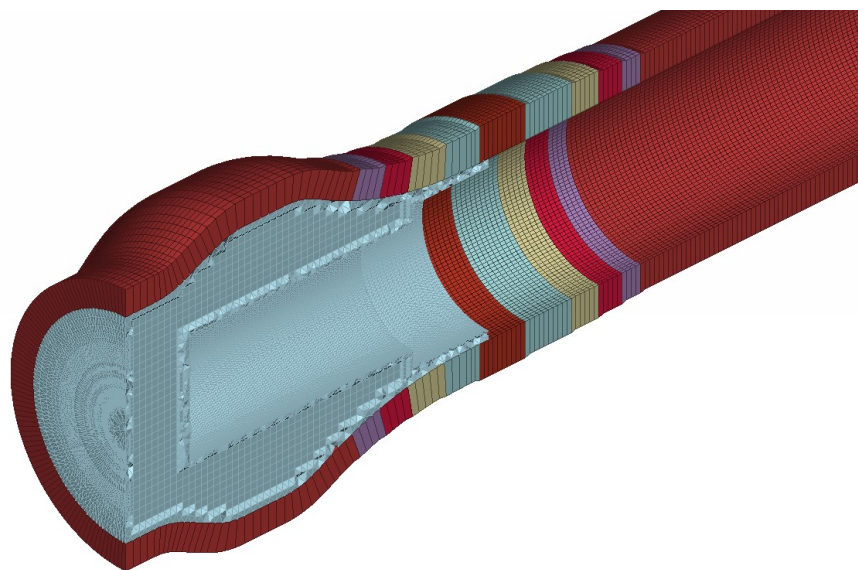
Εικόνα 4.53 Πλάγια όψη μοντέλου στερεών πεπερασμένων στοιχείων για τη βέλτιστη πλέξη του σύνθετου υλικού.



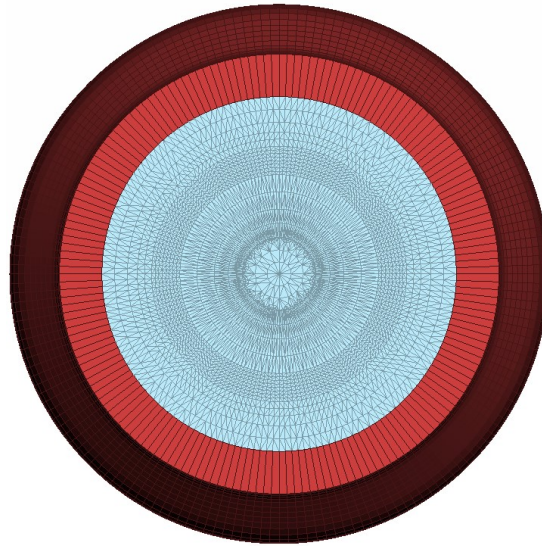
Εικόνα 4.54 Τομή πρόωσης του στερεού μοντέλου για τη βέλτιστη πλέξη του σύνθετου υλικού.



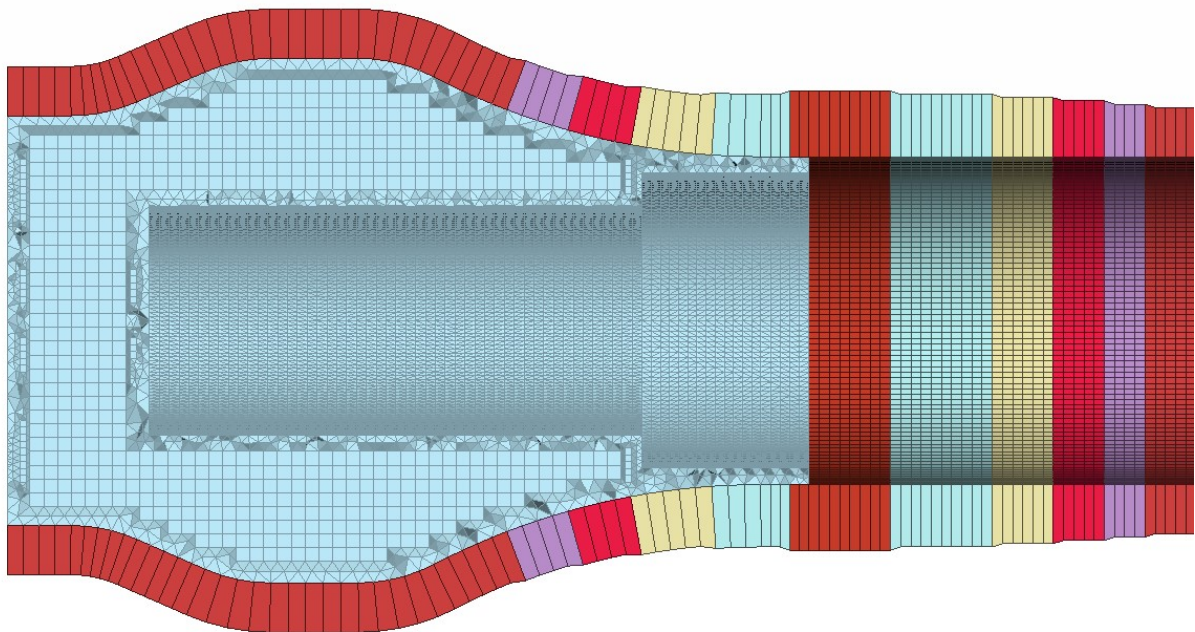
Εικόνα 4.55 Μοντέλο στερεών στοιχείων για το έμβολο με την πρόσθετη ενίσχυση.



Εικόνα 4.56 Τομή μοντέλου στερεών στοιχείων για το έμβολο με την πρόσθετη ενίσχυση.



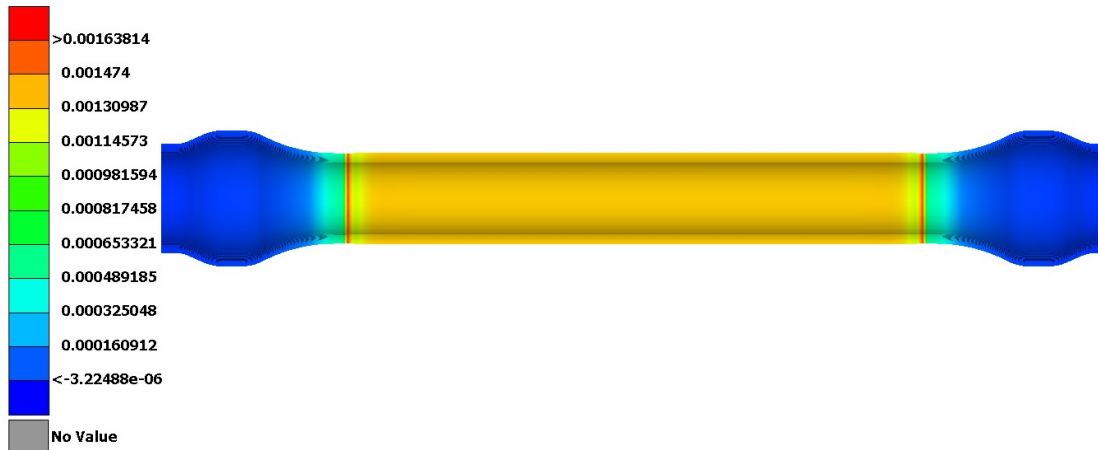
Εικόνα 4.57 Πλάγια όψη μοντέλου στερεών πεπερασμένων στοιχείων με την πρόσθετη ενίσχυση.



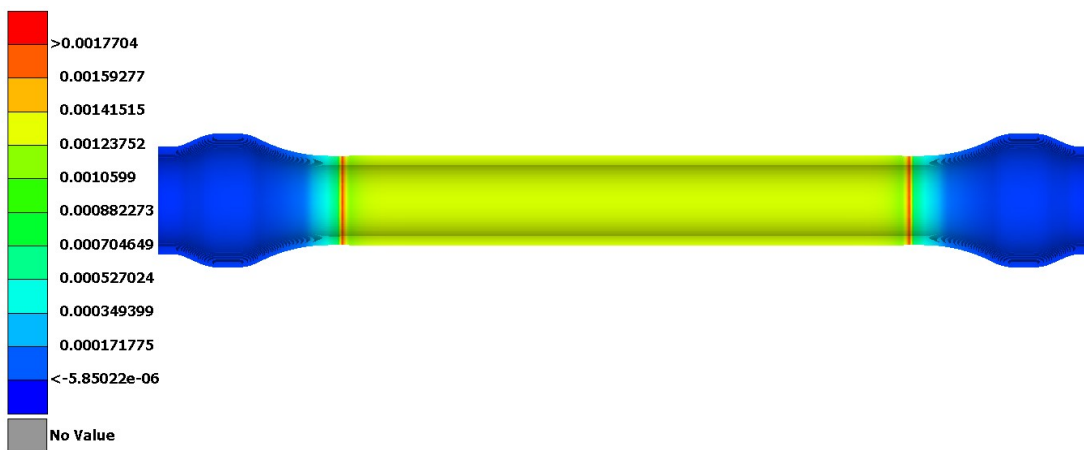
Εικόνα 4.58 Τομή πρόοψης του στερεού μοντέλου με την πρόσθετη ενίσχυση.

Στην Εικόνα 4.58 φαίνεται ευκρινώς η μεταβολή του πάχους με την προσθήκη της επιπλέον ενίσχυσης, καθώς και τα διάφορα στάδια μεταβολής της διατομής.

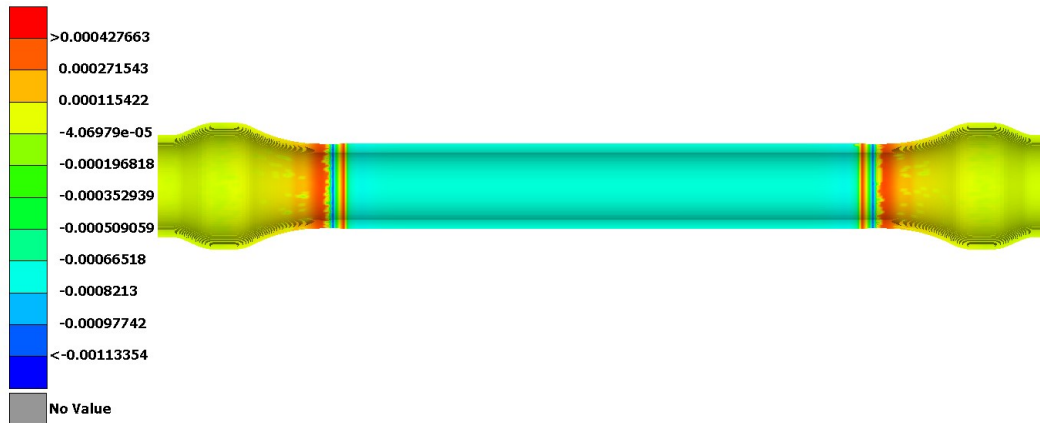
Ακολούθως, δίδονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης των δύο αυτών μοντέλων, μέσα από το λογισμικό μετά-επεξεργασίας. Από την Εικόνα 4.59 έως την Εικόνα 4.62 δίνονται τα αποτελέσματα για το μοντέλο χωρίς την ενίσχυση, ενώ από την Εικόνα 4.63 έως την Εικόνα 4.66 δίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το ενισχυμένο μοντέλο.



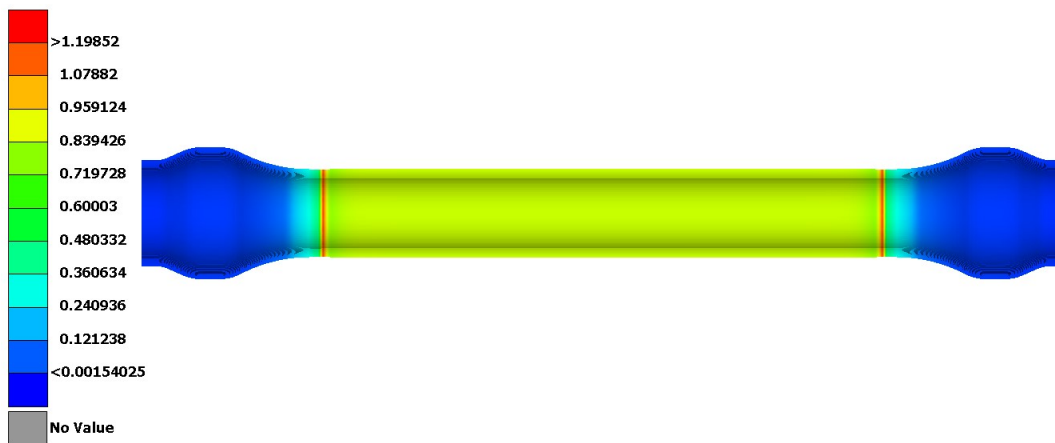
Εικόνα 4.59 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) για το στερεό μοντέλο με τη βέλτιστη δομή.



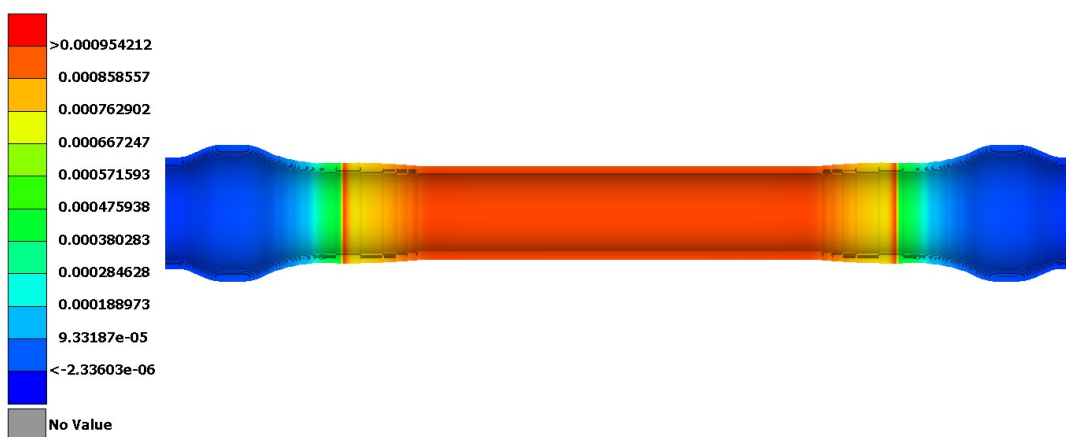
Εικόνα 4.60 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση y (Normal-2) για το στερεό μοντέλο με τη βέλτιστη δομή.



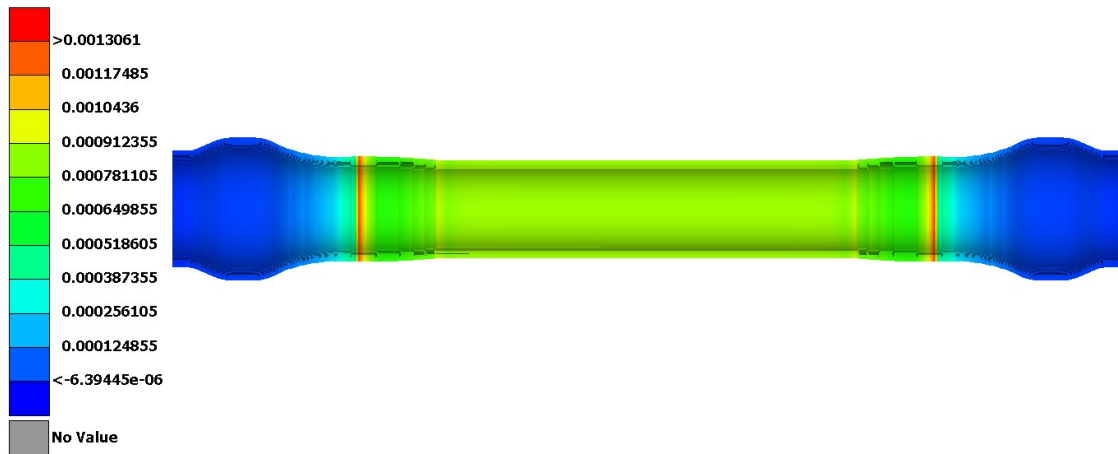
Εικόνα 4.61 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο (Shear-12) για το στερεό μοντέλο με τη βέλτιστη δομή.



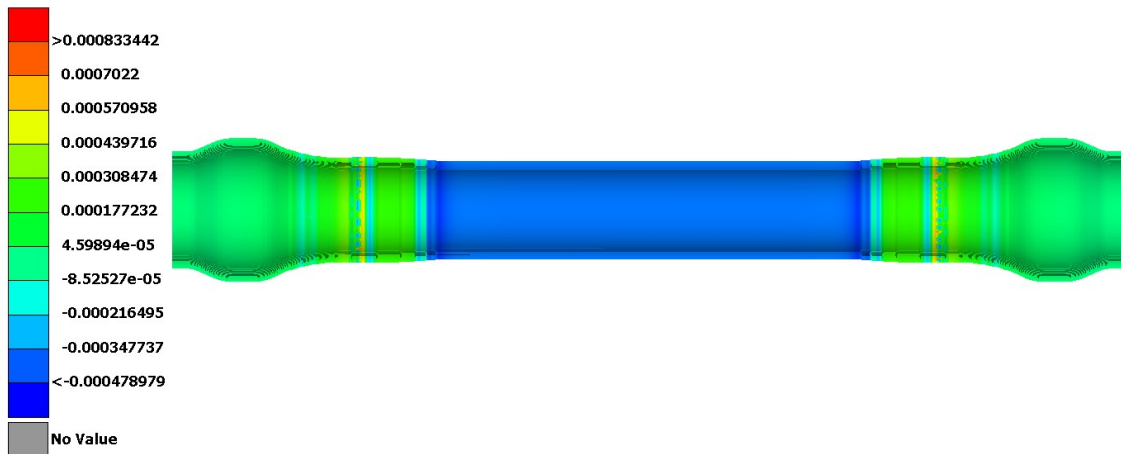
Εικόνα 4.62 Δείκτης αστοχίας για το στερεό μοντέλο με τη βέλτιστη δομή.



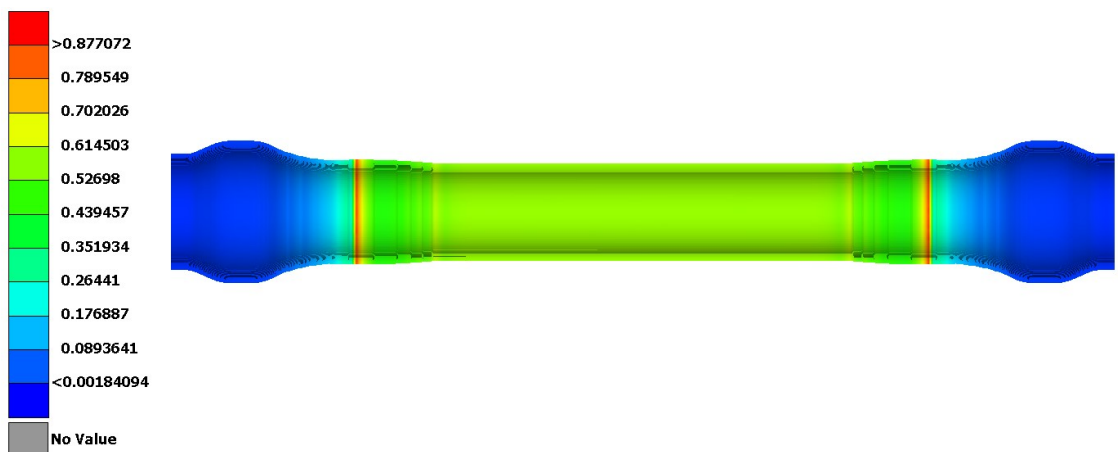
Εικόνα 4.63 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) για το ενισχυμένο μοντέλο.



Εικόνα 4.64 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση y (Normal-2) για το ενισχυμένο μοντέλο.



Εικόνα 4.65 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο 12 (Shear-12) για το ενισχυμένο μοντέλο.



Εικόνα 4.66 Δείκτης αστοχίας για το ενισχυμένο μοντέλο.

Στους ακόλουθο πίνακα, δίδονται οι τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας για τα δύο αυτά μοντέλα στερεών στοιχείων. Οι αριθμός 1 και 2 αντιστοιχούν στο έμβολο χωρίς ενίσχυση και στο έμβολο με την ενίσχυση αντίστοιχα.

Πίνακας 4.8 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας για τα δύο μοντέλα στερεών πεπερασμένων στοιχείων.

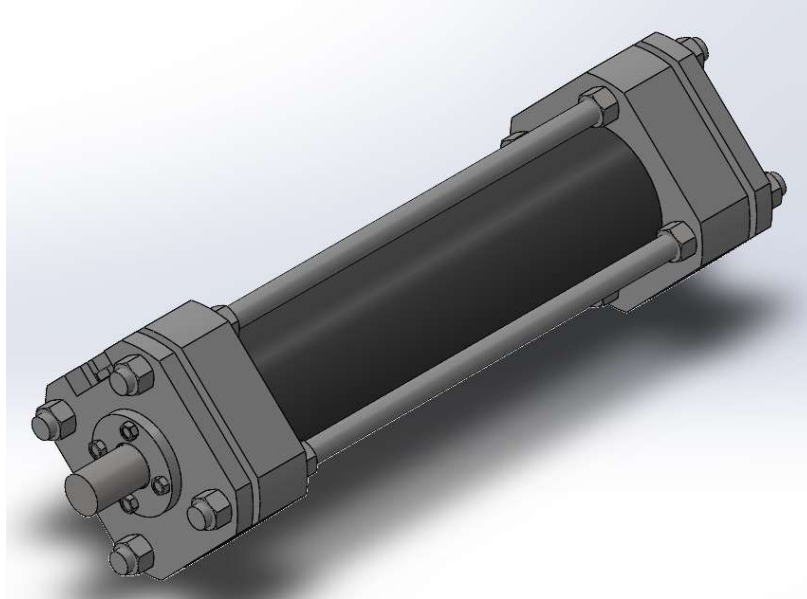
Μοντέλο	1	2
Πίεση	200 bar	200 bar
Normal-1 (-)	0.00163	0.00095
Normal-2 (-)	0.00177	0.00131
Shear-12 (-)	0.00113	0.00083
Failure Index (-)	1.198	0.877

Συγκρίνοντας τις τιμές του παραπάνω πίνακα, με τις τιμές των αντίστοιχων μοντέλων των δύο διαστάσεων που περιλαμβάνει ο Πίνακας 4.7, γίνεται φανερή η επίδραση του πάχους στην απόκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων μοντέλων. Συγκεκριμένα, ενώ για το μοντέλο χωρίς την ενίσχυση η απόκλιση είναι περίπου 0.5 %, για το έμβολο με την ενίσχυση, που το τοίχωμα του είναι αρκετά πιο παχύ, η απόκλιση είναι της τάξης του 10%. Το έμβολο χωρίς την ενίσχυση μπορεί να λειτουργήσει σε πιέσεις κάτω των 166.87 bar, που είναι η οριακή τιμή για έναν συντελεστή ασφαλείας στη μονάδα, ενώ το έμβολο με την ενίσχυση μπορεί να λειτουργήσει σε πιέσεις κάτω των 228.03 bar με συντελεστή ασφαλείας στη μονάδα.

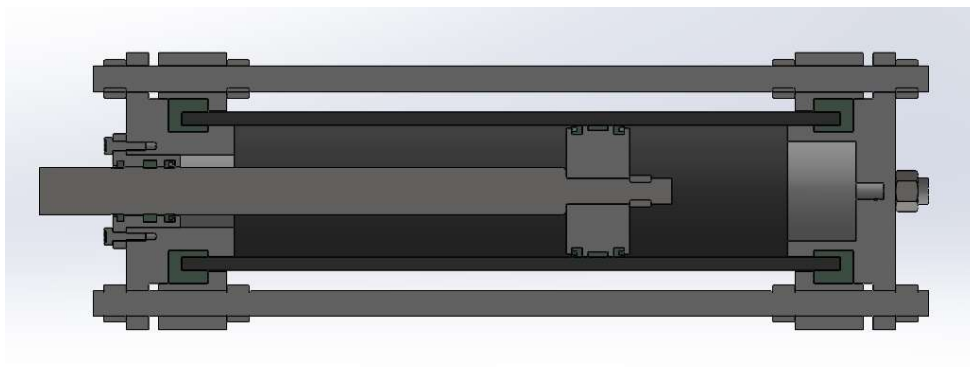
5 ΎΜΒΟΛΟ ΣΥΓΚΡΑΤΙΣΗΣ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ

5.1 Απλό μοντέλο δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων - Αριθμητική Επίλυση

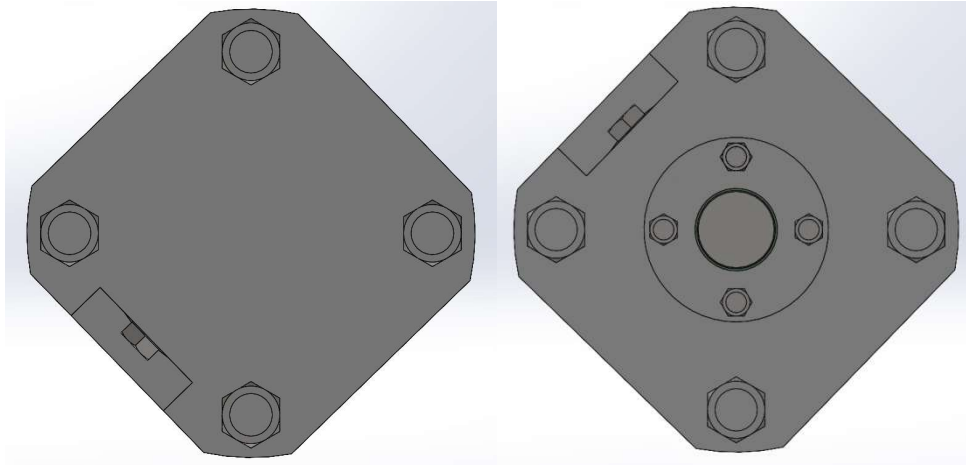
Ομοίως με την περίπτωση του εμβόλου απευθείας περιέλιξης επάνω στα μεταλλικά μέρη, εξετάστηκε και ένα έμβολο στο οποίο τα μεταλλικά πώματα ασφαίζονται με τη χρήση ράβδους. Στις ακόλουθες εικόνες, δίδονται οι όψεις του υδραυλικού εμβόλου από το λογισμικό CAD.



Εικόνα 5.1 Ισομετρική όψη εμβόλου με ράβδους.



Εικόνα 5.2 Τομή πρόοψης κατά μήκος του εμβόλου.

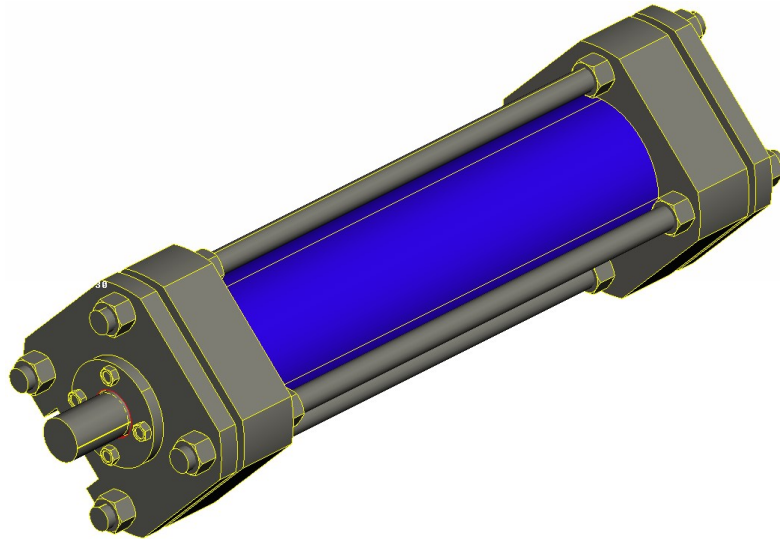


Εικόνα 5.3 Πλάγιες όψεις εμβόλου με ράβδους.

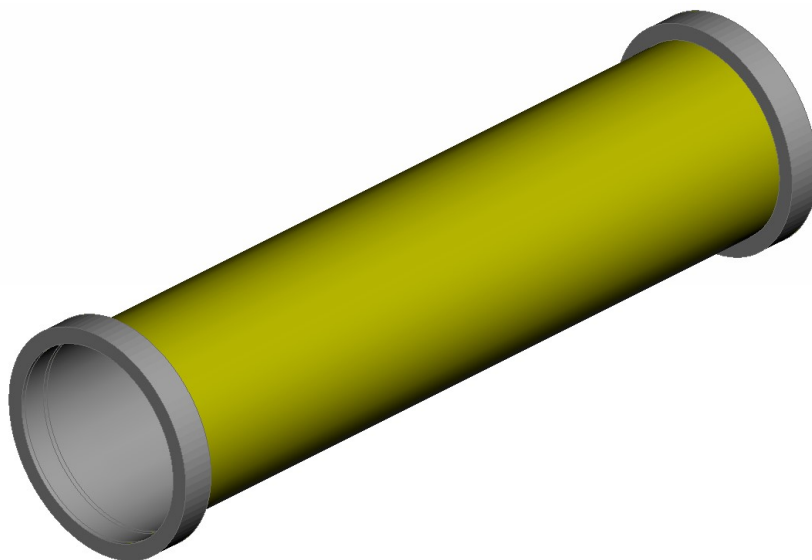
Και σε αυτό το μοντέλο, έγιναν ορισμένες παραδοχές και απλοποιήσεις, όμοια με αυτές που έγιναν στην παράγραφο 4.4.1. Αρχικά, η ανάλυση γίνεται για την ίδια περίπτωση φόρτισης από εσωτερική πίεση, οπότε θεωρείται στατική. Καθώς το πρώτο μοντέλο εξετάζει μόνο την εσωτερική πίεση, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη δύναμη σύσφιξης από τις ράβδους, αφαιρούνται πλήρως τα μεταλλικά μέρη του εμβόλου. Αυτή η απλοποίηση μπορεί να γίνει καθώς το σύνθετο υλικό δεν έρχεται απευθείας σε επαφή με τα πόματα, αλλά εφάπτεται σε στεγανοποιητικά. Επιπλέον, το μήκος του εμβόλου είναι επαρκώς μεγάλο ώστε τα φαινόμενα που εξετάζει η παρούσα μελέτη να παραμένουν αναλλοίωτα στον κορμό του.

Φυσικά, αντί των μεταλλικών τμημάτων του εμβόλου, έγινε κατάλληλος ορισμών των οριακών συνθηκών, δηλαδή τοποθετούνται πακτώσεις στα σημεία που θα επιδρούσαν τα μεταλλικά μέρη, ώστε να τα αντιπροσωπεύουν. Προφανώς, εφόσον δεν λαμβάνεται υπόψη η δύναμη σύσφιξης των μεταλλικών πωμάτων, οι πακτώσεις θα είναι πλήρης και στις δύο πλευρές. Εξετάστηκε έτσι μόνο η καταπόνηση του σύνθετου υλικού από την εσωτερική πίεση, χωρίς την προέκταση που του εφαρμόζεται από τις μεταλλικές ραβδους.

Τέλος, ομοίως με πριν, η μελέτη έγινε αρχικά για λεπτό σύνθετο υλικό, οπότε από τον κύλινδρο αφαιρούνται όλες οι επιφάνειες πλην της εξωτερικής, ώστε αυτός να αναπαρασταθεί με δισδιάστατα στοιχεία. Από τα στεγανοποιητικά, μοντελοποιούνται μόνο τα εξωτερικά μέρη που συνεισφέρουν στη συγκράτηση του σύνθετου υλικού έναντι της εσωτερικής πίεσης, κανονικά, με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Στις παρακάτω εικόνες, δίδεται η μορφή το εμβόλου όπως αυτό αρχικά εισάγεται στο λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια η τελική του μορφή, επάνω στην οποία γίνεται η ανάλυση.

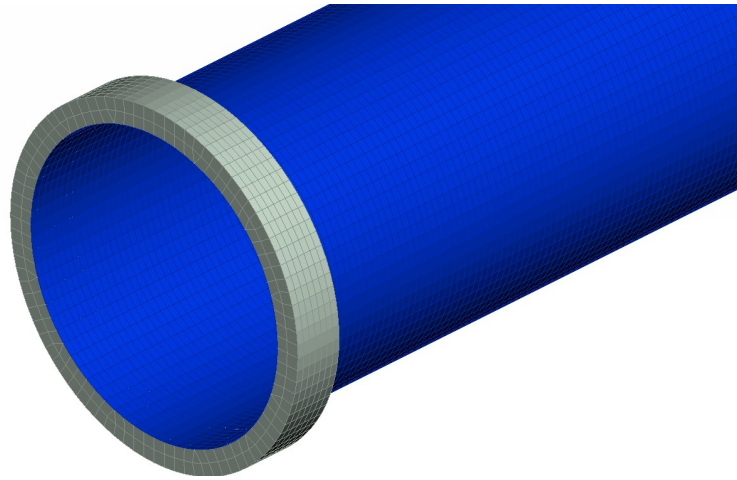


Εικόνα 5.4 Μοντέλο με απευθείας εισαγωγή από το λογισμικό CAD.



Εικόνα 5.5 Δισδιάστατο μοντέλο μετά τις απλοποιήσεις.

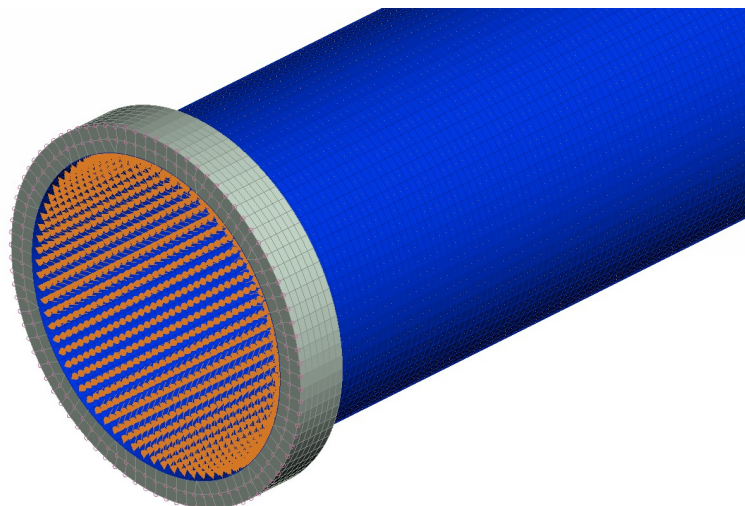
Έπειτα, σχηματίστηκε το πλέγμα επάνω στον κύλινδρο, ώστε αυτός αν διαιρεθεί σε πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά, ομοίως με πριν θα είναι τετράπλευρα, ώστε κατά την δημιουργία του αντίστοιχου μοντέλου από στερεά στοιχεία, αυτά να είναι εξάεδρα. Έτσι, στην Εικόνα 5.6 φαίνεται το πλέγμα του κυλίνδρου από το σύνθετο υλικό. Στην προκειμένη περίπτωση, καθώς το πρόβλημα ήταν απλό, το πλέγμα έχει μήκος 5 mm.



Εικόνα 5.6 Πλέγμα μοντέλου εμβόλου σύσφιξης με ράβδους.

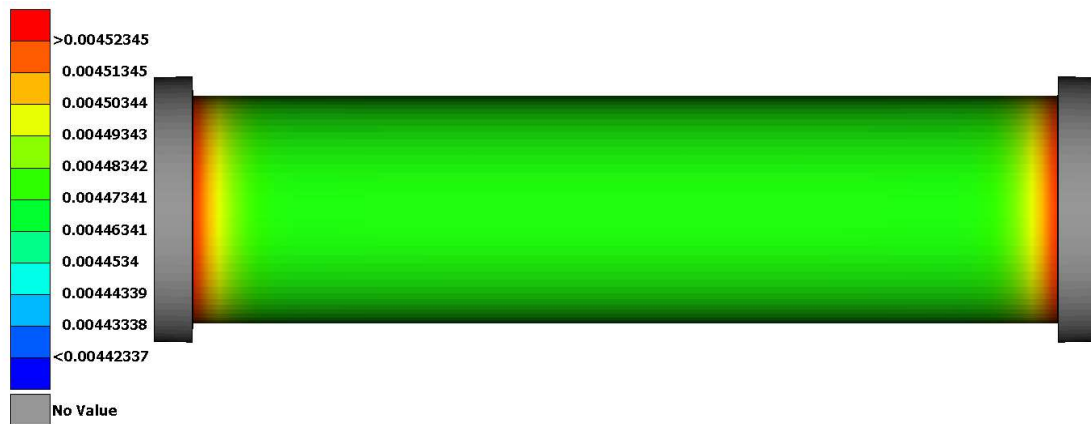
Για το εν λόγω έμβολο, η δομή του σύνθετου υλικού, με πάχος στρώσης 0.2 mm είναι η εξής:
 $[\pm 56/\pm 38/\pm 49/\pm 71/\pm 84/\pm 38/\pm 63/\pm 54/\pm 39/\pm 61/\pm 41/\pm 73/87/87/\pm 82/\pm 56/\pm 61/\pm 41/\pm 50/\pm 53/\pm 42/\pm 84/\pm 78/\pm 38/\pm 51/\pm 41]$.

Καθώς το έμβολο αυτής της κατασκευής, είναι κατασκευασμένο όμοια με αντίστοιχα έμβολα για βαριές εργασίες (heavy duty) η εσωτερική πίεση στην οποία εξετάζεται ανέρχεται στα 400 bar, κατανομημένα σε κυλινδρική επιφάνεια μήκους 460 mm και διαμέτρου 100 mm. Τέλος, για την απλή ανάλυση της εσωτερικής πίεσης, οι τσιμούχες θεωρούνται πακτωμένες και στις δύο πλευρές. Στην ακόλουθη εικόνα, φαίνονται οι οριακές συνθήκες για την εν λόγω ανάλυση. Παρουσιάζεται μόνο η μία πλευρά, καθώς το μοντέλο είναι συμμετρικό.

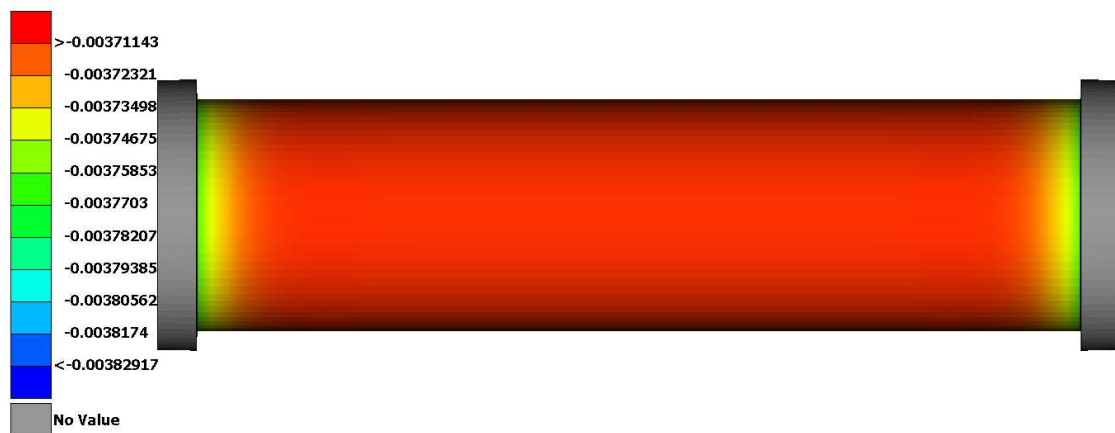


Εικόνα 5.7 Οριακές συνθήκες μοντέλου

Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο λογισμικό μετά-επεξεργασίας για την περίπτωση εσωτερικής πίεσης 400 bar.



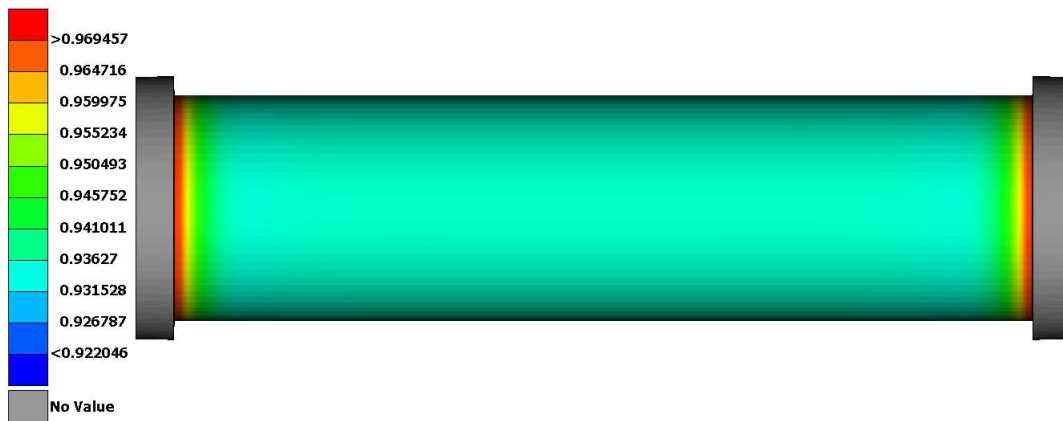
Εικόνα 5.8 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar.



Εικόνα 5.9 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση y (Normal-2) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar



Εικόνα 5.10 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο 12 (Shear-12) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar



Εικόνα 5.11 Δείκτης αστοχίας εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar

Ο Πίνακας 5.1 δίνει τις μέγιστες τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας για το μοντέλο των δισδιάστατων στοιχείων.

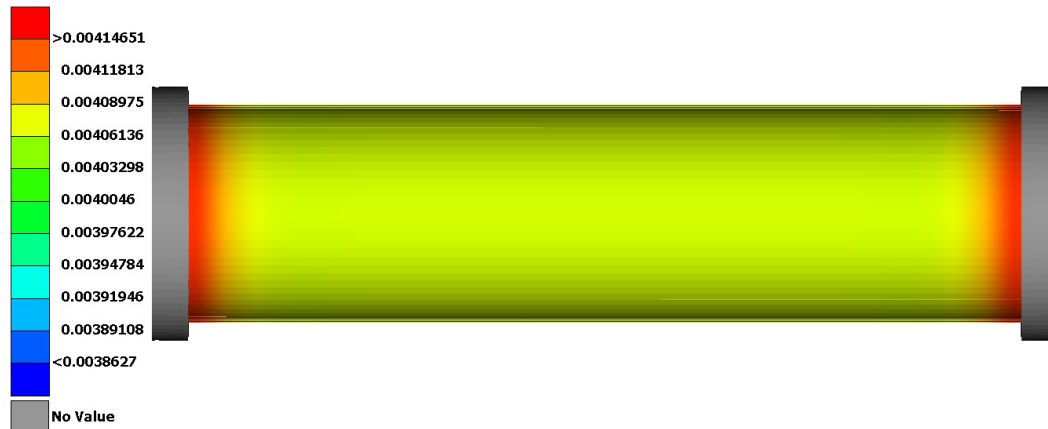
Πίνακας 5.1 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας του εμβόλου heavy duty.

	400 bar
Normal-1 (-)	0.00452
Normal-2 (-)	0.00383
Shear-12 (-)	0.00835
Failure Index (-)	0.969

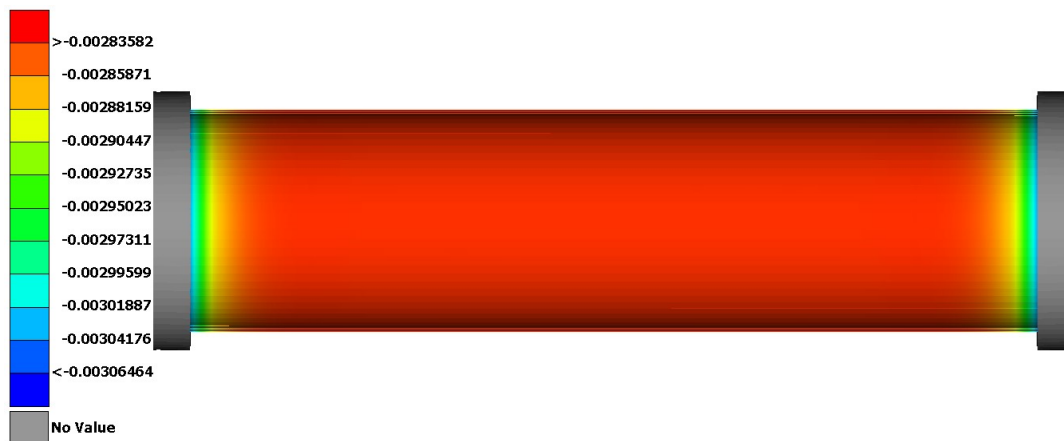
Στον πίνακα αυτό, οι τιμές των τροπών δίνονται κατά απόλυτη τιμή, καθώς οι αρνητικές τιμές που εμφανίζονται στις παραπάνω εικόνες, αποτελούν ουσιαστικά τροπές με τη μορφή συμπίεσης.

5.2 Απλό μοντέλο τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων - Αριθμητική Επίλυση

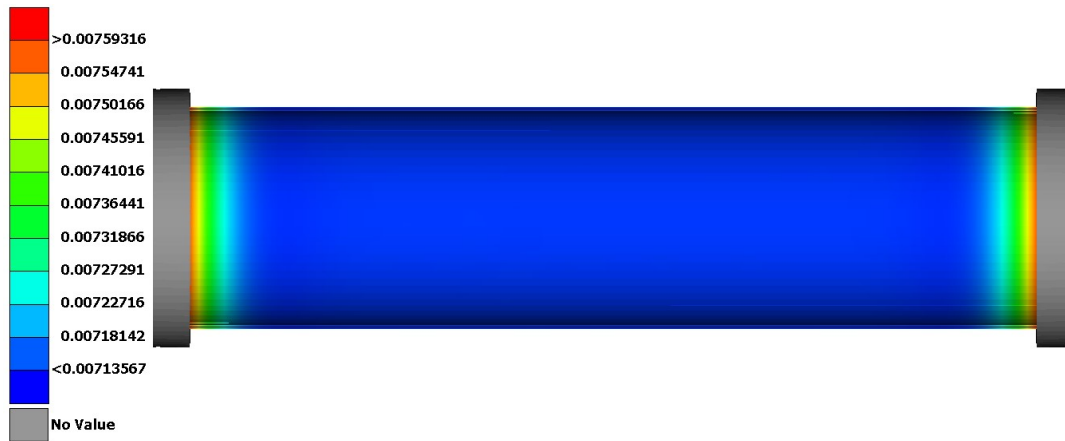
Ομοίως με τα έμβολα της παραγράφου 4, το εν λόγω έμβολο μοντελοποιήθηκε και με στερεά στοιχεία, για την περίπτωση της εσωτερικής πίεσης. Ο σχηματισμός των στερεών πεπερασμένων στοιχείων, έγινε και πάλι από τα αντίστοιχα δισδιάστατα. Στις παρακάτω εικόνες, δίνεται το μοντέλο των στερεών πεπερασμένων στοιχείων για το εν λόγω έμβολο. Οι οριακές συνθήκες παρέμειναν οι ίδιες, οπότε δεν παρουσιάζονται ξανά.



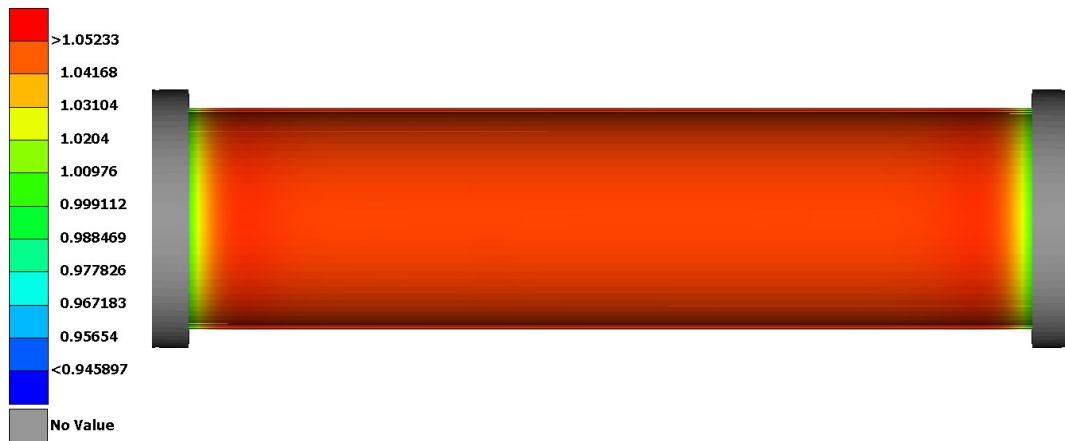
Εικόνα 5.12 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το στερεό μοντέλο.



Εικόνα 5.13 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση y (Normal-2) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το στερεό μοντέλο.



Εικόνα 5.14 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο 12 (Shear-12) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το στερεό μοντέλο.



Εικόνα 5.15 Δείκτης αστοχίας εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το στερεό μοντέλο.

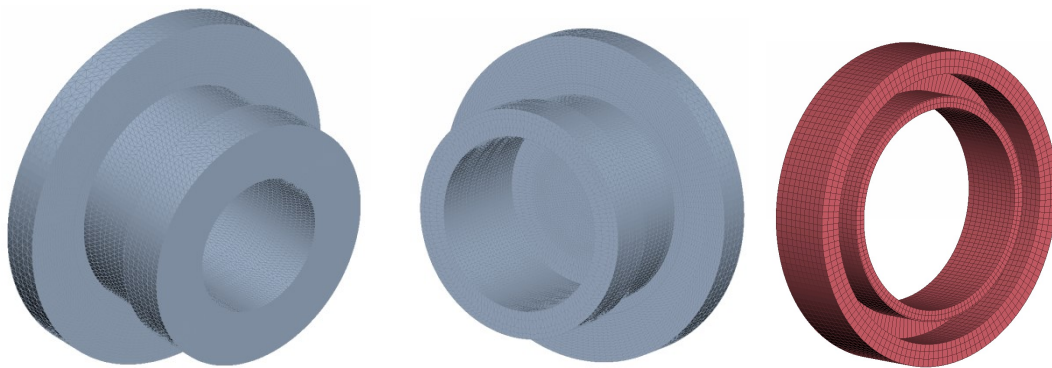
Στον παρακάτω πίνακα, δίνονται οι μέγιστες τιμές των τροπών και του δείκτη αστοχίας για το στερεό αυτό μοντέλο, όμοια με τον πίνακα για τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου δισδιάστατων στοιχείων. Ομοίως με πριν, οι τιμές εμφανίζονται κατά απόλυτη τιμή.

Πίνακας 5.2 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας του εμβόλου heavy duty στο στερεό μοντέλο.

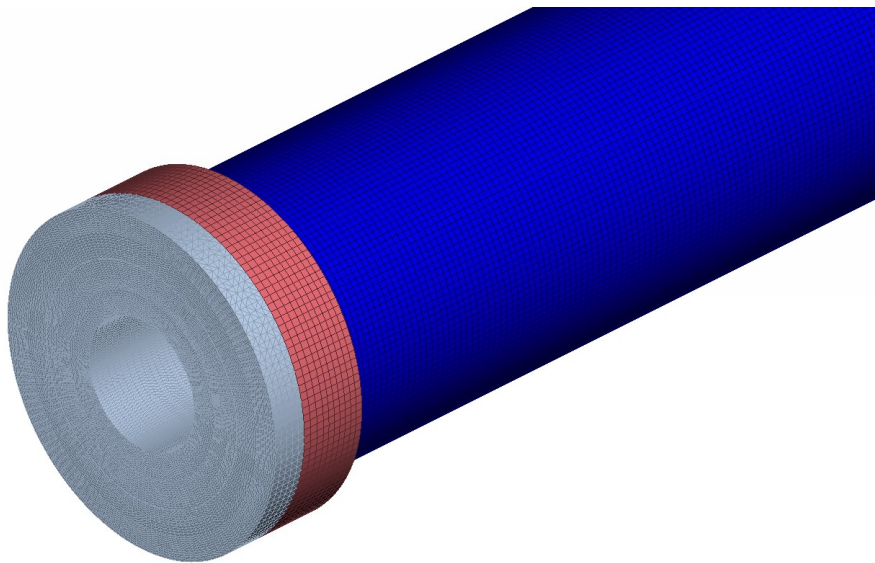
	400 bar
Normal-1 (-)	0.00415
Normal-2 (-)	0.00306
Shear-12 (-)	0.00759
Failure Index (-)	1.052

5.3 Πλήρες μοντέλο στερεών πεπερασμένων στοιχείων - Αριθμητική Επίλυση

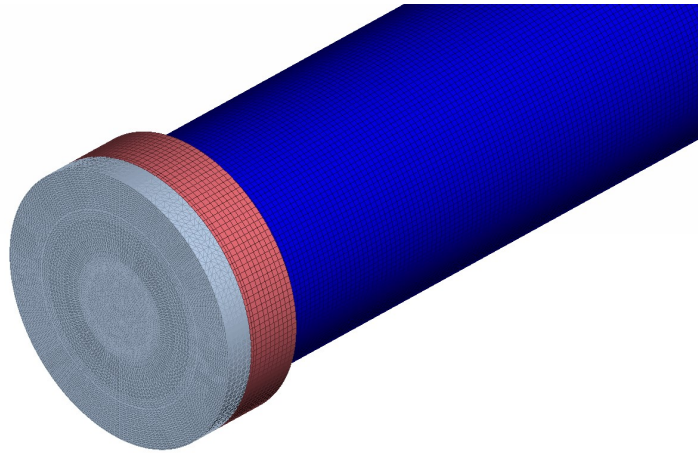
Προκειμένου να ληφθούν υπόψη και τα φαινόμενα που προκύπτουν από την εφαρμογή της δύναμης σύσφιξης από τις ράβδους, έγινε μελέτη και ενός πιο σύνθετου μοντέλου, όπου συμπεριλαμβάνονται τα μεταλλικά μέρη καθώς και η δύναμη της σύσφιξης, με μέτρο 140 kN. Σε αυτή την περίπτωση, οι οριακές συνθήκες αλλάζουν, με τη μία μεταλλική επιφάνεια να είναι πλήρως πακτωμένη, ενώ η άλλη μπορεί να κινηθεί μόνο κατά μήκος των ράβδων, για να προσομοιαστεί η δύναμη σύσφιξης. Στις ακόλουθες εικόνες, δίδεται το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες.



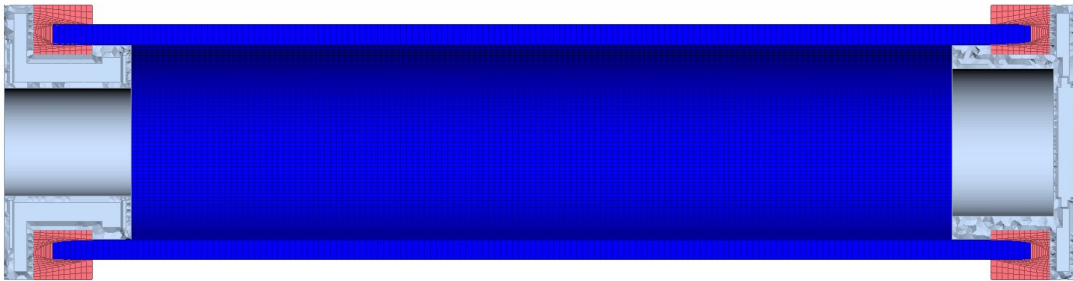
Εικόνα 5.16 Μεταλλικά πόματα και στεγανοποιητικό στοιχείο πλήρους στερεού μοντέλου.



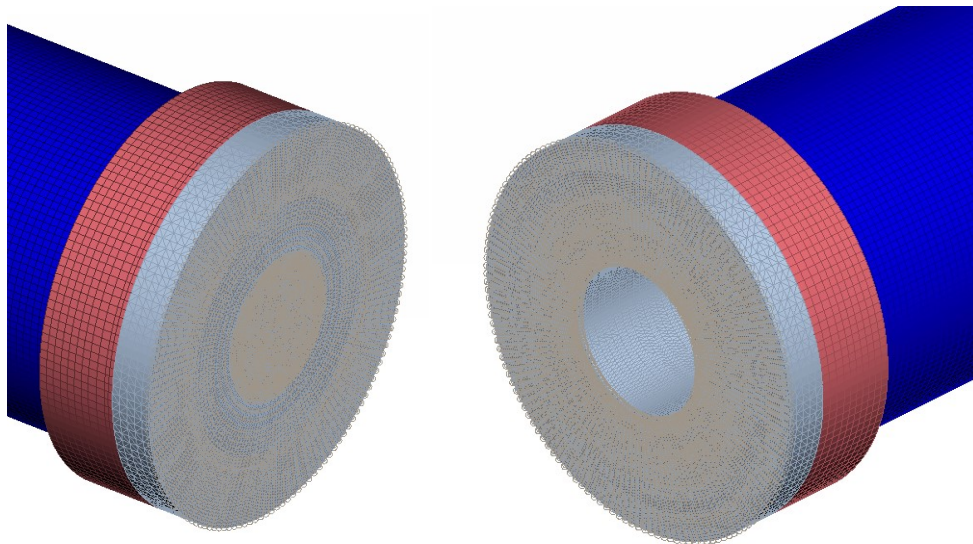
Εικόνα 5.17 Πλήρες μοντέλο στερεών πεπερασμένων στοιχείων εμβόλου σύσφιξης με ράβδους, πλευρά εφαρμογής της δύναμης σύσφιξης.



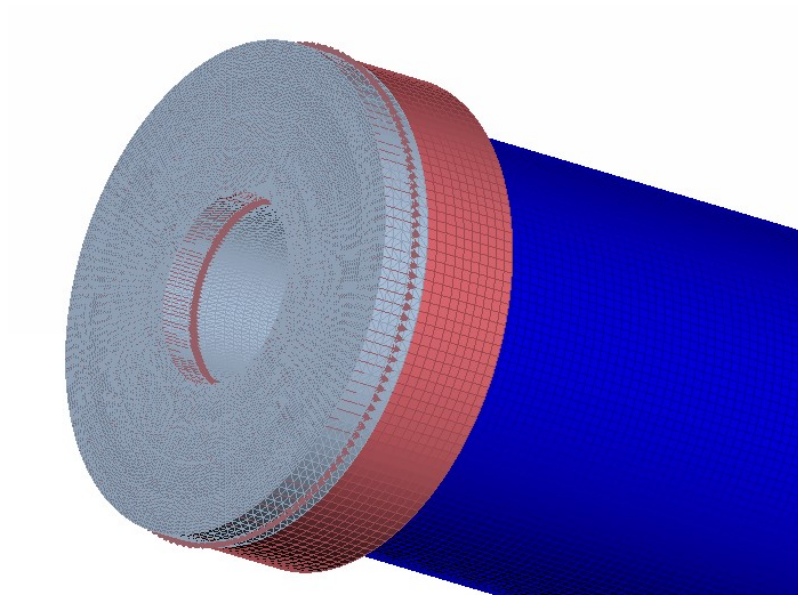
Εικόνα 5.18 Πλήρες μοντέλο στερεών πεπερασμένων στοιχείων εμβόλου σύσφιξης με ράβδους, πλευρά εφαρμογής της πλήρους πάκτωσης.



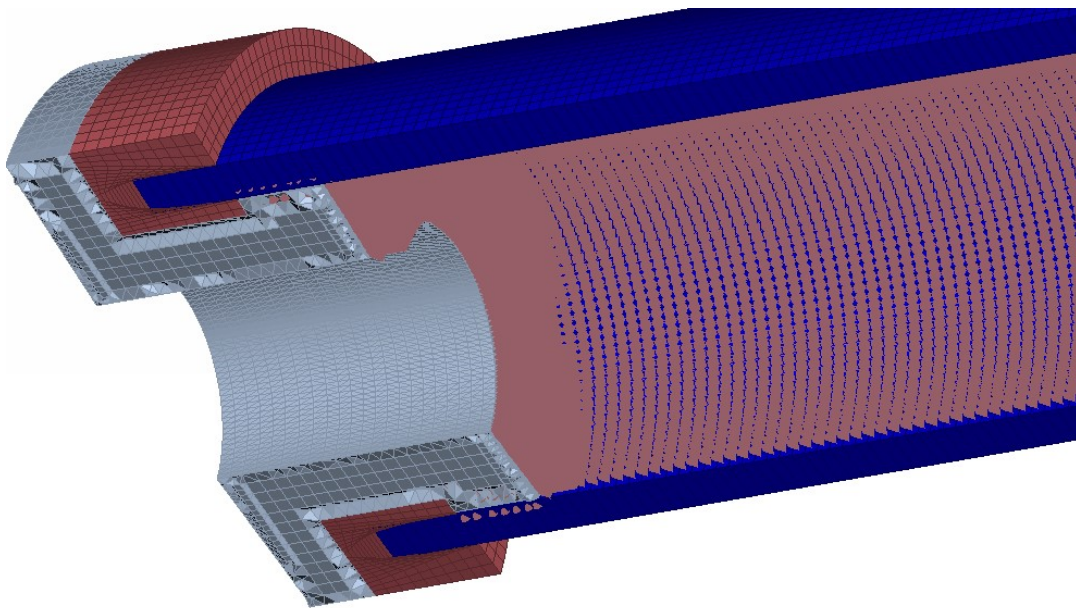
Εικόνα 5.19 Τομή πρόωσης μοντέλου στερεών πεπερασμένων στοιχείων εμβόλου σύσφιξης με ράβδους,



Εικόνα 5.20 Οριακές συνθήκες πλήρους στερεού μοντέλου, πάκτωση.

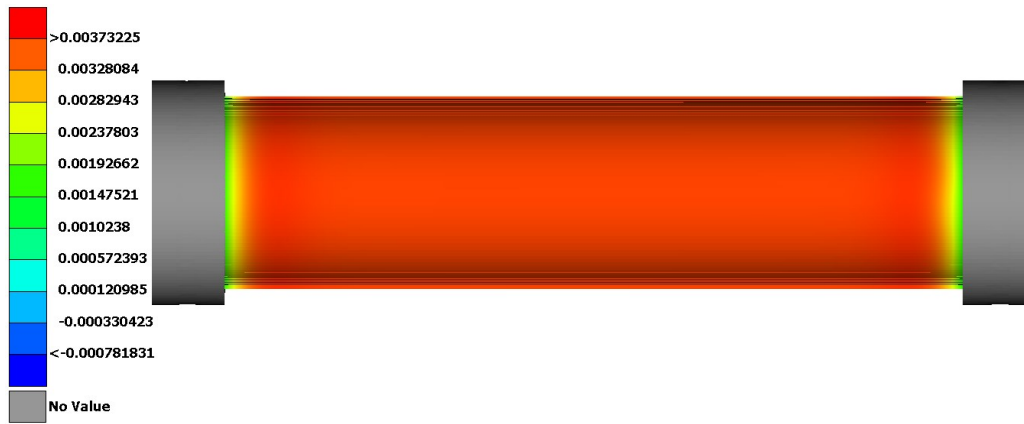


Εικόνα 5.21 Οριακές συνθήκες πλήρους στερεού μοντέλου, δύναμη σύσφιξης.

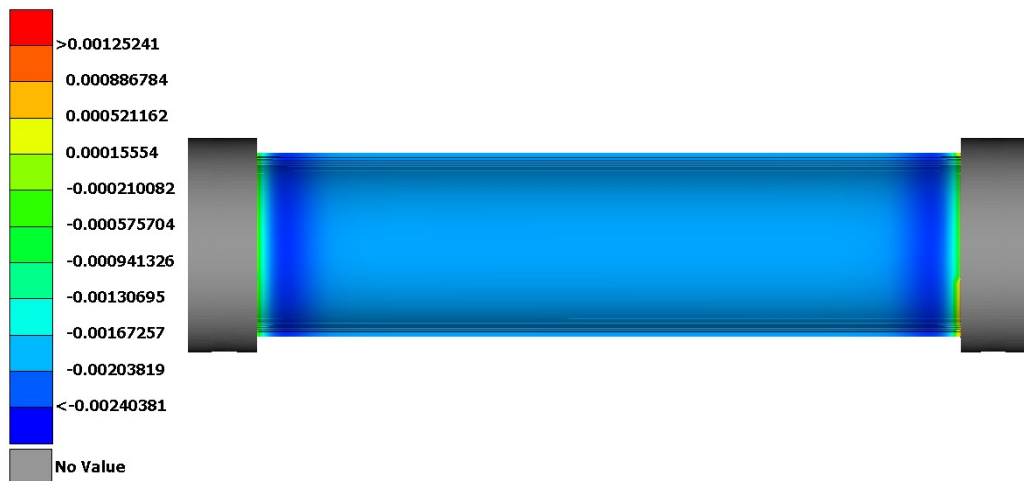


Εικόνα 5.22 Οριακές συνθήκες πλήρους στερεού μοντέλου, εσωτερική πίεση.

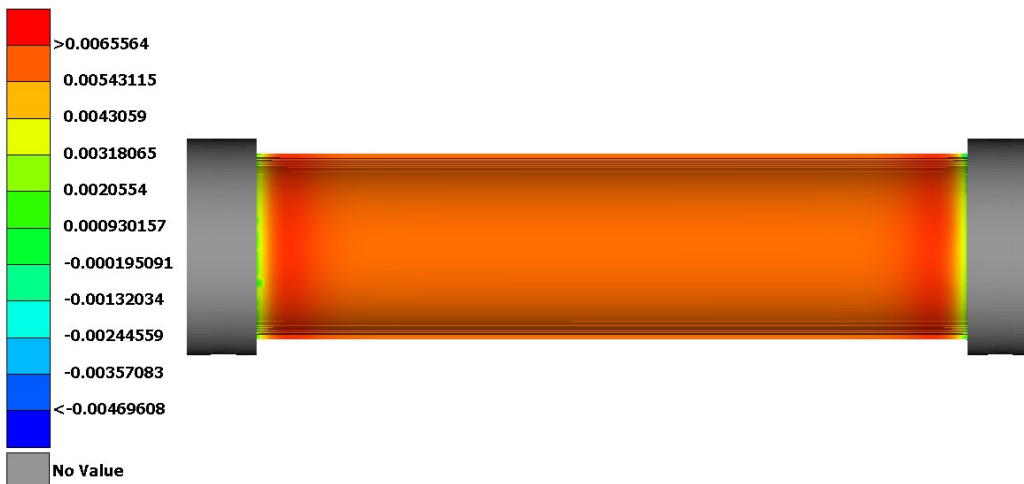
Ακολουθώς, δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του εν λόγω μοντέλου από το λογισμικό META, καθώς και ο πίνακας με τις μέγιστες τιμές για τις τροπές και το δείκτη αστοχίας του σύνθετου υλικού.



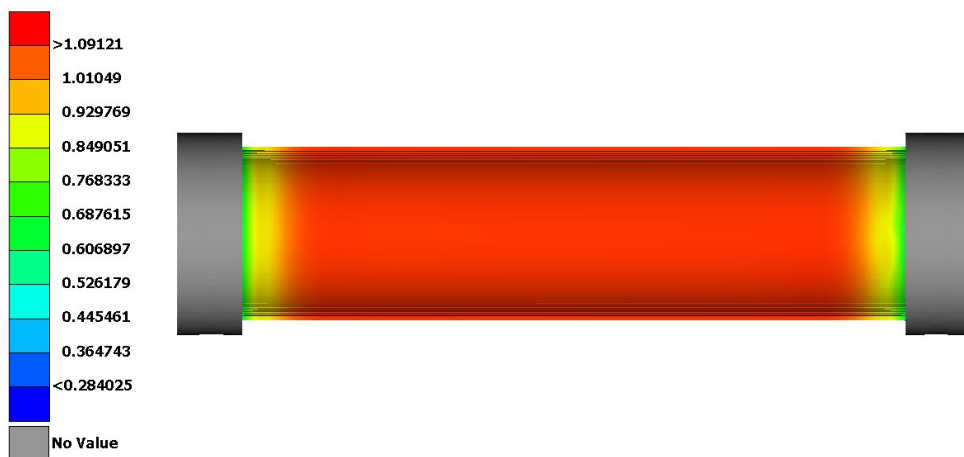
Εικόνα 5.23 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση x (Normal-1) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το πλήρες στερεό μοντέλο.



Εικόνα 5.24 Αξονικές τροπές στη διεύθυνση y (Normal-2) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το πλήρες στερεό μοντέλο.



Εικόνα 5.25 Διατμητικές τροπές στο επίπεδο 12 (Shear-12) εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το πλήρες στερεό μοντέλο.



Εικόνα 5.26 Δείκτης αστοχίας εμβόλου σύσφιξης με ράβδους σε πίεση 400 bar για το πλήρες στερεό μοντέλο.

Πίνακας 5.3 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας του εμβόλου heavy duty στο στερεό μοντέλο.

	400 bar
Normal-1 (-)	0.00373
Normal-2 (-)	0.00240
Shear-12 (-)	0.00656
Failure Index (-)	1.091

Τέλος δίδεται ο πίνακας με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές και για τα τρία μοντέλα που προηγήθηκαν, ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Τα μοντέλα αριθμούνται από 1 έως 3 με τη σειρά που παρουσιάστηκαν στην παρούσα μελέτη.

Πίνακας 5.4 Μέγιστες τροπές και δείκτες αστοχίας για τα πέντε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων του εμβόλου σύσφιξης με ράβδους.

Μοντέλο	1	2	3
Πίεση	400 bar	400 bar	400 bar
Normal-1 (-)	0.00452	0.00415	0.00373
Normal-2 (-)	0.00383	0.00306	0.00240
Shear-12 (-)	0.00835	0.00759	0.00656
Failure Index (-)	0.969	1.052	1.091

Πιο αντιπροσωπευτικό, προφανώς θα είναι το πλήρες μοντέλο. Ο δείκτης αστοχίας του είναι σχεδόν κατά 0.1 μεγαλύτερος του ορίου, συνεπώς, το συγκεκριμένο έμβολο μπορεί να λειτουργήσει σε πιέσεις που δεν ξεπερνούν τα 366.56 bar, ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να είναι μεγαλύτερος της μονάδας.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται μελέτη της μοντελοποίησης και στατική ανάλυση υδραυλικών εμβόλων κατασκευασμένων από σύνθετο υλικό (CFRP).

Έγινε αρχικά ανάλυση μια πρώτης γεωμετρίας ενός εμβόλου, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και των λογισμικών ANSA, META και NASTRAN, για μια δομή σύνθετου υλικού, κατασκευασμένη απλά ακολουθώντας ορισμένες πρακτικές σχεδιασμού της βέλτιστης δομής. Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, έγινε φανερό πως η αστοχία συμβαίνει λόγω της παραμόρφωσης στην εγκάρσια διεύθυνση, οπότε κρίθηκε απαραίτητη η αλλαγή της δομής του σύνθετου υλικού, ώστε να ενισχυθεί στην εν λόγω διεύθυνση. Η χρήση ενός αλγορίθμου για τη βελτιστοποίηση της δομής, αν και είχε αποτελέσματα, δεν επαρκούσε για την επίτευξη της επιθυμητής αντοχής, οπότε εξετάστηκε η μεταβολή της γεωμετρίας του σύνθετου υλικού σε μία ομαλότερη. Η ομαλότερη αυτή μεταβολή της διατομής του εμβόλου, είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού, χωρίς όμως να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Τελικά, τα επιθυμητά αποτελέσματα επιτεύχθηκαν μετά την αύξηση του πάχους του σύνθετου υλικού, στα σημεία όπου συγκεντρώνονται οι μεγαλύτερες τροπές. Με την εφαρμογή ορισμένων πρακτικών για τη μεταβολή του πάχους του σύνθετου υλικού, έγινε δυνατή η απόκτηση των απαραίτητων ιδιοτήτων του υλικού, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δυνατή ποσότητα σύνθετου υλικού, οδηγώντας έτσι σε σημαντική εξοικονόμηση του βάρους.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων των δισδιάστατων και των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται εμφανής η ανάγκη για μοντελοποίηση του σύνθετου υλικού με στερεά πεπερασμένα στοιχεία, καθώς αυτά λαμβάνουν υπόψη τους και τα φαινόμενα που συμβαίνουν στη διεύθυνση του πάχους.

Αναλύθηκε επίσης ένα έμβολο διαφορετικής κατασκευής, όπου το σύνθετο υλικό δεν τοποθετείται απευθείας επάνω στα μεταλλικά μέρη, αλλά αυτά συσφίγγονται σε αυτό με τη χρήση ράβδων. Η κατασκευή αυτή, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ορίου της πίεσης σε σχεδόν διπλάσια τιμή, τονίζοντας ξανά τη σημασία της γενικής γεωμετρίας και του τρόπου κατασκευής του εμβόλου.

Τέλος, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρατηρείται πως καθώς οι πιο σημαντικές τροπές εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές του σύνθετου υλικού, ενώ στο υπόλοιπο μήκος του είναι αρκετά χαμηλότερες, με την περαιτέρω βελτίωση του τρόπου σύνδεσης σύνθετου υλικού και μετάλλου καθώς και την ενίσχυση στα σημεία συγκέντρωσης των τάσεων, τα έμβολα αυτά μπορούν να λειτουργήσουν σε αρκετά μεγαλύτερες πιέσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Miracle D. B. and Donaldson S. L., ASM Handbook Volume 21 Composites, Introduction to Composites, Air Force Research Laboratory, 2001. ISBN: 0-87170-703-9.
- [2]. Jones, R., M., Taylor and Francis, Mechanics of Composite Materials. (Materials Science and Engineering Series), 1990.
- [3]. Vasiliev, V., V., Morozov, E., V., Advanced Mechanics of Composite Materials, Elsevier Ltd, © 2007, ISBN: 978-0-08-045372-9.
- [4]. Kassapoglou, C., Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures, John Wiley & Sons, Ltd, © 2010. ISBN: 978-0-470-97263-2.
- [5]. Irisarri, F.-X., Lasseign, A., Leroy, F.-H., Le Riche, R., Composite Structures Vol 107, Optimal design of laminated composite structures with ply drops using sequence tables, Elsevier Ltd, © 2013.
- [6]. Peters, S., Composite Filament Winding, ASM International®, © 2011.
- [7]. Rao, S., S., The Finite Element Method in Engineering, Elsevier Science & Technology Books, December 2004, ISBN: 0750678283.
- [8]. Bathe, K.-J., Finite Element Procedures, Prentice Hall, Pearson Education Inc, © 2006.
- [9]. Logan, D., L., A First Course in the Finite Element Method, Thomson Learning, © 2017.
- [10]. Roy, A., K., Tsai S., W., Design of Thick Composite Cylinders, Published Online, August 1988.
- [11]. Werthen, E., Dähne, S., Design rules consideration within optimization of composite structures using lamination parameters, DLR, European school of CAE technology, University of applied sciences of Landshut and Ingolstadt.
- [12]. NASTRAN Solver, Section 1, Introduction to Composites, Composites Technology Day, January 2012, Copyright © 2012 MSC.SOFTWARE CORPORATION.
- [13]. NASTRAN Solver, Section 2, Solid Composites, Composites Technology Day, January 2012, Copyright © 2012 MSC.SOFTWARE CORPORATION.
- [14]. NASTRAN Solver, Reference Guide, Copyright © 2020 MSC Software Corporation. Printed in U.S.A.
- [15]. NASTRAN Solver, Quick Reference Guide, Copyright © 2020 MSC Software Corporation. Printed in U.S.A.
- [16]. Evans, J., T., Gibson, A., G., Composite angle ply laminates and netting analysis, School of Mechanical and Systems Engineering, University of Newcastle upon Tyne, October 2020.
- [17]. Ζαχαράκης, Η., Πιπίλη, Ε., Διπλωματική εργασία, Ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και δυναμική ανάλυση του στροβίλου της μονάδας IV του ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου της ΔΕΗ, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, Νοέμβριος 2016.
- [18]. ANSA User Guide, BETA CAE SYSTEMS, Copyright © 1990-2019.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- {1}. <https://www.researchgate.net>
- {2}. Vasiliev, V., V., Morozov, E., V., Advanced Mechanics of Composite Materials, Elsevier Ltd, © 2007, ISBN: 978-0-08-045372-9.
- {3}. Kassapoglou, C., Design and Analysis of Composite Structures: With Applications to Aerospace Structures, John Wiley & Sons, Ltd, © 2010. ISBN: 978-0-470-97263-2.
- {4}. <https://www.easycomposites.co.uk>
- {5}. <http://www.hitex-composite.com>
- {6}. Tele, D., Wakhare, N., Bhosale, R., Bharde, P., Nernkar, S., International Journal of Current Engineering and Technology: A Review on Design and Development of Filament Winding Machine for Composite Materials, INPRESSCO®, © 2016.
- {7}. Jones, R., M., Taylor and Francis, Mechanics of Composite Materials. (Materials Science and Engineering Series), 1990.
- {8}. <http://docs.autodesk.com>
- {9}. <https://physics.stackexchange.com>
- {10}. <https://hydraulicsonline.com>
- {11}. <https://slideplayer.gr>
- {12}. <http://www.hydraulicmoldingpress.com>
- {13}. <https://www.brighthubengineering.com>
- {14}. <http://www.tankertrucktrailer.com>
- {15}. www.parker.com
- {16}. Peters, S., Composite Filament Winding, ASM International®, © 2011.
- {17}. Bathe, K.-J., Finite Element Procedures, Prentice Hall, Pearson Education Inc, © 2006.