



Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και μελέτη πιρουνιού  
αγωνιστικού ποδηλάτου κατασκευασμένο  
από cfrp

Design and analysis of a carbon fiber  
reinforced fork for use in racing bikes

Γλυμής Ευθύμιος

Επιβλέπων καθηγητής ΕΜΠ Κος Δημ. Μανωλάκος

Αθήνα 2016

## Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη ανθρακονημάτινου μπροστινού πιρουνιού για χρήση σε αγωνιστικό ποδήλατο δρόμου. Τα ανθρακονημάτινα προϊόντα το οποία πλέον κυριαρχούν στην αγορά του ποδηλάτου προσφέρουν μεγάλη αντοχή έναντι πολύ μικρού βάρους.

Αρχικός στόχος ήταν η εύρεση κατάλληλης αεροτομής για χρήση της γεωμετρίας της από τους βραχίονες (blades) του πιρουνιού στο σχέδιο. Η ανάλυση του cfd έγινε στο πρόγραμμα solidworks της εταιρίας Dassault systemes SolidWorks Corp. Οι αεροτομές ελέγχθηκαν στην αντοχή και την αεροδυναμική τους

Ο σχεδιασμός (3Dcad) θα γίνει με χρήση του προγράμματος SIEMENS NX 10. Έγινε χρήση της εφαρμογής realise shape λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδίου και προκυμμένου να σχεδιαστούν επιφάνειες υψηλής ποιότητας. Ο γεωμετρικός σχεδιασμός έχει γίνει με βάση μοντέλα που ήδη υπάρχουν στην αγορά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα στις αεροτομές.

Στην συνέχεια το πιρούνι μοντελοποιείται ως αλουμινένιο προκυμμένου να διαπιστώσουμε που αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τάσεις και που θα πρέπει να ενισχύσουμε με επιπλέον υλικό προ εμποτισμένων ανθρακονημάτων (prepreg). Επιπλέον καταλήγουμε στις διατάξεις των προσομοιώσεων αλλά και στον ορισμό των παραμέτρων. Στόχος των προσομοιώσεων ήταν να βρούμε πόσο πάχος αλουμίνιο χρειάζεται προκυμμένου το σχέδιο να περνάει τα τεστ που ορίζονται από τις προδιαγραφές iso.

Έπειτα το πιρούνι θα μοντελοποιηθεί ως αναθρακονημάτινο καθορίζοντας που τοποθετείτε η κάθε στρώση πάνω στο σχέδιο. Τα μοντέλα των πιρουνιών θα γίνουν στο Siemens Nx χρησιμοποιώντας και τις δυο εναλλακτικές εισαγωγής των στρώσεων global based και zone based layups μιας και η πρώτη προφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Έπειτα θα υποστούν τις καταπονήσεις που προβλέπονται από τα πρότυπα ISO και θα πρέπει να βελτιωθούν ώστε να μην αστοχούν.

Ειδικά για το τεστ της κρούσης που πρέπει να γίνει, θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό πακέτο LS-dyna διότι θεωρήθηκε ανώτερο για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Το τεστ της κρούσης είναι το δυσμενέστερο όλων οπότε και η τελική διαστρωμάτωση πρώτα δοκιμάστηκε στο συγκεκριμένο τεστ.

Στην επόμενη φάση θα πρέπει να σχεδιαστεί το καλούπι και να ελέγχει ως προς τις θερμοκρασιακές καταπονήσεις αλλά και αυτές από την αυξημένη πίεση στο εσωτερικό. Αρα λοιπόν έπρεπε να επιλεγθεί κατάλληλο υλικό για το καλούπι αλλά και κατάλληλο προ εμποτισμένο ύφασμα. Στην συνέχεια βρέθηκε ο κατάλληλος αριθμός κοχλιών αλλά και περιφερικών για χρήση στην ευθυγράμμιση του καλουπιού αλλά και την στεγάνωση του πνευματικού συστήματος.

# Abstract

The scope of this thesis is the design study of a carbon fiber front fork used in racing bicycles. Carbon fiber products, which overrule in the corresponding bicycle market, can provide significantly higher performance considering their low weight.

Initial aim is the research of an airfoil with suitable geometry, to use on the fork's blade design. The cfd analysis is completed using "SolidWorks" software (Dassault Systems SolidWorks Corp). Different load scenarios and aerodynamics testing is completed on the airfoils so we consider which one is the best.

Next step is to model the fork considering the material to be aluminum, in order to test the location of the generated maximum stresses. Keeping in mind that these locations, the model is going to be strengthened with the use of additional prepreg carbon fiber material. Furthermore, we conclude to the simulations boundary conditions and the clarification of the essential parameters. Aim of the simulations is to clarify the thickness of aluminum needed in order for the design to pass the ISO standards.

Third step is to model the fork considering the material to be carbon fiber and specifying each layer's position and direction on the design. The design is completed using "Siemens Nx" software, using both alternatives of "global based lay-ups" and "zone based lay-ups" , due to the fact that the first alternative provides better accuracy in the results. Afterwards, models are being tested according to ISO standards and strengthened so as to avoid failure.

For the completion of the impact test, we use "LS-dyna", which is verified as the most highly qualified for this specific task. Impact tests are the most unfavorable ones. For that reason, the final layering was firstly tested on this specific test.

On a next phase, the mold is designed and checked in terms of temperature stresses and stresses deriving from high internal pressure. Therefore, it is likely necessary to choose suitable material for the mold and suitably prepreg fabric. Thereafter the suitable number of screws was calculated, and peripherals chosen which are essential for aligning the mold and the sealing of the pneumatic system.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εισαγωγή-Θεωρητικό μέρος .....	5
Ιστορική αναδρομή ποδηλάτου .....	5
Ποδήλατο.....	9
Σύνθετα Υλικά.....	12
Κατασκευές με προ εμποτισμένα .....	22
Computer aided design (CAD) .....	25
Computer Numerical Control (CNC) .....	25
Finite Element Analysis (FEA) .....	26
Σχεδιασμός.....	28
Γεωμετρικές προδιαγραφές.....	31
Δημιουργία σχεδίων.....	33
Προδιαγραφές ISO(2231332 ISO 4210-6) .....	43
Έλεγχος προδιαγραφών με αλουμίνιο.....	47
Τεστ στατικής κάμψης.....	48
Τεστ κόπωσης στην κάμψη .....	53
Τεστ ροπής.....	55
Τεστ πρόσκρουσης .....	56
Έλεγχος προδιαγραφών με ανθρακονήματα.....	58
Εισαγωγή .....	58
Εύρεση κατάλληλης διαστρωμάτωσης .....	58
Zone based layup.....	60
Global layups.....	75
Συμπεράσματα .....	97
Δεύτερη φάση Is dyna .....	97
Τελική διαστρωμάτωση.....	101
Διαστρωμάτωση υψηλής αντοχής .....	101
Στιβαρή διαστρωμάτωση .....	109
Σχεδιασμός καλουπιού .....	122
Παράρτημα.....	135

## Εισαγωγή-Θεωρητικό μέρος

### Ιστορική αναδρομή ποδηλάτου

Το πιο ενδιαφέρον σχετικά με την ανακάλυψη του ποδηλάτου είναι ότι πολύ έχουν προσπαθήσει να πάρουν τα εύσημα της ανακάλυψης, πράγμα που έχει κάνει πολύπλοκη την εύρεση του πρώτου εφευρέτη του ποδηλάτου. Παρόλα αυτά ένα είναι σίγουρο, ότι υπήρχαν πολλοί άνθρωποι που συνείσφεραν στο να φτάσει το ποδήλατο στην μορφή που το γνωρίζουμε σήμερα. Ακολουθεί σύντομη ιστορική αναδρομή με τα πιο σημαντικά γεγονότα που οδήγησαν προς αυτή την κατεύθυνση.

1418 - Ο Giovanni Fontana κατασκεύασε το πρώτο όχημα κινούμενο με την ανθρώπινη μυϊκή δύναμη, είχε τέσσερις ρόδες και η μετάδοση κίνησης γινόταν μέσω σχοινιού που συνέδεε τις ρόδες με γρανάζια.

1493 – Τα πρώτα σχέδια που έχουν βρεθεί και απεικονίζουν μια πρώιμη μορφή του ποδηλάτου ανήκουν στον εφευρέτη Leonardo da Vinci. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι αμφισβητήστε έντονα η αυθεντικότητά τους.

1817 – Ο Karl Drais σε μια εποχή οπού η τροφή ήταν περιορισμένη και δεν μπορούσαν να συντηρηθούν τα άλογα, κατασκεύασε την αποκαλούμενη μηχανή τρεξίματος. Είχε δυο ρόδες και ο αναβάτης επιτάχυνε το όχημα τρέχοντας. Ήταν ξύλινο και είχε προβλήματα με την ευθυγράμμιση με αποτέλεσμα να είναι ασταθές και έτσι γρήγορα ξεπεράστηκε.



Εικόνα 1 μηχανή τρεξίματος

1839 – Ο Σκοτσέζος σιδηρουργός Kirkpatrick Mcmillan είναι πρώτος που εισάγει τα πετάλια για την μετάδοση της κίνησης.

1863 – Εμφανίζεται το velocipede ένα ποδήλατο από χάλυβα με τα πετάλια να βρίσκονται στην μπροστινή ρόδα και μετάδοση δύναμης ένα προς ένα.



Εικόνα 3 velocipede

1870 – Εμφανίζεται το ordinary ένα ποδήλατο με πολύ μεγάλη μπροστινή ρόδα που είχε σαν αποτέλεσμα να είναι πολύ πιο άνετο από τον προκάτοχο του. Τα πετάλια ήταν και πάλι κατ' ευθείαν στην μπροστινή ρόδα (fixed) όμως όσο μεγαλύτερη ήταν η ρόδα τόσο μεγαλύτερη ήταν η απόσταση που ο ποδηλάτης μπορούσε να καλύψει με μια περιστροφή της ρόδας. Ωστόσο λόγω της μεγάλης ρόδας υπήρχε το πρόβλημα ότι όταν χρειαζόταν για κάποιο λόγο ο αναβάτης να φρενάρει απότομα τότε λόγω του χαμηλού κέντρου βάρους το ποδήλατο περιστρεφόταν γύρω από τον άξονα της ρόδας με αποτέλεσμα ο αναβάτης να χτυπάει κατ' ευθείαν στο κεφάλι. Επίσης υπήρχε πρόβλημα και με την ισορροπία του αναβάτη.



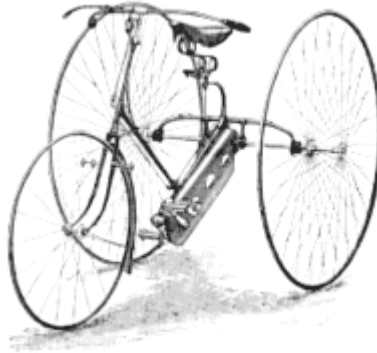
Εικόνα 2 ordinary

1872-1880 – Σε αυτό το διάστημα σημειώθηκαν αρκετές ανακαλύψεις που συντέλεσαν στο αναβαθμιστεί αισθητά το ποδήλατο. Αυτές ήταν:

- Η πρώτη μαζική παραγωγή του πρώτου χαλύβδινου ρουλεμάν
- Η κατασκευή ενός πρώιμου φρένου τύπου δαγκάνας από τους Browett και Harrison.
- Οι Scott και Phillott πατεντάρουν την πρώτη συσκευή αλλαγής ταχυτήτων προορισμένη για μετάδοση της κίνησης στην μπροστινή ρόδα.

- Ο Henry Lawson πατεντάρει για πρώτη φορά την μετάδοση κίνησης στον πίσω τροχό με αλυσίδα.

1880 – Λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζονταν από τις ψηλές μπροστινές ρόδες που χρησιμοποιούνταν μέχρι εκείνη την περίοδο οι μηχανικοί προχώρησαν στην κατασκευή του τρικύκλου το οποίο θεωρούνταν και όχημα πολυτελείας. Πολλές από τις καινοτομίες που εισήχθησαν στο τρίκυκλο βοήθησαν στην μετέπειτα ανάπτυξη τις αυτοκινητοβιομηχανίας. Μερικά παραδείγματα είναι η μετάδοση κίνησης με πνιον το διαφορικό αλλά και τα φρένα τύπου δαγκάνας.



Εικόνα 4 τρίκυκλο

1888 – Το πρώτο πνευματικό ελαστικό χρησιμοποιήθηκε σε ποδήλατο από τον Ιρλανδό κτηνίατρο και εφευρέτη Dunlop.

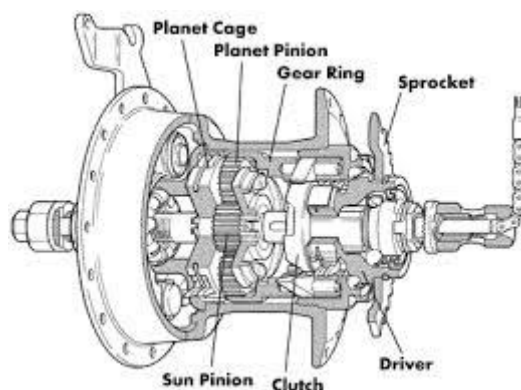
1890 – Το safety bike κάνει την εμφάνισή του, πρόκειται για την μορφή με την οποία το γνωρίζουμε και σήμερα. Η κατασκευή του κατέστη δυνατή λόγω της ανάπτυξης της σιδηρουργίας και των υλικών με αποτέλεσμα να υπάρχουν αρκετά ανθεκτικά και ελαφριά υλικά ώστε να μπορεί ο άνθρωπος με ευκολία να το κινήσει. Επίσης εμφανίστηκαν για πρώτη φορά και οι αναρτήσεις στον σκελετό του ποδηλάτου.



Εικόνα 5 safety

1894 – Στην προσπάθεια να μειωθεί το βάρος του ποδηλάτου εμφανίζεται το πρώτο ποδήλατο από μπαμπού.

1903 – Ο Styrmev Archer εφηύρε την αλλαγή ταχυτήτων με την συσκευή internal hub gears η οποία κυριάρχησε για τα 50 επόμενα χρόνια.



Εικόνα 6 internal gear hub

1930 – Ο Schwinn εισήγαγε για πρώτη φορά το πιρούνι με ελατήριο.



Εικόνα 7 πιρούνι με ανάρτηση

1950 – Ο Tullio Campagnolo εισάγει την αλλαγή σχέσεων στην μετάδοση κίνησης μέσω του derailleur που λειτουργούσε με ντίζα.



1984 – Η εισαγωγή επιπλέον γραναζιών στον πίσω άξονα αυξάνοντας τις διαθέσιμες σχέσεις έως και 24

1990 – Ξεκινάει η χρήση των μανετών από την shimano.

1994 – Εισάγονται τα δισκόφρενα αντί των κλασικών δαγκανών.

2015 – Σημειώνεται νέο παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας με ποδήλατο (137 km/h).



*Εικόνα 8 aerovelo κάτοχος παγκόσμιου ρεκόρ ταχύτητας ποδήλατου*

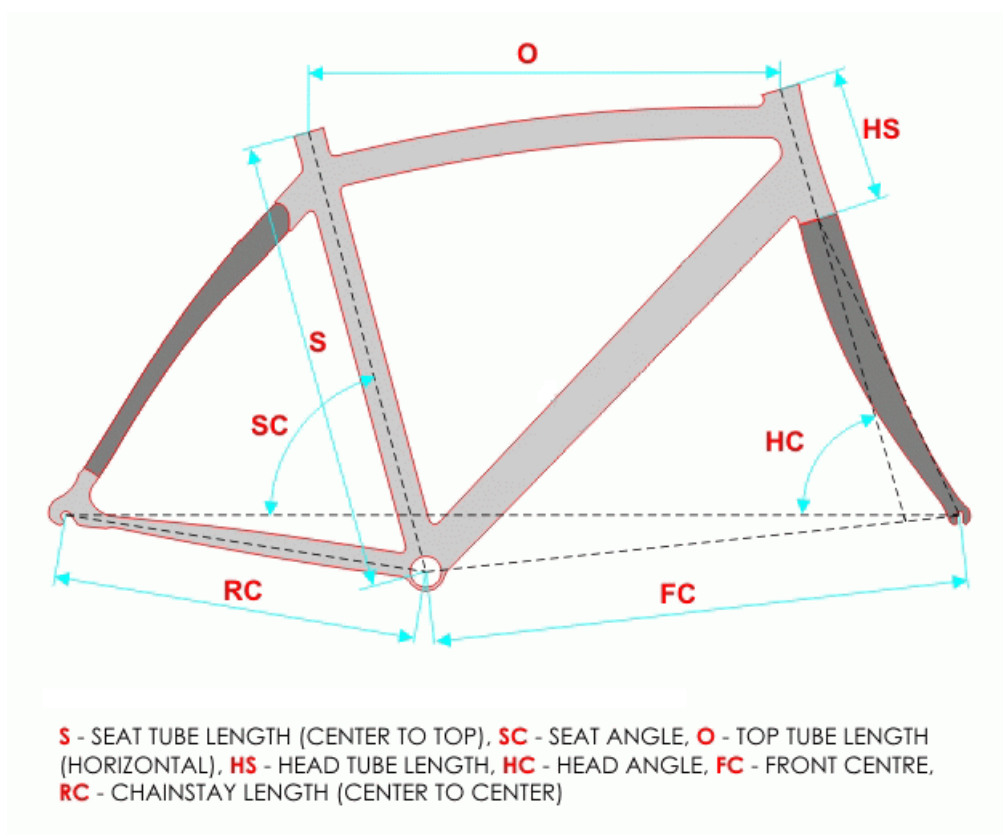
## Ποδήλατο

Το ποδήλατο όπως πολλές άλλες κατασκευές χωρίζεται σε πολλά κομμάτια. Έτσι λοιπόν έχουν προκύψει ιδιαίτερες ονομασίες για κάθε επιμέρους κομμάτι του.



Εικόνα 9 ονοματολογικά επιμέρους μερών

Όλα αυτά τα κομμάτια συνδέονται μέσω γωνιών που έχουν μεταξύ τους οι σωλήνες ορίζοντας την γεωμετρία του ποδηλάτου.



Εικόνα 10 ονοματολογία διαστάσεων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μας ενδιαφέρει η γωνία HC και η διάσταση HS που περιγράφονται περαιτέρω παρακάτω.

#### Υλικά στην κατασκευή ποδηλάτου

Όπως είδαμε και στην ιστορική αναδρομή που κάναμε στο παρελθόν είχαν γίνει πολλές δοκιμές σε υλικά για την κατασκευή ενός ποδηλάτου. Ωστόσο για πολλά χρόνια το υλικό που κυριάρχησε στην βιομηχανία του ποδηλάτου ήταν το σίδηρο.

Η πρώτη μεγάλη αλλαγή που έγινε ήταν η έναρξη της χρήσης του αλουμινίου στους σκελετούς. Το αλουμίνιο αποτελεί ένα ελαφρύ υλικό σε σχέση με το σίδηρο και όπως συνήθως συμβαίνει σε αυτές τις περιπτώσεις είναι και πιο εύκολα παραμορφώσιμο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αλλάξει ριζικά η εμφάνιση των ποδηλάτων λόγω του ότι έπρεπε να γίνονται πιο μεγάλες οι διατομές για να επιτευχθεί η επιθυμητή δυσκαμψία των σκελετών.



Εικόνα 11 ανθρακνηματινο ποδήλατο

Πλέον όμως, η τελευταία λέξη της τεχνολογία επιβάλλει την χρήση σύνθετων υλικών και ποιο συγκεκριμένα ανθρακονήματα. Αυτό το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα να φτιάχνονται πολύ πιο ελαφριά και πιο ανθεκτικά ποδήλατα σε σχέση με το παρελθόν.



Εικόνα 12 ανθρακονημάτινο ποδήλατο GRAM

## Σύνθετα Υλικά

### Εισαγωγή

**Ορισμός** (Agarwal-1990): Σύνθετα ονομάζονται τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα μέρη που έχουν συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Το ένα από τα συστατικά μέρη χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο υλικό βελτιωμένες κυρίως μηχανικές ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα και είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και εξασφαλίζει τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες του πρώτου.

### Ιστορική εξέλιξη

Από πολύ νωρίς στην ιστορία οι άνθρωποι αντιλήφθηκαν τα οφέλη της χρήσης των σύνθετων υλικών. Υλικά τα οποία χρησιμοποιούνταν εκτενώς και βρίσκονταν στην φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός και κόκαλα) σύντομα άρχισαν να ενισχύονται και να βελτιώνονται οι μηχανικές τους ιδιότητες με πρόσθετα υλικά.

5000 π.χ. – Παρατηρείται για πρώτη φορά από τους Αιγύπτιους η ενίσχυση των τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων με σκοπό την μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης στους Αιγύπτιους αποδίδεται η παρατήρηση ότι οι πλάκες ξύλου από πολύστρωτες βέργες ξύλου σε διαφορετικές γωνίες παρουσίαζαν μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.

2181-2055 π.χ. – Οι Αιγύπτιοι χρησιμοποιούνε στρώσεις λίνου η πάπυρο βουτηγμένο σε πηλό για να φτιάξουν μάσκες.

1000 π.χ. – Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά η τεχνική του βερνικώματος από τους Μεσοποτάμιους. Το βερνίκωμα σκοπό είχε τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς.

Ρωμαϊκά χρόνια – Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική κατά την οποία το οδόστρωμα ενισχύθηκε με τρίμματα κεραμιδιών.

1200 Οι Μογγόλοι εφηύραν τα πρώτα σύνθετα τόξα φτιαγμένα από συνδυασμό ξύλου μπαμπού και κόκκαλα. Τα τόξα αυτά ήταν μικρή αλλά ισχυρά και εξαιρετικά εύστοχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρέμειναν το πιο ισχυρό όπλο μέχρι και την χρήση των όπλων όπως τα γνωρίζουμε σήμερα.

1920 – Εμφανίζεται το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φιαολική φορμαλδεΐδη, γνωστό ως βακελίτης.

1960 – Παρατηρήτε η ανάπτυξη τις υψηλής αντοχής των ινών γυαλιού και και των ινών βορίου. Η ανάπτυξη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη σύνθετων υλικών με χρήση ινών.

1964 – Διατίθενται για πρώτη φορά στην αγορά οι ίνες άνθρακα σε μικρές ποσότητες όμως.

1971 – Διατίθενται για πρώτη φορά στην αγορά ίνες αραμιδίου. Οι οποίες πλέον χρησιμοποιούνται κυρίως στα ελαστικά.

Τα τελευταία 30 χρόνια οι ενισχυτικές ίνες διαρκώς βελτιώνονται. Σε κάποιες περιπτώσεις η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία έχουν φθάσει στο 10-14 πλαίσιο των τιμών του αλουμινίου.

Τα σύνθετα υλικά και ιδίως τα ενισχυμένα με ίνες πλέον χρησιμοποιούνται σε όλες τις κατασκευές με τεχνολογία αιχμής. Η μεγάλη ποικιλία ινών και ριτίνων δίνουν την δυνατότητα στον κατασκευαστή να επιλέξει από μια μεγάλη γκάμα την πιο κατάλληλη λύση για την εκάστοτε εφαρμογή.

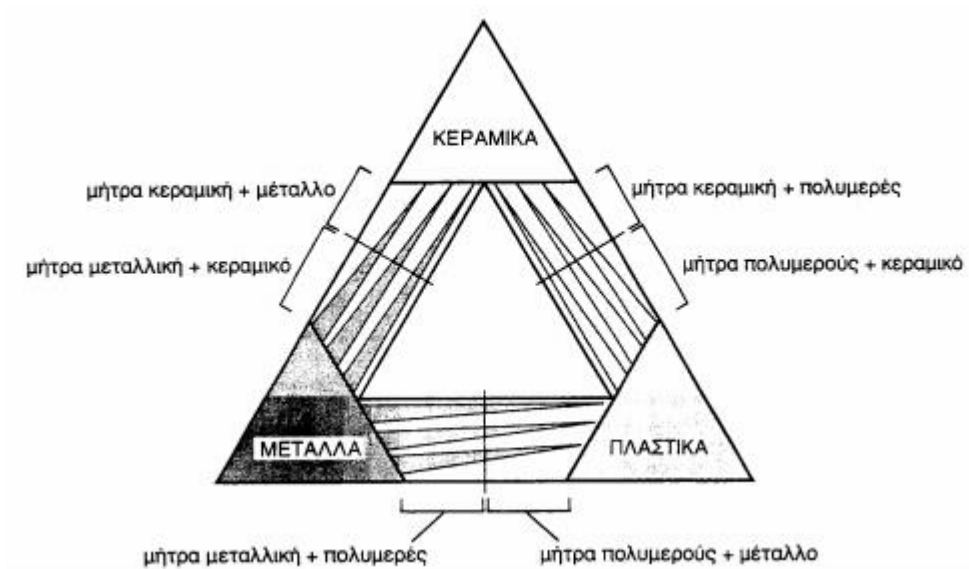
Τα κύρια χαρακτηριστικά που διακρίνουν την ανωτερότητα των σύνθετων υλικών έναντι των συμβατικών είναι.

- Το μικρό βάρος
- Η υψηλή αντοχή
- Η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση
- Η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση
- Σε κρούση
- Στην διάδοση ρωγμών

Μεταξύ των μειονεκτημάτων συγκαταλέγονται τα εξής.

- Υψηλά επίπεδα ερπυσμού
- Μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά
- Ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος
- Υψηλό αρχικό κόστος





Εικόνα 13 οικογένειες σύνθετων υλικών

### Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Ανάλογα με την μορφή τους τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται ως εξής:

1. Ινώδη σύνθετα

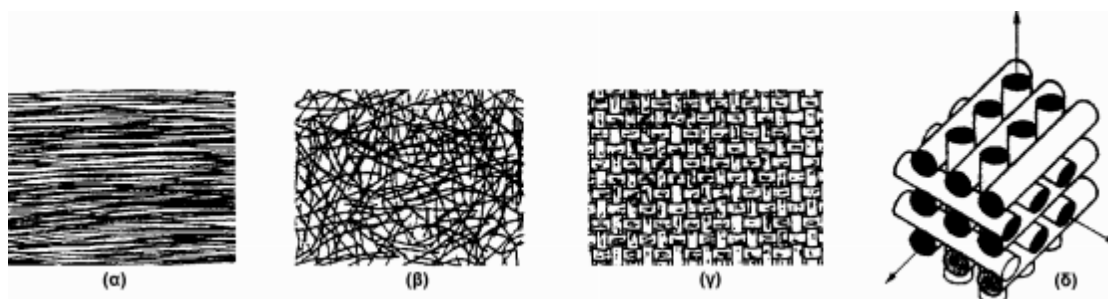
- Μονοδιευθυντικά σύνθετα
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα

Βάση του προσανατολισμού των ινών ταξινομούνται ως εξής

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
- Σύνθετα με ίνες πλέξη ύφανσης
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση

2. Στρωματικά σύνθετα

3. Κοκκώδη σύνθετα



Εικόνα 14 διάφορα σύνθετα υλικά

Στην περίπτωση μας μας ενδιαφέρουν κυρίως τα ινώδη σύνθετα με ίνες άνθρακα και σε αυτές θα επεκταθούμε παρακάτω.

#### Πλεονεκτήματα συνθέτων υλικών

Τα σύνθετα υλικά προσθέτουν την δυνατότητα για βελτιστοποίηση κατασκευών. Τα βασικά πλεονεκτήματα τους είναι:

- Η χαμηλή πυκνότητα, η υψηλή αντοχή και το μεγάλο μέτρο ελαστικότητας έχουν ως αποτέλεσμα να μπορούν να κατασκευάσουν γερές κατασκευές με χαμηλό βάρος
- Οι ίνες σύνθετου μπορούν να έχουν την κατεύθυνση της βασικής καταπόνησης κάνοντας την κατασκευή αποδοτικότερη.
- Πολύ ανθεκτική σε διάβρωση και γενικά σε αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος.
- Βελτιωμένες ιδιότητες συντονισμού και απόσβεσης
- Δυνατότητα χρήσης σε κατασκευές ασφαλείας απορρόφησης ενέργειας.
- Φθαρμένες κατασκευές μπορούν να κατασκευαστούν ευκολότερα.

#### Είδη ινώδων σύνθετων

##### Ανθρακονήματα

Οι ίνες ανθρακονήματος χωρίζονται σε κατηγορίες υψηλής αντοχής, μεσαίου μέτρου ελαστικότητας, υψηλού μέτρου ελαστικότητας και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Χρησιμοποιούνται σε κατασκευές υψηλής αντοχής και στιβαρότητας όπου τα πλεονεκτήματα του χαμηλού βάρους υπερκαλύπτουν το επιπλέον κόστος υλικού.

##### Υαλονήματα

Αυτά που κάποιος συναντάει συνήθως είναι τα E-glass και Quartz. Χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπως η βαλλιστική, όπου οι διηλεκτρικές ιδιότητες είναι κρίσιμες. Το υαλόνημα είναι χαμηλότερου κόστους του ανθρακονήματος αλλά βαρύτερο και φτωχότερο μηχανικών ιδιοτήτων σε αντοχή και στιβαρότητα.

##### Αραμίδιο

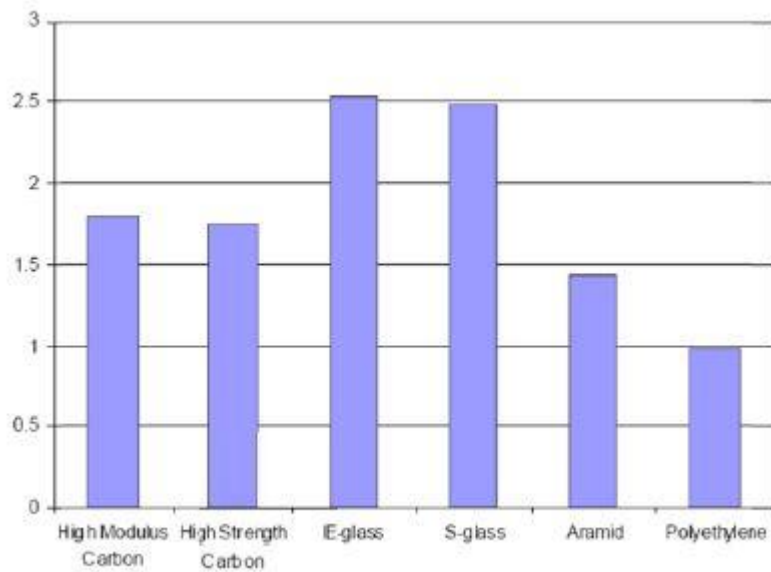
Γνωστό με το εμπορικό του όνομα Kevlar, Tecnona ή Twaron. Το αραμίδιο έχει την ιδιότητα να απορροφά και να διαχέει ενέργεια όπως επίσης και την ιδιότητα να αντιστέκεται στην απόξεση αλλά υποφέρει από μικρή αντοχή σε θλίψη.

Dyneema είναι πολύ υψηλού μοριακού βάρους πολυεθυλένιο. Χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή και χαμηλή πυκνότητα. Παρόλα αυτά έχει μικρή αντοχή στην θερμοκρασία και όπως το αραμίδιο χαμηλή αντοχή στην θλίψη.

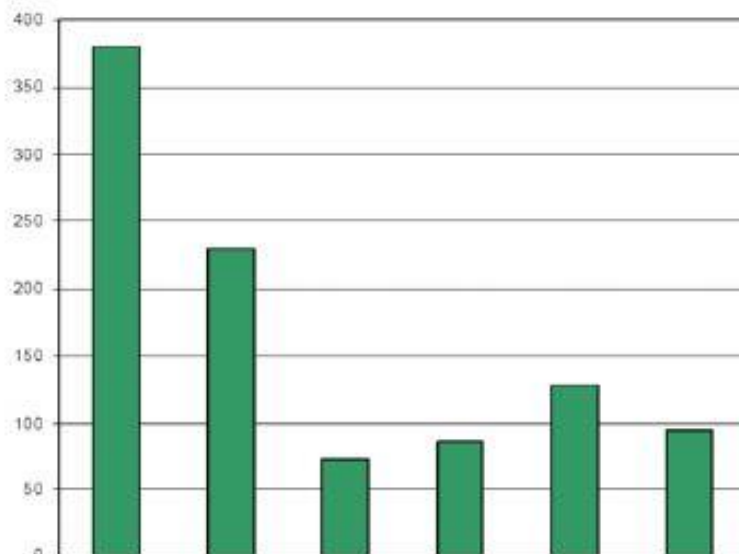
## Zylon

Οι ίνες Zylon ανώτερη αντοχή από τις ίνες αραμιδίου. Έχουν επίσης εξαιρετική αντοχή σε κρούση και υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία. Οι αδυναμίες τους περιλαμβάνουν την φτωχή αντοχή σε θλίψη και στην υπέρυθη ακτινοβολία.

Παρακάτω παραθέτοντας διαγράμματα για καλύτερη κατανόηση μεταξύ των διαφόρων ινών όσον αφορά την πυκνότητα το κόστος την αντοχή και τα μέτρα ελαστικότητας.

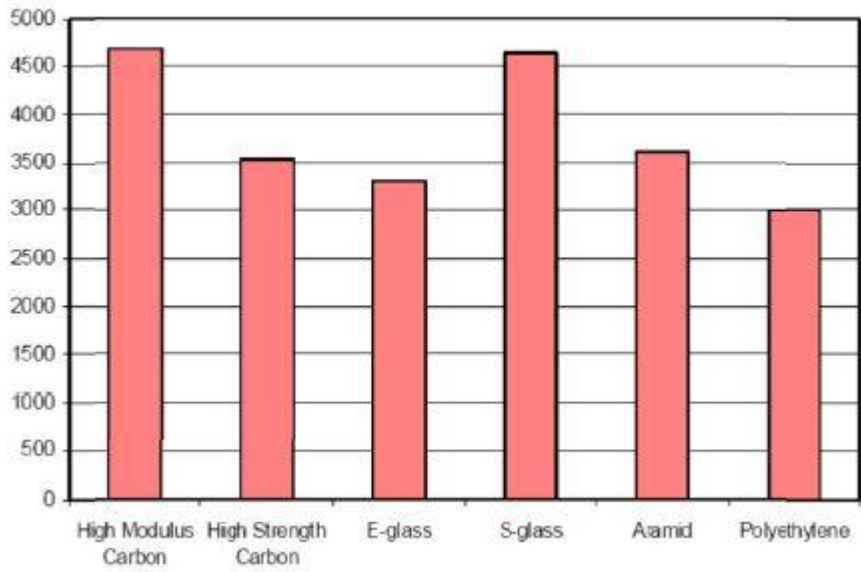


Πίνακας 1 Σχέση πυκνότητας υλικών

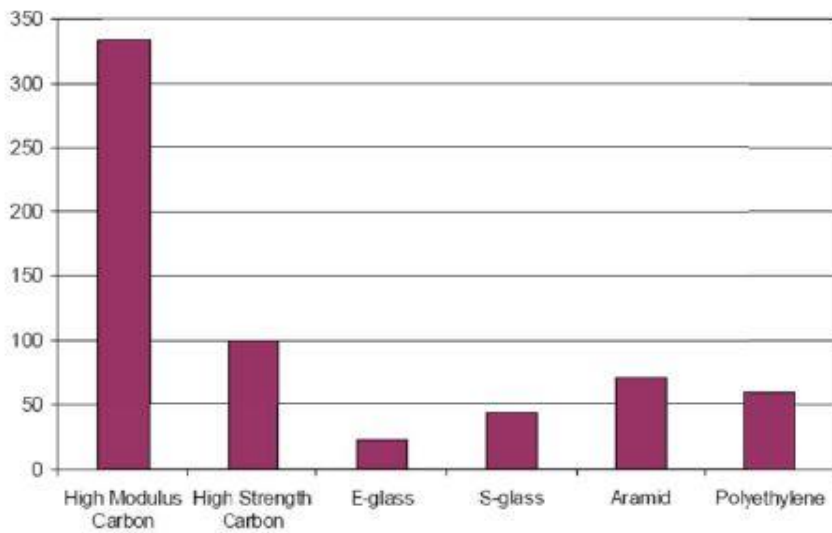


Πίνακας 2 Σχέση μετρου ελαστικότητας ινων





Πίνακας 3 Σχέση οπίου αντοχής σε εφελκισμο



Πίνακας 4 Σχέση κοστους ινων

Στην παρούσα διπλωματική θα επικεντρωθούμε περισσότερο στις ίνες άνθρακα pregreg μιας και αυτό θα χρησιμοποιηθεί.

## Ινες άνθρακα

Πρώτη φορά έχει καταγραφεί η παραγωγή ινών άνθρακα από το 1960. Έκτοτε έχουν μελετηθεί εκτενώς μιας και οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακές. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι παρουσιάζουν υψηλή αντοχή 3-7 GPa υψηλό μέτρο ελαστικότητας 200-500 GPa μέτρο διάτμησης 10-15 GPa και εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα 1.75-2 g/cm<sup>3</sup>.

Η προέλευση των ινών αυτών είναι από την πίσσα και μπορεί να παρουσιάζουν συντελεστές αγωγιμότητας αλλά και θερμικές και ηλεκτρικές αγωγιμότητες 900 GPa 1000 W/mK και 106 S/m αντίστοιχα.

Οι ιδιότητες των ινών άνθρακα τις έχουν καταστήσει τις πιο πολυχρησιμοποιημένες στα σύνθετα υλικά. Όλο και περισσότερες βιομηχανίες στρέφονται στην χρήση τους και η τιμή τους διαρκώς μειώνεται.

## Παραγωγή ινών άνθρακα.

Περίπου το 90% των ινών άνθρακα που παράγονται προέχονται από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN). Το υπόλοιπο 10% προέρχεται κυρίως από την πίσσα. Όλα αυτά τα υλικά είναι οργανικά πολυμερή που χαρακτηρίζονται από μακριές λωρίδες μορίων συνδεδεμένων με δεσμούς άνθρακα. Η ακριβής σύνθεση των ινών ποικίλουν από εταιρία σε εταιρία και θεωρείται εμπορικό μυστικό.

Κατά την διάρκεια της παραγωγής μια ποικιλία από αέρια και υγρά χρησιμοποιούνται. Κάποια από αυτά χρησιμοποιούνται για πετύχουν κάποια συγκεκριμένη αντίδραση με τις ίνες για να πετύχουν κάποιο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Από την άλλη υπάρχουν άλλα υλικά που αποτρέπουν μη επιθυμητές αντιδράσεις.

Η διαδικασία παραγωγής των ινών είναι εν μέρει χημική και εν μέρει μηχανολογική. Ο precursor τραβιέται και μετατρέπεται σε μακριούς κλώνους ή ίνες και στην συνέχεια θερμαίνεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και αποτρέποντας την επαφή του με το οξυγόνο. Είναι σαφές ότι αυτό γίνεται προκειμένου να μην αναφλεγούν οι ίνες. Αντ' αυτού λόγω της υψηλής θερμοκρασίας εξαναγκάζονται σε έντονη ταλάντωση έως ότου όλα τα μη άνθρακα μόρια αποτιναχθούν. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ανθρακοποίηση και σαν αποτέλεσμα έχει να αφήνει μακριές λωρίδες από σφιχτούς δεσμούς μεταξύ των μορίων του άνθρακα.

Η τυπική ακολουθία των διεργασιών περιγράφεται παρακάτω

- Διαδικασία νηματοποίησης-οξείδωσης για την παραγωγή ενός πρόδρομου σταδίου. Αυτό συμπεριλαμβάνει υγρό και στεγνό στροβιλισμό ακολουθούμενο από τέντωμα των ινών.
- Διαδικασία σταθεροποίησης της ίνας, η οποία την προστατεύει από πιθανή τήξη λόγω των υψηλών θερμοκρασιών επεξεργασίας.
- Διαδικασία θερμικής επεξεργασίας που καλείται ανθρακοποίηση με σκοπό την απομάκρυνση τυχόν προσμίξεων.

- Τέλος , η διαδικασία της θερμικής επεξεργασίας που καλείται γραφίτοποίηση και η οποία βελτιώνει τις ιδιότητες που έχει αποκτήσει η ίνα από την διαδικασία της ενανθράκωσης.



Εικόνα 15 Παραγωγή ινων ανθρακα

Σημαντικό ρόλο για την επίτευξη των υψηλών μέτρων ελαστικότητας παίζει ο σωστός προσανατολισμός των γραφιτικών κρυστάλλων.

#### Παραγωγή υφάσματος από ίνες άνθρακα

Οι ίνες ενίσχυσης του άνθρακα συνήθως είναι μπλεγμένες σε υφάσματα. Υπάρχουν πολλά είδη υφάσματος που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

- Απλή ύφανση

Οι ίνες μπλέκονται με τα υφίδια κάθε φορά που τα συναντούν. Σαν αποτέλεσμα προκύπτει ένα πολύ σταθερό ύφασμα, αλλά δύσκολο να ακολουθήσει τις απότομες αλλαγές της γεωμετρίας του καλουπιού. Τέτοιου είδους πλεκτά μοιάζουν με το μονοδιευθυντικό.

- Διαγώνια ύφανση

Οι ίνες περνούν πάνω και κάτω από κάποιον αριθμό ινών. Διαγώνια ύφανση είναι ένα ύφασμα του οποίου οι ίνες περνούν 2 δεσμίδες από πάνω και δυο δεσμίδες από κάτω. Αυτή η ύφανση χρησιμοποιείται σε πιο πολύπλοκες επιφάνειες.

- Satin ύφανση

Οι ίνες περνούν πάνω από ένα αριθμό δεσμιδών αλλά κάτω από μόνο μια. Αυτή η πλέξη επιτρέπει πολύ πιο επίπεδο ύφασμα που εύκολα ακολουθεί περίπλοκες γεωμετρίες.

- Πολυαξονικό επίπεδο ύφασμα

Ένα πολυαξονικό ύφασμα αποτελείται από μονοδιευθυντικά υφάσματα με διαφορετικές κατευθύνσεις ραμμένα κατάλληλα μεταξύ τους. Ωστόσο λόγω του αυξημένου του πάχους καθίσταται μη πρακτικό. Παρ όλα αυτά μπορούν να ακολουθήσουν περίπλοκες επιφάνειες.

Εμποτισμός υφασμάτων με ρητίνη

Τα προ εμποτισμένα (prepreg) υφάσματα τα οποία και χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο είναι εμποτισμένα με μια μήτρα ρητίνης. Οι κύριες μορφές των προ εμποτισμένων υφασμάτων είναι πλεκτά (woven) ή μονοδιευθυντικά (unidirectional).

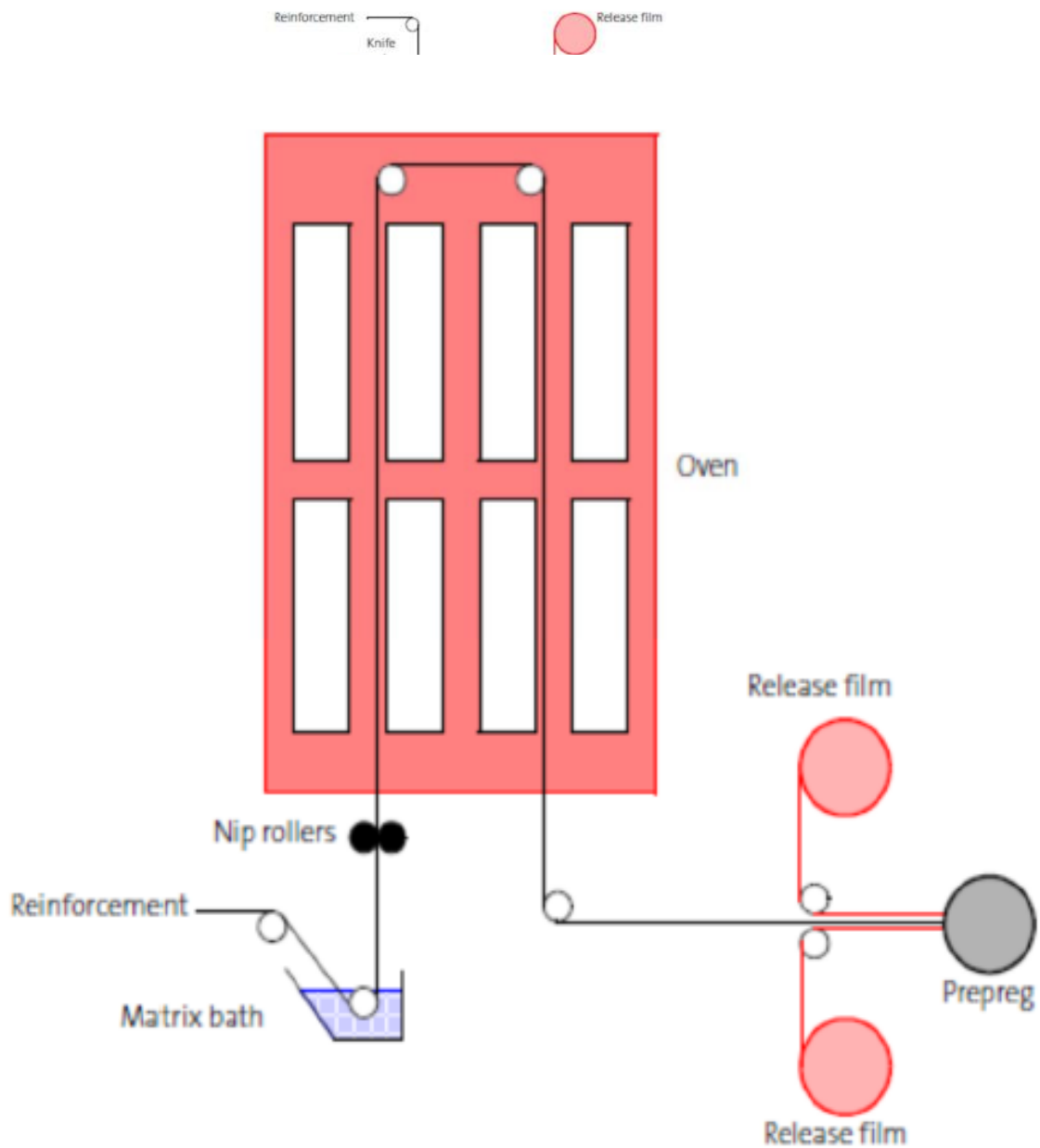
Όσων αφορά την παραγωγή του προ εμποτισμένου υφάσματος υπάρχουν δυο μέθοδοι:

- Ένωση της ρητίνης και των ινών με θέρμανση.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να παραχθεί και μονοδιευθυντικό και πλεκτό ύφασμα. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η ζεστή ρητίνη στρώνεται σε ένα φύλο με αποτέλεσμα να δημιουργήτε ένα λεπτό φιλμ. Το φιλμ αυτό έρχεται σε επαφή με τις ίνες και μέσω ραούλων και θερμικών επεργασιών περνούν την τελική τους μορφή. Τέλος τυλίγονται γύρω από ράουλα.

- Ένωση της ρητίνης και των ινών σε λουτρό διαλύτη

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο για την παραγωγή του πλεκτού



Εικόνα 16 Διαδικασία παραγωγής προεμπτισμενου

prepreg. Κατά αυτή την διαδικασία η ρητίνη είναι διαλυμένη σε ένα λουτρό διαλύτη, εκεί βυθίζεται το ύφασμα. Ο διαλύτης εξατμίζεται από το εμποτισμένο ύφασμα αφού περάσει μέσα από τον φούρνο.

## Κατασκευές με προ εμποτισμένα

Η διαδικασία παραγωγής με προ εμποτισμένα σύνθετα υλικά απαιτεί:

- Πίεση για να ενοποιήσει την διαστρωμάτωση
- Θερμοκρασία για να ξεκινήσει και να διατηρηθεί η θερμική διαδικασία σκλήρυνσης της ρητίνης.

### 1 Σακούλιασμα κενού

Η τεχνική πίεσής της διαστρωμάτωσης με την δημιουργία κενού είτε σε πίεση περιβάλλοντος είτε σε ελεγχόμενη πίεση χρησιμοποιείται για την ενοποίηση των στρώσεων και χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλο φάσμα εφαρμογών ακόμα και στην βιομηχανία του διαστήματος. Σε καλούπωμα ελεγχόμενων συνθηκών περιβάλλοντος μπορεί η πίεση να φθάσει τα 8 bar και γι' αυτό η ποιότητα του αποτελέσματος είναι πολύ καλύτερη. Όμως το κόστος του φούρνου ελεγχόμενων συνθηκών είναι πολύ υψηλό και γι' αυτό είναι ακριβότερα και τα προϊόντα του. Η διαδικασία σακουλιάσματος κενου είναι η ίδια σε ελεγχόμενο και μη περιβάλλον πίεσης

#### 1.1 Αναλώσιμα – διαδικασίας πίεσης με σακούλα κενού

Υπάρχουν πολλά αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την τεχνική, το καθένα με το δικό του ρόλο. Κάποια είναι πάντα απαραίτητα και κάποια αλλά όχι.

**Αποκολλητικό:** Επιτρέπει να αποκολληθεί το τελικό προϊόν από το καλούπι.

**Peel ply:** Ελαφρού ύφασμα (πολυεστέρα ή νάιλον) που εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού. Την προστατεύει από τα άλλα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία, όπως η κουβέρτα και αποκολλιέται μετά την θερμική διαδικασία. Μπορεί να είναι εμποτισμένο ή όχι αλλά στην περίπτωση που δεν υπάρχει κίνδυνος να απορροφήσει πολύ ρητίνη από το σύνθετο υλικό και να προκαλέσει κοιλότητες κενού. Χρησιμοποιείται στις εξωτερικές διαστρωματώσεις όπου η επιφάνεια διαφυγής του αέρα ταυτίζεται με την εκτιθέμενη επιφάνεια του σύνθετου. Στην περίπτωση του κλειστού καλουπιού ο αέρας διαφεύγει μέσα από τους αρμούς του καλουπιού λόγω της πίεσης της εσωτερικής σακούλας και οδηγείται από την κουβέρτα που περιβάλλει το καλούπι και γι' αυτό δε χρησιμοποιείται εκεί.

**Releasefilm:** Επιτρέπει την διαφυγή του αέρα και παρεμποδίζει ως ένα βαθμό αυτήν της ρητίνης (διάτρητο φιλμ).

**Breather (Κουβέρτα):** Επιτρέπει στον αέρα εντός της σακούλας να κινείται ελεύθερα ώστε να εξασφαλίσει ότι θα διαφύγει από το εσωτερικό τη σακούλας κενού.

**Φιλμ σακούλας:** Συνήθως αεροστεγές νάιλον υψηλής αντοχής σε πίεση και θερμοκρασία όπου μέσα του θα δημιουργηθεί το κενό.

**Sealanttape:** Ταινία σφραγίσματος της σακούλας είτε με το καλούπι είτε με άλλη σακούλα.

**Επιπλέον έξοδοι αέρα:** Λωρίδες από υαλόνημα εφαρμόζονται περιφερειακά της διαστρωμάτωσης για την βοήθεια της διαφυγής του αέρα.

### 2 Καλούπωμα πίεσης

Σε αυτήν την περίπτωση το προεμποτισμένο ύφασμα τοποθετείται σε ένα καλούπι ή έχει ήδη διαμορφωθεί σε ξεχωριστή διαδικασία για να τοποθετηθεί πολύ γρήγορα σε καλούπι. Τα καλούπια συνήθως κατασκευάζονται από κατεργασμένο ή/και χυτό μέταλλο και τα κομμάτια τους παράγονται ως αρσενικά ή/και ως θηλυκά. Η κοιλότητα που δημιουργείται όταν κλείσουν τα κομμάτια του καλουπιού καθορίζει το σχήμα του αντικειμένου που θα παραχθεί (στην περίπτωση του θηλυκού καλουπιού). Το προεμποτισμένο σύνθετο είναι κολλημένο μέσα στο καλούπι και η ενοποίηση των στρωμάτων γίνεται με υδραυλική πίεση. Το καλούπι μπορεί να θερμανθεί απευθείας με ηλεκτρικές αντιστάσεις ενσωματωμένες σε αυτό ή με λάδι ή ατμό που μπορούν να οδηγηθούν μέσα από διαδρόμους εσωτερικούς του καλουπιού. Όταν κατασκευάζονται μικρά τεμάχια η θερμότητα που απαιτείται μπορεί να παρέχεται από θερμασμένες πλάκες πρέσας. Οι θερμικοί κύκλοι σκλήρυνσης της ρητίνης μπορούν ελεγχθούν με μεγάλη ακρίβεια και μπορεί να επιτευχθεί μεγάλος βαθμός αυτοματοποίησης. Η διαδικασία παράγει προϊόντα υψηλής ποιότητας και ακρίβειας διαστάσεων. Λόγω του μεγάλου κόστους παραγωγής του καλουπιού, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μεγάλου όγκου παραγωγής.

### 3 Καλούπωμα σακούλας πίεσης

Μία εύκαμπτη σακούλα, συχνά από σιλικόνη, τοποθετείται εσωτερικά της κατασκευής και διογκώνεται για να παρέχει την απαραίτητη πίεση για την ενοποίηση των στρώσεων. Το αντικείμενο μπορεί να ψηθεί σε ένα φούρνο ενώ του ασκείται η πίεση. Αυτή η μέθοδος συχνά χρησιμοποιείται σε απλές διατομές όπως αυτές των σωλήνων, αλλά πρέπει να προσέξει κανείς ώστε το καλούπι να είναι αρκετά γερό για να αντέχει την εσωτερική πίεση χωρίς μεγάλες παραμορφώσεις. Αυτή είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε.

### 4 Τοποθέτηση ινών/ περιέλιξη στρώσεων

Στην πιο απλή περίπτωση συνεχής στενής ταινίας μονοδιευθυντικό τυλίγεται σε έναν περιστρεφόμενο mandrel (ελαστικός ή μη πυρήνας -αρσενικό καλούπι) με μεγάλη ακρίβεια. Η πίεση ενοποίησης των διαστρωματώσεων επιτυγχάνεται με το τύλιγμα υπό τάση των ινών στο mandrel. Με την αυτοματοποίηση της διαδικασίας μπορούν να κατασκευασθούν και πολυπλοκότερα τεμάχια από αυτά με κυκλική διατομή.

### 5 Καλούπωμα

θερμικής διαστολής: Το προεμποτισμένο ύφασμα τυλίγεται σε μπλοκ λάστιχου ή αφρού και μετά τοποθετείται σε καλούπι. Το συναρμολογημένο αυτό κομμάτι θερμαίνεται και καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία το καλούπι διαστέλλεται και πιέζει με μεγάλη δύναμη την διαστρωμάτωση. Αυτή η μέθοδος απαιτεί συνήθως μικρό κεφάλαιο για την αγορά του εξοπλισμού και μπορούν να παραχθούν πολύπλοκα σχήματα με έναν μόνο κύκλο θερμικής διαδικασίας σκλήρυνσης της ρητίνης μειώνοντας τον αριθμό των ενώσεων που σημαίνει ραγδαία μείωση του βάρους, αύξηση της αντοχής και μείωση του κόστους. Σημαντικές παράμετροι της διαδικασίας σκλήρυνσης της ρητίνης των προεμποτισμένων υφασμάτων

-HeatUp: Δείχνει το πόσο γρήγορα επιτρέπεται το καλούπι να φθάσει την θερμοκρασία στην οποία θα γίνει στερεοποίηση της ρητίνης. Ο ρυθμός αυτός καθορίζεται από πολλούς παράγοντες: Το ιξώδες της ρητίνης, η ευαισθησία της στην θερμοκρασία, το πάχος της διαστρωμάτωσης, η μάζα και η θερμική αγωγιμότητα του καλουπιού. Για πολύ ευαίσθητες στην θερμοκρασία μήτρες και χονδρές διαστρωματώσεις η διαδικασία θέρμανσης πρέπει να είναι χαμηλή για να μην δημιουργηθεί διαφορά θερμοκρασίας εντός της διαστρωμάτωσης.

-Intermediatedwell (προαιρετικό): Ενδιάμεσος χρόνος παραμονής σε μία θερμοκρασία. Χρησιμοποιείται για να βοηθηθεί το προεμπτισμένο ύφασμα και το καλούπι να αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία πριν την τελική θερμοκρασία ψησίματος. Πολλές φορές χρησιμοποιείται και σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία ιδανική για την απομάκρυνση των φυσαλίδων από την διαστρωμάτωση.

-Dwell /Cure: Για κάθε ρητίνη υπάρχει ένα εύρος επιλογών για θερμοκρασίες και διάρκεια παραμονής σε αυτές, ώστε να επιτευχθεί η στερεοποίηση της ρητίνης. Για κάθε θερμοκρασία στερεοποίησης υπάρχει και η ανάλογη απαιτούμενη διάρκεια παραμονής σε αυτή.

-Cooldown: είναι ο ρυθμός ψύξης του προϊόντος παραγωγής ή του καλουπιού του. Πρέπει να ελέγχεται για να μην δημιουργηθούν τάσεις μέσα στο προϊόν ή/και ζημιά στο καλούπι.

-Postcure:Επιπλέον θερμική διαδικασία για να μεγιστοποιηθεί η αντοχή σε θερμοκρασία και να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος. Χρησιμοποιείται κυρίως όταν δεν μπορούν να επιτευχθούν οι επιθυμητές θερμοκρασίες ή πιέσεις της διαστρωμάτωσης λόγω κόστους εξοπλισμού.

-Vacuum/pressure: Η πίεση κατά την διάρκεια του θερμικού κύκλου σκλήρυνσης της ρητίνης.

## Εφαρμογές ινων άνθρακα

Πλέον στις μέρες μας καθημερινά βρίσκετε μια νέα εφαρμογή στην οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ανθρακονήματα. Βρίσκουμε συχνά εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Ενδεικτικά:

- Στην αεροναυπηγική
- Στον μηχανοκίνητο αθλητισμό



- Σε στρατιωτικές εφαρμογές
- Σε ιατρικές εφαρμογές
- Στην αυτοκινητοβιομηχανία
- Σε περιβαλλοντικές εφαρμογές



Εικόνα 17 Ισθιοπλοϊκο απο ανθρακονηματα

### Computer aided design (CAD)

Ο σχεδιασμός προϊόντων με την βοήθεια υπολογιστή έφερε επανάσταση στην μηχανολογία. Με την βοήθεια των λογισμικών cad μπορεί κανείς να σχεδιάσει το προϊόν να το ελέγξει ως προς την αντοχή του στις καταπονήσεις που μπορεί να δεχτεί σε διάφορες φάσεις της διάρκειας ζωής του. Επομένως η βελτιστοποίηση του προϊόντος πλέον είναι κάτι πιο εύκολο. Αυτά τα πλεονεκτήματα πλέον τα προσφέρουν πολλά λογισμικά πακέτα αφού με μεγάλη ακρίβεια μπορούν να δώσουν αποτελέσματα για την συλλογή των οποίων στο παρελθόν χρειαζόταν χρόνος και χρήμα.

### Computer aided manufacturing (CAM)

Πρόκειται για λογισμικό το οποίο λαμβάνοντας την γεωμετρία από το cad μπορεί να φτιάξει κώδικα ή τον σχεδιασμό plc για χρήση συνήθως από CNC μηχανές

### Computer Numerical Control (CNC)

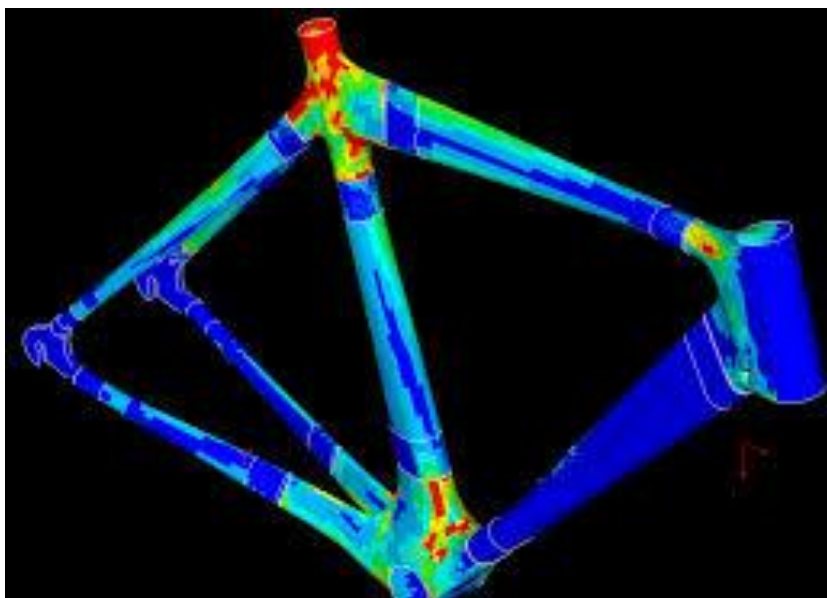
Πρόκειται για έλεγχο μηχανών με την βοήθεια υπολογιστή. Μια εργαλειομηχανή για να εμπίπτει σε αυτή την κατηγορία πρέπει να έχει ένα σερβοσύστημα που να την ελέγχει. Το σερβοσύστημα αποτελείται από τους επενεργητές, τα σερβομοτέρ δηλαδή, τους αισθητήρες που δίνουν

αναφορά κατάστασης (π.χ. θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση του ελεγχόμενου σημείου), την μονάδα ελέγχου και το λογισμικό. Η βασική αρχή κάθε σερβοσυστήματος είναι η ανάδραση. Η ανάδραση (feedback) είναι η διαδικασία διόρθωσης της τρέχουσας τιμής της ελεγχόμενης μεταβλητής βάσει της επιθυμητής. Την πραγματική τιμή της μεταβλητής την δίνουν οι αισθητήρες, συγκρίνεται από την μονάδα ελέγχου με την θεμιτή τιμή και αποφασίζεται από το λογισμικό ο τρόπος δράσης. Υπάρχουν τρεις τρόποι προγραμματισμού CNC εργαλειομηχανών. Ο πιο παλιός είναι η γραφή όλου του προγράμματος. Ο δεύτερος είναι ο προγραμματισμός με βάση προσωποποιημένες γεωμετρικές μορφές και ο τελευταίος τρόπος είναι η παραγωγή του επιθυμητού κώδικα πλήρως αυτοματοποιημένα από κατάλληλο λογισμικό όταν του δοθεί το τρισδιάστατο μοντέλο του παραγόμενου προϊόντος. Ένα κέντρο κατεργασιών χαρακτηρίζεται από την διεύθυνση της ατράκτου του (κατακόρυφη, οριζόντια), τον αριθμό των ατράκτων του, τους άξονές του, τον τρόπο αλλαγής επεξεργαζόμενων τεμαχίων και τον τρόπο αποθήκευσης και αλλαγής των εργαλείων του. Οι τρεις άξονες συνήθως είναι αρκετοί εκτός αν υπάρχουν γλυπτές επιφάνειες που τότε απαιτούνται παραπάνω.

### Finite Element Analysis (FEA)

Πρόκειται για μια αριθμητική μέθοδο για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Ουσιαστικά είναι η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα. Είναι προσεγγιστική μέθοδος αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημα είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ ιδίως σε μη γραμμικά φαινόμενα.

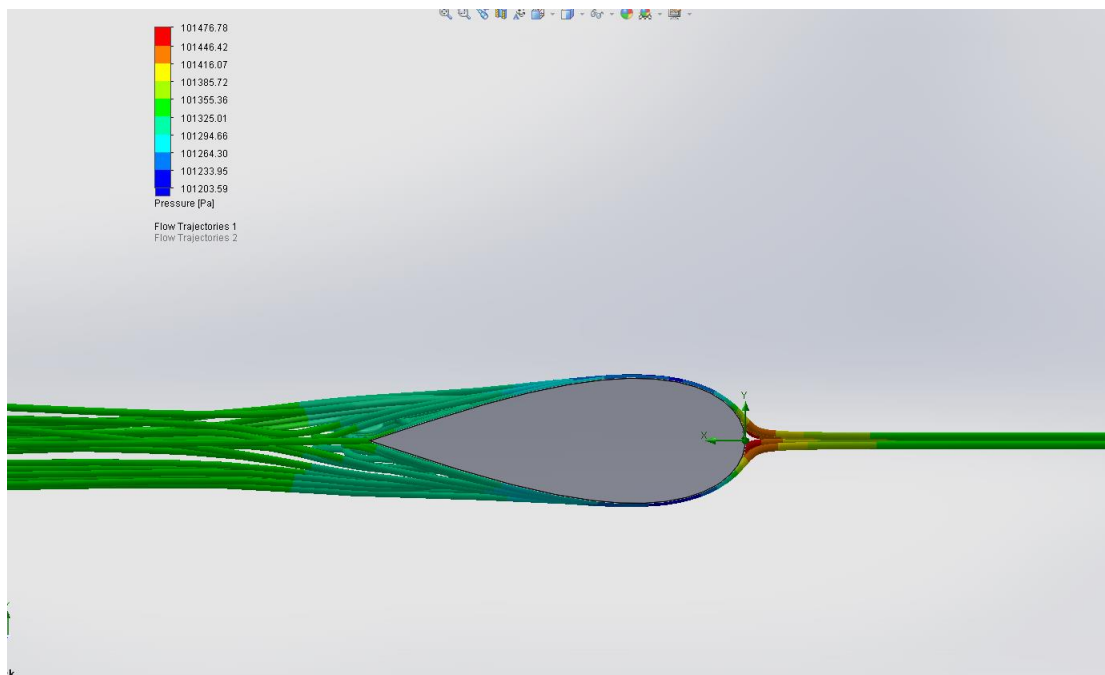
Ωστόσο χάρη στην ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας αυτό το πρόβλημα τίνει να ξεπεραστεί. Για να γίνει μια ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να εισαχθεί η γεωμετρία του μοντέλου σε μορφή cad.



Εικόνα 18 πεπερασμένα στοιχεία σε σκελετο

## Computational fluid dynamics (CFD)

Η υπολογιστική ρευστομηχανική χρησιμοποιεί την αριθμητική ανάλυση και αλγορίθμους για να λυθεί προβλήματα που περιλαμβάνουν ροή ρευστών. Οι υπολογιστές χρησιμοποιούνται προκυμμένους να προσομοιώσουν την αλληλεπίδραση ρευστών με επιφάνειες. Διαρκώς σχεδιάζονται καινούργια λογισμικά πακέτα που βελτιώνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επίσης όσο εξελίσσεται η τεχνολογία καινούργιοι επεξεργαστές προσφέρουν μεγαλύτερες ταχύτητες των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα διπλωματική οι αναλύσεις έγιναν στο λογισμικό πακέτο solidworks.



Εικόνα 19 cfd σε αεροτομή

## Σχεδιασμός

Στόχος ήταν να σχεδιαστεί ένα ανθρακονιμάτινο πιρούνι το οποίο προοριζόταν για χρήση σε αγωνιστικό ποδήλατο. Πρώτη μας κίνηση ήταν να ελέγξουμε την αγορά και να εντοπίσουμε τον ανταγωνισμό. Σύντομα διαπιστώθηκε ότι οι περισσότερες εταιρείες λόγω της δυσκολίας και της αυξημένης τιμής κατασκευής ενός πιρουνιού μόνο από ανθρακονήματα χρησιμοποιούνταν ενισχύσεις από αλουμίνιο στην κορόνα και μόνο τα blades και το steerer ήταν εξ ολοκλήρου από ανθρακόνημα.

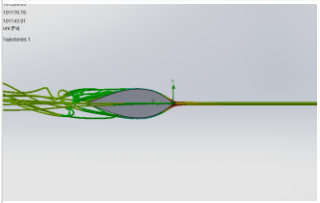
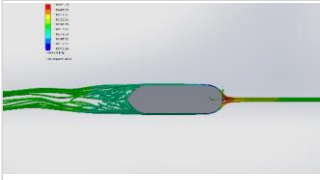
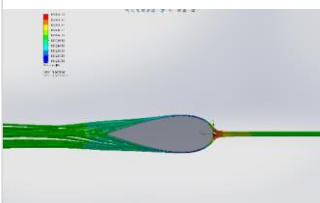
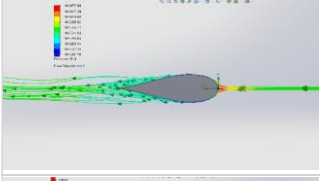
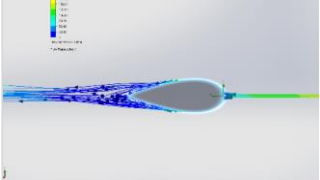
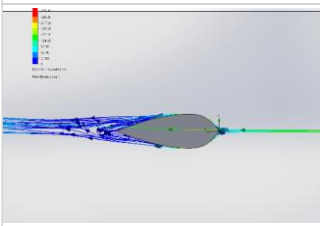
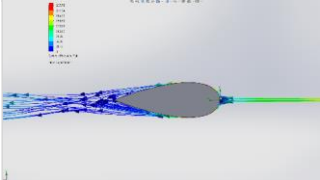
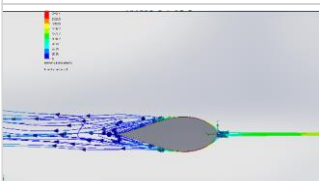
### Αεροδυναμική και επιλογή αεροτομής

Αρχικά αφού το προϊόν μας θα προοριζόταν για αγωνιστικούς σκοπούς έπρεπε να ερευνηθεί ως προς την αεροδυναμικότητα του. Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκαν 20 αεροτομές οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε ποδήλατα λόγω της καλής τους απόδοσης σε χαμηλές ταχύτητες.

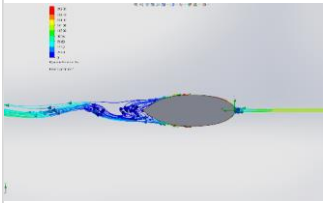
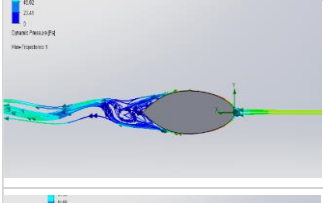
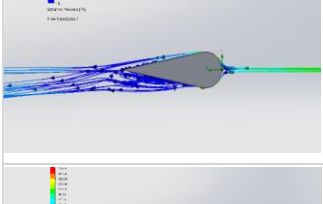
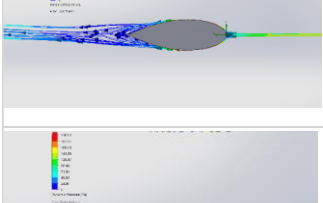
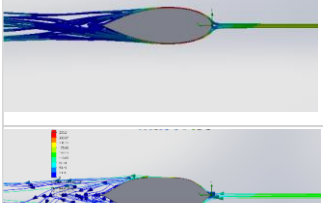
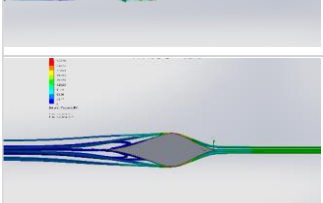
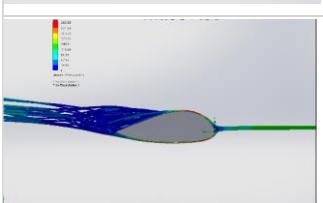
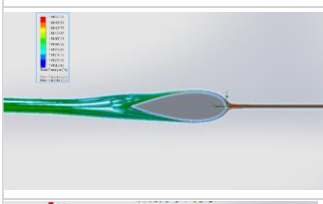
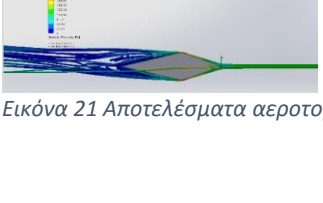

Μετά την επιλογή αυτή προσπαθήσαμε να βρούμε την καταλληλότερη αεροτομή που θα χρησιμοποιούσαμε στο σχέδιο μας. Οι αεροτομές αυτές ελέγχθηκαν σε μήκος χορδής 10 mm και πλάτος 40 mm.

Το μοντέλα στήθηκαν και μελετήθηκαν στο solidworks 2015 στην μέγιστη δυνατή ανάλυση και το πλέγμα δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα. Επίσης ελέγχθηκε η κατανομή των τάσεων στις αεροτομές αυτές σύμφωνα με τις καταπονήσεις που αναμένεται να έχουν κατά την χρήση του πιρουνιού δηλαδή σε θλίψη και σε κάμψη. Δύναμη 100 N εφαρμόστηκε στην διεύθυνση της θλίψης και αντιστοιχία στην διεύθυνση της κάμψης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 20,21.

		drag (N)	displasmnt x	displasmnt y	POINTS
	biconvex 33%	0,201934	0,811	5,39	37
	cambered plate 33%	0,254371	0,614	3,298	19
	horten brothers	0,164399	0,756	5,279	30
	joukovsky	0,184081	0,842	5,689	38
	naca 4 digit 33%	0,161546	0,746	5,239	26
	naca 4 digit 33% modified	0,163663	0,782	5,279	29
	naca 5 digit	0,157711	0,746	5,235	19
	naca 6 digit	0,206041	0,881	5,846	43

Εικόνα 20 Αποτελέσματα αεροτομών

	naca 7 33%	0,158561	0,706	4,187	8
	naca 16	0,165269	0,725	4,522	16
	newman circular	0,207335	0,791	7,103	41
	NPLEC	0,151768	0,741	4,852	10
	NPLEQ	0,153481	0,745	4,886	14
	Parsec	0,214352	0,848	4,24	32
	Rosner	0,243714	1,141	7,6	51
	TsAgi B	0,241486	0,754	4,88	30
	Vn de vooren 33.33	0,162867	0,751	5,113	22
					

Εικόνα 21 Αποτελέσματα αεροτομών 2

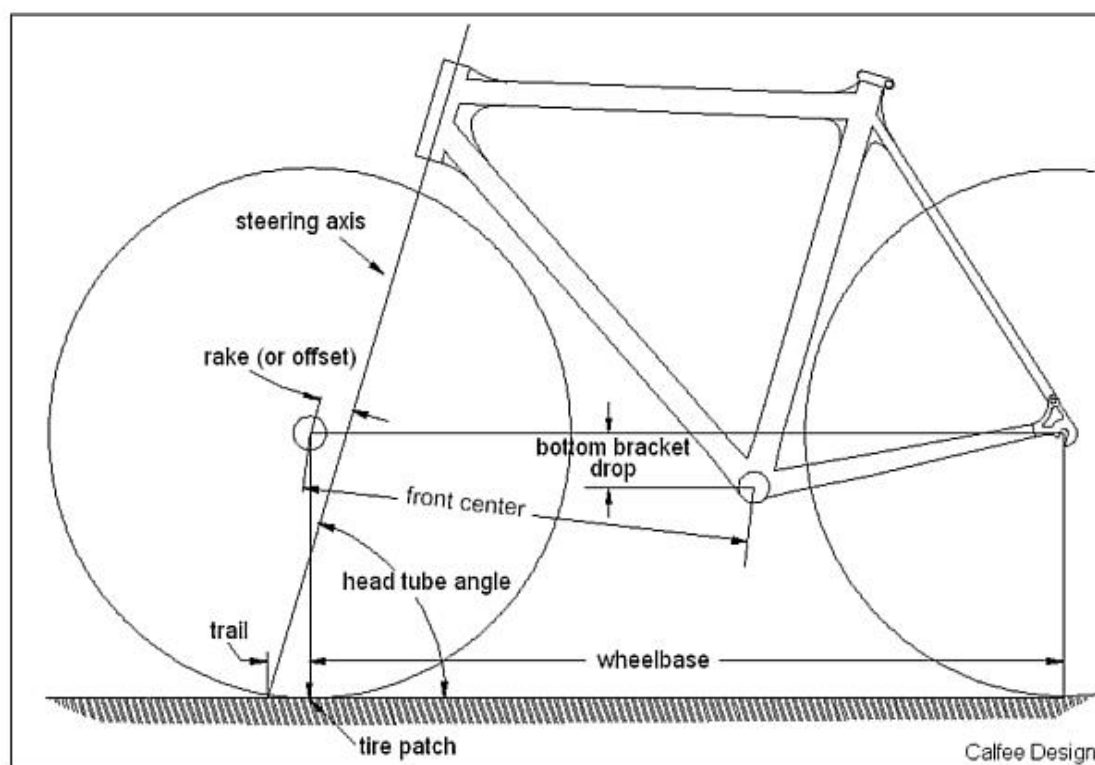
Από τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν φαίνεται ότι ανάλογα με την αεροτομή που θα επιλέξουμε να βάλουμε στο σχέδιο μας θα έχουμε και διαφορετικές αεροδυναμικές και μηχανικές ιδιότητες. Έτσι λοιπόν έπρεπε να γίνει επιλογή της καταλληλότερης αεροτομής.

Προκυμμένου να φτάσουμε πιο γρήγορα στο κατάλληλο αποτέλεσμα εφαρμόσαμε ένα point system με την εξής λογική. Αφού κατατάξαμε τις αεροτομές ανάλογα με την απόκριση τους στα τρία διαφορετικά τεστ βαθμολογήθηκαν ανάλογα με τον αύξοντα αρμό στον οποίο βρίσκονταν. Έτσι λοιπόν καταλαβαίνουμε ότι όποια αεροτομή έχει συγκεντρώσει τον μικρότερο αριθμό είχε και την καλύτερη συμπεριφορά.

Μετα από μελέτη των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι η αεροτομή naca 7 έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε όλα τα παιδιά. Πολύ καλή μηχανική συμπεριφορά είχε η αεροτομή cambered plate ωστόσο είχε την χειρότερη συμπεριφορά στην αεροδυναμική ανάλυση.

### Γεωμετρικές προδιαγραφές

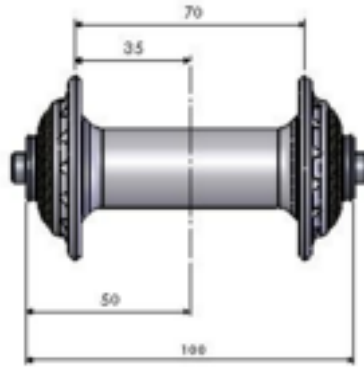
Αρχικά πρέπει να αποσαφηνίσουμε το μοντέλο που θέλουμε να σχεδιάσουμε. Πρέπει να ορίσουμε τις προδιαγραφές που θέλουμε να πληρεί το



Εικόνα 22 ονοματολογία διατάσεων

μοντέλο που θα σχεδιάσουμε. Παράμετροι όπως τι λάστιχο μπορεί να φέρει και τι μήκος θα έχει το κέντρο του τροχού και να ορίσουμε κατάλληλα offset πρέπει να οριστούν σε αυτό το σημείο. Τα μεγέθη που περιγράφονται φαίνονται παρακάτω σε φυτογραφίες.





Εικόνα 23 διαστάσεις άξονα

Μετα από έρευνα για τα αγωνιστικά ποδήλατα συμπεραίνουμε ότι το μήκος του κέντρου που χρησιμοποιήστε είναι 100mm και η το λάστιχο με την μεγαλύτερη διάμετρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι 700c και πάχος 29mm. Ο σωλήνας πρόσδεσης θα πρέπει να είναι σε κλίση 13.5 μοίρες σε σχέση με τον ορίζοντα και ορίσαμε αυθαίρετα ένα offset 10 mm αφού ο σχεδιαστής είναι ελεύθερος να ορίσει ότι τον βολεύει.

Όσον αφορά τα νύχια, το σημείο δηλαδή οπού γίνεται η πρόσδεση του κέντρου, του πιρουνιού αποφασιστήκαν ότι θα κατασκευαστούν αλουμινένια τεμάχια στην φρέζα τα οποία θα μπαίνουν συρταρωτά στα blades και θα κολληθούν με κόλα. Αυτό το προτιμάμε διότι τα ανθρακονήματα όταν έρχονται σε επαφή με μέταλλα τα οποία μπορεί να ολισθήσουν στην επιφάνεια των ανθρακονημάτων προκαλούνται φθορές.

Για τον σκοπό της επαλήθευσης του σχεδίου σχεδιάστηκε ένας ολόκληρος τροχός σε 3d cad όπως απεικονίζεται στην εικόνα 24.



Εικόνα 24 τροχός



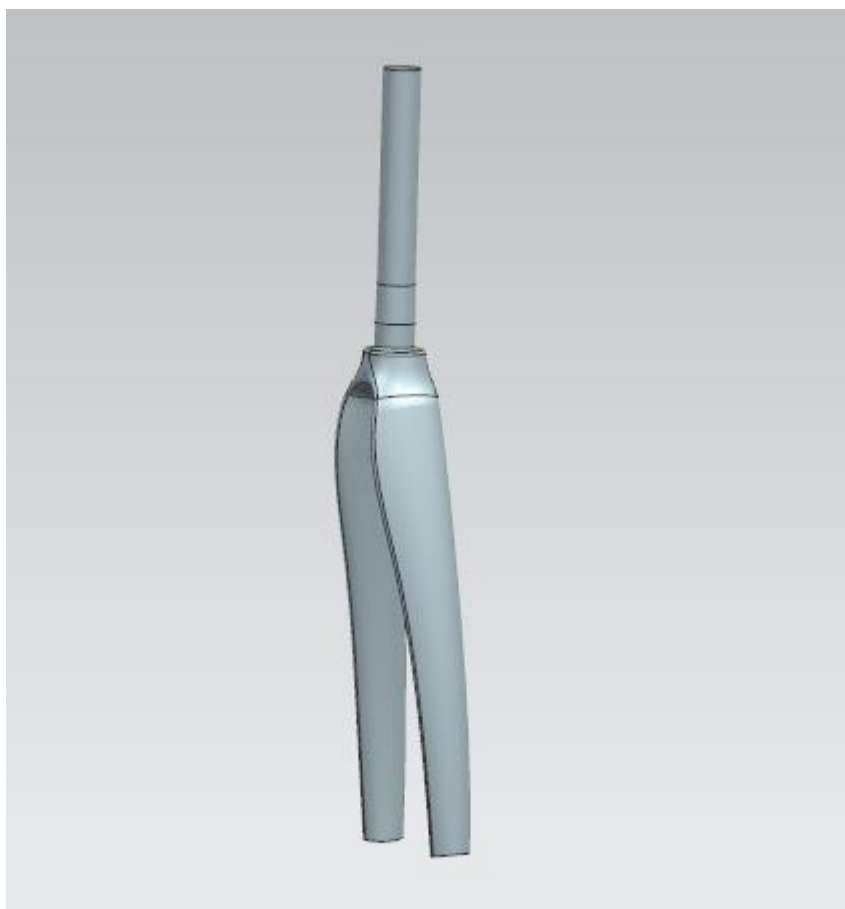
Έτσι λοιπόν αν χωράει αυτός ο τροχός στο σχέδιο του πιρουνιού σημαίνει πως η γεωμετρία έχει επιλεγθεί σωστά.

### Δημιουργία σχεδίων

Στην φάση του σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τεχνικές για να υλοποιήσουμε τα σχέδια. Αρχικά όπως αναφέραμε και παραπάνω η μορφή των blades θα έχουν την αεροτομή naca 7 τα οποία θα ενώνονται στην κορόνα και από κεί θα συνεχίζει το steerer tube.

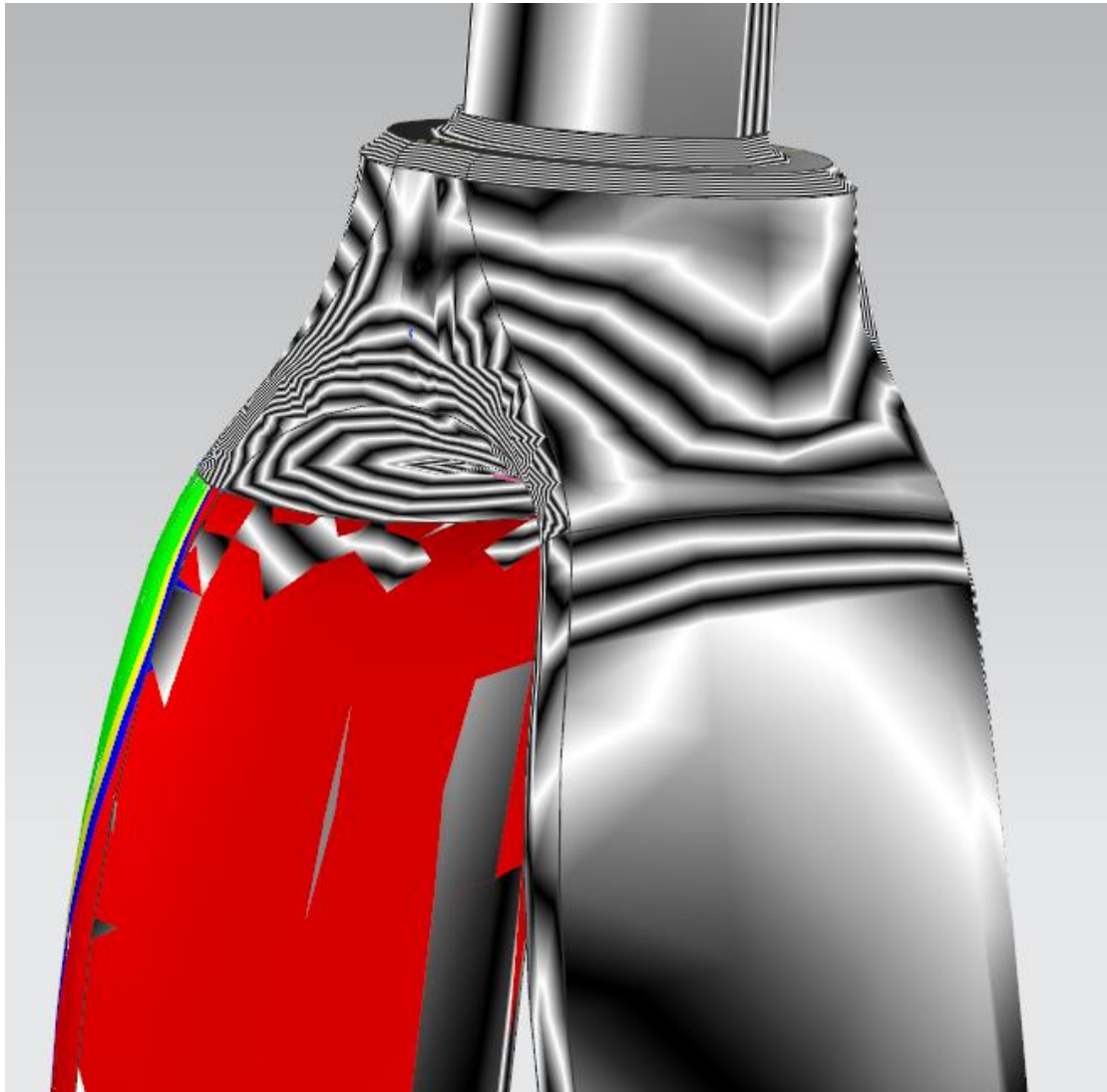
Έτσι λοιπόν είναι εμφανές ότι το σχέδιο μας θα είναι με επιφάνειες μεταξύ των οποίων απαιτούμε να έχουμε συνέχεια  $G2$ (curvature) προκυμμένου να προκύψουν πιο ομαλές επιφάνειες. Αυτό το απαιτούμε προκυμμένου όταν κατασκευαστεί το καλούπι να μην προκύψουν υπερακοντίσεις στην μηχανή cnc. Επίσης ένας περιορισμός που προκύπτει από την cnc είναι ότι δεν μπορούμε να έχουμε ράδια επιφανειών μικρότερα από 2.5mm μιας και δεν υπήρχε διαθέσιμο εργαλείο για αυτή την κατεργασία.

Αρχικά έγινε η προσπάθεια να φτιάξουμε το σχέδιο με συμβατικού σχεδιασμού, ωστόσο συναντήσαμε πολλές δυσκολίες ως προς την συνέχεια των επιφανειών η οποία θέλαμε να είναι  $G2$  παρακάτω φαίνεται το καλύτερο σχέδιο που καταφέραμε με την χρήση συμβατικού σχεδιασμού παρ όλα αυτά το σχέδιο δεν είχε την κατάλληλη ποιότητα επιφανείας που επιθυμούσαμε.



Εικόνα 25 πιρούνι σε συμβατικό σχεδιασμό

Το εργαλείο που χρησιμοποιήσαμε για να ελέγξουμε την ποιότητα της επιφάνειας ήταν τη αντανάκλαση που είχαν πάνω στο τεμάχιο διάφορα μοτίβα. Αυτό που θέλαμε ήταν να πέτυχουμε όσο πιο ομαλή αλλαγή και συνέχεια των γραμμών στο σχέδιο.



Εικόνα 26 ποιότητα επιφάνειας πηρουνιού σχεδιασμένο σε συμβατικό σχεδιασμό

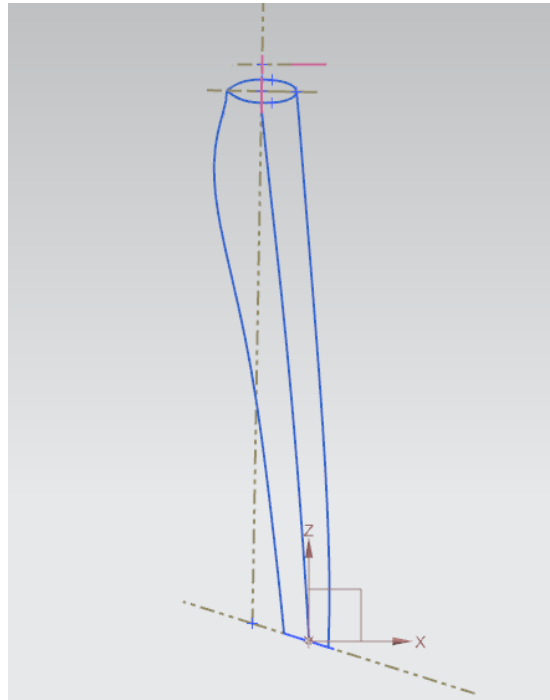
Βλέπουμε λοιπόν ότι υπάρχει πρόβλημα στο συγκεκριμένο σχέδιο στην συνέχεια και την ομαλότητα των γραμμών. Γεγονός το οποίο μεταφράζεται σε δυσκολία κατασκευής του καλουπιού από την cnc μηχανή.

### Σχεδιασμός blades

Αφού οριστήκαν οι διαστάσεις έπρεπε να σχεδιάσουμε τα δυο blades και το sterer και ύστερα να ενώσουμε αυτά τα κομμάτια μεταξύ τους. Ξεκινήσαμε από τον σχεδιασμό των blades τα οποία επιθυμούσαμε στην τομή τους να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στην αρχική γεωμετρικά της αεροτομής. Για αυτό ήταν προφανές ότι έπρεπε να

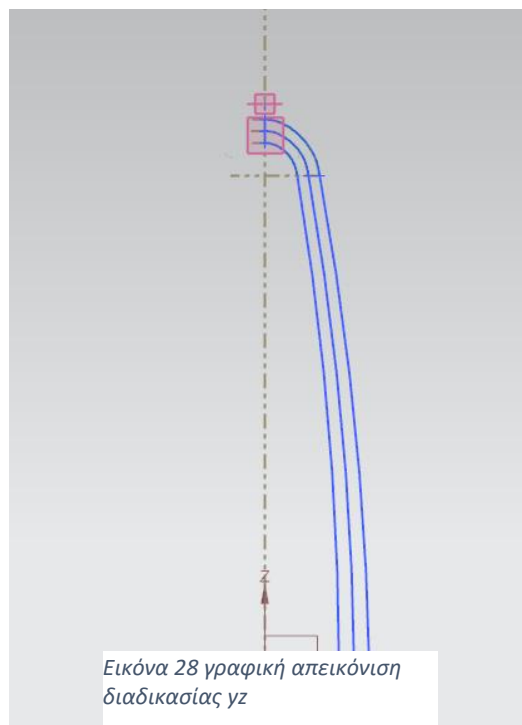
χρησιμοποιήσουμε την γεωμετρία της αεροτομής ως cross section και να φτιάξουμε κατάλληλες κατευθυντήριες γραμμές.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να σχεδιαστούν οι κατάλληλες κατευθυντήριες ήταν η εξής.

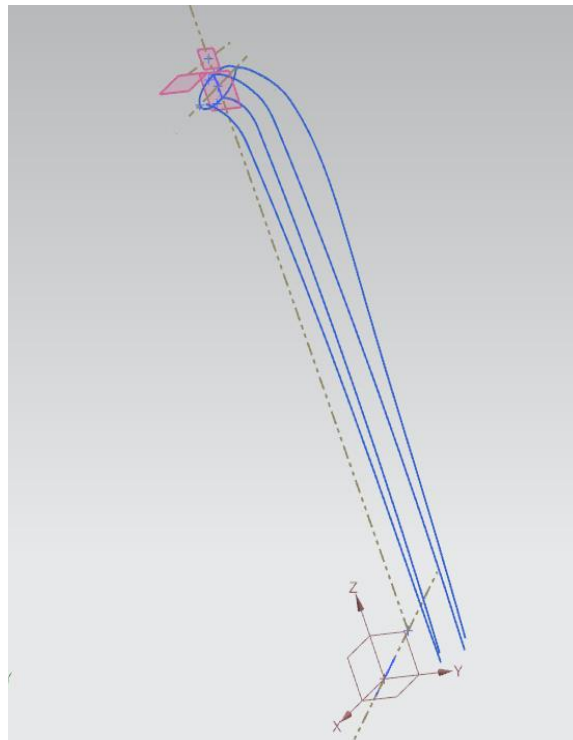


Εικόνα 27 γραφική απεικόνιση διαδικασίας xz

- Σχεδιασμός των γραμμών στο xz επίπεδο
- Σχεδιασμούς των γραμμών στο yz επίπεδο
- Κοινή προβολή των γραμμών στο χώρο.

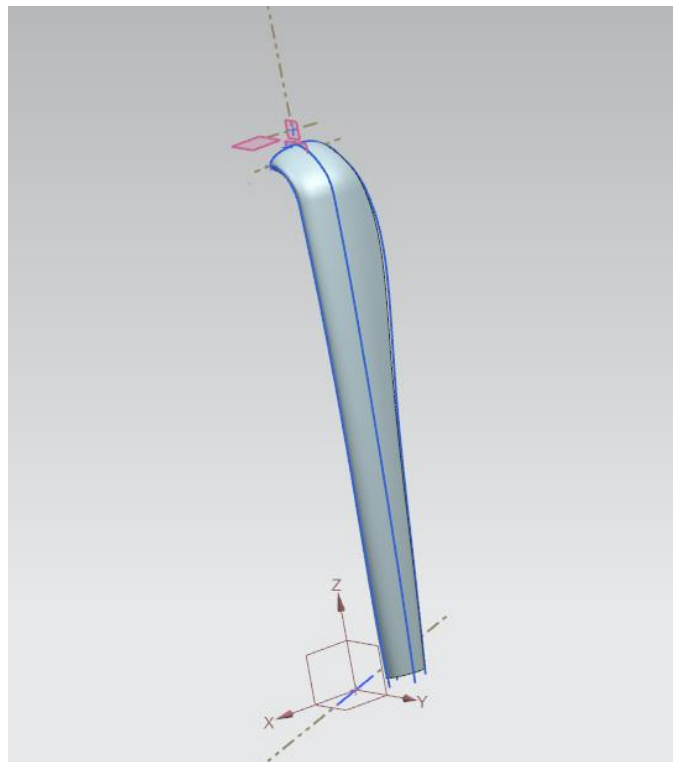


Εικόνα 28 γραφική απεικόνιση διαδικασίας yz



Εικόνα 30 γραφική απεικόνιση διαδικασίας διαγωνιοποίησης

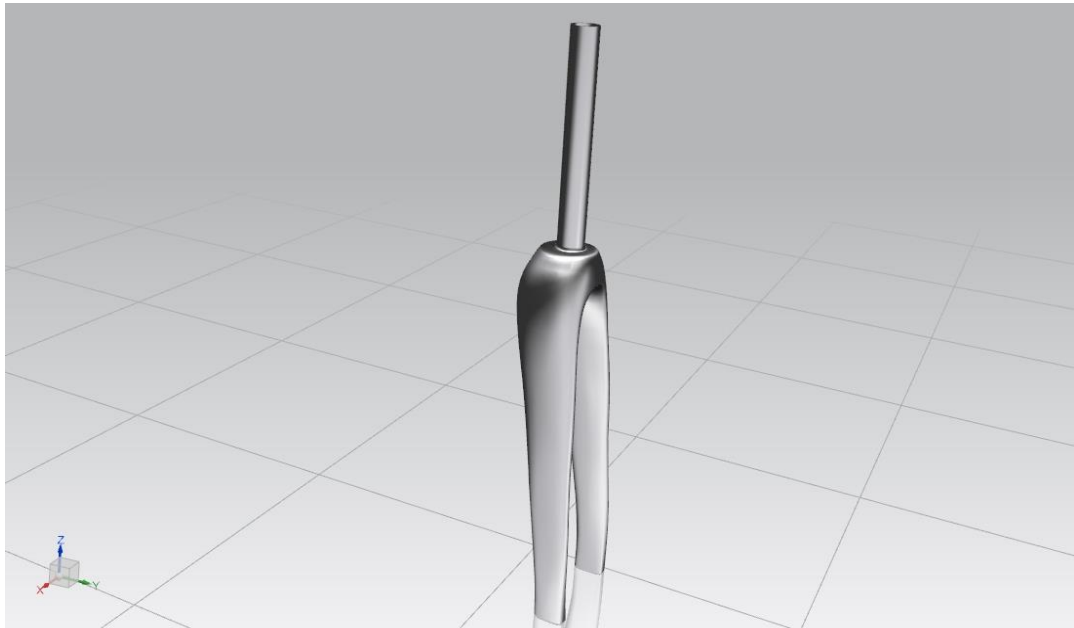
Έχοντας τις κατάλληλες κατευθυντήριες λοιπόν καταφέραμε να το μετατρέψουμε με επιτυχία σε επιφάνεια.



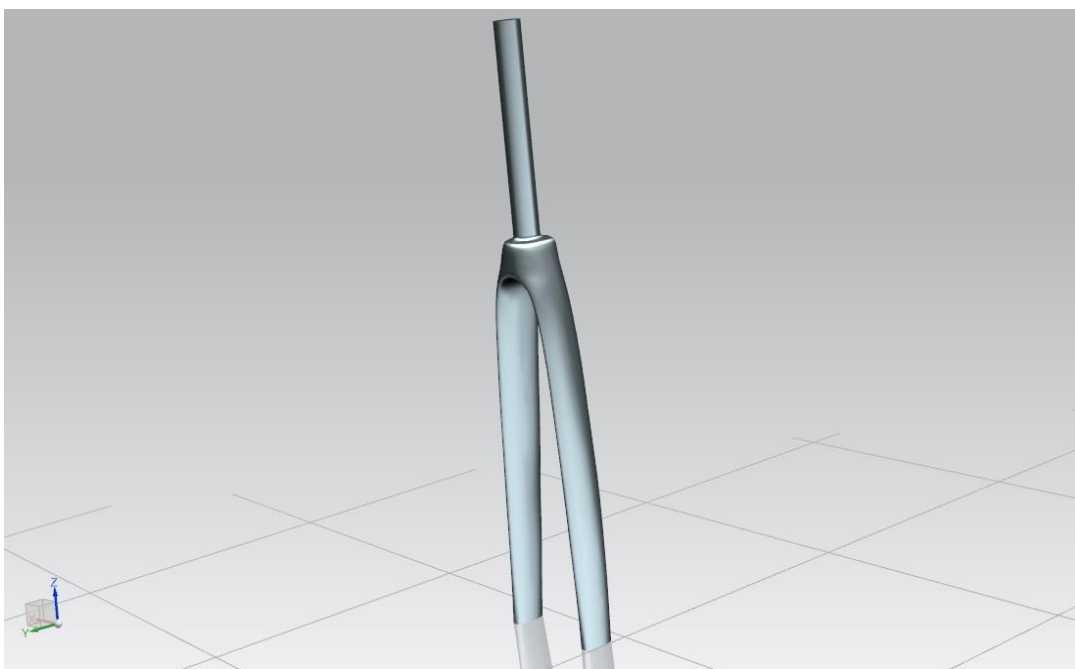
Εικόνα 29 το blade σε 3d solid

Έτσι λοιπόν με αυτές τις προδιαγραφές ξεκίνησε ο σχεδιασμός. Για τον σκοπό αυτό προσπαθήσαμε αρχικά με τον συμβατικό σχεδιασμό χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία και γι' αυτό περάσαμε στο realize shape όπως προαναφέρθηκε. Χρησιμοποιήσαμε σαν πάτημα για το realize τα ήδη έτοιμα blades με σχήμα της αεροτομής naca7

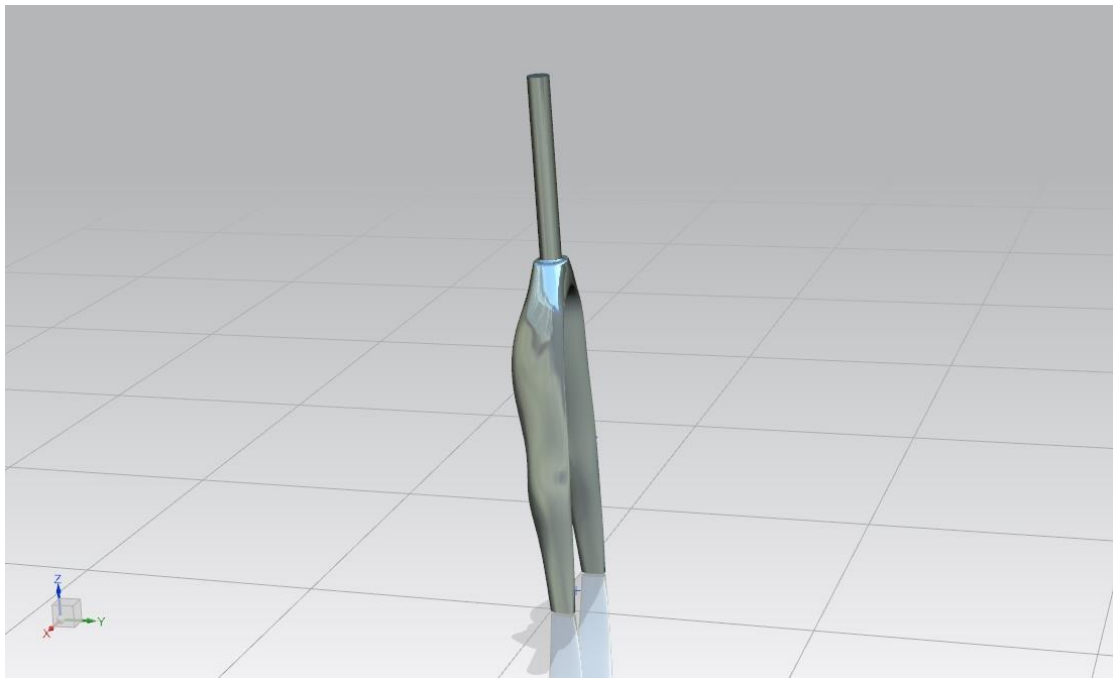
Δημιουργήθηκαν αρκετά διαφορετικά μοντέλα εως ότου επιλέξουμε αυτό το οποίο και θα χρησιμοποιήσουμε.



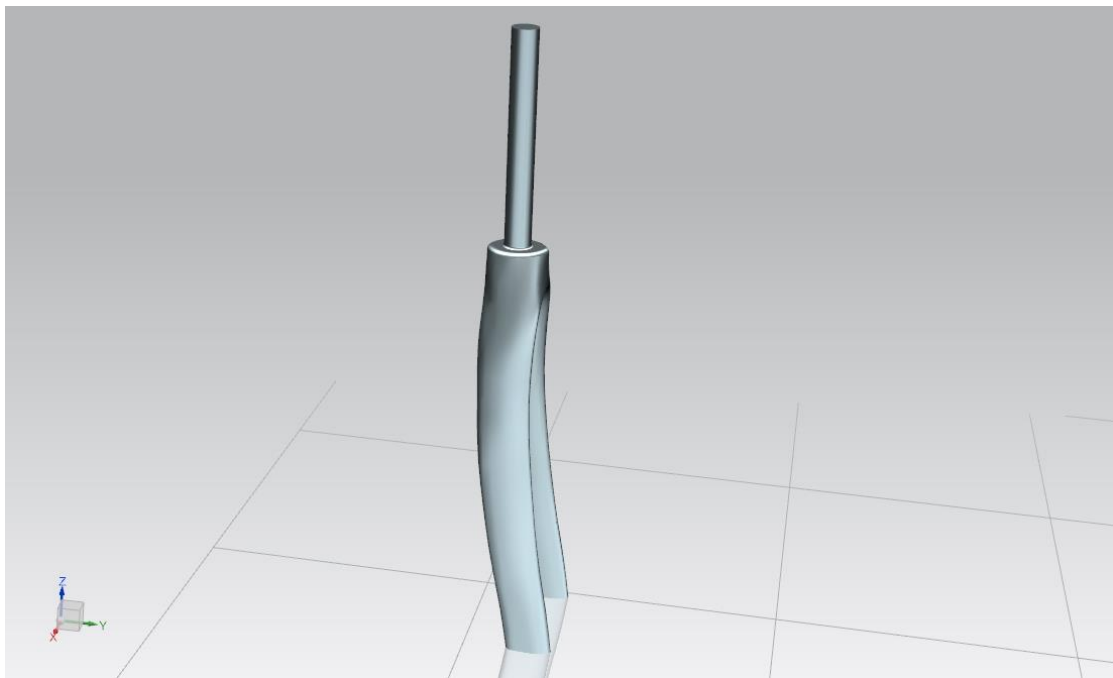
Εικόνα 32 Σχέδιο 1



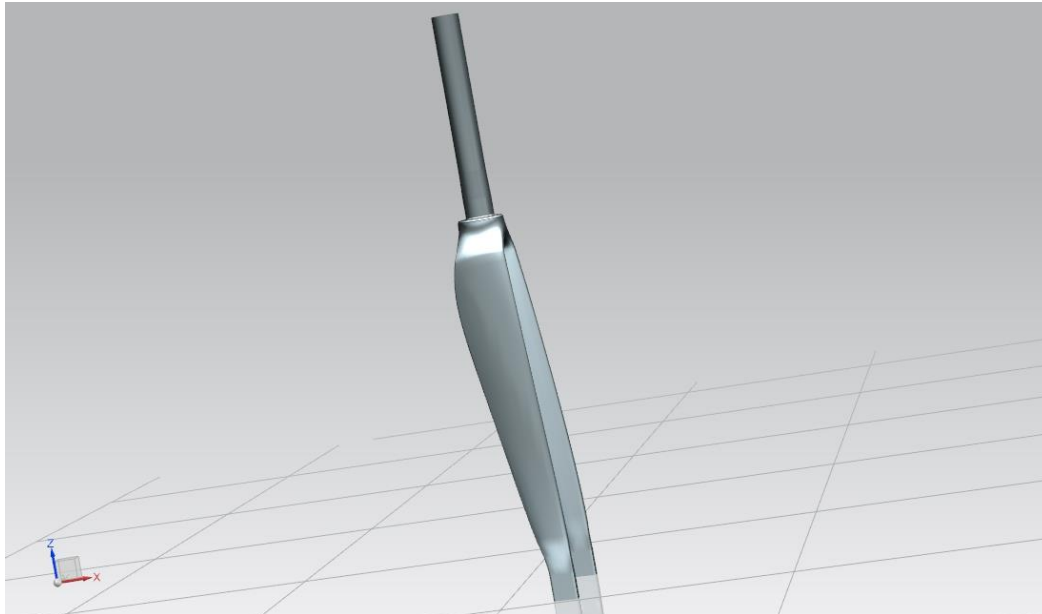
Εικόνα 31 Σχέδιο 2



Εικόνα 33 Σχέδιο 3



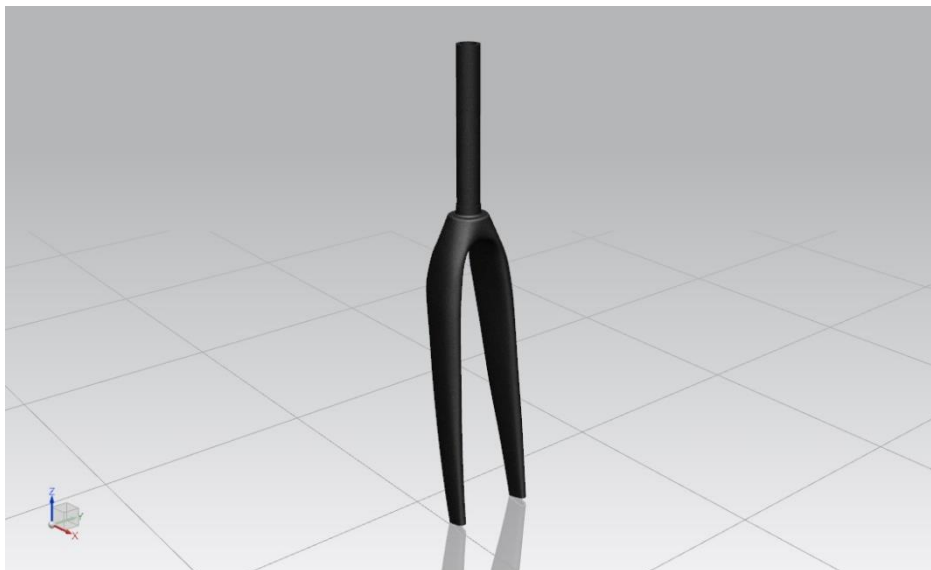
Εικόνα 34 Σχέδιο 4



Εικόνα 35 σχέδιο 5

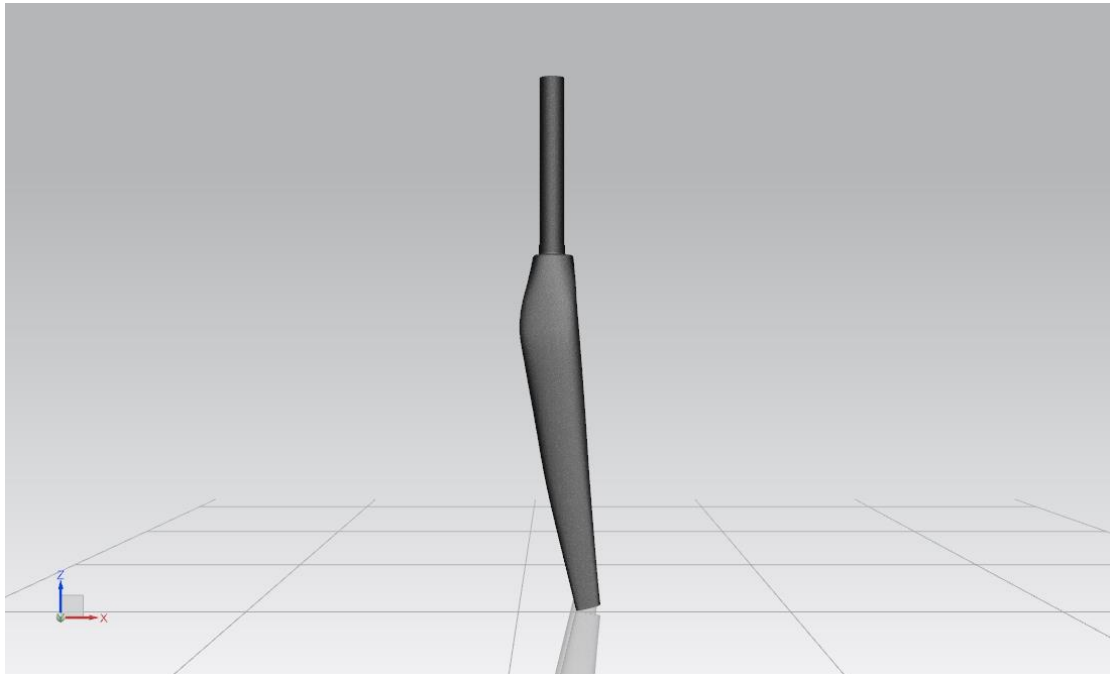
Αφού πλέον υπήρχε η κατάλληλη εξοικείωση με το πρόγραμμα σχεδιασμού και μετά από κάποιες στατικές αναλύσεις, οι οποίες υπέδειξαν ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα στην αντοχή του πιρουνιού έχει να κάνει με την επικίνδυνη περιοχή του steerer με την κορώνα, μας δόθηκε η δυνατότητα να επιλέξουμε ένα σχέδιο το οποίο να το προτιμούσαμε από την πλευρά της αισθητικής διαλέξαμε το σχέδιο E το οποίο μοιάζει με μοντέλο το οποίο έχει γνωρίσει μεγάλη εμπορική επιτυχία.

Στην συνέχεια έγινε επανασχεδιασμός του μοντέλου που επιλέξαμε και καταλήξαμε στο παρακάτω.

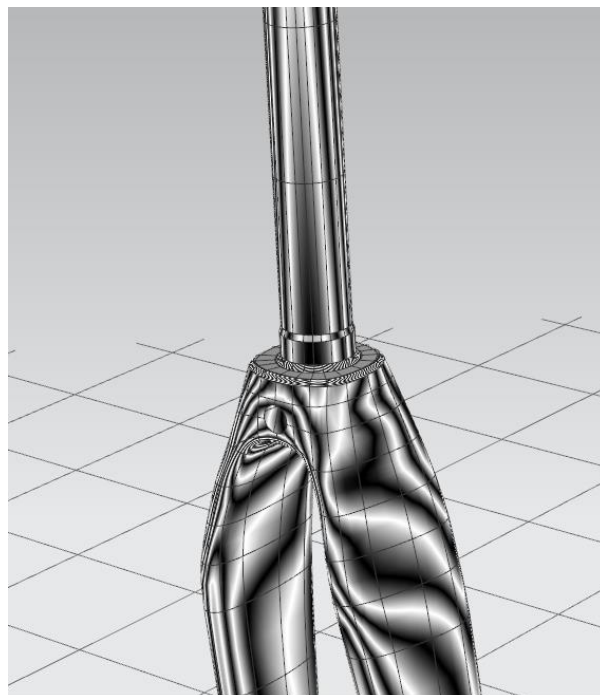


Εικόνα 36 Σχέδιο 6

Χαρακτηριστικό της ανωτερότητας της μεθόδου realize shape είναι η ποιότητα των επιφανειών με την χρήση της εφαρμογής. Πλέον οι γραμμές είναι ομαλές με καλή συνέχεια αλλά επίσης δεν διακόπτονται. Με μια τέτοια επιφάνεια πλέον έχουμε την δυνατότητα να συνεχίσουμε παρακάτω μιας και έχουμε πετύχει της προδιαγραφές που θα χρειαζόνταν αργότερα για την ποιότητα του καλουπιού.



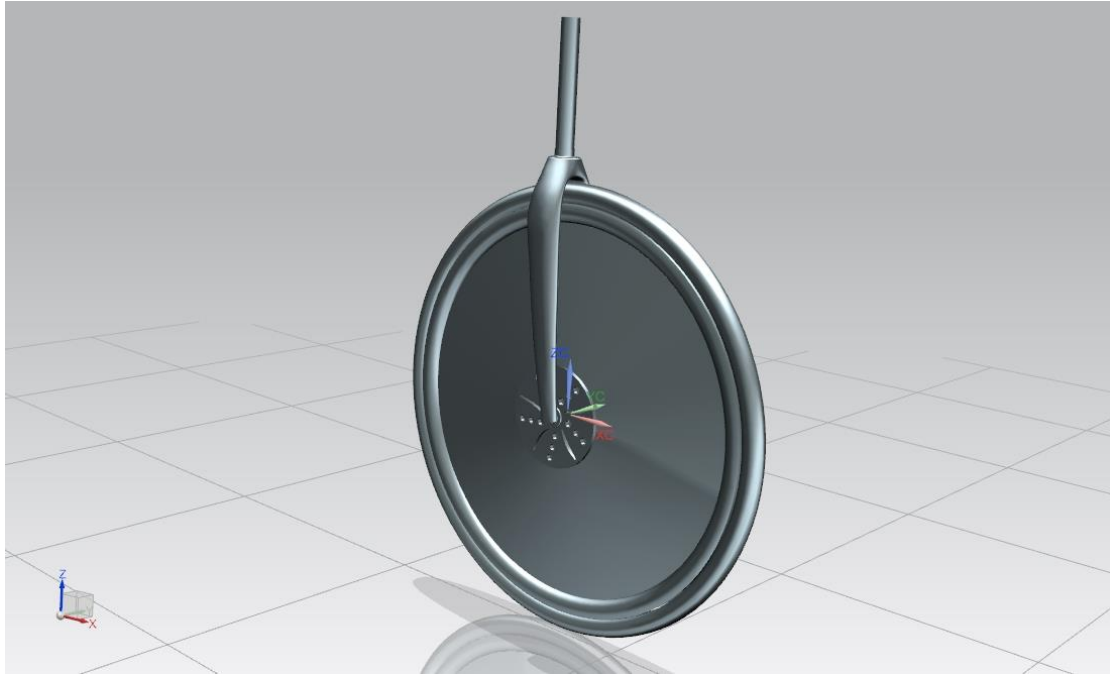
Εικόνα 38 σχέδιο 6 πλάγια όψη



Εικόνα 37 ποιότητα επιφάνειας σχεδίου 6



Σε δεύτερο στάδιο έγινε επαλήθευση του σχεδίου με την χρήση ενός σχεδιασμένου τροχού προκυμμένου να επαληθεύσουμε ότι οι διαστάσεις που προέκυψαν από την χρήση realize shape είναι σωστές



Εικόνα 39 σχέδιο 6 με τροχού διαγώνιας οψη



Εικόνα 40 σχέδιο 6 με τροχούς πρόσοψη

Πλέον είμαστε στο σημείο όπου θα πρέπει να ελέξουμε το σχέδιο που φτιάξαμε στις καταπονήσεις όπως αυτές ορίζονται από τις προδιαγραφές ISO(2231332 4210-6) οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

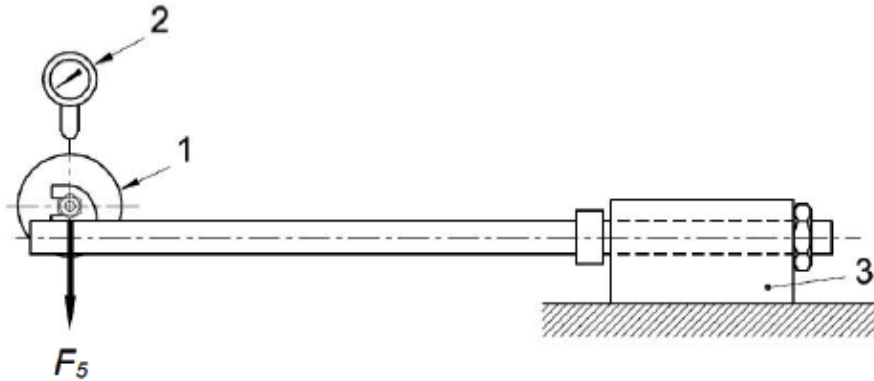
## Προδιαγραφές ISO(2231332 ISO 4210-6)

### Προδιαγραφές ασφαλείας ποδηλάτων.

#### Τεστ στατικής κάμψης

Πρόσδεση του πιρουνιού σύμφωνα με τις προδιαγραφές και εφαρμογή ομοιόμορφης δύναμης στον άξονα των νυχιών. Τοποθέτηση συσκευής για την μέτρηση της παραμόρφωσης εκεί όπου ασκείται η δύναμη προκυμμένου να μετρηθεί η παραμόρφωση και την μόνιμη παραμόρφωση του πιρουνιού στην κάθετη διεύθυνση με αυτή του steerer και στο επίπεδο του τροχού.

Εφαρμογή προ έντασης 100N κάθετα στο steerer ενάντια στην διεύθυνση της κίνησης και στο επίπεδο του τροχού. Αφαιρέστε την φόρτιση και επαναλάβει εως ότου υπάρχει μέτρηση της παραμόρφωσης εκεί μηδενίστε. Εφαρμόσατε δύναμη 1200 N και αναμείνατε 1 λεπτό τότε μειώστε την δύναμη στα 100N και μετρήστε της μόνιμες παραμορφώσεις.



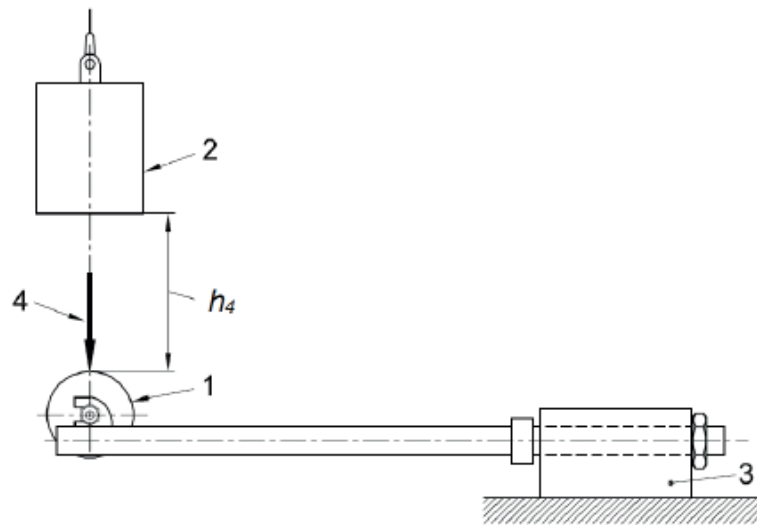
Εικόνα 41 Πειραματική διάταξη 1

#### Τεστ πρόσκρουσης

Προσδέστε το πιρούνι σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Προσδέστε κύλινδρο στον άξονα των νυχιών με μάζα μικρότερη ή ίση του κιλού και διαστάσεις των προδιαγραφών και σκληρότητα 60 HRC στην επιφάνειά πρόσκρουσης.

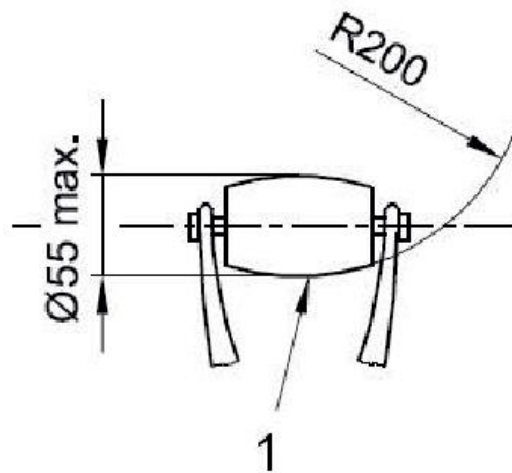
Ακινητοποιήστε μια μάζα 22,5kg  $\pm 0,1$ kg πάνω από τον τοποθετημένο κύλινδρο με τέτοια φορά ώστε η δύναμη να έχει την αντίθετη φορά από την πορεία κίνησης του ποδηλάτου και στο επίπεδο του τροχού. Τοποθετήστε συσκευή μέτρησης παραμόρφωσης στην κάτω μεριά του κυλίνδρου και μετρήστε την παραμόρφωση σε διεύθυνση κάθετη στο steerer και στο επίπεδο του τροχού.

Αφαιρέστε την συσκευή και σηκώστε την μάζα στα 640mm και αφήστε την μάζα να πέσει. Η αναπήδηση της μάζας είναι φυσιολογική. Όταν το φαινόμενο ολοκληρωθεί ελέξτε για ρογμες και μετρήστε την μόνιμη παραμόρφωση.



Εικόνα 42 Πειραματική διάταξη 2

Dimensions in millimetres



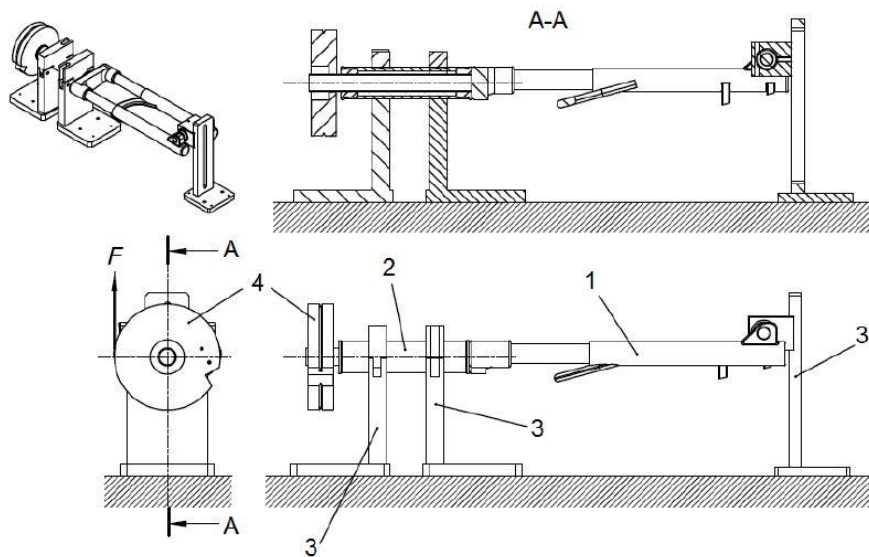
Key

1 low-mass roller (1 kg max.)

Εικόνα 43 Διαστάσεις για πειραματική διάταξη 2

## Τεστ ροπής

Εφαρμογή ροπής στη συνδεσμολογία όπως αυτή φαίνεται στην φωτογραφία και διατήρηση της για ένα λεπτό προς κάθε πιθανή κατεύθυνση στροφής γύρω από τον άξονα του steerer. Η ασκούμενη ροπή για αγωνιστικά ποδήλατα ορίζεται ως 80 Nm.



### Key

- 1 front fork
- 2 fork mounting fixture (fixture representative of the head tube)
- 3 rigid mount
- 4 test adaptor

Εικόνα 44 πειραματική διαταξη 3

## Τεστ κόπωσης στην κάμψη.

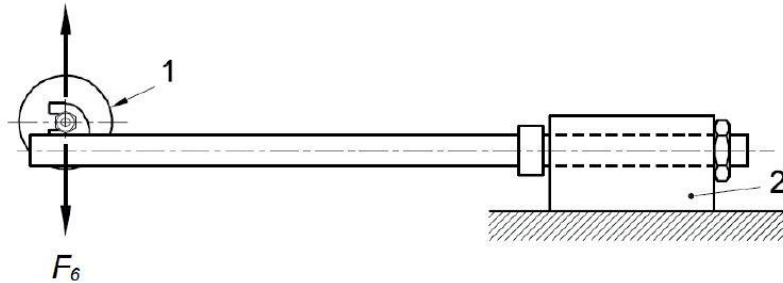
Πρόσδεση του πιρουνιού σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Εφαρμογή πλήρως εναλλασσόμενων δυναμικών δυνάμεων της τάξεως των 620 N στο επίπεδο του τροχού και κάθετα στο steerer. Η εφαρμογή της δύναμης θα γίνει στα νύχια και θα πρέπει να αντέξει 100000 κύκλους λειτουργείας. Η συχνότητα εναλλαγής των δυνάμεων θα πρέπει να είναι 25 Hz.

Σταματήστε το τεστ αν η παραμόρφωση στο σημείο εφαρμογής των δυνάμεων αυξηθεί πάνω από 20% από τις αρχικές τιμές.

Ολοκληρώστε το τεστ μετά από 10000 κύκλους και ελέγξτε προσεκτικά για ρωγμές και αστοχίες.

Αν το δείγμα αντέξει τους 100000 κύκλους με επιτυχία τότε πραγματοποιείται το τεστ πρόσκρουσης που περιεγράφηκε παραπάνω όταν ολοκληρωθεί το τεστ μετρήστε την μόνιμη παραμόρφωση και ελέγξτε για τυχόν ρωγμές.



**Key**

- 1 pivoted force attachment
- 2 rigid mount incorporating head bearings

Εικόνα 45 πειραματική διάταξη 4

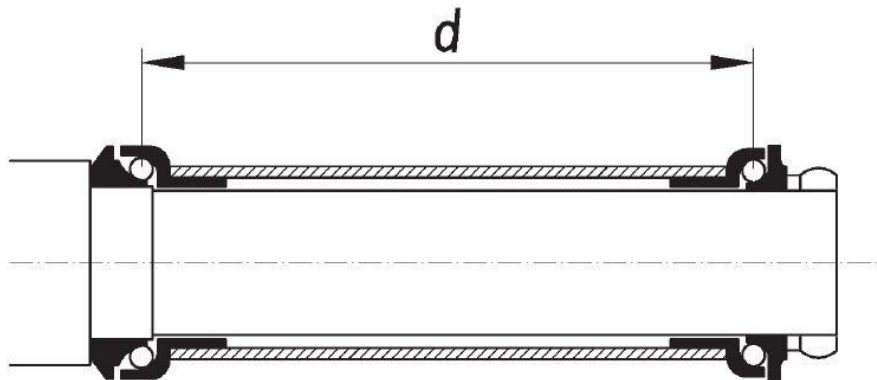
### Τεστ για μη σύγκλητό πιρούνι

Προσδέστε το πιρούνι σύμφωνα με τις προδιαγραφές κρατώντας τις δυνάμεις μακριά από την κορόνα και εφαρμόστε δύναμη 5000N διαμοιρασμένη στα δυο άκρα με διεύθυνση παράλληλη στα στο steerer.

### Προδιαγραφές πρόσδεσης

Το πιρούνι θα πρέπει να προσδεθεί σε αντιπροσωπευτικά εξαρτήματα του κούτελου του σκελετού και των ποτηριών και των ρουλεμάν που χρησιμοποιούνται και στην πραγματικότητα. Η τυπική απόσταση μεταξύ των ρουλεμάν υπολογίζεται σε 150+-50 mm όπως φένεται στο παρακάτω σχήμα.

Το αντιπροσωπευτικό κούτελο της συναρμογής δεν θα πρέπει να έρχεται σε επαφή με το sheerer όταν κάμπτεται.



Εικόνα 46 στήριξη σωλήνα στις πειραματικές διατάξεις

## Έλεγχος προδιαγραφών με αλουμίνιο

### Αλουμίνιο

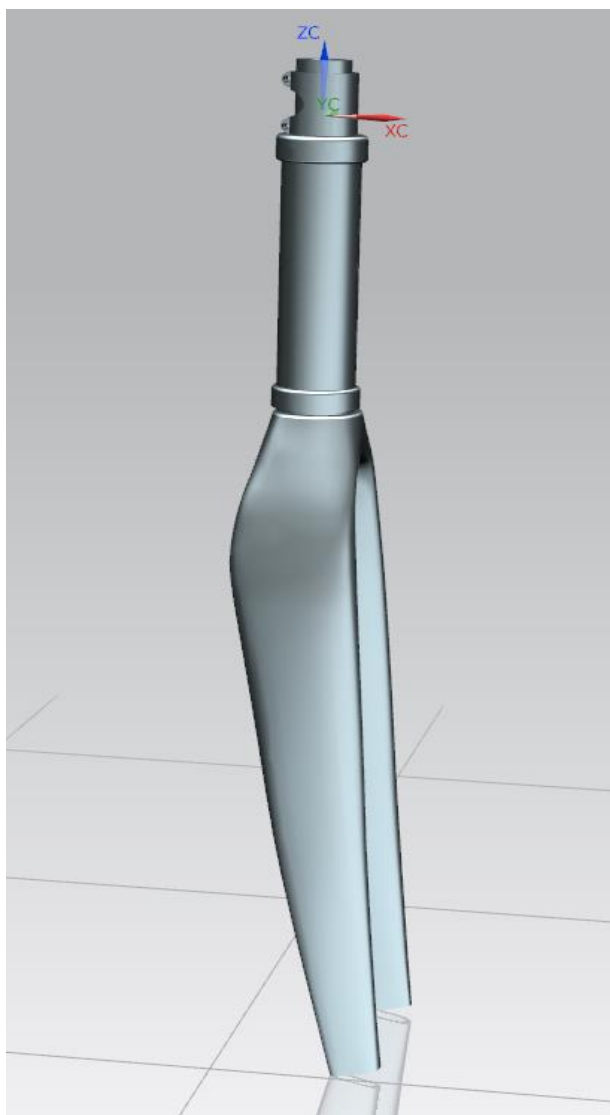
Σε πρώτη φάση θα πρέπει να ελέγξουμε το κατά πόσο τα σχέδια μας έχουν διαφορετικά αποτελέσματα σε διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων. Κατά τον έλεγχο του σχεδίου μας θα χρησιμοποιήσουμε σαν υλικό το αλουμίνιο 7075 με συγκεκριμένο πάχος σε ολη την επιφάνεια του σχεδίου μας. Το πάχος αυτό επιλέγεται ως 1mm. Σαν υλικό χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό αλουμίνιο το 6061. Αυτό που μας ενδιαφέρει σε αυτή την φάση είναι η σύγκριση και όχι τόσο η αντοχή. Βασική προϋπόθεση φυσικά αποτελεί το να μην περνάει στην πλαστική περιοχή το τεμάχιο λόγω της φόρτισης κάτι το οποίο δεν συμβαίνει

Έτσι λοιπόν έγινε αναπαραγωγή των προδιαγραφών σε κατάλληλους solvers που παρέχει το λογισμικό πακέτο κάθε φορά. Κυρίως χρησιμοποιήθηκε ο solver 101 ιδανικός για απλές φορτίσεις και γραμμικά φαινόμενα.

Ταχύτατα διαπιστώσαμε ότι το πάχος θα έπρεπε να αυξηθεί σε συγκεκριμένα σημεία λόγω του ότι οι τάσεις ξεπερνούσαν το όριο διαρροής του υλικού. Χρησιμοποιήθηκε λοιπόν με πάχος 2mm ωστόσο λόγω των τεράστιων τάσεων που αναπτύσσονταν στην επικίνδυνη διατομή (κορόνα steerer) αποφασίστηκε να ενισχύσουμε τα σημεία που είχαν πρόβλημα με επιπλέον υλικό. Αυτό έγινε για δυο λόγους. Πρώτον, κατά την κατασκευή του πιρουνιού με ανθρακονήματα σε εκείνα τα σημεία επίσης θα έχουμε επιπλέον υλικό. Δεύτερον, λόγω των μεγάλων τάσεων αδυνατούσαμε να δούμε πως ανταποκρίνονταν τα blades στις καταπονήσεις μιας και οι τάσεις που αναπτύσσονταν εκεί ήταν πολύ μικρότερες.

## Τεστ στατικής κάμψης

Για το τεστ αυτό σχεδιάστηκε όλη η συνδεσμολογία όπως θα είναι στην πραγματικότητα. Σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους ο λαιμός το κούτελο του σκελετού, επίσης σχεδιάστηκαν τα ρουλεμάν τα οποία δεν μας ενδιέφερε να περιστρέφονται οπότε σχεδιάστηκε απλά ένα τεμάχιο στις διαστάσεις των ρουλεμάν. Ακόμη χρειάστηκε να σχεδιαστούν τα ποτήρια και οι φωλιές σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

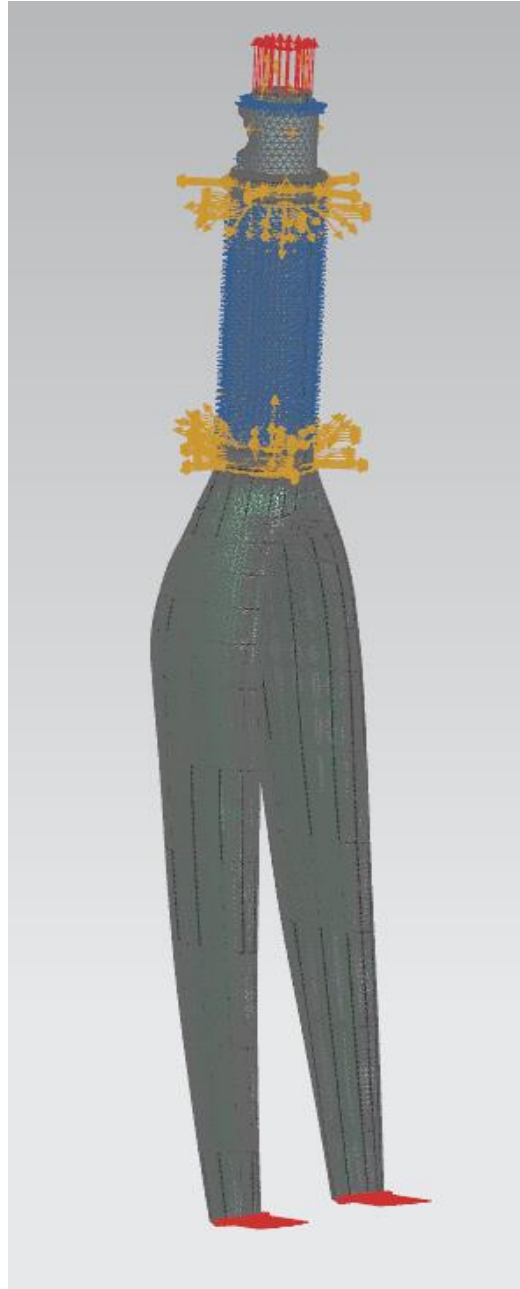


Εικόνα 47 διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στις προσομιώσεις

Η ανάλυση έγινε στον solver 101 του λογισμικού πακέτου siemens nx 10 αφού ορίστηκαν κατάλληλα οι επαφές μεταξύ των σωμάτων. Επίσης στο αποτέλεσμα συνυπολογίζεται η τριβή για την οποία πήραμε μια τυπική τιμή του συντελεστή στατικής τριβής 0.5. Χρησιμοποιήθηκε απλή surface to surface επαφή σε όλες τις



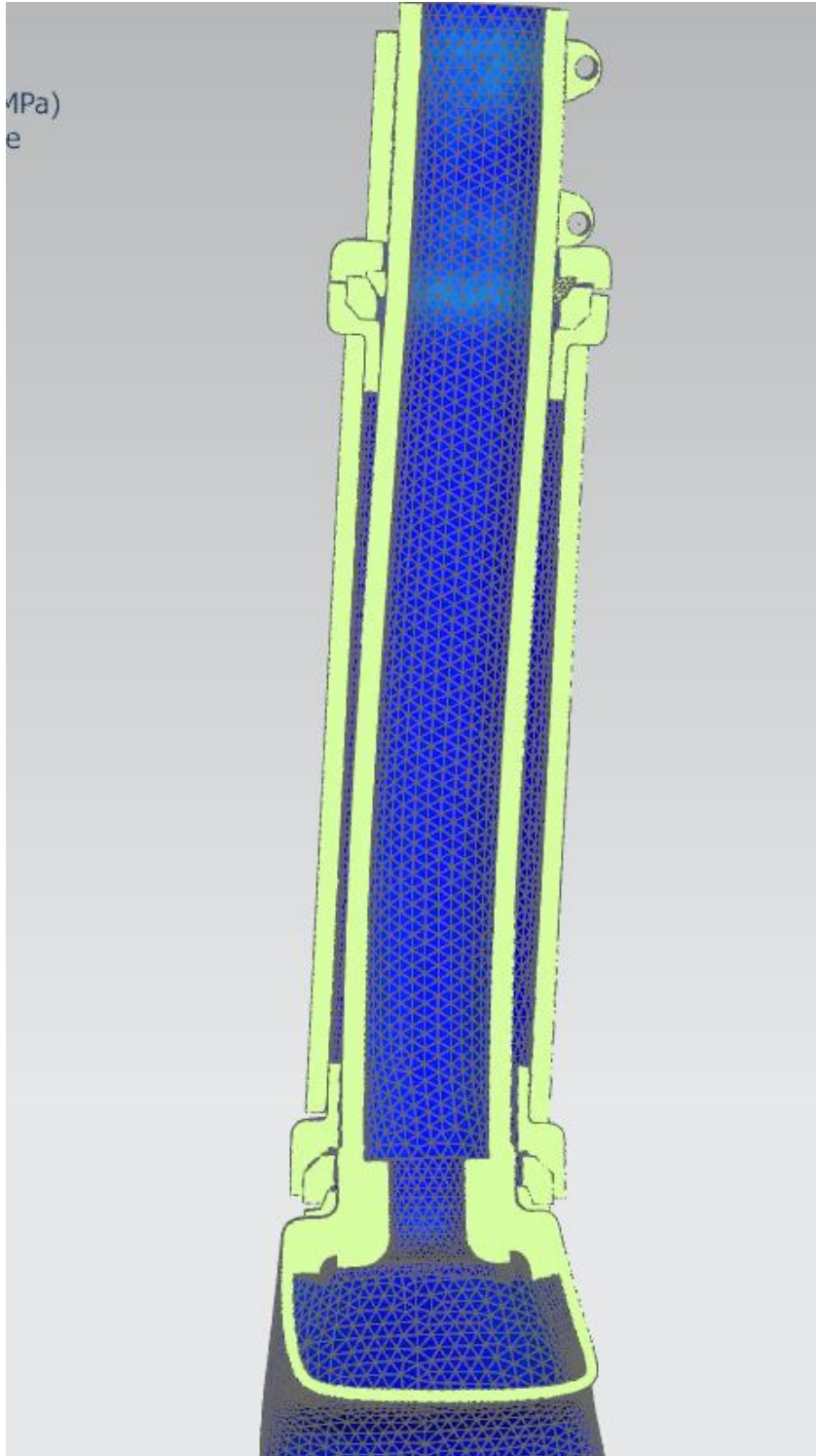
επιφάνειες. Ακόμη υπολογίστηκε η προ ένταση του πιρουνιού από κοχλία στην κορυφή του steerer και οι βίδες του λαιμού που σφίγγουν τον λαιμο και εν συνέχεια το steerer. Το φορτίο από το οποίο καταπονείτε το πιρούνι είναι 1200N στην διεύθυνση της κίνησης του ποδηλάτου.



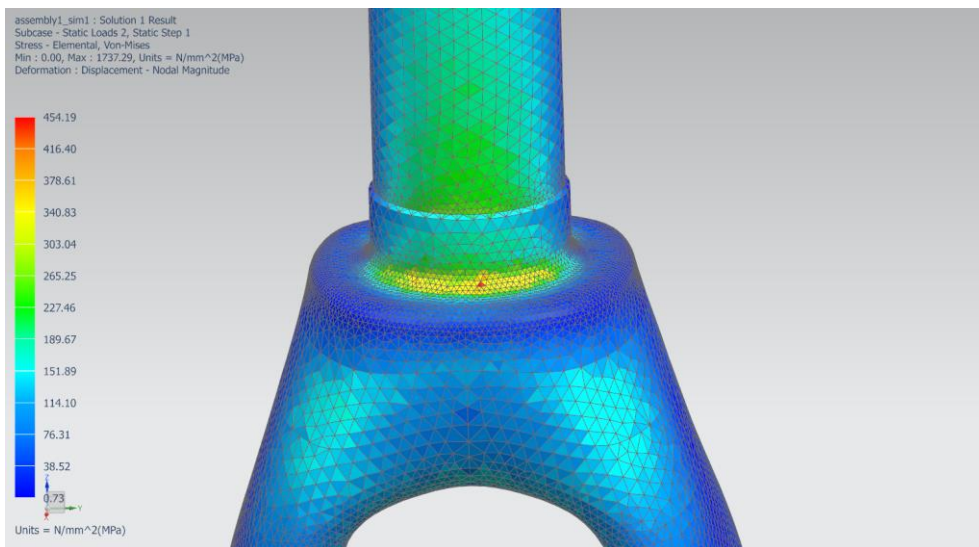
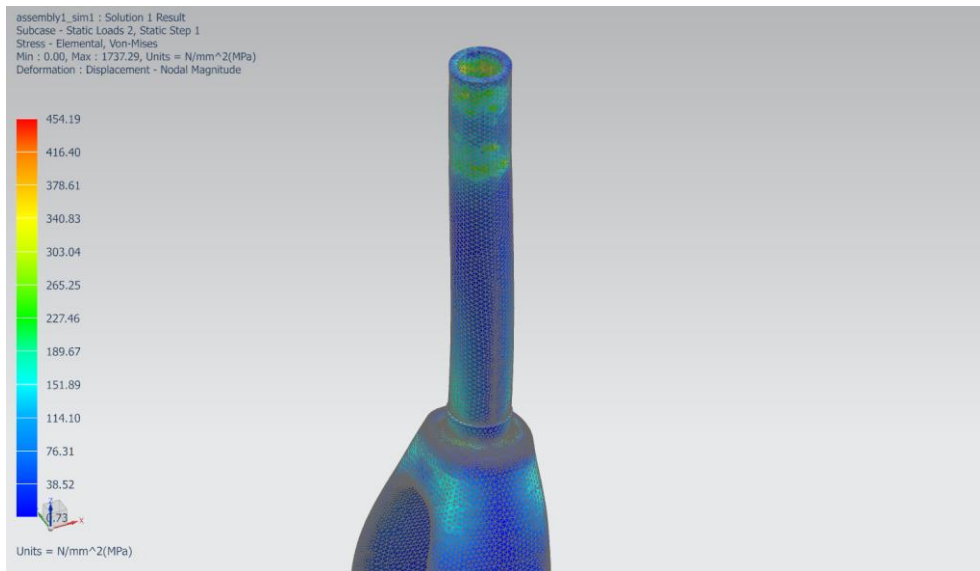
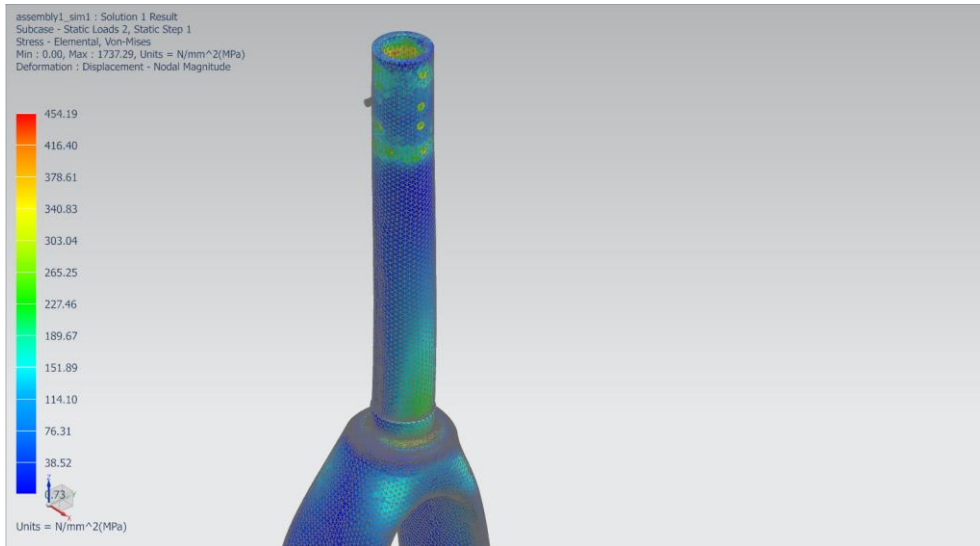
Εικόνα 48 διάταξη προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία



Εικόνα 49 γραφικά αποτελέσματα προσομοίωσης



*Εικόνα 50 τομή των συνδέσεων μετά τις παραμορφώσεις*

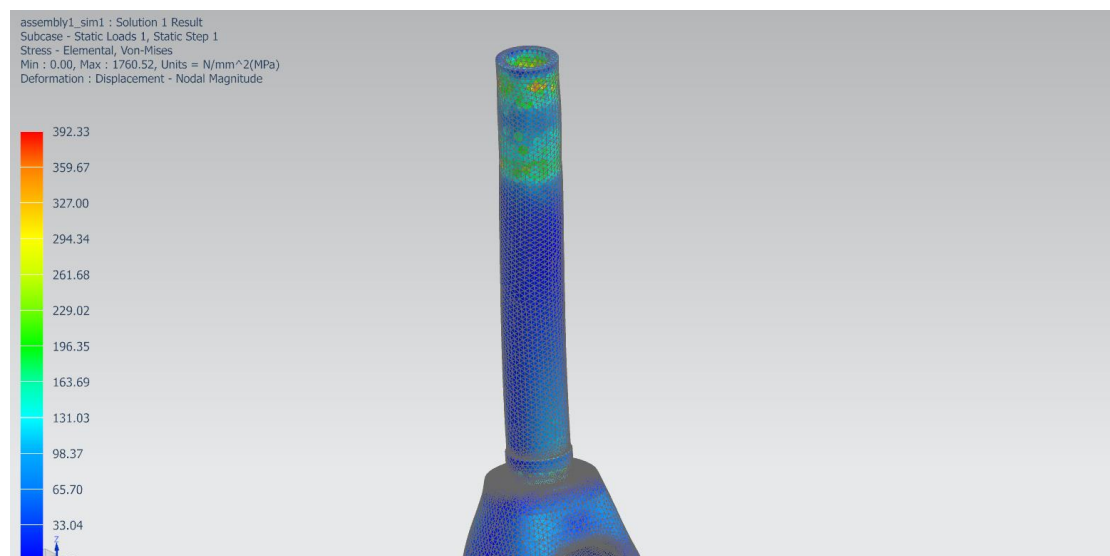
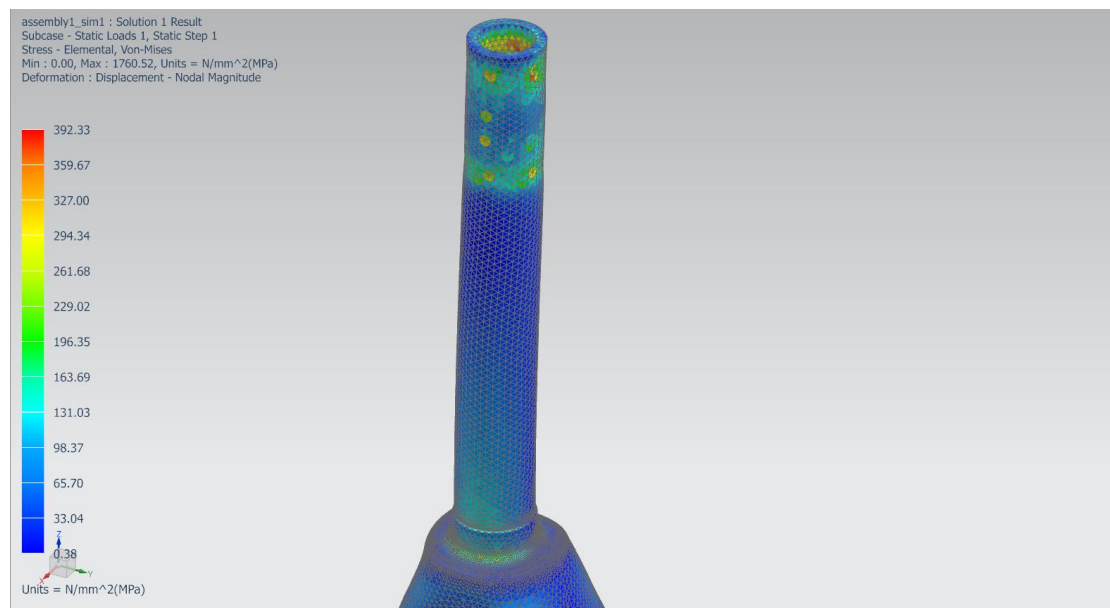


Εικόνα 51 γραφικά αποτελέσματα προυιου

Το υλικό του πιρουνιού τελικά άλλαξε και χρησιμοποιήσαμε το αλουμίνιο 7075 t6 συνεπώς αντέχει σε δυσμενέστερες καταπονήσεις και πλέον γνωρίζουμε που πρέπει να ενισχύσουμε με ανθρακονήματα προκυμμένου να ενισχύσουμε την αντοχή του δοκιμίου.

### Τεστ κόπωσης στην κάμψη

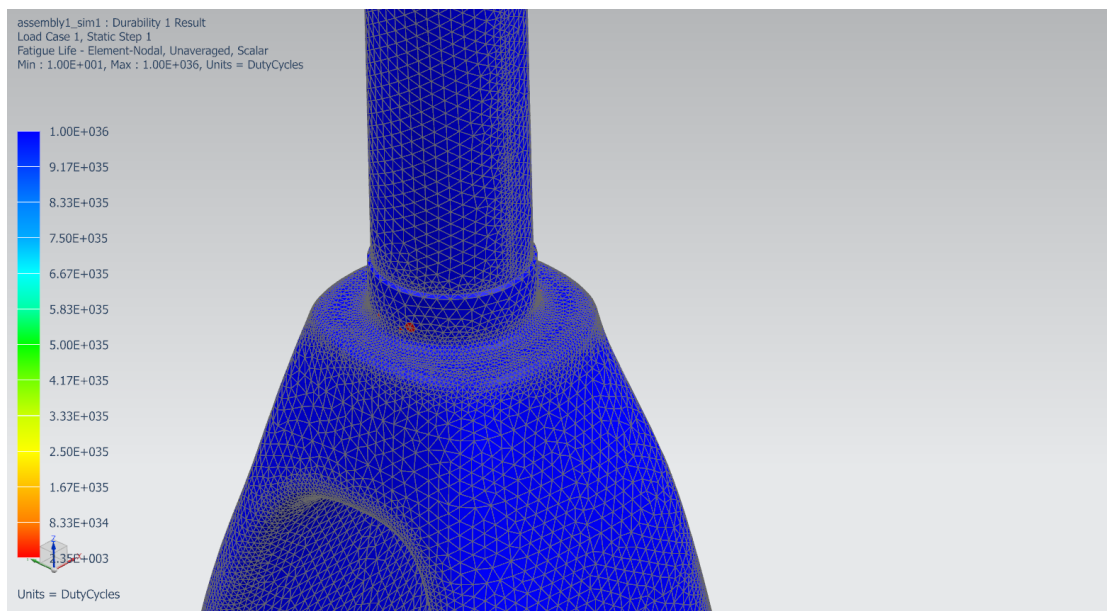
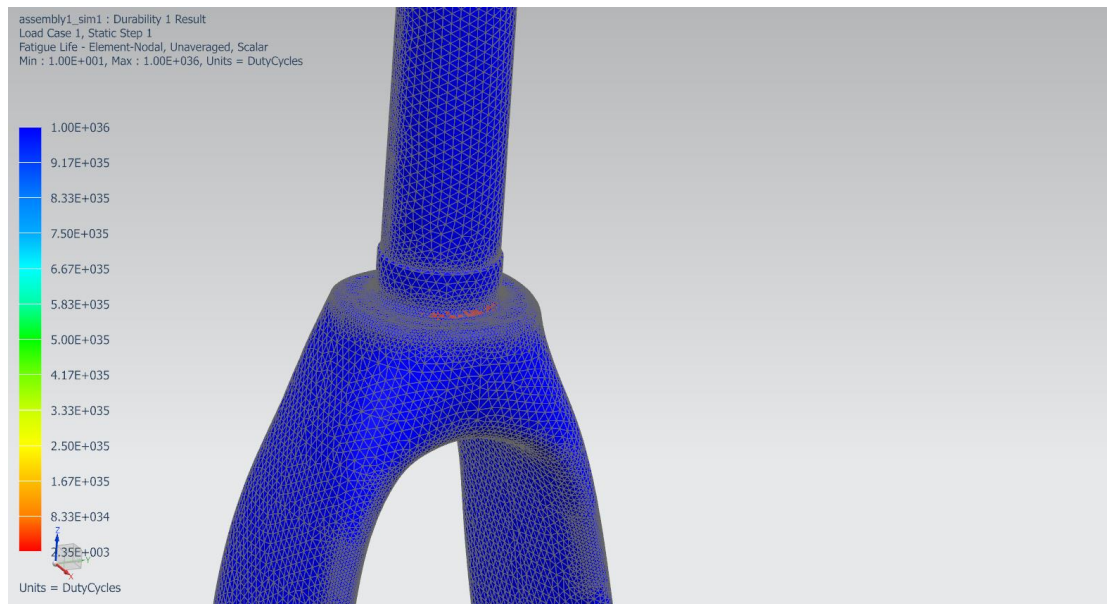
Για το τεστ αυτό χρησιμοποιήσαμε τον ίδιο solver (101) εφαρμόσαμε μια δύναμη 620 N στα blades και μετα χρησιμοποιήθηκε το durability wizard στο οποίο ορίσαμε τον συνολικό κύκλο φορτίσεων σε εναλλασσόμενο μοτίβο δυνάμεων 620 N.



Εικόνα 52 γραφικά αποτελέσματα επιβάρυνση της τριβής

Πρωτού χρησιμοποιήσουμε τον κώδικα για την κόπωση επέτρεπε να εισάγουμε στο πρόγραμμα τις καμπύλες S-N όπου αυτές βρέθηκαν στην βιβλιογραφία και εισήχθησαν οι τιμές στο πρόγραμμα.

Το αλουμίνιο ωστόσο και δη το 7075 T6 το οποίο έχει υποστεί επιπλέον επεξεργασία για σκλήρυνση όπως αναμέναμε δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην κόπωση και προβλέπεται πως θα υπάρξει ρωγμή.



Εικόνα 53 διάρκεια ζωής

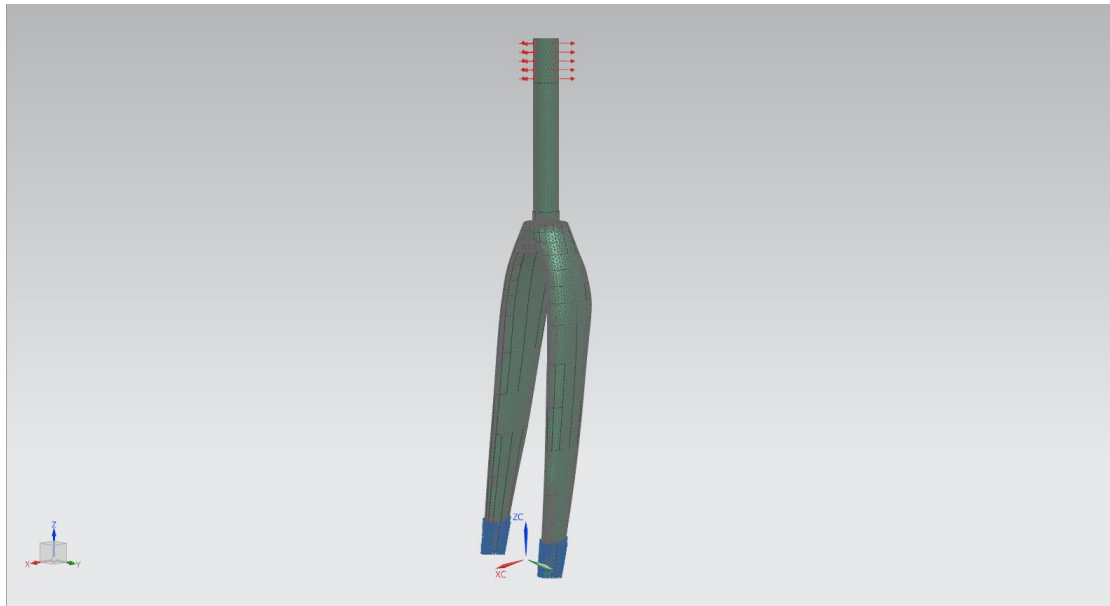
Όπως αναμέναμε το αλουμίνιο θα αντέξει μόλις 23500 κύκλους φόρτισης από τους συνολικά 100000 που απαιτούν οι προδιαγραφές. Τα



ανθρακονήματα ωστόσο έχουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά στην κόπωση οπότε δεν θα ασχοληθούμε αλλά με την βελτίωση της εσωτερικής γεωμετρίας ώστε να το κάνουμε να αντέξει.

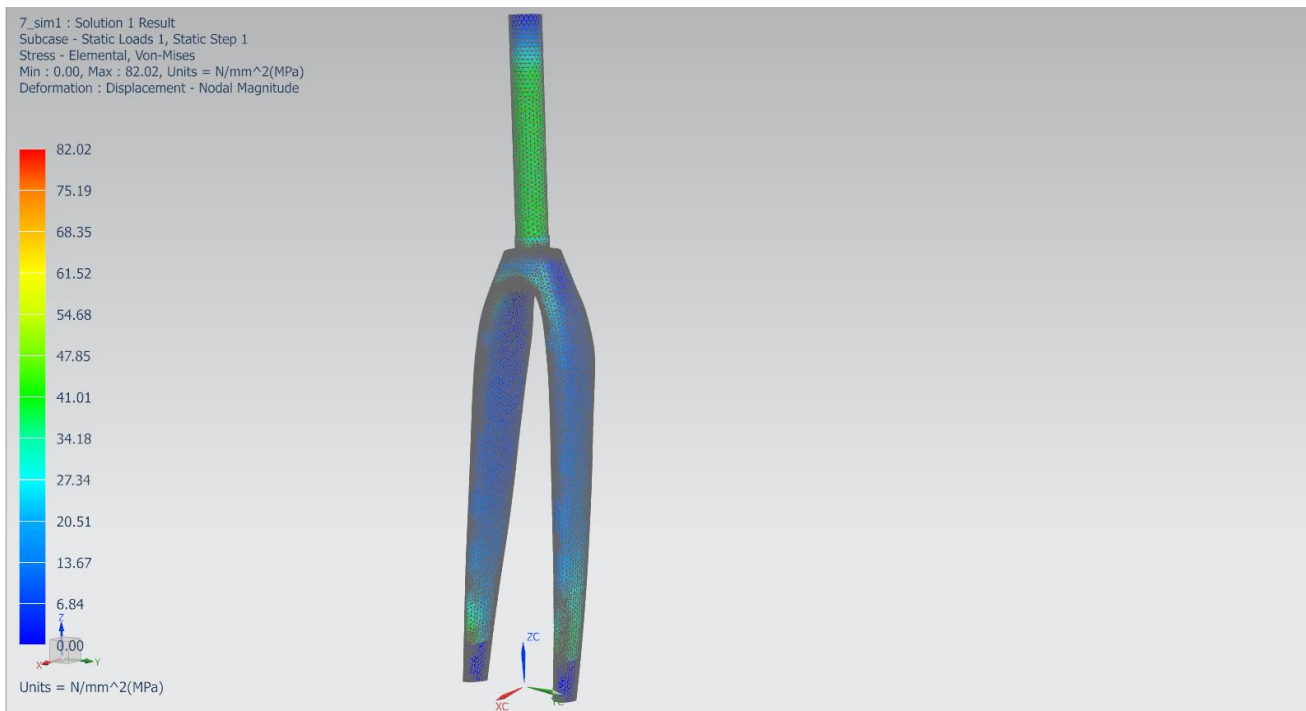
### Τεστ ροπής

Εδώ αλλάζει η διάταξη της συνδεσμολογίας ωστόσο χρησιμοποιήτε ο ίδιος solver με πριν.



Εικόνα 54 Διάταξη για τεστ ροπής

Η πάκτωση πλέον είναι στα νύχια και εφαρμογή της ροπής στο σωλήνα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 55 Γραφικά αποτελέσματα τεστ ροπήs

Όπως φέρεται λοιπόν οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι σχετικά μικρές και δεν δημιουργούν κάποιο πρόβλημα.

### Τεστ πρόσκρουσης

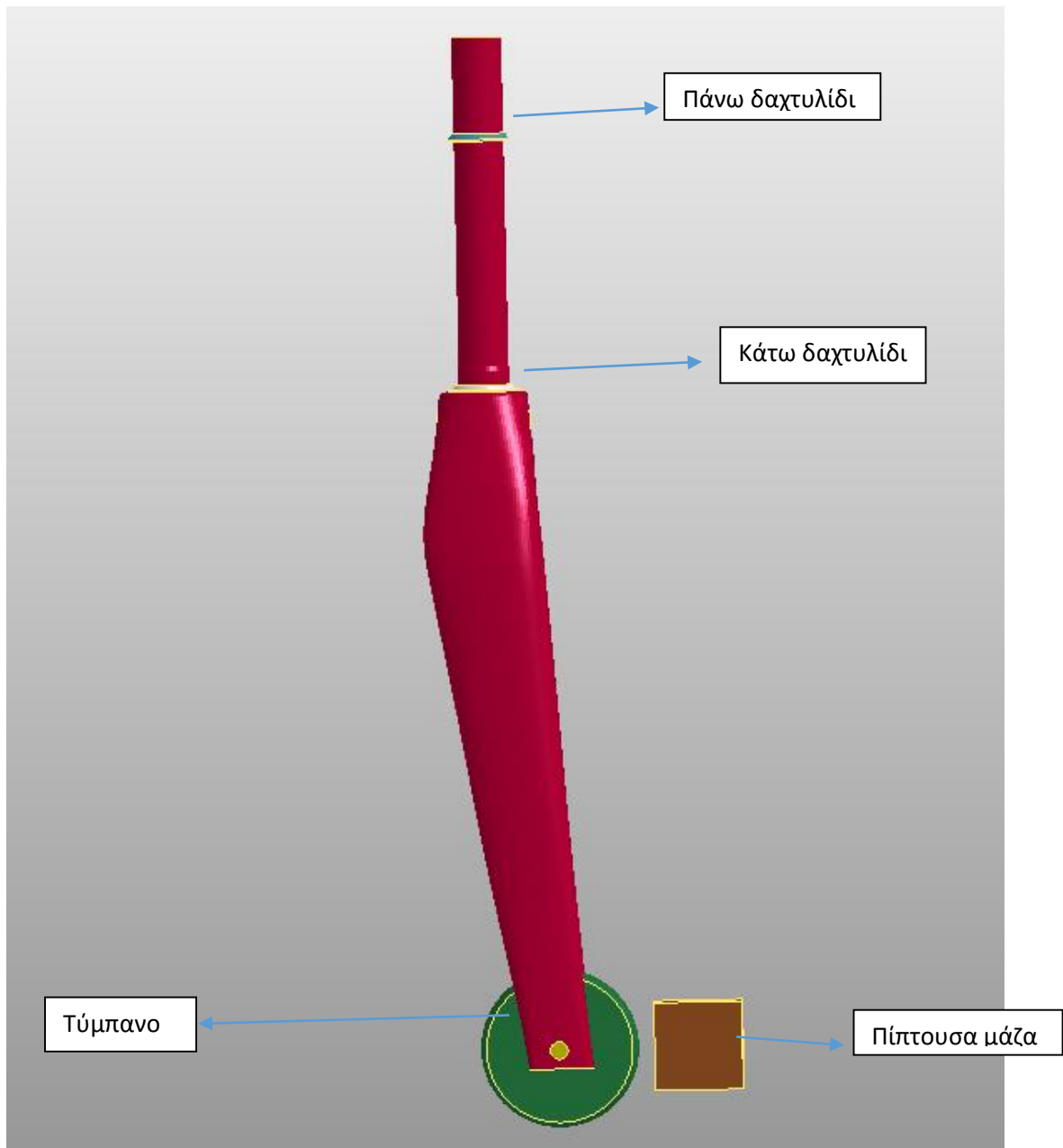
Το συγκεκριμένο τεστ αποτέλεσε σημαντική πρόκληση μιας και έπρεπε να οριστούν πολλές παράμετροι. Αυτό συμβαίνει διότι ήταν αναγκαία η χρήση μη γραμμικού explicit επιλητη. Χρειάστηκε να ορίσουμε επιπλέον ιδιότητες στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν (τις μη γραμμικές αυτών) χρονικά περιθώρια ανάλυσης. Να ορίσουμε κατάλληλα της επαφής μεταξύ των σωμάτων και να ορίσουμε κατάλληλα χρονικά διαστήματα για την ολοκλήρωση του κώδικα. Παρ όλα αυτά η προσομοίωση έτρεξε με επιτυχία.

Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήσαμε το Ls-dyna μιας και κρίθηκε καταλληλότερο για το συγκεκριμένο τεστ. Αρχικά σχεδιάστηκαν scale down μοντέλα και τελικά καταλήξαμε να σχεδιάσουμε ένα αρκετά ρεαλιστικό μοντέλο.

Τα διάφορα κομμάτια σχεδιάστηκαν στο nx και εισήχθησαν σαν IGES αρχεία στο Ls-dyna. Το πιρούνι σχεδιάστηκε ως shell ενώ τα υπόλοιπα ως solids. Αντίστοιχα έγινε το meshing σε 2d και 3d στοιχεία αντίστοιχα. Τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε ήταν αλουμίνιο για το πιρούνι και τα υπόλοιπα μέρη μοντελοποιήθηκαν ως χάλυβας. Στην συνέχεια οριστήκαν τα boundary conditions και τα κατάλληλα contacts.



Πιο συγκεκριμένα η διάταξη:



Εικόνα 56 Διάταξη προσομοίωσης στο Is dyna

Μετα την σύγκρουση παρατηρείται μια αποσβένουσα ταλάντωση εως ου του τελικά ηρεμεί. Η μέγιστη τάση κατά την ταλάντωση αυτή παρατηρείται στην διεύθυνση της κρούσης στην ακραία θέση. Η τάση αυτή είναι ίση με 246.4MPa αρκετά κάτω από το όριο θραύσης για το αλουμίνιο 7075 t6 που χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό της ανάλυσης.

## Έλεγχος προδιαγραφών με ανθρακονήματα

### Εισαγωγή

Στο σημείο αυτό πραγματοποιήθηκε η διαδικασία κατά την οποία αρχίσαμε να προσθέτουμε laminates στο αρχικό 2d cad. Σε πρώτη φάση δοκιμαστήκαν διάφοροι συνδυασμοί στρώσεων με σκοπό να βρούμε το μοτίβο που πρέπει να ακολουθήσουμε

Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις όσων αφορά τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιούνται τα υφάσματα. Το λογισμικό πακέτο προφέρει την επιλογή του zone based και του global layup (zone based). Οι διαφορές μεταξύ των δυο έγκειται στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα στρώνει τις στρώσεις πάνω στο σχέδιο cad που έχουμε εισάγει. Επίσης υπάρχει διαφορά στην ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται ο προσανατολισμός των ινών. Η zone based μέθοδος αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικότητας μιας και προσομοιώνει σε πολύ καλο βαθμό τις κατευθύνσεις των ινών μετά την εισαγωγή τους στο καλούπι.

### Εύρεση κατάλληλης διαστρωμάτωσης

Στο σημείο αυτό πραγματοποιήθηκε η διαδικασία κατά την οποία αρχίσαμε να προσθέτουμε laminates στο αρχικό 2d cad. Σε πρώτη φάση δοκιμαστήκαν διάφοροι συνδυασμοί στρώσεων με σκοπό να βρούμε το μοτίβο που πρέπει να ακολουθήσουμε.

Αρχικά μοντελοποιήσαμε με woven φυλά σε quasi ισεντροπικό προκειμένου να διαπιστώσουμε τις κατευθύνσεις στις οποίες ασκούνται τα φορτία της καταπόνησής κατά το τεστ κάμψεως των 1200N μιας και παρόμοιες κατευθύνσεις των φορτίων ασκούνται και στα άλλα τεστ. Αυτό το διαπιστώσαμε με την αρχική μας προσέγγιση με το αλουμίνιο. Αφού διαπιστώσουμε τις κατευθύνσεις των φορτίων πλέον θα μπορούμε να γνωρίζουμε που πρέπει να ενισχύσουμε και με τι φύλλα (woven ή unidirectional).

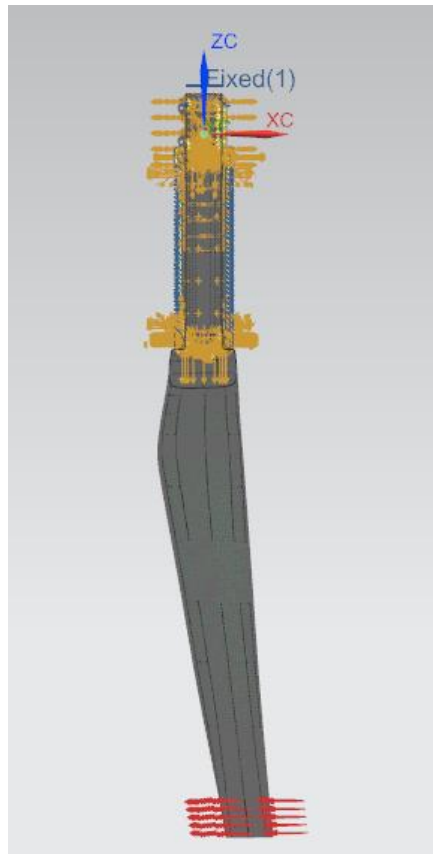
Κινούμενοι με αυτό το σκεπτικό προχωρήσαμε στην τοποθέτηση των laminates σε αρκετές διαφορετικές διαστρωματώσεις μέχρι να καταλήξουμε στο πιο φύλλο μπαίνει που.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις όσων αφορά τον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιούνται τα υφάσματα. Το λογισμικό πακέτο προσφέρει την επιλογή του zone based και του global layup (zone based). Οι διαφορές μεταξύ των δυο έγκειται στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα στρώνει τις στρώσεις πάνω στο σχέδιο cad που έχουμε εισάγει. Επίσης υπάρχει διάφορα στην ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται ο προσανατολισμός των ινών. Η zone based μέθοδος αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικότητας μιας και προσομοιώνει σε πολύ καλό βαθμό τις κατευθύνσεις των ινών μετά την εισαγωγή τους στο καλούπι.

Όσων αφορά την διάταξη του τεστ προσπαθήσαμε να αναπαραστήσουμε το φαινόμενο όσο καλύτερα γινόταν. Φτιάχνοντας διάταξη κατάλληλη ώστε να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στην πραγματικότητα και στις πραγματικές καταπονήσεις που θα προκύψουν. Σχεδιάστηκε ολο το σύστημα με δαχτυλίδια ρουλεμάν ποτήρια αλλά και το κούτελο του σκελετού. Κατάλληλες επαφές ορίστηκαν μεταξύ των επιμέρους

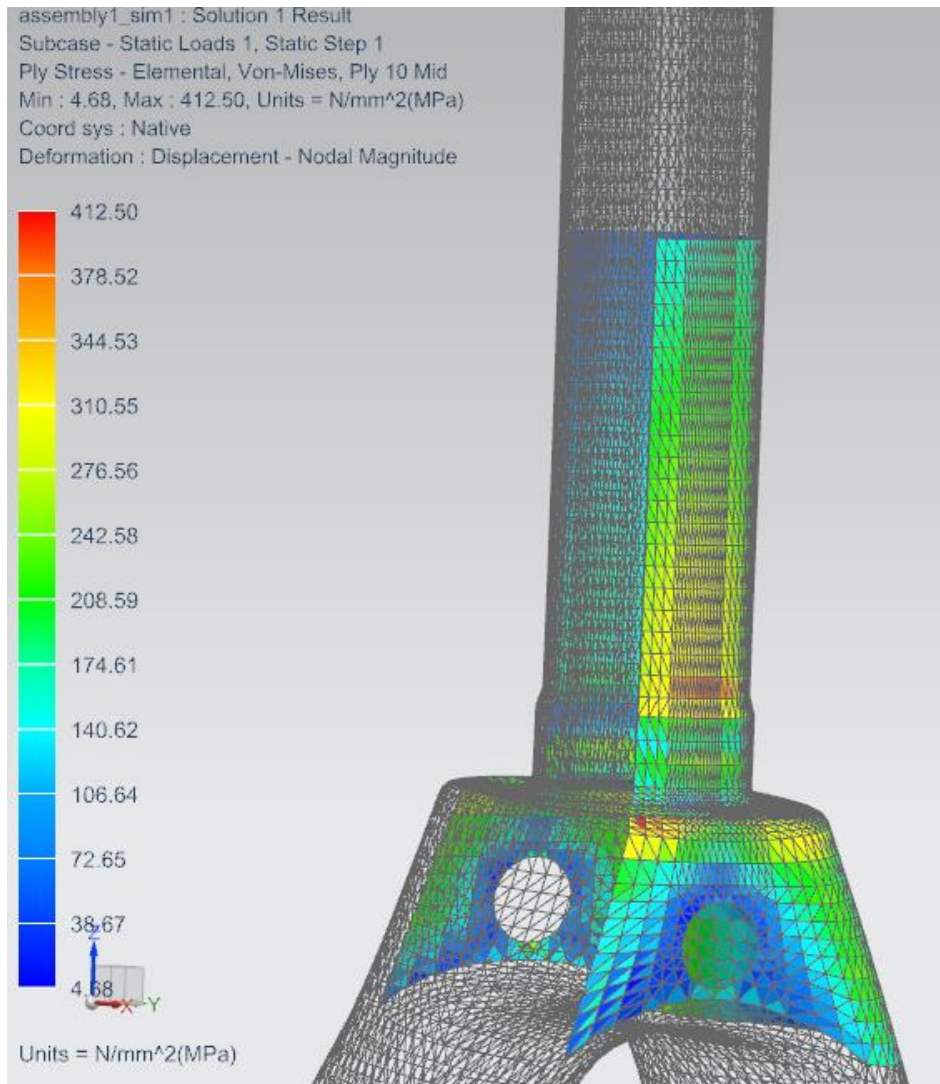
σχεδίων αλλά και συντελεστής τριβής μιας τυπικής τιμής γύρω στο 0,5. Οι επαφές όλες οριστήκαν ως surface to surface.

Θεωρήθηκε γραμμικό το φαινόμενο τις συγκεκριμένης καταπόνησης και επίσης θεωρήθηκε ότι τα υλικά θα παραμείνουν στην ελαστική περιοχή τους. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο solver 101 που βρίσκεται στην διάθεση μας μέσω του λογισμικού πακέτου



Εικόνα 57 Τομη διαταξης

Λόγω του ότι πέρνουμε διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε στρώση που χρησιμοποιείται και δεν ήταν δυνατόν να βάλουμε τα αποτελέσματα από κάθε στρώση έχουμε συγκεντρώσει τα αποτελέσματα σε πίνακες του excel οι οποίο περιλαμβάνουν α πιο σημαντικά στοιχεία των αποτελεσμάτων.



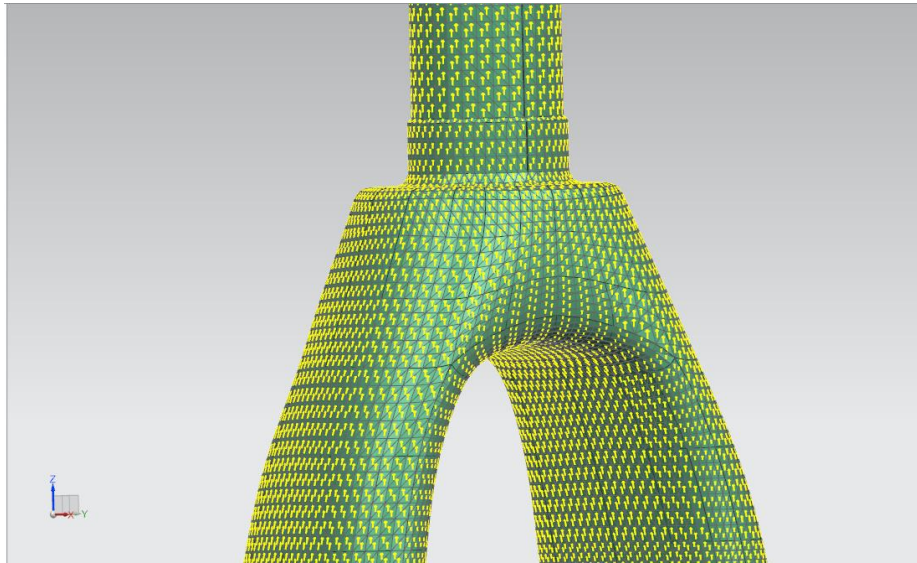
Εικόνα 58 Γραφική απεικόνιση για την καταπόνηση μιας στρώσης

### Zone based layup

Αρχικά ακολουθήσαμε την zone based μέθοδο που προσφέρει το πρόγραμμα κατά την οποία τοποθετείς στρώσεις σε shell elements ορίζοντας την κατεύθυνση των ινών.

Αρχικός προσανατολισμός για τις 0 μοίρες λογίζεται ο άξονας των z. Αυτό συμβαίνει για δυο λόγους:

1. Μας διευκολύνει η χρήση ενός άξονα του global συστήματος συντεταμένων και δη ο άξονας των z διότι εύκολα και γρήγορα βάζουμε τις κατευθύνσεις που επιθυμούμε.
2. Λόγω του σχήματος το πιρούνι είναι κάθετο στο έδαφος με μια μικρή κλίση στα blades αυτό μας δίνει την δυνατότητα να το θεωρήσουμε ολο κάθετο με σκοπό να γλυτώσουμε χρόνο στην ανάλυση μας.



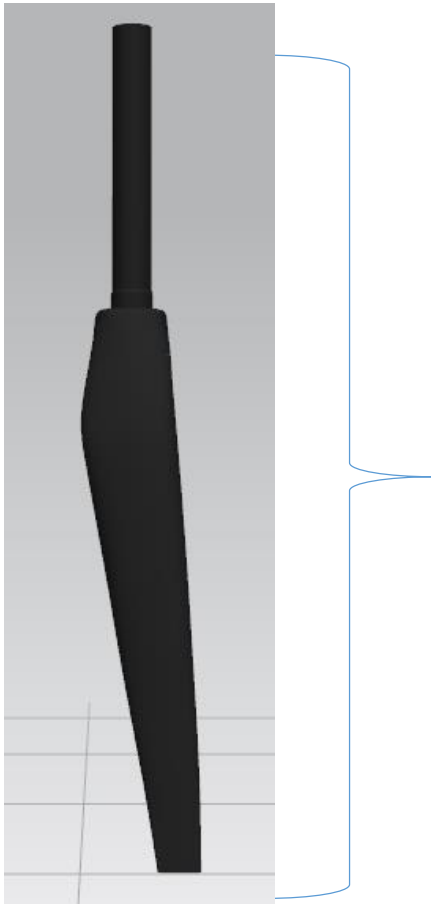
Εικόνα 59 Κατεύθυνση των ινών

Στις εικονες 60 εως 73 απεικονίζονται οι διαστρωμάτωσής που δοκιμάστηκαν. Στην συνέχεια υπάρχουν αναλυτικοί πίνακες σχετικά με τα φορτία που αναπτύχθηκαν στις προσομοιώσεις.



ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-T300w	0,3	45
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-T300w	0,3	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0

Εικόνα 60 1η  
διαστρωμάτωση



Material Name	Thickness (mm)	Angle (de
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0
ply-m46j_UD	0,16	0

Εικόνα 61 2η  
διαστρωμάτωση

	Element Id	Ply Layer Id	Computation Location	Bond	Stresses						Maximum Principal	Maximum Shear
					Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31		
Min Stress 11	8993	1	11 Middle	Interlaminar	-2,99E+06	-3,70E+02	0,00E+00	-3,85E+03	-1,16E+01	6,31E+03	-3,65E+02	1,50E+06
Max Stress 11	8840	1	11 Middle	Interlaminar	2,85E+06	-4,93E+02	0,00E+00	8,02E+03	-1,51E+00	6,86E+03	2,85E+06	1,43E+06
Min Stress 22	8834	16	10 Middle	Interlaminar	-1,22E+06	-1,84E+06	0,00E+00	-3,19E+05	-3,04E-11	8,90E-12	-1,08E+06	4,47E+05
Max Stress 22	9009	16	10 Middle	Interlaminar	9,97E+05	1,89E+06	0,00E+00	-4,93E+05	-2,54E-11	1,56E-11	2,11E+06	6,64E+05
Min Stress 33	1	1	11 Middle	Interlaminar	-1,01E+04	-6,06E+01	0,00E+00	3,50E+01	-4,20E-02	-2,10E+02	-6,05E+01	5,02E+03
Max Stress 33	1	1	11 Middle	Interlaminar	-1,01E+04	-6,06E+01	0,00E+00	3,50E+01	-4,20E-02	-2,10E+02	-6,05E+01	5,02E+03
Min Stress 12	3888	7	2 Middle	Interlaminar	1,35E+04	-1,73E+05	0,00E+00	-2,96E+06	1,02E+04	-4,20E+04	2,88E+06	2,96E+06
Max Stress 12	3870	7	2 Middle	Interlaminar	-1,04E+04	1,65E+05	0,00E+00	2,98E+06	1,15E+04	-4,32E+04	3,05E+06	2,98E+06
Min Stress 23	9250	11	5 Middle	Interlaminar	2,62E+05	6,19E+04	0,00E+00	1,44E+05	-1,38E+05	-6,74E+04	3,37E+05	1,75E+05
Max Stress 23	9131	11	5 Middle	Interlaminar	1,10E+05	9,88E+04	0,00E+00	3,23E+05	1,27E+05	-1,21E+04	4,27E+05	3,23E+05
Min Stress 31	9046	9	3 Middle	Interlaminar	-4,54E+05	-1,88E+05	0,00E+00	-2,26E+05	-6,78E+04	-2,63E+05	-5,87E+04	2,62E+05
Max Stress 31	9008	9	3 Middle	Interlaminar	8,36E+04	7,15E+05	0,00E+00	4,55E+05	4,63E+04	8,53E+04	9,53E+05	5,53E+05
Min Maximum Principal Stress	8891	16	10 Middle	Interlaminar	-1,44E+06	-1,58E+06	0,00E+00	4,09E+03	1,52E-11	-7,05E-12	-1,44E+06	7,23E+04
Max Maximum Principal Stress	8993	16	10 Middle	Interlaminar	1,32E+06	1,42E+06	0,00E+00	-2,36E+06	7,40E-12	5,34E-12	3,73E+06	2,36E+06
Min Maximum Shear Stress	30577	1	11 Middle	Interlaminar	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Max Maximum Shear Stress	8840	16	10 Middle	Interlaminar	-1,84E+06	-6,07E+05	0,00E+00	2,94E+06	9,63E-13	5,81E-12	1,78E+06	3,01E+06
Max Absolute Ply Failure Index	34464	16	10 Middle	Interlaminar	-3,79E+03	1,09E+05	0,00E+00	1,83E+06	-1,39E-11	5,19E-13	1,88E+06	1,83E+06
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	11 Middle	Interlaminar	-1,01E+04	-6,06E+01	0,00E+00	3,50E+01	-4,20E-02	-2,10E+02	-6,05E+01	5,02E+03
Min Ply Margin of Safety	1	1	11 Middle	Interlaminar	-1,01E+04	-6,06E+01	0,00E+00	3,50E+01	-4,20E-02	-2,10E+02	-6,05E+01	5,02E+03
Max Ply Margin of Safety	34464	16	10 Middle	Interlaminar	-3,79E+03	1,09E+05	0,00E+00	1,83E+06	-1,39E-11	5,19E-13	1,88E+06	1,83E+06

Εικόνα 62 Αποτελέσματα 1ης διαστρωμάτωσης

	Element Id	Ply Layer Id	Computation Location	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Maximum Shear
Min Stress 11	107513	15	Middle	Laminate1	Interlaminar	-6.55E+07	-5.57E+04	0.00E+00	2.42E+03	-4.27E+04	4.93E+04	-5.57E+04	3.27E+07
Max Stress 11	82634	6	Middle	Laminate1	Interlaminar	5.21E+07	-3.45E+07	0.00E+00	1.14E+07	1.08E+06	1.68E+06	5.36E+07	4.48E+07
Min Stress 22	82629	6	Middle	Laminate1	Interlaminar	3.25E+07	-5.07E+07	0.00E+00	-1.91E+07	4.31E+05	1.36E+06	3.67E+07	4.58E+07
Max Stress 22	82672	6	Middle	Laminate1	Interlaminar	-2.92E+07	5.25E+07	0.00E+00	-2.76E+07	-1.56E+06	1.51E+06	6.09E+07	4.93E+07
Min Stress 33	73800	1	Middle	Laminate1	Interlaminar	7.64E+03	-7.91E+01	0.00E+00	1.02E+02	-1.35E-01	-3.02E+02	7.55E+03	3.86E+03
Max Stress 33	73800	1	Middle	Laminate1	Interlaminar	7.64E+03	-7.91E+01	0.00E+00	1.02E+02	-1.35E-01	-3.02E+02	7.55E+03	3.86E+03
Min Stress 12	77691	6	Middle	Laminate1	Interlaminar	-4.41E+06	1.94E+07	0.00E+00	-1.10E+08	-7.51E+05	-2.05E+06	9.38E+07	1.02E+08
Max Stress 12	82739	6	Middle	Laminate1	Interlaminar	-6.88E+06	1.99E+07	0.00E+00	9.24E+07	5.55E+05	7.77E+05	9.96E+07	9.34E+07
Min Stress 23	82661	10	Middle	Laminate1	Interlaminar	5.03E+06	2.94E+07	0.00E+00	3.57E+07	-4.98E+06	7.85E+05	4.89E+07	3.65E+07
Max Stress 23	82760	10	Middle	Laminate1	Interlaminar	-1.22E+07	-1.96E+07	0.00E+00	1.10E+07	3.74E+06	-2.07E+06	3.21E+07	2.35E+07
Min Stress 31	82809	8	Middle	Laminate1	Interlaminar	1.61E+07	1.10E+06	0.00E+00	-4.26E+07	4.85E+04	-3.23E+06	4.45E+07	4.62E+07
Max Stress 31	82685	8	Middle	Laminate1	Interlaminar	-1.06E+07	1.10E+06	0.00E+00	-3.82E+07	-7.52E+04	2.67E+06	3.39E+07	3.87E+07
Min Maximum Principal Stress	107552	16	Middle	Laminate1	Interlaminar	-3.64E+07	-2.60E+07	0.00E+00	1.81E+07	-2.13E-11	-2.80E-11	-1.23E+07	1.88E+07
Max Maximum Principal Stress	82759	6	Middle	Laminate1	Interlaminar	-6.88E+06	1.94E+07	0.00E+00	9.24E+07	5.55E+05	7.77E+05	9.96E+07	9.34E+07
Min Maximum Shear Stress	101644	11	Middle	Laminate1	Interlaminar	-4.44E-01	-1.68E-01	0.00E+00	-2.51E-01	-6.91E+00	5.27E+01	-1.98E-02	2.86E-01
Max Maximum Shear Stress	77691	6	Middle	Laminate1	Interlaminar	-4.41E+06	-1.14E+07	0.00E+00	-1.10E+08	-7.51E+05	-2.05E+06	9.38E+07	1.02E+08
Min Absolute Ply Failure Index	108263	16	Middle	Laminate1	Interlaminar	-1.74E+07	-9.08E+06	0.00E+00	4.17E+07	2.48E-10	4.61E-12	2.87E+07	4.19E+07
Max Absolute Ply Strength Ratio	73800	1	Middle	Laminate1	Interlaminar	7.64E+03	-7.91E+01	0.00E+00	1.02E+02	-1.35E-01	-3.02E+02	7.55E+03	3.86E+03
Min Ply Margin of Safety	73800	1	Middle	Laminate1	Interlaminar	7.64E+03	-7.91E+01	0.00E+00	1.02E+02	-1.35E-01	-3.02E+02	7.55E+03	3.86E+03
Max Ply Margin of Safety	108263	16	Middle	Laminate1	Interlaminar	-1.74E+07	-9.08E+06	0.00E+00	4.17E+07	2.48E-10	4.61E-12	2.87E+07	4.19E+07

Εικόνα 63 Αποτελέσματα 2ης διαστρωμάτωσης





Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-T700_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-T700_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-T700_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-T700_UD	0,16	0
ply-T700_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-T700_UD	0,16	0
ply-T700_UD	0,16	0
ply-m46_wooven	0,16	45
ply-T700_UD	0,16	0
ply-T700_UD	0,16	45
ply-T700_UD	0,16	0

Εικόνα 64 3η  
διαστρωμάτωση



Εικόνα 65 4η  
διαστρωμάτωση

Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0
M46J wooven dur	0,16	45
M46J UD fatigue	0,16	0

	Element Id	Ply Layer Id	Computation Location	Laminate Name	Ply	Failure Theory	Bond	Stresses						Maximum Principal	Maximum Shear							
								Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31									
Min Stress 11	330577	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar		mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	-1.42E+08	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	1.15E+08	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	0.00E+00	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	-4.00E+07	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	4.16E+05	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	-8.88E+05	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	1.21E+08	1.34E+1
Max Stress 11	330486	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			1.37E+08		-1.15E+08		0.00E+00		6.58E+07		-5.98E+05		-1.04E+06		1.53E+08	1.42E+1
Min Stress 22	330378	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			1.14E+08		-1.40E+08		0.00E+00		-3.51E+07		9.30E+05		1.55E+06		1.18E+08	1.32E+1
Max Stress 22	330243	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-1.23E+08		1.46E+08		0.00E+00		5.85E+07		-6.09E+05		1.26E+06		1.58E+08	1.47E+1
Min Stress 33	318461	1	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			7.44E+04		-1.35E+04		0.00E+00		2.06E+02		-2.59E+01		-3.74E+02		7.44E+04	4.39E+1
Max Stress 33	318461	1	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			7.44E+04		-1.35E+04		0.00E+00		2.06E+02		-2.59E+01		-3.74E+02		7.44E+04	4.39E+1
Min Stress 12	330224	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			2.74E+07		-5.48E+07		0.00E+00		-1.99E+08		-2.22E+05		-2.58E+05		1.90E+08	2.04E+1
Max Stress 12	364581	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-3.33E+07		-2.57E+07		0.00E+00		2.08E+08		-1.76E+05		3.96E+04		1.78E+08	2.08E+1
Min Stress 23	330309	10	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-1.97E+07		-1.28E+07		0.00E+00		7.62E+07		-2.81E+06		7.23E+04		6.01E+07	7.63E+1
Max Stress 23	330452	10	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-1.14E+06		-2.90E+07		0.00E+00		6.87E+07		2.72E+06		1.75E+05		5.15E+07	6.96E+1
Min Stress 31	322161	8	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-2.20E+07		-9.52E+06		0.00E+00		-1.57E+03		-1.41E+05		-3.18E+06		-9.52E+06	6.22E+1
Max Stress 31	330248	8	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-4.27E+06		-1.42E+07		0.00E+00		-5.14E+04		-1.68E+05		3.18E+06		-4.27E+06	4.97E+1
Min Maximum Principal Stress	362607	16	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-2.09E+07		-4.25E+07		0.00E+00		1.06E+07		2.28E+10		-8.01E+11		-1.66E+07	1.51E+1
Max Maximum Principal Stress	330224	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			2.74E+07		-5.48E+07		0.00E+00		-1.99E+08		-2.22E+05		-2.58E+05		1.90E+08	2.04E+1
Min Maximum Shear Stress	342759	11	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			1.15E+02		1.14E+02		0.00E+00		-4.37E+02		-3.91E+01		-1.70E+01		1.15E+02	7.56E+1
Max Maximum Shear Stress	364581	4	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-3.33E+07		-2.57E+07		0.00E+00		2.08E+08		-1.76E+05		3.96E+04		1.78E+08	2.08E+1
Min Absolute Ply Failure Index	364746	16	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-3.87E+06		1.17E+06		0.00E+00		4.26E+07		-1.96E+10		4.27E+12		4.13E+07	4.27E+1
Max Absolute Ply Strength Ratio	318461	1	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			7.44E+04		-1.35E+04		0.00E+00		2.06E+02		-2.59E+01		-3.74E+02		7.44E+04	4.39E+1
Min Ply Margin of Safety	318461	1	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			7.44E+04		-1.35E+04		0.00E+00		2.06E+02		-2.59E+01		-3.74E+02		7.44E+04	4.39E+1
Max Ply Margin of Safety	364746	16	Middle	Laminate 1	None	Interlaminar			-3.87E+06		1.17E+06		0.00E+00		4.26E+07		-1.96E+10		4.27E+12		4.13E+07	4.27E+1

Εικόνα 66 αποτελέσματα 3η διαστρωμάτωση

	Element	Ply	Computation	Laminate	Failure Theory	Stresses						Maximum Principal	Maximum Shear
	Id	Layer Id	Location	Name	Ply	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31		
						mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)
Min Stress 11	171241	2	2 Middle	Laminate1	None	<b>-9,07E+05</b>	-5,11E+05	0,00E+00	-3,82E+03	6,52E+02	1,46E+03	-5,11E+05	1,98E+05
Max Stress 11	173447	26	26 Middle	Laminate1	None	<b>7,58E+05</b>	2,96E+05	0,00E+00	1,84E+03	1,22E-12	7,01E-13	7,58E+05	2,31E+05
Min Stress 22	171101	2	2 Middle	Laminate1	None	<b>-5,58E+05</b>	<b>-8,80E+05</b>	0,00E+00	-9,78E+03	-6,87E+02	1,64E+03	-5,57E+05	1,62E+05
Max Stress 22	172351	2	2 Middle	Laminate1	None	5,26E+05	<b>8,09E+05</b>	0,00E+00	5,96E+03	-1,08E+02	1,25E+03	8,09E+05	1,42E+05
Min Stress 33	160156	1	1 Middle	Laminate1	None	2,99E+04	-4,25E+03	<b>0,00E+00</b>	6,35E+02	-1,41E+00	-9,73E+01	2,99E+04	1,71E+04
Max Stress 33	160156	1	1 Middle	Laminate1	None	2,99E+04	-4,25E+03	<b>0,00E+00</b>	6,35E+02	-1,41E+00	-9,73E+01	2,99E+04	1,71E+04
Min Stress 12	172846	26	26 Middle	Laminate1	None	-4,26E+05	-2,80E+05	0,00E+00	<b>-5,24E+04</b>	8,25E-13	-1,63E-14	-2,63E+05	9,00E+04
Max Stress 12	173583	26	26 Middle	Laminate1	None	5,65E+05	4,03E+05	0,00E+00	<b>6,00E+04</b>	8,94E-13	4,88E-14	5,85E+05	1,01E+05
Min Stress 23	173575	13	13 Middle	Laminate1	None	-6,78E+04	9,95E+03	0,00E+00	-2,79E+03	<b>-4,29E+04</b>	-2,10E+04	1,00E+04	3,90E+04
Max Stress 23	173108	13	13 Middle	Laminate1	None	-6,73E+04	1,03E+04	0,00E+00	7,38E+02	<b>3,84E+04</b>	-2,31E+04	1,03E+04	3,88E+04
Min Stress 31	172681	13	13 Middle	Laminate1	None	-2,62E+04	-2,60E+03	0,00E+00	-5,48E+03	-1,39E+04	<b>-8,33E+04</b>	-1,40E+03	1,30E+04
Max Stress 31	188417	13	13 Middle	Laminate1	None	4,38E+04	-7,70E+02	0,00E+00	1,24E+04	-4,74E+03	<b>2,73E+04</b>	4,70E+04	2,55E+04
Min Maximum Principal Stress	171364	2	2 Middle	Laminate1	None	-8,44E+05	-7,35E+05	0,00E+00	1,07E+04	2,29E+02	1,53E+03	<b>-7,34E+05</b>	5,57E+04
Max Maximum Principal Stress	172351	2	2 Middle	Laminate1	None	5,26E+05	8,09E+05	0,00E+00	5,96E+03	-1,08E+02	1,25E+03	<b>8,09E+05</b>	1,42E+05
Min Maximum Shear Stress	216942	1	1 Middle	Laminate1	None	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	<b>0,00E+00</b>
Max Maximum Shear Stress	171067	1	1 Middle	Laminate1	None	-7,04E+05	-3,02E+04	0,00E+00	-1,85E+04	-2,49E+01	1,21E+03	-2,97E+04	<b>3,37E+05</b>
Max Absolute Ply Failure Index	218133	26	26 Middle	Laminate1	None	1,31E+04	1,25E+04	0,00E+00	-2,12E+02	3,44E-13	-1,52E-14	1,32E+04	3,64E+02
Min Absolute Ply Strength Ratio	160156	1	1 Middle	Laminate1	None	2,99E+04	-4,25E+03	0,00E+00	6,35E+02	-1,41E+00	-9,73E+01	2,99E+04	1,71E+04
Min Ply Margin of Safety	160156	1	1 Middle	Laminate1	None	2,99E+04	-4,25E+03	0,00E+00	6,35E+02	-1,41E+00	-9,73E+01	2,99E+04	1,71E+04
Max Ply Margin of Safety	218133	26	26 Middle	Laminate1	None	1,31E+04	1,25E+04	0,00E+00	-2,12E+02	3,44E-13	-1,52E-14	1,32E+04	3,64E+02

Εικόνα 67 Αποτελέσματα 4η διαστρωματώση



Εικόνα 68 5η διαστρωμάτωση

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
40	M46J UD	0,16	90
39	M46J UD	0,16	-45
38	M46J UD	0,16	45
37	M46J UD	0,16	0
36	M46J UD	0,16	90
35	M46J UD	0,16	-45
34	M46J UD	0,16	45
33	M46J UD	0,16	0
32	M46J UD	0,16	90
31	M46J UD	0,16	-45
30	M46J UD	0,16	45
29	M46J UD	0,16	0
28	M46J UD	0,16	90
27	M46J UD	0,16	-45
26	M46J UD	0,16	45
25	M46J UD	0,16	0
24	M46J UD	0,16	90
23	M46J UD	0,16	-45
22	M46J UD	0,16	45
21	M46J UD	0,16	0
20	M46J UD	0,16	90
19	M46J UD	0,16	-45
18	M46J UD	0,16	45
17	M46J UD	0,16	0
16	M46J UD	0,16	90
15	M46J UD	0,16	-45
14	M46J UD	0,16	45
13	M46J UD	0,16	0
12	M46J UD	0,16	90
11	M46J UD	0,16	-45
10	M46J UD	0,16	45
9	M46J UD	0,16	0
8	M46J UD	0,16	90
7	M46J UD	0,16	-45
6	M46J UD	0,16	45
5	M46J UD	0,16	0
4	M46J UD	0,16	90
3	M46J UD	0,16	-45
2	M46J UD	0,16	45
1	M46J UD	0,16	0

	Element	Layer	Ply	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Maximum Shear
	Id		Id	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)
Min Stress 11	18757	38	38	<b>-6,83E+05</b>	-1,19E+04	0,00E+00	1,93E+02	3,75E+03	1,08E+03	-1,19E+04	3,35E+05
Max Stress 11	18657	37	37	<b>6,87E+05</b>	1,34E+04	0,00E+00	1,05E+04	1,38E+03	5,23E+03	6,87E+05	3,37E+05
Min Stress 22	18766	40	40	-1,19E+05	<b>-5,08E+04</b>	0,00E+00	-2,03E+03	-1,38E-13	-1,13E-11	-5,07E+04	3,44E+04
Max Stress 22	18654	40	40	1,44E+05	<b>5,15E+04</b>	0,00E+00	-1,42E+04	6,57E-14	6,12E-12	1,46E+05	4,82E+04
Min Stress 33	1	1	1	1,05E+04	-1,69E+03	<b>0,00E+00</b>	1,04E+03	7,45E-01	-3,16E+02	1,06E+04	6,19E+03
Max Stress 33	1	1	1	1,05E+04	-1,69E+03	<b>0,00E+00</b>	1,04E+03	7,45E-01	-3,16E+02	1,06E+04	6,19E+03
Min Stress 12	18626	40	40	4,02E+05	2,97E+04	0,00E+00	<b>-5,40E+04</b>	-1,42E-12	-1,07E-11	4,10E+05	1,94E+05
Max Stress 12	18757	40	40	-4,04E+05	-3,09E+04	0,00E+00	<b>5,50E+04</b>	-9,07E-13	-5,48E-12	-2,29E+04	1,95E+05
Min Stress 23	8068	21	21	-3,55E+04	-7,66E+03	0,00E+00	-9,32E+03	<b>-5,91E+04</b>	-4,24E+04	-4,83E+03	1,68E+04
Max Stress 23	8056	21	21	-3,43E+04	-7,59E+03	0,00E+00	9,04E+03	<b>5,96E+04</b>	-4,25E+04	-4,81E+03	1,61E+04
Min Stress 31	19244	19	19	-4,59E+04	-3,13E+03	0,00E+00	-2,51E+02	2,50E+03	<b>-1,03E+05</b>	-3,12E+03	2,14E+04
Max Stress 31	18650	19	19	9,82E+04	9,41E+03	0,00E+00	4,42E+03	5,70E+03	<b>3,20E+04</b>	9,84E+04	4,46E+04
Min Maximum Principal Stress	18766	40	40	-1,19E+05	-5,08E+04	0,00E+00	-2,03E+03	-1,38E-13	-1,13E-11	<b>-5,07E+04</b>	3,44E+04
Max Maximum Principal Stress	18657	37	37	6,87E+05	1,34E+04	0,00E+00	1,05E+04	1,38E+03	5,23E+03	<b>6,87E+05</b>	3,37E+05
Min Maximum Shear Stress	68802	1	1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	<b>0,00E+00</b>	0,00E+00
Max Maximum Shear Stress	18657	37	37	6,87E+05	1,34E+04	0,00E+00	1,05E+04	1,38E+03	5,23E+03	<b>6,87E+05</b>	3,37E+05
Max Absolute Ply Failure Index	72675	40	40	2,90E+05	2,97E+02	0,00E+00	1,13E+03	-1,51E-12	3,89E-13	2,90E+05	1,45E+05
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	1	1,05E+04	-1,69E+03	0,00E+00	1,04E+03	7,45E-01	-3,16E+02	1,06E+04	6,19E+03
Min Ply Margin of Safety	1	1	1	1,05E+04	-1,69E+03	0,00E+00	1,04E+03	7,45E-01	-3,16E+02	1,06E+04	6,19E+03
Max Ply Margin of Safety	72675	40	40	2,90E+05	2,97E+02	0,00E+00	1,13E+03	-1,51E-12	3,89E-13	2,90E+05	1,45E+05

Εικόνα 69 αποτελέσματα 5η διαστρωμάτωση



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
77	m46jwoov_tms	0,23	0
76	m46jwoov_tms	0,23	45
75	m46jwoov_tms	0,23	0
74	m46jwoov_tms	0,23	45
73	m46jwoov_tms	0,23	0
72	m46jwoov_tms	0,23	45
71	m46jwoov_tms	0,23	0
70	m46jwoov_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
20	t300_tms	0,29	45
19	t700_tms	0,16	0
18	t300_tms	0,29	45
17	t700_tms	0,16	0
16	t300_tms	0,29	45
15	t700_tms	0,16	0
14	m46jwoov_tms	0,23	45
13	m46jud_tms	0,16	0
12	m46jwoov_tms	0,23	45
11	m46jud_tms	0,16	0
10	m46jwoov_tms	0,23	45
9	m46jwoov_tms	0,16	45
8	t700_tms	0,16	0
7	m46jwoov_tms	0,23	45
6	t300_tms	0,29	0
5	t300_tms	0,29	45
4	t700_tms	0,16	0
3	t300_tms	0,29	45
2	t300_tms	0,16	0
1	t300_tms	0,29	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
49	m46jwoov_tms	0,23	0
48	m46jwoov_tms	0,23	45
47	m46jwoov_tms	0,23	0
46	m46jwoov_tms	0,23	45
45	m46jud_tms	0,16	0
44	m46jwoov_tms	0,23	45
43	m46jud_tms	0,16	0
42	m46jwoov_tms	0,23	45
41	m46jwoov_tms	0,23	0
40	m46jwoov_tms	0,23	45

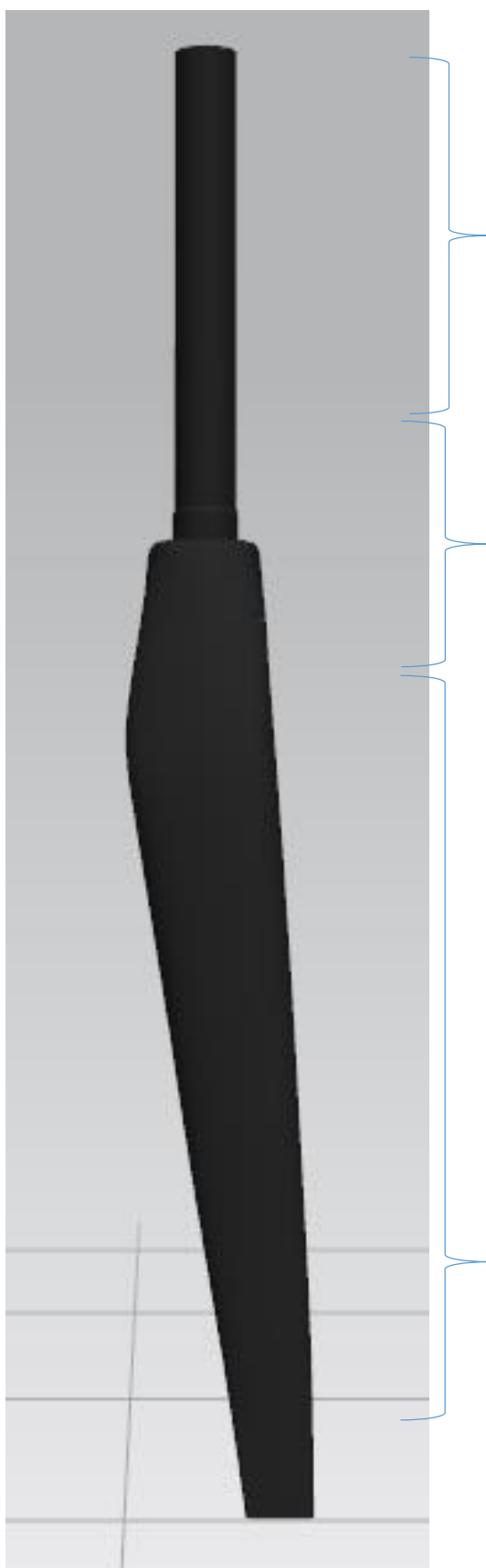
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
64	m46jwoov_tms	0,23	0
63	m46jwoov_tms	0,23	45
62	m46jud_tms	0,16	0
61	m46jwoov_tms	0,23	45
60	m46jwoov_tms	0,23	0

Εικόνα 70 6η διαστρωμάτωση

	Element Id	Ply Layer Id	Laminate Name	Bond	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Maximum Shear
Max Absolute Stress 11	46623	2	2 korona	Interlaminar	-5,66E+05	-2,88E+05	0,00E+00	-5,11E+04	7,82E+01	8,28E+03	-2,79E+05	1,481
Max Absolute Stress 22	46688	1	1 korona	Interlaminar	-4,53E+05	-5,10E+05	0,00E+00	1,01E+05	0,00E+00	0,00E+00	-3,76E+05	1,051
Max Absolute Stress 33	44856	1	1 korona	Interlaminar	-1,29E+05	-2,20E+04	0,00E+00	5,03E+03	0,00E+00	0,00E+00	-2,17E+04	5,381
Max Absolute Stress 12	47989	7	7 korona	Interlaminar	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,931
Max Absolute Stress 23	91062	6	45 mid blades	Interlaminar	-3,61E+04	2,03E+02	0,00E+00	-6,48E+04	3,94E+04	1,75E+04	4,93E+04	6,731
Max Absolute Stress 31	46592	11	11 korona	Interlaminar	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,051
Max Absolute Minimum Principle	47989	1	1 korona	Interlaminar	4,16E+05	4,75E+05	0,00E+00	-1,28E+05	0,00E+00	0,00E+00	5,76E+05	1,311
Max Absolute Minimum Principle	46623	1	1 korona	Interlaminar	-5,46E+05	-4,28E+05	0,00E+00	1,50E+05	0,00E+00	0,00E+00	-3,26E+05	1,611
Max Absolute Maximum Shear Str	46623	4	4 korona	Interlaminar	-4,21E+05	-1,42E+04	0,00E+00	-3,99E+04	1,77E+02	1,89E+04	-1,04E+04	2,071
Max Absolute Strain 11	46623	2	2 korona	Interlaminar	-5,66E+05	-2,88E+05	0,00E+00	-5,11E+04	7,82E+01	8,28E+03	-2,79E+05	1,481
Max Absolute Strain 22	46657	1	1 korona	Interlaminar	-3,57E+05	-5,03E+05	0,00E+00	6,75E+04	0,00E+00	0,00E+00	-3,31E+05	9,951
Max Absolute Strain 33	44856	1	1 korona	Interlaminar	-1,29E+05	-2,20E+04	0,00E+00	5,03E+03	0,00E+00	0,00E+00	-2,17E+04	5,381
Max Absolute Strain 12	46723	1	1 korona	Interlaminar	-3,10E+05	-3,28E+05	0,00E+00	1,60E+05	0,00E+00	0,00E+00	-1,59E+05	1,601
Max Absolute Strain 23	46558	9	9 korona	Interlaminar	-2,54E+04	-5,00E+04	0,00E+00	5,01E+03	-3,87E+04	2,68E+04	-2,44E+04	1,331
Max Absolute Strain 31	46592	8	8 korona	Interlaminar	-1,69E+05	-2,19E+02	0,00E+00	-1,76E+04	5,56E+03	5,20E+04	1,59E+03	8,621
Max Absolute Maximum Principle	47989	1	1 korona	Interlaminar	4,16E+05	4,75E+05	0,00E+00	-1,28E+05	0,00E+00	0,00E+00	5,76E+05	1,311
Max Absolute Minimum Principle	46623	1	1 korona	Interlaminar	-5,46E+05	-4,28E+05	0,00E+00	1,50E+05	0,00E+00	0,00E+00	-3,26E+05	1,611
Max Absolute Maximum Shear Str	46625	1	1 korona	Interlaminar	-4,77E+05	-3,67E+05	0,00E+00	1,57E+05	0,00E+00	0,00E+00	-2,56E+05	1,661
Max Absolute Ply Failure Index	47989	7	7 korona	Interlaminar	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,931
Max Absolute Bond Failure Index	46592	11	11 korona	Interlaminar	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,051
Min Absolute Ply Strength Ratio	47989	7	7 korona	Interlaminar	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,931
Min Absolute Bond Strength Ratio	46592	11	11 korona	Interlaminar	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,051
Min Ply Margin of Safety	47989	7	7 korona	Interlaminar	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,931
Min Bond Margin of Safety	46592	11	11 korona	Interlaminar	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,051

Εικόνα 71 Αποτελέσματα βη διαστρωμάτωση





Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
77	m46jwoov_tms	0,23	0
76	m46jwoov_tms	0,23	45
75	m46jwoov_tms	0,23	0
74	m46jwoov_tms	0,23	45
73	m46jwoov_tms	0,23	0
72	m46jwoov_tms	0,23	45
71	m46jwoov_tms	0,23	0
70	m46jwoov_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
20	t300_tms	0,29	45
19	t700_tms	0,16	0
18	t300_tms	0,29	45
17	t700_tms	0,16	0
16	t300_tms	0,29	45
15	t700_tms	0,16	0
14	m46jwoov_tms	0,23	45
13	m46jud_tms	0,16	0
12	m46jwoov_tms	0,23	45
11	m46jud_tms	0,16	0
10	m46jwoov_tms	0,23	45
9	m46jwoov_tms	0,16	45
8	t700_tms	0,16	0
7	m46jwoov_tms	0,23	45
6	t300_tms	0,29	0
5	t300_tms	0,29	45
4	t700_tms	0,16	0
3	t300_tms	0,29	45
2	t300_tms	0,16	0
1	t300_tms	0,29	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
64	m46jwoov_tms	0,23	0
63	m46jwoov_tms	0,23	45
62	m46jud_tms	0,16	0
61	m46jwoov_tms	0,23	45
60	m46jwoov_tms	0,23	0

Εικόνα 72 7η διαστρωμάτωση

	Element Id	Ply Layer Id	Computation Location	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Maximum Shear
Max Absolute Stress 11	46623	2	2 Bottom	-5,66E+05	-2,88E+05	0,00E+00	-5,11E+04	7,82E+01	8,28E+03	-2,79E+05	1,48
Max Absolute Stress 22	46688	1	1 Bottom	-4,53E+05	-5,10E+05	0,00E+00	1,01E+05	0,00E+00	0,00E+00	-3,76E+05	1,05
Max Absolute Stress 33	44856	1	1 Bottom	-1,29E+05	-2,20E+04	0,00E+00	5,03E+03	0,00E+00	0,00E+00	-2,17E+04	5,38
Max Absolute Stress 12	47989	7	7 Bottom	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,93
Max Absolute Stress 23	91062	6	45 Middle	-3,61E+04	2,03E+02	0,00E+00	-6,48E+04	3,94E+04	1,75E+04	4,93E+04	6,73
Max Absolute Stress 31	46592	11	11 Bottom	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,05
Max Absolute Maximum Prin	47989	1	1 Bottom	4,16E+05	4,75E+05	0,00E+00	-1,28E+05	0,00E+00	0,00E+00	5,76E+05	1,31
Max Absolute Minimum Prin	46623	1	1 Bottom	-5,46E+05	-4,28E+05	0,00E+00	1,50E+05	0,00E+00	0,00E+00	-3,26E+05	1,61
Max Absolute Maximum Shear S	46623	4	4 Bottom	-4,21E+05	-1,42E+04	0,00E+00	-3,99E+04	1,77E+02	1,89E+04	-1,04E+04	2,07
Max Absolute Strain 11	46623	2	2 Bottom	-5,66E+05	-2,88E+05	0,00E+00	-5,11E+04	7,82E+01	8,28E+03	-2,79E+05	1,48
Max Absolute Strain 22	46657	1	1 Bottom	-3,57E+05	-5,03E+05	0,00E+00	6,75E+04	0,00E+00	0,00E+00	-3,31E+05	9,95
Max Absolute Strain 33	44856	1	1 Bottom	-1,29E+05	-2,20E+04	0,00E+00	5,03E+03	0,00E+00	0,00E+00	-2,17E+04	5,38
Max Absolute Strain 12	46723	1	1 Bottom	-3,10E+05	-3,28E+05	0,00E+00	1,60E+05	0,00E+00	0,00E+00	-1,59E+05	1,60
Max Absolute Strain 23	46658	9	9 Top	-2,54E+04	-5,00E+04	0,00E+00	5,01E+03	-3,87E+04	2,68E+04	-2,44E+04	1,33
Max Absolute Strain 31	46592	8	8 Top	-1,69E+05	-2,19E+02	0,00E+00	-1,76E+04	5,56E+03	5,20E+04	1,59E+03	8,62
Max Absolute Maximum Prin	47989	1	1 Bottom	4,16E+05	4,75E+05	0,00E+00	-1,28E+05	0,00E+00	0,00E+00	5,76E+05	1,31
Max Absolute Minimum Prin	46623	1	1 Bottom	-5,46E+05	-4,28E+05	0,00E+00	1,50E+05	0,00E+00	0,00E+00	-3,26E+05	1,61
Max Absolute Maximum Shear S	46625	1	1 Bottom	-4,77E+05	-3,67E+05	0,00E+00	1,57E+05	0,00E+00	0,00E+00	-2,56E+05	1,66
Max Absolute Ply Failure Index	47989	7	7 Bottom	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,93
Max Absolute Bond Failure Index	46592	11	11 Bottom	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,05
Min Absolute Ply Strength Ratio	47989	7	7 Bottom	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,93
Min Absolute Bond Strength Ratio	46592	11	11 Bottom	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,05
Min Ply Margin of Safety	47989	7	7 Bottom	3,13E+05	3,54E+05	0,00E+00	-1,92E+05	-2,58E+04	2,68E+04	5,27E+05	1,93
Min Bond Margin of Safety	46592	11	11 Bottom	-2,04E+05	9,90E+02	0,00E+00	-2,46E+04	5,55E+03	5,32E+04	3,90E+03	1,05

Εικόνα 73 Αποτελέσματα 7η διαστρωμάτωση

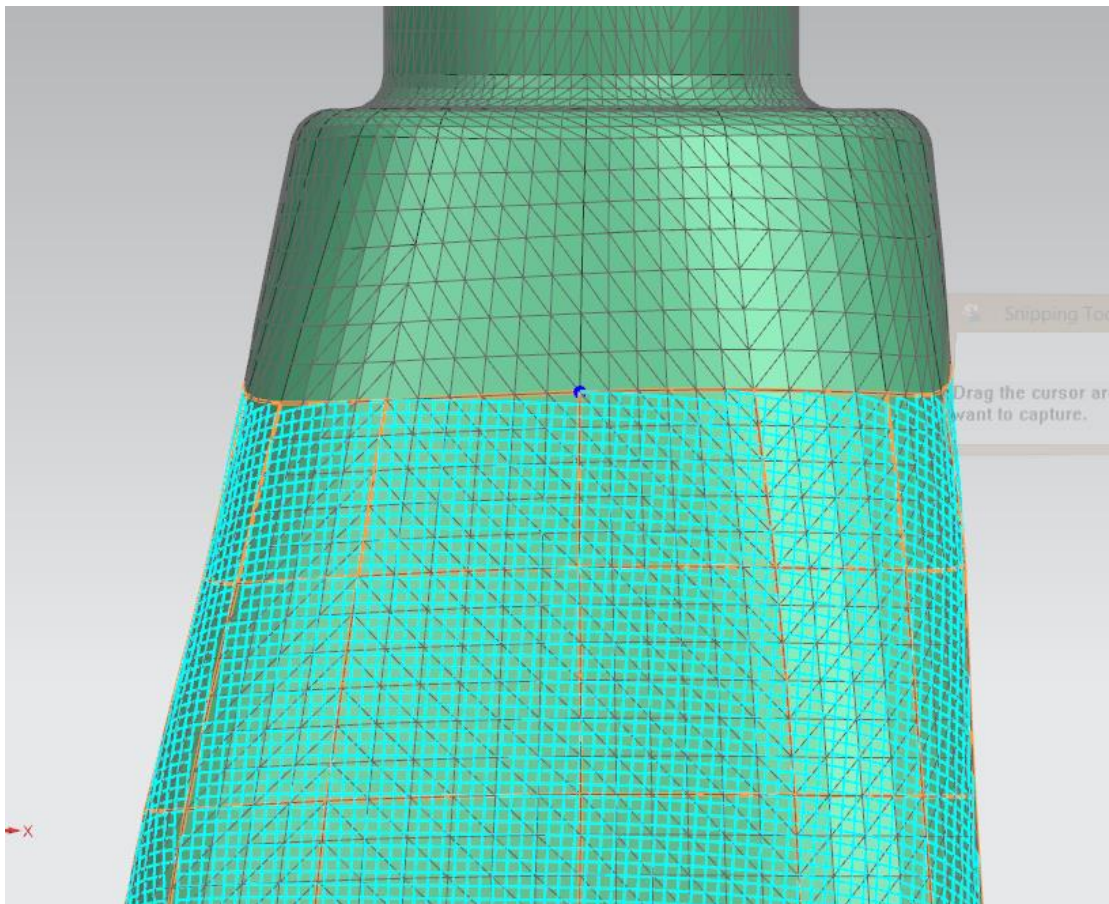
## Global layups

Σε αυτό το σημείο θα προχωρήσουμε στην πιο εξελιγμένη μέθοδο για τις κατευθύνσεις των ινων, όπου ο χρήστης με τον ορισμό κάποιων παραμέτρων σχετικά με τον προσανατολισμό ορίζει την κατεύθυνση των ινων. Έπειτα γίνεται χρήση αλγορίθμων draping όπου το ύφασμα στρώνεται πάνω στην επιφάνεια του πιρουνιού. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει κοψίματα στο ύφασμα για να τυλιχτεί καλύτερα. Επίσης ορίζεται το σημείο από το οποίο ξεκινάει το lay up.

Η μέθοδος του global lay up δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα αφού το πρόγραμμα ξέρει ακριβώς τον προσανατολισμό της ίνας όπως αυτή θα έμπαινε στο καλούπι. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς κάνουμε το lay up στο καλούπι μπορεί το ύφασμα να αλλάξει κατεύθυνση ανάλογα με τις αλλαγές της επιφάνειας. Γενικότερα η μέθοδος αυτή παράγει αποτελέσματα πολύ κοντά στην πραγματικότητα.

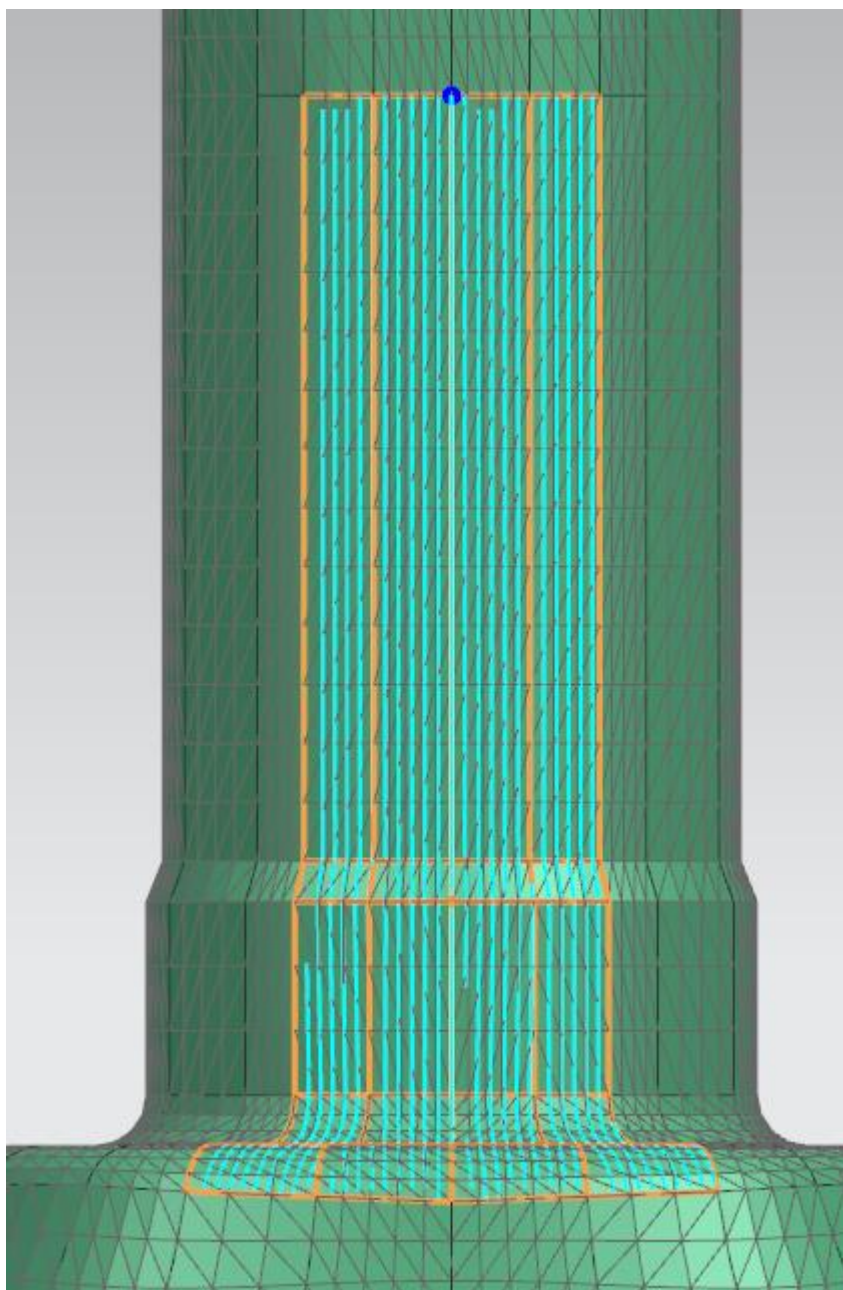
Διαφορετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται για woven ή για unidirectional υφάσματα μιας και υπάρχει διαφορά στις ίνες.

## Woven solver



Εικόνα 74 κατεύθυνση ινων πλεκτού

## Unidirectional solver



Εικόνα 75 κατεύθυνση ινών μονοδιευθυντικού

Όπως φαίνεται λοιπόν επιλέγουμε σε συγκεκριμένα faces που γίνεται το lay up. Η μπλε κουκκίδα είναι το σημείο από το οποίο ξεκινάει το στρώσιμο. Είναι εμφανές λοιπόν ,ειδικότερα στον woven solver το πώς μεταβάλλεται ο προσανατολισμός των ινών ανάλογα με την επιφάνεια. Κάτι τέτοιο δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί νωρίτερα.

Στις εικόνες 76 έως 94 απεικονίζονται οι διαστρωματώσεις που ελέγχθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
44	m46jwoov_tms	0,23	0
43	m46jwoov_tms	0,23	45
42	m46jwoov_tms	0,23	0
41	m46jwoov_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
36	m46jwoov_tms	0,23	0
35	m46jwoov_tms	0,23	45
34	t300_tms	0,29	0
33	t300_tms	0,29	45
24	m46jwoov_tms	0,23	45
23	m46jwoov_tms	0,23	0
22	m46jwoov_tms	0,23	45
21	m46jwoov_tms	0,23	0
20	m46jwoov_tms	0,23	45
19	m46jwoov_tms	0,16	0
18	m46jwoov_tms	0,23	45
17	m46jwoov_tms	0,23	0

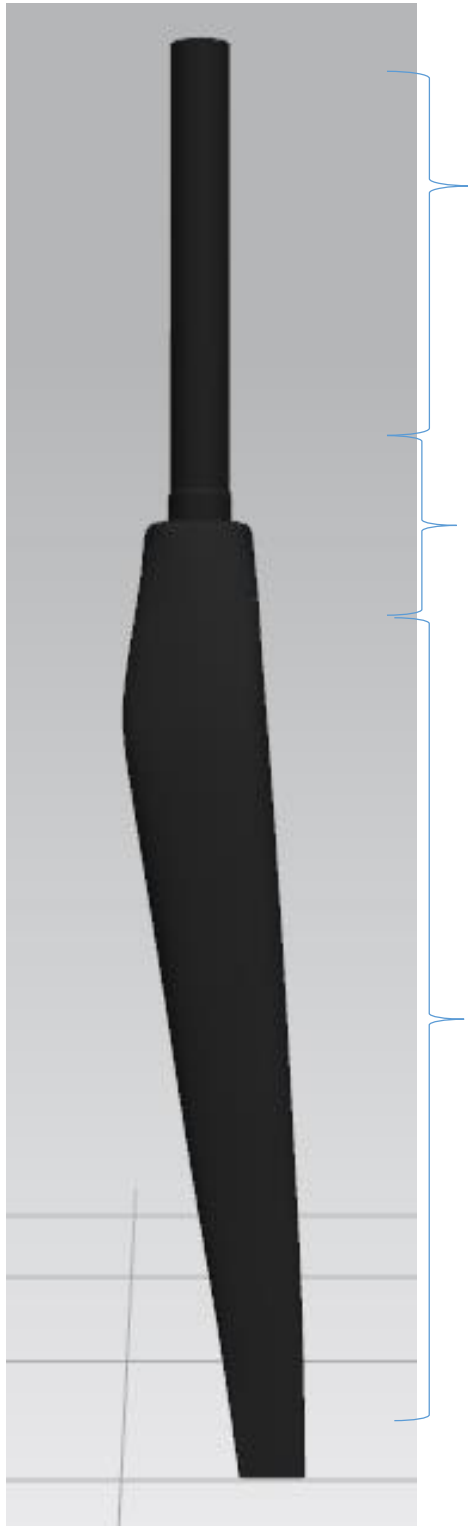
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
62	m46jwoov_tms	0,23	0
61	m46jwoov_tms	0,23	45
4	t700_tms	0,16	0
3	t300_tms	0,29	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

Εικόνα 76 8η διαστρωμάτωση

	Element Id	Layer	Ply Id	Stresses			Maximum Principal	Maximum Shear		
				Stress11	Stress22	Stress12			Stress23	Stress31
Min Stress 11	5303	14	32	-1,03E+06	-4,06E+05	-2,78E+03	-2,49E-12	-1,20E-11	-4,06E+05	3,14
Max Stress 11	27136	16	32	9,09E+05	3,21E+05	8,72E+04	-4,29E-13	-6,53E-13	9,21E+05	3,06
Min Stress 22	4804	12	24	-7,53E+05	-9,05E+05	2,49E+05	0,00E+00	-1,23E-11	-5,69E+05	2,60
Max Stress 22	2496	4	42	6,53E+04	6,92E+05	-1,02E+05	-1,09E+04	-7,89E+03	7,08E+05	3,30
Min Stress 33	9625	1	1	1,33E+04	-1,12E+04	-1,31E+03	1,20E+02	-4,03E+01	1,34E+04	1,24
Max Stress 33	9625	1	1	1,33E+04	-1,12E+04	-1,31E+03	1,20E+02	-4,03E+01	1,34E+04	1,24
Min Stress 12	2496	7	49	2,94E+05	5,84E+05	-3,54E+05	-9,15E+03	-6,62E+03	8,22E+05	3,82
Max Stress 12	4803	12	24	-7,37E+05	-8,12E+05	2,87E+05	-9,24E-13	1,13E-11	-4,85E+05	2,90
Min Stress 23	4762	8	20	-1,50E+05	-3,61E+04	-6,22E+04	-2,30E+05	4,25E+04	-8,65E+03	8,42
Max Stress 23	4753	7	19	-8,35E+04	-1,18E+05	1,02E+05	2,00E+05	2,12E+04	2,79E+03	1,03
Min Stress 31	3758	5	21	-1,51E+05	-2,79E+05	5,78E+04	-1,05E+04	-3,60E+05	-1,29E+05	8,64
Max Stress 31	4765	8	20	-1,43E+05	-2,28E+04	-5,95E+04	2,09E+04	2,06E+05	1,64E+03	8,46
Min Maximum Principal Stress	4617	12	24	-6,99E+05	-7,18E+05	9,25E+04	0,00E+00	1,23E-11	-6,16E+05	9,30
Max Maximum Principal Stress	27136	16	32	9,09E+05	3,21E+05	8,72E+04	-4,29E-13	-6,53E-13	9,21E+05	3,06
Min Maximum Shear Stress	49524	4	56	-4,31E+01	-4,95E+01	-8,62E+00	8,76E+01	1,26E+01	-3,71E+01	9,19
Max Maximum Shear Stress	2496	8	50	8,51E+05	6,81E+04	-8,19E+04	-6,21E+03	-4,50E+03	8,60E+05	4,00
Max Absolute Ply Failure Index	50152	6	50	-8,29E+02	-3,89E+01	-2,01E+02	1,69E-16	-2,38E-16	9,48E+00	4,43
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	47	-1,25E+05	-5,97E+04	2,04E+04	2,77E+03	6,29E+02	-5,38E+04	3,85
Min Ply Margin of Safety	1	1	47	-1,25E+05	-5,97E+04	2,04E+04	2,77E+03	6,29E+02	-5,38E+04	3,85
Max Ply Margin of Safety	50152	6	50	-8,29E+02	-3,89E+01	-2,01E+02	1,69E-16	-2,38E-16	9,48E+00	4,43

Εικόνα 77 Αποτελέσματα 8η διαστρωμάτωση





Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
62	t300_tms	0,29	0
61	t300_tms	0,29	45
4	m46jwoov_tms	0,23	0
3	m46jwoov_tms	0,23	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
42	t300_tms	0,29	0
41	m46jwoov_tms	0,23	45
36	t300_tms	0,29	0
35	m46jwoov_tms	0,23	45
34	t300_tms	0,29	0
33	t300_tms	0,29	45
24	t300_tms	0,29	45
23	t300_tms	0,29	0
22	m46jwoov_tms	0,23	45
21	m46jwoov_tms	0,23	0
20	m46jwoov_tms	0,23	45
19	m46jwoov_tms	0,23	0
18	t300_tms	0,29	45
17	t300_tms	0,29	0

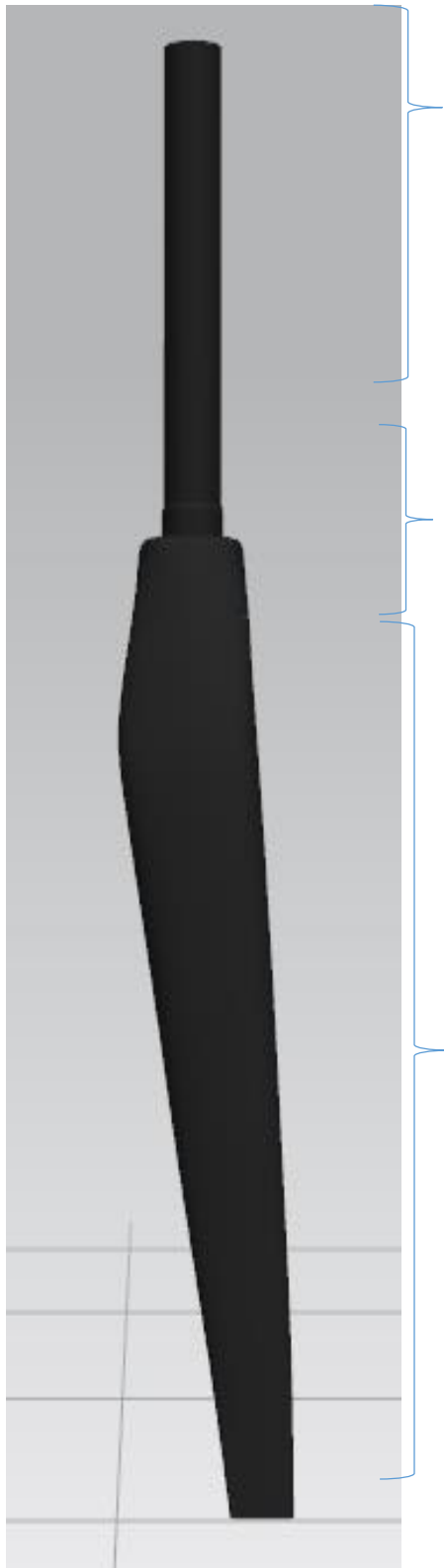
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
46	t300_tms	0,29	0
45	m46jwoov_tms	0,23	45
44	m46jwoov_tms	0,23	0
43	t300_tms	0,29	45

Εικόνα 78 9η διαστρωμάτωση

	Element	Layer	Ply	Stresses								
				Stress11	Stress22	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Minimum Principal		
Min Stress 11	4854	10	22	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)
Max Stress 11	2496	6	48	<b>-6,27E+05</b>	-5,57E+05	1,55E+05	7,46E+03	3,69E+04	-4,33E+05	-7,51		
Min Stress 22	4804	10	22	<b>8,68E+05</b>	7,00E+04	-6,72E+04	-1,06E+04	-5,94E+03	8,73E+05	6,43		
Max Stress 22	2497	7	49	-5,35E+05	<b>-6,36E+05</b>	1,55E+05	7,04E+03	3,40E+04	-4,22E+05	-7,48		
Min Stress 23	7161	1	1	2,03E+05	<b>6,54E+05</b>	-2,90E+05	2,93E+03	-9,72E+03	7,96E+05	6,10		
Max Stress 33	7161	1	1	3,75E+03	5,05E+03	-1,41E+03	-3,03E+01	-1,87E+02	5,95E+03	2,84		
Min Stress 12	33270	1	3	2,89E+05	1,84E+05	<b>-3,94E+05</b>	-2,62E+03	8,89E+02	5,95E+03	2,84		
Max Stress 12	32438	3	3	-2,51E+05	-2,09E+05	<b>3,50E+05</b>	-2,16E+03	-1,78E+04	1,20E+05	-5,81		
Min Stress 23	4614	6	18	-3,79E+04	-5,45E+04	-3,94E+04	-2,09E+05	-1,10E+05	-5,95E+03	-8,65		
Max Stress 23	4753	6	18	2,03E+04	-8,40E+04	-5,60E+03	<b>1,91E+05</b>	7,79E+03	2,06E+04	-8,43		
Min Stress 31	3758	4	20	-9,69E+04	-2,41E+05	-5,75E+04	-8,88E+03	<b>-3,22E+05</b>	-7,68E+04	-2,61		
Max Stress 31	4601	6	18	-2,08E+04	-1,07E+05	-4,33E+04	1,81E+05	<b>1,88E+05</b>	-2,86E+03	-1,25		
Min Maximum Principal Stress	4612	10	22	-4,81E+05	-5,03E+05	1,35E+04	5,43E+04	-9,21E+04	<b>-4,74E+05</b>	-5,09		
Max Maximum Principal Stress	2496	7	49	3,27E+05	6,51E+05	-3,90E+05	-8,67E+03	-4,87E+03	<b>9,11E+05</b>	6,67		
Min Minimum Principal Stress	5303	12	30	-5,27E+05	-5,35E+05	2,24E+05	-6,91E+02	2,20E+04	-3,07E+05	<b>-7,55</b>		
Max Minimum Principal Stress	33211	10	22	4,53E+05	4,32E+05	-1,29E+05	5,93E+04	2,11E+04	5,73E+05	<b>3,13</b>		
Max Absolute Ply Failure Index	50152	6	50	-5,64E+02	-2,62E+01	-1,07E+02	-1,43E-15	5,25E-15	-5,81E+00	-5,84		
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	47	-7,85E+04	-3,85E+04	1,01E+04	2,40E+03	4,94E+02	-3,61E+04	-8,09		
Min Ply Margin of Safety	1	1	47	-7,85E+04	-3,85E+04	1,01E+04	2,40E+03	4,94E+02	-3,61E+04	-8,09		
Max Ply Margin of Safety	50152	6	50	-5,64E+02	-2,62E+01	-1,07E+02	-1,43E-15	5,25E-15	-5,81E+00	-5,84		

Εικόνα 79 Αποτελέσματα 9η διαστρωμάτωση





Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
4	m46jwoov_tms	0,23	0
3	m46jwoov_tms	0,23	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
30	m46jwoov_tms	0,23	0
29	m46jwoov_tms	0,23	45
28	m46jwoov_tms	0,23	0
27	m46jwoov_tms	0,23	45
26	m46jwoov_tms	0,23	0
25	m46jwoov_tms	0,23	45
16	m46jwoov_tms	0,23	45
15	m46jwoov_tms	0,23	0
14	m46jwoov_tms	0,23	45
13	m46jwoov_tms	0,23	0
12	m46jwoov_tms	0,23	45
11	m46jwoov_tms	0,16	0
10	m46jwoov_tms	0,23	45
9	m46jwoov_tms	0,23	0

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
38	t700_tms_1	0,23	90
37	t700_tms_1	0,23	0
36	t700_tms_1	0,23	90
35	t300_tms	0,23	45

Εικόνα 80 10η διαστρωμάτωση

	Element	Ply	Stress11	Stress22	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Minimum Principal
	Id	Layer	Id	Stress11	Stress22	Stress12	Stress23	Stress31	Principal
				mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)
Min Stress 11	12337	3	3	<b>-1.62E+05</b>	-1.22E+05	-1.91E+05	-1.39E+04	2.31E+03	5.01E+04
Max Stress 11	30676	4	4	<b>4.03E+05</b>	2.76E+04	7.87E+03	0.00E+00	0.00E+00	4.03E+05
Min Stress 22	6055	4	4	-9.27E+04	<b>-4.03E+05</b>	-2.50E+03	0.00E+00	0.00E+00	-9.27E+04
Max Stress 22	28666	3	3	1.44E+05	<b>2.16E+05</b>	-1.59E+05	2.61E+03	2.29E+02	3.43E+05
Min Stress 33	5547	1	1	1.82E+03	2.02E+03	-9.59E+02	7.89E+01	1.48E+01	2.88E+03
Max Stress 33	5547	1	1	1.82E+03	2.02E+03	-9.59E+02	7.89E+01	1.48E+01	2.88E+03
Min Stress 12	8132	3	3	-1.13E+05	-1.65E+05	<b>-2.28E+05</b>	-1.86E+04	1.03E+02	9.06E+04
Max Stress 12	6841	3	3	-7.41E+04	-8.19E+04	<b>7.02E+04</b>	1.50E+03	-2.05E+02	-7.75E+03
Min Stress 23	12746	5	7	-1.59E+04	-6.29E+04	-9.72E+04	<b>-3.29E+04</b>	7.84E+02	6.06E+04
Max Stress 23	12748	5	7	1.41E+04	2.41E+04	-7.00E+04	<b>3.36E+04</b>	-3.84E+03	8.92E+04
Min Stress 31	6055	2	2	8.56E+04	-1.62E+05	2.02E+04	2.23E+04	<b>-1.25E+04</b>	8.72E+04
Max Stress 31	6064	2	2	5.68E+04	-1.82E+05	5.67E+03	-2.35E+04	<b>5.81E+03</b>	5.70E+04
Min Maximum Principal Stress	5721	4	4	-1.24E+05	-3.47E+05	2.89E+04	0.00E+00	0.00E+00	<b>-1.20E+05</b>
Max Maximum Principal Stress	30676	4	4	4.03E+05	2.76E+04	7.87E+03	0.00E+00	0.00E+00	<b>4.03E+05</b>
Min Minimum Principal Stress	6055	4	4	-9.27E+04	-4.03E+05	-2.50E+03	0.00E+00	0.00E+00	-9.27E+04
Max Minimum Principal Stress	5835	4	4	3.01E+05	5.59E+04	-6.20E+03	-2.04E+13	2.89E+14	3.01E+05
Max Absolute Ply Failure Index	31014	4	4	7.06E+04	-4.61E+02	-1.93E+04	-7.44E+15	1.22E+14	7.55E+04
Min Absolute Ply Strength Ratio	5547	1	1	1.82E+03	2.02E+03	-9.59E+02	7.89E+01	1.48E+01	2.88E+03
Min Ply Margin of Safety	5547	1	1	1.82E+03	2.02E+03	-9.59E+02	7.89E+01	1.48E+01	2.88E+03
Max Ply Margin of Safety	31014	4	4	7.06E+04	-4.61E+02	-1.93E+04	-7.44E+15	1.22E+14	7.55E+04

Εικόνα 81 Αποτελέσματα 10η διαστρωμάτωση



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
4	t300_tms	0,23	0
3	t300_tms	0,23	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

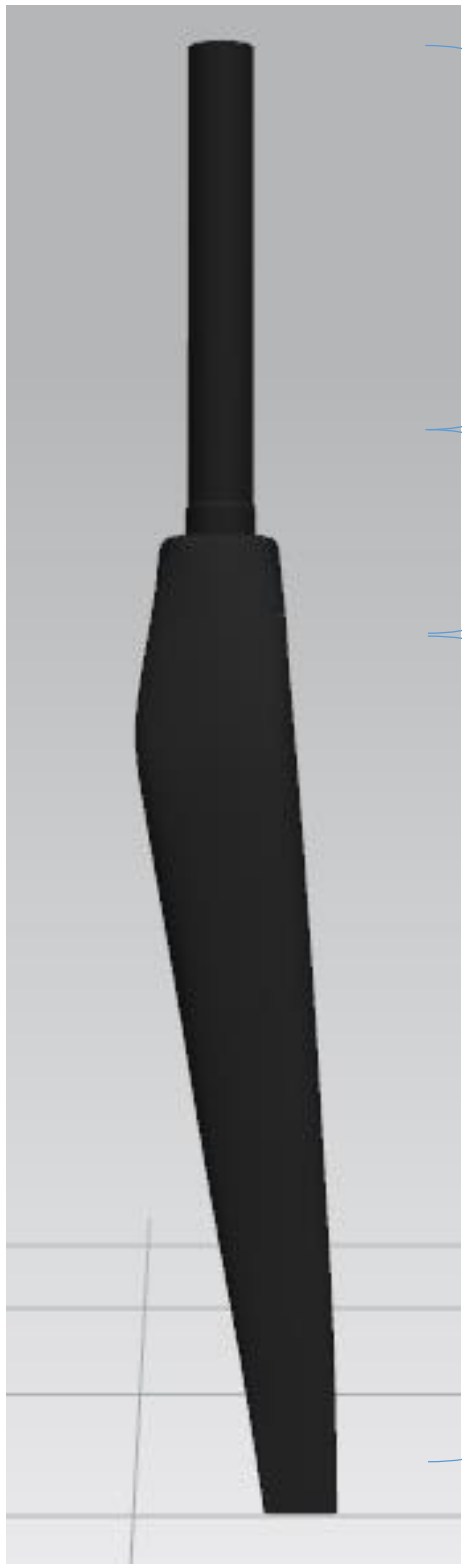
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
52	t700_tms_1	0,16	-45
51	t700_tms_1	0,16	45
30	m46jwoov_tms	0,23	0
29	m46jwoov_tms	0,23	45
28	m46jwoov_tms	0,23	0
27	m46jwoov_tms	0,23	45
26	m46jwoov_tms	0,23	0
25	m46jwoov_tms	0,23	45
15	t300_tms	0,29	45
14	t300_tms	0,29	0
13	t300_tms	0,29	45
12	t300_tms	0,29	0
11	m46jwoov_tms	0,23	45
10	t300_tms	0,29	0
9	m46jwoov_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
38	t700_tms_1	0,23	90
37	t700_tms_1	0,23	0
36	t700_tms_1	0,23	90
35	t300_tms	0,23	45

Εικόνα 82 11η διαστρωμάτωση

	Element Id	Ply Layer Id	Stresses									Maximum Principal	Minimum Principal
			Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Stress11	Stress22	Stress33		
Min Stress 11	39736	7	28	-6,75E+05	-6,97E+04	0,00E+00	6,42E+04	-2,93E+03	-1,41E+02	-6,30E+04	-6,81E+05		
Max Stress 11	2063	5	26	5,53E+05	9,80E+04	0,00E+00	1,72E+05	7,73E+03	-2,19E+03	6,11E+05	4,02E+04		
Min Stress 22	3168	3	9	-1,85E+05	-4,61E+05	0,00E+00	1,55E+05	9,84E+03	-3,14E+04	-1,15E+05	-5,31E+05		
Max Stress 22	2063	7	30	7,81E+04	7,52E+05	0,00E+00	1,29E+04	2,76E+03	-8,39E+02	7,52E+05	7,79E+04		
Min Stress 33	5571	1	1	6,17E+03	4,62E+03	0,00E+00	-4,81E+03	-4,09E+01	-2,98E+01	1,03E+04	5,19E+02		
Max Stress 33	5571	1	1	6,17E+03	4,62E+03	0,00E+00	-4,81E+03	-4,09E+01	-2,98E+01	1,03E+04	5,19E+02		
Min Stress 12	35457	3	9	2,83E+05	1,92E+05	0,00E+00	-3,26E+05	6,82E+03	5,95E+02	5,67E+05	-9,19E+04		
Max Stress 12	2063	6	29	3,12E+05	4,28E+05	0,00E+00	3,06E+05	5,91E+03	-1,70E+03	6,81E+05	5,91E+04		
Min Stress 23	4829	7	11	-1,18E+04	-1,35E+04	0,00E+00	-1,92E+04	-7,98E+04	-9,52E+04	-1,01E+04	-1,21E+05		
Max Stress 23	26955	8	10	5,97E+04	-2,45E+04	0,00E+00	-3,97E+04	8,00E+04	-4,70E+04	7,54E+04	-4,03E+04		
Min Stress 31	3190	5	11	-1,18E+05	-1,82E+05	0,00E+00	-8,94E+04	5,45E+03	-1,93E+05	-5,50E+04	-2,45E+05		
Max Stress 31	5016	6	10	1,04E+05	2,79E+04	0,00E+00	-1,04E+04	2,62E+04	7,16E+04	1,05E+05	2,65E+04		
Min Maximum Principal Stress	4756	11	15	-3,44E+05	-3,68E+05	0,00E+00	1,78E+04	6,74E-13	-2,36E-11	-3,35E+05	-3,78E+05		
Max Maximum Principal Stress	2063	7	30	7,81E+04	7,52E+05	0,00E+00	1,29E+04	2,76E+03	-8,39E+02	7,52E+05	7,79E+04		
Min Minimum Principal Stress	39736	7	28	-6,75E+05	-6,97E+04	0,00E+00	6,42E+04	-2,93E+03	-1,41E+02	-6,30E+04	-6,81E+05		
Max Minimum Principal Stress	32693	7	11	3,74E+05	3,76E+05	0,00E+00	3,66E+04	5,99E+04	-1,98E+03	4,12E+05	3,39E+05		
Max Absolute Ply Failure Index	53480	4	38	-3,90E+02	-1,86E+03	0,00E+00	-1,36E+03	-3,76E-14	-2,26E-14	4,21E+02	-2,67E+03		
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	35	-4,95E+04	-1,28E+05	0,00E+00	-4,67E+04	-4,94E+01	-1,07E+03	-2,77E+04	-1,49E+05		
Min Ply Margin of Safety	1	1	35	-4,95E+04	-1,28E+05	0,00E+00	-4,67E+04	-4,94E+01	-1,07E+03	-2,77E+04	-1,49E+05		
Max Ply Margin of Safety	53480	4	38	-3,90E+02	-1,86E+03	0,00E+00	-1,36E+03	-3,76E-14	-2,26E-14	4,21E+02	-2,67E+03		

Εικόνα 83 Αποτελέσματα 11η διαστρωμάτωση



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
4	m46jwoov_tms	0,23	0
3	m46jwoov_tms	0,23	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

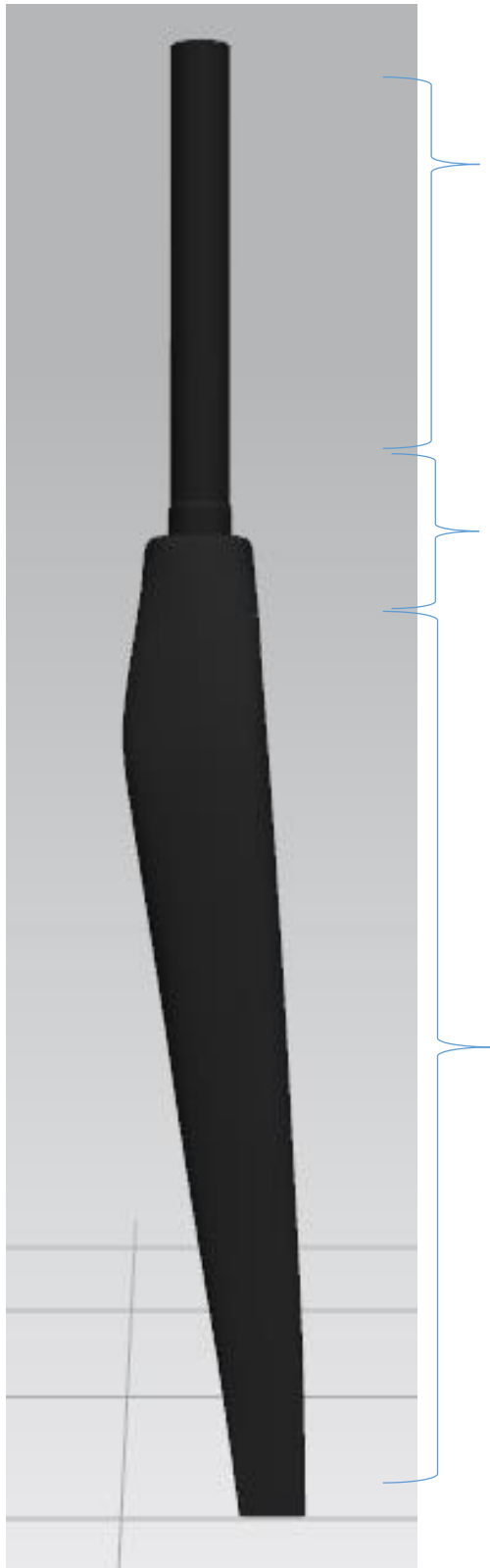
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
26	m46jud_tms	0,13	0
25	m46jud_tms	0,13	45
24	m46jud_tms	0,13	0
23	m46jud_tms	0,13	45
22	t300_tms	0,23	0
21	t300_tms	0,23	45
14	m46jwoov_tms	0,29	0
13	m46jwoov_tms	0,29	45
12	m46jwoov_tms	0,29	0
11	m46jwoov_tms	0,29	45
10	t300_tms	0,29	0
9	t300_tms	0,29	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
33	m46jud_tms	0,23	0
32	m46jud_tms	0,23	90
31	t300_tms	0,23	45

Εικόνα 84 12η διαστρωματωση

	Element Id	Layer	Ply Id	Stresses			Maximum Principal	Minimum Principal			
				Stress11	Stress22	Stress33					
Min Stress 11	9375	14	20	<b>-3,75E+05</b>	-1,40E+05	0,00E+00	2,14E-12	-1,40E+05	-3,76E-		
Max Stress 11	29823	11	20	<b>3,72E+05</b>	1,60E+05	0,00E+00	4,16E+03	4,60E-12	8,51E-13	3,72E+05	1,60E-
Min Stress 22	6055	4	4	-1,11E+05	<b>-3,95E+05</b>	0,00E+00	-1,90E+03	0,00E+00	0,00E+00	-1,11E+05	-3,95E-
Max Stress 22	5025	3	3	2,12E+05	<b>2,97E+05</b>	0,00E+00	-8,23E+04	2,02E+02	4,49E+03	3,47E+05	1,62E-
Min Stress 33	258	1	31	-3,81E+04	-7,05E+04	<b>0,00E+00</b>	-5,19E+03	4,38E+01	-1,08E+03	-3,73E+04	-7,13E-
Max Stress 33	258	1	31	-3,81E+04	-7,05E+04	<b>0,00E+00</b>	-5,19E+03	4,38E+01	-1,08E+03	-3,73E+04	-7,13E-
Min Stress 12	5247	3	3	7,36E+04	1,87E+04	0,00E+00	-2,16E+05	-1,19E+04	3,22E+03	2,64E+05	-1,71E-
Max Stress 12	4090	1	3	-1,06E+05	-1,55E+05	0,00E+00	<b>1,57E+05</b>	5,59E+02	-4,01E+02	2,85E+04	-2,90E-
Min Stress 23	8695	8	14	-2,92E+04	-7,47E+03	0,00E+00	-2,02E+04	-4,42E+04	-1,83E+04	4,62E+03	-4,13E-
Max Stress 23	5166	7	11	-1,31E+05	-1,62E+05	0,00E+00	-6,51E+04	<b>4,50E+04</b>	-6,90E+03	-7,96E+04	-2,13E-
Min Stress 31	3190	5	11	-5,10E+04	-8,34E+04	0,00E+00	-3,12E+04	-1,48E+03	-8,86E+04	-3,21E+04	-1,02E-
Max Stress 31	8999	6	10	3,66E+04	-8,99E+03	0,00E+00	1,91E+04	-1,80E+03	<b>2,16E+04</b>	4,36E+04	-1,60E-
Min Maximum Principal Stress	5249	10	14	-3,61E+05	-2,98E+05	0,00E+00	2,68E+03	-3,15E+03	-3,23E+02	<b>-2,98E+05</b>	-3,61E-
Max Maximum Principal Stress	32662	11	19	2,82E+05	2,80E+05	0,00E+00	-1,15E+05	1,21E-12	-5,63E-14	<b>3,96E+05</b>	1,66E-
Min Minimum Principal Stress	6055	4	4	-1,11E+05	-3,95E+05	0,00E+00	-1,90E+03	0,00E+00	0,00E+00	-1,11E+05	-3,95E-
Max Minimum Principal Stress	32696	10	14	3,69E+05	1,87E+05	0,00E+00	8,02E+03	2,13E-12	5,13E-13	3,70E+05	<b>1,86E-</b>
Max Absolute Ply Failure Index	53480	3	33	-5,49E+03	-5,41E+01	0,00E+00	4,37E+03	-3,50E-14	0,00E+00	2,37E+03	-7,91E-
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	31	-4,11E+04	-7,16E+04	0,00E+00	-2,19E+04	-8,80E+01	-5,52E+02	-2,97E+04	-8,30E-
Min Ply Margin of Safety	1	1	31	-4,11E+04	-7,16E+04	0,00E+00	-2,19E+04	-8,80E+01	-5,52E+02	-2,97E+04	-8,30E-
Max Ply Margin of Safety	53480	3	33	-5,49E+03	-5,41E+01	0,00E+00	4,37E+03	-3,50E-14	0,00E+00	2,37E+03	-7,91E-

Εικόνα 85 αποτελέσματα 12η διαστρωματώση



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
33	t700_tms_1	0,23	0
32	t700_tms_1	0,23	90
31	t300_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
26	m46jwoov_tms	0,23	0
25	m46jwoov_tms	0,23	45
24	m46jwoov_tms	0,23	0
23	m46jwoov_tms	0,23	45
22	m46jwoov_tms	0,23	0
21	m46jwoov_tms	0,23	45
14	m46jwoov_tms	0,23	0
13	m46jwoov_tms	0,29	45
12	m46jwoov_tms	0,23	0
11	t300_tms	0,29	45
10	t300_tms	0,29	0
9	t300_tms	0,29	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
33	t700_tms_1	0,23	0
32	t700_tms_1	0,23	90
31	t300_tms	0,23	45

Εικόνα 86 13η διαστρωματωση

	Element	Ply	Computation	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum	Minimum
	Id	Layer	Id Location	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)
Min Stress 11	8973	14	20 Middle	-6,76E+05	-2,72E+05	0,00E+00	1,11E+05	0,00E+00	0,00E+00	-2,44E+05	-7,04E+05
Max Stress 11	27903	12	20 Middle	8,61E+05	4,28E+05	0,00E+00	-3,09E+04	-1,07E-12	-6,72E-14	8,64E+05	4,26E+05
Min Stress 22	4786	10	14 Middle	-5,46E+05	-5,41E+05	0,00E+00	-2,90E+04	1,46E+03	-2,28E+04	-5,14E+05	-5,73E+05
Max Stress 22	32696	9	13 Middle	6,01E+05	5,59E+05	0,00E+00	-1,12E+05	8,04E+03	1,63E+03	6,94E+05	4,66E+05
Min Stress 33	44049	1	31 Middle	9,70E+04	9,70E+04	0,00E+00	3,52E+04	-3,95E+01	1,32E+03	1,24E+05	1,24E+05
Max Stress 33	44049	1	31 Middle	9,70E+04	7,81E+04	0,00E+00	3,52E+04	-3,95E+01	1,32E+03	1,24E+05	5,11E+04
Min Stress 12	38015	1	3 Middle	3,14E+05	2,02E+05	0,00E+00	-2,82E+05	1,48E+03	-3,42E+03	5,45E+05	-2,91E+04
Max Stress 12	32698	1	1 Middle	-4,83E+04	-8,46E+04	0,00E+00	2,43E+05	7,61E+03	8,12E+02	1,78E+05	-3,11E+05
Min Stress 23	4817	6	10 Middle	-2,26E+04	7,74E+03	0,00E+00	-2,76E+04	-1,07E+05	-1,43E+05	2,41E+04	-3,89E+04
Max Stress 23	26955	8	13 Middle	-6,85E+04	1,35E+05	0,00E+00	-6,59E+04	7,81E+04	-5,74E+04	1,55E+05	-8,80E+04
Min Stress 31	3190	5	11 Middle	-7,78E+04	-8,49E+04	0,00E+00	-3,96E+04	-2,09E+04	-2,30E+05	-4,16E+04	-1,21E+05
Max Stress 31	5059	6	10 Middle	7,66E+04	3,72E+04	0,00E+00	1,43E+04	1,70E+04	7,87E+04	8,13E+04	3,26E+04
Min Maximum Principal Stress	4756	10	14 Middle	-5,93E+05	-5,39E+05	0,00E+00	-1,31E+04	-1,05E+03	-2,30E+04	-5,36E+05	-5,96E+05
Max Maximum Principal Stress	27903	12	20 Middle	8,61E+05	4,28E+05	0,00E+00	-3,09E+04	-1,07E-12	-6,72E-14	8,64E+05	-7,04E+05
Min Minimum Principal Stress	8973	14	20 Middle	-6,76E+05	-2,72E+05	0,00E+00	1,11E+05	0,00E+00	0,00E+00	-2,44E+05	-7,04E+05
Max Minimum Principal Stress	32700	10	14 Middle	8,48E+05	4,81E+05	0,00E+00	3,14E+04	-7,16E-12	-4,26E-13	8,50E+05	4,78E+05
Max Absolute Ply Failure Index	53480	3	33 Middle	-1,05E+04	-7,93E+02	0,00E+00	7,43E+03	6,26E-14	-4,53E-14	3,24E+03	-1,45E+04
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	31 Middle	-7,70E+04	-1,76E+05	0,00E+00	-5,90E+04	-2,08E+02	-1,00E+03	-4,95E+04	-2,03E+05
Min Ply Margin of Safety	1	1	31 Middle	-7,70E+04	-1,76E+05	0,00E+00	-5,90E+04	-2,08E+02	-1,00E+03	-4,95E+04	-2,03E+05
Max Ply Margin of Safety	53480	3	33 Middle	-1,05E+04	-7,93E+02	0,00E+00	7,43E+03	6,26E-14	-4,53E-14	3,24E+03	-1,45E+04

Εικόνα 87 Αποτελέσματα 13η διαστρωματωση





Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
33	t700_tms_1	0,23	0
32	t700_tms_1	0,23	90
31	t300_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
26	t700_tms_1	0,13	0
25	t700_tms_1	0,13	45
24	t700_tms_1	0,13	0
23	t700_tms_1	0,13	45
22	m46jwoov_tms	0,23	0
21	m46jwoov_tms	0,23	45
11	t300_tms	0,29	45
10	t300_tms	0,29	0
9	t300_tms	0,29	45
12	m46jwoov_tms	0,23	0
13	m46jwoov_tms	0,29	45
14	m46jwoov_tms	0,23	0

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
5	t300_tms	0,29	45
4	t300_tms	0,23	0
3	t300_tms	0,23	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

Εικόνα 88 14η διαστρωμάτωση

	Element Id	Layer	Ply Id	Stresses							Maximum Principal	Minimum Principal
				Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31			
Min Stress 11	39736	10	50	-6,78E+05	-8,82E+04	0,00E+00	1,28E+05	-1,69E-12	1,75E-13	-6,17E+04	-7,0	
Max Stress 11	2063	10	47	7,11E+05	2,02E+05	0,00E+00	-2,97E+05	4,73E-13	-1,36E-14	8,48E+05	6,5	
Min Stress 22	39736	9	49	-1,20E+05	-5,71E+05	0,00E+00	1,86E+05	-4,80E+03	1,01E+03	-5,31E+04	-6,3	
Max Stress 22	24591	14	19	4,55E+05	5,30E+05	0,00E+00	-2,45E+05	5,82E-12	-1,29E-12	7,40E+05	2,4	
Min Stress 33	3379	1	23	-7,10E+03	-1,70E+04	0,00E+00	-7,27E+04	6,70E+02	1,23E+03	6,08E+04	-8,5	
Max Stress 33	3379	1	23	-7,10E+03	-1,70E+04	0,00E+00	-7,27E+04	6,70E+02	1,23E+03	6,08E+04	-8,5	
Min Stress 12	2063	10	47	7,11E+05	2,02E+05	0,00E+00	-2,97E+05	4,73E-13	-1,36E-14	8,48E+05	6,5	
Max Stress 12	2075	10	46	4,99E+05	1,88E+05	0,00E+00	2,59E+05	1,42E+03	1,10E+02	6,45E+05	3,9	
Min Stress 23	4817	6	13	-6,88E+04	-1,33E+04	0,00E+00	-5,21E+04	-9,10E+04	-1,41E+05	1,80E+04	-1,0	
Max Stress 23	26955	8	12	1,29E+05	-5,32E+04	0,00E+00	-7,74E+04	8,14E+04	-5,78E+04	1,57E+05	-8,1	
Min Stress 31	3190	4	13	-1,24E+05	-1,53E+05	0,00E+00	-6,84E+04	-1,26E+04	-2,22E+05	-6,86E+04	-2,0	
Max Stress 31	5016	6	13	1,49E+05	1,30E+05	0,00E+00	-7,83E+04	3,46E+04	7,64E+04	2,18E+05	6,0	
Min Maximum Principal Stress	4756	10	11	-3,46E+05	-3,47E+05	0,00E+00	2,51E+04	4,23E+02	-3,21E+04	-3,21E+05	-3,7	
Max Maximum Principal Stress	2063	10	47	7,11E+05	2,02E+05	0,00E+00	-2,97E+05	4,73E-13	-1,36E-14	8,48E+05	6,5	
Min Minimum Principal Stress	39736	10	50	-6,78E+05	-8,82E+04	0,00E+00	1,28E+05	-1,69E-12	1,75E-13	-6,17E+04	-7,0	
Max Minimum Principal Stress	32696	7	12	4,68E+05	4,97E+05	0,00E+00	1,35E+04	1,68E+04	3,48E+03	5,03E+05	4,6	
Max Absolute Ply Failure Index	53480	3	33	-1,04E+04	-7,83E+02	0,00E+00	7,38E+03	0,00E+00	-4,48E-14	3,20E+03	-1,4	
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	31	-8,52E+04	-1,85E+05	0,00E+00	-6,04E+04	-1,84E+02	-1,13E+03	-5,68E+04	-2,1	
Min Ply Margin of Safety	1	1	31	-8,52E+04	-1,85E+05	0,00E+00	-6,04E+04	-1,84E+02	-1,13E+03	-5,68E+04	-2,1	
Max Ply Margin of Safety	53480	3	33	-1,04E+04	-7,83E+02	0,00E+00	7,38E+03	0,00E+00	-4,48E-14	3,20E+03	-1,4	

Εικόνα 89 Αποτελέσματα 14ης διαστρωματώσης



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
31	t300_tms	0,23	45
30	t700_tms_1	0,13	0
29	t700_tms_1	0,13	45
28	m46jwoov_tms	0,23	0

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
27	m46jwoov_tms	0,23	45
26	t700_tms_1	0,13	0
25	t700_tms_1	0,13	45
24	t700_tms_1	0,13	0
23	t700_tms_1	0,13	45
22	m46jwoov_tms	0,23	0
21	m46jwoov_tms	0,23	45
11	t300_tms	0,29	45
10	t300_tms	0,29	0
9	t300_tms	0,29	45
12	m46jwoov_tms	0,23	0
13	m46jwoov_tms	0,29	45
14	m46jwoov_tms	0,23	0

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
5	t300_tms	0,29	45
4	t300_tms	0,23	0
3	t300_tms	0,23	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

Εικόνα 90 15η διαστρωμάτωση

	Element Id	Layer	Ply Id	Stresses						Maximum Principal	Minimum Principal
				Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31		
				mN/mm <sup>2</sup> (kPa)							
Min Stress 11	9375	12	20	<b>-3,87E+05</b>	-1,74E+05	0,00E+00	-1,29E+04	4,79E+03	3,92E+02	-1,73E+05	-3,88E+05
Max Stress 11	2063	10	47	<b>3,57E+05</b>	1,01E+05	0,00E+00	-1,49E+05	2,22E-13	8,72E-16	4,25E+05	3,28E+04
Min Stress 22	5249	7	12	-1,45E+05	<b>-3,11E+05</b>	0,00E+00	1,99E+04	-1,46E+04	-2,86E+03	-1,42E+05	-3,13E+05
Max Stress 22	24591	14	19	2,22E+05	<b>2,86E+05</b>	0,00E+00	-1,38E+05	2,96E-12	-8,23E-13	3,96E+05	1,12E+05
Min Stress 33	21090	1	31	-3,31E+04	-2,18E+04	<b>0,00E+00</b>	-9,67E+03	-5,74E+02	-2,11E+02	-1,63E+04	-3,86E+04
Max Stress 33	21090	1	31	-3,31E+04	-2,18E+04	<b>0,00E+00</b>	-9,67E+03	-5,74E+02	-2,11E+02	-1,63E+04	-3,86E+04
Min Stress 12	5247	1	1	1,13E+05	7,11E+04	0,00E+00	<b>-1,75E+05</b>	-5,14E+03	8,15E+02	2,68E+05	-8,48E+04
Max Stress 12	20680	5	14	-4,10E+04	-7,18E+04	0,00E+00	<b>1,31E+05</b>	-3,94E+03	1,05E+04	7,51E+04	-1,88E+05
Min Stress 23	4817	6	13	-3,20E+04	-6,56E+03	0,00E+00	-2,03E+04	<b>-4,62E+04</b>	-7,06E+04	4,66E+03	-4,32E+04
Max Stress 23	5170	6	13	-1,61E+05	-1,90E+05	0,00E+00	-8,88E+04	<b>4,64E+04</b>	-1,41E+04	-8,54E+04	-2,65E+05
Min Stress 31	3190	4	13	-7,79E+04	-7,06E+04	0,00E+00	-2,79E+04	-6,47E+03	<b>-1,09E+05</b>	-4,61E+04	-1,02E+05
Max Stress 31	5089	6	13	9,07E+04	3,01E+04	0,00E+00	-1,77E+04	5,58E+03	<b>3,01E+04</b>	9,55E+04	2,53E+04
Min Maximum Principal Stress	9376	12	20	-3,62E+05	-2,23E+05	0,00E+00	-5,91E+04	5,02E+03	4,96E+03	<b>-2,01E+05</b>	-3,84E+05
Max Maximum Principal Stress	2063	10	47	3,57E+05	1,01E+05	0,00E+00	-1,49E+05	2,22E-13	8,72E-16	<b>4,25E+05</b>	3,28E+04
Min Minimum Principal Stress	12253	14	19	-3,24E+05	-2,37E+05	0,00E+00	1,12E+05	5,35E-12	5,29E-13	-1,60E+05	<b>-4,01E+05</b>
Max Minimum Principal Stress	32696	7	12	2,68E+05	2,52E+05	0,00E+00	6,37E+03	9,65E+03	1,76E+03	2,70E+05	<b>2,50E+05</b>
Max Absolute Ply Failure Index	53480	3	33	-5,39E+03	-4,04E+02	0,00E+00	3,81E+03	0,00E+00	-2,31E-14	1,66E+03	-7,45E+03
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	31	-4,43E+04	-9,58E+04	0,00E+00	-3,12E+04	-9,32E+01	-5,88E+02	-2,99E+04	-1,10E+05
Min Ply Margin of Safety	1	1	31	-4,43E+04	-9,58E+04	0,00E+00	-3,12E+04	-9,32E+01	-5,88E+02	-2,99E+04	-1,10E+05
Max Ply Margin of Safety	53480	3	33	-5,39E+03	-4,04E+02	0,00E+00	3,81E+03	0,00E+00	-2,31E-14	1,66E+03	-7,45E+03

Εικόνα 91 Αποτελέσματα 15ης διαστρωμάτωσης



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
35	t700_tms_1	0,23	90
34	t300_tms	0,23	45
33	t700_tms_1	0,23	0
32	t700_tms_1	0,23	90
31	t300_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
18	t300_tms	0,29	0
17	t700_tms_1	0,16	20
16	t300_tms	0,29	0
15	t700_tms_1	0,16	-20
14	t300_tms	0,29	45
13	t300_tms	0,29	0
12	t700_tms_1	0,16	-20
11	t300_tms	0,29	45
10	t700_tms_1	0,16	20
9	t300_tms	0,29	0

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
5	t300_tms	0,29	45
4	t300_tms	0,23	0
3	t300_tms	0,23	45
2	t300_tms	0,29	0
1	t300_tms	0,29	45

Εικόνα 92 16η διαστρωμάτωση

	Element	Ply	Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Minimum Principal
	Id	Layer Id	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)
Min Stress 11	39736	10	<b>-3,87E+05</b>	-5,04E+04	0,00E+00	7,12E+04	0,00E+00	-4,94E-13	-3,59E+04	-4,02E+05
Max Stress 11	2063	10	<b>3,86E+05</b>	1,10E+05	0,00E+00	-1,60E+05	0,00E+00	2,70E-14	4,59E+05	3,62E+04
Min Stress 22	39736	9	-6,98E+04	<b>-3,23E+05</b>	0,00E+00	1,06E+05	-2,69E+03	8,72E+02	-3,12E+04	-3,62E+05
Max Stress 22	8973	1	9,90E+04	<b>2,52E+05</b>	0,00E+00	-5,86E+04	-4,70E+01	7,11E+01	2,72E+05	7,91E+04
Min Stress 33	10980	1	5,07E+03	4,69E+03	<b>0,00E+00</b>	-4,82E+03	1,91E+02	2,47E+02	9,70E+03	5,47E+01
Max Stress 33	10980	1	5,07E+03	4,69E+03	<b>0,00E+00</b>	-4,82E+03	1,91E+02	2,47E+02	9,70E+03	5,47E+01
Min Stress 12	5247	1	1,23E+05	6,52E+04	0,00E+00	<b>-1,85E+05</b>	-4,64E+03	6,72E+02	2,81E+05	-9,29E+04
Max Stress 12	2075	10	2,75E+05	1,04E+05	0,00E+00	<b>1,44E+05</b>	5,62E+02	7,81E+01	3,56E+05	2,24E+04
Min Stress 23	7637	6	-4,73E+04	-1,50E+05	0,00E+00	8,53E+03	<b>-4,95E+04</b>	2,08E+04	-4,65E+04	-1,51E+05
Max Stress 23	7619	6	-5,11E+04	-5,76E+04	0,00E+00	-1,42E+04	<b>5,01E+04</b>	-6,67E+03	-3,98E+04	-6,90E+04
Min Stress 31	3190	5	-3,32E+04	-5,95E+04	0,00E+00	-2,21E+04	-6,11E+03	<b>-1,00E+05</b>	-2,06E+04	-7,21E+04
Max Stress 31	5016	6	6,15E+04	2,57E+04	0,00E+00	-1,02E+04	2,27E+04	<b>3,63E+04</b>	6,42E+04	2,30E+04
Min Maximum Principal Stress	5249	10	-2,73E+05	-2,04E+05	0,00E+00	-4,40E+03	-3,87E+03	-8,32E+02	<b>-2,03E+05</b>	-2,73E+05
Max Maximum Principal Stress	2063	10	3,86E+05	1,10E+05	0,00E+00	-1,60E+05	0,00E+00	2,70E-14	<b>4,59E+05</b>	3,62E+04
Min Minimum Principal Stress	39736	10	-3,87E+05	-5,04E+04	0,00E+00	7,12E+04	0,00E+00	-4,94E-13	-3,59E+04	-4,02E+05
Max Minimum Principal Stress	5025	1	2,15E+05	2,48E+05	0,00E+00	-7,71E+04	2,21E+03	5,00E+03	3,10E+05	<b>1,52E+05</b>
Max Absolute Ply Failure Index	53480	3	-5,37E+03	-4,01E+02	0,00E+00	3,79E+03	-3,24E-14	0,00E+00	1,64E+03	-7,42E+03
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	-4,56E+04	-9,68E+04	0,00E+00	-3,12E+04	-8,78E+01	-6,10E+02	-3,08E+04	-1,12E+05
Min Ply Margin of Safety	1	1	-4,56E+04	-9,68E+04	0,00E+00	-3,12E+04	-8,78E+01	-6,10E+02	-3,08E+04	-1,12E+05
Max Ply Margin of Safety	53480	3	-5,37E+03	-4,01E+02	0,00E+00	3,79E+03	-3,24E-14	0,00E+00	1,64E+03	-7,42E+03

Εικόνα 93 Αποτελέσματα 16ης διαστρωμάτωσης



Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
35	m46jud_tms	0,16	45
34	m46jud_tms	0,16	90
33	m46jud_tms	0,23	0
32	m46jud_tms	0,23	90
31	m46jwoov_tms	0,23	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
26	m46jud_tms	0,13	0
25	m46jud_tms	0,13	45
24	m46jud_tms	0,13	0
23	m46jud_tms	0,13	45
22	t300_tms	0,23	0
21	t300_tms	0,23	45
14	m46jwoov_tms	0,29	0
13	m46jwoov_tms	0,29	45
12	m46jwoov_tms	0,29	0
11	m46jwoov_tms	0,29	45
10	m46jwoov_tms	0,29	0
9	m46jwoov_tms	0,29	45

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
5	m46jwoov_tms	0,29	45
4	m46jwoov_tms	0,23	0
3	m46jwoov_tms	0,23	45
2	m46jwoov_tms	0,29	0
1	m46jwoov_tms	0,29	45

Εικόνα 94 17η διαστρωμάτωση

	Element Id	Layer	Ply Id	Stresses									Maximum Principal	Minimum Principal
				Stress11	Stress22	Stress33	Stress12	Stress23	Stress31	Stress11	Stress22	Stress33		
Min Stress 11	5251	10	14	-3.26E+05	-2.60E+05	0.00E+00	1.06E+03	-5.20E+03	-1.11E+03	-2.60E+05	-3.26E+05			
Max Stress 11	7595	1	1	3.35E+05	1.63E+05	0.00E+00	-8.56E+04	8.62E+02	1.97E+03	3.71E+05	1.27E+05			
Min Stress 22	6055	4	4	-1.22E+05	-3.70E+05	0.00E+00	-1.81E+03	0.00E+00	0.00E+00	-1.22E+05	-3.70E+05			
Max Stress 22	5025	1	1	2.08E+05	3.05E+05	0.00E+00	-7.94E+04	-1.20E+03	2.24E+02	3.50E+05	1.64E+05			
Min Stress 33	15431	1	5	6.71E+02	-1.25E+03	0.00E+00	2.21E+03	-1.20E+02	-1.06E+02	2.12E+03	-2.70E+03			
Max Stress 33	15431	1	5	6.71E+02	-1.25E+03	0.00E+00	2.21E+03	-1.20E+02	-1.06E+02	2.12E+03	-2.70E+03			
Min Stress 12	8109	1	1	-4.98E+04	-7.65E+04	0.00E+00	-2.33E+05	1.65E+04	7.03E+03	1.71E+05	-1.14E+05			
Max Stress 12	15249	2	2	3.74E+04	4.82E+03	0.00E+00	1.34E+05	-1.01E+03	8.24E+03	1.56E+05	-2.03E+05			
Min Stress 23	5220	6	10	-6.43E+04	-2.03E+05	0.00E+00	1.10E+03	-4.15E+04	-2.33E+03	-6.43E+04	-2.03E+05			
Max Stress 23	5166	6	10	-6.43E+04	-1.77E+05	0.00E+00	-2.68E+04	9.46E+03	-3.10E+03	-5.83E+04	-1.83E+05			
Min Stress 31	38807	5	11	9.66E+03	5.01E+04	0.00E+00	-1.62E+04	5.87E+03	-8.71E+04	5.58E+04	3.95E+03			
Max Stress 31	20709	5	15	-8.68E+04	3.99E+04	0.00E+00	2.47E+03	5.87E+03	1.94E+04	4.00E+04	-8.68E+04			
Min Maximum Principal Stress	5249	10	14	-3.20E+05	-2.62E+05	0.00E+00	2.76E+03	-5.19E+03	-6.53E+02	-2.62E+05	-3.20E+05			
Max Maximum Principal Stress	7595	1	1	3.35E+05	1.63E+05	0.00E+00	-8.56E+04	8.62E+02	1.97E+03	3.71E+05	1.27E+05			
Min Minimum Principal Stress	15543	4	8	-8.63E+04	-3.69E+05	0.00E+00	2.85E+04	-3.51E-12	1.56E-12	-8.34E+04	-3.77E+05			
Max Minimum Principal Stress	5029	1	1	2.48E+05	2.55E+05	0.00E+00	-7.99E+04	-3.45E+03	-1.59E+03	3.32E+05	1.77E+05			
Max Absolute Ply Failure Index	53480	5	35	-2.88E+03	-4.27E+01	0.00E+00	2.85E+03	-4.13E-14	-5.45E-14	1.72E+03	-4.64E+03			
Min Absolute Ply Strength Ratio	1	1	31	-4.88E+04	-9.80E+04	0.00E+00	-3.13E+04	-4.17E+01	-5.61E+02	-3.36E+04	-1.13E+05			
Min Ply Margin of Safety	1	1	31	-4.88E+04	-9.80E+04	0.00E+00	-3.13E+04	-4.17E+01	-5.61E+02	-3.36E+04	-1.13E+05			
Max Ply Margin of Safety	53480	5	35	-2.88E+03	-4.27E+01	0.00E+00	2.85E+03	-4.13E-14	-5.45E-14	1.72E+03	-4.64E+03			

Εικόνα 95 Αποτελέσματα 17ης διαστρωμάτωσης



## Συμπεράσματα

Πλέον έχουμε αποσαφηνίσει το πρόβλημα των φορτίσεων και έχουμε καταλήξει στο ότι το σημείο το οποίο παρατηρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα καταπόνησης είναι η κορόνα. Συνεπώς η κορόνα θα ενισχυθεί από πολύ μεγαλύτερο αριθμό στρώσεων σε σχέση με το υπόλοιπο τεμάχιο. Είναι εμφανές ότι αυτό συμβαίνει λόγω της απότομης αλλαγής γεωμετρίας.

Ένα πρόβλημα που θα πρέπει να αναλογιστούμε είναι το ότι δεν μπορούμε να προσθέτουμε στρώσεις επ άπειρον αφού πρέπει να περάσουν μέσα οι σακουλές και έχουμε περιορισμό από την διάσταση του steerer που έχει 30mm διάμετρο. Συνεπώς οι στρώσεις πρέπει να αφήσουν ένα περιθώριο τουλάχιστον 8 mm προκυμμένου να περνάει η σακούλα που σπρώζει τα υφάσματα πάνω στα τοιχώματα του καλουπιού.

Μετα τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε ότι τα μεγαλύτερα φορτία παρατηρούνται στην αλλαγή γεωμετρίας κάτι που περιμέναμε. Παρατηρήσαμε λοιπόν η επίπτωση που έχει αυτό στα laminates είναι ότι στην διεύθυνση 0 μοιρών έχουμε την μεγαλύτερη καταπόνηση. Έτσι λοιπόν κατά συνέπεια θα πρέπει να ενισχύσουμε με φυλλα στις 0 μοίρες.

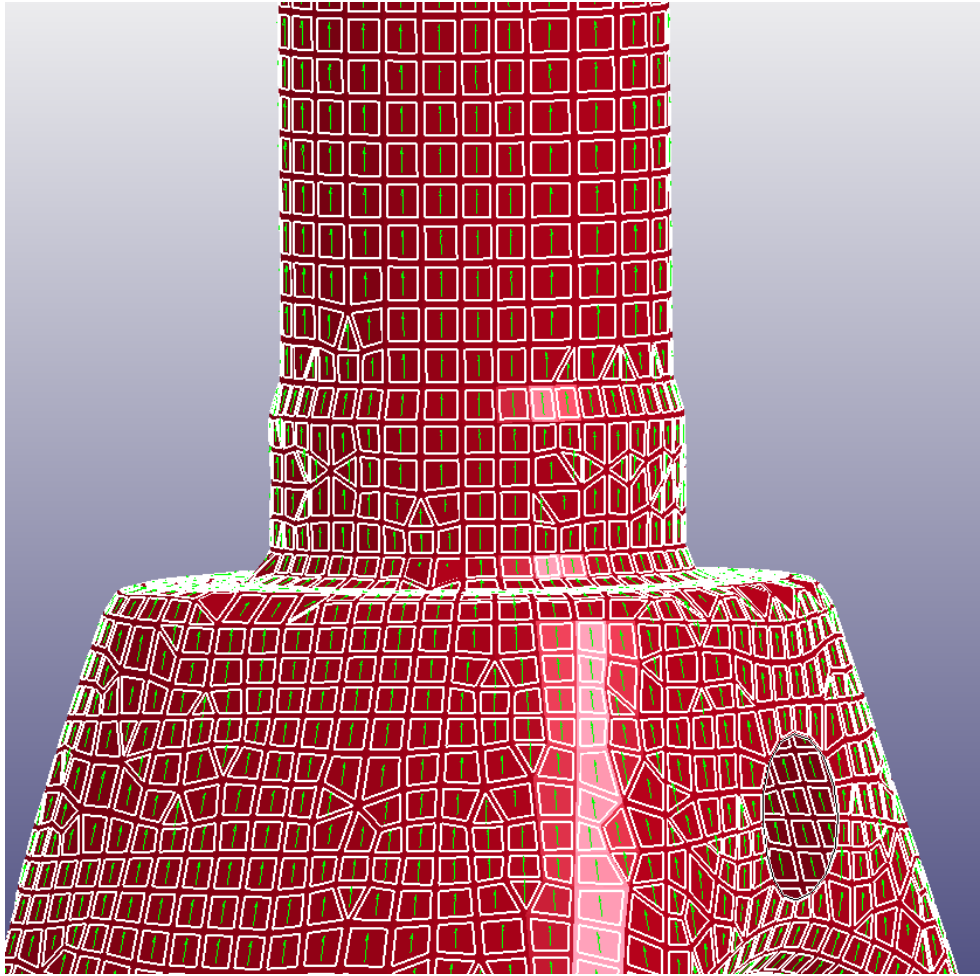
Επίσης παρατηρήθηκε ότι στις 90 μοίρες δεν παραλαμβάνονταν φορτία αρα μπορούμε να μην χρησιμοποιήσουμε ενίσχυση σε αυτή την κατεύθυνση κερδίζοντας σε βάρος αλλά και πάχος. Τα φυλλα τα οποία ήταν στις 45 μοίρες παραλάμβαναν φορτίο συγκριτικά μικρότερα παρ όλα αυτά σε σχέση με αυτό στις 0 μοίρες.

Κρίθηκε επιβεβλημένο για την συνέχεια να χρησιμοποιήσουμε αυτά που μάθαμε σε μια καινούρια διαστρωμάτωση. Στην διαστρωμάτωση αυτή θα συμπεριλάβουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

## Δεύτερη φάση Is dyna

Αφού πλέον χέουμε αποσαφηνίσει το ερώτημα επιπλέον θα πρέπει να προχωρήσουμε στο δυσμενέστερο τεστ των προδιαγραφών το οποίο είναι το τεστ της πρόσκρουσης. Και εδώ όπως και στο αλουμίνιο θα χρησιμοποιήσουμε το Is dyna για να τρέξουμε το τεστ.

Η μέθοδος για να κάνουμε την διαστρωμάτωση στο Is dyna μοιάζει με την μέθοδο zone based layup του siemens nx. Διαλέγοντας σε ποια elements πανε ποιες στρώσεις και επιπλέον την κατεύθυνση που έχει το συγκεκριμένο element και το πάχος του κάθε φυλούν ορίζονται πλήρως οι παράμετροι που απαιτούνται από το πρόγραμμα.



Εικόνα 96 κατεύθυνση ινων Is dyona

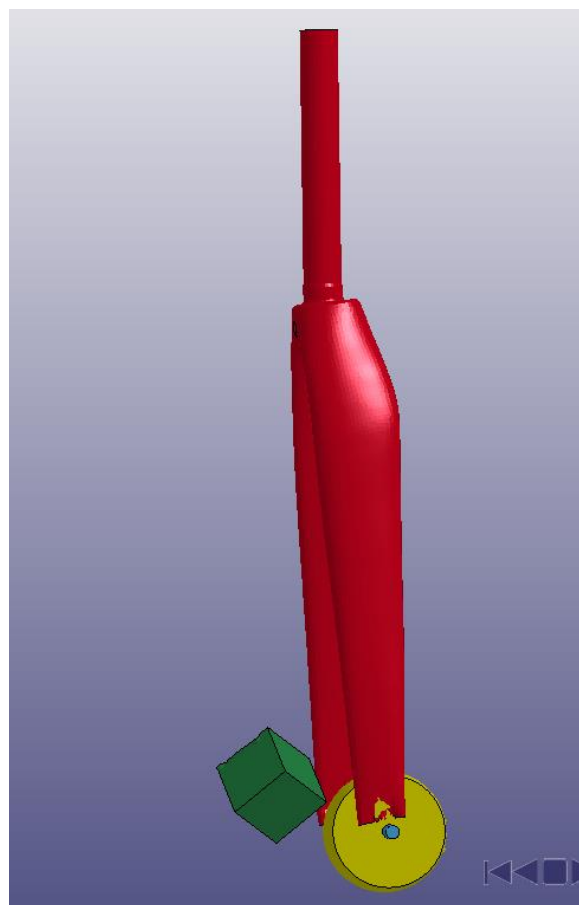
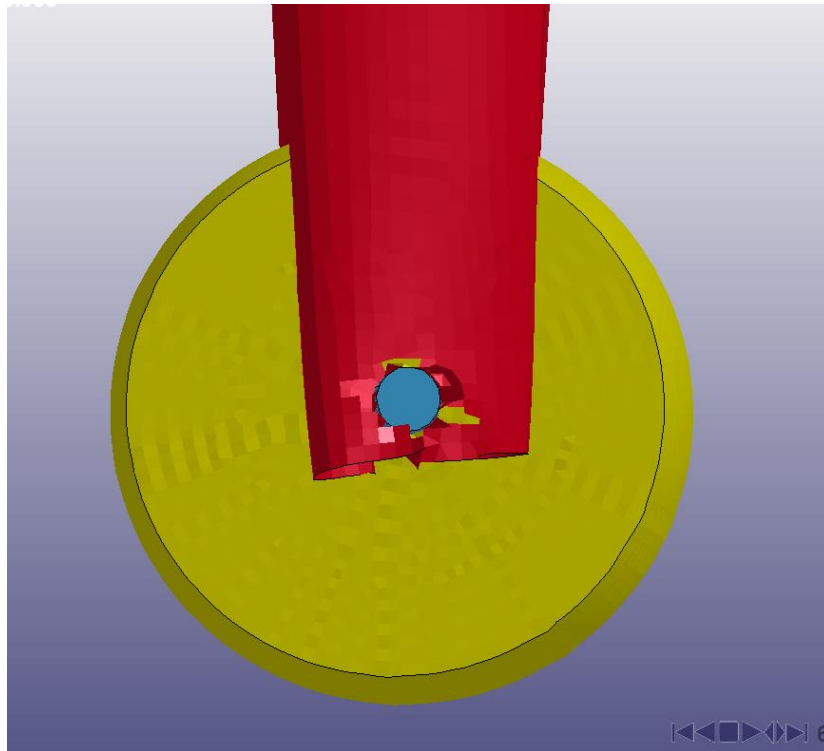
Πλέον οι διαστρωματώσεις που θα δοκιμάσουμε έχουν ως κυριο στοιχείου μονοδιευθυντικά φύλλα αφού είναι πιο λεπτά και θα είναι πολύ πιο χρήσιμα αφού οι κυριες φορτίσεις είναι αυτές στις 0 μοίρες. Θα διατηρήσουμε τα πλεκτά στο steerer καθώς wovnen θα είναι και η πρώτη στρώση σε το μήκος. Το πρόβλημα ομωε είναι ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δυο συνεχιόμενες στρώσεις με ίδιο προσανατολισμό. Για αυτό το λόγο λοιπόν θα χρησιμοποιήσουμε μονοδιευθυντικά φυλλα τα οποία θα είναι στις 20 και -20 μοίρες οι οποίες θα παραλαμβάνουν επίσης φορτίσεις και πιστεύουμε κατ αυτό τον τρόπο θα έχουμε πολύ καλύτερο μοίρασμα των φορτίσεων.



Εικόνα 97 διάταξη Is dyna

Αφού χρησιμοποιήσαμε όλα αυτά που προέκυψαν απο τις προηγούμενες προσομοιώσεις ξεκινήσαμε τις αναλύσεις με 7 στρώσεις στο steerer 3 στρώσεις στα blades Στην συνέχεια για την κορόνα ξεκινήσαμε με 14 στρώσεις και μειώσαμε εως οτου το δοκίμιο αντέχει την καταπόνηση χωρίς να υπάρχει θραύση. Καταλήξαμε σε 16 στρώσεις. Οι κατευθύνσεις των στρώσεων αυτών προέκυψε από τα συμπεράσματα που βγάλαμε πιο πανω.

Κατά τις δοκιμές διάφορων διαστρωματώσεων είχαμε και κάποιες θραύσεις και χρειάστηκε να προσθέσουμε επιπρόσθετες στρώσεις στα blades.

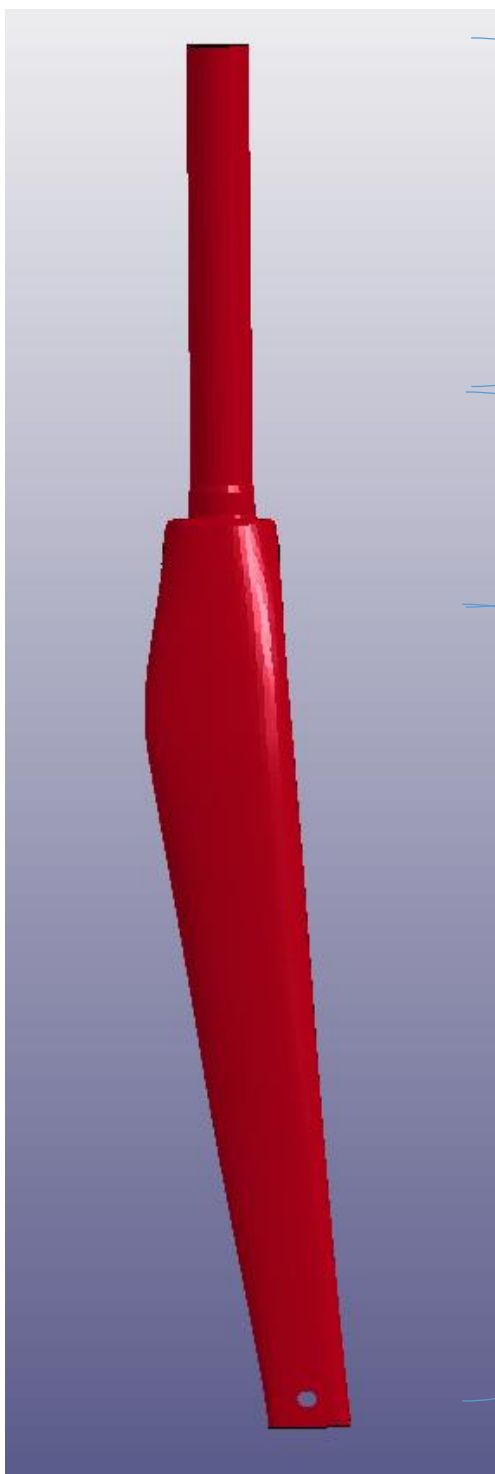


Εικόνα 98 Θραύση από την κρούση

## Τελική διαστρωμάτωση

Διαστρωμάτωση υψηλής αντοχής

Τελικά φτάσαμε στην διαστρωμάτωση η οποία αποτελείται εξ ολοκλήρου από προεμπλουτισμένα υψηλής αντοχής, τύπου T όπως φαίνεται στην εικόνα 100έ



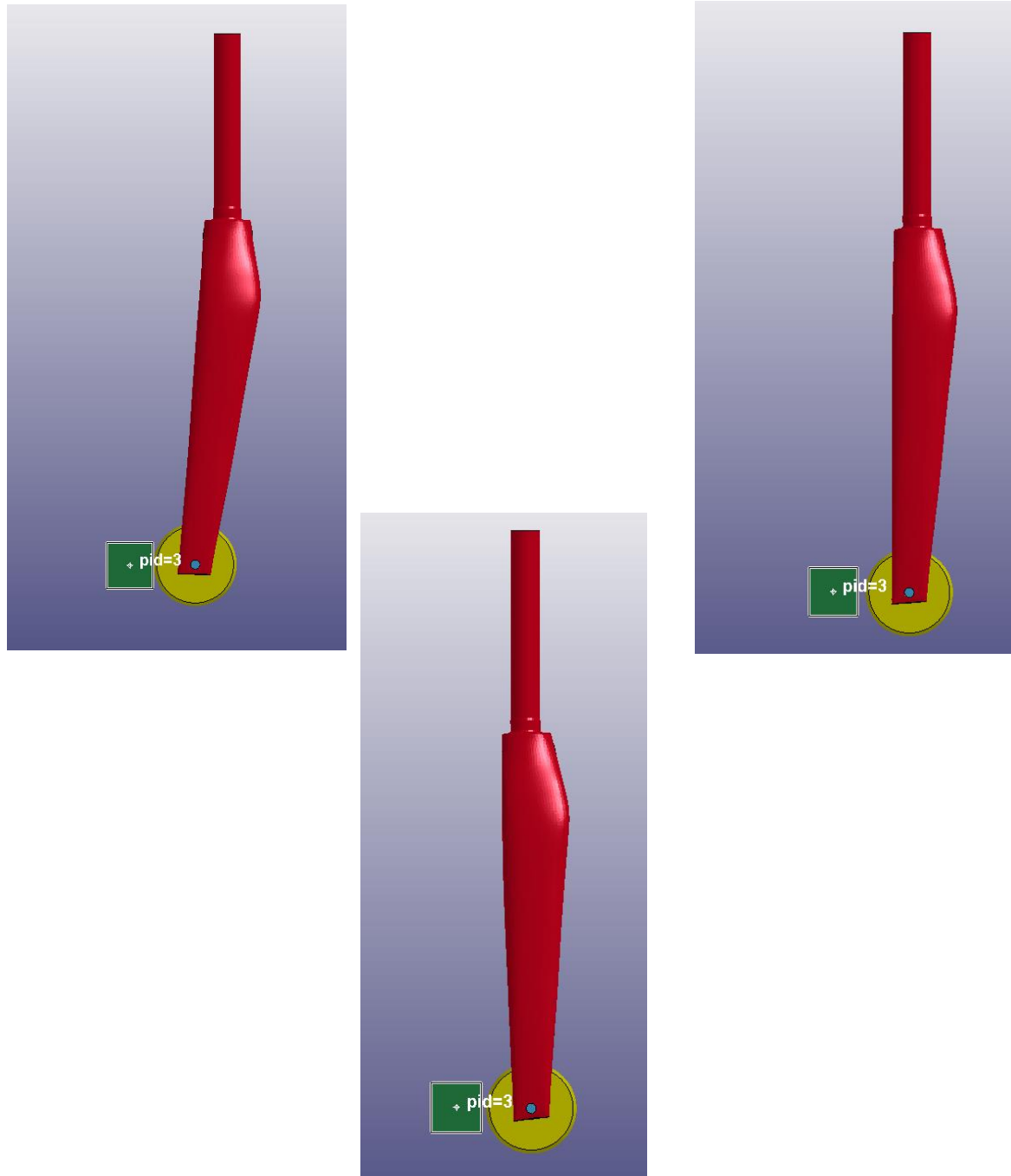
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
54	T700 UD0_pdf_1	0.16	-20
53	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
52	T700 UD0_pdf_1	0.16	20
51	T700 UD0_pdf_1	0.16	90
4	T700 UD0_pdf_1	0.16	45
3	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
2	T700 UD0_pdf_1	0.16	-45
1	T300_woven_pdf_	0.29	0

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
67	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
66	T700 UD0_pdf_1	0.16	20
65	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
64	T700 UD0_pdf_1	0.16	-20
63	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
62	T700 UD0_pdf_1	0.16	20
61	T700 UD0_pdf_1	0.16	-20
60	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
59	T700 UD0_pdf_1	0.16	-45
14	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
13	T700 UD0_pdf_1	0.16	20
12	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
11	T700 UD0_pdf_1	0.16	45
10	T700 UD0_pdf_1	0.16	-20
9	T300_woven_pdf_	0.29	0

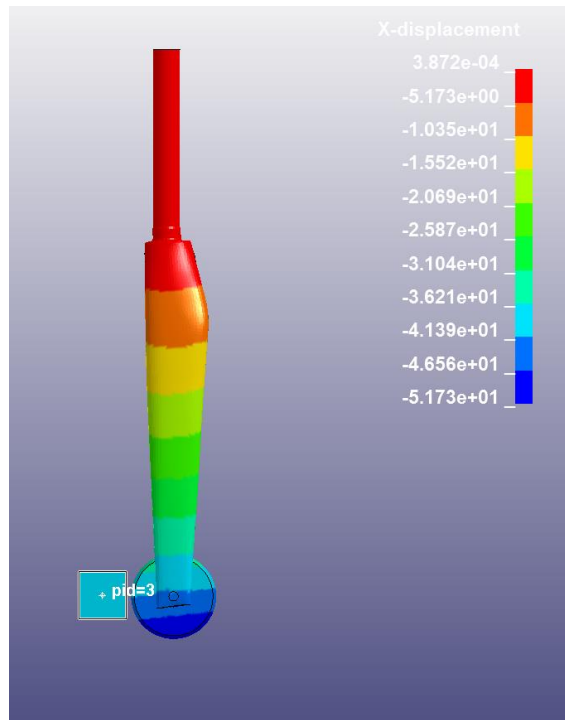
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
34	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
81	T700 UD0_pdf_1	0.16	20
33	T700 UD0_pdf_1	0.16	0
32	T700 UD0_pdf_1	0.16	-20
31	T300_woven_pdf_	0.29	0

Εικόνα 99 Τελική διαστρωμάτωση υψηλής αντοχής

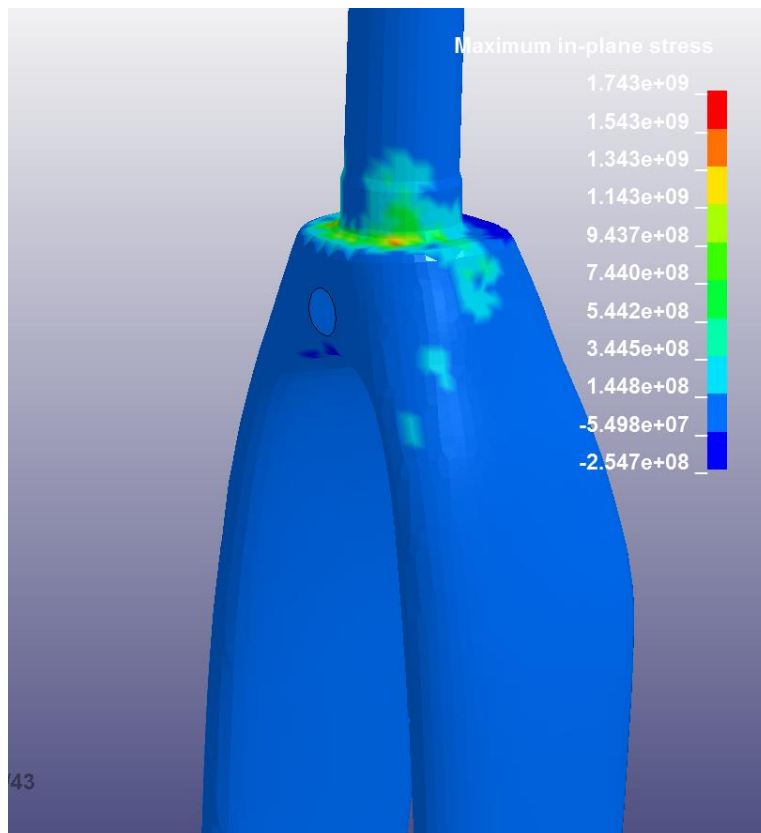
Παρακάτω δίνονται κάποιες πληροφορίες σχετικά με την προσομοίωση. Στην εικόνα 100 υπάρχουν τρία στιγμιότυπα της σύγκρουσης η οποία ακολουθεί την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας τηςπίπτουσας μάζας που φαίνεται στο σχήμα 103. Αποτέλεσμα τις συναλλαγής ενεργείας είναι Η δημιουργία τάσεων καθώς και η παραμόρφωση του τεμαχίου.



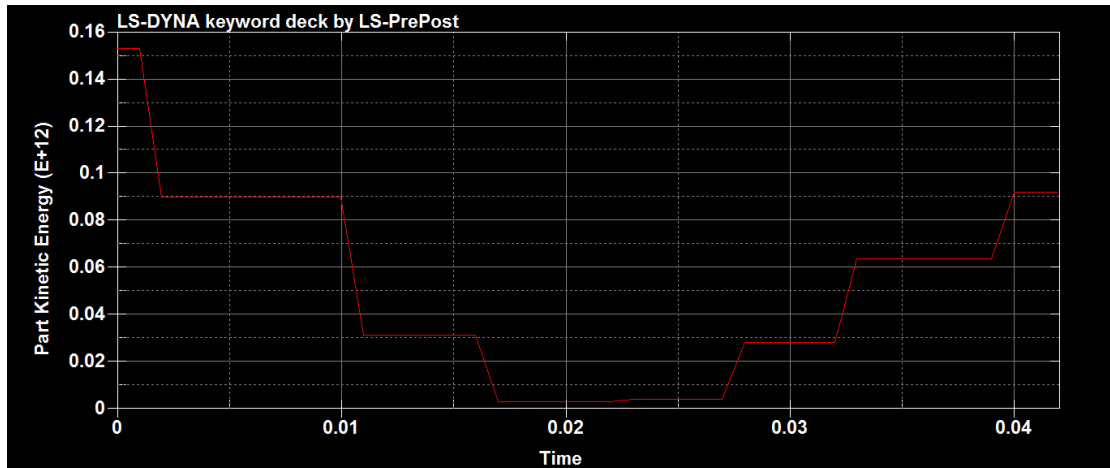
Εικόνα 100 Τρία στιγμιότυπα της ανάλυσης Πάνω αριστερά αρχική κατάσταση Πάνω δεξιά πρώτη κρούση Κάτω μέγιστη παραμόρφωση



Εικόνα 101 Μέγιστη μετατόπιση



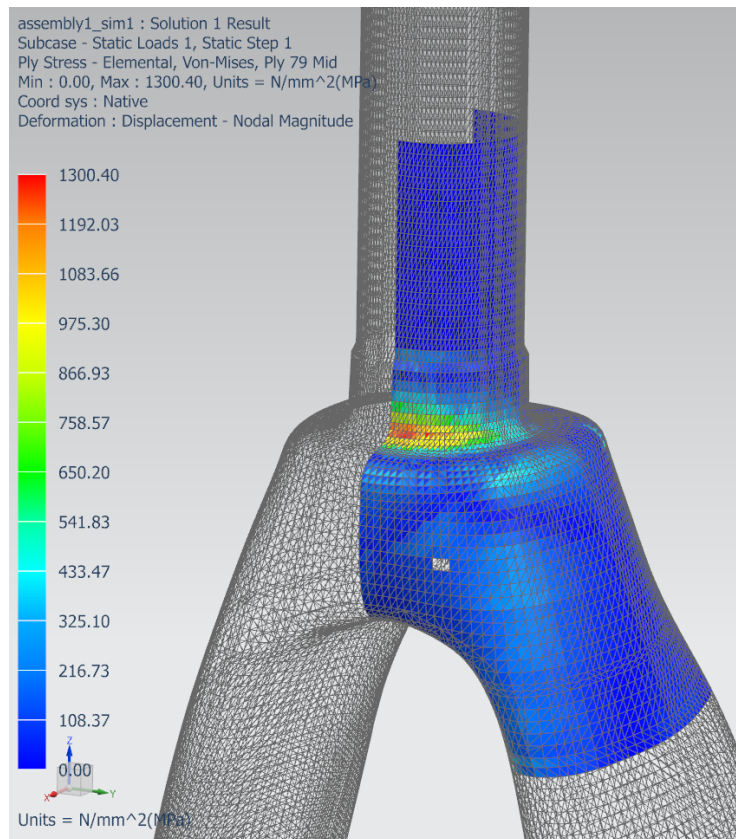
Εικόνα 102 μέγιστη τάση στην πρώτη στρώση 0 της κορόνας



Εικόνα 103 διάγραμμα κινητικής ενεργείας πύπουσας μάζας

Στην συνέχεια η τελική διαστρωμάτωση μοντελοποιήθηκε στο nx όπου πραγματοποιήθηκε global lay up με χρήση draping αλγορίθμων. Έπειτα έγινε έλεγχος για το αν η διαστρωμάτωση στην οποία καταλήξαμε περνάει και τα υπόλοιπα τεστ.

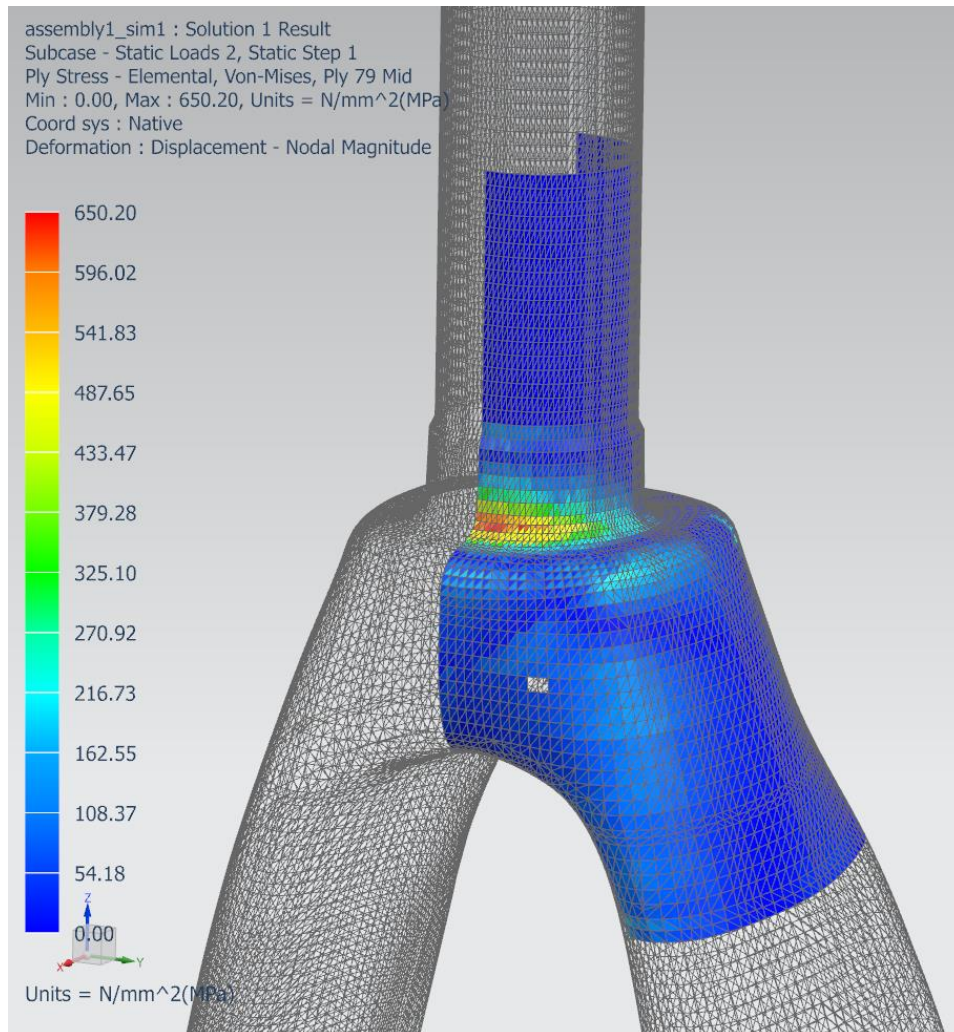
Αρχικά έγινε έλεγχος για το τεστ κάμψης με τα 1200 N. Η στρώση στην οποία αναπτύσσεται η μέγιστη τάση είναι η στρώση 79 στην exact πλευρά του καλουπιού.



Εικόνα 104 μέγιστη τάση απο τεστ κάμψης



Έπειτα γίνεται ο έλεγχος για τα 600 N όπου μέγιστη τάση είναι στην στρώση και παλι 79 με 650 MPa όπως φαίνεται στην εικόνα 105.



Εικόνα 105 μέγιστη τάση απο τεστ κάμψης

Τελικά η διαστρωμάτωση αυτή περνάει τις προδιαγραφές, ετσι λοιπόν επιλέγεται ως η διαστρωμάτωση υψηλής αντοχής. Το τελικό βάρος της διαστρωμάτωσης αυτής είναι 314,155 γραμμάρια. Βάρος το οποίο θα κάνει το μοντέλο μας ιδιαίτερα ανταγωνιστικό.

Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα από τα τεστ στων προδιαγραφών. Στις εικόνες 106 107 και 108 φενονται τα αποτελέσματα των προσομιώσεων.

	Element id	Layer	Ply id	Stresses										
				Stress11 mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Stress22 mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Stress12 mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Stress23 mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Stress31 mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Maximum Principal mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Minimum Principal mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Maximum Shear mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	Maximum Principal mm/mm	Minimum Principal mm/mm	Maximum Shear mm/mm
Max Absolute Stress 11	483848	16	78	<b>1.38E+06</b>	1.07E+05	-8.56E+04	-5.73E+03	-4.26E+02	1.39E+06	1.01E+05	6.43E+05	1.74E-02	1.45E-04	1.73E
Max Absolute Stress 22	512138	1	9	-2.43E+05	<b>-8.31E+05</b>	-5.25E+04	-8.14E+03	8.01E+03	-2.38E+05	-8.36E+05	2.99E+05	9.49E-05	-1.39E-02	1.40E
Max Absolute Stress 33	437443	1	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E
Max Absolute Stress 12	483874	17	79	1.30E+06	1.35E+05	<b>-1.06E+05</b>	-4.78E+03	-3.19E+02	1.31E+06	1.25E+05	5.91E+05	2.06E-02	-6.93E-04	2.13E
Max Absolute Stress 23	485761	8	71	3.41E+05	7.72E+03	-4.51E+03	<b>1.25E+05</b>	-2.81E+02	3.41E+05	7.66E+03	1.67E+05	2.59E-03	-6.39E-05	2.65E
Max Absolute Stress 31	485746	9	71	5.01E+05	7.81E+03	-5.83E+03	-1.88E+04	-2.81E+02	5.01E+05	7.74E+03	2.47E+05	3.78E-03	-4.16E-04	4.19E
Max Absolute Maximum Principal Stress	483848	16	78	1.38E+06	1.07E+05	-8.56E+04	-5.73E+03	-4.26E+02	<b>1.39E+06</b>	1.01E+05	6.43E+05	1.74E-02	-1.45E-04	1.73E
Max Absolute Minimum Principal Stress	513925	14	77	-1.30E+06	-5.39E+04	-4.40E+04	8.68E+03	-1.80E+04	-5.23E+04	<b>-1.30E+06</b>	1.01E+05	-3.84E-04	1.16E-02	1.12E
Max Absolute Maximum Shear Stress	483848	16	78	1.38E+06	1.07E+05	-8.56E+04	-5.73E+03	-4.26E+02	1.39E+06	1.01E+05	6.43E+05	1.74E-02	1.45E-04	1.73E
Max Absolute Strain 11	483848	16	78	1.38E+06	1.07E+05	-8.56E+04	-5.73E+03	-4.26E+02	1.39E+06	1.01E+05	6.43E+05	1.74E-02	1.45E-04	1.73E
Max Absolute Strain 22	483865	17	80	1.04E+05	2.29E+05	1.75E+04	3.26E-12	-5.44E-12	2.32E+05	1.01E+05	6.50E+04	2.28E-02	1.24E-04	2.27E
Max Absolute Strain 33	437443	1	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E
Max Absolute Strain 12	483874	17	79	1.30E+06	1.35E+05	-1.06E+05	-4.78E+03	-3.19E+02	1.31E+06	1.25E+05	5.91E+05	2.06E-02	-6.93E-04	2.13E
Max Absolute Strain 23	485761	8	71	3.41E+05	7.72E+03	-4.51E+03	<b>1.25E+05</b>	-2.81E+02	3.41E+05	7.66E+03	1.67E+05	2.59E-03	-6.39E-05	2.65E
Max Absolute Strain 31	485746	9	71	5.01E+05	7.81E+03	-5.83E+03	-1.88E+04	-2.81E+02	5.01E+05	7.74E+03	2.47E+05	3.78E-03	-4.16E-04	4.19E
Max Absolute Maximum Principal Strain	483865	17	80	1.04E+05	2.29E+05	1.75E+04	3.26E-12	-5.44E-12	2.32E+05	1.01E+05	6.50E+04	2.28E-02	1.24E-04	2.27E
Max Absolute Minimum Principal Strain	513923	17	80	-2.68E+05	-1.54E+05	-4.79E+04	-2.02E-11	-1.89E-12	-1.37E+05	-2.86E+05	7.46E+04	2.23E-02	<b>-1.64E-02</b>	1.63E
Max Absolute Maximum Shear Strain	483874	18	80	1.46E+05	2.13E+05	5.40E+04	5.95E-13	1.34E-11	2.43E+05	1.16E+05	6.35E+04	2.23E-02	-7.38E-04	<b>2.30E</b>
Max Absolute Ply Failure Index	518716	22	42	2.81E+04	2.22E+03	-2.16E+04	-1.11E-11	-2.48E-12	4.03E+04	-1.00E+04	2.51E+04	2.34E-03	-1.98E-03	4.31E
Min Absolute Ply Strength Ratio	427091	1	35	-4.01E+04	7.47E+03	1.55E+04	-4.13E+03	3.64E+02	1.21E+04	-4.47E+04	2.84E+04	1.39E-03	-1.81E-03	3.19E
Min Ply Margin of Safety	427091	1	35	-4.01E+04	7.47E+03	1.55E+04	-4.13E+03	3.64E+02	1.21E+04	-4.47E+04	2.84E+04	1.39E-03	-1.81E-03	3.19E

Εικόνα 106 1200N σε κάμψη

Element Id	Ply Id	Stresses						Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear	Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear	
		Stress11	Stress22	Stress12	Stress23	Stress31	Principal							
Max Absolute Stress 11	483848	16	78	6.90E+05	5.33E+04	-4.28E+04	-2.87E+03	-2.13E+02	6.93E+05	5.05E+04	3.21E+05	8.72E-03	7.26E-05	8.65E-03
Max Absolute Stress 22	512138	1	9	-1.21E+05	-4.16E+05	-2.63E+04	-4.07E+03	4.01E+03	-1.19E+05	-4.18E+05	1.49E+05	4.74E-05	-6.95E-03	7.00E-03
Max Absolute Stress 33	443117	1	9	1.70E+04	2.46E+04	-5.94E+03	-5.29E+02	-1.23E+03	2.79E+04	1.38E+04	7.05E+03	8.64E-04	-3.29E-04	1.19E-03
Max Absolute Stress 12	483874	17	79	6.48E+05	6.74E+04	-5.31E+04	-2.39E+03	-1.60E+02	6.53E+05	6.25E+04	2.95E+05	1.03E-02	-3.46E-04	1.06E-02
Max Absolute Stress 23	485761	8	71	1.70E+05	3.86E+03	-2.26E+03	6.24E+04	-1.40E+02	1.70E+05	3.83E+03	8.33E+04	1.29E-03	-3.20E-05	1.33E-03
Max Absolute Stress 31	485746	9	71	2.51E+05	3.90E+03	-2.91E+03	-9.38E+03	5.76E+04	2.51E+05	3.87E+03	1.23E+05	1.89E-03	-2.08E-04	2.10E-03
Max Absolute Maximum Principal Stress	483848	16	78	6.90E+05	5.33E+04	-4.28E+04	-2.87E+03	-2.13E+02	6.93E+05	5.05E+04	3.21E+05	8.72E-03	7.26E-05	8.65E-03
Max Absolute Minimum Principal Stress	513925	14	77	-6.49E+05	-2.69E+04	-2.20E+04	4.34E+03	-8.99E+03	-2.62E+04	-6.50E+05	3.12E+05	-1.92E-04	-5.81E-03	5.61E-03
Max Absolute Maximum Shear Stress	483848	16	78	6.90E+05	5.33E+04	-4.28E+04	-2.87E+03	-2.13E+02	6.93E+05	5.05E+04	3.21E+05	8.72E-03	7.26E-05	8.65E-03
Max Absolute Strain 11	483848	16	78	6.90E+05	5.33E+04	-4.28E+04	-2.87E+03	-2.13E+02	6.93E+05	5.05E+04	3.21E+05	8.72E-03	7.26E-05	8.65E-03
Max Absolute Strain 22	483865	17	80	5.19E+04	1.15E+05	8.75E+03	1.63E-12	-2.72E-12	1.16E+05	5.07E+04	3.25E+04	1.14E-02	6.22E-05	1.13E-02
Max Absolute Strain 33	443117	1	9	1.70E+04	2.46E+04	-5.94E+03	-5.29E+02	-1.23E+03	2.79E+04	1.38E+04	7.05E+03	8.64E-04	-3.29E-04	1.19E-03
Max Absolute Strain 12	483874	17	79	6.48E+05	6.74E+04	-5.31E+04	-2.39E+03	-1.60E+02	6.53E+05	6.25E+04	2.95E+05	1.03E-02	-3.46E-04	1.06E-02
Max Absolute Strain 23	485761	8	71	1.70E+05	3.86E+03	-2.26E+03	6.24E+04	-1.40E+02	1.70E+05	3.83E+03	8.33E+04	1.29E-03	-3.20E-05	1.33E-03
Max Absolute Strain 31	485746	9	71	2.51E+05	3.90E+03	-2.91E+03	-9.38E+03	5.76E+04	2.51E+05	3.87E+03	1.23E+05	1.89E-03	-2.08E-04	2.10E-03
Max Absolute Maximum Principal Stress	483865	17	80	5.19E+04	1.15E+05	8.75E+03	1.63E-12	-2.72E-12	1.16E+05	5.07E+04	3.25E+04	1.14E-02	6.22E-05	1.13E-02
Max Absolute Minimum Principal Stress	513923	17	80	-1.34E+05	-7.70E+04	-2.40E+04	-1.01E-11	-9.44E-13	-6.83E+04	-1.43E+05	3.73E+04	-4.27E-05	-8.18E-03	8.14E-03
Max Absolute Maximum Shear Stress	483874	18	80	7.28E+04	1.06E+05	2.70E+04	2.97E-13	6.72E-12	1.21E+05	5.78E+04	3.18E+04	1.11E-02	-3.69E-04	1.15E-02
Max Absolute Ply Failure Index	518716	22	42	1.40E+04	1.11E+03	-1.08E+04	-5.53E-12	-1.24E-12	2.01E+04	-5.00E+03	1.26E+04	1.17E-03	-9.88E-04	2.16E-03
Max Absolute Bond Failure Index	518716	22	42	1.40E+04	1.11E+03	-1.08E+04	-5.53E-12	-1.24E-12	2.01E+04	-5.00E+03	1.26E+04	1.17E-03	-9.88E-04	2.16E-03

Εικόνα 107 600N σε κάμψη

	Element	Ply	Stresses						Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear	Maximum Principal	Minimum Principal
			Stress11	Stress22	Stress12	Stress23	Stress31	Principal					
	Id	Layer	Id	Id	Id	Id	Id	Id	Id	Id	Id	Id	
Max Absolute Stress 11	473693	9	58	1.72E+05	-1.10E+04	-1.82E+04	-6.34E-12	1.75E-12	1.74E+05	-1.28E+04	9.34E+04	2.20E-03	-2.38E-03
Max Absolute Stress 22	439902	2	9	4.91E+04	-8.96E+04	-1.64E+04	0.00E+00	0.00E+00	5.10E+04	-9.15E+04	7.12E+04	1.71E-03	-2.23E-03
Max Absolute Stress 33	443117	1	9	-8.60E+02	4.56E+04	1.84E+03	-8.16E+02	3.69E+02	4.57E+04	-9.33E+02	2.33E+04	6.97E-04	-1.21E-04
Max Absolute Stress 12	437465	3	79	9.56E+04	-8.37E+03	2.25E+04	8.21E-13	2.03E-12	1.00E+05	-1.30E+04	5.66E+04	2.26E-03	-2.58E-03
Max Absolute Stress 23	468814	3	3	-1.01E+04	2.58E+02	-2.46E+03	-5.01E+04	-1.47E+03	8.10E+02	-1.07E+04	5.75E+03	2.40E-04	-2.67E-04
Max Absolute Stress 31	442889	1	9	7.62E+03	-3.53E+04	-8.90E+03	5.21E+03	1.48E+04	9.39E+03	-3.70E+04	2.32E+04	7.74E-04	-1.13E-03
Max Absolute Maximum Principal Stress	473693	9	58	1.72E+05	-1.10E+04	-1.82E+04	-6.34E-12	1.75E-12	1.74E+05	-1.28E+04	9.34E+04	2.20E-03	-2.38E-03
Max Absolute Minimum Principal Stress	448194	4	80	-1.62E+05	8.47E+03	3.76E+03	-2.00E-12	3.99E-12	8.55E+03	-1.62E+05	8.51E+04	1.26E-03	-1.27E-03
Max Absolute Maximum Shear Stress	473694	9	58	1.72E+05	-1.14E+04	-1.88E+04	-5.43E-11	-2.50E-12	1.74E+05	-1.33E+04	9.34E+04	2.24E-03	-2.46E-03
Max Absolute Strain 11	473693	9	58	1.72E+05	-1.10E+04	-1.82E+04	-6.34E-12	1.75E-12	1.74E+05	-1.28E+04	9.34E+04	2.20E-03	-2.38E-03
Max Absolute Strain 22	479007	2	10	1.43E+05	-1.66E+04	7.09E+03	0.00E+00	5.00E-13	1.44E+05	-1.69E+04	8.03E+04	1.25E-03	-2.14E-03
Max Absolute Strain 33	443117	1	9	-8.60E+02	4.56E+04	1.84E+03	-8.16E+02	3.69E+02	4.57E+04	-9.33E+02	2.33E+04	6.97E-04	-1.21E-04
Max Absolute Strain 12	437465	3	79	9.56E+04	-8.37E+03	2.25E+04	8.21E-13	2.03E-12	1.00E+05	-1.30E+04	5.66E+04	2.26E-03	-2.58E-03
Max Absolute Strain 23	468814	3	3	-1.01E+04	2.58E+02	-2.46E+03	-5.01E+04	-1.47E+03	8.10E+02	-1.07E+04	5.75E+03	2.40E-04	-2.67E-04
Max Absolute Strain 31	442889	1	9	7.62E+03	-3.53E+04	-8.90E+03	5.21E+03	1.48E+04	9.39E+03	-3.70E+04	2.32E+04	7.74E-04	-1.13E-03
Max Absolute Maximum Principal Strain	474241	6	14	3.35E+04	1.01E+04	-1.76E+04	3.74E-12	-1.72E-12	4.29E+04	6.43E+02	2.11E+04	2.38E-03	-1.22E-03
Max Absolute Minimum Principal Strain	437465	3	79	9.56E+04	-8.37E+03	2.25E+04	8.21E-13	2.03E-12	1.00E+05	-1.30E+04	5.66E+04	2.26E-03	-2.58E-03
Max Absolute Maximum Shear Strain	437465	3	79	9.56E+04	-8.37E+03	2.25E+04	8.21E-13	2.03E-12	1.00E+05	-1.30E+04	5.66E+04	2.26E-03	-2.58E-03
Max Absolute Ply Failure Index	518716	22	42	-1.05E+04	1.87E+03	1.46E+03	-1.17E-12	6.65E-13	2.04E+03	-1.06E+04	6.33E+03	2.70E-04	-1.42E-04
Max Absolute Bond Failure Index	518716	22	42	-1.05E+04	1.87E+03	1.46E+03	-1.17E-12	6.65E-13	2.04E+03	-1.06E+04	6.33E+03	2.70E-04	-1.42E-04

Εικόνα 108 80 Nm τεστ πορτής

### Στιβαρή διαστρωμάτωση

Συνεχίζοντας λοιπόν έπρεπε να βρούμε και μια διαστρωμάτωση πιο στιβαρή με χρήση προεμποτισμενων υψηλού μέτρου ελαστικότητάς

Και εδώ η διερεύνηση έγινε στο Isdyna και η διαστρωμάτωση που άντεξε ήταν αυτή που περιγράφεται στην εικόνα 109.

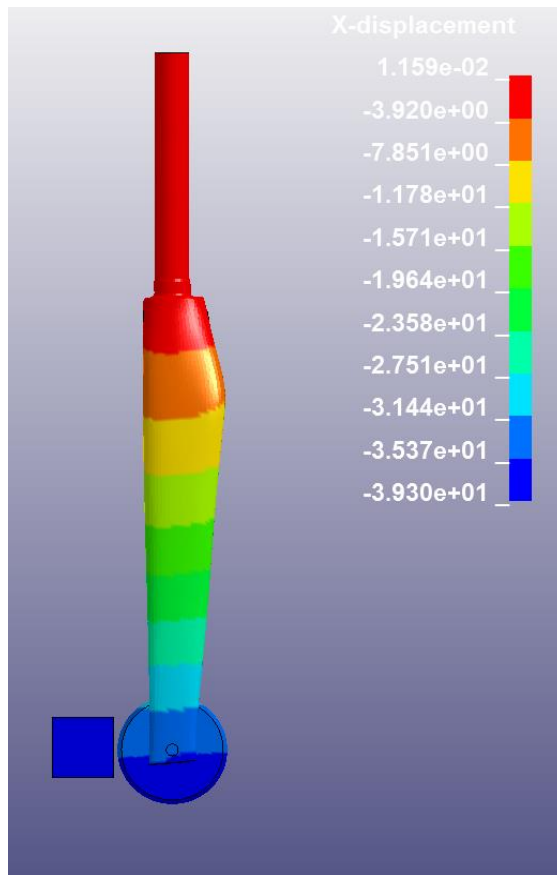


Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
54	m46jud_tms	0.16	-20
53	m46jud_tms	0.16	0
52	m46jud_tms	0.16	20
51	m46jud_tms	0.16	90
4	m46jud_tms	0.16	45
3	m46jud_tms	0.16	0
2	m46jud_tms	0.16	-45
1	m46jwoov_tms_1	0.29	0

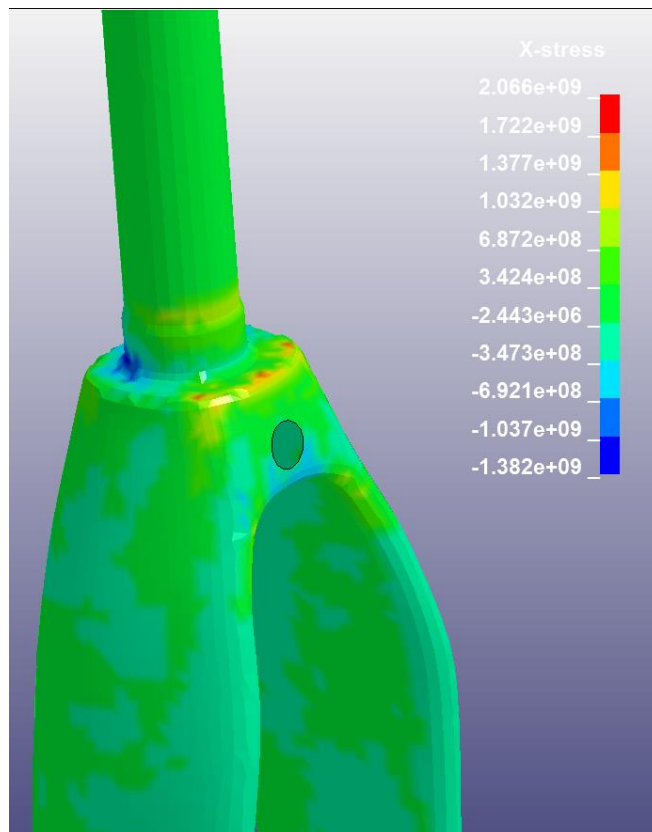
Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
69	m46jud_tms	0.16	20
68	m46jud_tms	0.16	-20
67	m46jud_tms	0.16	0
66	m46jud_tms	0.16	20
65	m46jud_tms	0.16	0
64	m46jud_tms	0.16	-20
63	m46jud_tms	0.16	0
62	m46jud_tms	0.16	20
61	m46jud_tms	0.16	-20
60	m46jud_tms	0.16	0
59	m46jud_tms	0.16	-45
14	m46jud_tms	0.16	0
13	m46jud_tms	0.16	20
12	m46jud_tms	0.16	0
11	m46jud_tms	0.16	45
10	m46jud_tms	0.16	-20
9	m46jwoov_tms_1	0.29	0

Ply Id	Material Name	Thickness (mm)	Angle (deg)
34	m46jud_tms	0.16	0
81	m46jud_tms	0.16	20
33	m46jud_tms	0.16	0
32	m46jud_tms	0.16	-20
31	m46jwoov_tms_1	0.29	0

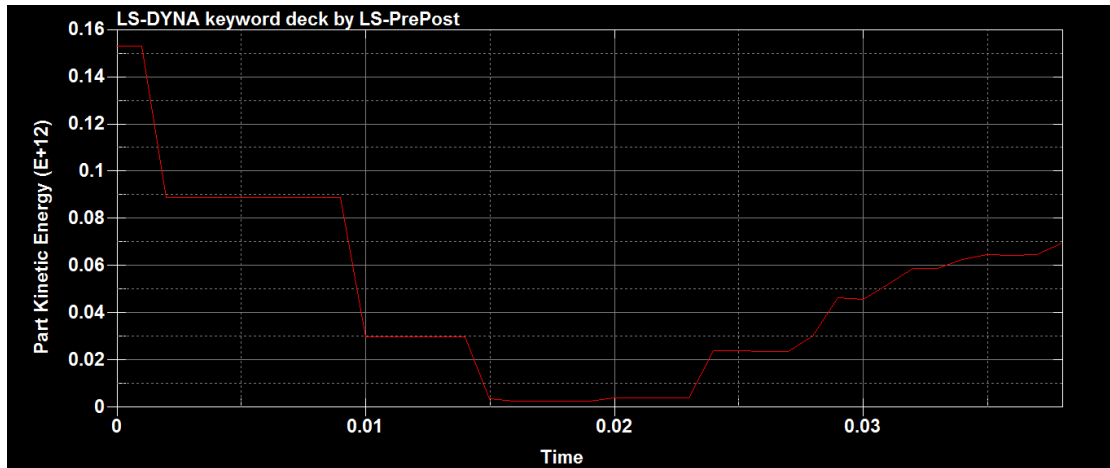
Εικόνα 109 Στιβαρή διαστρωμάτωση



Εικόνα 111 μέγιστη παραμόρφωση σιβαρού



Εικόνα 110 μέγιστη τάση στην πρώτη στρώση 0 της κορόνας

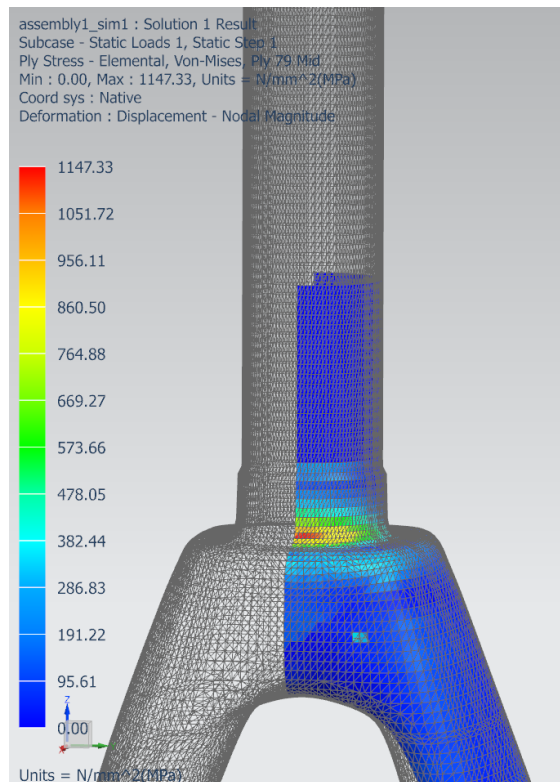


Εικόνα 112 διάγραμμα κινητικής ενέργειας

Παραπάνω δίνονται γραφήματα σχετικά με το τεστ της κρούσης. Στην εικόνα 106 βλέπουμε την μέγιστη παραμόρφωση η οποία είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη υψηλής αντοχής. Αντίθετα είναι τα αποτελέσματα των τάσεων όπου στα υφάσματα με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας είχαμε μεγαλύτερες τάσεις. Η μέγιστη αυτών φαίνεται στην εικόνα 105. οι διαφορές στην συναλλαγή κινητικής ενέργειας φαίνονται στην εικόνα 107.

Στην συνέχεια και εδώ έγινε περαιτέρω διερεύνηση της διαστρωμάτωσης ως προς την συμπεριφορά της στα υπόλοιπα τεστ. Η ανάλυση και εδώ έγινε σ9το πχ.

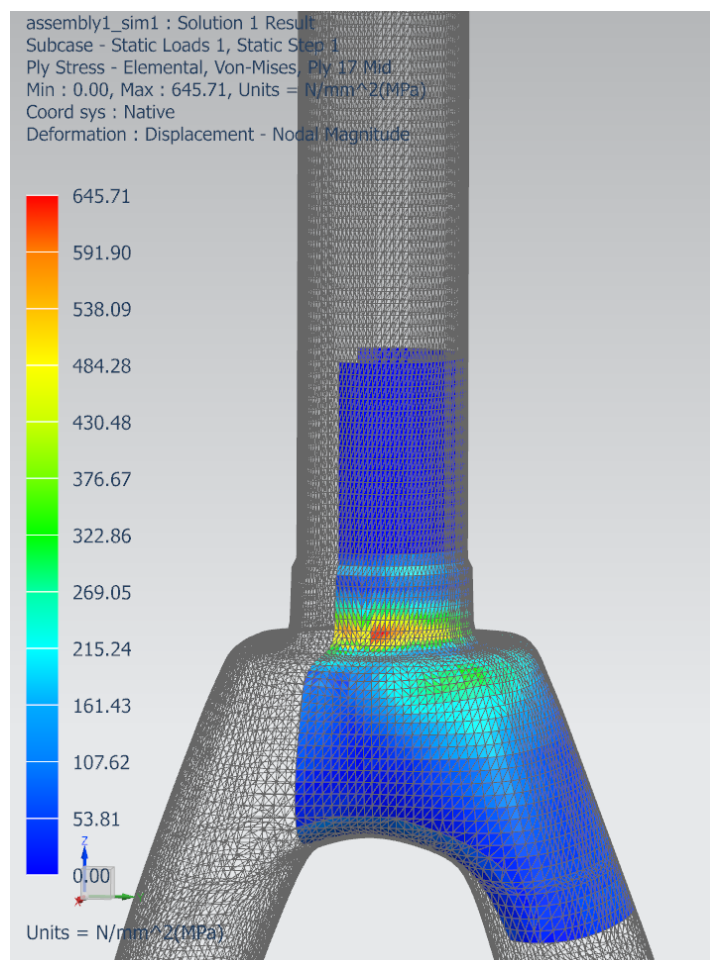
Ξεκινήσαμε από το τεστ των 1200 N σε κάμψη.



Εικόνα 113 Αποτελέσματα απο τεστ κάμψης



Και στα 600N κάμψης



Εικόνα 114 Αποτελέσματα τεστ κάμψης

Αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι διαφορές που βλέπουμε μεταξύ των δυο διαστρωμάτων είναι οι διαφορές που παρουσιάζουν στο τεστ της κρούσης. Βλέπουμε ότι αναπτύσσεται μεγαλύτερη τάση ωστόσο με μικρότερη παραμόρφωση. Το γεγονός ότι το ίδιο δεν αποτυπώνεται στην στατική κάμψη μπορεί να οφείλεται στις επικαλύψεις (overlaps) των υλικών.

Τελικά η διαστρωμάτωση αυτή περνάει τις προδιαγραφές, έτσι λοιπόν επιλέγεται ως η στιβαρή διαστρωμάτωση. Το τελικό βάρος της διαστρωμάτωσης αυτής είναι 346,77 γραμμάρια. Βάρος το οποίο θα κάνει το μοντέλο μας ιδιαίτερα ανταγωνιστικό. Στις εικόνες 114,115 και 116 αναγράφονται σε πίνακες τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης



Element	Layer	Ply	Stress11	Stress22	Stress12	Stress23	Stress31	Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear	Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear	
Id		Id	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mN/mm <sup>2</sup> (kPa)	mm/mm	mm/mm	mm/mm	
Max Absolute Stress 11	483766	16	78	9.99E+05	5.53E+03	-2.50E+05	-8.85E-12	6.50E-13	1.06E+06	-5.38E+04	5.56E+05	5.58E-03	2.03E-03	3.55E-03
Max Absolute Stress 22	474338	1	9	-9.06E+04	-4.91E+05	-8.42E+04	-4.58E+03	3.76E+04	-7.36E+04	-5.08E+05	2.17E+05	4.22E-05	-2.42E-03	2.46E-03
Max Absolute Stress 33	437439	1	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Max Absolute Stress 12	483847	1	9	-1.79E+05	-2.65E+04	-4.96E+05	-3.73E+03	-5.93E+03	3.99E+05	-6.05E+05	5.02E+05	2.42E-03	-3.26E-03	5.69E-03
Max Absolute Stress 23	485793	8	71	2.34E+05	6.96E+02	-1.21E+04	-1.18E+05	-2.01E+03	2.35E+05	7.30E+01	1.17E+05	1.15E-03	3.37E-04	8.12E-04
Max Absolute Stress 31	485746	8	70	5.78E+04	2.15E+03	-4.58E+04	-2.44E+04	1.09E+05	8.36E+04	-2.36E+04	5.36E+04	1.15E-03	2.04E-04	9.46E-04
Max Absolute Maximum Principal Stress	483884	17	79	9.46E+05	7.01E+03	-3.77E+05	-2.32E+03	-2.99E+02	1.08E+06	-1.26E+05	6.03E+05	6.26E-03	1.83E-03	4.43E-03
Max Absolute Minimum Principal Stress	513925	14	77	-7.48E+05	-2.88E+03	-2.66E+05	4.83E+03	-1.51E+04	8.25E+04	-8.33E+05	4.58E+05	-6.59E-04	-4.41E-03	3.75E-03
Max Absolute Maximum Shear Stress	483884	17	79	9.46E+05	7.01E+03	-3.77E+05	-2.32E+03	-2.99E+02	1.08E+06	-1.26E+05	6.03E+05	6.26E-03	1.83E-03	4.43E-03
Max Absolute Strain 11	483766	16	78	9.99E+05	5.53E+03	-2.50E+05	-8.85E-12	6.50E-13	1.06E+06	-5.38E+04	5.56E+05	5.58E-03	2.03E-03	3.55E-03
Max Absolute Strain 22	483865	17	80	4.19E+05	1.37E+04	-7.07E+04	3.71E-12	-1.71E-11	4.31E+05	1.72E+03	2.15E+05	6.86E-03	2.01E-03	4.85E-03
Max Absolute Strain 33	437439	1	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Max Absolute Strain 12	483847	1	9	-1.79E+05	-2.65E+04	-4.96E+05	-3.73E+03	-5.93E+03	3.99E+05	-6.05E+05	5.02E+05	2.42E-03	-3.26E-03	5.69E-03
Max Absolute Strain 23	485793	8	71	2.34E+05	6.96E+02	-1.21E+04	-1.18E+05	-2.01E+03	2.35E+05	7.30E+01	1.17E+05	1.15E-03	3.37E-04	8.12E-04
Max Absolute Strain 31	485746	8	70	5.78E+04	2.15E+03	-4.58E+04	-2.44E+04	1.09E+05	8.36E+04	-2.36E+04	5.36E+04	1.15E-03	2.04E-04	9.46E-04
Max Absolute Maximum Principal Strain	483874	18	80	4.25E+05	1.37E+04	9.70E+04	-3.21E-13	5.54E-12	4.47E+05	-8.07E+03	2.28E+05	6.88E-03	2.01E-03	4.87E-03
Max Absolute Minimum Principal Strain	513923	17	80	-1.21E+05	-1.25E+04	-2.34E+05	-4.30E-12	2.41E-11	1.74E+05	-3.07E+05	2.41E+05	-2.91E-04	-6.54E-03	6.25E-03
Max Absolute Maximum Shear Strain	513923	17	80	-1.21E+05	-1.25E+04	-2.34E+05	-4.30E-12	2.41E-11	1.74E+05	-3.07E+05	2.41E+05	-2.91E-04	-6.54E-03	6.25E-03
Max Absolute Ply Failure Index	518716	22	42	3.76E+04	-5.33E+01	-6.11E+04	7.05E-13	0.00E+00	8.27E+04	-4.52E+04	6.39E+04	4.40E-04	-2.84E-04	7.24E-04
Max Absolute Bond Failure Index	518716	22	42	3.76E+04	-5.33E+01	-6.11E+04	7.05E-13	0.00E+00	8.27E+04	-4.52E+04	6.39E+04	4.40E-04	-2.84E-04	7.24E-04

Εικόνα 115 1200 N σε κάμψη

	Element Id	Layer	Ply Id	Stresses									Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear	Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear
				Stress11	Stress22	Stress12	Stress23	Stress31	Principal	Principal	Shear	Principal						
Max Absolute Stress 11	483766	16	78	<b>4.39E+05</b>	2.77E+03	-1.25E+05	-4.43E-12	3.25E-13	5.29E+05	-2.69E+04	2.78E+05	2.79E-03	1.02E-03	1.77E-03				
Max Absolute Stress 22	474338	1	9	-4.53E+04	<b>-2.45E+05</b>	-4.21E+04	-2.29E+03	1.88E+04	-3.68E+04	-2.54E+05	1.09E+05	2.11E-05	-1.21E-03	1.23E-03				
Max Absolute Stress 33	437439	1	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00				
Max Absolute Stress 12	483847	1	9	-8.95E+04	-1.33E+04	<b>-2.48E+05</b>	-1.86E+03	-2.97E+03	2.00E+05	-3.02E+05	2.51E+05	1.21E-03	-1.65E-03	2.84E-03				
Max Absolute Stress 23	485793	8	71	1.17E+05	3.48E+02	-6.04E+03	<b>-5.89E+04</b>	-1.01E+03	1.17E+05	3.65E+01	5.87E+04	5.74E-04	1.68E-04	4.06E-04				
Max Absolute Stress 31	485746	8	70	2.89E+04	1.07E+03	-2.29E+04	-1.22E+04	<b>5.47E+04</b>	4.18E+04	-1.18E+04	2.68E+04	5.75E-04	1.02E-04	4.73E-04				
Max Absolute Maximum Principal Stress	483884	17	79	4.73E+05	3.50E+03	-1.89E+05	-1.16E+03	-1.50E+02	<b>5.40E+05</b>	-6.29E+04	3.01E+05	3.13E-03	9.17E-04	2.21E-03				
Max Absolute Minimum Principal Stress	513925	14	77	-3.74E+05	-1.44E+03	-1.33E+05	2.42E+03	-7.55E+03	4.13E+04	<b>4.17E+05</b>	2.29E+05	-3.30E-04	-2.21E-03	1.88E-03				
Max Absolute Maximum Shear Stress	483884	17	79	4.73E+05	3.50E+03	-1.89E+05	-1.16E+03	-1.50E+02	5.40E+05	-6.29E+04	<b>3.01E+05</b>	3.13E-03	9.17E-04	2.21E-03				
Max Absolute Strain 11	483766	16	78	4.99E+05	2.77E+03	-1.25E+05	-4.43E-12	3.25E-13	5.29E+05	-2.69E+04	2.78E+05	2.79E-03	1.02E-03	1.77E-03				
Max Absolute Strain 22	483865	17	80	2.10E+05	6.84E+03	-3.53E+04	1.86E-12	-8.53E-12	2.16E+05	8.62E+02	1.07E+05	3.43E-03	1.01E-03	2.43E-03				
Max Absolute Strain 33	437439	1	9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00				
Max Absolute Strain 12	483847	1	9	-8.95E+04	-1.33E+04	-2.48E+05	-1.86E+03	-2.97E+03	2.00E+05	-3.02E+05	2.51E+05	1.21E-03	-1.65E-03	2.84E-03				
Max Absolute Strain 23	485793	8	71	1.17E+05	3.48E+02	-6.04E+03	-5.89E+04	-1.01E+03	1.17E+05	3.65E+01	5.87E+04	5.74E-04	1.68E-04	4.06E-04				
Max Absolute Strain 31	485746	8	70	2.89E+04	1.07E+03	-2.29E+04	-1.22E+04	<b>5.47E+04</b>	4.18E+04	-1.18E+04	2.68E+04	5.75E-04	1.02E-04	4.73E-04				
Max Absolute Maximum Principal Stress	483874	18	80	2.13E+05	6.83E+03	-2.29E+04	-1.61E-13	2.77E-12	2.24E+05	-4.04E+03	2.68E+04	<b>3.44E-03</b>	1.01E-03	2.44E-03				
Max Absolute Minimum Principal Stress	513923	17	80	-6.03E+04	-6.24E+03	-1.17E+05	-2.15E-12	1.20E-11	8.70E+04	-1.54E+05	1.20E+05	-1.45E-04	<b>-3.27E-03</b>	3.12E-03				
Max Absolute Maximum Shear Stress	513923	17	80	-6.03E+04	-6.24E+03	-1.17E+05	-2.15E-12	1.20E-11	8.70E+04	-1.54E+05	1.20E+05	-1.45E-04	<b>-3.27E-03</b>	3.12E-03				
Max Absolute Ply Failure Index	518716	22	42	1.88E+04	-2.66E+01	-3.06E+04	3.53E-13	0.00E+00	4.14E+04	-2.26E+04	3.20E+04	2.20E-04	-1.42E-04	3.62E-04				
Max Absolute Bond Failure Index	518716	22	42	1.88E+04	-2.66E+01	-3.06E+04	3.53E-13	0.00E+00	4.14E+04	-2.26E+04	3.20E+04	2.20E-04	-1.42E-04	3.62E-04				

Εικόνα 116 600N σε κάμψη

Element	Id	Layer	Ply	Stress11	Stress22	Stress12	Stresses			Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear	Maximum Principal	Minimum Principal	Maximum Shear
							Stress23	Stress31	Principal						
Max Absolute Stress 11	456451		8	1.06E+05	-1.04E+03	-1.13E+05	4.52E-11	-4.46E-12	1.77E+05	-7.22E+04	1.25E+05	8.20E-04	-8.27E-04	1.65E-03	
Max Absolute Stress 22	448190		2	2.79E+04	-6.82E+04	-1.25E+04	-1.34E+03	-8.94E+02	2.95E+04	-6.98E+04	4.96E+04	1.99E-04	-3.64E-04	5.63E-04	
Max Absolute Stress 33	437439		1	2.31E+04	-6.04E+03	-1.61E+04	4.83E+02	-4.40E+02	3.03E+04	-1.32E+04	2.17E+04	1.58E-04	-8.93E-05	2.46E-04	
Max Absolute Stress 12	468813		8	1.02E+05	-6.19E+02	-1.17E+05	4.76E-11	-5.74E-12	1.79E+05	-7.73E+04	1.28E+05	8.71E-04	-6.85E-04	1.56E-03	
Max Absolute Stress 23	468820		2	8.00E+03	-1.53E+02	-2.62E+03	-7.40E+04	9.16E+02	2.58E+04	-9.24E+02	4.85E+03	4.09E-05	-7.84E-05	1.19E-04	
Max Absolute Stress 31	435233		1	1.44E+04	-5.79E+03	-2.13E+04	1.62E+03	-5.74E-12	2.58E+04	-2.02E+04	2.30E+04	1.42E-04	-1.19E-04	2.61E-04	
Max Absolute Maximum Principal Stress	468813		8	1.02E+05	-6.19E+02	-1.17E+05	4.76E-11	-5.74E-12	1.79E+05	-7.73E+04	1.28E+05	8.71E-04	-6.85E-04	1.56E-03	
Max Absolute Minimum Principal Stress	473706		8	-4.37E+03	1.62E+01	-1.12E+05	-1.63E+04	-1.02E+03	1.10E+05	-1.14E+05	1.12E+05	6.30E-04	-6.43E-04	1.27E-03	
Max Absolute Maximum Shear Stress	468813		8	1.02E+05	-6.19E+02	-1.17E+05	4.76E-11	-5.74E-12	1.79E+05	-7.73E+04	1.28E+05	8.71E-04	-6.85E-04	1.56E-03	
Max Absolute Strain 11	456451		8	1.06E+05	-1.04E+03	-1.13E+05	4.52E-11	-4.46E-12	1.77E+05	-7.22E+04	1.25E+05	8.20E-04	-8.27E-04	1.65E-03	
Max Absolute Strain 22	480433		8	1.04E+05	-1.42E+03	-1.00E+05	-3.06E-11	-5.09E-13	1.65E+05	-6.20E+04	1.13E+05	7.31E-04	-9.37E-04	1.67E-03	
Max Absolute Strain 33	437439		1	2.31E+04	-6.04E+03	-1.61E+04	4.83E+02	-4.40E+02	3.03E+04	-1.32E+04	2.17E+04	1.58E-04	-8.93E-05	2.46E-04	
Max Absolute Strain 12	468813		8	1.02E+05	-6.19E+02	-1.17E+05	4.76E-11	-5.74E-12	1.79E+05	-7.73E+04	1.28E+05	8.71E-04	-6.85E-04	1.56E-03	
Max Absolute Strain 23	468820		2	8.00E+03	-1.53E+02	-2.62E+03	-7.40E+04	9.16E+02	2.58E+04	-9.24E+02	4.85E+03	4.09E-05	-7.84E-05	1.19E-04	
Max Absolute Strain 31	435233		1	1.44E+04	-5.79E+03	-2.13E+04	1.62E+03	-5.74E-12	2.58E+04	-2.02E+04	2.30E+04	1.42E-04	-1.19E-04	2.61E-04	
Max Absolute Maximum Principal Stress	468813		8	1.02E+05	-6.19E+02	-1.17E+05	4.76E-11	-5.74E-12	1.79E+05	-7.73E+04	1.28E+05	8.71E-04	-6.85E-04	1.56E-03	
Max Absolute Minimum Principal Stress	470515		9	9.66E+04	-1.39E+03	-1.04E+05	1.41E-11	-2.13E-12	1.65E+05	-6.67E+04	1.13E+05	7.25E-04	-9.41E-04	1.67E-03	
Max Absolute Maximum Shear Stress	480433		8	1.04E+05	-1.42E+03	-1.00E+05	-3.06E-11	-5.09E-13	1.65E+05	-6.20E+04	1.13E+05	7.31E-04	-9.37E-04	1.67E-03	
Max Absolute Ply Failure Index	518716		22	-1.13E+04	1.75E+02	2.88E+03	1.44E-13	0.00E+00	8.60E+02	-1.19E+04	6.40E+03	8.95E-05	-5.68E-05	1.46E-04	
Max Absolute Bond Failure Index	518716		22	-1.13E+04	1.75E+02	2.88E+03	1.44E-13	0.00E+00	8.60E+02	-1.19E+04	6.40E+03	8.95E-05	-5.68E-05	1.46E-04	

Εικόνα 117 80Nm ροπή

## Κόπωση ανθρακονημάτων

Στο σημείο αυτό έπρεπε να γίνει κάποια προσέγγιση στο θέμα της αντοχής στην κόπωση των ανθρακονημάτων. Βάση του βιβλίου “Fatigue of fiber reinforced composites” Προκύπτουν κάποια κάποια εμπειρικά μοντέλα για τον υπολογισμό των S-N καμπυλών. Η προσέγγιση βασίζεται στην θεωρία

Κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής, η ακαμψία του δομικού στοιχείου μειώνεται. Η μοντελοποίηση της ζωής με κόπωση στα δείγματα κομμένα σε διάφορες γωνίες off-axis γωνίες από ένα πολλαπλών κατευθύνσεων ύφασμα [0 / (± 45) 2/0] T που υποβλήθηκε σε μονοαξονική κυκλική φόρτιση σε ένα ευρύ φάσμα από αναλογίες του R διεξήχθη και βασίζεται σε μετρήσεις που έγιναν. Ένα απλό εμπειρικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των καμπυλών σχεδιασμού, οι οποίες δεν αντιστοιχούν στην αντοχή κόπωση αλλά σε μία προκαθορισμένη τιμή της μείωσης της ακαμψίας χρησιμοποιώντας μόνο ένα τμήμα των δεδομένων με κόπωση που απαιτούνται για τον καθορισμό ενός αξιόπιστου μοντέλου καμπύλων S-N. Οι καθιερωμένες καμπύλες Sc-N παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την επιτρεπόμενη αποδόμηση της ακαμψίας που επίσης η πιθανότητα επιβίωση. Δείχθηκε ότι Sc-N καμπύλες είναι συγκρίσιμα με αντίστοιχο σχεδιασμό επιτρεπόμενες και προήλθε μετά από στατιστική ανάλυση των δεδομένων αντοχή σε κόπωση, παρόλα αυτά καμπύλες που ελέγχουν την δυσκαμψία είναι, στις περισσότερες από τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, όχι ιδιαίτερα αποδεχτές, ειδικά για μεγαλύτερο αριθμό κύκλων. Στην εικόνα 118 φαίνεται ο πίνακας προσέγγισης των S-N καμπυλών.

Table 4.3 Stiffness-controlled and S-N curves for 95% survival probability\*

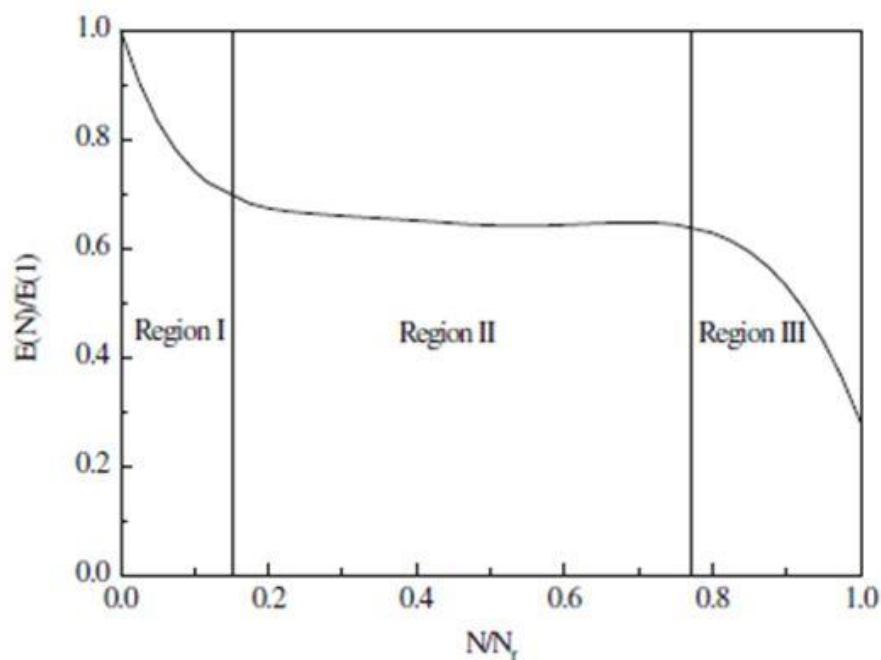
Direction	R-ratio							
	10		-1		0.1		0.5	
	Sc-N	S-N	Sc-N	S-N	Sc-N	S-N	Sc-N	S-N
0°	305.1 $N^{-0.0591}$ (0.97)	244.51 $N^{-0.0387}$	164.6 $N^{-0.0585}$ (0.98)	142.2 $N^{-0.0463}$	585.4 $N^{-0.1116}$ (0.85)	528.5 $N^{-0.1008}$	366.4 $N^{-0.0502}$ (0.95)	326.4 $N^{-0.0420}$
15°					168.2 $N^{-0.0733}$ (0.96)	164.9 $N^{-0.0694}$		
30°	327.7 $N^{-0.1139}$ (0.99)	321.9 $N^{-0.1115}$	113.2 $N^{-0.0807}$ (0.96)	113.8 $N^{-0.0788}$				
45°	216.9 $N^{-0.0758}$ (0.98)	238.8 $N^{-0.0843}$	133.4 $N^{-0.0850}$ (0.95)	112.9 $N^{-0.0721}$	161.6 $N^{-0.0950}$ (0.98)	153.4 $N^{-0.0921}$	166.9 $N^{-0.0719}$ (0.93)	156.96 $N^{-0.0671}$
60°	154.2 $N^{-0.0953}$ (0.98)	143.5 $N^{-0.0833}$	121.7 $N^{-0.0986}$ (0.89)	121.8 $N^{-0.0993}$				
75°					94.47 $N^{0.0995}$ (0.83)	75.03 $N^{-0.0769}$		
90°	67.20 $N^{-0.0441}$ (0.99)	70.39 $N^{-0.0485}$		77.46 $N^{-0.0712}$	70.62 $N^{-0.0963}$ (0.84)	55.41 $N^{-0.0690}$		

\* Numbers in parentheses indicate the respective  $E(N)/E(1)$  values

Εικόνα 118 Εμπειρικό μοντέλο προσέγγισης

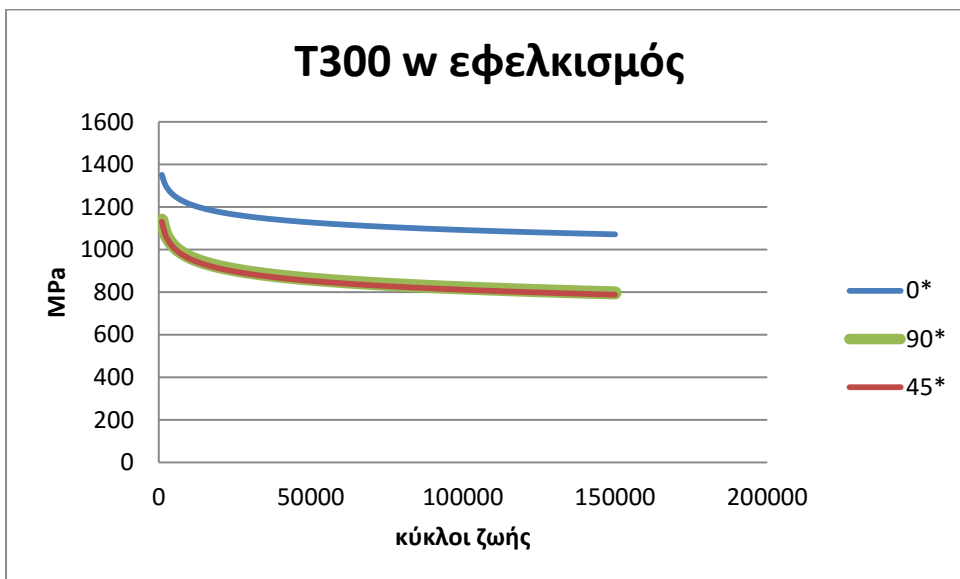
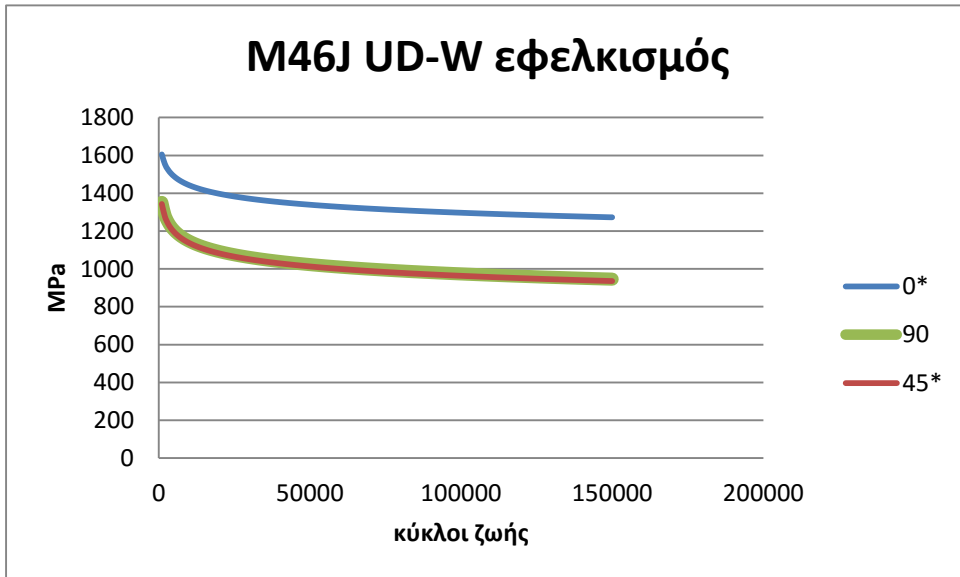
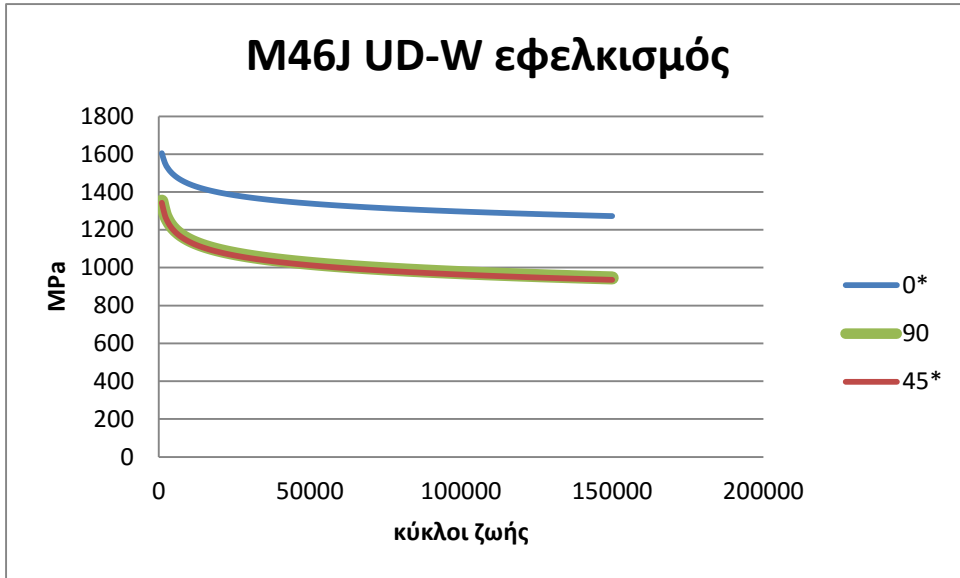
Επίσης στο βιβλίο αυτό δίνεται και ένα εμπειρικό μοντέλο μείωσης του μέτρου ελαστικότητας. Οι τρεις περιοχές που ορίζονται σε αυτό το σχήμα διακρίθηκαν πρώτα από τον καμπύλη για την ένταση-ένταση ( tension-tension ) κόπωση των cross-ply carbon/epoxy laminates . Στην αρχική περιοχή, και μέχρι περίπου 10% της ζωής κόπωσης, το υλικό εμφανίζει μια απότομη μείωση της ακαμψίας (σε σύγκριση με την περιοχή II). Στην ενδιάμεση περιοχή, η ακαμψία υλικού αποδομείται σε ένα σταθερό και μέτριο ρυθμό. Τέλος, σημαντική επιδείνωση του υλικού μπορεί να παρατηρηθεί κοντά στο τέλος της διάρκειας ζωής κόπωσης. Η τρίτη περιοχή με μια απότομη κλίση προσομοιώνει το φαινόμενο αυτό. Ο κύριος στόχος της ερευνητικής κοινότητας είναι

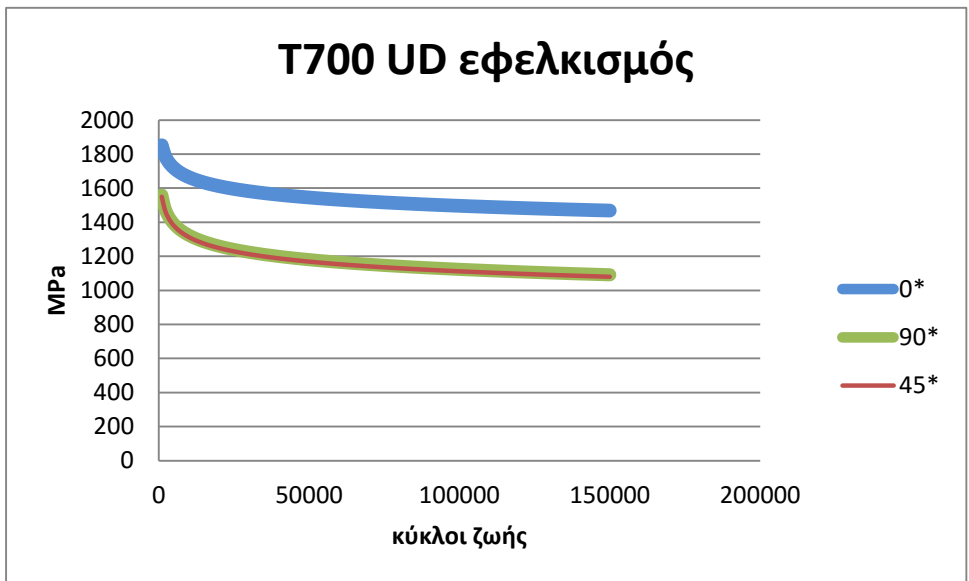
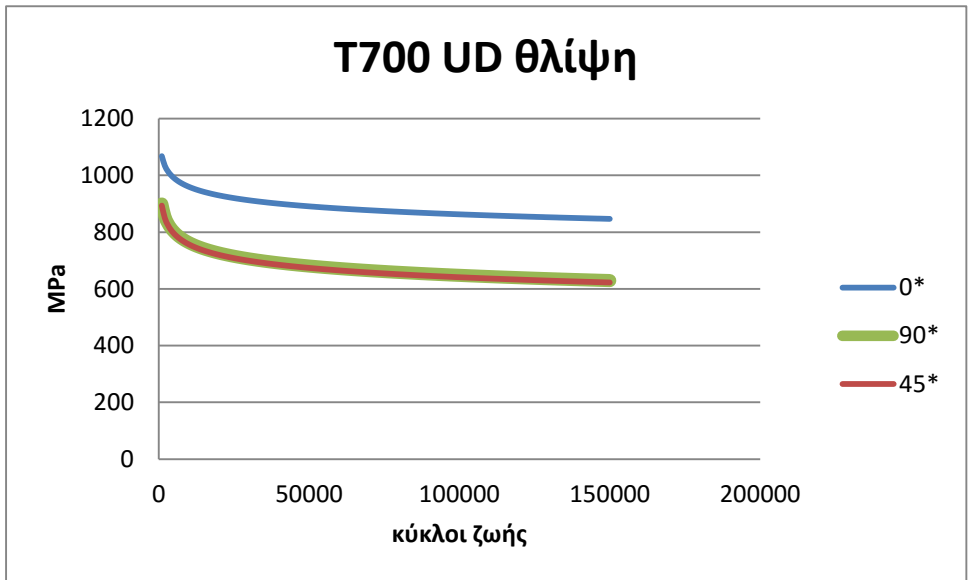
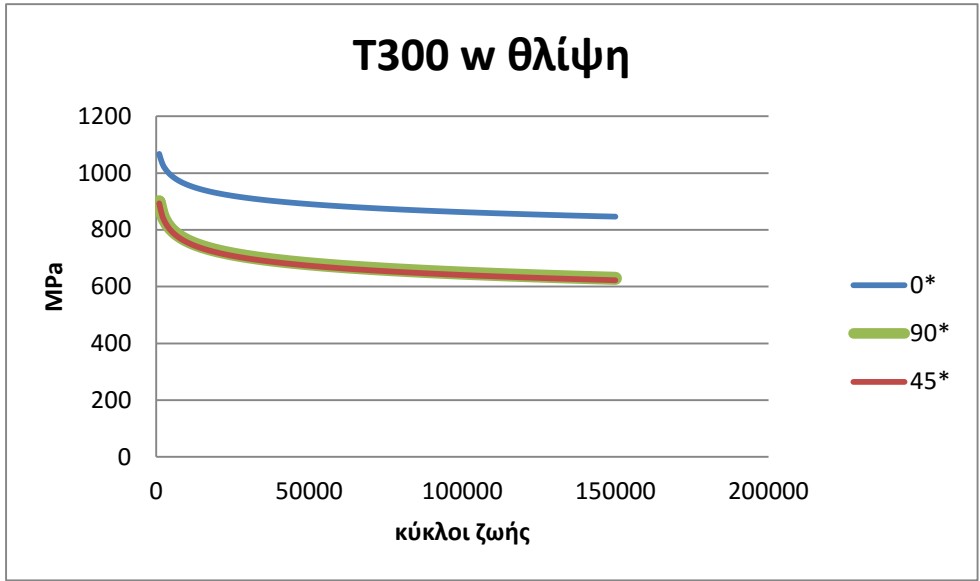
να διαμορφώσει αυτή τη συμπεριφορά για κάθε επιλεγμένο σύνθετο υλικό για διάφορες δομικές εφαρμογές. Προς το σκοπό αυτό, ένας δυναμικός νόμος συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε στο , για να περιγράψει την υποβάθμιση της ακαμψίας σε ένα ύφασμα σύνθετο φύλλο ινών υάλου και εισήγαγε την έννοια του συντελεστή της κόπωσης. Ορίστηκε ως η αναλογία της μέγιστης τάσης προς την μέγιστη τάση στο ένα συγκεκριμένο κύκλο. Στην εικόνα 119 απεικονίζεται η μείωση του μέτρου ελαστικότητας ανάλογα με τις επαναλήψεις.



Εικόνα 119 Stiffness degradation

Σύμφωνα με τα προηγούμενα λοιπόν προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα S-N Για τα υλικά που χρησιμοποιούμε. Μετά από ανάλυση που έγινε στο λογισμικό πακέτο του nx προέκυψε ότι το μοντέλο αντέχει.

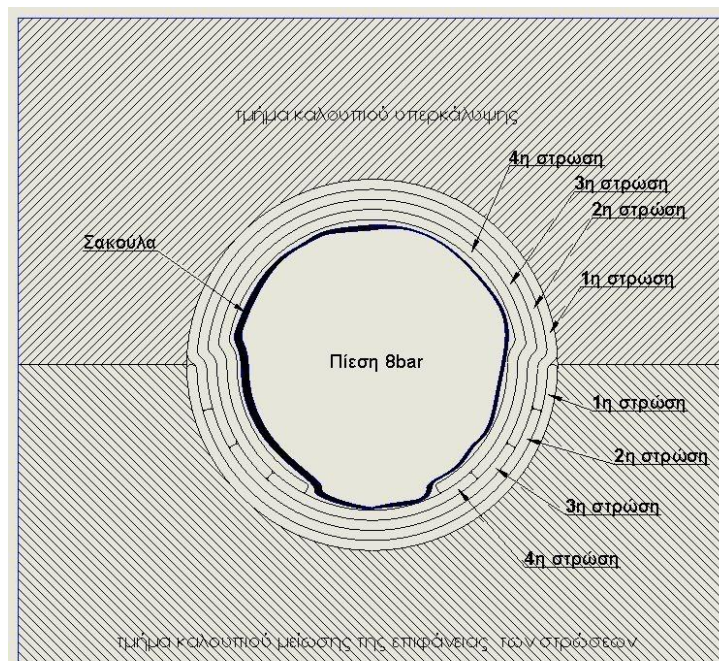




## Μέθοδος τοποθέτησης των υφασμάτων

Καθοριστικο ρολο στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την global based μέθοδο τοποθέτησης των ινών στο σχέδιο είναι η μεθοδολογία που θα ακολουθήσουμε στην τοποθέτηση των στρώσεων στο καλούπι.

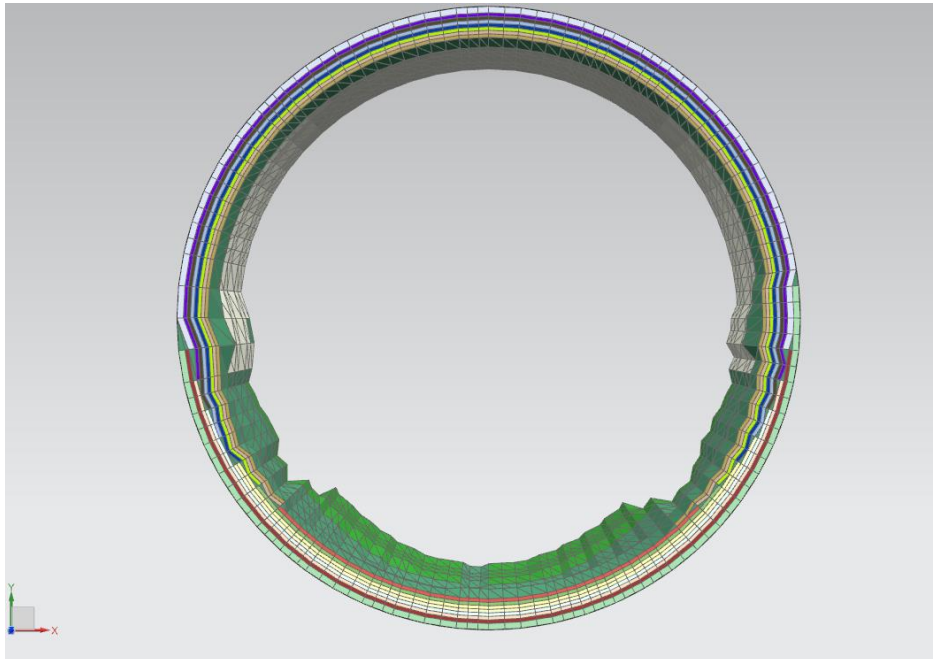
Το προ εμποτισμένο ανθρακόνημα τοποθετείται ανά στρώση στα τμήματα του καλουπιού. Τα τμήματα του ανθρακονήματος όμως πρέπει να ενωθούν μεταξύ τους για να συνθέσουν το τελικό τεμάχιο. Για να γίνει αυτό απαιτείται υπερκάλυψη (overlap) των στρώσεων του ενός τμήματος του καλουπιού με το απέναντί του. Ένας εμπειρικός κανόνας για το μήκος υπερκάλυψης της κάθε στρώσης είναι δέκα με είκοσι φορές το πάχος της στρώσης. Το πάχος της στρώσης είναι 2 - 2.5 δέκατα του χιλιοστού άρα η υπερκάλυψη ανά στρώση πρέπει να είναι 2.5mm τουλάχιστον. Επειδή στο σημείο των ενώσεων θα υπάρχει παραπάνω υλικό από το υπολογισμένο θα πρέπει να μην γίνονται στο ίδιο σημείο για να μην δημιουργηθεί εσωτερικά του πιρουνιού έντονο ανάγλυφο που θα οδηγήσει σε συσσώρευση τάσεων. Για αυτόν τον λόγο η μία πλευρά του καλουπιού πρέπει να έχει υλικό που θα εξέχει και το μήκος που θα εξέχει θα πρέπει να αυξάνεται ανά στρώση, και η άλλη θα έχει υλικό που θα ξεκινάει ακριβώς από τον αρμό του καλουπιού και θα μειώνεται ανά στρώση. Για να μπορεί να κλείσει το καλούπι χωρίς φόβο να πιαστεί ανθρακόνημα ή σακούλα στους αρμούς του, θα πρέπει να περαστεί η σακούλα μέσα στην διαστρωμάτωση υπερκάλυψης, η οποία θα έχει κλίση προς το εσωτερικό της κοιλότητας, να κλείσει το καλούπι και μετά ανοίγοντας την πίεση η σακούλα θα πιέσει τα κομμάτια ανθρακονήματος που κάνουν την υπερκάλυψη πάνω σε αυτά που μειώνουν το εμβαδόν τους. Αυτό είναι η ιδανική διαστρωμάτωση και φαίνεται εικόνα 118.



Εικόνα 120 Ιδανική διαστρωμάτωση

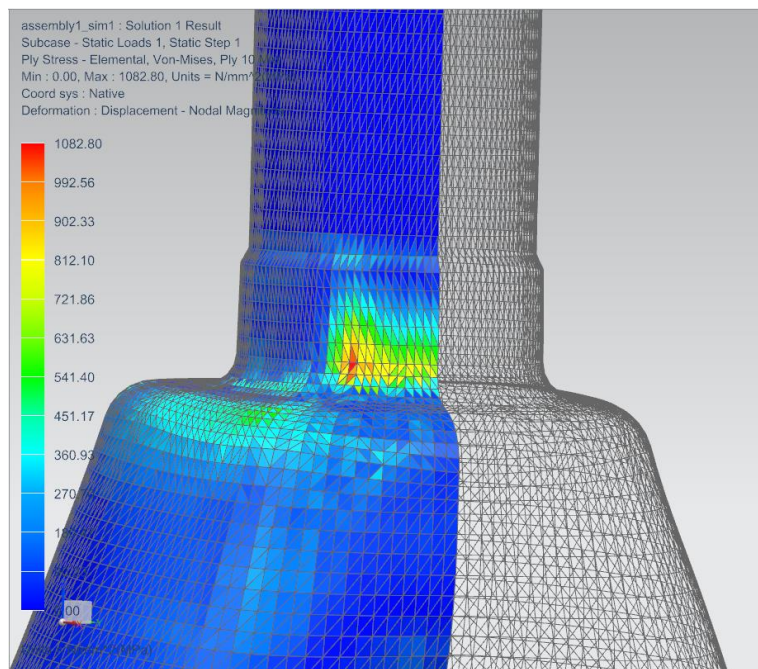


Προσπαθήσαμε να ακολουθήσουμε την λογική τοποθέτησης των υφασμάτων στο καλούπι και με αυτό σαν οδηγό καταλήξαμε στην διαστρωμάτωση της εικόνας 119 όπου φαίνεται η διαστρωμάτωση στο σωλήνα πρόσδεσης.



Εικόνα 121 διαστρωμάτωση σωλήνα πρόσδεσης

Παρ όλα αυτά και πάλι παρατηρήθηκε αύξηση των τάσεων στις περιοχές υπερκάλυψης (overlaps). Στην εικόνα 120 φαίνεται ένα παράδειγμα αύξησης των τάσεων σε σημείο που υπάρχει υπερκάλυψη (overlap)

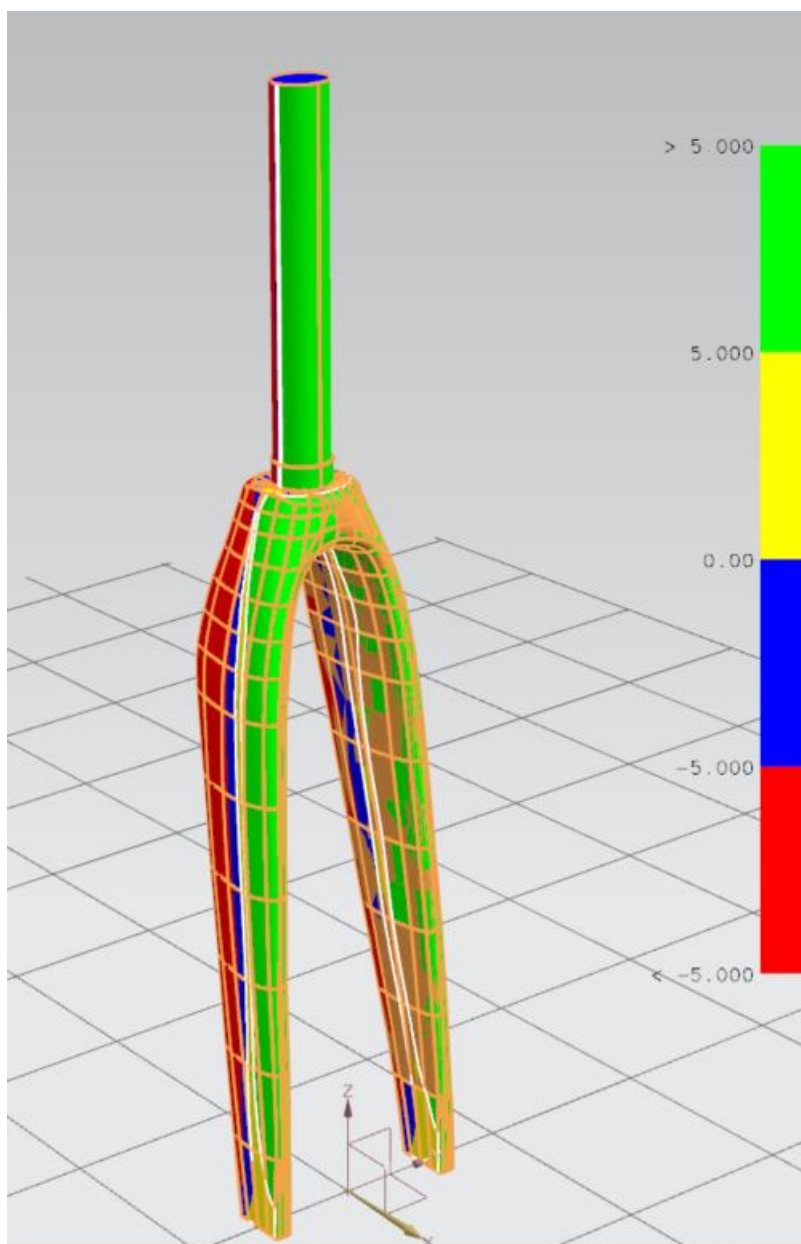


Εικόνα 122 επίπτωση υπερκάλυψης

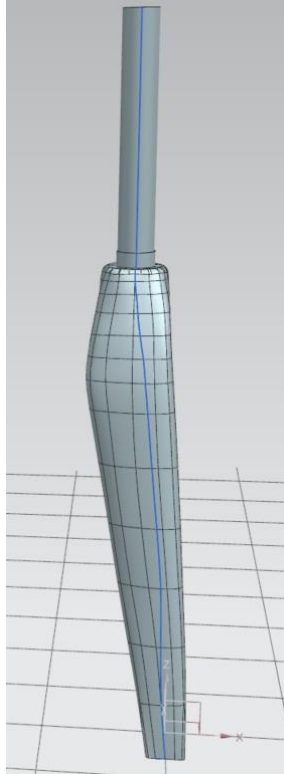
## Σχεδιασμός καλουπιού

Αρχικά η πρώτη απόφαση που έπρεπε να πάρουμε ήταν το σε ποσά επιμέρους κομμάτια θα χωρίζαμε το καλούπι. Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσίαζε το σχέδιο εξαιτίας των περιέργων parting lines δεν είχαμε πολλές επιλογές. Υπήρχαν δυο επιλογές, να γίνει σε δυο κομμάτια ή τρία..

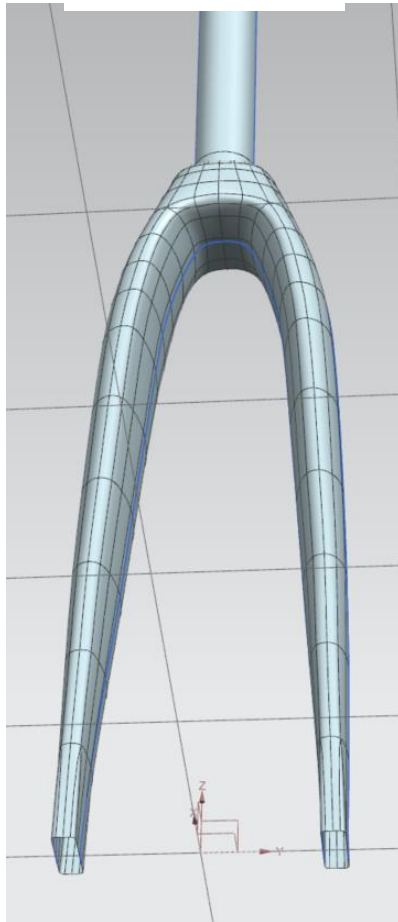
Αρχικά πρωτίστως έπρεπε να βρούμε τις γραμμές πάνω στο τεμάχιο οι εκατέρωθεν των οποίων αλλάζει η καμπυλότητα των επιφανειών. Όπως φαίνεται στην εικόνα 98 βρίσκουμε τις γραμμές αυτές μέσω του λογισμικού πακέτου. Φαίνονται πιο καθαρά στις εικόνες 99 και 100.



Εικόνα 123 Γραφική απεικόνιση αλλαγής καμπυλότητας κατα τον άξονα χ



Εικόνα 125 πλάγια όψη

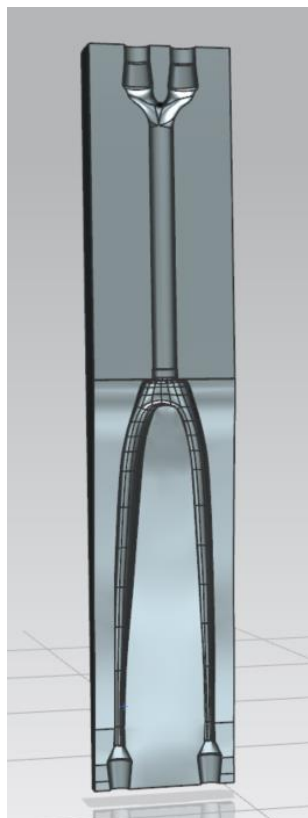


Εικόνα 124 όψη από διαγώνια κάτω

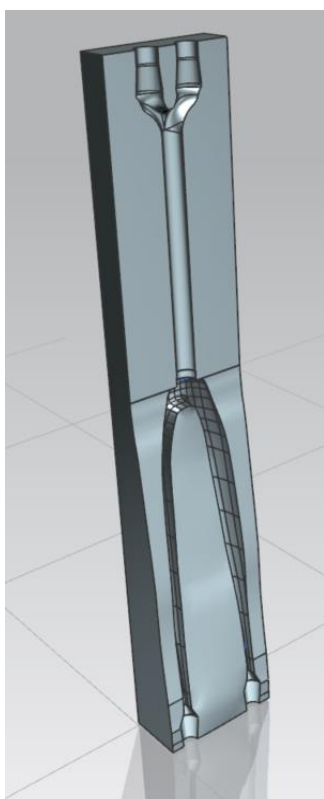
Έτσι λοιπόν βάση αυτών των γραμμών προκύπτουν οι γραμμές σύμφωνα με τις οποίες θα σχεδιαστεί το καλούπι. Οι γραμμές αυτές χρησιμεύουν στο γεγονός ότι αν οι γραμμές αυτές γίνουν οι γραμμές οι οποίες θα διαχωρίζουν το ένα με το άλλο κομμάτι τότε διασφαλίζουμε ότι δεν θα έχουμε υπο κοπες καθώς και ότι θα είναι δυνατό το ξεκαλούπωμα.

Η πρώτη προσέγγιση ήταν να σχεδιάσουμε το καλούπι σε 3 κομμάτια. Αν και ήταν πιο δύσκολο σχεδιάστικα θα ήταν πιο οικονομικό λόγω του ότι οι κατεργασίες που θα έπρεπε να γίνουν ήταν πιο 'ευκολες'. Επίσης το layout θα γινόταν πιο εύκολα. Ωστόσο αφότου έγινε ο σχεδιασμός διαπιστώσαμε ότι το μεσαίο κομμάτι δεν ήταν δυνατό κατασκευαστεί αφού δεν υπήρχε τρόπος να πραγματοποιηθούν όλες οι κατεργασίες με μια σειρά κατεργασιών και το τεμάχιο έπρεπε να δεθεί εκ νέου. Γεγονός που καθιστούσε την κατασκευή πολύ δύσκολη και έτσι το ενδεχόμενο των τριών κομματιών απορρίφθηκε.

Έτσι λοιπόν περάσαμε στην επόμενη εναλλακτική, να σχεδιάσουμε το καλούπι σε δυο κομμάτια. Ο σχεδιασμός ήταν εθίσου δύσκολος παρόλα αυτά ολοκληρώσαμε το σχέδιο το οποίο ήταν και κατασκευάσιμο. Αυτό επιβεβαιώθηκε από το γεγονός ότι τα εργαλεία χωρούσαν στις σκαμμένες επιφάνειες και ότι τα ραδια ήταν στα επιτρεπτά όρια προκυμμένου να παραμείνει σχετικά οικονομικό.



Εικόνα 126 1ο κομμάτι



Εικόνα 127 2ο κομμάτι

Επειτα Από τα βασικότερα κριτήρια του σχεδιασμού ήταν ο τρόπος που θα κλείνει το καλούπι με ακρίβεια και ο τρόπος που θα ανοίγει με ευκολία. Για να κλείνει με ακρίβεια το καλούπι πρέπει να υπάρχουν οδηγοί πείροι και για να ανοίγει με ευκολία πρέπει να υπάρχουν εξολκείς.

Επίσης πρέπει να σχεδιαστούν τα πώματα που θα σφραγίζουν την σακούλα πίεσης με το καλούπι και να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό το κύκλωμα πίεσης, ειδικά σε ό,τι αφορά τους συνδέσμους του σωλήνα πίεσης με το πώμα-είσοδο του αέρα.

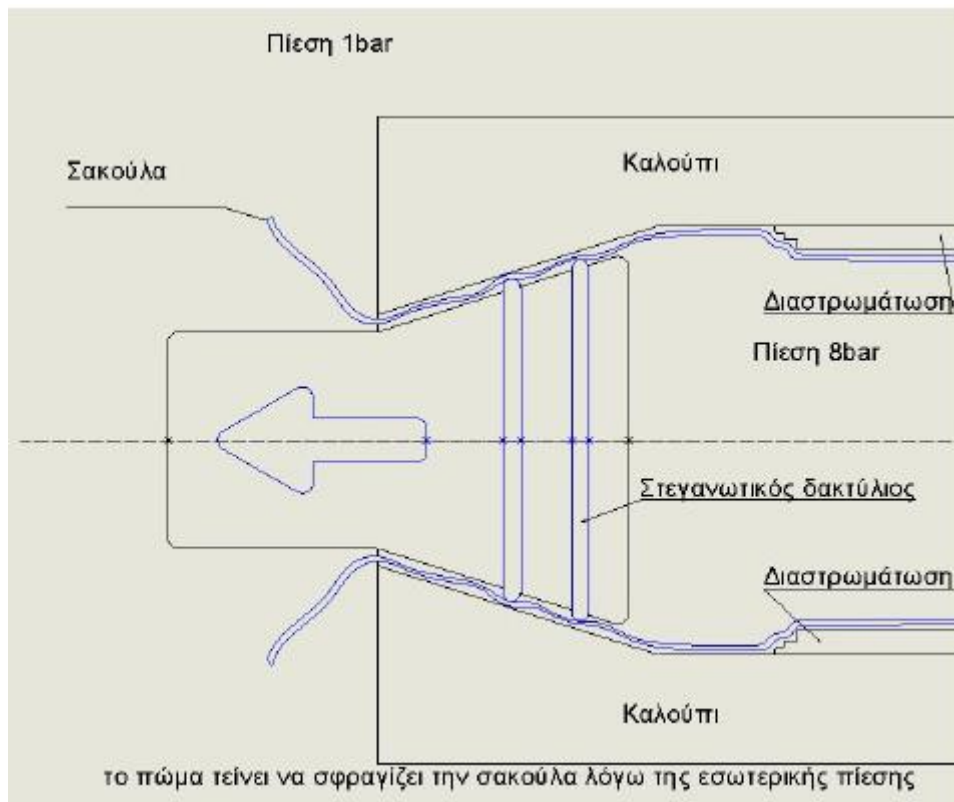
Λόγω της ανάγλυφης επιφάνειας που προέκυψε από τις parting lines υπάρχει μοναδικός τρόπος με τον οποίο κλείνει το καλούπι. Αυτό ωστόσο δεν είναι αρκετό διότι παραμένει ένας βαθμός ελευθέριας στον άξονα  $y$ . Για τον λόγο αυτό προστέθηκαν δυο κεντραριστικοί πείροι. Επιπροσθέτως χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες προκυμμένου να μείνει το καλούπι επαρκώς κλειστό. Ο αριθμός των κοχλιών είχε άμεση σχέση με την σχισμή που δημιουργούταν λόγω της πίεσης.

Έγινε προσπάθεια να υπάρχει όσο το δυνατόν λιγότερο αλουμίνιο γύρω από τις επιφάνειες διαστρωμάτωσης διατηρώντας ωστόσο το ορθογωνικό σχήμα. Εξω από τις επιφάνειες διαστρωμάτωσης Βρίσκεται το αυλάκι για την συγκέντρωση της ρητίνης αλλά και οι οπές για τις κοχλίες.

Το αυλάκι προστίθεται προκυμμένου να συλλεχθεί η ρητίνη που ρευστοποιείται λόγω θερμοκρασίας. Η οποία θα διαρρεύσει από τους αρμούς επειδή είναι λεπτόρρευστη.

Η λογική του σφραγίσματος της σακούλας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η στέγνωση της σακούλας γίνεται από τους στεγνωτικούς δακτυλίους σιλικόνης. Επιλέχθηκαν δακτύλιοι σιλικόνης για να αντέχουν στην θερμοκρασία.

Στην δικιά μας περίπτωση θα έχουμε δυο σακούλες. Μια θα περνάει άμεσα από κάθε blade και θα καταλήγουν και οι δυο στο κατευθυντήριο σωλήνα. Στις εικόνες 126 και 127 υπάρχει γραφική αποτύπωση των δυο καλουπιων.

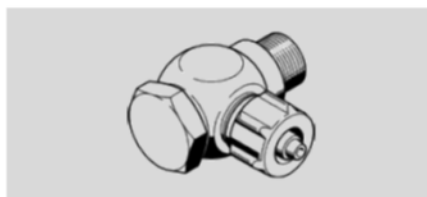


Αφού επιλέχθηκαν τα επιμέρους στοιχεία του καλουπιού έγινε η μελέτη του καλουπιού στις συνθήκες του φούρνου οι οποίες είναι 8bar πίεση και 120 βαθμοί κελσίου. Το μοντέλο που σχεδιάστηκε δεν περιείχε τα επιμέρους στοιχεία των ευθυγραμμιστικών και των εξολκίων. Οι βίδες μοντελοποιήθηκαν ως 1D beam elements. Σκοπός της μοντελοποίησης αυτής ήταν να παρατηρηθούν οι παραμορφώσεις λόγω πίεσης και θερμοκρασίας του καλουπιού, για να αποθρευχουν:

- 1)Ανεπαρκείς κλείσιμο του καλουπιού από τις βίδες.
- 2)Μεγάλες παραμορφώσεις του καλουπιού, κυρίως στα σημεία που η κοιλότητα του είναι κυλινδρική γιατί σε περίπτωση που δεν είχε την σωστή γεωμετρία το πιρούνι στα σημεία πρόσδεσής μπορεί να σπάσει.
- 3)Παραμορφωμένο τελικό προϊόν ασυμμετρίας μεγάλου βαθμού.

Το πνευματικό κύκλωμα για το οποίο σχεδιάστηκε το καλούπι κατέληγε στον παρακάτω σύνδεσμο με τον σωλήνα που ακολουθεί

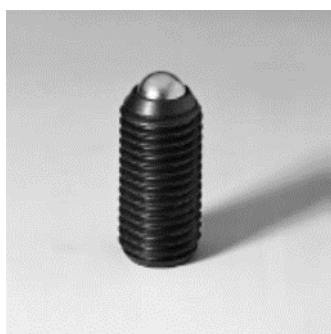
Function



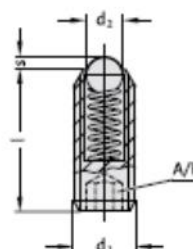
Feature	values
Nominal size	2.9 mm
Type of seal on screw-in stud	Sealing ring
Assembly position	Any
Pneumatic connection	G1/8
	PK-4 with sleeve nut
Materials note	Free of copper and PTFE
Materials information, housing	Zinc die-casting

Εικόνα 128 πνευματικός σύνδεσμος

Στην συνέχεια επιλέχθηκαν οι εξολκείς

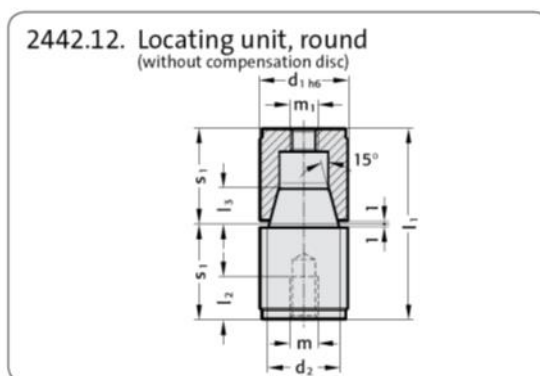
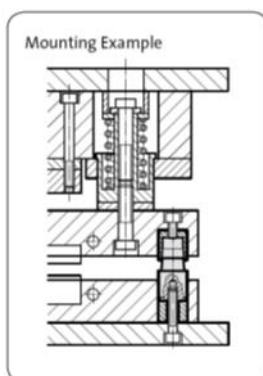


2471.03./2471.04.  
2471.33./2471.34.



Εικόνα 129 εξολκείς

Και στην εικόνα 115 φαίνονται τα ευθυγραμμιστήκα τα οποία εξασφαλίζουν αυξημένη ακρίβεια λόγω κωνικότητας



Εικόνα 130 ευθυγραμμιστήκα



Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τάσεις στο καλούπι λόγω της πίεσης είναι πολύ μικρές. Ωστόσο στην θερμοκρασία των 120 βαθμών κελσίου του καλούπι διαστέλλεται κατά 1.5 χιλιοστό τιμή μη αποδεκτή. Υπήρχαν δυο επιλογές.

- Να αλλάξουμε σχέδιο και να μικρύνουμε το μήκος του καλουπιού.
- Να κάνουμε το καλούπι σε δυο κομμάτια και να τα ενώσουμε με κάποιου είδους μουφα.
- Να αλλάξουμε το υλικό προ εμποτισμένο που χρησιμοποιούμε.

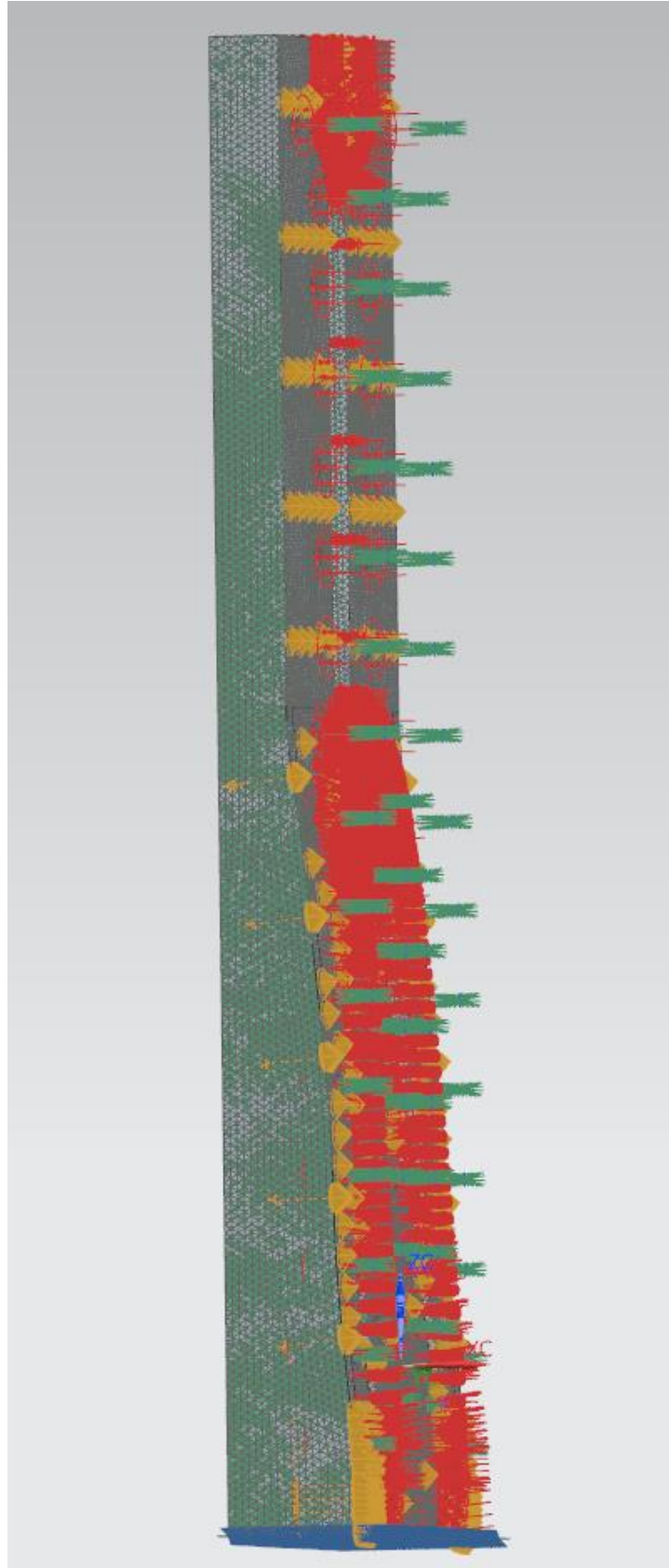
Μετά από μια γρήγορη διερεύνηση καταλήξαμε στο γεγονός ότι οι πρώτες δυο εναλλακτικές δεν ήταν ικανοποιητικές. Έτσι λοιπόν ήρθαμε σε επικοινωνία με τον προμηθευτή και καταλήξαμε στην χρήση άλλου προ εμποτισμένου υφάσματος του οποίου το ψήσιμο γίνεται σε πιο χαμηλή θερμοκρασία. Στους 80 βαθμούς κελσίου.

Επίσης έγινε διερεύνηση σχετικά με τον αριθμό των κοχλιών. Όσες περισσότερες χρησιμοποιήσουμε τόσο καλύτερα θα κλείνει το καλούπι αλλά και όσο περισσότερες χάνουμε χρόνο στο ξεκαλούπωμα με αποτέλεσμα να πέφτει η θερμοκρασία του καλουπιού και να είναι δύσκολη η αποκόλληση του τεμαχίου.

Για τον λόγο αυτό έγινε διερεύνηση για 12,14 και 16 βίδες στο μήκος του καλουπιού από την μια πλευρά.

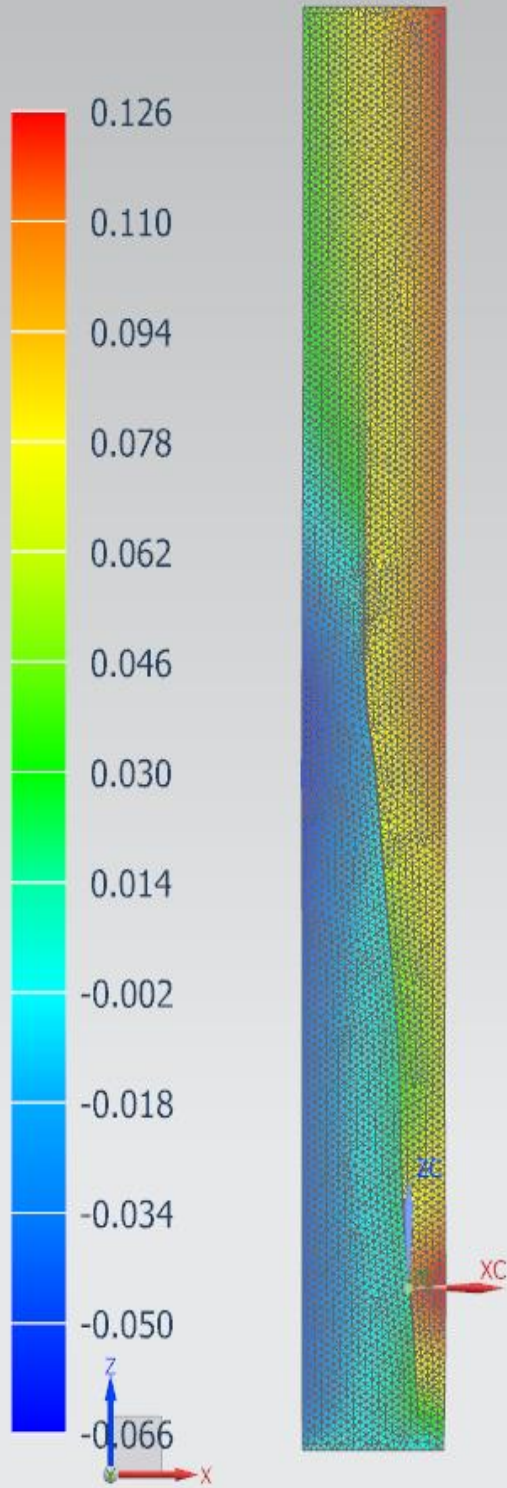
Και στην εικόνα 119 φαίνεται η διάταξη του περάματος στην μια πλακά. Με κόκκινο είναι η πίεση και η προ ένταση των κοχλιών. Με πράσινο τα πεπερασμένα που αναπαριστούν τις βίδες και με κίτρινο είναι οι ορισμένες επαφές.

Τα αποτελέσματα που μας ενδιέφεραν ήταν το κατά ποσό ανοίγει το καλούπι στον άξονα χ. Στις εικόνες 116,117 και 118 φαίνονται τα αποτελέσματα



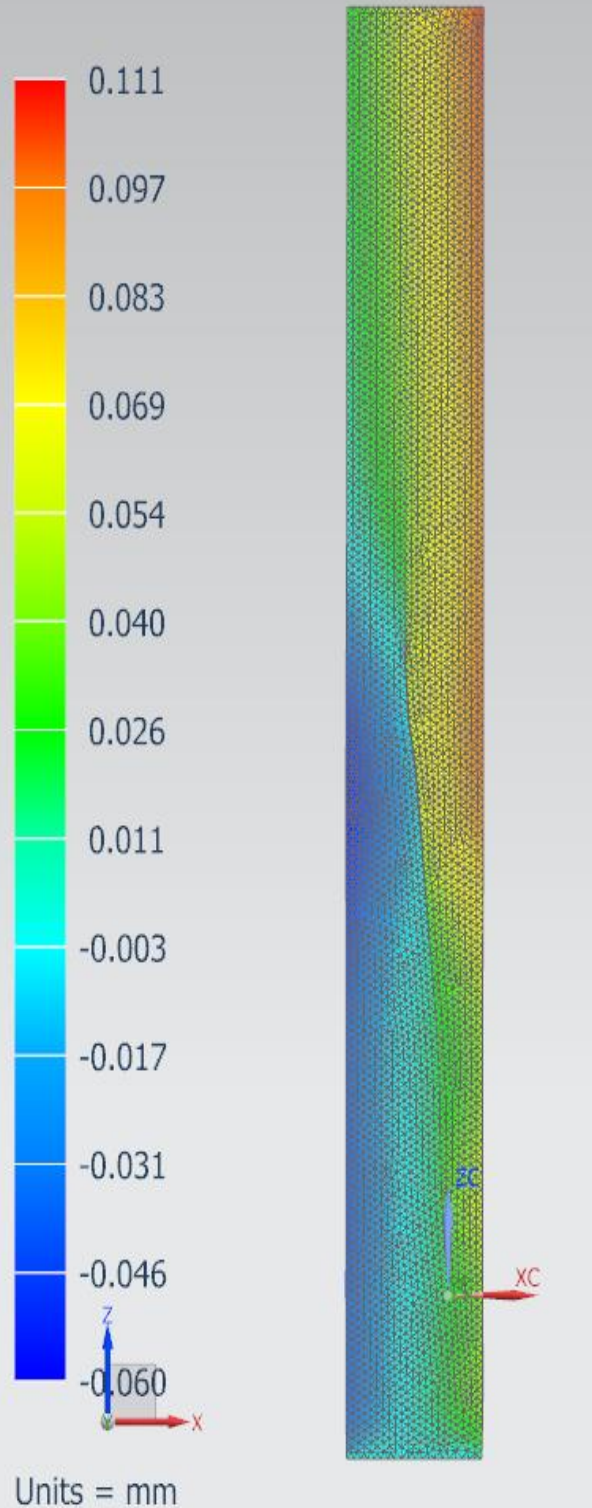
Εικόνα 131 διάταξη προσομοίωσης

assembly1\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, X  
Min : -0.066, Max : 0.126, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnit



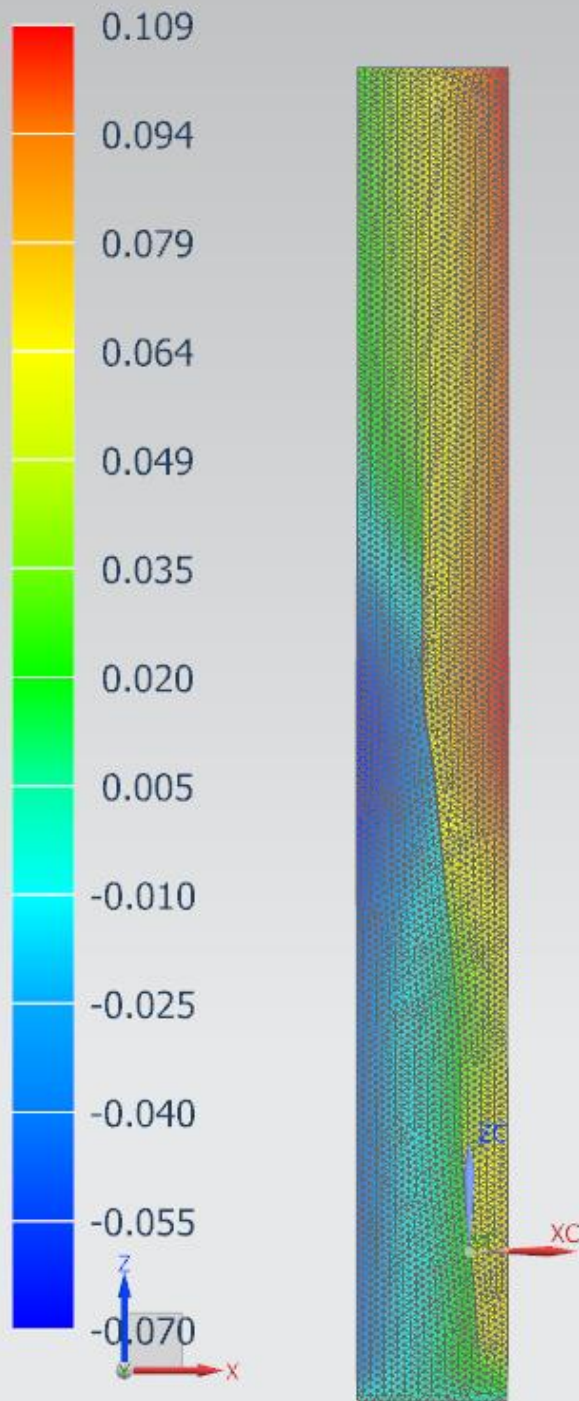
Units = mm  
Εικόνα 132 12 βίδες

asssim : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, X  
Min : -0.060, Max : 0.111, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



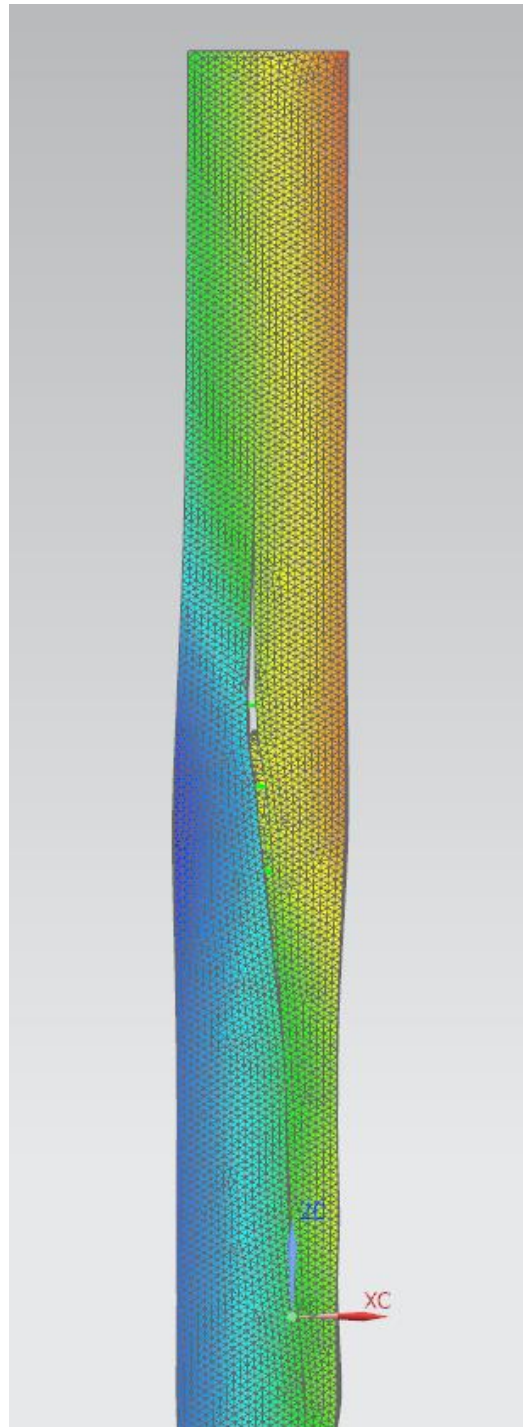
Εικόνα 133 14 βιδες

assemblysim : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Displacement - Nodal, X  
Min : -0.070, Max : 0.109, Units = mm  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Εικόνα 134 16 βίδες

Βλέπουμε λοιπόν ότι από τις 12 στις 16 βίδες υπάρχει διαφορά 20 μικρών. Εξ αρχής θέλαμε η τιμή να μην ξεπερνά τα 100 μικρά παρόλα αυτά θα κρατήσουμε το μοντέλο με τις 16 βίδες. Στην εικόνα 123 φαίνεται καλύτερα η παραμόρφωση. Επίσης φαίνεται το σημείο το οποίο είναι πιο επιρρεπές στο άνοιγμα.



Εικόνα 135 πολλαπλασιασμένη παραμόρφωση



## Παράρτημα

### Ιδιότητες ινών και πλεκτών

Μετά από έρευνα στο site του προμηθευτή των ινών καταλήξαμε με τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες για τα πλεκτά και τις ίνες μας

M46J

TECHNICAL DATA SHEET No. CFA-015		TORAYCA® M46J DATA SHEET		
MJ type high modulus fiber with enhanced tensile and compressive strength over <b>M</b> series fibers. Mainly used for premium sporting goods, aerospace, and industrial applications.				
<b>F I B E R P R O P E R T I E S</b>				
		<b>English</b>	<b>Metric</b>	<b>Test Method</b>
Tensile Strength		611 ksi	4,210 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		63.3 Msi	436 GPa	TY-030B-01
Strain		1.0 %	1.0 %	TY-030B-01
Density		0.066 lbs/in <sup>3</sup>	1.84 g/cm <sup>3</sup>	TY-030B-02
Filament Diameter		2.0E-04 in.	5 μm	
Yield	6K	6,679 ft/lbs	223 g/1000m	TY-030B-03
	12K	3,347 ft/lbs	445 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
		Twist	Twisted, Untwisted	
<b>F U N C T I O N A L P R O P E R T I E S</b>				
CTE			-0.9 α·10 <sup>-6</sup> /°C	
Specific Heat			0.17 Cal/g·°C	
Thermal Conductivity			0.202 Cal/cm·s·°C	
Electric Resistivity			0.9 x 10 <sup>-3</sup> Ω·cm	
Chemical Composition: Carbon			>99 %	
Na + K			<50 ppm	
<b>C O M P O S I T E P R O P E R T I E S *</b>				
Tensile Strength		320 ksi	2,210 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus		38.5 Msi	265 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain		0.8 %	0.8 %	ASTM D-3039
Compressive Strength		155 ksi	1,080 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength		210 ksi	1,420 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus		32.0 Msi	220 GPa	ASTM D-790
ILSS		11.5 ksi	8 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength		7.0 ksi	47 MPa	ASTM D-3039
* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.				

**TORAYCA®**  
**T300 DATA SHEET**

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

**FIBER PROPERTIES**

		<b>English</b>	<b>Metric</b>	<b>Test Method</b>
Tensile Strength		512 ksi	3,530 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Density		0.064 lbs/in <sup>3</sup>	1.76 g/cm <sup>3</sup>	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
	3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
	6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	40A, 40B		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	40D		0.7 %	TY-030B-05
	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
Twist		Twisted, Untwisted, or Never twisted		

**FUNCTIONAL PROPERTIES**

CTE	-0.41 α·10 <sup>-6</sup> /°C
Specific Heat	0.19 Cal/g·°C
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.7 x 10 <sup>-3</sup> Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

**COMPOSITE PROPERTIES \***

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

\* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.



Οι ιδιότητες που χρησιμοποιήσαμε είναι οι εξής.

## Siemens Nx

### M46 UD

Material : M46J\_UD\_  
Parent Material : M46J\_UD  
Parent Material Library : M46J\_UD  
Parent Material Library Version : 1.0

#### Material properties:

Locally defined material

Material Type: Orthotropic

Label: 2

Alternate Name :  
Category :  
Sub-Category :  
Mass Density (RHO) : 1.6 kg/mm<sup>3</sup>

#### ===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 175000 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Young's Modulus (E2) : 8000 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Young's Modulus (E3) : Not defined  
: Major Poisson's Ratio  
Poisson's Ratio (NU) : 0.3  
Poisson's Ratio (NU23) : Not defined  
Poisson's Ratio (NU13) : Not defined  
Shear Modulus (G) : 5000 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear Modulus (G13) : Not defined  
Shear Modulus (G23) : Not defined  
Structural Damping Coefficient (GE) : Not defined  
Stress-Strain Input Data Type : Engineering Stress-Strain  
Stress-Strain (H) : Not defined  
Type of Nonlinearity (TYPE) : PLASTIC  
Yield Function Criterion (YF) : von Mises  
Hardening Rule (HR) : Isotropic  
Initial Yield Point (LIMIT1) : Not defined  
Initial Friction Angle (LIMIT2) : Not defined

#### ===== Strength

Yield Strength : Not defined  
Yield Strength - 2 : Not defined  
Yield Strength - 12 : Not defined  
Ultimate Tensile Strength : 1000 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Ultimate Tensile Strength 2 : 40 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Ultimate Tensile Strength 12 : Not defined  
Tsai-Wu Interaction Coefficient (F12) : Not defined  
Max Stress Tension (ST) : 1000 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (ST2) : 40 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (ST3) : Not defined  
Max Stress Compression (SC) : 850 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC2) : 200 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC3) : Not defined  
Max Stress Shear (SS) : 60 N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear (S13) : Not defined  
Shear (S23) : Not defined  
Max Strain Tension (XT) : 0.55 mm/mm  
Tension (XT2) : 0.5 mm/mm  
Tension (XT3) : Not defined  
Max Strain Compression (XC) : 0.45 mm/mm  
Compression (XC2) : 2.5 mm/mm

Compression (XC3) : Not defined  
 Max Strain Shear (XS) : 1.2 mm/mm  
 Shear (X13) : Not defined  
 Shear (X23) : Not defined

=====  
Durability

Stress-Life Data : Field  
 Stress Life Data Field2 : Stress Life Data Field2:  
 Stress Amplitude - 1 (default value: 1425 N/mm<sup>2</sup>(MPa))  
 Stress Amplitude - 2 (default value: 675 N/mm<sup>2</sup>(MPa))  
 Stress Amplitude - 12 (default value: 675 N/mm<sup>2</sup>(MPa))  
 Strain-Life Data : Expression  
 Fatigue Ductility Coefficient : Not defined  
 Fatigue Ductility Coefficient - 2 : Not defined  
 Fatigue Ductility Coefficient - 12 : Not defined  
 Fatigue Ductility Exponent : Not defined  
 Fatigue Ductility Exponent - 2 : Not defined  
 Fatigue Ductility Exponent - 12 : Not defined  
 Cyclic Yield Strength : Not defined  
 Cyclic Strength Coefficient : Not defined  
 Cyclic Strain Hardening Exponent : Not defined  
 Fatigue Limit Strength in Bending : Not defined  
 Fatigue Limit Strength in Torsion : Not defined  
 Percent Reduction in Area : 0

=====  
Thermal/Electrical

Temperature (TREF) : Not defined  
 Specific Heat (CP) : Not defined  
 Thermal Expansion Coefficient (A) : Not defined  
 Thermal Expansion (A2) : Not defined  
 Thermal Expansion (A3) : Not defined  
 Thermal Conductivity (K) : Not defined  
 Thermal Conductivity (K2) : Not defined  
 Thermal Conductivity (K3) : Not defined  
 Latent Heat (L) : Not defined  
 Phase Change Temperature : Not defined  
 Phase Change Temperature Range : Not defined  
 Specific Heat Above Phase Change : Not defined  
 Resistivity : Not defined  
 Scattering : Not defined  
 Extinction : Not defined  
 Scattering : Not defined  
 Extinction : Not defined

=====  
Creep

: None

=====  
Viscoelasticity

Domain : None

=====  
Visual

Crosshatch Pattern :

=====  
Damage

: None

=====  
Stress Life Data Field2:

Stress Amplitude - 1 (default value: 1425 N/mm<sup>2</sup>(MPa))  
 Stress Amplitude - 2 (default value: 675 N/mm<sup>2</sup>(MPa))  
 Stress Amplitude - 12 (default value: 675 N/mm<sup>2</sup>(MPa))  

0	1600	800	800
50000	1450	700	700
100000	1400	650	650

150000

1350

600

600

### M46 wooven

Library Material : M46J\_woovenCategory

Library Reference M46J\_wooven\_pdf.xml

Material Type : OrthotropicMaterial  
Version : 1.0  
Alternate Name : Not Defined  
Mass Density (RHO) : 1.6g/cm<sup>3</sup>

#### ===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 85000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Young's Modulus (E2) : 85000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
 : 0  
Poisson's Ratio (NU) : 0.1  
Shear Modulus (G) : 5000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Stress-Strain Input Data Type : 0  
Type of Nonlinearity (TYPE) : 1  
Yield Function Criterion (YF) : 1  
Hardening Rule (HR) : 1

#### ===== Strength

Tension (ST) : 350N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (ST2) : 350N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC) : 150N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC2) : 150N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear (SS) : 35N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (XT) : 0.4mm/mm  
Tension (XT2) : 0.4mm/mm  
Compression (XC) : 0.15mm/mm  
Compression (XC2) : 0.15mm/mm  
Shear (XS) : 0.7mm/mm

#### ===== Durability

Stress-Life Data : 0  
Strain-Life Data : 0  
Percent Reduction in Area : 0

#### ===== Creep

: 0

#### ===== Viscoelasticity

Domain : 0

#### ===== Visual

Crosshatch Pattern : Not Defined

#### ===== Damage

: 3

### T300 wooven

Library Material : T300\_wooven\_

Category

Library Reference T300\_wooven\_pdf\_durability\_1.xml

Material Type : OrthotropicMaterial  
Version : 1.0  
Alternate Name : Not Defined  
Mass Density (RHO) : 1.44g/cm<sup>3</sup>

#### ===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 70000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Young's Modulus (E2) : 70000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Young's Modulus (E3) : 7000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
: 0  
Poisson's Ratio (NU) : 0.1  
Poisson's Ratio (NU23) : 0.1  
Poisson's Ratio (NU13) : 0.1  
Shear Modulus (G) : 5000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear Modulus (G13) : 5000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear Modulus (G23) : 5000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Stress-Strain Input Data Type : 0  
Type of Nonlinearity (TYPE) : 1  
Yield Function Criterion (YF) : 1  
Hardening Rule (HR) : 1

#### ===== Strength

Tension (ST) : 600N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (ST2) : 600N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (ST3) : 35N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC) : 570N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC2) : 570N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC3) : 35N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear (SS) : 90N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (XT) : 0.85mm/mm  
Tension (XT2) : 0.85mm/mm  
Compression (XC) : 0.8mm/mm  
Compression (XC2) : 0.8mm/mm  
Shear (XS) : 0.8mm/mm

#### ===== Durability

Stress-Life Data : 1  
Strain-Life Data : 0  
Percent Reduction in Area : 0

#### ===== Creep

: 0

#### ===== Viscoelasticity

Domain : 0

#### ===== Visual

Crosshatch Pattern : Not Defined

#### ===== Damage

: 3

## T700 UD

Library Material : T700 UD0\_

Category

Library Reference T700 UD0\_pdf\_durability.xml

Material Type : OrthotropicMaterial  
Version : 1.0  
Alternate Name : Not Defined  
Mass Density (RHO) : 1.39kg/mm<sup>3</sup>

### ===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 135000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Young's Modulus (E2) : 10000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Young's Modulus (E3) : 10000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
: 0  
Poisson's Ratio (NU) : 0.3  
Poisson's Ratio (NU23) : 0.3  
Poisson's Ratio (NU13) : 0.3  
Shear Modulus (G) : 5000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear Modulus (G13) : 5000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear Modulus (G23) : 5000N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Stress-Strain Input Data Type : 0  
Type of Nonlinearity (TYPE) : 1  
Yield Function Criterion (YF) : 1  
Hardening Rule (HR) : 1

### ===== Strength

Tension (ST) : 1500N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (ST2) : 50N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (ST3) : 30N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC) : 1200N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC2) : 250N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Compression (SC3) : 30N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Shear (SS) : 70N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Tension (XT) : 1.05mm/mm  
Tension (XT2) : 0.5mm/mm  
Compression (XC) : 0.85mm/mm  
Compression (XC2) : 2.5mm/mm  
Shear (XS) : 1.4mm/mm

### ===== Durability

Stress-Life Data : 1  
Strain-Life Data : 0  
Percent Reduction in Area : 0

### ===== Creep

: 0

### ===== Viscoelasticity

Domain : 0

### ===== Visual

Crosshatch Pattern : Not Defined

### ===== Damage

: 3

## Aluminum 7075

Library Material : aluminum 7075-T6

Category

Library Reference aluminum 7075-T6\_1\_2\_2.xml

Material Type : IsotropicMaterial  
Version : 1.0  
Alternate Name : Not Defined  
Mass Density (RHO) : 2.81g/cm<sup>3</sup>

### ===== Mechanical

Young's Modulus (E) : 71700N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
: 0  
Poisson's Ratio (NU) : 0.33  
Shear Modulus (G) : 26900N/mm<sup>2</sup> (MPa)  
Stress-Strain Input Data Type : 0  
Stress-Strain (H) : Tabular Data:

strain	stress
mm/mm	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
0.00524	379
0.00542	390
0.0056	400
0.00579	410
0.00603	421
0.00629	431
0.00659	441
0.00691	452
0.00728	462
0.0077	472
0.00816	483
0.00865	493
0.00902	500
0.00943	507

Type of Nonlinearity (TYPE) : 1  
Yield Function Criterion (YF) : 1  
Hardening Rule (HR) : 1  
Initial Yield Point (LIMIT1) : 379N/mm<sup>2</sup> (MPa)

### ===== Strength

Yield Strength : Tabular Data:

temperature	stress
C	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
371	32
316	45
260	62
204	87
149	186
100	448
24	503
-28	517
-80	545
-196	634

Ultimate Tensile Strength : Tabular Data:

temperature	stress
C	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
371	41
316	55
260	76

204	110
149	214
100	483
24	572
-28	593
-80	621
-196	703

===== Durability

Stress-Life Data : 0  
 Strain-Life Data : 0  
 Percent Reduction in Area : 0

===== Thermal/Electrical

Temperature (TREF) : 21C  
 Thermal Expansion Coefficient (A) : 2.32e-0051/C  
 Thermal Conductivity (K) : 130W/mm-C  
 Specific Heat (CP) : 960J/kg-K  
 Phase Change Temperature : 477C

===== Creep

: 0

===== Viscoelasticity

Domain : 0

===== Visual

Crosshatch Pattern : Not Defined

===== Miscellaneous

Fixed Stock Thickness : 0  
 Adhesive : Not Defined

# LS-Dyna

**TITLE**  
m46woov

1	<b>MID</b>	<b>RO</b>	<b>EA</b>	<b>EB</b>	<b>(EC)</b>	<b>PRBA</b>	<b>(PRCA)</b>	<b>(PRCB)</b>
	6	0.0016000	8.500e+010	8.500e+010	7.000e+009	0.0	0.0	0.0
2	<b>GAB</b>	<b>GBC</b>	<b>GCA</b>	<b>(KF)</b>	<b>AOPT</b> <input type="checkbox"/>	<b>2WAY</b>		
	5.000e+009	5.000e+009	5.000e+009	0.0	0.0	0.0		
3	<b>XP</b>	<b>YP</b>	<b>ZP</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>MANGLE</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>DFAILM</b>	<b>DFAILS</b>
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1000000	0.1000000
5	<b>TFAIL</b>	<b>ALPH</b>	<b>SOFT</b>	<b>FBRT</b>	<b>YCFAC</b>	<b>DFAILT</b>	<b>DFAILC</b>	<b>EFS</b>
	1.000e-009	0.3000000	0.8000000	0.9500000	1.2000000	0.1000000	-0.1000000	0.0
6	<b>XC</b>	<b>XT</b>	<b>YC</b>	<b>YI</b>	<b>SC</b>	<b>CRIT</b>	<b>BETA</b>	
	1.470e+010	2.000e+010	1.990e+011	4.000e+007	1.540e+011	54.0 <input type="checkbox"/>	0.0	
7	<b>PEL</b>	<b>EPSF</b>	<b>EPSR</b>	<b>TSMC</b>	<b>SOFT2</b>			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	<b>SLIMT1</b>	<b>SLIMC1</b>	<b>SLIMT2</b>	<b>SLIMC2</b>	<b>SLIMS</b>	<b>NCYRED</b>	<b>SOFTG</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	<b>LCXC</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCXT</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCYC</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCYT</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCSC</b> <input type="checkbox"/>	<b>DT</b>		
	0	0	0	0	0	0.0		

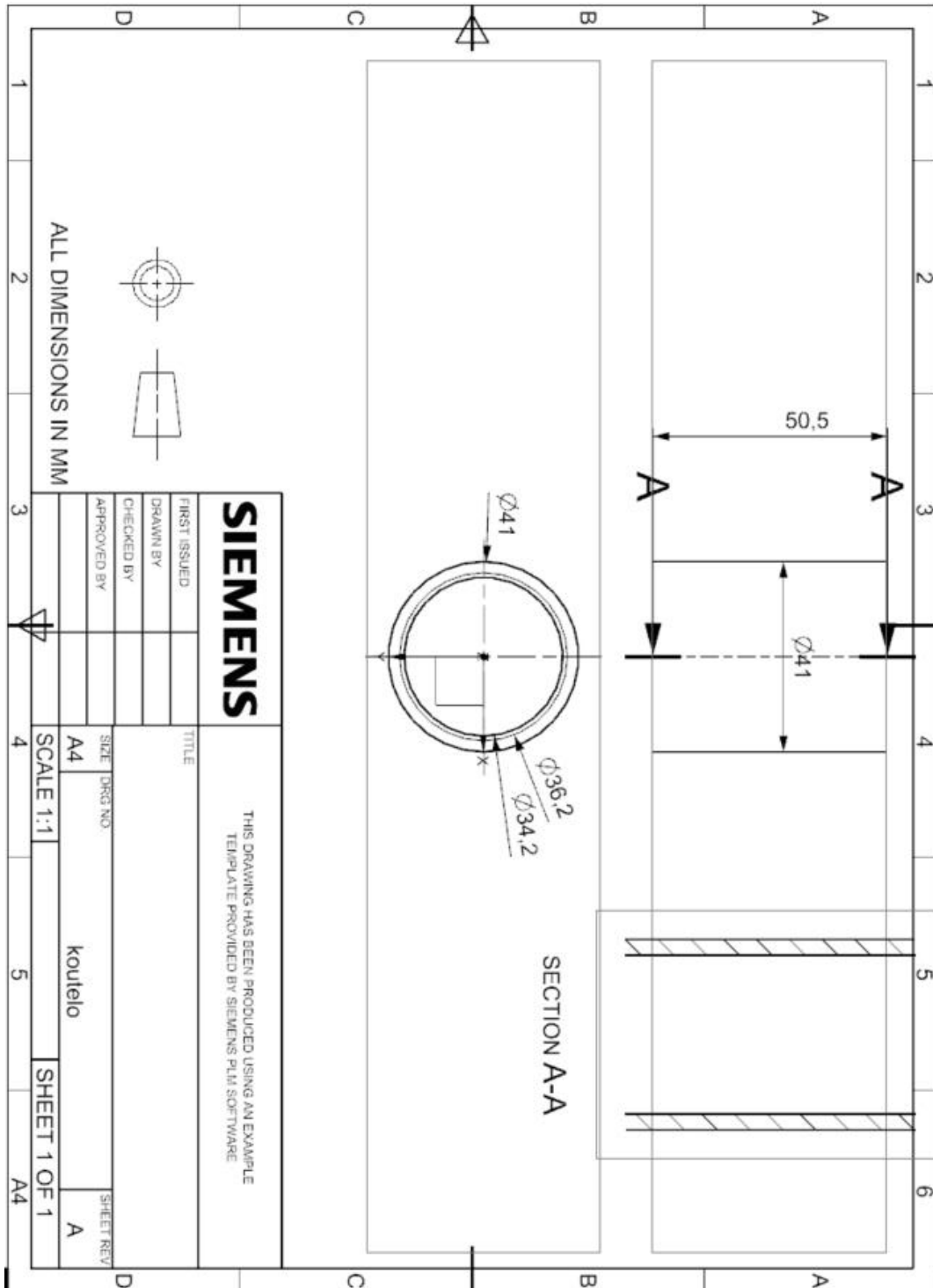
**TITLE**  
m46ud

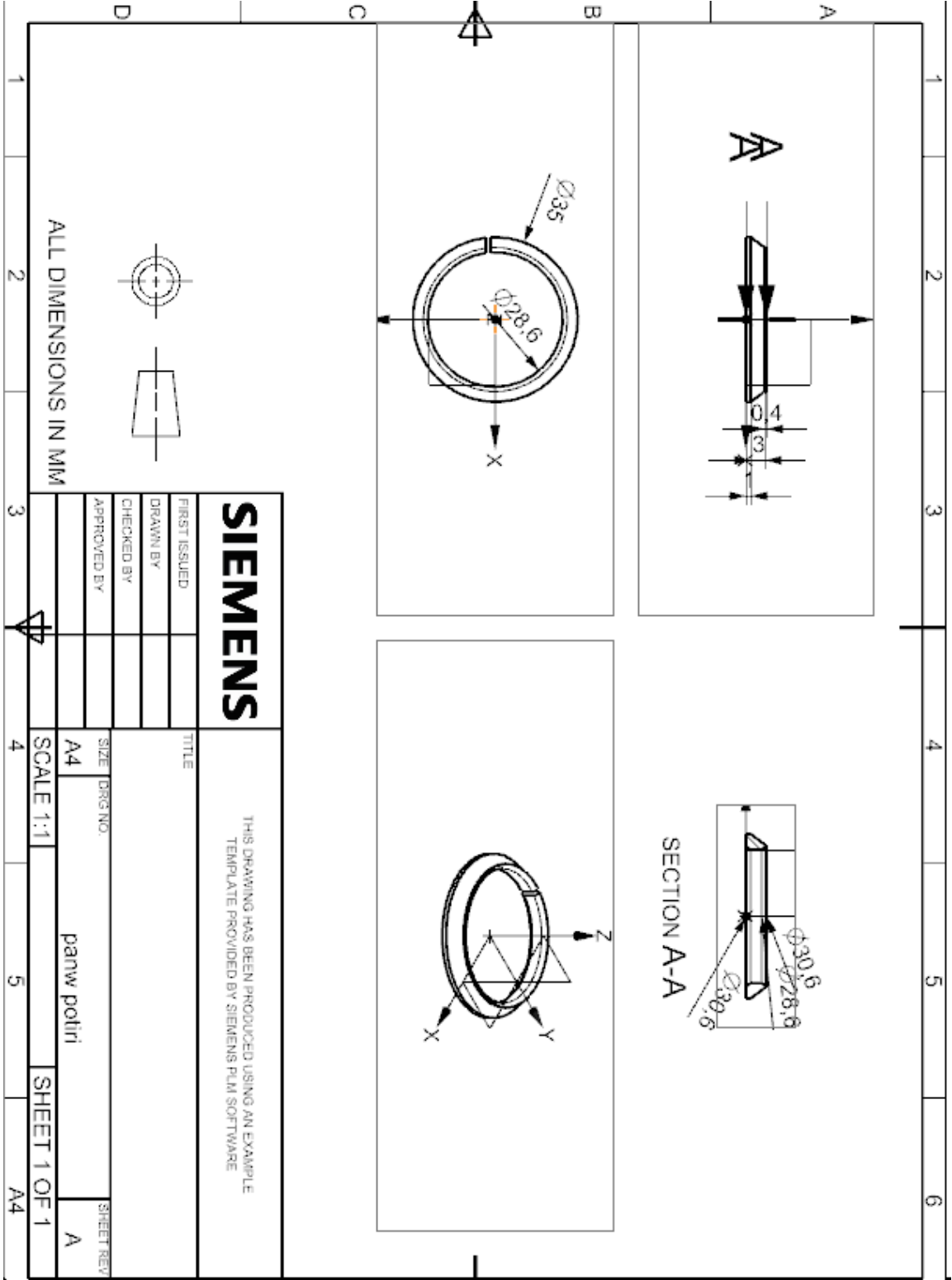
1	<b>MID</b>	<b>RO</b>	<b>EA</b>	<b>EB</b>	<b>(EC)</b>	<b>PRBA</b>	<b>(PRCA)</b>	<b>(PRCB)</b>
	4	0.0016000	1.700e+011	7.000e+010	7.000e+009	0.0	0.0	0.0
2	<b>GAB</b>	<b>GBC</b>	<b>GCA</b>	<b>(KF)</b>	<b>AOPT</b> <input type="checkbox"/>	<b>2WAY</b>		
	5.000e+009	5.000e+009	5.000e+009	0.0	0.0	0.0		
3	<b>XP</b>	<b>YP</b>	<b>ZP</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>MANGLE</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>DFAILM</b>	<b>DFAILS</b>
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1000000	0.1000000
5	<b>TFAIL</b>	<b>ALPH</b>	<b>SOFT</b>	<b>FBRT</b>	<b>YCFAC</b>	<b>DFAILT</b>	<b>DFAILC</b>	<b>EFS</b>
	1.000e-009	0.3000000	0.5000000	0.9500000	1.2000000	0.1000000	-0.1000000	0.0
6	<b>XC</b>	<b>XT</b>	<b>YC</b>	<b>YI</b>	<b>SC</b>	<b>CRIT</b>	<b>BETA</b>	
	1.470e+009	2.000e+010	1.990e+011	4.000e+007	1.540e+011	54.0 <input type="checkbox"/>	0.0	
7	<b>PEL</b>	<b>EPSF</b>	<b>EPSR</b>	<b>TSMC</b>	<b>SOFT2</b>			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	<b>SLIMT1</b>	<b>SLIMC1</b>	<b>SLIMT2</b>	<b>SLIMC2</b>	<b>SLIMS</b>	<b>NCYRED</b>	<b>SOFTG</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	<b>LCXC</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCXT</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCYC</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCYT</b> <input type="checkbox"/>	<b>LCSC</b> <input type="checkbox"/>	<b>DT</b>		
	0	0	0	0	0	0.0		



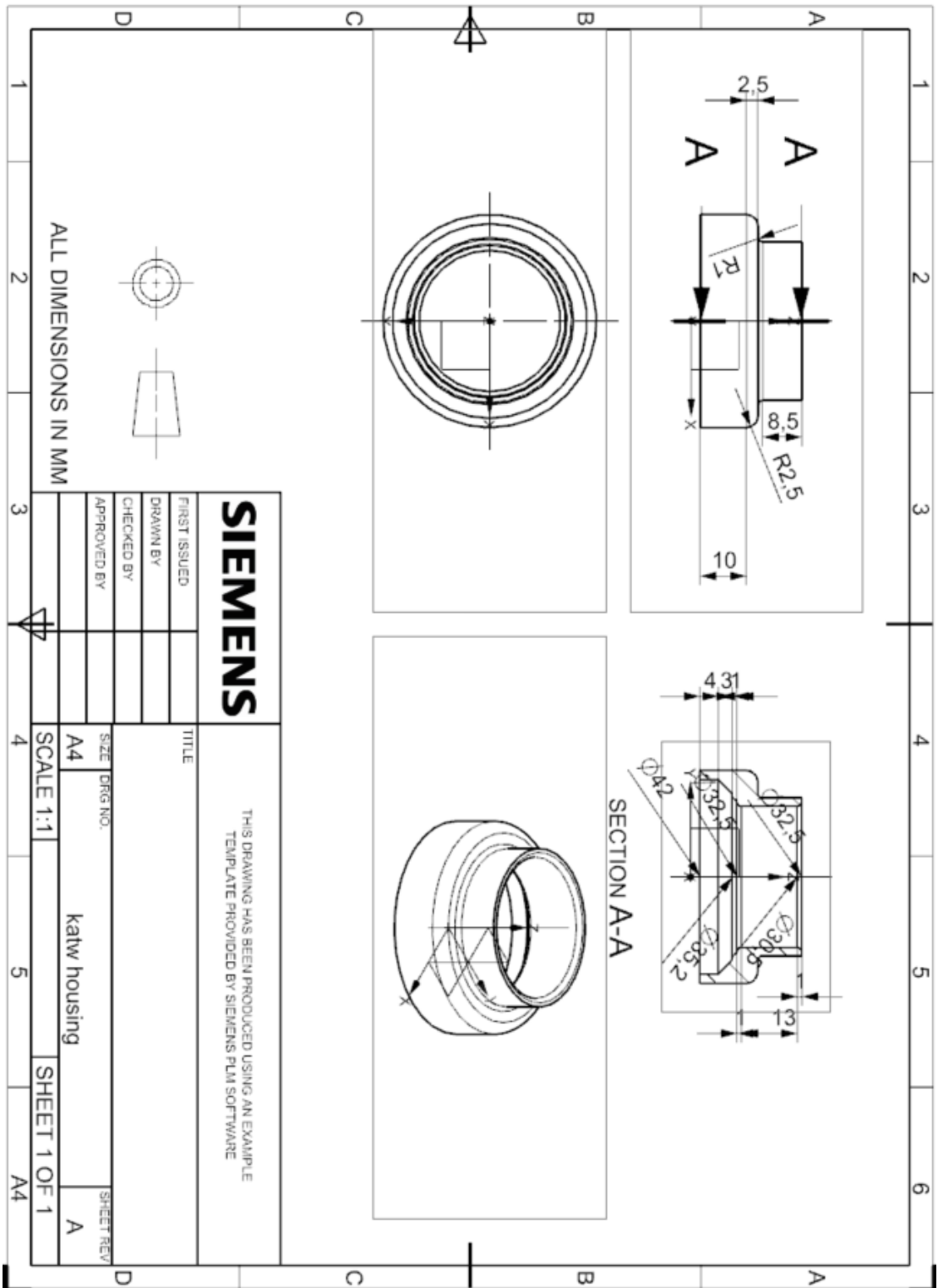
TITLE								
T700								
1	<b>MID</b>	<b>RO</b>	<b>EA</b>	<b>EB</b>	<b>(EC)</b>	<b>PRBA</b>	<b>(PRCA)</b>	<b>(PRCB)</b>
	3	0.0016000	1.350e+011	7.000e+009	7.000e+009	0.0	0.0	0.0
2	<b>GAB</b>	<b>GBC</b>	<b>GCA</b>	<b>(KF)</b>	<b>AOPT</b>	<b>2WAY</b>		
	5.000e+009	5.000e+009	5.000e+009	0.0	0.0	0.0		
3	<b>XP</b>	<b>YP</b>	<b>ZP</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>MANGLE</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>DFAILM</b>	<b>DFAILS</b>
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1000000	0.1000000
5	<b>TFAIL</b>	<b>ALPH</b>	<b>SOFT</b>	<b>FBRT</b>	<b>YCFAC</b>	<b>DFAILT</b>	<b>DFAILC</b>	<b>EFS</b>
	1.000e-009	0.3000000	0.5000000	0.9500000	1.2000000	0.1000000	-0.1000000	0.0
6	<b>XC</b>	<b>XT</b>	<b>YC</b>	<b>YT</b>	<b>SC</b>	<b>CRIT</b>	<b>BETA</b>	
	8.570e+009	1.500e+010	1.990e+011	4.800e+007	1.540e+011	54.0	0.0	
7	<b>PEL</b>	<b>EPSF</b>	<b>EPSR</b>	<b>TSMC</b>	<b>SOFT2</b>			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	<b>SLIMT1</b>	<b>SLIMC1</b>	<b>SLIMT2</b>	<b>SLIMC2</b>	<b>SLIMS</b>	<b>NCYRED</b>	<b>SOFTG</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	<b>LCXC</b>	<b>LCXT</b>	<b>LCYC</b>	<b>LCYT</b>	<b>LCSC</b>	<b>DT</b>		
	0	0	0	0	0	0.0		

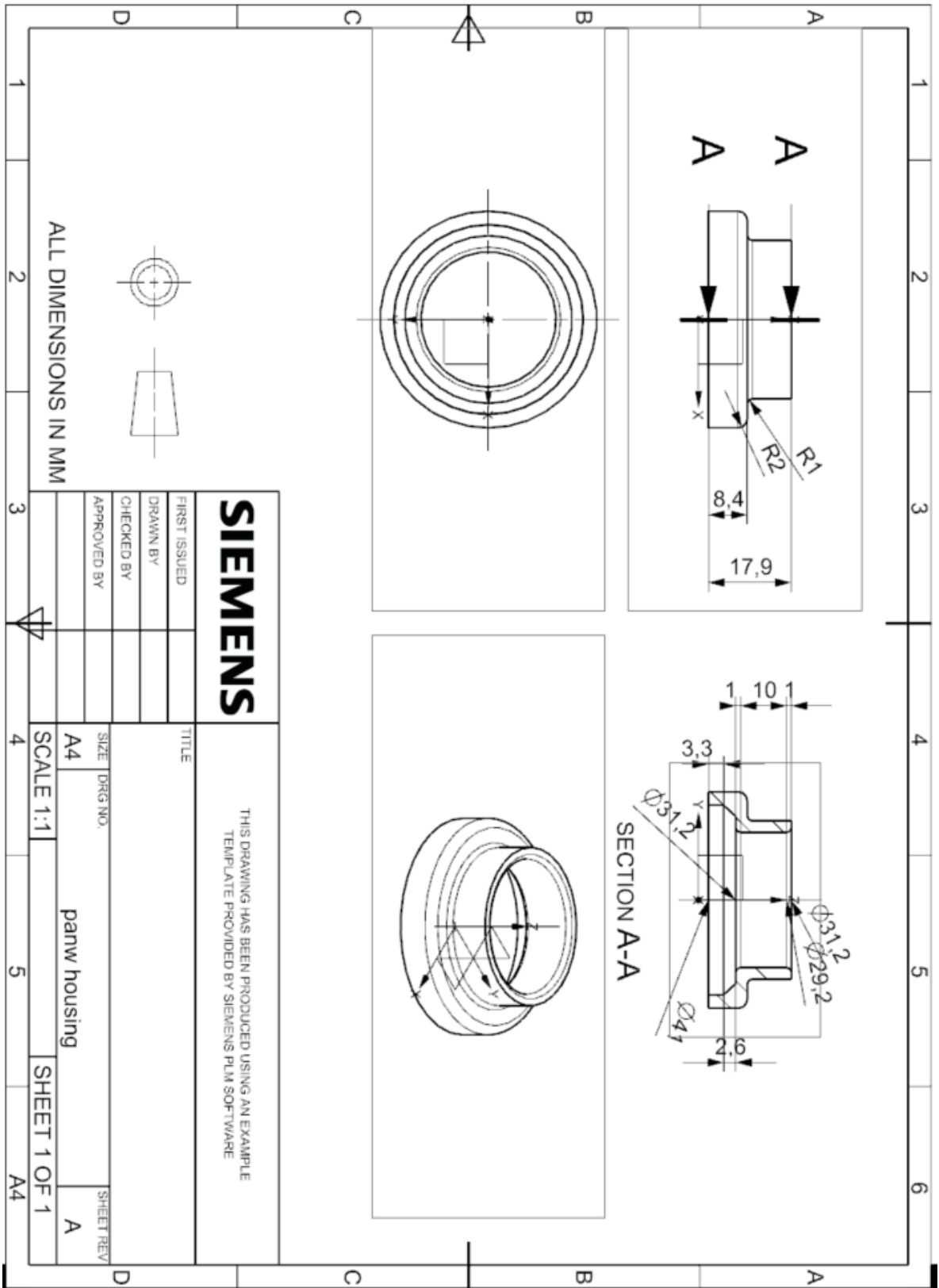
TITLE								
T300								
1	<b>MID</b>	<b>RO</b>	<b>EA</b>	<b>EB</b>	<b>(EC)</b>	<b>PRBA</b>	<b>(PRCA)</b>	<b>(PRCB)</b>
	1	0.0014400	7.000e+010	7.000e+010	7.000e+009	0.0	0.0	0.0
2	<b>GAB</b>	<b>GBC</b>	<b>GCA</b>	<b>(KF)</b>	<b>AOPT</b>	<b>2WAY</b>		
	5.000e+009	5.000e+009	5.000e+009	0.0	0.0	0.0		
3	<b>XP</b>	<b>YP</b>	<b>ZP</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>MANGLE</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>DFAILM</b>	<b>DFAILS</b>
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1000000	0.1000000
5	<b>TFAIL</b>	<b>ALPH</b>	<b>SOFT</b>	<b>FBRT</b>	<b>YCFAC</b>	<b>DFAILT</b>	<b>DFAILC</b>	<b>EFS</b>
	1.000e-009	0.3000000	0.5000000	0.9500000	1.2000000	0.1000000	-0.1000000	0.0
6	<b>XC</b>	<b>XT</b>	<b>YC</b>	<b>YT</b>	<b>SC</b>	<b>CRIT</b>	<b>BETA</b>	
	1.470e-009	2.200e+012	1.990e+011	4.800e+010	1.540e+011	54.0	0.0	
7	<b>PEL</b>	<b>EPSF</b>	<b>EPSR</b>	<b>TSMC</b>	<b>SOFT2</b>			
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000			
8	<b>SLIMT1</b>	<b>SLIMC1</b>	<b>SLIMT2</b>	<b>SLIMC2</b>	<b>SLIMS</b>	<b>NCYRED</b>	<b>SOFTG</b>	
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000000	
9	<b>LCXC</b>	<b>LCXT</b>	<b>LCYC</b>	<b>LCYT</b>	<b>LCSC</b>	<b>DT</b>		
	0	0	0	0	0	0.0		











**SIEMENS**

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE  
TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE

FIRST ISSUED

DRAWN BY

CHECKED BY

APPROVED BY

TITLE

SIZE DRG NO.

A4

SCALE 1:1

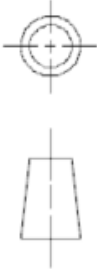
panw housing

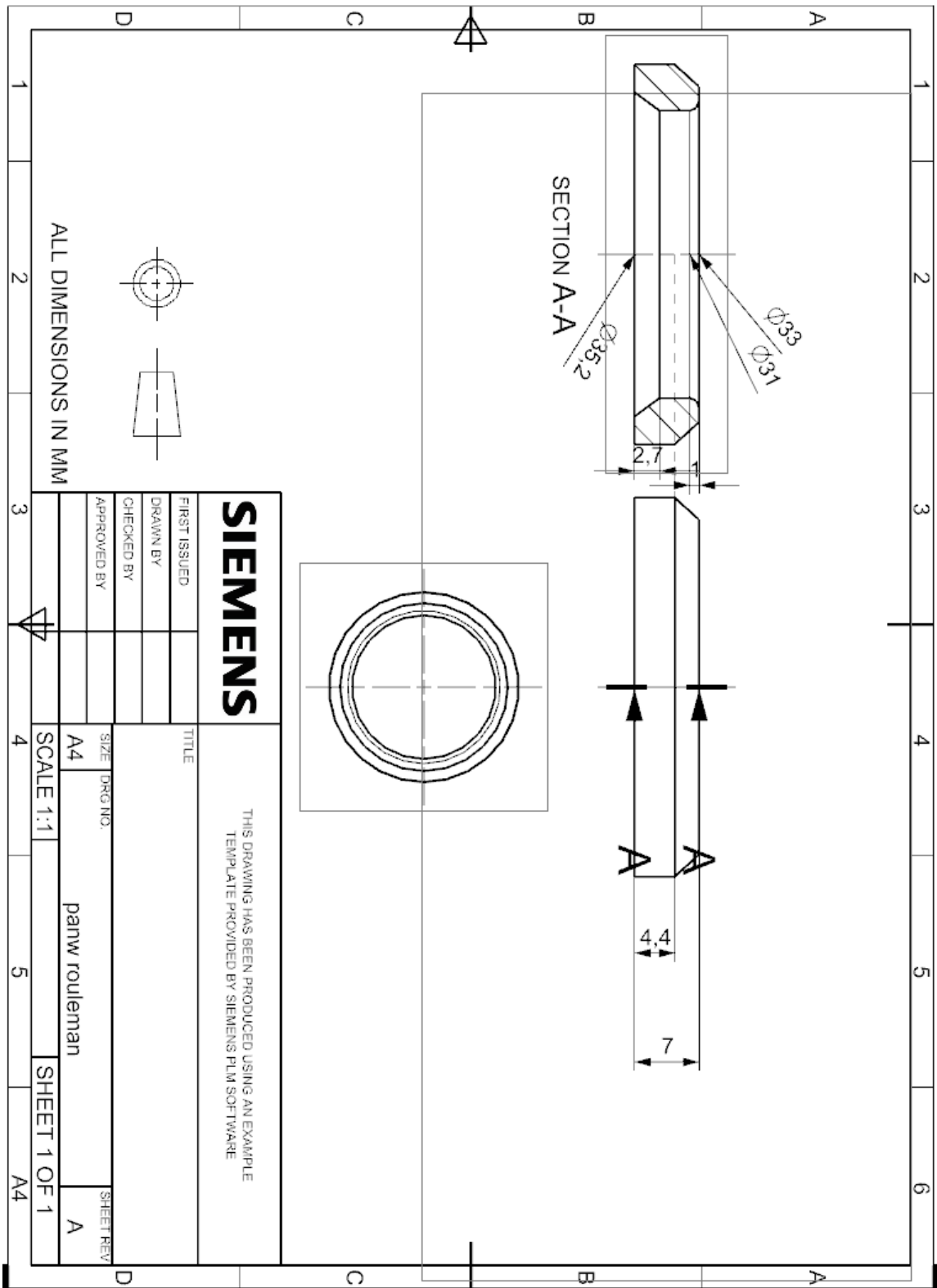
SHEET 1 OF 1

SHEET REV

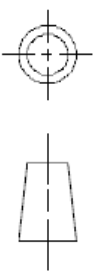
A

ALL DIMENSIONS IN MM





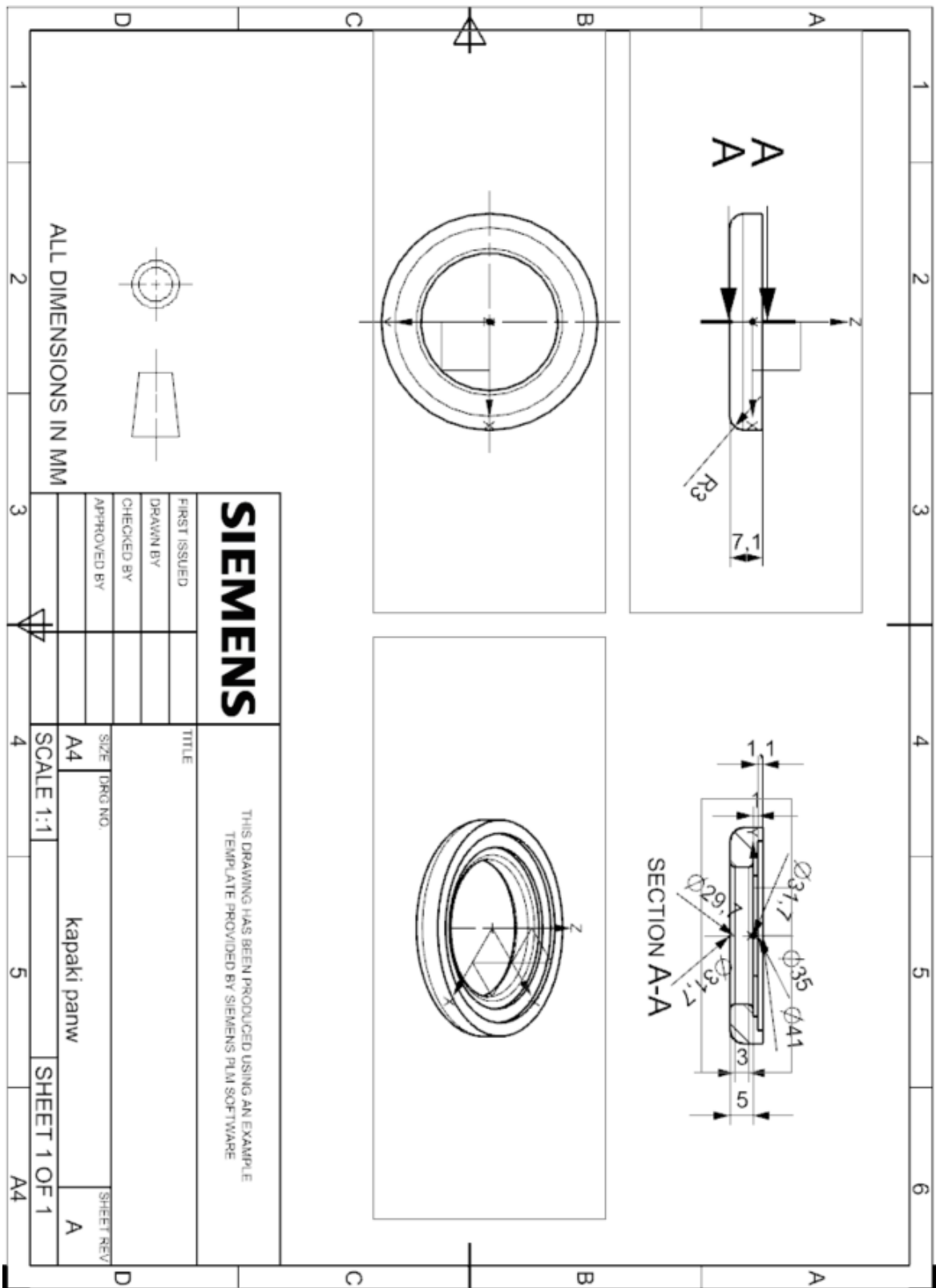
ALL DIMENSIONS IN MM



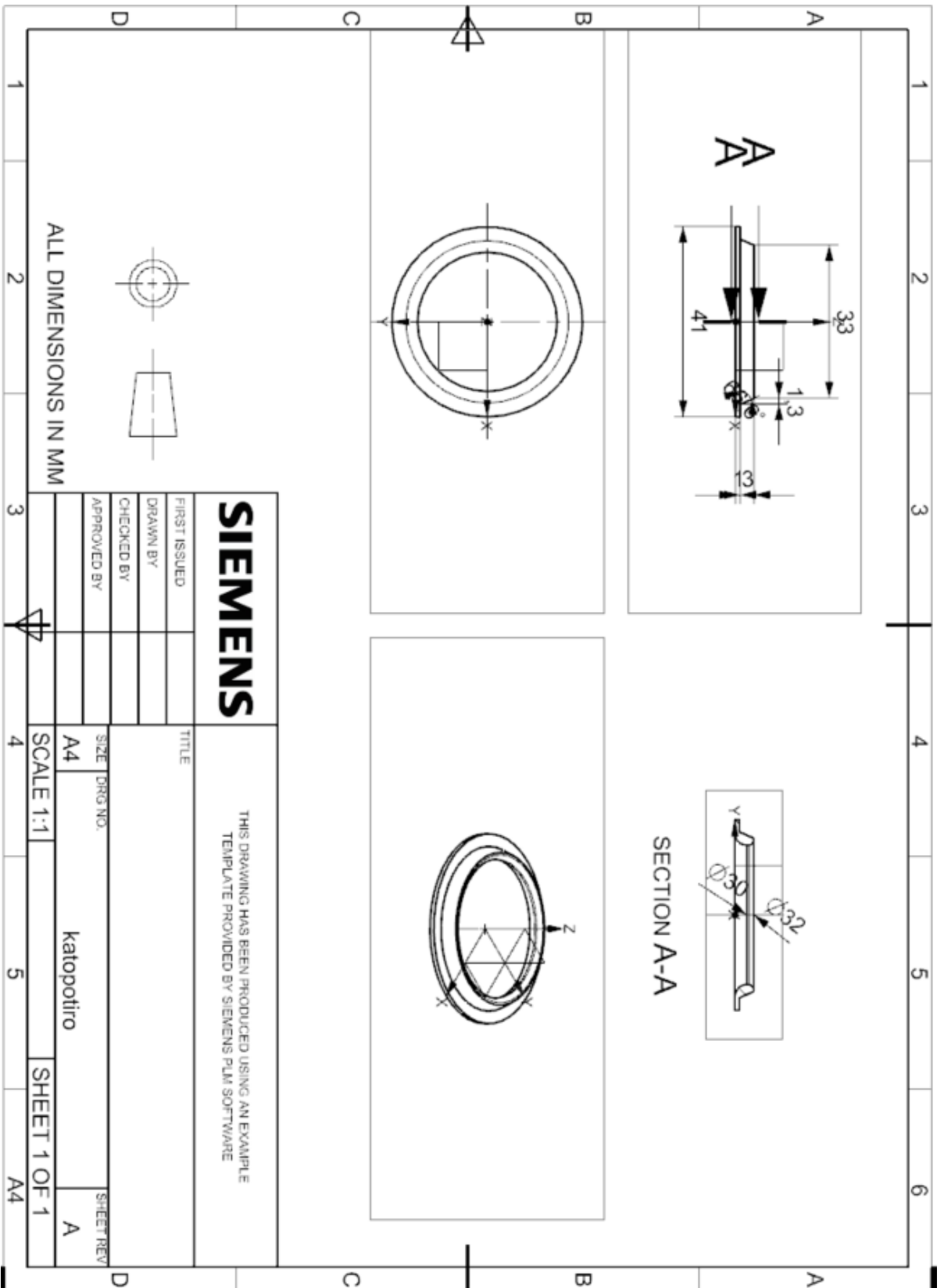
**SIEMENS**

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE  
TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE

FIRST ISSUED	TITLE	SIZE / ORIGIN:		SHEET REV:
DRAWN BY		A4	panw rouleman	A
CHECKED BY		SCALE 1:1		
APPROVED BY				
			SHEET 1 OF 1	





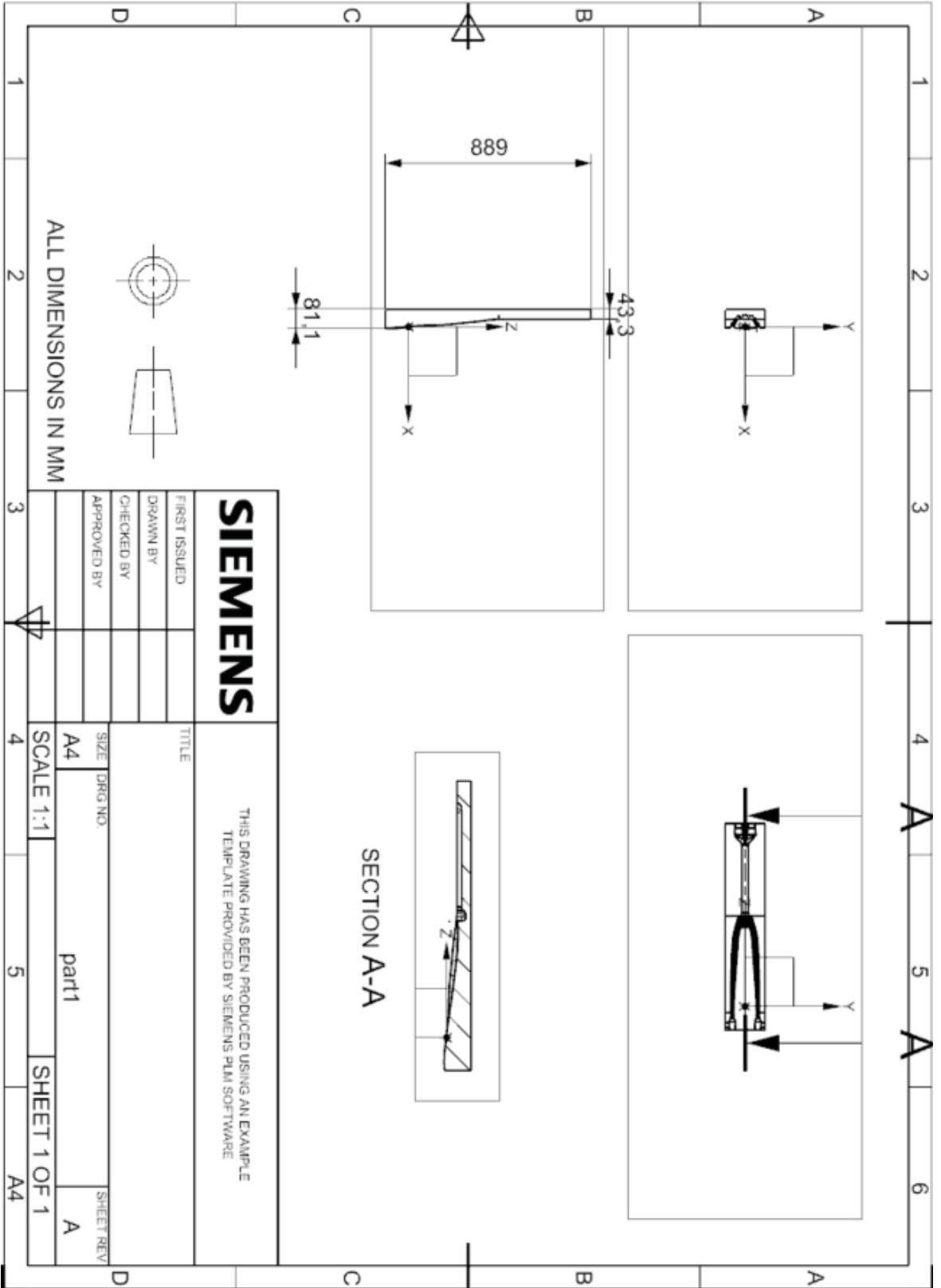


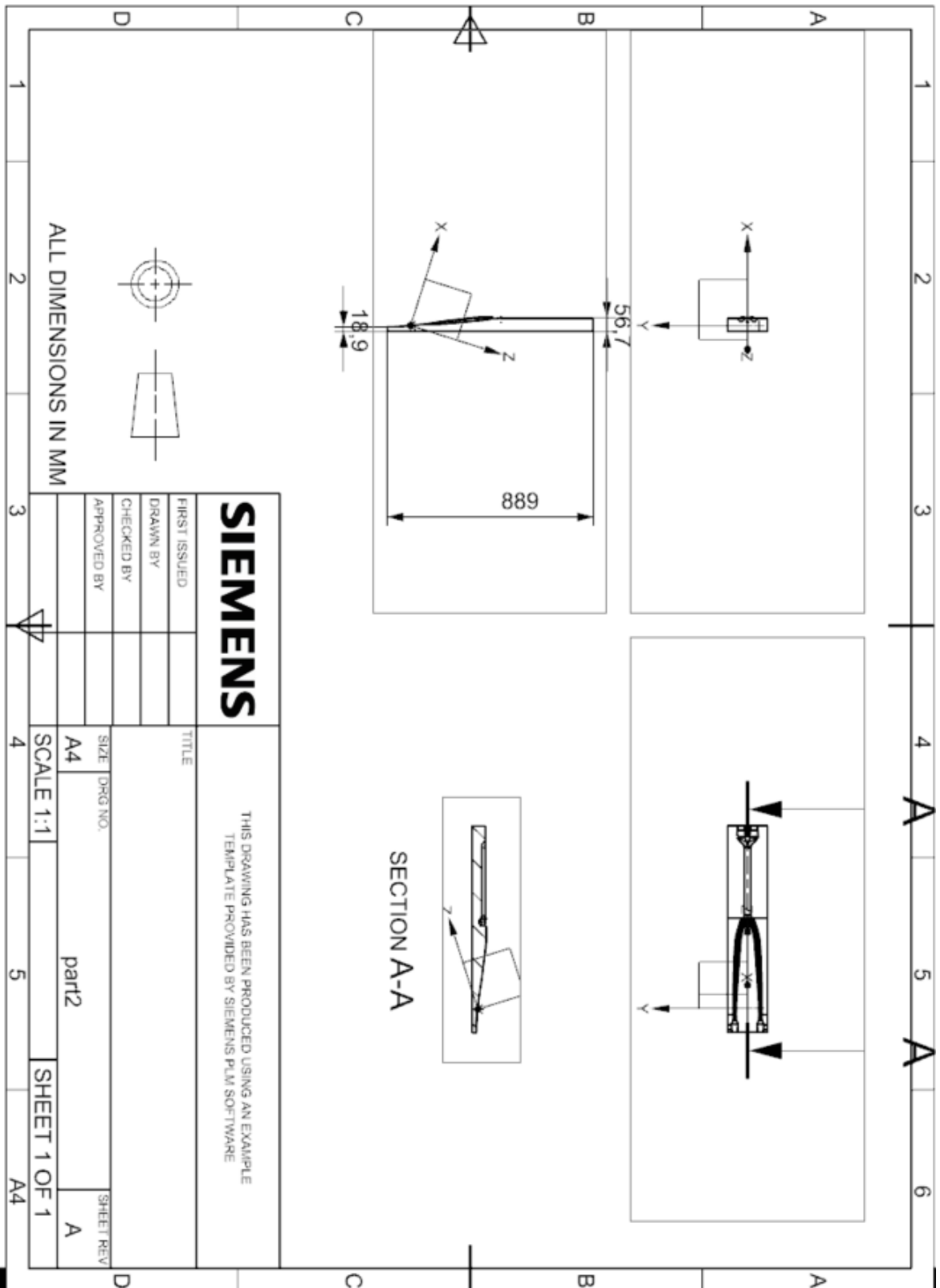
ALL DIMENSIONS IN MM

**SIEMENS**

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE  
TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE

FIRST ISSUED	TITLE	THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE	
DRAWN BY	SIZE	DRG NO.	
CHECKED BY	A4		
APPROVED BY	SCALE	1:1	
		katopotiro	
		SHEET 1 OF 1	
			A





## Βιβλιογραφία

- 1 ) Σημειώσεις μαθήματος Προηγμένα υλικά  
Δημήτριος Μανωλάκος
- 2) Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά  
Δημήτρης Ι. Παντελής
- 3) «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΠΟ CFRP ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ» ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΡΑΚΙΖΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π. Κος ΔΗΜ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ
- 4) Σχεδιασμός και κατασκευή ανθρακονημάτινου τιμονιού αγωνιστικού ποδηλάτου - Μάρκος Κατσίπης  
Επιβλέπων Καθηγητής Ε.Μ.Π. Κος Δημ. Μανωλάκος
- 5) NX Laminate Composites Student Guide October, 2011  
MT15029-s-nx8
- 6) Fatigue of Fiber-reinforced Composites Anastasios P. Vassilopoulos •  
Thomas Keller
- 7) NONLINEAR MECHANICAL RESPONSE OF CFRP LAMINATES UNDER OFF-AXIS TENSILE LOADING  
Shinji Ogihara\*, Eishin Adachi\*\* and Satoshi Kobayashi\*\*\*
- 8) HANDBOOK OF DIE DESIGN Copyright © 2006, 1998 by Ivana Suchy., McGraw-Hill
- 9) «A Math-Based Methodology for Fatigue Longevity Prediction of 3D Woven»  
Fiberglass Reinforced Vinyl-ester Composites Michael C. H. Lee, William , T. Short,  
Delphi Research Labs.
- 10) " Fatigue in composites Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics"  
Edited by Bryan Harris
- 11) Investigation on tension–tension fatigue performances and reliability fatigue life of T700/MTM46 composite laminates
- 12) Σχεδιασμός και μελέτη τιμονιού για αγωνιστικό ποδήλατο ορεινής ποδηλασίας.  
Επιβλέπων καθηγητής ΕΜΠ Κος Δημ. Μανωλάκος

## Ιστοσελίδες

<http://www.ibike.org/library/history-timeline.htm>

<http://www.theverge.com/tldr/2015/9/18/9351763/worlds-fastest-bike-human-powered>

<http://www.johnnybroccoli.com/geeky-cool-history-bike/>