



Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και μελέτη αγωνιστικού  
σκελετού ποδηλάτου ορεινής ποδηλασίας  
χωρίς πίσω ανάρτηση κατασκευασμένου  
από ανθρακονήματα.

Design and analysis of a racing cfrp  
hardtail mountain bike frame.

Νικολακέα Χρυσαιγή

Επιβλέπων καθηγητής ΕΜΠ Κος Δημ. Μανωλάκος

Αθήνα 2017

## *Ευχαριστίες*

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας και Κατεργασιών κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση της διπλωματικής. Επίσης, στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη για την καθοδήγηση και τις υποδείξεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες στην ομάδα του Gram Carbon, κυρίως Θεόδωρο Θεοδωρίδη και Ανδρέα Ζουρνή, για την υποστήριξη και τις συμβουλές.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου ήταν οι μεγαλύτεροι υποστηρικτές και συμπαραστάτες μου.

# Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη ενός ανθρακονημάτινου σκελετού ποδηλάτου τύπου mountain bike χωρίς πίσω ανάρτηση (hardtail) για αγωνιστική χρήση σε δύο μεγέθη (L και M). Τα ανθρακονημάτινα προϊόντα επικρατούν πλέον στην ποδηλατική αγορά λόγω της μεγάλης αντοχής έναντι χαμηλού βάρους που προσφέρουν.

Αρχικός στόχος ήταν η εύρεση κατάλληλου σχήματος και διατομής για κάθε τμήμα του σκελετού. Ο σχεδιασμός έγινε με χρήση του προγράμματος SIEMENS NX 10 και 11. Χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή realize shape η οποία προσφέρει υψηλής ποιότητας επιφάνειες σε πολύπλοκα σχέδια. Ο γεωμετρικός σχεδιασμός βασίστηκε σε ήδη υπάρχοντα μοντέλα τα οποία κυριαρχούσαν στην αγορά κατά την περίοδο που ξεκίνησε η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Εν συνεχεία, ο σκελετός μοντελοποιήθηκε ως αλουμινένιος και μέσω προσομοιώσεων βασισμένων στα αντίστοιχα τεστ που τίθενται από το ISO διαπιστώθηκαν οι περιοχές μέγιστων τάσεων καθώς και η κατανομή τους πάνω στο σκελετό. Αλλάζοντας κάθε φορά το σχήμα σε διάφορα σημεία του σκελετού, προέκυψε ένα μοντέλο που έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα και καλή κατανομή τάσεων.

Έπειτα, το μοντέλο του σκελετού μοντελοποιήθηκε ως ανθρακονημάτινο καθορίζοντας τη θέση και το μέγεθος κάθε στρώσης πάνω στο σχέδιο. Τα μοντέλα των σκελετών έγιναν στο SIEMENS NX με τη χρήση της μεθόδου zone based layup, η οποία παρότι δεν προσφέρει τη μέγιστη ακρίβεια σε αποτελέσματα προσφέρεται για ιδιαίτερα πολύπλοκα σχέδια, όπως αυτό του σκελετού. Στη συνέχεια τα διάφορα μοντέλα εισάχθηκαν στις προσομοιώσεις που προέκυψαν με βάση τα τεστ που προβλέπει το ISO και αξιολογήθηκε η καταλληλότητα κάθε πιθανής διαστρωμάτωσης.

Ειδικά για το τεστ πτώσης (drop test) έγινε συμπληρωματικά η χρήση του λογισμικού πακέτου LS-dyna, διότι κατά το στήσιμο του τεστ στο πρόγραμμα SIEMENS NX προέκυπταν σφάλματα. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από το LS-dyna μοντελοποιήθηκε εκ νέου η προσομοίωση στο SIEMENS NX, η οποία και χρησιμοποιήθηκε τελικά.

Στην τελικά φάση σχεδιάστηκαν τα καλούπια για τα δύο διαφορετικά μεγέθη. Τα καλούπια αυτά ελέγχθηκαν ως προς την πίεση που θα υφίστανται εσωτερικά. Στη συνέχεια επιλέχθηκε κατάλληλος αριθμός κοχλιών και κεντραριστικών πείρων έτσι ώστε να εφαρμόζουν σωστά τα διάφορα κομμάτια του καλουπιού και να προσφέρουν μέγιστη στεγανοποίηση.

# Abstract

The objective of this thesis is the design study of a racing hardtail mountain bike frame made from carbon fiber materials in two sizes (L and M). Carbon fiber products are the leaders in the bicycle market, due to the significantly higher performance they offer considering their low weight.

The initial aim was to create a suitable shape and geometry for every different piece of the bicycle frame. To design the frame, the program used was SIEMENS NX 10 and 11. The add-on realize shape was used for the supreme quality surfaces it produces. The geometric design was based on frames which were considered as top quality in the market during the time this thesis started.

The next step was to consider the material of the frame model as aluminum and, through simulations based on the corresponding ISO tests, to determine the areas where the maximum stresses were generated, as well as their distribution along the frame. Changing each time the shape on different areas of the frame, we were able to find a shape which provided satisfactory results and good stress distribution.

The third step was to consider the material of the frame to be carbon fiber and to specify the placement and the size of every layer on the frame model. The frames were designed on SIEMENS NX using the zone based layup method, which is preferred on such projects, even though it is not as accurate. Afterwards, the different models were tested according to ISO standards and each layup was assessed.

Especially for the drop test we also used LS-dyna, because during the setup of the simulation in SIEMENS NX there were many errors. Using the results from the LS-dyna we made a new simulation in SIEMENS NX, which was used in the end.

The last step was to design the molds for the two different sizes. The molds were checked in terms of stresses deriving from high internal pressure. Furthermore, a suitable amount of screws and guiding pillars were chosen for aligning and sealing the different parts of the mold.

# Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή-Θεωρητικό μέρος	1
1.1 Ιστορική αναδρομή ποδηλάτου	1
1.2 Ποδήλατο	7
1.2.1 Υλικά στην κατασκευή ποδηλάτου	8
1.3 Σύνθετα Υλικά	10
1.3.1 Εισαγωγή	10
1.3.2 Ιστορική αναδρομή	10
1.3.3 Ταξινόμηση των συνθέτων υλικών	12
1.3.4 Πλεονεκτήματα συνθέτων υλικών	13
1.3.5 Είδη ινωδών υλικών	13
1.3.6 Ίνες άνθρακα	18
1.3.6.1 Παραγωγή ινών άνθρακα	18
1.3.6.2 Παραγωγή υφάσματος από ίνες άνθρακα	20
1.3.6.3 Εμποτισμός υφασμάτων με ρητίνη	21
1.3.6.4 Κατασκευές με προ-εμποτισμένα	23
1.3.6.5 Εφαρμογές ανθρακονημάτων	26
1.4 CAD – CAM – CNC – FEA	27
1.4.1 CAD	27
1.4.2 CAM	27
1.4.3 CNC	27
1.4.4 FEA	28
2. Σχεδιασμός	29
2.1 Γεωμετρικές προδιαγραφές	29
2.2 Δημιουργία σχεδίων	33
2.2.1 Επιλογή βασικής γεωμετρίας	33
2.3 Προδιαγραφές ISO(2231332 ISO 4210-6)	35
2.4 Έλεγχος προδιαγραφών με αλουμίνιο	41
2.5 Σύγκριση μοντέλων σκελετού από αλουμίνιο	50
2.5.1 Σχεδιασμός μεγέθους L	53
2.5.2 Σχεδιασμός μεγέθους M	61
2.5.3 Σχεδιασμός άλλων μεγεθών	66
2.6 Έλεγχος προδιαγραφών με ανθρακονήματα	68
2.6.1 Ιδιότητες Υλικών	70
2.6.2 Εύρεση διαστρωμάτωσης STD στο μέγεθος L	71
2.6.3 Εύρεση διαστρωμάτωσης SL στο μέγεθος L	92
2.6.4 Εύρεση διαστρωμάτωσης STD για το μέγεθος M.	107
2.6.5 Εύρεση διαστρωμάτωσης SL για το μέγεθος M.	118
2.6.6 Κόπωση ανθρακονημάτων	127
3. Σχεδιασμός καλουπιού	132
3.1 Σχεδιασμός καλουπιού για το μέγεθος L	132
3.2 Έλεγχος αντοχής καλουπιού	145
3.3 Σχεδιασμός καλουπιού για το μέγεθος M.	146
3.4 Έλεγχος των νέων σχεδίων του σκελετού	148
4. Παράρτημα	153
5. Βιβλιογραφία	

# 1. Εισαγωγή-Θεωρητικό μέρος

## 1.1 Ιστορική αναδρομή ποδηλάτου

Το πιο ενδιαφέρον σχετικά με την ανακάλυψη του ποδηλάτου είναι ότι πολλοί 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, πολλοί άνθρωποι 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 σχοινού 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 2 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 κατευθειάν 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 υψηλού 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 3 ordinary*

1872-1880 – Σε αυτό το διάστημα σημειώθηκαν αρκετές ανακαλύψεις που συντέλεσαν στο να 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 τρίκύκλου το οποίο θεωρούταν και όχημα πολυτελείας. Πολλές από τις καινοτομίες που εισήχθησαν στο τρίκυκλο βοήθησαν στη μετέπειτα ανάπτυξη τις αυτοκινητοβιομηχανίας. Μερικά παραδείγματα είναι η η μετάδοση κίνησης με πινιόν, το διαφορεικό αλλά και τα φρένα τύπου δαγκάνας.



*Εικόνα 2 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



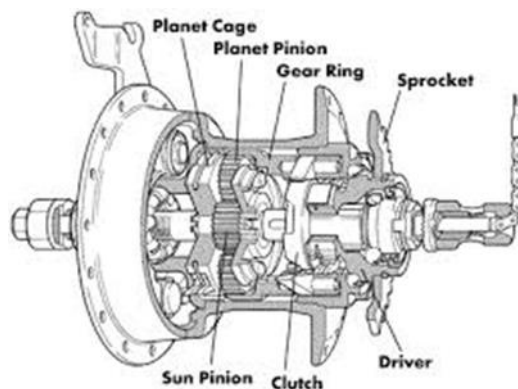
της σιδηρουργίας και των υλικών με αποτέλεσμα να υπάρχουν αρκετά ανθεκτικά και ελαφριά υλικά ώστε να μπορεί ο άνθρωπος με ευκολία να το κινήσει. Επίσης εμφανίστηκαν για πρώτη φορά και οι αναρτήσεις στον σκελετό του ποδηλάτου.



*Εικόνα 3 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 4 internal gear hub*

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



*Εικόνα 5 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 κλασσικών δαγκανών.

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



*Εικόνα 6 αεροVELO κάτοχος παγκόσμιου ρεκόρ ταχύτητας ποδήλατου*

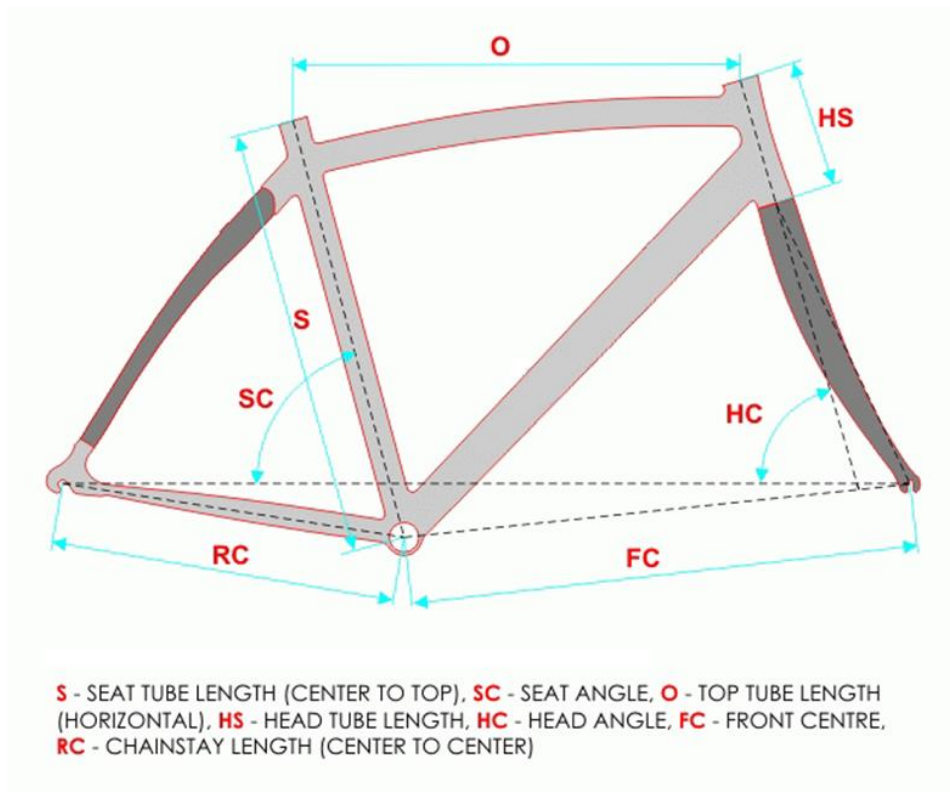
## 1.2 Ποδήλατο

Το ποδήλατο χωρίζεται σε διαφορετικά κομμάτια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Κάθε κομμάτι έχει και διαφορετική ονομασία.



*Εικόνα 7 ονοματολογία επιμέρους μερών*

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



Εικόνα 8 ονοματολογία διαστάσεων

### 1.2.1 Υλικά στην κατασκευή ποδηλάτου

Στο παρελθόν έχουν δοκιμαστεί πολλά υλικά για την κατασκευή ενός ποδηλάτου. Για πολλά χρόνια στην ποδηλατική βιομηχανία κυριαρχούσε το σίδηρο. Στη συνέχεια όμως ξεκίνησε να αντικαθίσταται σε μεγάλο βαθμό από το αλουμίνιο εξαιτίας του μικρότερου βάρους του. Το πρόβλημα του αλουμινίου έναντι του σίδηρου είναι η μεγάλη και εύκολη σχετικά παραμόρφωση που υφίσταται. Αυτό είχε ως συνέπεια τη έντονη αλλαγή του σχήματος και συγκεκριμένα των διατομών των επιμέρους κομματιών του σκελετού με σκοπό την αύξηση της ακαμψίας τους.



*Εικόνα 11 μεταλλικό ποδήλατο*

Στη σύγχρονη εποχή πλέον, η τελευταία λέξη της τεχνολογίας επιβάλλει την χρήση σύνθετων υλικών και πιο συγκεκριμένα ανθρακονήματα. Αυτό το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα να φτιάχνονται πολύ πιο ελαφριά και πιο ανθεκτικά ποδήλατα σε σχέση με το παρελθόν.



*Εικόνα 12 σκελετός ποδηλάτου από ανθρακονήματα*

## 1.3 Σύνθετα Υλικά

### 1.3.1 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 τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.



Εικόνα 13 οικογένειες σύνθετων υλικών

### 1.3.2 Ιστορική αναδρομή

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από την αρχαιότητα. Υλικά που συναντώνται εύκολα στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά.

**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 χρησιμοποιούν στρώσεις λίνου ή 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.

Ρωμαίικα 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 μικρά, 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 φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό ως βακελίτης.

1960 – Παρατηρείται η ανάπτυξη τις υψηλής αντοχής των ινών γυαλιού 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 ίνες αυτές 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 πλάσιο των τιμών του αλουμινίου.

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

Οι κύριοι παράγοντες που καθιστούν τα σύνθετα ως το ιδανικό κατασκευαστικό υλικό για μεγάλο πλήθος εφαρμογών 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

Τα παραπάνω μειονεκτήματα αντιμετωπίζονται σταδιακά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και της εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής τους.

### 1.3.3 Ταξινόμηση των συνθέτων υλικών

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

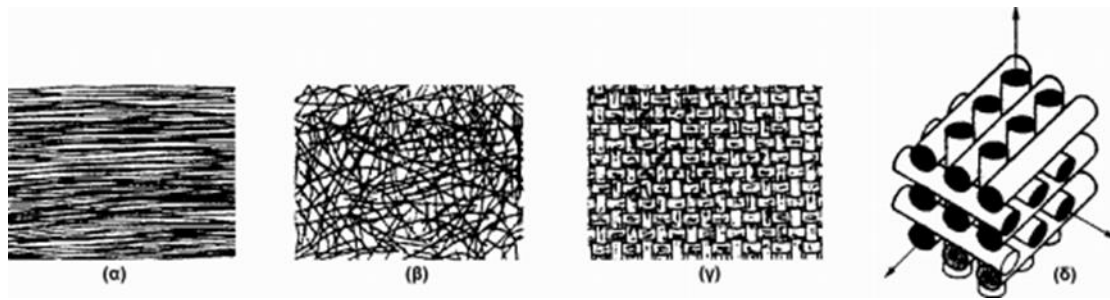
- Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας
- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): με επάλληλες στρώσεις υλικών
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω με βάση τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα: οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα: οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις

Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα ταξινομούνται περαιτέρω βάση του προσανατολισμού των ινών ως εξής:

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



Εικόνα 9 διάφορα σύνθετα υλικά

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

### 1.3.4 Πλεονεκτήματα συνθέτων υλικών

Τα σύνθετα υλικά προσθέτουν την δυνατότητα για βελτιστοποίηση κατασκευών. Τα βασικά πλεονεκτήματά 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.

### 1.3.5 Είδη ινώδων σύνθετων

Ο πρωταρχικός ρόλος των ινών είναι να παρέχουν δύναμη και ακαμψία. Εν τούτοις, σαν σύνολο, οι ίνες υψηλής αντοχής είναι ψαθυρές, έχουν γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης με λίγη ή καθόλου διαρροή, επιδεικνύουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην αντοχή από τα μέταλλα.

#### Υαλονήματα

Οι ίνες ύαλου (glass fibers) είναι οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες εξαιτίας της καλής σχέσης μηχανικών ιδιοτήτων – χαμηλού κόστους. Το e-glass (“electrical” glass, «ηλεκτρικό» γυαλί) είναι η πιο κοινή ίνα ύαλου και χρησιμοποιείται εκτενώς σε σύνθετα εμπορικά προϊόντα. Το e-glass είναι μια ίνα χαμηλού κόστους, υψηλής

πυκνότητας, χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία έχει καλή αντίσταση κατά της διάβρωσης και ευκολία στην μεταχείριση. Το s-2 glass (“structural” glass, «δομικό» γυαλί) αναπτύχθηκε ως ανταπόκριση στην ανάγκη για μια ίνα μεγαλύτερης αντοχής για δοχεία πίεσης και για συμπαγή κελύφη κινητήρων ρουκετών. Η τιμή της πυκνότητάς του, το επίπεδο απόδοσης και το κόστος κυμαίνονται μεταξύ των αντίστοιχών του e-glass και του άνθρακα. Οι ίνες από χαλαζία (quartz fiber) χρησιμοποιούνται σε πολλές ηλεκτρικές εφαρμογές εξαιτίας της χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς τους, εν τούτοις είναι πολύ ακριβές.



*Εικόνα 15 S-glass fibers*

### Αραμίδιο

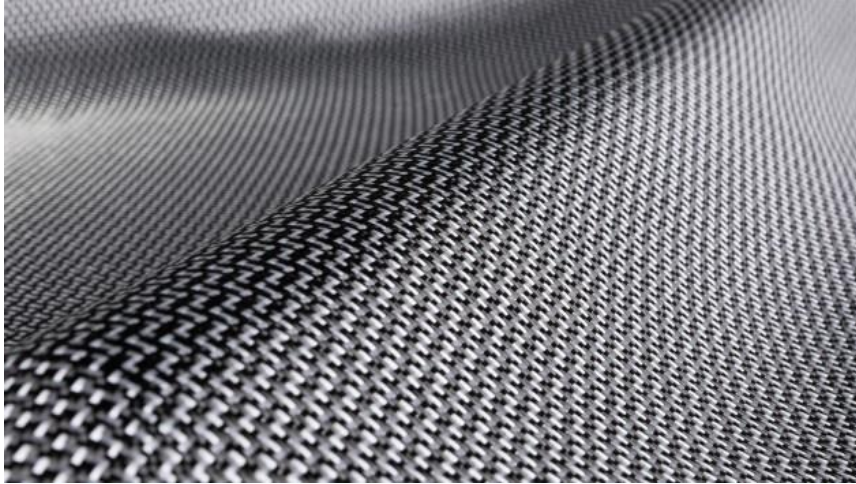
Οι ίνες αραμιδίου (aramid fiber), για παράδειγμα το Kevlar, είναι εξαιρετικά ανθεκτικές οργανικές ίνες με χαμηλή πυκνότητα και επιδεικνύουν εξαιρετική αντοχή στην καταπόνηση (damage tolerance). Παρόλο που έχουν υψηλή τάση εφελκυσμού, δεν έχουν καλή απόδοση στη θλίψη. Είναι επίσης ευαίσθητες στην υπεριώδη ακτινοβολία και η χρήση τους πρέπει να περιορίζεται σε μακροπρόθεσμη λειτουργία σε θερμοκρασίες κάτω από τους  $350^{\circ}\text{F}=449,82\text{ K}$ .



*Εικόνα 16 Ίνες αραμιδίου*

## 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.



*Εικόνα 17 Υφασμα από ίνες Dyneema*

## 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.

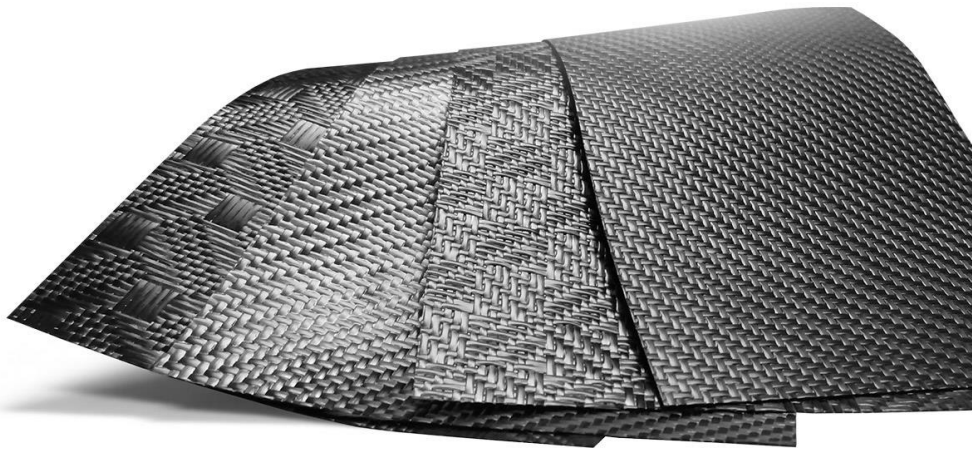


*Εικόνα 18 Ίνες Zylon*

## Ανθρακονήματα

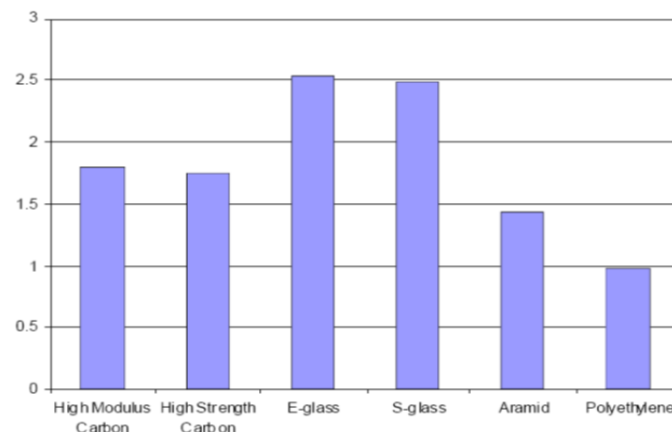
Οι ίνες άνθρακα (carbon fiber) περιέχουν τον καλύτερο συνδυασμό ιδιοτήτων αλλά είναι επίσης πιο ακριβές από το γυαλί και από το αραμίδιο. Έχουν χαμηλή πυκνότητα, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE, coefficient of thermal expansion) και είναι αγωγιμες. Τα υλικά από ανθρακόνημα είναι κατασκευαστικά πολύ αποδοτικά και επιδεικνύουν εξαιρετική αντοχή στην κόπωση. Είναι επίσης ψαθυρά [κόπωση έως αστοχία (strain-to-failure) λιγότερο από 2%] και επιδεικνύουν χαμηλή αντίσταση σε κρούση. Όντας αγωγιμα, προκαλούν γαλβανική διάβρωση αν έρθουν σε άμεση επαφή με αλουμίνιο. Ανθρακονήματα είναι διαθέσιμα σε ευρύ πεδίο αντοχής (300-1000 ksi) και σιβαρότητας (μέτρο ελαστικότητας (30-145 msi). Τα ανθρακονήματα ταξινομούνται συχνά στις εξής κατηγορίες:

- Υψηλής αντοχής
- Ενδιαμέσου μέτρου ελαστικότητας
- Υψηλού μέτρου ελαστικότητας

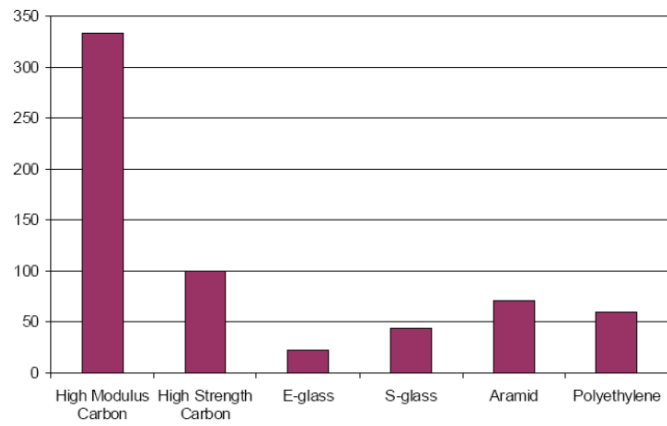


Εικόνα 19 υφάσματα από ανθρακονήματα σε διαφορετικές πλέξεις

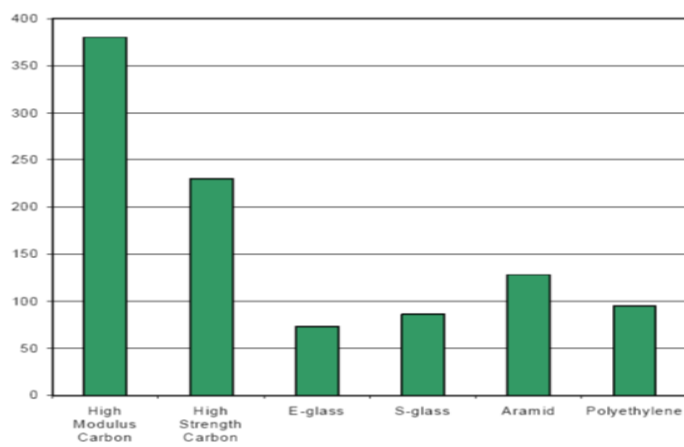
Οι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή ίνας είναι: πυκνότητα, κόστος, αντοχή και ελαστικότητα. Στα επόμενα διαγράμματα συγκρίνονται οι διάφορες ίνες ανά παράγοντα.



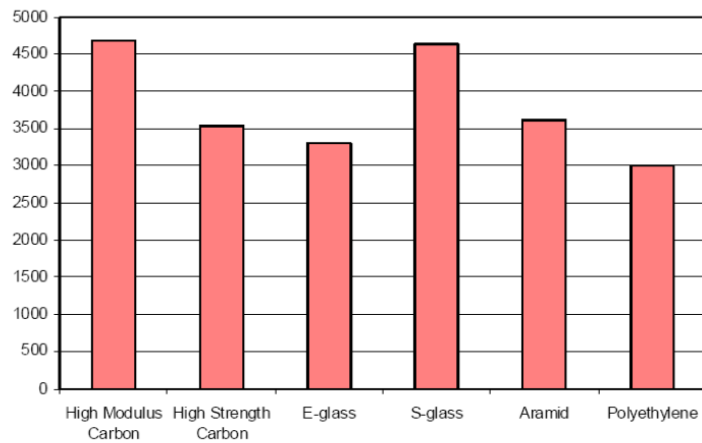
Πίνακας 1 Σχέση πυκνότητας ινών



Πίνακας 2 Σχέση κόστους ινών



Πίνακας 3 Σχέση μέτρου ελαστικότητας ινών



Πίνακας 4 σχέση ορίου αντοχής σε εφελκυσμό των ινών

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

### 1.3.6 Ίνες 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. Ολο και περισσότερες βιομηχανίες στρέφονται στην χρήση τους και η τιμή τους διαρκώς μειώνεται.

#### 1.3.6.1 Παραγωγή ινών άνθρακα

Περίπου το 90% των ινών άνθρακα που παράγονται προέχονται από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN). Το υπόλοιπο 10% προέρχεται κυρίως από ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) και πίσσα, η οποία παράγεται από πετρέλαιο. Όλα αυτά τα υλικά είναι οργανικά πολυμερή που χαρακτηρίζονται από μακριές λωρίδες μορίων συνδεδεμένων με δεσμούς άνθρακα. Η ακριβής σύνθεση των ινών ποικίλει 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 να πετύχουν συγκεκριμένες αντιδράσεις με τις ίνες και να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Από την άλλη συμμετέχουν και επιπλέον συστατικά που αποτρέπουν μη επιθυμητές αντιδράσεις.

Η διαδικασία παραγωγής των ινών είναι εν μέρει χημική και εν μέρει μηχανική. Ο precursor τραβιέται και μετατρέπεται σε μακρούς κλώνους (ή ίνες) και στην συνέχεια θερμαίνεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και απουσία οξυγόνου. 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 μόρια που δεν είναι άνθρακας να 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-οξειδωσης 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 γραφίτιοποίηση και η οποία βελτιώνει τις ιδιότητες που έχει αποκτήσει η ίνα από την διαδικασία της ενανθράκωσης.

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



*Εικόνα 20 Παραγωγή ινών άνθρακα*



### 1.3.6.2 Παραγωγή υφάσματος από ίνες άνθρακα

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

- Απλή ύφανση

Οι ίνες πλέκονται 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.

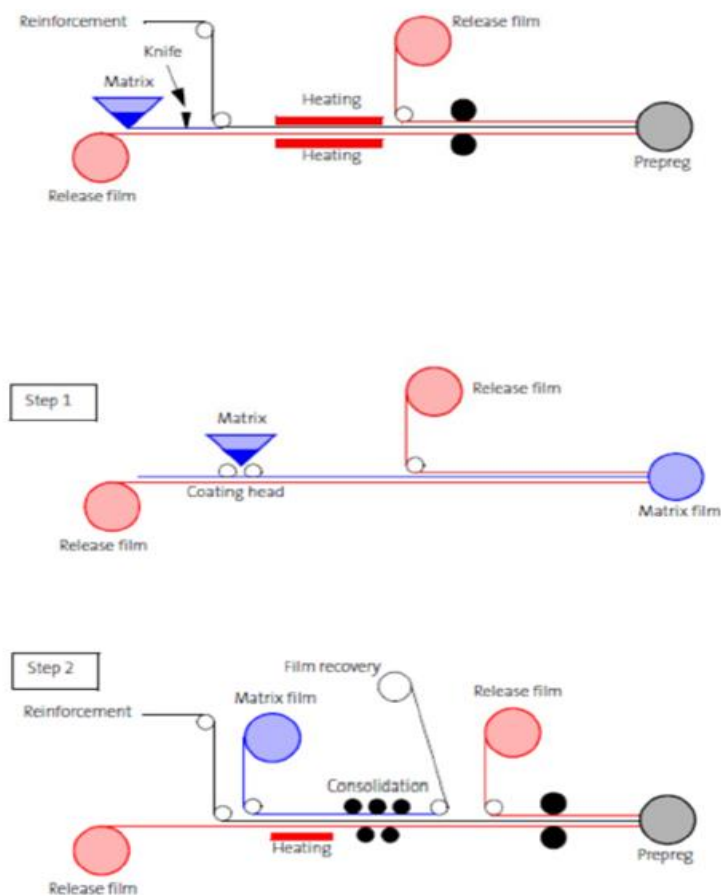
### 1.3.6.3 Εμποτισμός υφασμάτων με ρητίνη

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

Όσον αφορά στην παραγωγή του προ-εμποτισμένου υφάσματος υπάρχουν δυο μέθοδοι:

- Ένωση της ρητίνης και των ινών με θέρμανση.

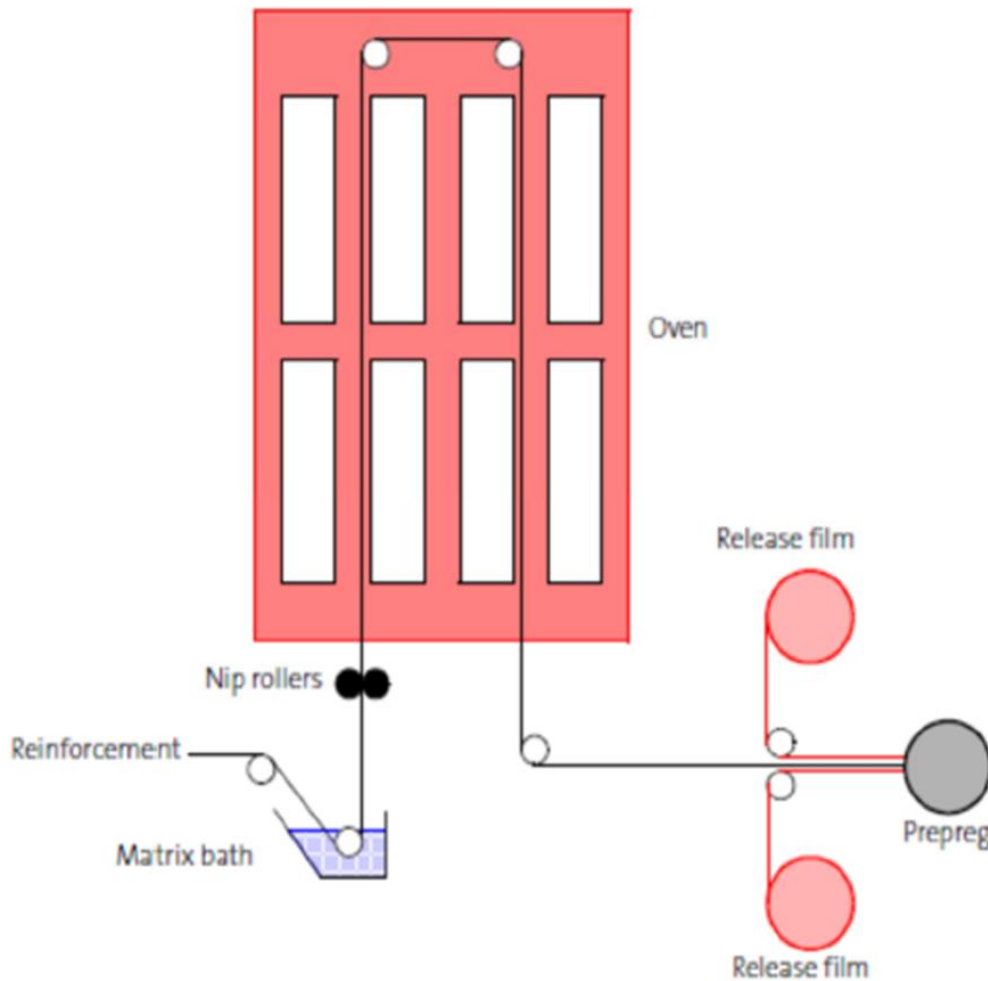
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να παραχθεί και μονοδιευθυντικό και πλεκτό ύφασμα. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η ζεστή ρητίνη στρώνεται σε ένα φύλο με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα λεπτό φιλμ. Το φιλμ αυτό έρχεται σε επαφή με τις ίνες και μέσω ραούλων και θερμικών επεργασιών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



Εικόνα 21 Ένωση ρητίνης – ινών με θέρμανση

- Ένωση της ρητίνης και των ινών σε λουτρό διαλύτη

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο για την παραγωγή του πλεκτού 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.



Εικόνα 22 Διαδικασία ένωσης ρητίνης – ινών σε λουτρό διαλύτη

#### 1.3.6.4 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 πίεσης 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 η πίεση μπορεί να φθάσει τα 8 bar και γι' αυτό το αποτέλεσμα είναι πολύ καλύτερης ποιότητας. Όμως το κόστος του φούρνου ελεγχόμενων συνθηκών είναι πολύ υψηλό και γι' αυτό είναι ακριβότερα και τα προϊόντα του. Η διαδικασία σακουλιάσματος κενού είναι η ίδια σε ελεγχόμενο και μη περιβάλλον πίεσης.

##### 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.
- Release film: 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 οπού μέσα του θα δημιουργηθεί το κενό.
- Sealant tape: 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 προ-εμποτισμένο 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 πρέσσας. 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 προεμπροτισμένο 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 προεμπροτισμένων υφασμάτων

### 1.3.6.5 Εφαρμογές ανθρακονημάτων

Το ανθρακόνημα χρησιμοποιείται σήμερα για την κατασκευή μερών ποδηλάτων, μοτοσικλετών, αυτοκινήτων, σκαφών, αεροπλάνων, διαστημοπλοίων, αναπηρικών αμαξιδίων, ακόμα και για τεράστιες κατασκευές όπως πολυώροφα κτήρια. Γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλές εφαρμογές, όμως εξαιτίας του υψηλού κόστους τώρα αρχίζει να γίνεται προσιτό στο ευρύ καταναλωτικό κοινό. Ιδανικό είναι το ανθρακόνημα για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη επιτάχυνση είτε υπάρχουν πολλά περιστρεφόμενα μέρη είτε πολύ μεγάλη μετακινούμενη μάζα. Γενικά όπου θα βοηθούσε η μείωση του βάρους με διατήρηση της απαιτούμενης αντοχής. Επίσης η ευχέρεια που προσφέρει η αρχική μορφή του ανθρακονήματος δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθούν έξυπνες κατασκευές, οι οποίες θα έχουν το ελάχιστο βάρος που απαιτείται (με τον ανάλογο συντελεστή ασφαλείας), θα είναι στιβαρές εκεί που πρέπει, απορροφητικές στους κραδασμούς σε άλλα σημεία, αεροδυναμικές κ.τ.λ.



Εικόνα 23 Ιστιοπλοϊκό σκάφος από ανθρακονήματα

## 1.4 CAD – CAM – CNC – FEA

### 1.4.1 CAD

Ο σχεδιασμός προϊόντος με την βοήθεια υπολογιστή (Computer - Aided - Design), έφερε επανάσταση στη μηχανολογία. Με την βοήθεια λογισμικών Cad μπορεί κανείς όχι μόνο να σχεδιάσει το προϊόν του και να παράγει τα απαραίτητα σχέδια για την κατασκευή του, αλλά και να το ελέγξει ως προς την αντοχή του στις αναμενόμενες καταπονήσεις, να ελέγξει τις όποιες ανοχές υπάρχουν, να κάνει δυναμική μελέτη, μελέτη μετάδοσης θερμότητας, μελέτη αεροδυναμικής και πολλές άλλες προσομοιώσεις και να καταλήξει σε κάποια βελτιστοποίηση γλιτώνοντας έτσι χρόνο και οικονομικούς πόρους. Από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά Cad στις μέρες μας είναι το Autocad, το Solidworks, το Parasolid και το Solidedge.

### 1.4.2 CAM

Cam ονομάζεται η κατασκευή με την βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Manufacturing). Αυτή περιλαμβάνει πολλές επιμέρους διαδικασίες όπως τον προγραμματισμό PLC, συσκευών ελέγχου ποιότητας κ.α. αλλά κυρίως τον προγραμματισμό CNC μηχανών.

### 1.4.3 CNC

Πρόκειται για έλεγχο μηχανών με την βοήθεια υπολογιστή (Computer Numerical Control). Μία εργαλειομηχανή για να θεωρείται CNC 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 (δοσμένη). 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



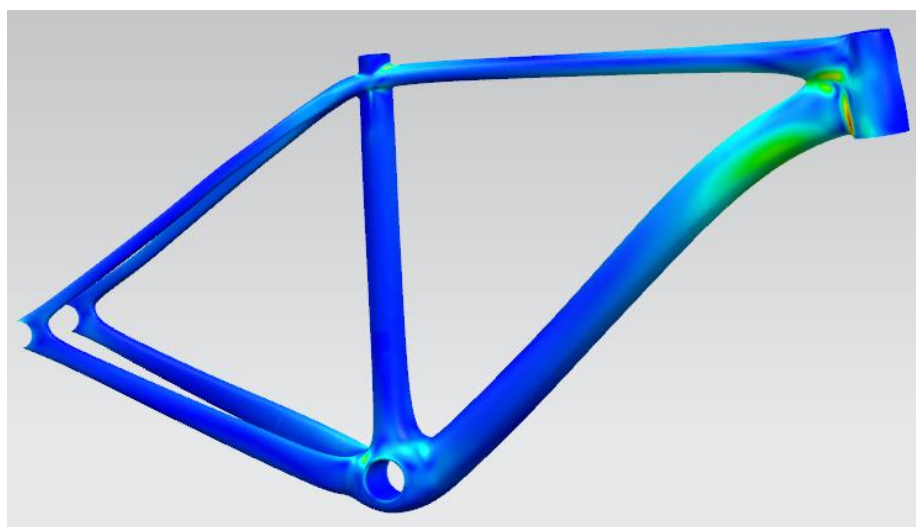
συνήθως είναι αρκετοί εκτός αν υπάρχουν γλυπτές επιφάνειες που τότε απαιτούνται παραπάνω (συνήθως πέντε).

Η CNC μηχανή μπορεί να εκτελέσει το πρόγραμμά της είτε ολόκληρο, είτε τμηματικά, είτε ανά εντολή. Σε περίπτωση επανάληψης μοτίβων υπάρχει δυνατότητα μετασχηματισμού του συστήματος συντεταγμένων, ώστε να απλοποιηθεί η διαδικασία του προγραμματισμού. Για την απλοποίηση της αρχικοποίησης της διαδικασίας μπορεί να χρησιμοποιηθούν συστήματα αυτόματου προσδιορισμού θέσης τεμαχίου. Τα συστήματα αυτά βοηθούν και στον έλεγχο της μηχανής. Έτσι διαπιστώνονται τακτικά σφάλματα και διορθώνονται. Άλλος ένας τρόπος απλοποίησης του προγραμματισμού είναι η αποθήκευση των χαρακτηριστικών των εργαλείων, για να είναι δυνατή η αντιστάθμιση του κοπτικού ώστε να μην χρειάζεται να παίρνει συνέχεια αναφορά η μηχανή. Επίσης ο χειριστής μπορεί ανά πάσα στιγμή να διακόψει τη διαδικασία αλλά και να επέμβει-τροποποιήσει τον κώδικα G. Πολλή προσοχή πρέπει επίσης να δοθεί στη σωστή αρχικοποίηση της μηχανής, στο μηδενισμό, στον ορισμό του ύψους των εργαλείων κοπής κ.α. Καλή εποπτεία της επικείμενης κοπής δίνεται από την προσομοίωση της διαδικασίας σε γραφικό περιβάλλον. Για την καλή λειτουργία του μηχανήματος και καλό παραγόμενο προϊόν πρέπει να υπάρχει εμφάνιση της κατάστασης της μηχανής στην οθόνη του χειριστή ώστε να προλαμβάνονται ατυχήματα ή προβλήματα στη παραγωγή.

#### 1.4.4 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 τείνει να ξεπεραστεί. Για να γίνει μια ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να εισαχθεί η γεωμετρία του μοντέλου σε μορφή cad.



Εικόνα 24 Ανάλυση σκελετού με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

## 2. Σχεδιασμός

Στόχος ήταν ο σχεδιασμός ενός ανθρακονημάτινου σκελετού αγωνιστικού ποδηλάτου ορεινής ποδηλασίας σε δύο διαφορετικά μεγέθη. Η πρώτη κίνηση ήταν ο έλεγχος της αγοράς και των προϊόντων που ήταν κορυφαία την περίοδο που ξεκίνησε η εκπόνηση της εργασίας. Σύντομα προέκυψε ότι οι περισσότερες εταιρίες φτιάχνουν τον σκελετό σε διαφορετικά κομμάτια, συνήθως τρία (3), τα οποία στην συνέχεια ενώνονται με ειδική κόλλα. Επίσης, συγκεκριμένα στοιχεία, όπως τα νύχια, ήταν φτιαγμένα από αλουμίνιο και στη συνέχεια κολλημένα πάνω στον ανθρακονημάτινο σκελετό.

### 2.1 Γεωμετρικές προδιαγραφές

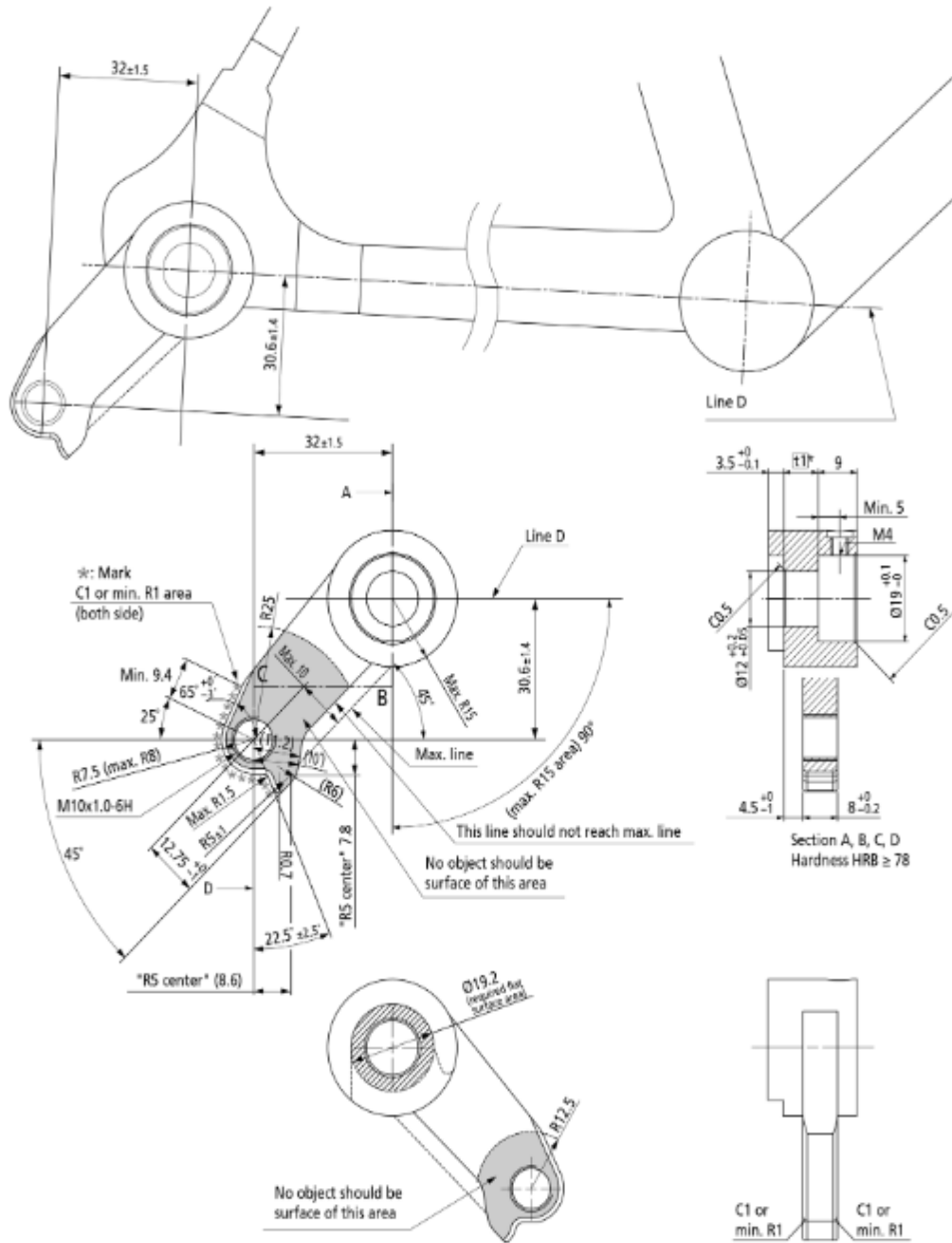
Αρχικά πρέπει να αποσαφηνιστεί το μοντέλο που θέλουμε να σχεδιάσουμε. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τον σχεδιασμό είναι οι εξής:

- Πάχος ελαστικού στον πίσω άξονα ( αφού δεν σχεδιάζεται και το πηρούνι με την ανάρτηση μπροστά δεν μας απασχολεί το πάχος του μπροστινού ελαστικού)
- Διάμετρος του παλουκόσελου
- Τρόπος σύνδεσης του παλουκόσελου με το seat tube
- Το άνοιγμα του πίσω άξονα (142 mm ή 148 mm)
- Ο τρόπος σύνδεσης του δισκόφρενου με τον σκελετό
- Μέγεθος του δίσκου για τα δισκόφρενα
- Το είδος του dropout στο πίσω δεξί νύχι
- Το είδος του μπροστινού derailleur

Έχοντας υπ' όψιν τα προϊόντα που ήδη κυκλοφορούν στην αγορά αποφασίστηκε :

- Το ελαστικό του πίσω άξονα να είναι 29" σε διάμετρο και σε πάχος να είναι τουλάχιστον 2" με σκοπό να μπει το δυνατόν πιο πλατύ.
- Το παλουκόσελο που θα χρησιμοποιηθεί να είναι διαμέτρου 27.2 mm, καθώς όντας πιο «μαλακό» θα βοηθήσει στην απορρόφηση κραδασμών αφού δεν υπάρχει πίσω ανάρτηση, και να στερεώνεται πάνω στον σκελετό με κολλάρο, άρα το seat tube στο πάνω μέρος του θα πρέπει να έχει κυκλική διάμετρο 31.8 mm έτσι ώστε να εφαρμόζουν τα κολλάρα που κυκλοφορούν στην αγορά.
- Το άνοιγμα του πίσω άξονα δεν διευκρινίστηκε αρχικά, οπότε δοκιμάστηκαν και οι δύο περιπτώσεις σε διαφορετικά σχέδια, αν και στο τέλος επιλέχθηκε το άνοιγμα 148 mm καθώς εκεί φαίνεται να κινείται η αγορά.
- Το δισκόφρενο να συνδέεται με τον σκελετό στο αριστερό chain stay και ο δίσκος να είναι 160 mm σε διάμετρο.
- Το dropout στο πίσω δεξί νύχι να είναι τύπου E-thru.
- Το μπροστινό derailleur να είναι τύπου direct mount.

 **E-thru type (O.L.D. 142 mm / 148 mm)**

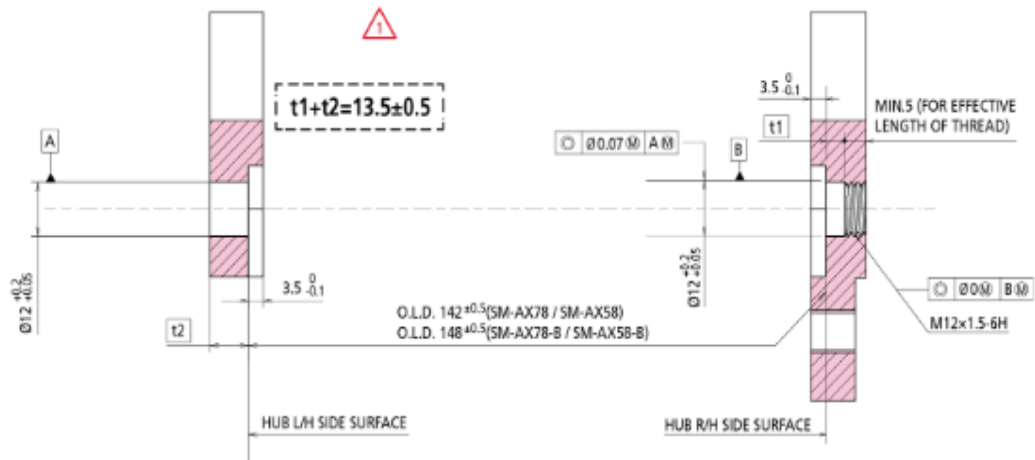


Εικόνα 25 Διαστάσεις για το dropout στο πίσω δεξί νύχι από τα εγχειρίδια της Shimano

## Rear E-thru system C-025

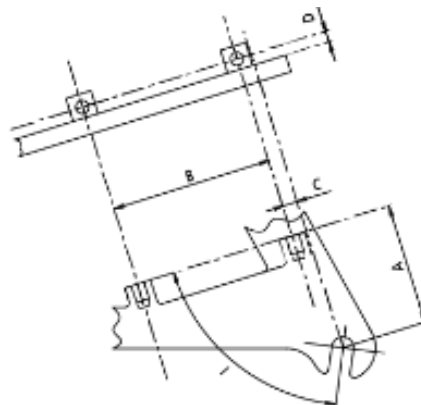
SM-AX78 / SM-AX58(O.L.D. 142mm, I-type)

SM-AX78-B / SM-AX58-B(O.L.D. 148mm, I-type)



- Total dropout thickness  $t_1 + t_2$  should be in  $13.5 \pm 0.5$  mm.
- Upper drawing shows an example of dropout. Please design and consider for dropout as a whole by your frame design.
- Total axle length (refer to [C-265](#))

Εικόνα 26 Διαστάσεις στα νύχια για το σύστημα Rear E-thru



### Dimensions of rear post mount of disc brake caliper

	Model No.	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Dimension			Min. E (mm)
					D (mm)			
					O.L.D. 135, 150 mm straight and BMX type	O.L.D. 142 mm E-thru type	O.L.D. 148mm E-thru type	
Wiring type	BR-M9000							10.0
	BR-M9020							11.0
Cap type	BR-M820							11.5
	BR-M8000							10.0
	BR-M7000							10.0
	BR-T675							11.5
	BR-M640							11.5
	BR-M615							9.0
	BR-T615	140 mm (S): 47.5 ± 0.1	140 mm (S): 74.2 ± 0.1	140 mm (S): 1.7 ± 0.1	140 mm (S): 5.7 ± 0.3 - 1.3	140 mm (S): 9.2 ± 0.3 - 1.3	140 mm (S): 9.2 ± 0.3 - 1.3	11.5
	BR-M4050							11.5
	BR-M3050							11.5
	BR-M447	160 mm (S): 55.9 ± 0.1	160 mm (S): 74.2 ± 0.1	160 mm (S): 6.3 ± 0.1	160 mm (S): 5.7 ± 0.3 - 1.3	160 mm (S): 9.2 ± 0.3 - 1.3	160 mm (S): 9.2 ± 0.3 - 1.3	11.5
	BR-M446							11.5
	BR-M416A	180 mm (M): 64.0 ± 0.1	180 mm (M): 74.2 ± 0.1	180 mm (M): 12.4 ± 0.1	180 mm (M): 5.7 ± 0.3 - 1.3	180 mm (M): 9.2 ± 0.3 - 1.3	180 mm (M): 9.2 ± 0.3 - 1.3	11.0
	BR-M395							11.5
	BR-M375	203mm (L): 73.9 ± 0.1	203mm (L): 74.2 ± 0.1	203mm (L): 18.8 ± 0.1	203mm (L): 5.7 ± 0.3 - 1.3	203mm (L): 9.2 ± 0.3 - 1.3	203mm (L): 9.2 ± 0.3 - 1.3	11.0
	BR-M385							11.5
	BR-M315							11.5
	BR-TX805							11.0
	BR-5700							10.0
	BR-R5785							10.0
	BR-R785							10.0
BR-CK77							11.0	
BR-R517							11.0	
BR-R317							11.0	

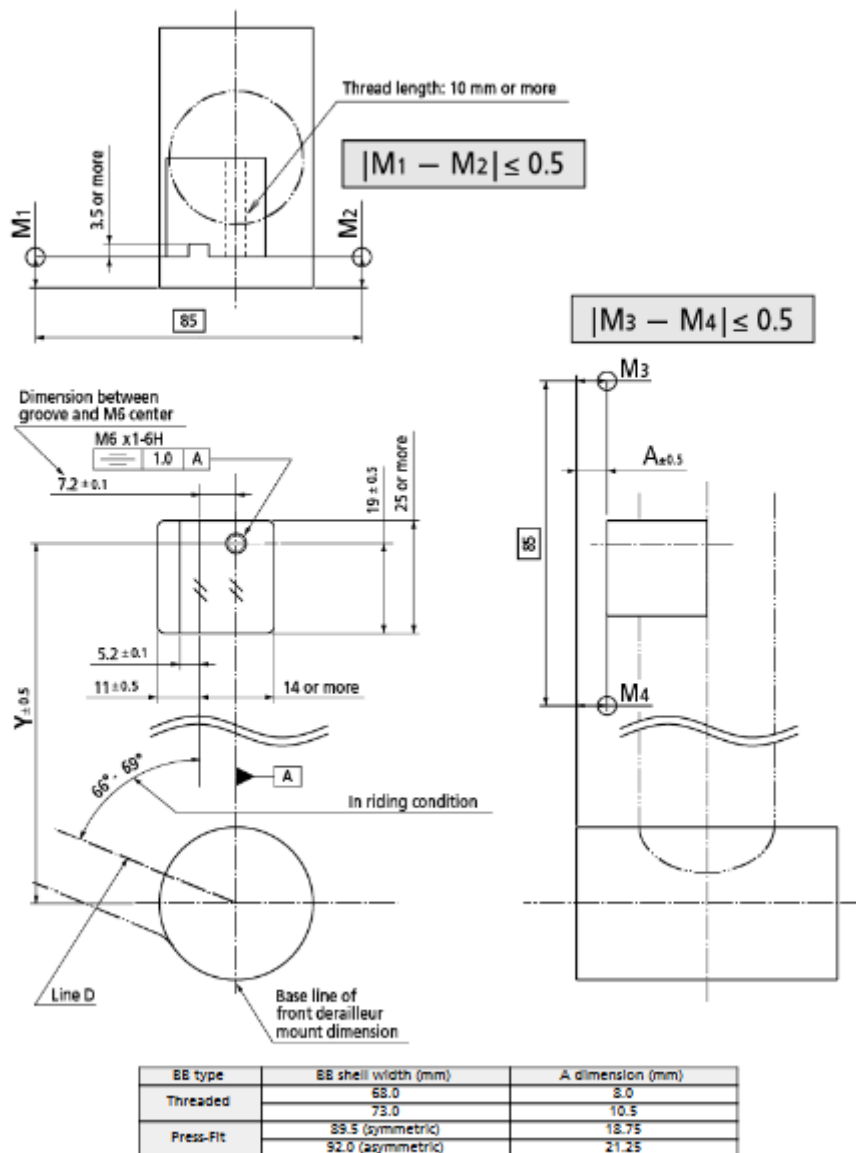
Εικόνα 27 Διαστάσεις και περιορισμοί για βάση δισκόφρενου στα chain stays ανάλογα με τη διάμετρο του δίσκου

## Direct mount type [MTB]

C-050

### Frame requirement and compatibility [MTB] C-051

Please refer to Shimano recommended MTB direct mount part on seat tube below.



Εικόνα 28 Διαστάσεις για μπροστινό derailleur τύπου direct mount

Έχοντας υπ' όψιν τις παραπάνω προδιαγραφές προχωρήσαμε στη δημιουργία κάποιων αρχικών σχεδίων.

## 2.2 Δημιουργία σχεδίων

Βασική προϋπόθεση στο σχέδιο ήταν οι επιφάνειες που σχεδιάσθηκαν να έχουν συνέχεια G2 (curvature). Αυτό ήταν απαραίτητο έτσι ώστε κατά την κατασκευή του καλουπιού να μην υπάρχουν υπερακοντίσεις στη μηχανή CNC.

Καθώς το σχήμα ενός σκελετού είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και με τον κλασσικό σχεδιασμό η διαδικασία, αν και επιτεύξιμη, θα ήταν πολύ χρονοβόρα, επιλέχθηκε η εφαρμογή του SEIMENS NX realize shape για το σχεδιασμό κάθε διαφορετικού μοντέλου του σκελετού. Το βασικό μειονέκτημα της εφαρμογής realize shape είναι ότι, παρότι παράγει επιφάνειες με G2 συνέχεια, δεν έχει μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις, για παράδειγμα δεν μπορεί να παράγει ακριβώς έναν κύλινδρο με συγκεκριμένη διάμετρο. Γι' αυτό τον λόγο σε συγκεκριμένα σημεία, όπως στο πάνω μέρος του seat tube ή στα νύχια χρησιμοποιήθηκε κλασσικός σχεδιασμός τοπικά και τα κομμάτια αυτά ενώθηκαν στη συνέχεια με τον υπόλοιπο σκελετό που είχε παραχθεί με realize shape.

### 2.2.1 Επιλογή βασικής γεωμετρίας

Το πρώτο στάδιο του σχεδιασμού αποτέλεσε η επιλογή μιας αρχικής βασικής γεωμετρίας. Ως βασική γεωμετρία εννοείται το μήκος των διαφόρων κομματιών του σκελετού καθώς και οι μεταξύ τους γωνίες. Το κορυφαίο μοντέλο στην κατηγορία σκελετών ορεινής ποδηλασίας χωρίς πίσω ανάρτηση την περίοδο του Μαρτίου ήταν το μοντέλο Stumpjumper της εταιρίας Specialized. Έτσι χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία του μοντέλου αυτού ως η βασική γεωμετρία για την παραγωγή των δικών μας μοντέλων. Συνοπτικά, τα βασικά μεγέθη για τα μεγέθη L και M φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μεγέθη	L	M
stack (mm)	625	610
reach (mm)	437	414
bb drop (mm)	61	61
head tube length (mm)	115	100
head tube angle (°)	71	71
seat tube length (mm)	470	434
seat tube angle (°)	74	74
chain stays length (mm)	430	430
wheelbase (mm)	1128	1099
fork length (mm)	496	496

Πίνακας 5 Τιμές μεγεθών για L και M

Με βάση τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά παράχθηκε το πρώτο μοντέλο μεγέθους L. Το μοντέλο αυτό προσπαθήσαμε να μοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο στο μοντέλο Stumpjumper της Specialized. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο στήθηκαν οι προσομοιώσεις των τεστ που θα πρέπει να περνάει ο σκελετός σύμφωνα με το σύστημα ISO.



*Εικόνα 29 Stumpjumper hardtail*

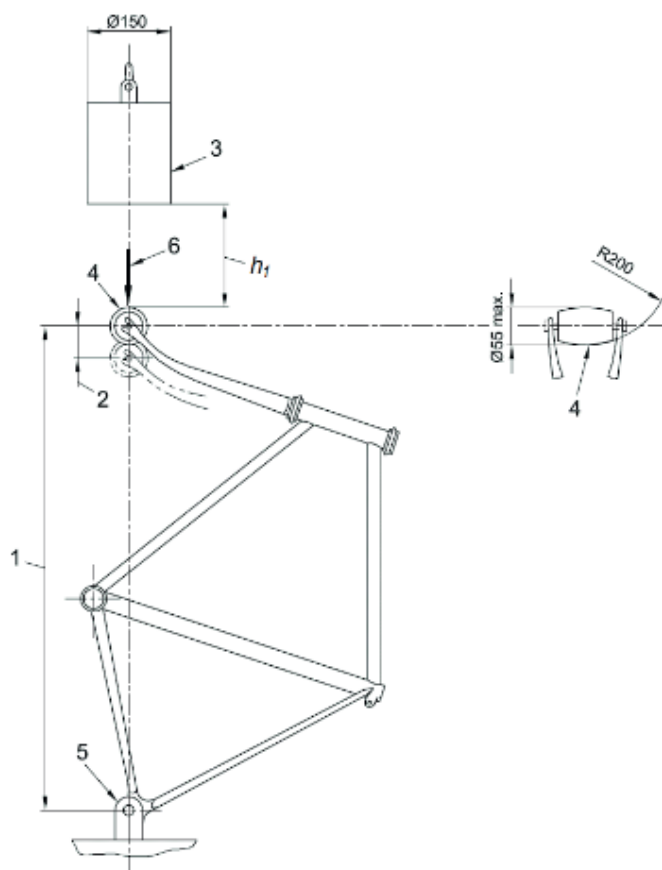


*Εικόνα 30 Πρώτο σχέδιο σκελετού με βάση το Stumpjumper*

## 2.3 Προδιαγραφές ISO(2231332 ISO 4210-6)

### 1. Τεστ πρόσκρουσης – Πίπτουσα μάζα ( Impact test – Falling mass)

Για το τεστ αυτό χρησιμοποιείται ένα ομοίωμα πηρουνιού (dummy fork) το οποίο τοποθετείται στη θέση του μπροστινού πηρουνιού. Το σύστημα σκελετού – πηρουνιού τοποθετείται κατακόρυφα και πακτώνεται στις θέσεις πρόσδεσης του πίσω άξονα. Μια μάζα βάρους 22,5 κιλών τοποθετείται σε επαφή με την άκρη του ομοιώματος πηρουνιού και μετράται η απόσταση του πίσω άξονα από τον άξονα του κυλίνδρου στο κάτω μέρος του ομοιώματος πηρουνιού. Στη συνέχεια η μάζα υψώνεται σε ύψος 360 mm από την άκρη του ομοιώματος πηρουνιού και αφήνεται να προσκρούσει στο πηρούνι. Η μάζα θα αναπηδήσει και αυτό είναι αναμενόμενο. Μόλις η μάζα ηρεμήσει πάνω στο ομοίωμα μετράται και πάλι η απόσταση του πίσω άξονα με τον άξονα του κυλίνδρου στο κάτω μέρος του ομοιώματος.



#### Key

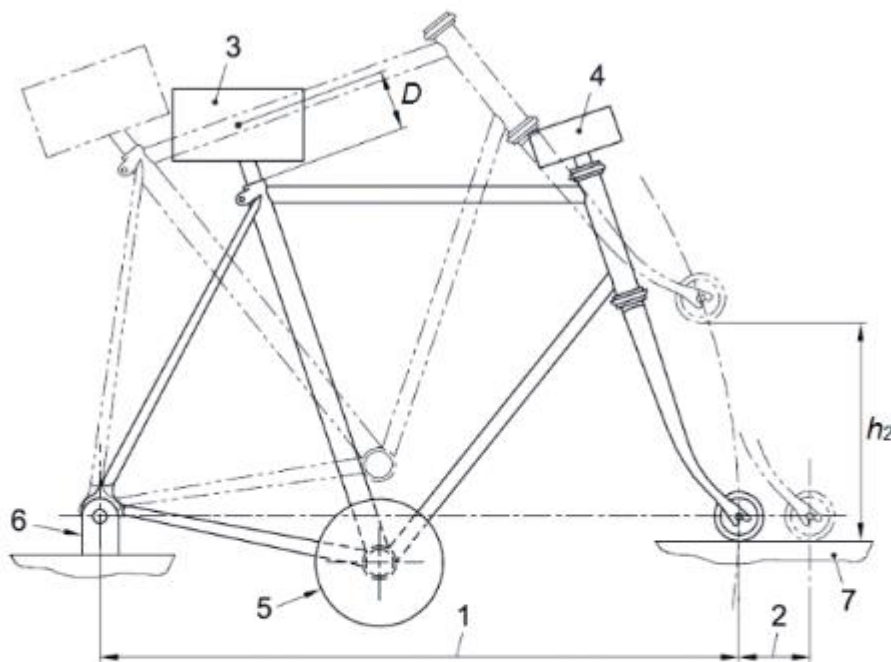
- $h_1$  drop height
- 1 wheelbase
- 2 permanent deformation
- 3 22,5 kg striker
- 4 low-mass roller (1 kg max.)
- 5 rigid mounting for rear-axle attachment point
- 6 direction of rearward impact

Εικόνα 31 τεστ πίπτουσας μάζας



## 2. Τεστ πρόσκρουσης – πτώση σκελετού ( Impact test – falling frame)

Για αυτό το τεστ τοποθετείται ξανά το ομοίωμα πηρουνιού. (Χάριν ευκολίας αντί για ομοίωμα πηρουνιού θα λέμε πηρούνι από εδώ και στο εξής.) Το σύστημα σκελετού – πηρουνιού στηρίζεται στον πίσω άξονα του σκελετού, με τρόπο τέτοιοιον ώστε να μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον άξονα αυτόν. Το πηρούνι τοποθετείται έτσι ώστε το κάτω μέρος του να ακουμπάει σε ένα επίπεδο χαλύβδινο αμώνι και ο σκελετός να είναι στην κανονική θέση χρήσης του. Τοποθετείται μάζα 30 κιλών στο παλουκόσελο, της οποίας το κέντρο βάρους βρίσκεται σε απόσταση 75 mm από το σημείο πρόσδεσης κατά μήκος του άξονα του παλουκόσελου. Επιπλέον πακτώνεται μάζα 10 κιλών στην κορυφή του άξονα πρόσδεσης του πηρουνιού και μάζα 50 κιλών στη μεσαία τριβή. Μετράται η απόσταση του πίσω άξονα από τον μπροστά άξονα (δηλαδή τον άξονα του κυλίνδρου στο κάτω μέρος του ομοιώματος πηρουνιού). Το σύστημα σκελετού-πηρουνιού-μαζών περιστρέφεται γύρω από τον πίσω άξονα μέχρι η απόσταση του κυλίνδρου στο κάτω μέρος του πηρουνιού από το αμώνι να είναι 300mm και στη συνέχεια αφήνεται να προσκρούσει πάνω στο αμώνι. Μετράται ξανά η απόσταση πίσω άξονα με μπροστινό άξονα.



### Key

- 1 wheelbase
- 2 permanent deformation
- 3 mass 1 ( $M_1$ )
- 4 mass 2 ( $M_2$ )
- 5 mass 3 ( $M_3$ )
- 6 rigid mounting for rear-axle attachment point
- 7 steel anvil
- $D$  distance to the centre of gravity (75 mm)
- $h_2$  drop height

Εικόνα 32 Τεστ πτώσης σκελετού

### 3. Τεστ κοπώσεως με δυνάμεις πεταλαρίσματος ( Fatigue test with pedaling forces)

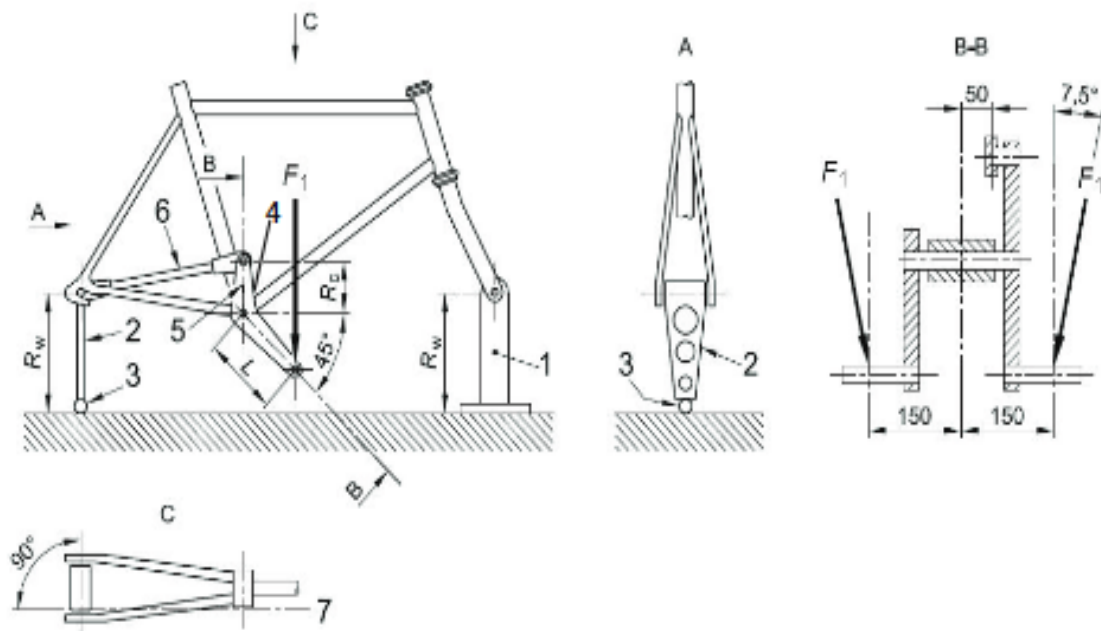
Χρησιμοποιείται ένα νέο σύστημα σκελετού – πηρουνιού με τυπικά ρουλεμάν στο head tube. Το πηρούνι μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ομοίωμα ίδιου μήκους και σκληρότητας με το κανονικό.

Ο σκελετός τοποθετείται όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω με τον άξονα στο κάτω μέρος του πηρουνιού στερεωμένο σε άκαμπτο στοιχείο συγκεκριμένου ύψους με τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από αυτόν τον άξονα. Στο πίσω μέρος του σκελετού (στα dropouts) εφαρμόζεται άξονας ο οποίος στηρίζεται με έναν άκαμπτο κάθετο σύνδεσμο ίδιου ύψους με τον μπροστινό. Ο σκελετός μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον πίσω άξονα. Ο άκαμπτος σύνδεσμος έχει στο κάτω μέρος του σφαιρική άρθρωση με το δάπεδο.

Για την εφαρμογή των δυνάμεων χρησιμοποιείται ένα σύστημα. Το σύστημα αυτό μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον άξονα της μεσαίας τριβής (bottom bracket). Το ομοίωμα της πεταλιέρας θα πρέπει να έχει προεκτάσεις μήκους 175 mm τοποθετημένες σε γωνία 45 μοιρών από το οριζόντιο επίπεδο με κατεύθυνση μπροστά και κάτω. Πάνω στο ομοίωμα της πεταλιέρας υπάρχει και μία επιπλέον κατακόρυφη προεξοχή μήκους 75 mm. Στην άκρη της κατακόρυφης προεξοχής υπάρχει ένας μικρός άξονας πάνω στον οποίον δένεται μια ράβδος, που στο άλλο της άκρο είναι συνδεδεμένη με τον πίσω άξονα του σκελετού. Η αξονική της ράβδου είναι παράλληλη με το επίπεδο συμμετρίας του σκελετού και απέχει από αυτό 50 mm.

Εφαρμόζεται σε κάθε πετάλι δύναμη 1200 N προς τα κάτω σε απόσταση 150 mm από την αξονική του σκελετού και στραμμένη κατά 7,5 μοίρες προς τα μέσα.

Οι δυνάμεις εφαρμόζονται για 100000 κύκλους, όπου σε κάθε κύκλο ο σκελετός υφίσταται και τις δύο δυνάμεις εναλλάξ. Η μέγιστη συχνότητα εφαρμογής των δυνάμεων είναι 1 Hz όπως διευκρινίζεται στο ISO 4210-3:2014, 4.5.



#### Key

- $R_w$  height of rigid mount and vertical link
- $R_c$  length of vertical arm (75 mm)
- $L$  length of crank replacement (175 mm)
- 1 rigid mount
- 2 vertical link
- 3 ball joint
- 4 adaptor assembly
- 5 vertical arm
- 6 tie rod
- 7 centreline of tie rod

Εικόνα 33 Τεστ κοπώσεως με δυνάμεις πατελαρίσματος

#### 4. Τεστ κοπώσεως με οριζόντιες δυνάμεις (Fatigue test with horizontal forces)

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ομοίωμα πηρουιού ίδιου μήκους με το πραγματικό και κατάλληλα προσδεμένου στο head tube μέσω ρουλεμάν.

Ο σκελετός τοποθετείται στην κανονική θέση χρήσης του και στηρίζεται στον πίσω άξονα έτσι ώστε να μπορεί να περιστραφεί. Ο μπροστινός και ο πίσω άξονας βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Εφαρμόζονται κύκλοι δυναμικών οριζόντιων δυνάμεων 1200 N προς τα μπρος και 600 N προς τα πίσω για 50000 κύκλους. Το πηρούνι είναι δεν μπορεί να κινηθεί κατακόρυφα αλλά μπορεί να κινηθεί μπρος και πίσω υπό τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Η μέγιστη συχνότητα εφαρμογής των δυνάμεων είναι 1 Hz όπως διευκρινίζεται στο ISO 4210-3:2014, 4.5.



##### Key

- 1 free-running guided roller
- 2 rigid, pivoted mounting for rear-axle attachment point

Εικόνα 34 Τεστ κοπώσεως με οριζόντιες δυνάμεις

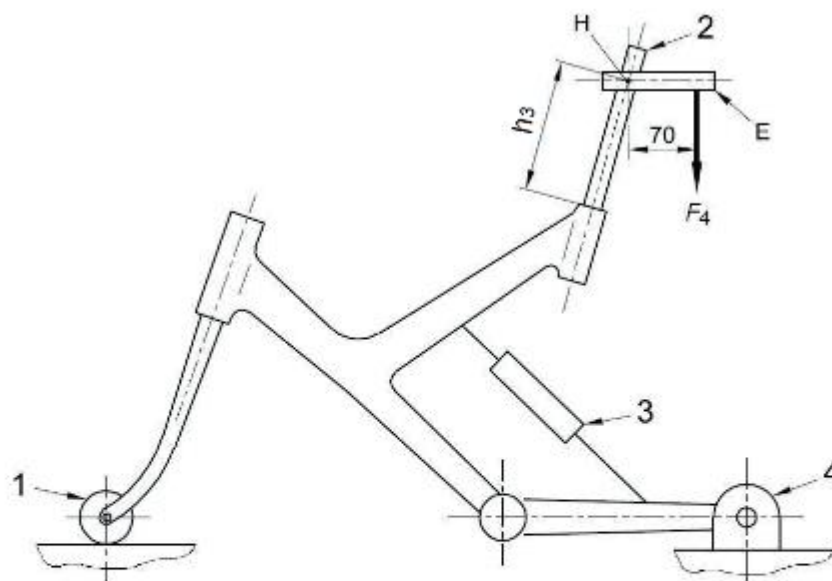
## 5. Τεστ κοπώσεως με κάθετη δύναμη (Fatigue test with a vertical force)

Και πάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ομοίωμα πηρουιού ίδιο με το προηγούμενο τεστ.

Ο σκελετός τοποθετείται στην κανονική του θέση και στηρίζεται στον πίσω άξονα έτσι ώστε να μπορεί να περιστραφεί. Το ομοίωμα πηρουιού έχει κατάλληλη διαμόρφωση στο άκρο του έτσι ώστε ο σκελετός να μπορεί να καμφθεί υπό την εφαρμοζόμενη δύναμη.

Τοποθετείται ομοίωμα παλουκόσελου από χάλυβα στο ελάχιστο μήκος εισχώρησης στο seat tube και ασφαρίζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Τοποθετείται μια οριζόντια προέκταση στην κορυφή του παλουκόσελου προς τα πίσω. Το μήκος της προεξοχής είναι τέτοιο που το σημείο ένωσης της προεξοχής και του παλουκόσελου είναι το ίδιο με το κέντρο του στοιχείου σύνδεσης της σέλας.

Εφαρμόζονται κύκλοι κόπωσης με κατακόρυφη δύναμη 1200 N σε απόσταση 70 mm πίσω από το σημείο που συναντώνται ο άξονας του παλουκόσελου και της προέκτασης για 50000 κύκλους. Η μέγιστη συχνότητα εφαρμογής των δυνάμεων είναι 1 Hz όπως διευκρινίζεται στο ISO 4210-3:2014, 4.5.



### Key

- E horizontal, rearward extension
- H position equivalent to that of the centre of the saddle clamp with the bicycle
- 1 free-running roller
- 2 steel bar
- 3 locked suspension unit or solid link for pivoted chain stays
- 4 rigid, pivoted mounting for rear axle attachment point

Εικόνα 35 Τεστ κοπώσεως με κατακόρυφη δύναμη

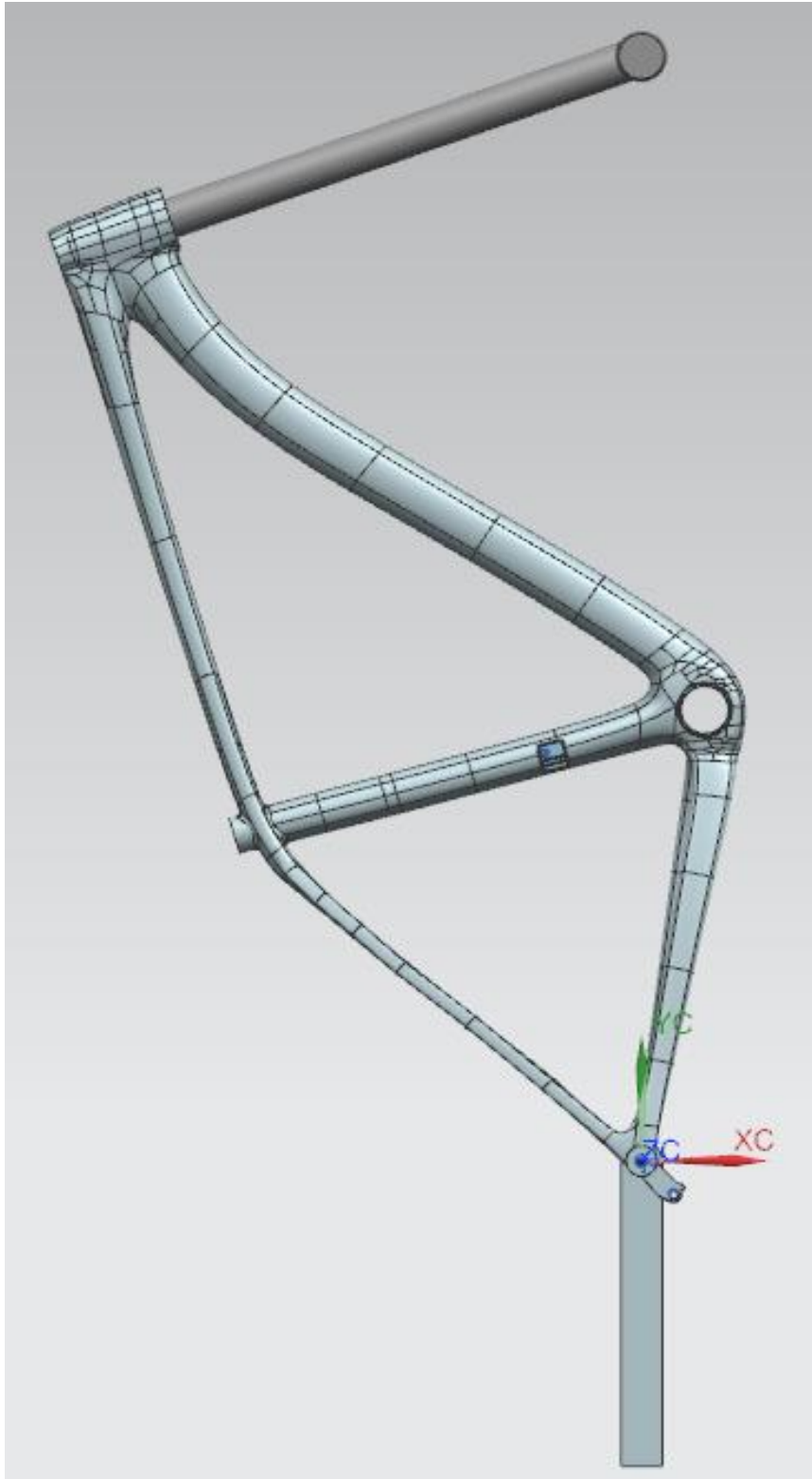
## 2.4 Έλεγχος προδιαγραφών με αλουμίνιο

Σε πρώτη φάση θα πρέπει να ελέγξουμε κατά πόσο αλλάζουν τα αναπτυσσόμενα φορτία στα διαφορετικά μοντέλα. Κατά τον έλεγχο αυτόν, επιλέγεται ως υλικό για τον σκελετό το αλουμίνιο 7075 πάχους 1 mm, ενώ ο σκελετός κάθε φορά μοντελοποιείται ως κέλυφος (shell). Για καλύτερα αποτελέσματα επιλέγεται πυκνό πλέγμα τύπου CTRIA3, όπου το μέγεθος του στοιχείου επιλέγεται να είναι 1.5 mm.

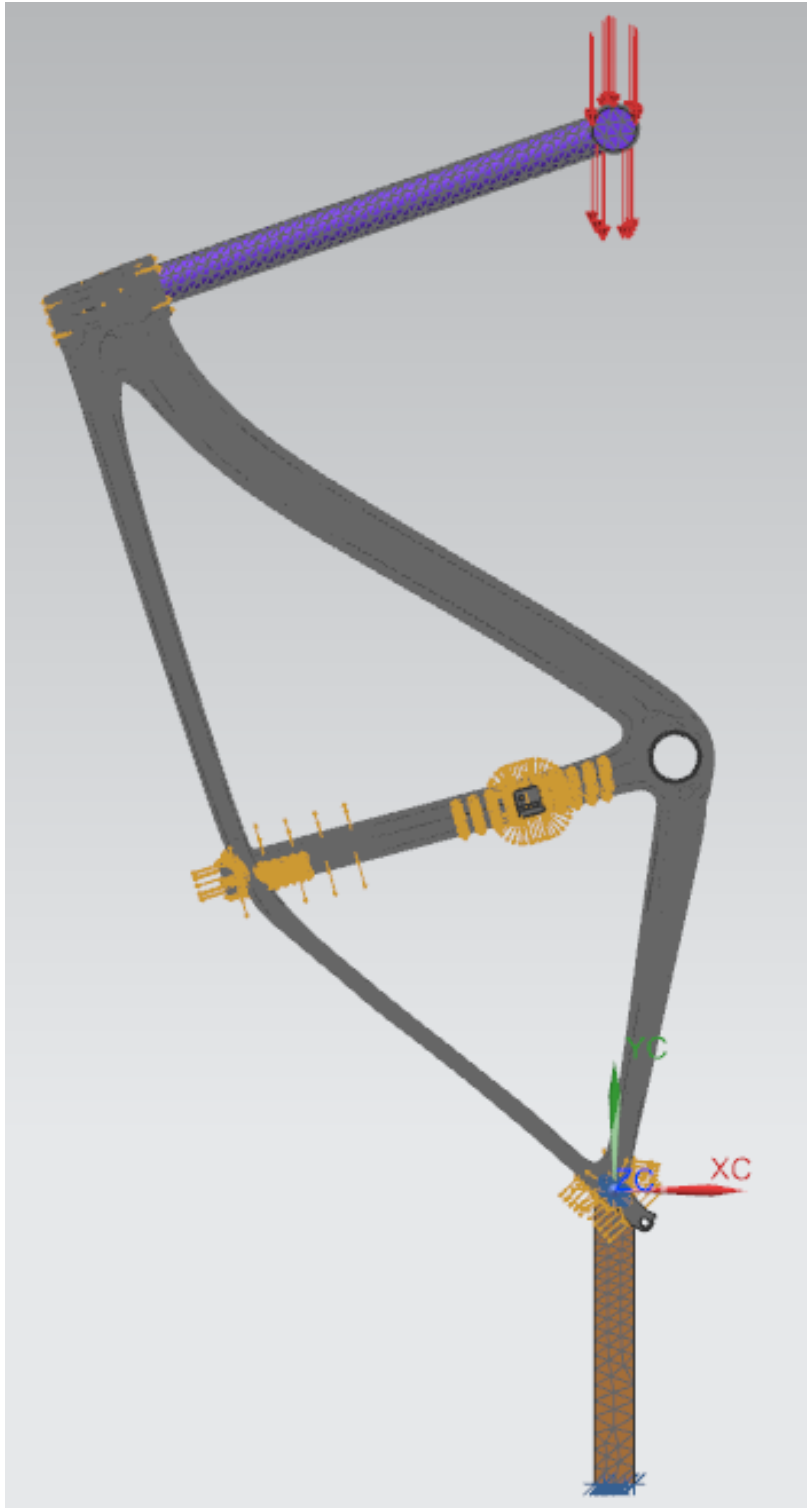
Με βάση τα τεστ του ISO που αναλύθηκαν παραπάνω παράχθηκαν προσομοιώσεις. Χάριν ευκολίας όλα τα τεστ μοντελοποιήθηκαν ως απλά στατικά και χρησιμοποιήθηκε ο solver 101 του προγράμματος. Επιπλέον, λόγω κάποιων σφαλμάτων και bugs του προγράμματος έγιναν κάποιες απλοποιήσεις ειδικά στο κομμάτι των επαφών έτσι ώστε να παραχθούν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

### 1. Τεστ πρόσκρουσης – Πίπτουσα μάζα ( Impact test – Falling mass)

Το τεστ αυτό παρουσίασε από την αρχή μια δυσκολία κατά την προσομοίωση καθώς το πρόγραμμα εμφάνιζε σφάλματα κατά την ρίψη της μάζας και την κρούση της με την άκρη του ομοιώματος πηρουνιού. Αφού όμως τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν για σύγκριση των σχεδίων και όχι για πλήρη προσομοίωση του φαινομένου, στο πρόγραμμα SEIMENS NX αντικαταστάθηκε η πίπτουσα μάζα με δύναμη 1000 N στο κάτω άκρο του πηρουνιού. Επιπλέον, επειδή κατά την εφαρμογή απλών surface to surface επαφών προέκυπταν μη αποδεκτά αποτελέσματα (εισχωρούσε το ένα κομμάτι μέσα στο άλλο) χρησιμοποιήθηκε glue contact surface to surface η οποία παρότι δεν είναι ακριβώς αυτό που αναφέρεται στο ISO είναι μια καλή προσέγγιση για τη συγκεκριμένη φάση. Κατά την επίλυση χάριν ευκολίας χρησιμοποιήθηκε ο solver 101.



Εικόνα 36 Assembly σκελετού – ομοιώματος πηρουνιού – πίσω άξονα – στηρίγματος πίσω άξονα



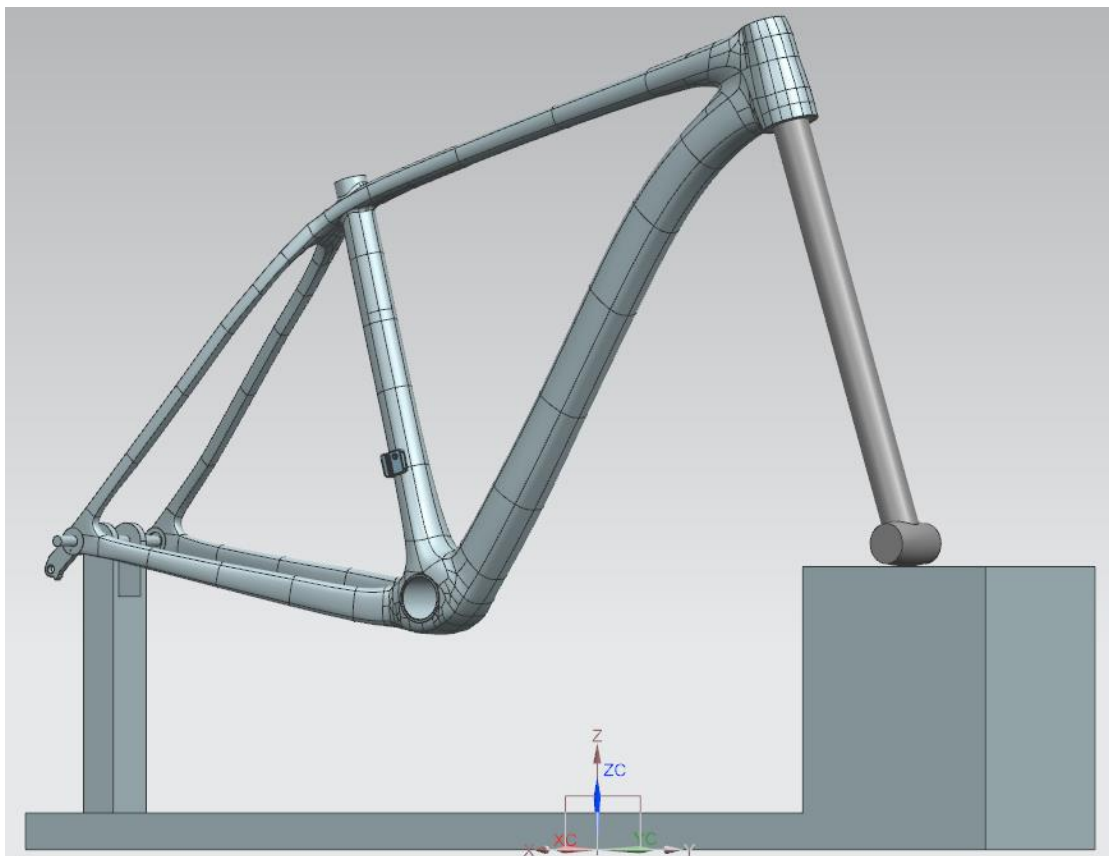
*Εικόνα 37 Απεικόνιση της προσομοίωσης για το τεστ πίπτουσας μάζας*

Τα κόκκινα βέλη αντιπροσωπεύουν την ασκούμενη δύναμη, ενώ τα κίτρινα τις επαφές.

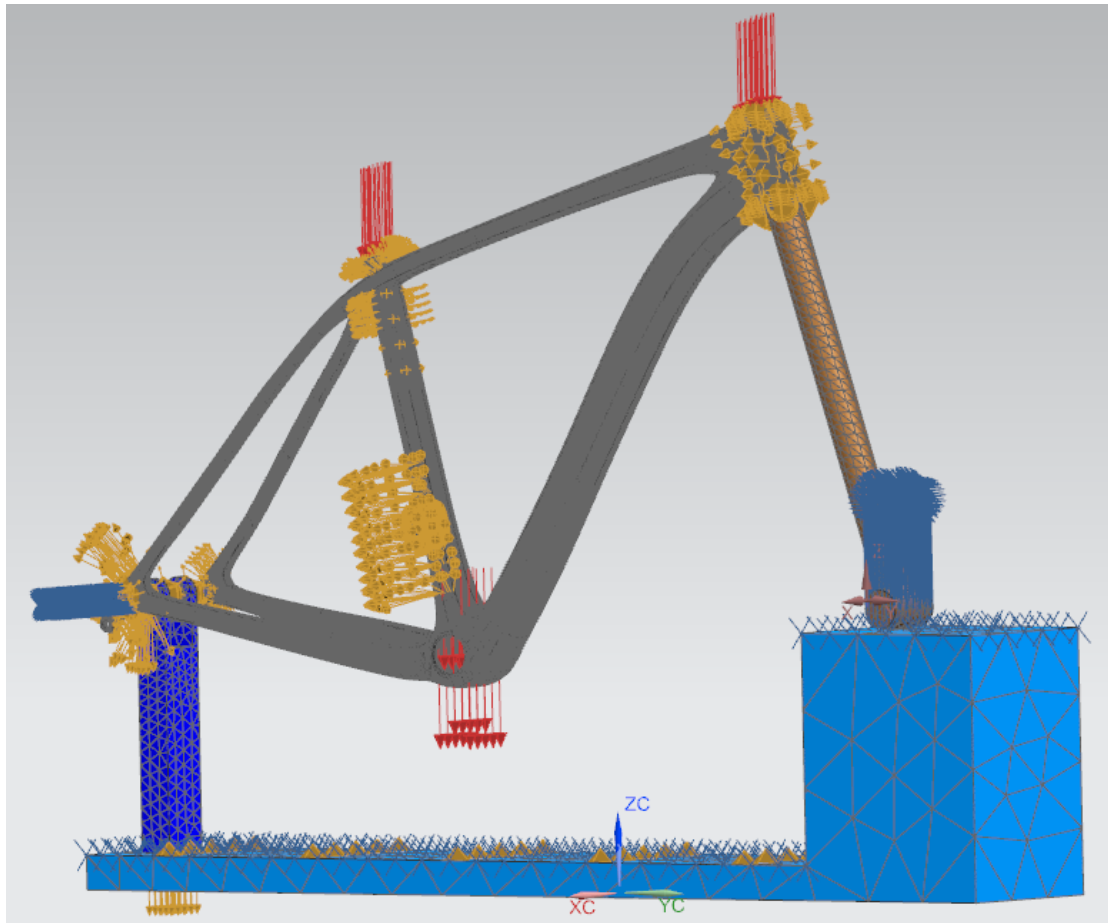


## 2. Τεστ πρόσκρουσης – πτώση σκελετού ( Impact test – falling frame)

Και σε αυτό το τεστ παρουσιάστηκαν οι ίδιες δυσκολίες στο SEIMENS NX κατά την πτώση του σκελετού και την επαφή του πηρουινιού με το αμώνι. Έτσι αφού πάλι τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά, οι μάζες μοντελοποιήθηκαν σαν κατακόρυφες δυνάμεις στα σημεία που προβλέπει το τεστ του ISO και προστέθηκε μια επιπλέον δύναμη 1000 N στο πάνω μέρος του head tube. Παρότι η προσομοίωση αυτή δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματική κατάσταση, είναι αρκετή για τη σύγκριση που θέλουμε να κάνουμε σε αυτό το επίπεδο. Επιπλέον, η στήριξη του πίσω άξονα για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω έγινε με glue contact. Η επίλυση έγινε και πάλι με χρήση του solver 101 λόγω ευκολίας.



Εικόνα 38 Assembly σκελετού – ομοιώματος πηρουινιού – πίσω άξονα- στηρίγματος πίσω άξονα - πατώματος

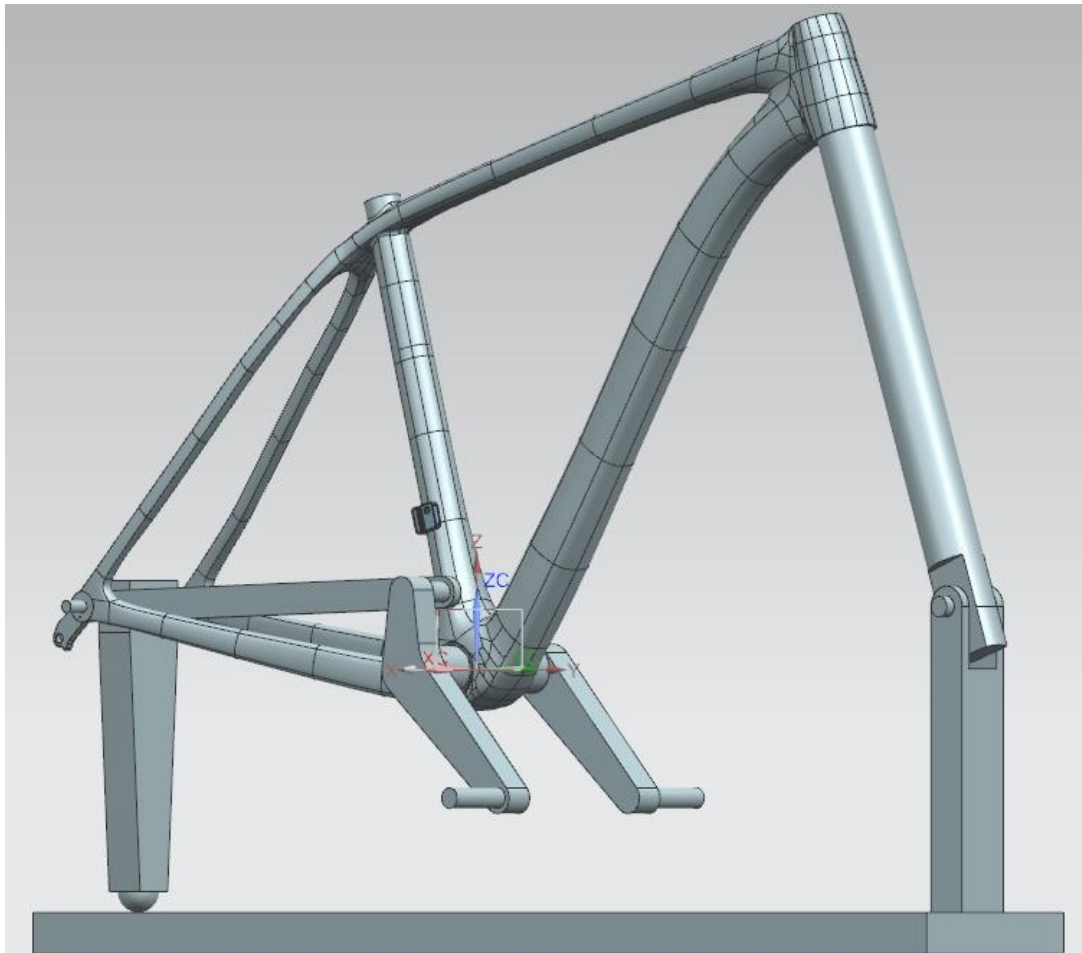


Εικόνα 39 απεικόνιση της προσομοίωσης για το τεστ πτώσης του σκελετού

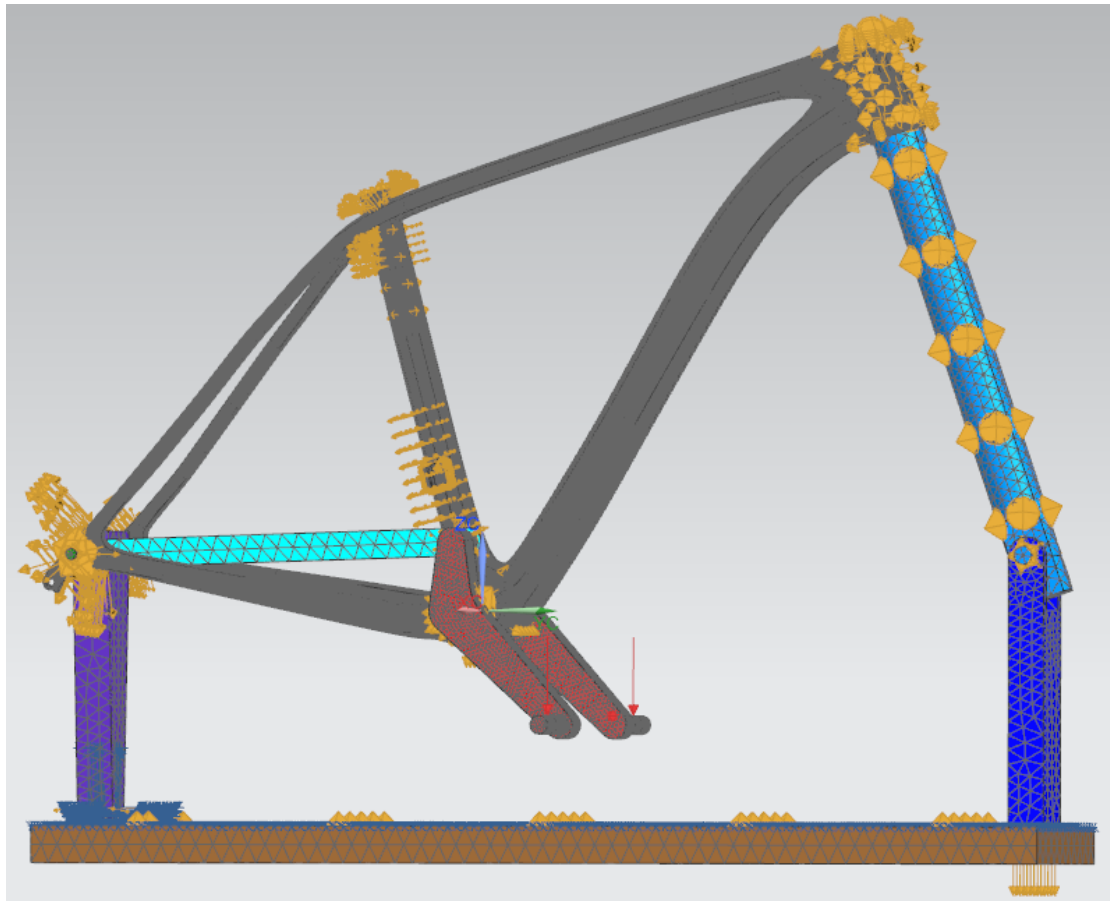
Και σε αυτήν την περίπτωση τα κόκκινα βέλη αντιπροσωπεύουν τις ασκούμενες δυνάμεις που αντικετέστησαν τα βάρη και τα κίτρινα τις επαφές. Οι μπλε γραμμές υποδηλώνουν τους περιορισμούς. Συγκεκριμένα, το κάτω μέρος του ομοιώματος πηρουνιού έχει δεσμευμένη την κίνηση κατά τον άξονα Z, ο πίσω άξονας έχει δεσμευμένη την μετακίνηση στον άξονα X, ενώ οι πάνω πλευρές του πατώματος είναι πακτωμένες.

3. Τεστ κοπώσεως με δυνάμεις πεταλαρίσματος ( Fatigue test with pedaling forces)

Σε αυτό το τεστ σχεδιάστηκαν από την αρχή τα ομοιώματα της πεταλιέρας και της αλυσίδας όπως ακριβώς περιγράφονται από τα πρότυπα του ISO. Η επίλυση έγινε και πάλι με την solver 101. Η δύναμη των 1200 N χωρίστηκε κατάλληλα σε δύο δυνάμεις μία κατακόρυφη και μια παράλληλη με τον άξονα της μεσαίας τριβής για να συμπεριληφθεί η γωνία των 7,5 μοιρών που αναφέρει το πρότυπο του ISO. Και σε αυτό το τεστ όλες οι επαφές μεταξύ των διαφορετικών κομματιών του ποδηλάτου μοντελοποιήθηκαν ως glue contacts. Το κάτω μέρος του πίσω στηρικτικού συνδέσμου σχεδιάστηκε ως μισή σφαίρα η οποία έχει δεσμευμένες τις μετατοπίσεις και ελεύθερες τις περιστροφές.



*Εικόνα 40 Assembly σκελετού – ομοιώματος πηρουνιού – ομοιώματος πεταλιέρας – ομοιώματος αλυσίδας – μπροστά και πίσω στηρίγματος - πατώματος*



*Εικόνα 41 Απεικόνιση του τεστ με τις δυνάμεις πεταλαρίσματος*

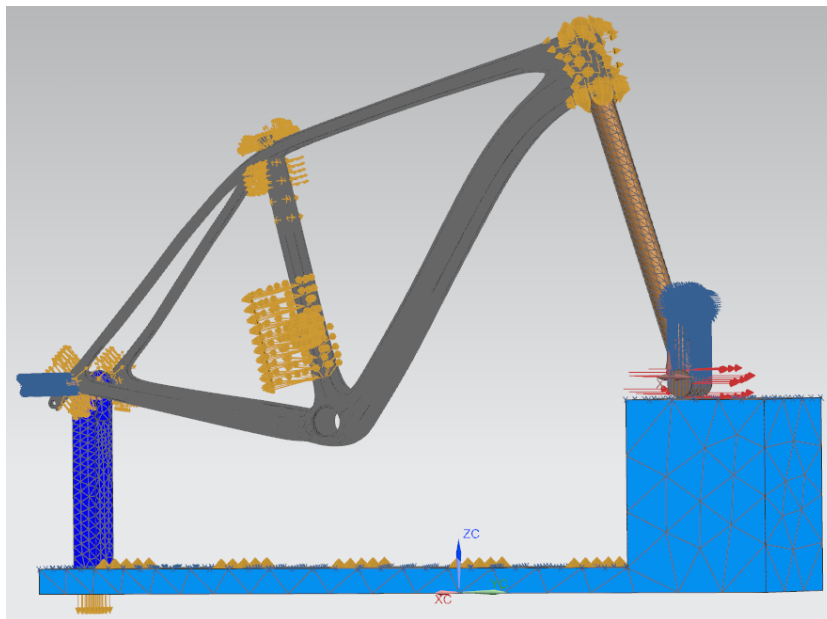
Στην εικόνα της προσομοίωσης είναι εμφανές το σπάσιμο της δύναμης των 1200 N σε δύο, μία κατά τον άξονα Z και μία κατά τον άξονα X. Από εδώ και στο εξής ως δύναμη F1 ονομάζουμε τη δύναμη που ασκείται στην δεξιά μεριά του ποδηλάτου (η μπροστινή μεριά του ποδηλάτου όπως το βλέπουμε στην εικόνα 41) και F2 η δύναμη που ασκείται στην αριστερή πλευρά του ποδηλάτου.

Και σε αυτήν την προσομοίωση τα κόκκινα βέλη αντιπροσωπεύουν τις δυνάμεις και τα κίτρινα τις επαφές. Τονίζεται ότι στο πίσω στήριγμα, η σφαίρα έχει δεσμευμένη την μετακίνηση κατά τους άξονες X, Y και Z αλλά έχει ελεύθερες τις περιστροφές.

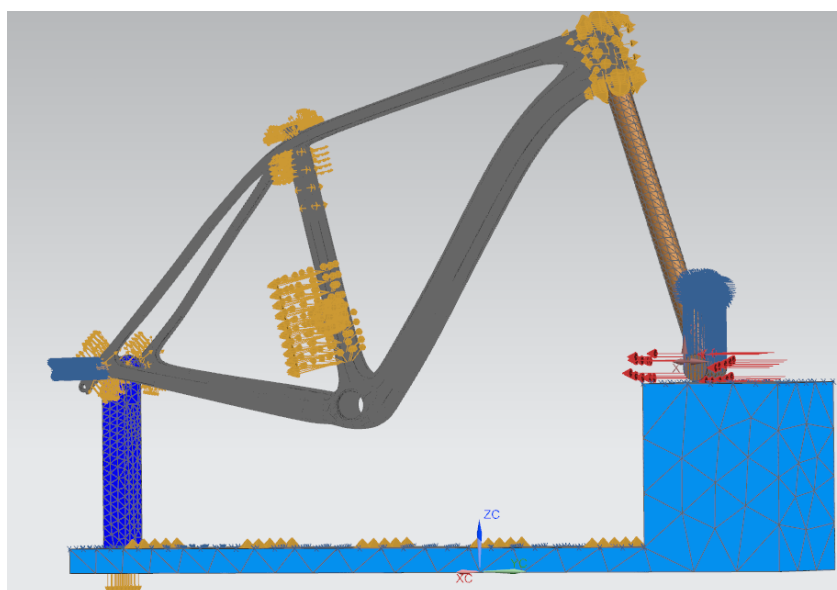
#### 4. Τεστ κοπώσεως με οριζόντιες δυνάμεις (Fatigue test with horizontal forces)

Σε αυτό το τεστ εφαρμόστηκε στη άκρη του ομοιώματος πηρουιού δύναμη 1200 N στη διεύθυνση της κίνησης και 600 N αντίθετα. Η επαφή του πίσω άξονα με το στήριγμά του μοντελοποιήθηκε και πάλι ως glue contact και εφαρμόστηκε simply supported περιορισμός κίνησης στο κάτω μέρος του ομοιώματος πηρουιού. Το τεστ επιλύθηκε ως στατικό με χρήση του solver 101.

Χρησιμοποιείται η ίδια διάταξη με το τεστ πτώσης του σκελετού, αλλά αλλάζουν οι φορτίσεις.



Εικόνα 42 Απεικόνιση του τεστ με οριζόντια δύναμη  $F1$  ομόρροπη με τον άξονα  $Y$

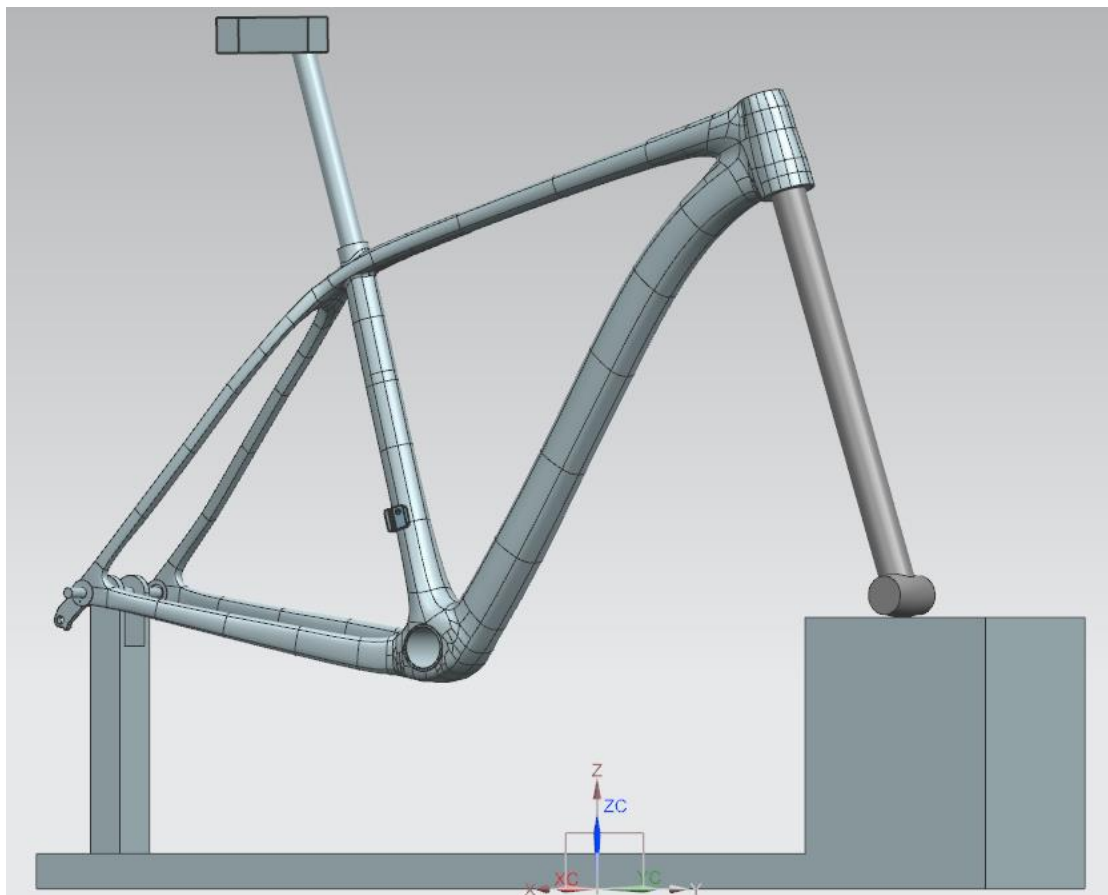


Εικόνα 43 Απεικόνιση του τεστ με οριζόντια δύναμη  $F2$  αντίρροπη με τον άξονα  $Y$

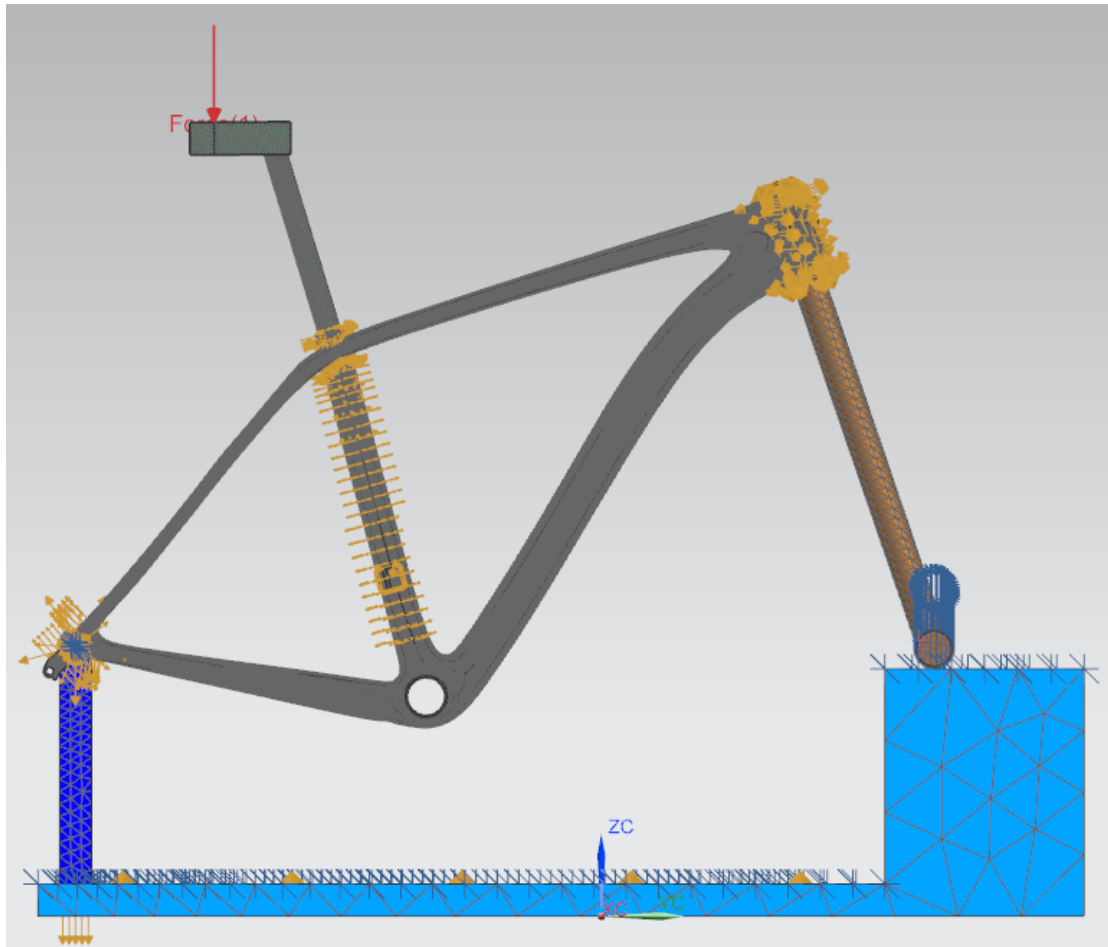
## 5. Τεστ κοπώσεως με κάθετη δύναμη (Fatigue test with a vertical force)

Το ομοίωμα του παλουκόσελου με την αντίστοιχη προεξοχή σχεδιάστηκε ως ένα κομμάτι σύμφωνα με τα μεγέθη που προβλέπει το πρότυπο του ISO. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι για να υπάρχει καλή εφαρμογή του παλουκόσελου μέσα στον σκελετό, σχεδιάστηκε ένας κύλινδρος ο οποίος μπαίνει μέσα στον σκελετό και μέσα σε αυτόν εισέρχεται το παλουκόσελο. Αυτό δεν απέχει τόσο από την πραγματικότητα, καθώς αποτελεί πολύ συνηθισμένο τρόπο ενίσχυσης του πάνω μέρους του seat tube. Ο κύλινδρος αυτός, ή αλλιώς μανίκι, είναι και αυτός από ανθρακονήματα στην πραγματικότητα και κολλάται με ειδική κόλλα μέσα στο seat tube, αλλά για τις προσομοιώσεις που έγιναν μοντελοποιήθηκε ως αλουμινένιος. Και πάλι όλες οι επαφές ορίστηκαν ως glue contacts ενώ αντί για επαφή του πηρουιού με το πάτωμα, ορίστηκε απλή στήριξη ως περιορισμός στο κάτω μέρος του πηρουιού.

Χρησιμοποιείται και πάλι ως βάση η διάταξη που σχεδιάστηκε για το τεστ της πτώσης του σκελετού και σε αυτήν προστίθεται το ομοίωμα του παλουκόσελου.



Εικόνα 44 Διάταξη μετά την προσθήκη του ομοιώματος παλουκόσελου



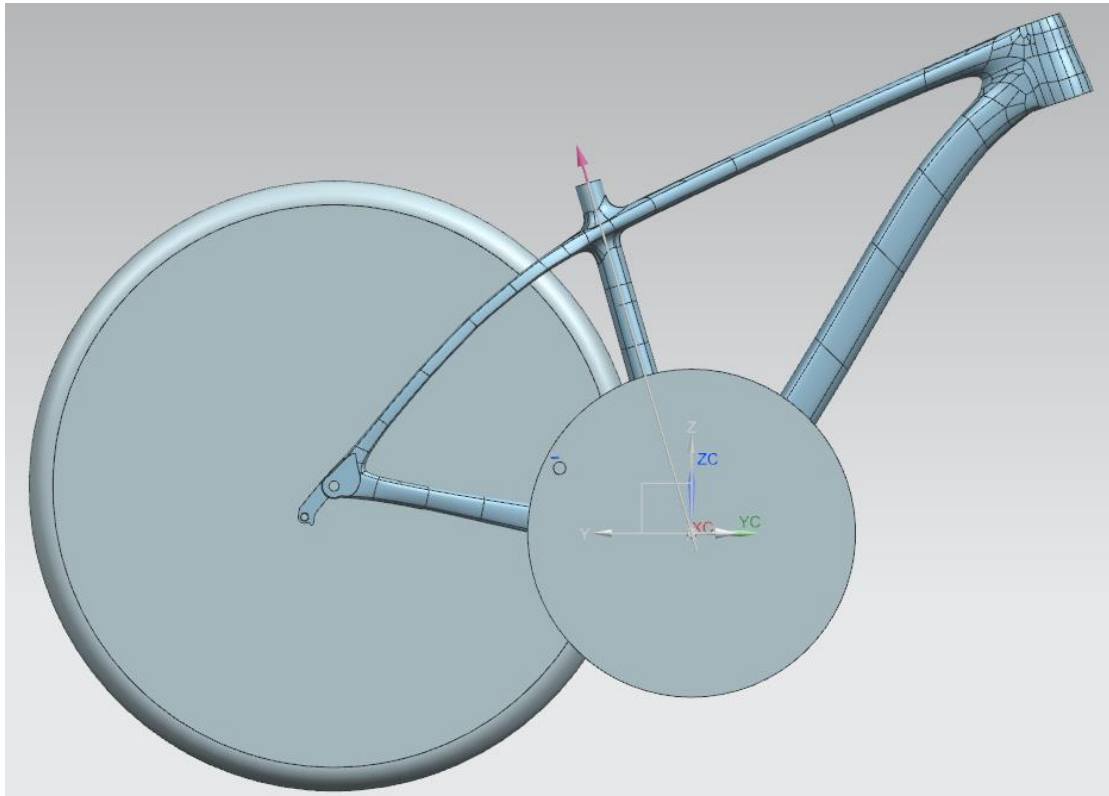
Εικόνα 45 Απεικόνιση του τεστ με εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης

## 2.5 Σύγκριση μοντέλων σκελετού από αλουμίνιο

Από την αρχή του σχεδιασμού του πρώτου μοντέλου, κρίθηκε απαραίτητο να επιλεγθούν κάποια στοιχεία σχετικά με τα περιφερειακά μέρη του ποδηλάτου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το παλουκόσελο επιλέχθηκε να είναι διαμέτρου 27.2 mm, τα dropout να είναι τύπου E- thru και το μπροστινό derailleur να είναι τύπου direct mount. Επιπλέον η μεσαία τριβή επιλέχθηκε να είναι τύπου Press Fit BB-30 με πλάτος 73 mm. Τα πρότυπα για τα παραπάνω στοιχεία δίνονται από την εταιρεία Shimano, η οποία παράγει τα διάφορα περιφερειακά κομμάτια του ποδηλάτου.

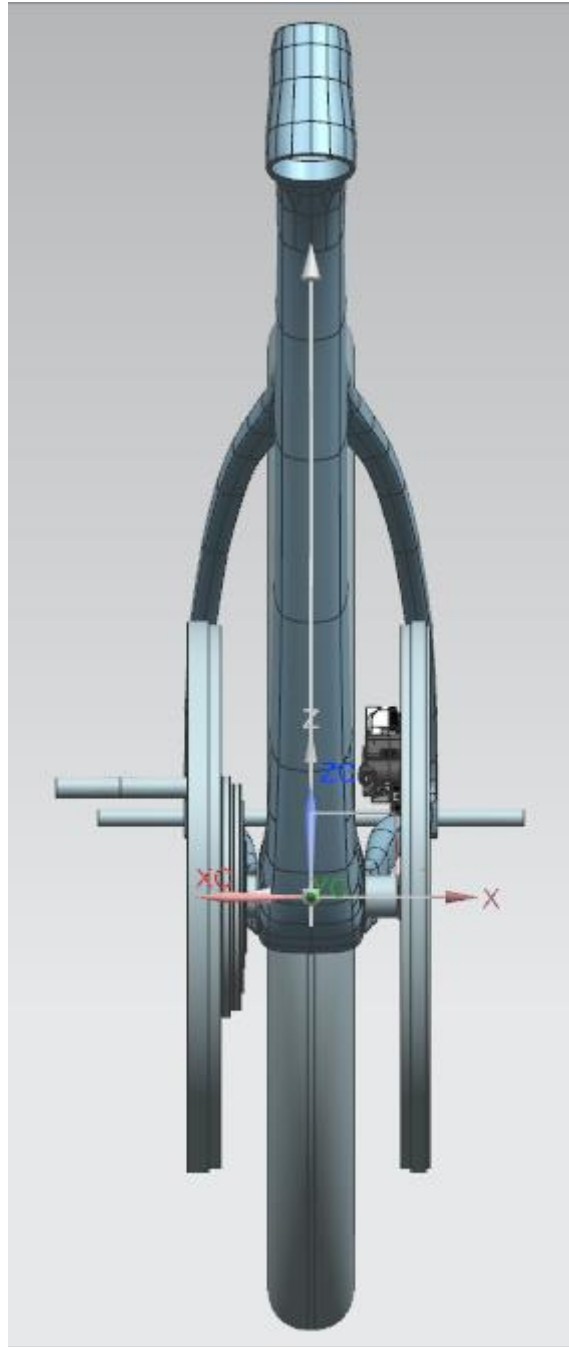
Αρχικά, υπήρξε η σκέψη τα νύχια στο σημείο εφαρμογής του πίσω άξονα να είναι φτιαγμένα από αλουμίνιο και στη συνέχεια να κολληθούν στον σκελετό, γι' αυτό και στα παρακάτω μοντέλα εμφανίζονται ως ξεχωριστά κομμάτια. Επιπλέον, σε αυτή την αρχική σύγκριση δεν λήφθηκε υπ' όψιν η βάση του πίσω φρένου, καθώς ενδιέφερε περισσότερο το γενικό σχήμα και οι ενώσεις των διαφόρων κομματιών του σκελετού.

Συνολικά, για το μέγεθος L παράχθηκαν περίπου 50 διαφορετικά μοντέλα. Εκτός από αλλαγές που έγιναν με σκοπό την καλύτερη κατανομή των φορτίων και τη μείωση της μέγιστης τιμής τους, μετατροπές έγιναν για να μην υπάρχει επαφή του σκελετού με τα υπόλοιπα στοιχεία του ποδηλάτου. Γι' αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν σχέδια για την πίσω ρόδα και την πεταλιέρα και κάθε φορά το υποψήφιο μοντέλο ελεγχόταν ως προς τις πιθανές επαφές.



*Εικόνα 46 Διάταξη σκελετού, ρόδας και ομοιωμάτων πεταλιέρας σε πλάγια όψη*





*Εικόνα 47 διάταξη σκελετού, ρόδας και ομοιωμάτων πεταλιέρας σε πρόσθια όψη*

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια από τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες μετατοπίσεις και τα μέγιστα φορτία που αναπτύχθηκαν ανά προσομοίωση.

## 2.5.1 Σχεδιασμός μεγέθους L

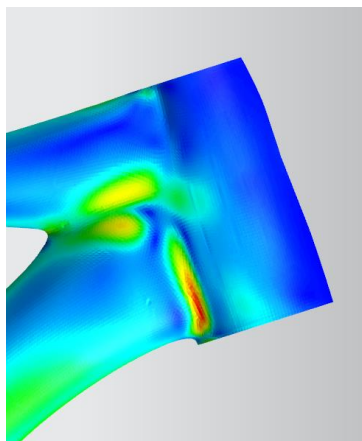
### 1<sup>η</sup> δοκιμή



*Εικόνα 48 Μοντέλο σκελετού κατά την 1<sup>η</sup> δοκιμή*

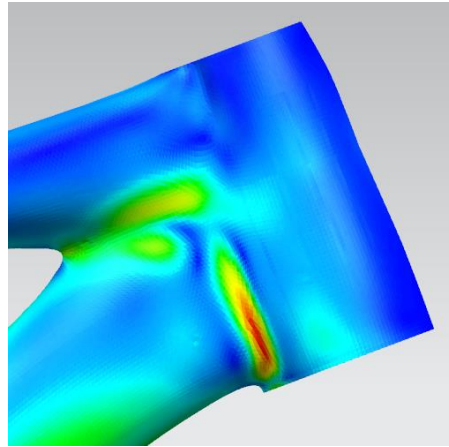
Το πρώτο αυτό μοντέλο προσομοιάζει στο Stumpjumper της Specialized.

Από το πρώτο κιόλας τεστ παρατηρούμε ότι πρέπει να γίνει αλλαγή στην ένωση του down tube με το head tube καθώς εκεί παρατηρούμε τοπικά υψηλά φορτία, όπως φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία.



*Εικόνα 49 Τάσεις Von Mises κατά το τεστ πίπτουσας μάζας στην πρώτη δοκιμή*

Στο ίδιο σημείο παρατηρείται συγκέντρωση φορτίων κατά το τεστ με τις οριζόντιες δυνάμεις.



*Εικόνα 50 τάσεις Von Mises Υπό την επίδραση της F1 δύναμης στο τεστ οριζοντίων δυνάμεων*

### 5<sup>η</sup> δοκιμή



*Εικόνα 51 Μοντέλο σκελετού κατά την 5<sup>η</sup> δοκιμή*

Σε αυτό το μοντέλο είναι εμφανής η αλλαγή στο σχήμα του head tube. Επιπλέον τα chain stays είναι πια στο ίδιο ύψος σε αντίθεση με πριν που το αριστερό βρισκόταν λίγο ψηλότερα από το δεξί, ενώ το down tube έχει πιο οβάλ διατομή από πριν.

## 12<sup>η</sup> δοκιμή

Σε αυτό το μοντέλο έχουν γίνει αλλαγές στην ένωση head tube – down tube – top tube καθώς και στην ένωση seat tube – top tube- seat stays, ενώ το down tube έχει πιο τετραγωνισμένη διατομή



*Εικόνα 52 Μοντέλο σκελετού κατά την 12<sup>η</sup> δοκιμή*

## 17<sup>η</sup> δοκιμή

Σε αυτό το μοντέλο κατέβηκε η ένωση του top tube με τα seat stays πάνω στο seat tube και προστέθηκε ένα επιπλέον κομμάτι το οποίο ενώνει την άκρη του seat tube με το top tube για καλύτερη στήριξη.



*Εικόνα 53 Μοντέλο σκελετού κατά την 17<sup>η</sup> δοκιμή*

### 19<sup>η</sup> δοκιμή

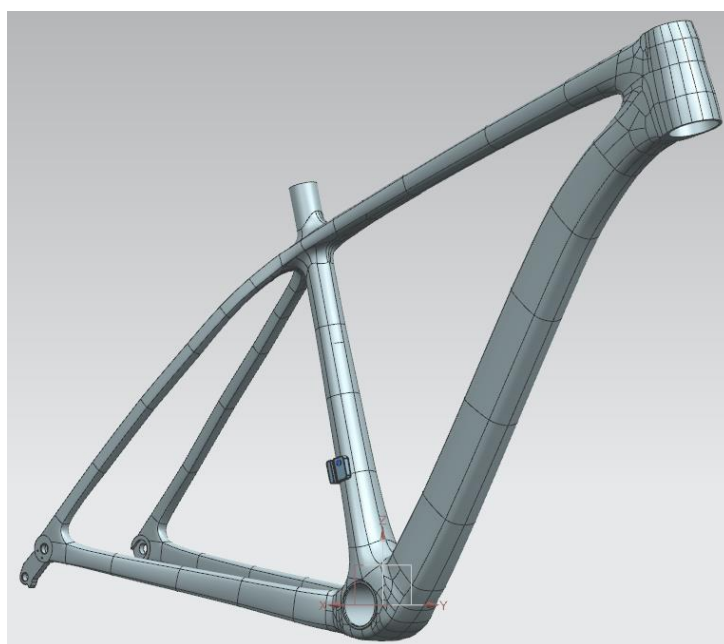
Σε αυτό το σχέδιο ο επιπλέον σωλήνας της δοκιμής 17 ενώθηκε με το top tube και το seat tube σε ένα ενιαίο κομμάτι



*Εικόνα 54 Μοντέλο σκελετού κατά την 19<sup>η</sup> δοκιμή*

### 22<sup>η</sup> δοκιμή

Καθώς τα φορτία στο τεστ με την κατακόρυφη δύναμη στο παλουκόσελο εξακολουθούν να είναι υψηλά, γυρνάμε στα προηγούμενα σχέδια και επικεντρωνόμαστε σε αλλαγές στην ένωση του head tube με τον υπόλοιπο σκελετό



*Εικόνα 55 Μοντέλο σκελετού κατά την 22<sup>η</sup> δοκιμή*

### 30<sup>η</sup> δοκιμή

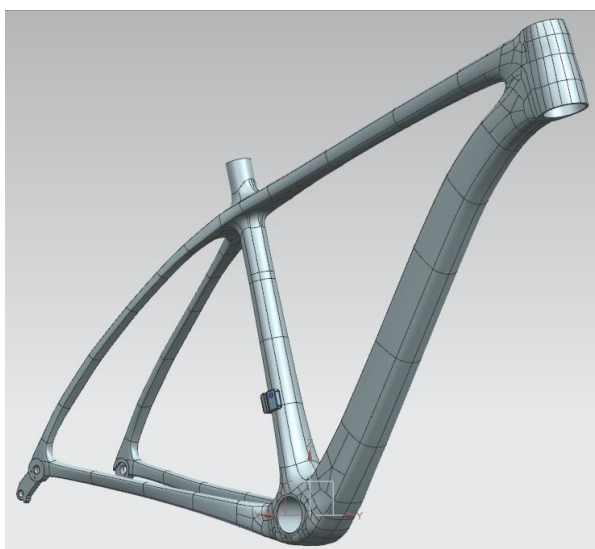
Με διαδοχικές αλλαγές στις διατομές των seat stays και των chain stays, προκύπτει το παρακάτω μοντέλο. Η διατομή των seat stays είναι πιο ορθογώνια με την μεγάλη διάσταση κατά τον X άξονα του σχεδίου, ενώ η διατομή των chain stays ξεκινάει ως οβάλ κοντά στη μεσαία τριβή και από το μέσο περίπου και έπειτα αποκτά μια πιο τραπεζοειδή μορφή με τη μεγάλη διάσταση του τραπεζίου να βρίσκεται στην πάνω πλευρά του chain stay.



*Εικόνα 56 Μοντέλο σκελετού κατά την 30<sup>η</sup> δοκιμή*

### 40<sup>η</sup> δοκιμή

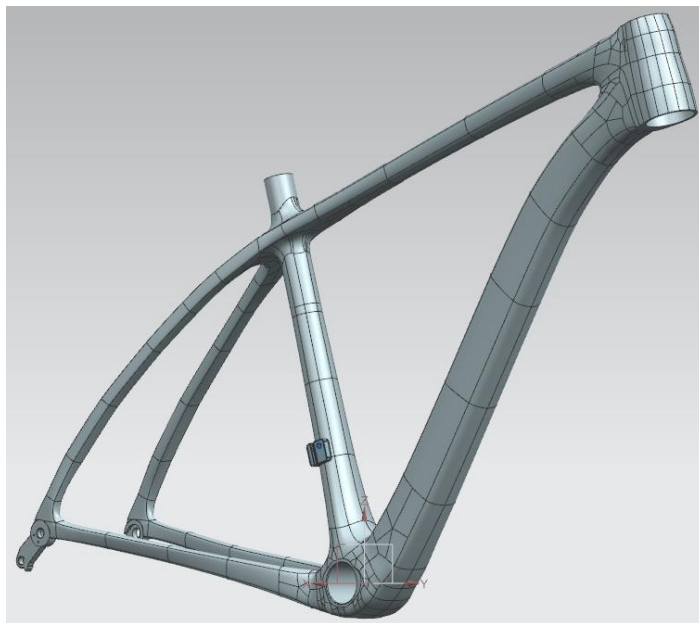
Για να είναι πραγματοποιηθεί πιο εύκολα ελιγμούς το ποδήλατο, στο συγκεκριμένο μοντέλο μίκρυναν τα chain stays σε μήκος (427 mm), ενώ έγιναν επιπλέον αλλαγές στα seat stays καθώς και στην ένωσή τους με το seat tube.



*Εικόνα 57 Μοντέλο σκελετού κατά την 40<sup>η</sup> δοκιμή*

### 43<sup>η</sup> δοκιμή

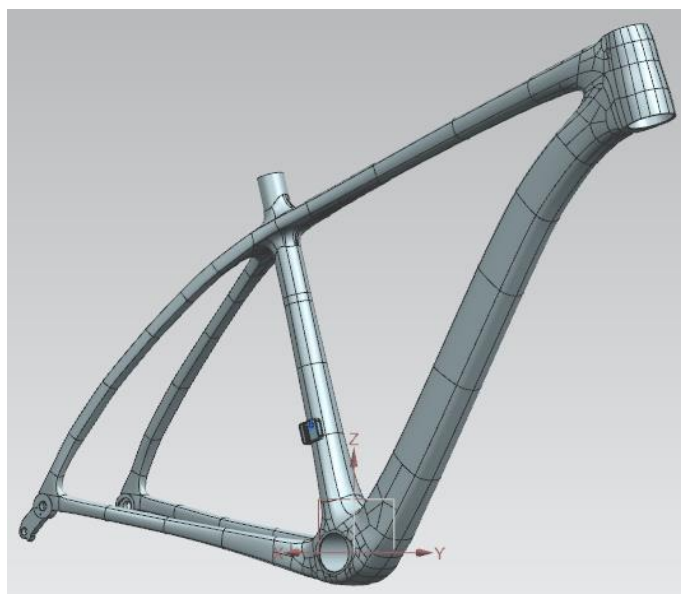
Εξαιτίας της αλλαγής του μήκους των chain stays, και καθώς το πρότυπο της Shimano για τον τύπου direct mount μπροστινό derailleur προβλέπει η γωνία της αξονικής των chain stays και της αξονικής του seat tube να βρίσκεται μεταξύ 66 και 69 μοιρών, άλλαξε το μέγεθος bb drop από 61 mm σε 55.7 mm. Με επιπλέον αλλαγές στα seat stays (αύξηση των διαστάσεων της διατομής τους αλλά διατήρηση της ορθογώνιας διατομής τους) προέκυψε το παρακάτω μοντέλο.



*Εικόνα 58 Μοντέλο σκελετού κατά την 43<sup>η</sup> δοκιμή*

### 47<sup>η</sup> δοκιμή

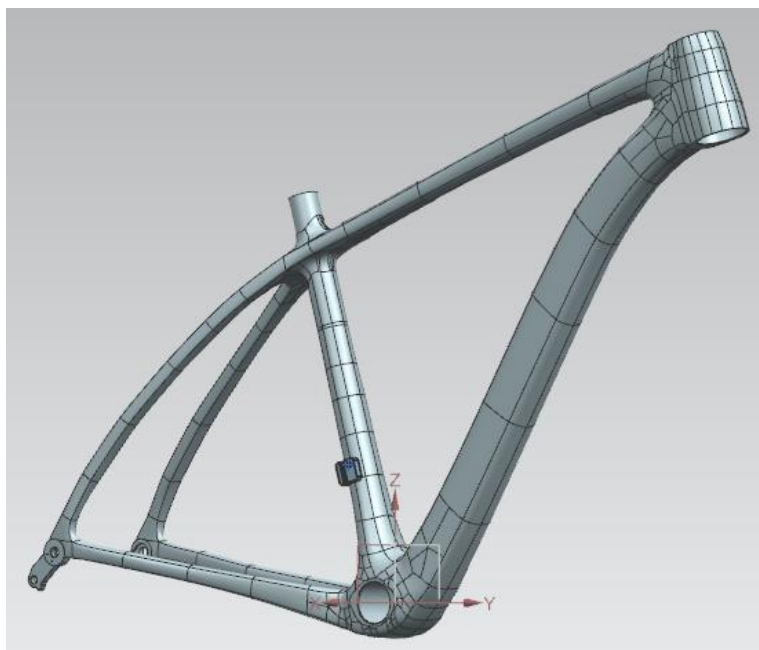
Στο επόμενο μοντέλο μεγάλωσαν και πάλι τα chain stays από 427 mm σε 429 mm πράγμα που μας επιτρέπει να βάλουμε μεγαλύτερο ελαστικό.



*Εικόνα 59 Μοντέλο σκελετού κατά την 47<sup>η</sup> δοκιμή*

## 52<sup>η</sup> δοκιμή

Με επιπλέον αλλαγές στις ενώσεις των chain stays στο seat tube, καθώς και κάποιες αλλαγές στο head tube έτσι ώστε κατά την παραγωγή του καλουπιού να μην έχω υποκοπές, προέκυψε το τελικό μοντέλο αλουμινίου το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ως το αρχικό για την εύρεση της κατάλληλης διαστρωμάτωσης ανθρακονημάτων.



Εικόνα 60 Μοντέλο σκελετού κατά την 52<sup>η</sup> δοκιμή

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες με τα μέγιστα φορτία σε MPa και τις μέγιστες μετατοπίσεις σε mm για κάθε δοκιμή που αναφέρθηκε. Τα μέγιστα φορτία έχουν παραχθεί με τη μέθοδο Von Mises.

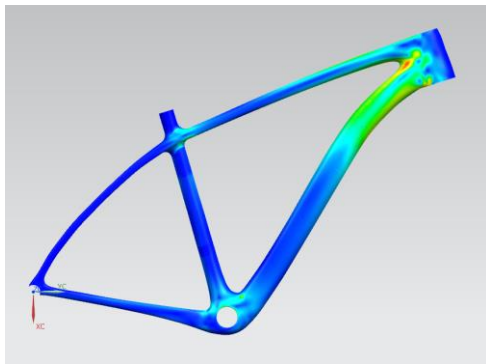
Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	327.43	33.51	94.49	47.25	131.20	124.58	124.68
5η	233.96	28.62	78.83	39.42	131.67	116.76	111.87
12η	197.24	28.93	61.79	30.89	134.84	114.13	111.32
17η	192.93	30.61	67.86	33.93	195.76	116.43	113.05
19η	193.78	32.00	68.05	34.03	395.45	116.69	114.38
22η	171.77	27.04	59.47	29.73	111.06	114.22	111.81
30η	171.72	26.86	59.50	29.75	112.57	101.02	104.68
40η	172.12	27.56	60.80	30.40	104.96	102.06	109.24
43η	171.18	26.13	60.50	30.25	101.96	101.59	110.00
47η	172,71	25,57	60,35	30,18	102,68	102,35	109,31
52η	192,18	27,25	66,91	33,46	102,9	101,96	104,54

Πίνακας 6 Μέγιστα φορτία στον σκελετό μεγέθους L κατά τις δοκιμές με αλουμίνιο

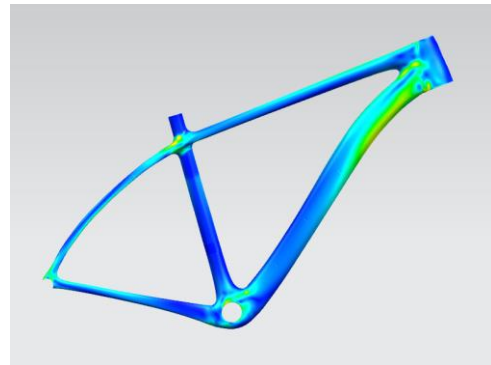


Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	5.024	0.694	2.072	1.036	0.747	2.865	2.399
5η	3.996	0.643	1.937	0.968	0.744	2.872	2.469
12η	3.885	0.617	1.872	0.936	0.741	2.823	2.443
17η	4.848	0.619	1.899	0.949	1.511	2.776	2.438
19η	4.978	0.612	1.898	0.949	2.440	2.810	2.477
22η	4.192	0.625	1.916	0.958	0.814	2.791	2.421
30η	3.787	0.624	1.923	0.962	0.802	3.202	2.834
40η	3.310	0.595	1.973	1.987	0.703	3.028	2.740
43η	3.169	0.602	1.956	0.978	0.685	3.006	2.717
47η	3,458	0,606	1,945	0,972	0,677	2,884	2,621
52η	3,649	0,611	1,963	0,981	0,686	2,891	2,572

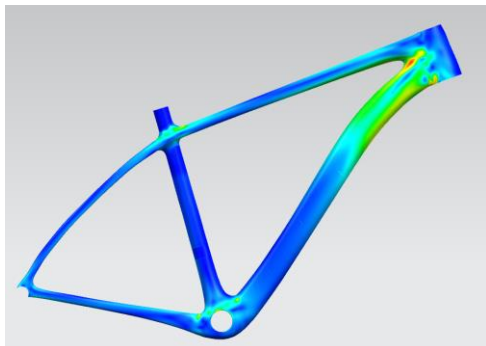
Πίνακας 7 Μέγιστες μετατοπίσεις στον σκελετό μεγέθους L κατά τις δοκιμές με αλουμίνιο



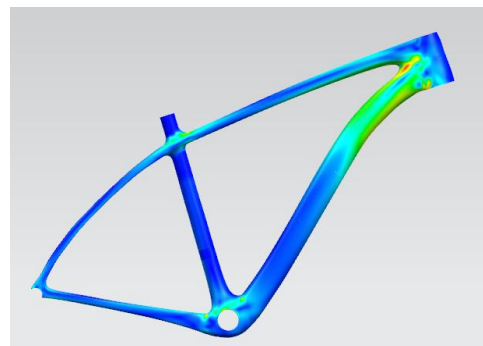
Εικόνα 61 Απεικόνιση φορτίων κατά το τεστ πύπτουσας μάζας στην 52<sup>η</sup> δοκιμή



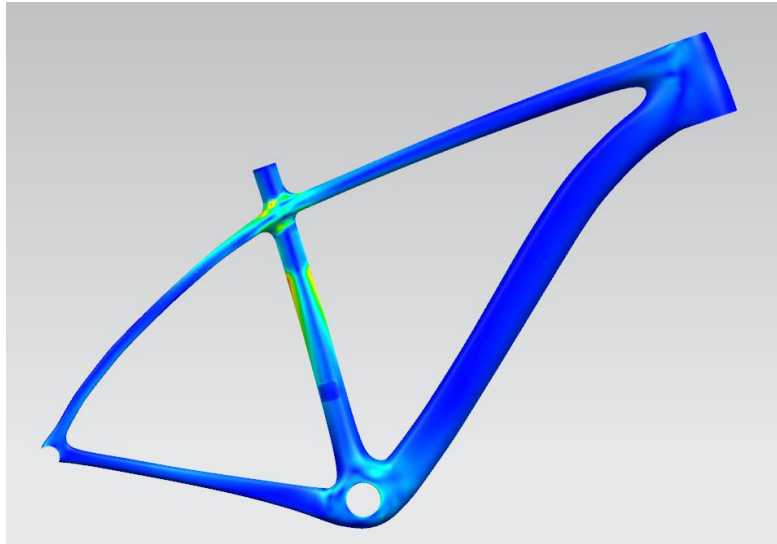
Εικόνα 62 Απεικόνιση φορτίων κατά το τεστ πτώσης του σκελετού στην 52<sup>η</sup> δοκιμή



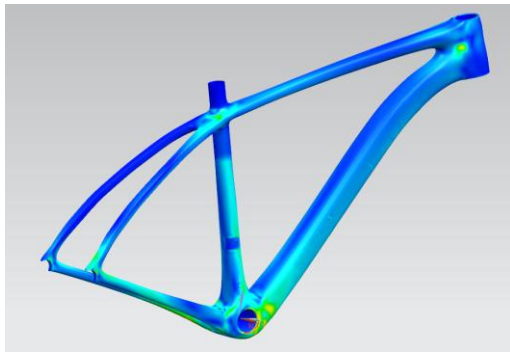
Εικόνα 63 Απεικόνιση φορτίων υπό την οριζόντια δύναμη F1 στην 52<sup>η</sup> δοκιμή



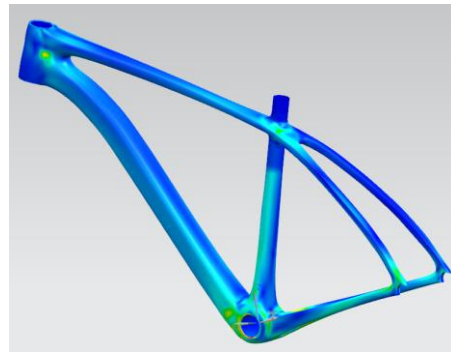
Εικόνα 64 Απεικόνιση φορτίων υπό την οριζόντια δύναμη F2 κατά την 52<sup>η</sup> δοκιμή



Εικόνα 65 Απεικόνιση φορτίων κατά το τεστ κατακόρυφης δύναμης στην 52<sup>η</sup> δοκιμή



Εικόνα 66 Απεικόνιση φορτίων κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F1 στην 52<sup>η</sup> δοκιμή



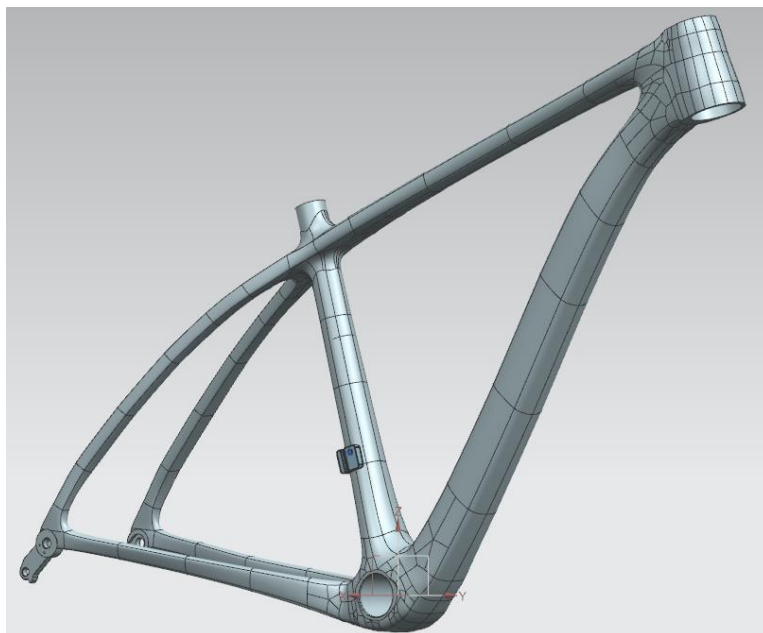
Εικόνα 67 Απεικόνιση φορτίων κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F2 στην 52<sup>η</sup> δοκιμή

## 2.5.2 Σχεδιασμός μεγέθους M

Αφού είχε προηγηθεί ο σχεδιασμός του μοντέλου για το μέγεθος L, ο σχεδιασμός του μεγέθους M ήταν πολύ πιο εύκολος και σύντομος. Βασικό στοιχείο του σχεδιασμού του μεγέθους M είναι ότι τα chain stays και στα δύο μεγέθη διατηρούνται ίδια, ενώ αλλάζουν οι υπόλοιπες διαστάσεις. Ο σχεδιασμός του M ξεκίνησε παράλληλα με τα τελευταία μοντέλα του L, οπότε όπως θα φανεί και στη συνέχεια οι αλλαγές στα μοντέλα του M ταυτίζονται με αυτές στα τελευταία μοντέλα του L.

### 1<sup>η</sup> δοκιμή

Χρησιμοποιήθηκε ως βάση η 43<sup>η</sup> δοκιμή που έγινε για το μέγεθος L η οποία αναλύεται και παραπάνω. Οι αλλαγές που έγιναν στο μοντέλο προήλθαν από την αλλαγή της γεωμετρίας μεταξύ του L και του M, αλλά διατηρήθηκε το σχήμα και το μήκος των chain stays.



*Εικόνα 68 Μοντέλο σκελετού κατά την 1<sup>η</sup> δοκιμή*

### 5<sup>η</sup> δοκιμή

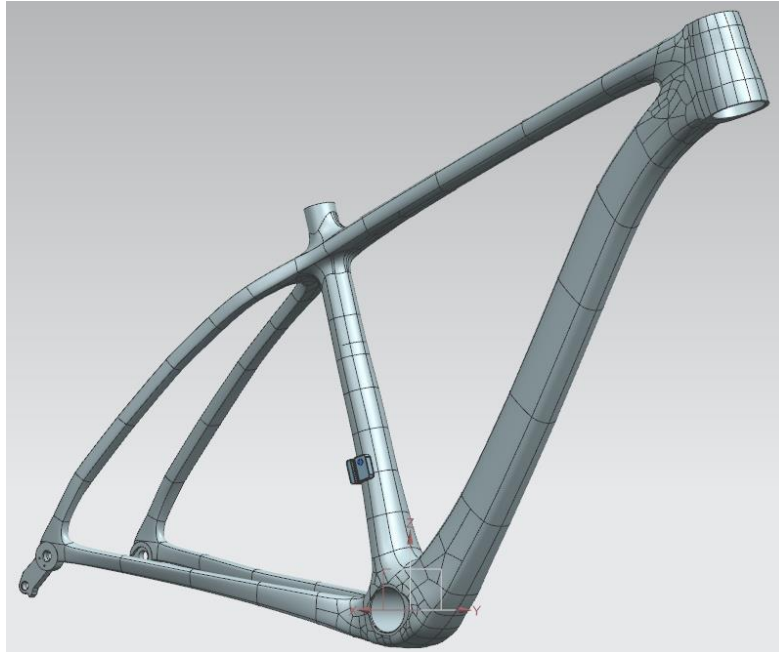
Το παρακάτω μοντέλο προέκυψε μετά από αλλαγές κυρίως στο top tube και στο head tube για καλύτερη κατανομή των τάσεων μετά την αλλαγή του σχεδίου από μέγεθος L σε μέγεθος M.



*Εικόνα 69 Μοντέλο σκελετού κατά την 5<sup>η</sup> δοκιμή*

### 7<sup>η</sup> δοκιμή

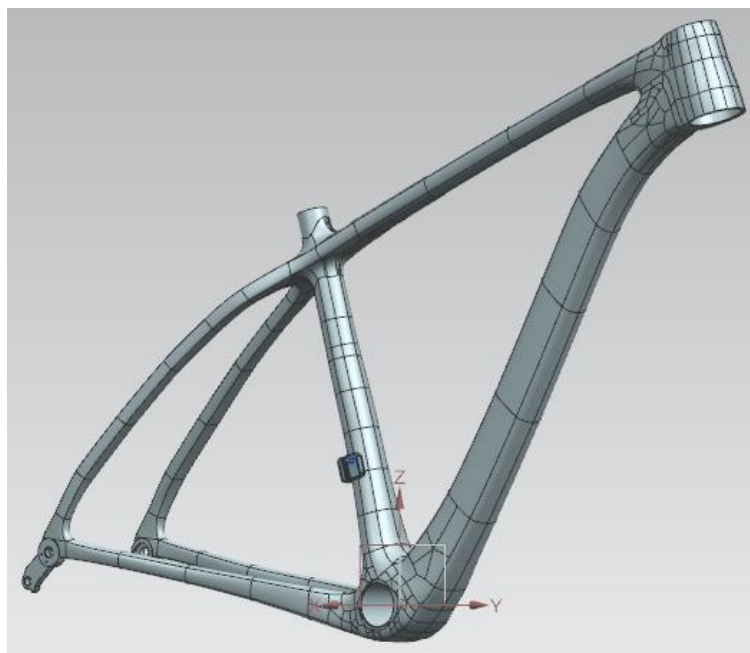
Χρησιμοποιώντας το σύστημα του σκελετού με τη ρόδα και τα ομοιώματα πεταλιέρας που είχαν δημιουργηθεί και για τον σχεδιασμό του L, έγιναν αλλαγές στο seat tube καθώς και στα chain stays και την ένωση αυτών με το seat tube για αύξηση των διακένων μεταξύ ρόδας και σκελετού.



*Εικόνα 70 Μοντέλο σκελετού κατά την 7<sup>η</sup> δοκιμή*

### 8<sup>η</sup> δοκιμή

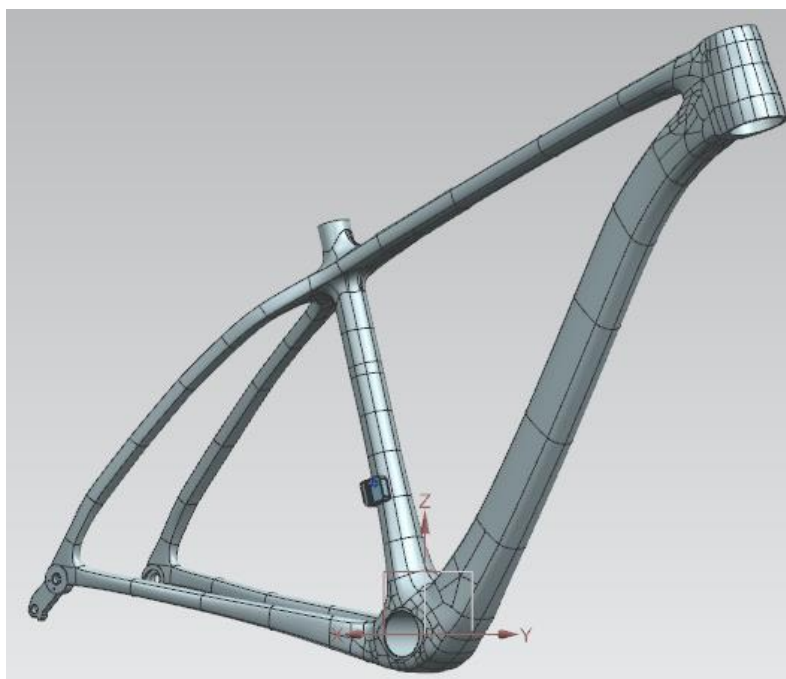
Ακολουθώντας τις αλλαγές στα σχέδια του L, αλλάζει το μήκος των chain stays από 427 mm σε 429 mm.



*Εικόνα 71 Μοντέλο σκελετού κατά την 8<sup>η</sup> δοκιμή*

## 11<sup>η</sup> δοκιμή

Στο τελικό μοντέλο για το M σε αυτή τη φάση του σχεδιασμού, έγιναν αλλαγές στο head tube, όπως και στο τελικό μοντέλο για το μέγεθος L.



*Εικόνα 72 Μοντέλο σκελετού κατά την 11<sup>η</sup> δοκιμή*

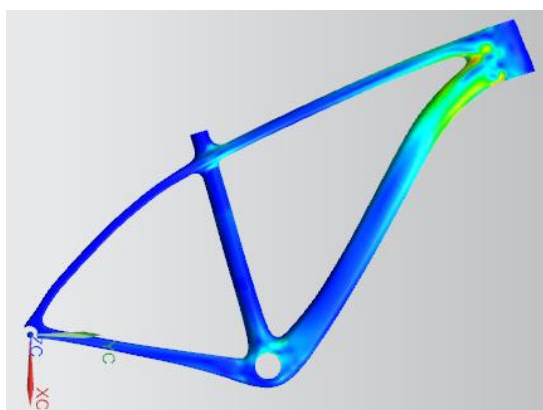
Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες με τα μέγιστα φορτία σε MPa και τις μέγιστες μετατοπίσεις σε mm για κάθε δοκιμή που αναφέρθηκε. Τα μέγιστα φορτία έχουν παραχθεί με τη μέθοδο Von Mises.

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	296,71	31,70	91,55	45,77	101,49	113,38	124,18
5η	243,48	24,56	72,22	36,11	99,88	114,61	124,48
7η	241,56	30,72	73,64	36,82	97,63	98,32	103,26
8η	241,65	30,76	73,75	36,88	99,36	96,77	101,67
11η	258,18	31,17	76,12	38,06	94,52	100,47	103,39

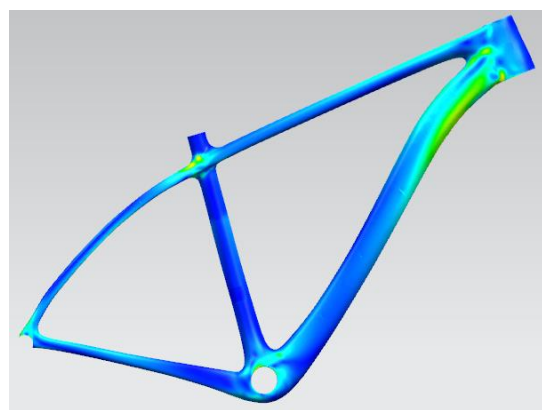
*Πίνακας 8 Μέγιστα φορτία στον σκελετό μεγέθους M κατά τις δοκιμές με αλουμίνιο*

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	3,240	0,561	1,842	0,921	0,553	3,024	2,724
5η	3,776	0,613	2,014	1,007	0,557	3,034	2,738
7η	3,864	0,598	1,992	0,996	0,585	3,018	2,739
8η	4,008	0,598	1,985	0,992	0,580	2,847	2,565
11η	4,203	0,605	1,998	0,999	0,617	2,917	2,626

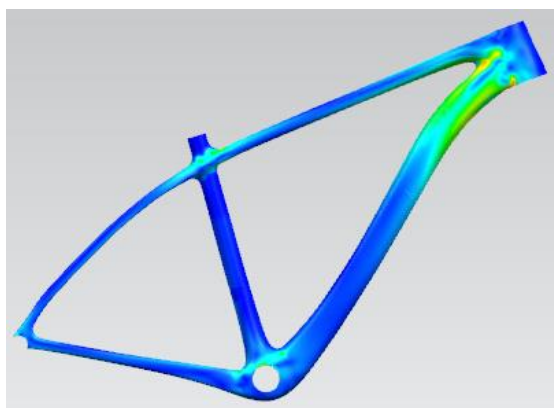
Πίνακας 9 Μέγιστες μετατοπίσεις στον σκελετό μεγέθους M κατά τις δοκιμές με αλουμίνιο



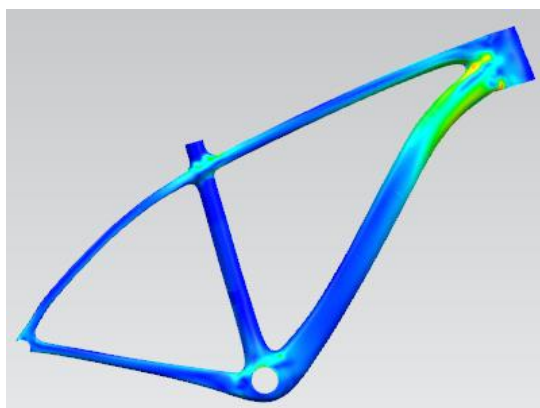
Εικόνα 73 Κατανομή φορτίων στο τεστ πίπτουσας μάζας κατά την 11<sup>η</sup> δοκιμή



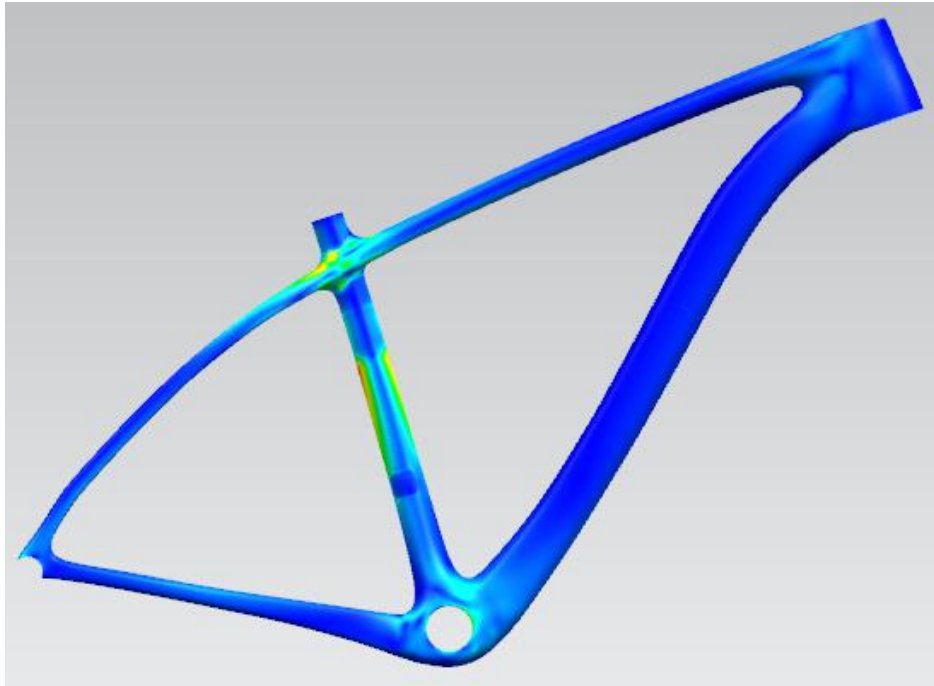
Εικόνα 74 Κατανομή φορτίων στο τεστ πτώσης σκελετού κατά την 11<sup>η</sup> δοκιμή



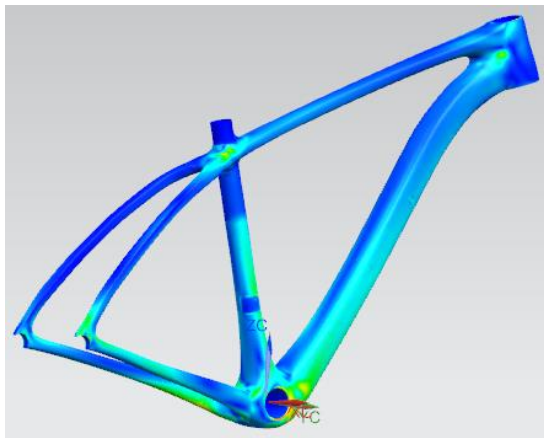
Εικόνα 75 Κατανομή φορτίων υπό την οριζόντια δύναμη F1 στην 11<sup>η</sup> δοκιμή



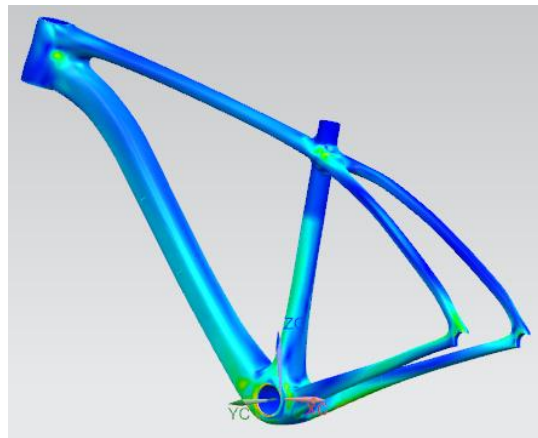
Εικόνα 76 Κατανομή φορτίων υπό την οριζόντια δύναμη F2 στην 11<sup>η</sup> δοκιμή



Εικόνα 77 Κατανομή φορτίων κατά την εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης στην 11<sup>η</sup> δοκιμή



Εικόνα 78 Κατανομή φορτίων υπό την δύναμη πεταλαρίσματος F1 στην 11<sup>η</sup> δοκιμή

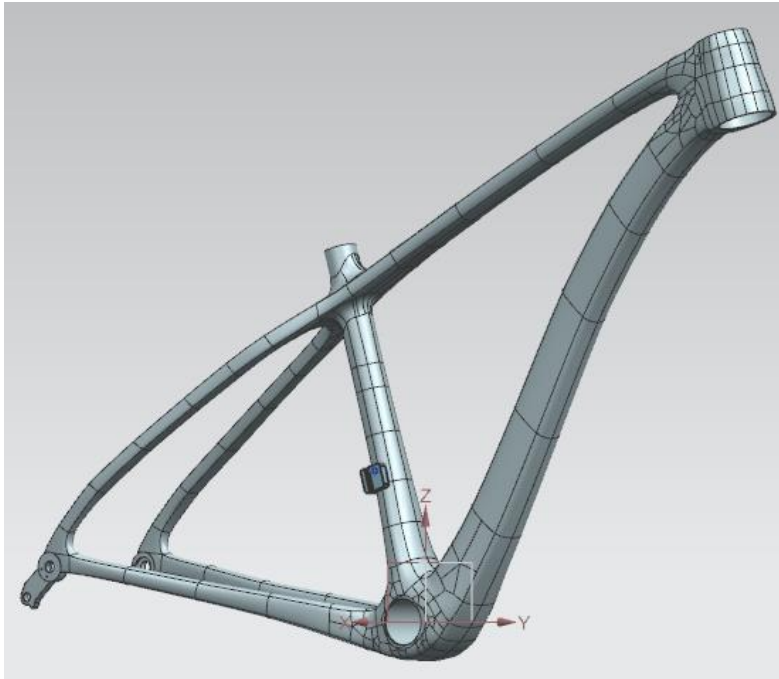


Εικόνα 79 κατανομή φορτίων υπό την δύναμη πεταλαρίσματος F2 στην 11<sup>η</sup> δοκιμή

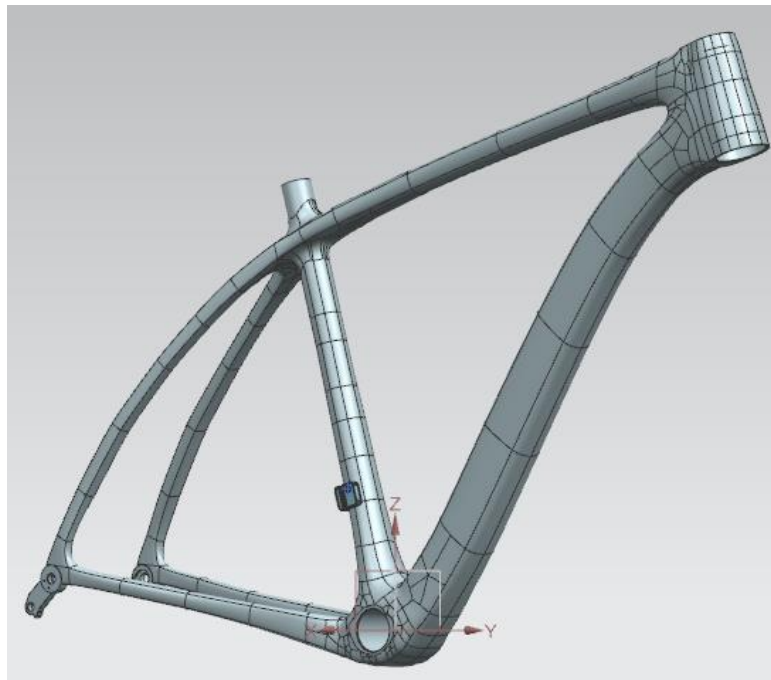
### 2.5.3 Σχεδιασμός άλλων μεγεθών

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι εκτός από τον σχεδιασμό του σκελετού στα μεγέθη L και M, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για να σχεδιαστεί και στα μεγέθη S και XL. Στη συνέχεια έγινε κατανοητό ότι λόγω του μεγάλου όγκου της εργασίας, δεν

υπήρχε λόγος να αναλωθούμε σε περαιτέρω αναζήτηση για αυτά τα μεγέθη, καθώς δεν έχουν και μεγάλη ζήτηση. Παρόλα αυτά παρατίθενται τα τελικά σχέδια για τα μεγέθη S και XL όπως αυτά προέκυψαν μετά από την ανάλυση για αλουμινένιο σκελετό.



*Εικόνα 80 Τελικό μοντέλο σκελετού μεγέθους S*



*Εικόνα 81 Τελικό μοντέλο σκελετού στο μέγεθος XL*



## 2.6 Έλεγχος προδιαγραφών με ανθρακονήματα

Έχοντας καταλήξει πλέον σε δύο σχέδια τα οποία έδιναν ικανοποιητικά αποτελέσματα στις δοκιμές με αλουμίνιο για τα μεγέθη L και M, επόμενο βήμα είναι η εύρεση κατάλληλων διαστρωματώσεων ανθρακονημάτων.

Αποφασίστηκε κάθε διαφορετικό μέγεθος να βγει σε δύο εκδόσεις ανάλογα με το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται κάθε φορά. Τα υλικά που ήταν διαθέσιμα ήταν:

- T300 woven, οι ίνες του οποίου ζυγίζουν 285 gr ανά m<sup>2</sup> υφάσματος και η περιεκτικότητά του σε ρητίνη είναι 42% κατά βάρος
- T700 UD (unidirectional), οι ίνες του οποίου ζυγίζουν 150 gr/m<sup>2</sup> και η περιεκτικότητά του σε ρητίνη είναι 36% κατά βάρος
- M40J woven, με βάρος ινών 150 gr/m<sup>2</sup> και 42% κατά βάρος ρητίνη
- HR40 UD, με βάρος ινών και περιεκτικότητα ρητίνης ίδια με το T700

Από τα παραπάνω υλικά, το T300 woven και το T700 UD είναι πιο φθηνά και αλλά υφίστανται μεγαλύτερες παραμορφώσεις, ενώ τα M40J και HR40 πιο ακριβά αλλά παρουσιάζουν μικρότερες μετατοπίσεις και αντέχουν σε υψηλότερα φορτία.

Έτσι, οι δύο διαφορετικές διαστρωματώσεις για κάθε μέγεθος θα είναι οι:

- STD (standard) διαστρωμάτωση που θα περιέχει τα υλικά T300 woven και T700 UD
- SL (super light) διαστρωμάτωση που θα περιέχει τα υλικά M40J και HR40 κυρίως (συμπληρωματικά σε κάποια σημεία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το T300)

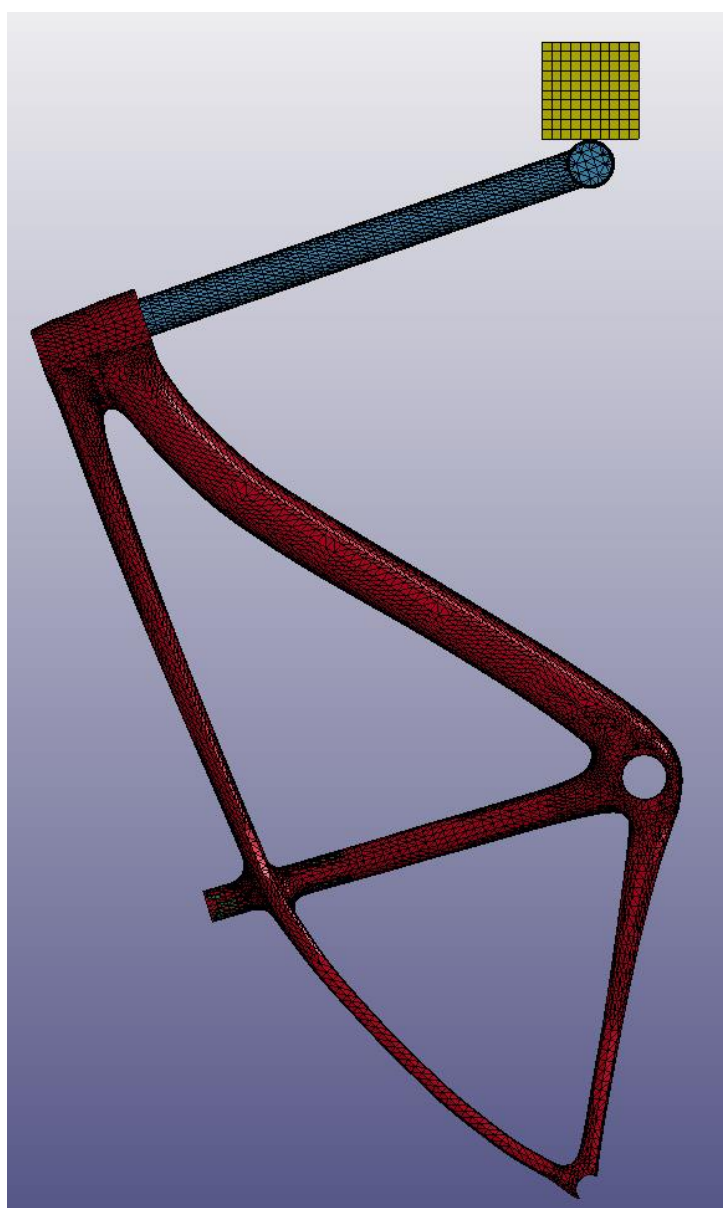
Ζητούμενο σε κάθε διαστρωμάτωση δεν ήταν μόνο να χρησιμοποιηθεί ο ελάχιστος αριθμός στρώσεων ανθρακονήματος έτσι ώστε το μοντέλο να αντέχει σε κάθε προσομοίωση, αλλά και η ακαμψία του σε συγκεκριμένα τμήματα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο ελάχιστος αριθμός στρώσεων, ο σκελετός που θα προέκυπτε δεν θα βόλευε τον αναβάτη. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες μετατοπίσεις που θα είχαν τα διάφορα τμήματα του σκελετού. Για παράδειγμα, μεγάλες μετατοπίσεις κατά το τεστ με τις δυνάμεις πεταλαρίσματος σημαίνει ότι ο αναβάτης καταναλώνει περισσότερη ενέργεια σε σχέση με κάποιον που χρησιμοποιεί έναν πιο άκαμπτο σκελετό για το ίδιο μήκος διαδρομής.

Από την άλλη, σε συγκεκριμένα τμήματα του σκελετού, όπως το top tube και τα seat stays, αυτές οι μετατοπίσεις είναι επιθυμητές για την απορρόφηση των κραδασμών αφού δεν υπάρχει πίσω ανάρτηση. Συνεπώς στις προσομοιώσεις που ακολούθησαν, μας ενδιέφερε πρωτίστως η μέγιστη μετατόπιση σε κάθε τεστ και δευτερευόντως τα μέγιστα φορτία, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν γινόταν έλεγχος κάθε φορά και σε αυτά.

Επιπλέον σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι, καθώς ψάχνουμε πλέον ποσοτικά και όχι μόνο ποιοτικά αποτελέσματα, έγιναν κάποιες προσαρμογές στις

προσομοιώσεις που προέκυψαν από τις προσδιαγραφές του ISO. Οι προσαρμογές αυτές εντοπίζονται στα δύο τεστ πρόσκρουσης.

Στο πρώτο τεστ, όπου η πίπτουσα μάζα προσκρούει στο κάτω μέρος του ομοιώματος πηρουνιού, έγινε χρήση του λογισμικού πακέτου LS-dyna. Εισήχθησαν ως .step αρχεία τα σχέδια του σκελετού και του ομοιώματος πηρουνιού, ενώ σχεδιάστηκε μάζα η οποία προσκρούει στο πηρούνι με την ταχύτητα που θα ανέπτυσσε αν πραγματοποιούσε ελεύθερη πτώση από τα 360 mm που προβλέπει το πρότυπο. Από την ανάλυση προέκυψε το μέγιστο φορτίο που αναπτύσσεται πάνω στον σκελετό. Χρησιμοποιώντας αυτό ως δεδομένο, στήθηκε εκ νέου η προσομοίωση στο πρόγραμμα SEIMENS NX και έγιναν δοκιμές μέχρις ότου βρεθεί η κατάλληλη δύναμη η οποία προκαλεί την ίδια μέγιστη φόρτιση στο ίδιο σημείο του σκελετού. Τα τεστ αυτά έγιναν στο τελικό μοντέλο σκελετού που προέκυψε από τις προσομοιώσεις σε αλουμίνιο.



Εικόνα 82 Διάταξη για το τεστ πίπτουσας μάζας στο LS-dyna

Στο δεύτερο τεστ, κρίθηκε ότι η επιπλέον δύναμη που είχε προτεθεί στο πάνω μέρος του head tube δεν ήταν αρκετή για να προσομοιώσει με ακρίβεια την πραγματικότητα. Δοκιμάστηκε ο σχεδιασμός του τεστ στο πρόγραμμα LS-dyna, χωρίς επιτυχία όμως, καθώς προέκυπταν σφάλματα στις επιμέρους επαφές των διαφόρων τεμαχίων. Έτσι, θεωρήθηκε ότι ο τριπλασιασμός των δυνάμεων που αντικατέστησαν τις μάζες που προβλέπει το πρότυπο είναι καλύτερη προσομοίωση και ίσως να παράγει και μεγαλύτερα φορτία στον σκελετό απ' ό,τι στην πραγματικότητα. Συνεπώς, αν αντέχει ο σκελετός σε αυτήν την καταπόνηση, σίγουρα θα αντέχει και στο πραγματικό τεστ.

Οι υπόλοιπες προσομοιώσεις διατηρήθηκαν, καθώς είχαν μοντελοποιηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια από την αρχή.

### 2.6.1 Ιδιότητες Υλικών

Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε πριν καν αρχίσουν οι αναλύσεις με ανθρακονήματα ήταν ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των διαθέσιμων υλικών. Οι εταιρίες που φτιάχνουν τα υφάσματα prepreg συνήθως χρησιμοποιούν τις ίνες και την εποξική ρητίνη στην συγκεκριμένη περιεκτικότητα που τους ζητά ο αγοραστής. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού μπορεί να γίνει από την εταιρία παραγωγής prepreg αλλά έχει ασύμφορα μεγάλο κόστος, το οποίο αυξάνεται ραγδαία με της αύξηση των ιδιοτήτων που ζητά ο αγοραστής να προσδιοριστούν.

Στην περίπτωση μας, χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες που δίνονται για την εκάστοτε ίνα ανθρακα από την εταιρία παραγωγής Toray, σε συνδυασμό με στοιχεία που βρέθηκαν από εταιρίες που χρησιμοποιούσαν υλικά με παρόμοιες συνταγές με τα διαθέσιμα δικά μας. Επειδή ακριβώς οι ιδιότητες αυτές αφορούσαν ιδανικά δοκίμια, κατά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών στο πρόγραμμα SEIMENS NX μειώθηκαν τα αντίστοιχα μέγιστα φορτία έτσι ώστε να έχω έναν συντελεστή ασφαλείας στα αποτελέσματά μου.

Όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στο παράρτημα.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι τιμές των βασικών ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Παρότι στις τελικές διαστρωματώσεις χρησιμοποιούνται μόνο τα υλικά T300 woven, T700 UD, M40J woven και HR40 UD, δίνονται και οι ιδιότητες για τα M46J woven και M46J UD, καθώς αυτά τα υλικά χρησιμοποιήθηκαν στις αρχικές δοκιμές, όπως θα φανεί παρακάτω.

Properties		T700_UD	T300_Woven	M46J_UD	M46J_Woven	HR40_UD	M40J_Woven
poisson's ratio		0,32	0,08	0,3	0,1	0,3	0,1
density	g/cm <sup>3</sup>	1,394	1,760	1,522	1,484	1,500	1,550
Young's Modulus E1	GPa	135	70	205	160	180	145
E2	GPa	10	70	8	160	8	145
E3	GPa	10	7	8	16	8	8
Shear modulus G12	GPa	5	30	5	40	5	40
G13	GPa	5	5	5	5	5	5
G23	GPa	5	5	5	5	5	5
tensile strength ST1	MPa	2200	700	1900	1600	2000	1700
ST2	MPa	40	700	40	1600	40	1700
ST3	MPa	40	70	40	160	40	170
compressive strength SC1	MPa	1200	541	850	600	900	720
SC2	MPa	40	541	40	600	40	720
SC3	MPa	40	70	40	160	40	170
shear strength SS12	MPa	85,7	95,5	59	35	60	60

*Πίνακας 10 Ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν*

## 2.6.2 Εύρεση διαστρωμάτωσης STD στο μέγεθος L

Όπως και στη διαδικασία σχεδιασμού του αρχικού μοντέλου, η εύρεση διαστρωμάτωσης ξεκίνησε από το μέγεθος L. Αρχικά υπήρξαν δύο ιδέες ως προς την αρχική διαστρωμάτωση που θα δοκιμαστεί:

- Quasi ιστροπική, δηλαδή διαστρωμάτωση με woven στρώσεις σε διεύθυνση 0/90 /  $\pm 45$  μοιρών εναλλάξ, και στη συνέχεια ανάλογα με τα αποτελέσματα αφαίρεση ή πρόσθεση στρώσεων μέχρι να φτάσω τα επιθυμητά φορτία και μετατοπίσεις.
- Η διαστρωμάτωση του μοντέλου σκελετού δρόμου που παράγει ήδη η εταιρία και στη συνέχεια προσθαφαίρεση στρώσεων μέχρι τα επιθυμητά φορτία και μετατοπίσεις.

Η δεύτερη ιδέα επικράτησε τελικά για λόγους οικονομίας χρόνου, καθώς κρίθηκε ότι θα οδηγήσει πιο γρήγορα στην τελική διαστρωμάτωση, παρότι ο σκελετός δρόμου υφίσταται διαφορετικά φορτία, βάσει του ISO, από το σκελετό ορεινής ποδηλασίας.

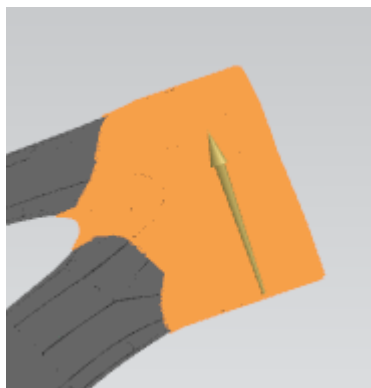
Κατά τη διάρκεια της αναζήτησης κατάλληλης διαστρωμάτωσης προέκυψε σε διάφορα σημεία ανάγκη αλλαγής της γεωμετρίας του σκελετού. Αυτή η ανάγκη οφείλεται κυρίως σε αλλαγές της αγοράς, όπως η αλλαγή του πίσω άξονα από 142 mm σε 148 mm, αλλά και σε παραλήψεις στο αρχικό σχέδιο, όπως η παράληψη σχεδιασμού της βάσης των πίσω δισκόφρενων. Συνεπώς, παρότι η διαδικασία ξεκίνησε με ένα συγκεκριμένο σχέδιο σκελετού, στο τέλος το σχήμα έχει αλλάξει για να εξυπηρετήσει τις καινούργιες ανάγκες που προέκυψαν. Κάθε φορά που άλλαζε το

σχήμα του σκελετού, διατηρούνται η ίδια διαστρωμάτωση και η διαδικασία εύρεσης της κατάλληλης συνταγής συνέχιζε και πάλι από εκείνο το σημείο.

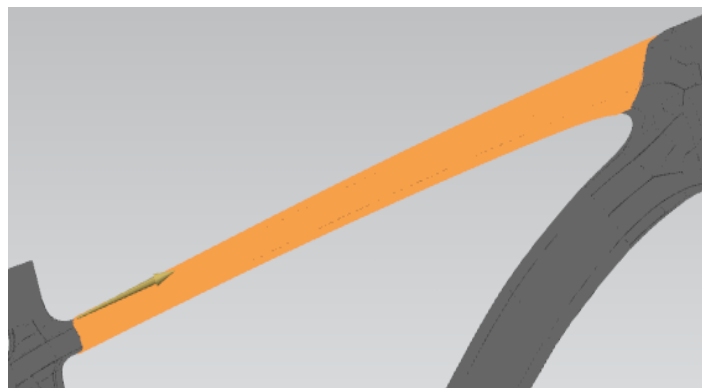
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το πρόγραμμα SEIMENS NX μας δίνει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσουμε τα laminates με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι η zone based μέθοδος, όπου ορίζονται διαφορετικές ζώνες οι οποίες έχουν κοινή διαστρωμάτωση. Ο δεύτερος τρόπος είναι το global layer, όπου ορίζεται η επιφάνεια που θα καταλαμβάνει κάθε στρώση. Πλεονέκτημα της πρώτης μεθόδου είναι η εξοικονόμηση χρόνου κατά το στήσιμο κάθε προσομοίωσης, ενώ παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κατά τη δεύτερη μέθοδο, μπορεί να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματικότητα, καθώς μοντελοποιούνται πλήρως τα overlap ή υπερκαλύψεις των στρώσεων ανθρακονήματος, με αποτέλεσμα να παράγει αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Ωστόσο, σε πολύπλοκα σχήματα όπως ο σκελετός, μπορεί να προκύψουν σφάλματα κατά το "στρώσιμο" κάθε στρώσης και συνεπώς να αλλοιώνονται τα αποτελέσματα. Γι' αυτό το λόγο, επιλέχθηκε η πρώτη μέθοδος για την αναπαράσταση των διαστρωματώσεων.

Για την παραγωγή αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων με την μέθοδο zone based, είναι απαραίτητος ο προσανατολισμός των πεπερασμένων στοιχείων σε μία κατεύθυνση, η οποία θεωρείται η κατεύθυνση με κλίση  $0^\circ$ . Ο προσανατολισμός αυτός αλλάζει για κάθε διαφορετικό κομμάτι του σκελετού, ακολουθώντας τη διεύθυνση του καθενός. Για παράδειγμα, στη διαστρωμάτωση του head tube, τα πεπερασμένα στοιχεία πάνω στον σκελετό είναι προσανατολισμένα κατά την αξονική της «τρύπας» του στην οποία εισέρχεται το πηρούνι.

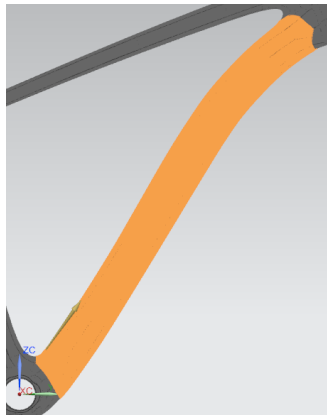
Όπως θα φανεί στη συνέχεια, κάθε κομμάτι του σκελετού έχει διαφορετική διαστρωμάτωση. Στις επόμενες εικόνες φαίνονται τα τμήματα του σκελετού με διαφορετική διαστρωμάτωση.



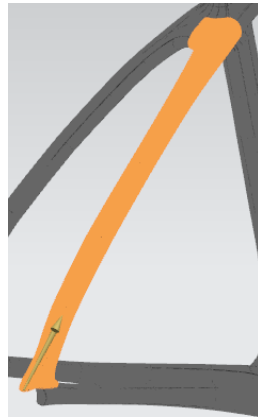
*Εικόνα 83 Τμήμα διαστρωμάτωσης head tube και διάνυσμα προσανατολισμού των στοιχείων*



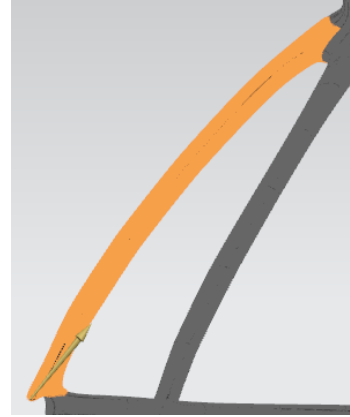
*Εικόνα 84 Τμήμα διαστρωμάτωσης top tube και διάνυσμα προσανατολισμού των στοιχείων*



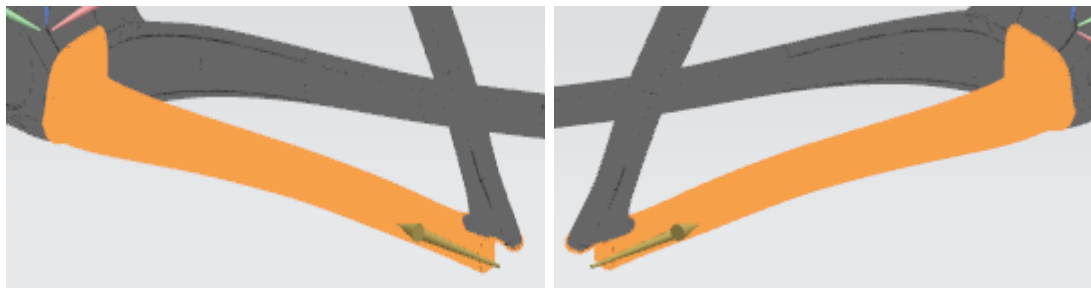
Εικόνα 85 τμήμα διαστρωμάτωσης down tube και διάνυσμα προσανατολισμού των στοιχείων



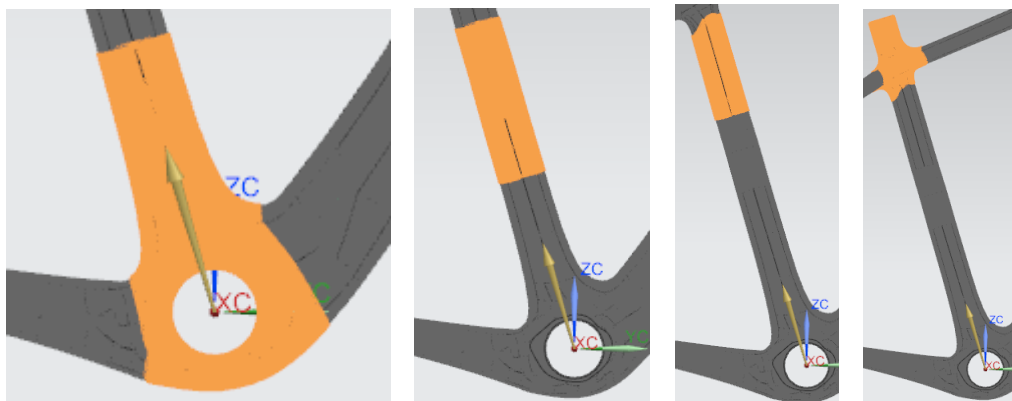
Εικόνα 86 τμήμα διαστρωμάτωσης δεξιού seat stay και διάνυσμα προσανατολισμού των στοιχείων



Εικόνα 87 τμήμα διαστρωμάτωσης αριστερού seat stay και διάνυσμα προσανατολισμού των στοιχείων



Εικόνα 88 τμήματα διαστρωμάτωσης αριστερού chain stay (αριστερά) και δεξιού chain stay (δεξιά) και τα αντίστοιχα διανύσματα προσανατολισμού των στοιχείων



Εικόνα 89 τμήματα διαστρωμάτωσης Seat tube 1/4, 2/4, 3/4 και 4/4 όπως φαίνονται από αριστερά προς τα δεξιά και το διάνυσμα προσανατολισμού των στοιχείων

Συνολικά έγιναν 50 διαφορετικές δοκιμές με χρήση laminates στο πρόγραμμα SEIMENS NX, κατά τις οποίες άλλαζε μία η διαστρωμάτωση και μια το σχήμα του σκελετού. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες από τις πιο ουσιαστικές δοκιμές καθώς και ένας πίνακας που συγκεντρώνει τις μέγιστες μετατοπίσεις ανά τεστ και δοκιμή.



<b>DRAW &amp; CUT</b>												
Drawer Cutter:				Date:		<b>EXACT</b>						
Layer	<b>α/α</b>	<b>HEAD TUBE M401-HR40</b>	<b>α/α</b>	<b>DOWN TUBE M401-HR40</b>	<b>α/α</b>	<b>CHAIN STAYS M401-HR40</b>	<b>α/α</b>	<b>SEAT STAYS T300-T700</b>	<b>α/α</b>	<b>SEAT TUBE M401-HR40</b>	<b>α/α</b>	<b>TOP TUBE T300-T700</b>
a	1	Woven ±45 T300 M401	2	Woven ±45 UD 0 M401	3	Woven ±45 UD 0 M401	4	Woven ±45 UD 0 T300-T700	5	Woven ±45 UD FULL 4/4 M401	6	Woven ±45 UD 0 T300
b	7	Woven ±45 Woven 0/90	8	UD 0 Woven ±45	9	UD 0 Woven ±45	10	UD 0 Woven ±45	11	UD FULL 4/4 Woven 0/90	12	UD 0 Woven ±45
c	13	Woven ±45 Woven 0/90	14	Woven ±45 UD 0	15	Woven ±45 UD 0	16	Woven ±45 UD reinf	17	Woven 0/90 UD 0 3/4	18	Woven ±45 UD reinf
d	19	Woven ±45 Woven 0/90	20	UD 0 Woven ±45	21	UD 0 Woven ±45	22	UD reinf	23	Woven 0/90 UD 0 2/4	24	UD reinf
e	25	Woven ±45 Woven 0/90	26	UD 0	27	UD 0			28	UD 0 1/4		
f	29	Woven ±45 Woven 0/90	30	UD 0	31	UD 0			32	UD 0 1/4		
g	33	Woven ±45 Woven 0/90			34	UD 0				UD 90 1/4		
h	34	Woven 0/90										
		<i>Gear Cable Reinf</i>		<i>Gear Cable Reinf</i>		<i>BB Solid Reinf</i>						<i>Break Cable Reinf</i>
		<i>BB Solid Reinf</i>										
		<i>Break Cable Reinf</i>										
Drawer Cutter:					Date:			<b>OVER</b>				

Πίνακας 12 Διαστρωμάτωση 4<sup>ης</sup> δοκιμής



<b>DRAW &amp; CUT</b>												
Drawer Cutter:				Date:				<b>EXACT</b>				
Layer	$\alpha/\alpha$	<b>HEAD TUBE</b> M40J-HR40	$\alpha/\alpha$	<b>DOWN TUBE</b> M40J-HR40	$\alpha/\alpha$	<b>CHAIN</b> STAYS M40J-HR40	$\alpha/\alpha$	<b>SEAT STAYS</b> T300-T700	$\alpha/\alpha$	<b>SEAT TUBE</b> M40J-HR40	$\alpha/\alpha$	<b>TOP TUBE</b> T300-T700
a	1	Woven $\pm 45$ T300 M40J	2	Woven $\pm 45$ T300 M40J	3	Woven $\pm 45$ T300 M40J	4	Woven $\pm 45$ T300-T700	5	Woven $\pm 45$ T300 M40J	6	Woven $\pm 45$ T300-T700
b	7	Woven 0/90	8	UD 0	9	UD 0	10	UD 0	11	UD FULL 4/4	12	UD 0
c	13	Woven $\pm 45$	14	Woven 0/90	15	Woven 0/90	16	Woven $\pm 45$	17	Woven 0/90	18	Woven $\pm 45$
d	19	Woven 0/90	20	UD 0	21	UD 0	22	UD reinf	23	UD 0 3/4	24	UD reinf
e	25	Woven $\pm 45$	26	Woven 0/90	27	Woven 0/90	28		29	Woven 0/90		
f	29	Woven 0/90	30	UD 0	31	UD 0	32		33	UD 0 2/4		
g	33	Woven $\pm 45$			34	Woven 0/90			35	UD 0 1/4		
h	34	Woven 0/90			36	UD 0				UD 90 1/4		
		<i>Gear Cable Reinf</i>		<i>Gear Cable Reinf</i>		<i>BB Solid Reinf</i>		<i>Break boss Reinf</i>		<i>Gear Cable Reinf</i>		<i>Break Cable Reinf</i>
		<i>BB Solid Reinf</i>										
		<i>Break Cable Reinf</i>										
Drawer Cutter:				Date:				<b>OVER</b>				

Πίνακας 13 Διαστρωμάτωση 7<sup>ης</sup> δοκιμής







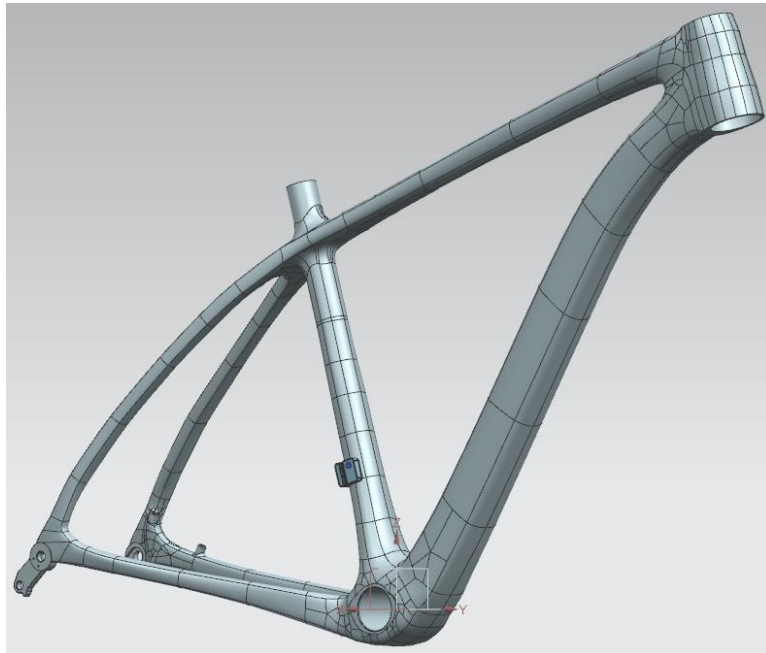




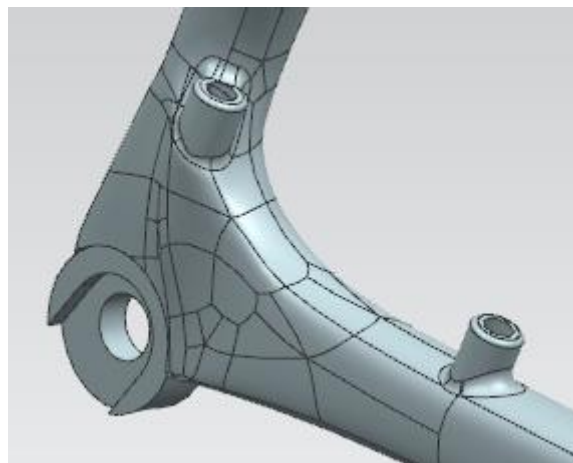
## 26<sup>η</sup> δοκιμή

Σε αυτή τη δοκιμή διατηρήθηκε η ίδια διαστρωμάτωση με την δοκιμή 25, αλλά άλλαξε το σχέδιο του σκελετού. Το άνοιγμα των ψαλιδιών στον πίσω άξονα από 142 mm έγινε 148 mm και σχεδιάστηκε και για πρώτη φορά μία βάση φρένων. Το σχέδιο για τη βάση του δισκόφρενου προκύπτει από το αντίστοιχο πρότυπο της Shimano.

Στο νέο μοντέλο, που απεικονίζεται στη συνέχεια, διατηρήθηκαν ίδιες οι ζώνες των διαστρωματώσεων με πριν.



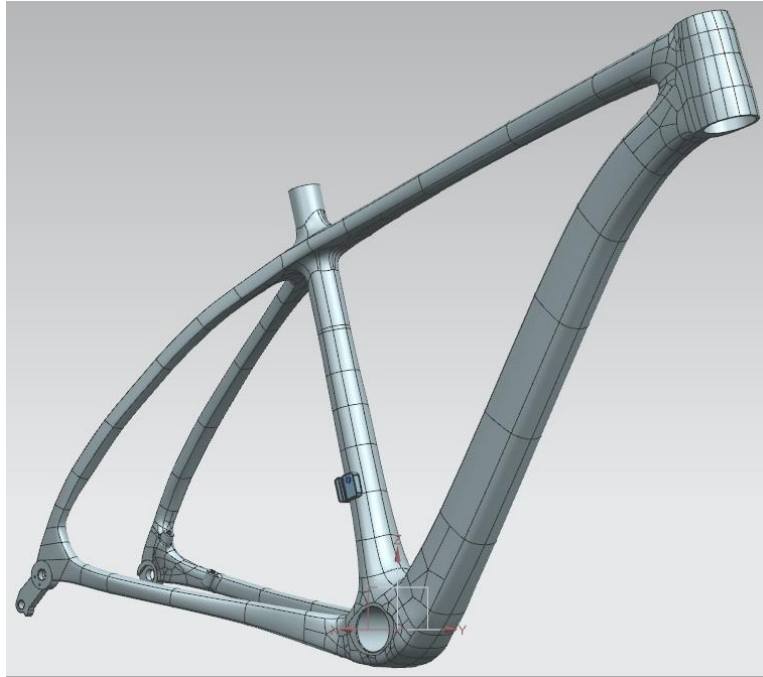
*Εικόνα 90 Νέο σχέδιο σκελετού στην 26<sup>η</sup> δοκιμή*



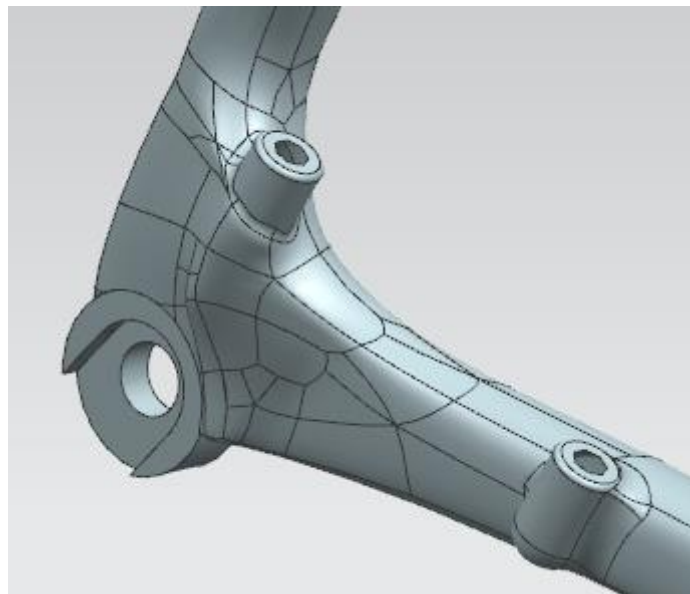
*Εικόνα 91 Λεπτομέρεια βάσης δισκόφρενου*

### 33<sup>η</sup> δοκιμή

Μέχρι και αυτή τη δοκιμή έγιναν αλλαγές στο σχέδιο του σκελετού και ειδικά στο σημείο της βάσης του δισκόφρενου, με παράλληλη διατήρηση της διαστρωμάτωσης της δοκιμής 25. Το νέο σχέδιο που προέκυψε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 92 Νέο σχέδιο σκελετού στην 33<sup>η</sup> δοκιμή*

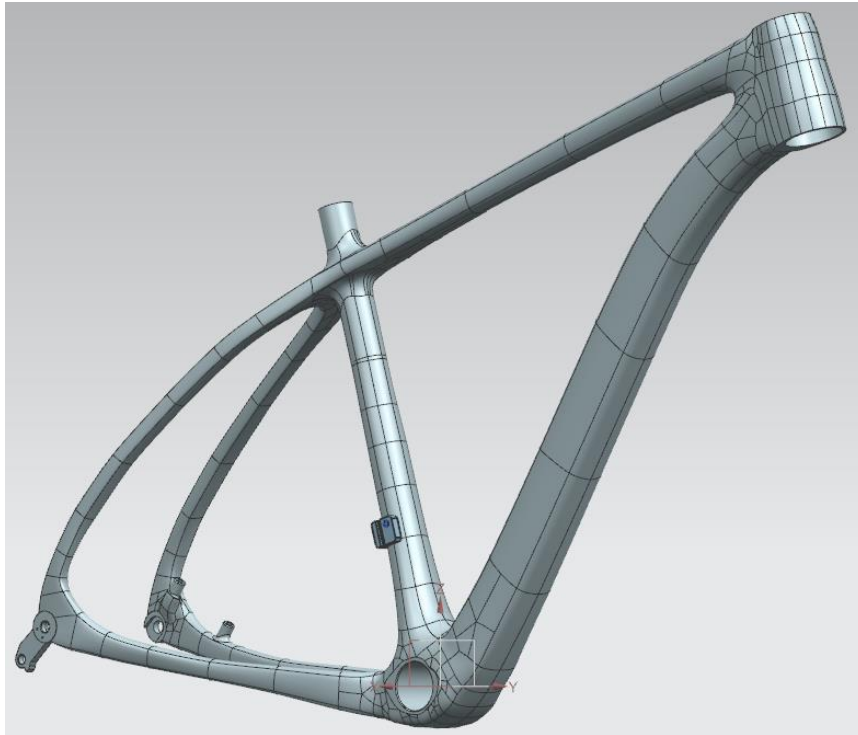


*Εικόνα 93 Λεπτομέρεια βάσης δισκόφρενου*

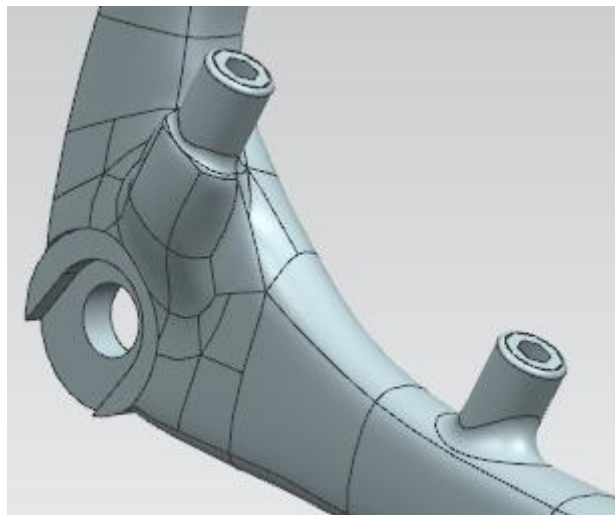


### 34<sup>η</sup> δοκιμή

Σε αυτή τη δοκιμή αλλάζει και πάλι το σχέδιο του σκελετού κοντά στη βάση του δισκόφρενου, διατηρώντας στην ίδια διαστρωμάτωση



*Εικόνα 94 Νέο σχέδιο σκελετού στην 34<sup>η</sup> δοκιμή*

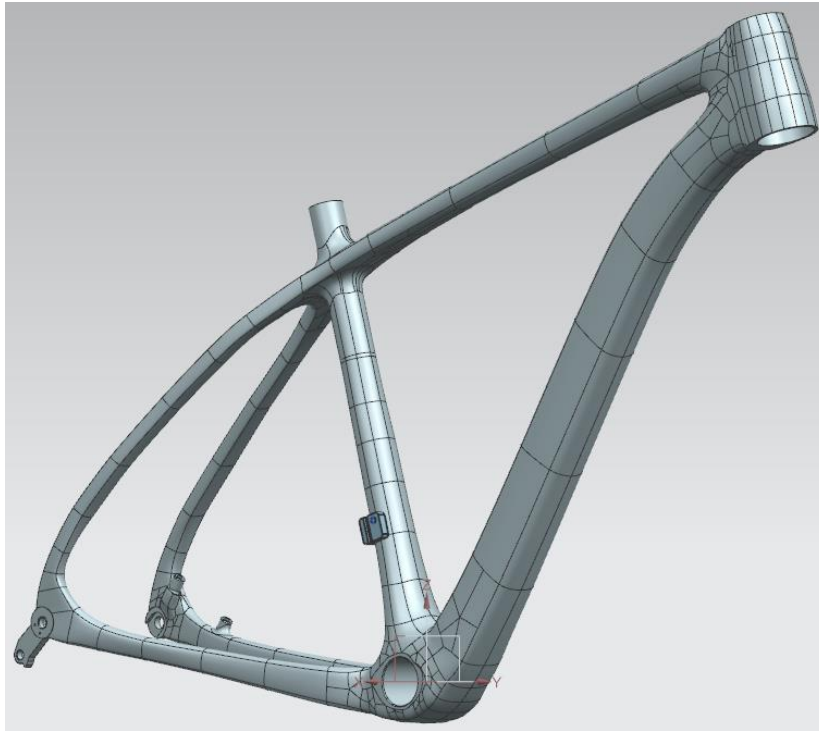


*Εικόνα 95 Λεπτομέρεια στην βάση του δισκόφρενου*

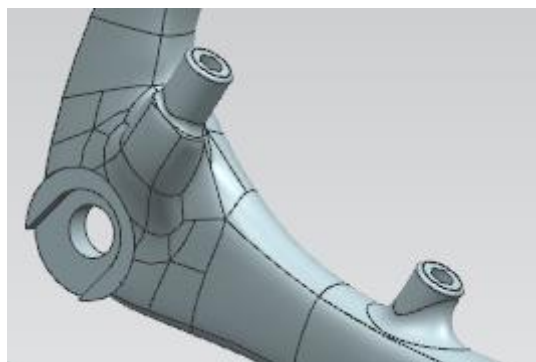


### 39<sup>η</sup> δοκιμή

Μέχρι και αυτή τη δοκιμή αλλάζει και πάλι το σχήμα του σκελετού, ενώ η διαστρωμάτωση παραμένει ίδια με την δοκιμή 35.



*Εικόνα 96 Σχέδιο σκελετού στην δοκιμή 39*



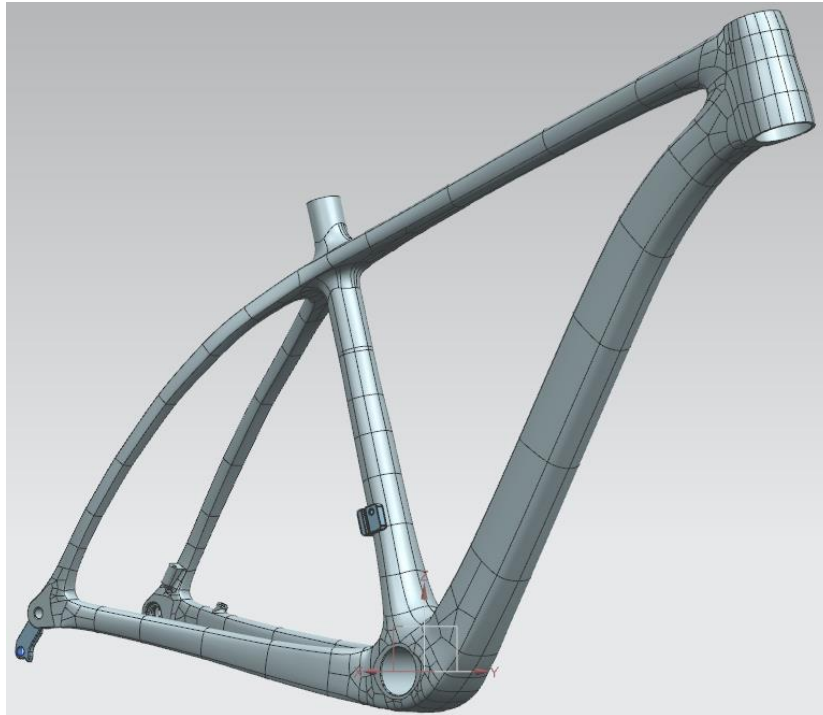
*Εικόνα 97 Λεπτομέρεια στην βάση του δισκόφρενου*



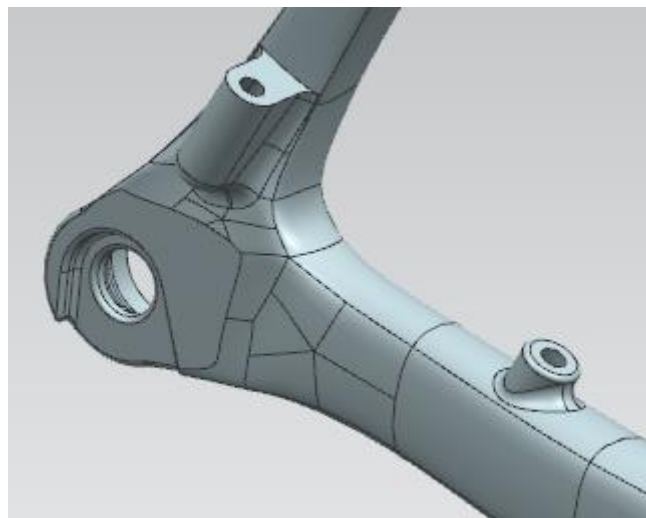


## 50<sup>η</sup> δοκιμή

Μέχρι και την τελευταία αυτή δοκιμή διατηρείται η διαστρωμάτωση της δοκιμής 47 και γίνονται μικρές αλλαγές στο σχέδιο του σκελετού. Το τελικό σχέδιο που προέκυψε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



*Εικόνα 98 Τελικό σχέδιο σκελετού κατά την 50<sup>η</sup> δοκιμή*



*Εικόνα 99 Λεπτομέρεια στην βάση του δισκόφρενου στο τελικό μοντέλο*

Οι μέγιστες μετατοπίσεις σε mm των προσομοιώσεων για κάθε δοκιμή που αναλύθηκε παραπάνω συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	2,687	0,696	1,645	0,823	0,637	2,277	1,998
4η	2,082	0,626	1,404	0,702	0,514	2,074	1,869
7η	1,932	0,627	1,367	0,684	0,513	2,063	1,863
11η	1,343	0,615	1,204	0,602	0,476	2,048	1,864
17η	1,359	0,602	1,169	0,584	0,474	1,906	1,740
21η	1,716	0,653	1,294	0,647	0,552	2,040	1,850
22η	1,867	0,674	1,353	0,677	0,604	2,198	1,973
25η	2,589	0,525	1,491	0,746	0,570	2,254	2,036
26η	2,590	0,524	1,492	0,746	0,570	2,255	2,035
28η	2,584	0,850	1,533	0,766	0,673	2,280	2,103
33η	2,050	0,683	1,409	0,705	0,601	2,240	2,087
34η	2,827	0,720	1,400	0,700	0,652	2,205	2,031
35η	2,619	0,700	1,350	0,675	0,650	2,187	2,021
36η	2,552	0,637	1,340	0,670	0,637	2,169	1,999
39η	2,369	0,569	1,329	0,665	0,604	2,109	1,930
40η	2,730	0,567	1,450	0,725	0,607	2,147	1,962
47η	2,338	0,607	1,341	0,670	0,615	2,182	2,003
50η	2,027	0,733	1,350	0,675	0,577	2,172	2,018

*Πίνακας 22 Μέγιστες μετατοπίσεις ανά δοκιμή στις προσομοιώσεις με ανθρακόνημα για τη διαστρωμάτωση STD στο μέγεθος L*

Ειδικά για την τελευταία δοκιμή παρατίθενται και οι πίνακες των μέγιστων φορτίων σε MPa ανά στρώση για κάθε τεστ και φόρτιση.

Falling mass	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	97,82	-104,13	85,96	-115,68	142,82
Ply 2 (b)	143,27	-225,60	97,75	-85,45	220,64
Ply 3 (c)	74,50	-85,31	77,23	-90,46	96,20
Ply 4 (d)	129,37	-196,51	74,04	-61,65	192,37
Ply 5 (e)	87,31	-68,93	89,54	-73,52	116,82
Ply 6 (f)	183,57	-167,43	84,41	-75,03	185,03
Ply 7 (g)	132,46	-89,58	131,68	-92,45	192,21
Ply 8 (h)	271,93	-173,86	157,42	-112,84	276,12

*Πίνακας 23 Μέγιστα φορτία ανά στρώση στο τεστ πίπτουσας μάζας*

Falling frame	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	60,04	-73,47	62,03	-79,41	108,50
Ply 2 (b)	94,19	-153,70	9,70	-12,07	153,72
Ply 3 (c)	51,29	-68,88	50,66	-69,50	93,35
Ply 4 (d)	114,97	-92,70	36,42	-47,22	115,95
Ply 5 (e)	73,20	-82,47	54,01	-78,47	131,81
Ply 6 (f)	144,87	-126,68	11,03	-10,76	148,26
Ply 7 (g)	28,93	-50,80	37,04	-59,02	81,62
Ply 8 (h)	66,86	-115,28	9,53	-11,21	115,10

Πίνακας 24 Μέγιστα φορτία ανά στρώση στο τεστ πτώσης του σκελετού

Horizontal forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	43,46	-38,33	44,70	-36,89	54,13
Ply 2 (b)	89,45	-59,47	33,58	-38,04	67,50
Ply 3 (c)	33,79	-28,59	35,59	-39,03	48,97
Ply 4 (d)	77,97	-57,02	30,25	-28,36	76,33
Ply 5 (e)	44,32	-39,58	33,76	-41,68	76,31
Ply 6 (f)	78,66	-83,93	29,25	-31,98	86,00
Ply 7 (g)	35,26	-49,49	36,41	-49,13	72,65
Ply 8 (h)	73,21	-101,38	44,48	-59,22	102,98

Πίνακας 25 Μέγιστα φορτία ανά στρώση υπό την επίδραση της οριζόντιας δύναμης F1

Horizontal forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	19,16	-21,73	18,45	-22,35	27,07
Ply 2 (b)	29,74	-44,72	19,02	-16,79	43,75
Ply 3 (c)	14,29	-16,89	19,51	-17,79	24,48
Ply 4 (d)	28,51	-38,99	14,18	-15,13	38,17
Ply 5 (e)	19,79	-22,16	20,84	-16,88	38,16
Ply 6 (f)	41,97	-39,33	15,99	-14,63	43,00
Ply 7 (g)	24,75	-17,63	24,56	-18,21	36,33
Ply 8 (h)	50,69	-36,60	29,61	-22,24	51,49

Πίνακας 26 Μέγιστα φορτία ανά στρώση υπό την επίδραση της οριζόντιας δύναμης F2

Vertical force	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	74,32	-84,30	74,01	-82,68	160,63
Ply 2 (b)	198,38	-224,63	7,92	-9,76	225,00
Ply 3 (c)	47,85	-79,46	47,62	-79,94	104,73
Ply 4 (d)	188,78	-214,23	47,09	-54,40	213,05
Ply 5 (e)	132,14	-149,49	47,05	-60,34	151,22
Ply 6 (f)	118,33	-100,09	8,53	-9,47	121,70
Ply 7 (g)	18,43	-25,88	16,05	-37,01	43,07
Ply 8 (h)	30,07	-58,27	6,85	-8,95	57,99

Πίνακας 27 Μέγιστα φορτία ανά στρώση κατά το τεστ κατακόρυφης δύναμης



Pedalling forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	65,48	-57,16	74,31	-65,85	105,79
Ply 2 (b)	69,44	-146,43	21,15	-23,45	146,43
Ply 3 (c)	36,65	-55,90	57,14	-59,07	87,54
Ply 4 (d)	75,63	-100,05	23,55	-38,75	99,94
Ply 5 (e)	56,16	-79,16	63,70	-50,98	110,62
Ply 6 (f)	145,66	-160,45	18,56	-12,14	159,70
Ply 7 (g)	43,02	-48,25	44,93	-57,14	76,23
Ply 8 (h)	95,80	-109,36	36,57	-16,97	109,07

*Πίνακας 28 Μέγιστα φορτία ανά στρώση κατά το τεστ με τη δύναμη πεταλαρίσματος F1*

Pedalling forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	70,49	-64,03	70,96	-62,08	92,48
Ply 2 (b)	93,42	-130,11	29,30	-24,85	129,96
Ply 3 (c)	51,89	-50,88	42,28	-57,49	86,50
Ply 4 (d)	126,05	-100,36	24,48	-39,33	127,88
Ply 5 (e)	81,80	-62,82	67,18	-86,55	136,52
Ply 6 (f)	172,49	-114,32	19,34	-13,13	176,77
Ply 7 (g)	41,03	-44,62	42,52	-27,25	63,13
Ply 8 (h)	91,02	-106,56	22,06	-18,21	107,42

*Πίνακας 29 Μέγιστα φορτία ανά στρώση κατά το τεστ με τη δύναμη πεταλαρίσματος F2*

Είναι φανερό ότι τα φορτία είναι πολύ μικρά σε σχέση με αυτά που αντέχουν τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Ο λόγος που προστέθηκαν τόσες στρώσεις ενώ τα φορτία είναι πολύ χαμηλά είναι ότι θέλω να έχω μικρές μετατοπίσεις. Επίσης, καθώς τα υλικά T300 και T700 δεν είναι τόσο ακριβά σε σχέση με τα M40J και HR40, δεν τίθεται θέμα αυξημένου κόστους. Έτσι, έχουμε την ελευθερία να προσθέσουμε όσες στρώσεις χρειάζονται για να αυξηθεί η ακαμψία του σκελετού.

### 2.6.3 Εύρεση διαστρωμάτωσης SL στο μέγεθος L

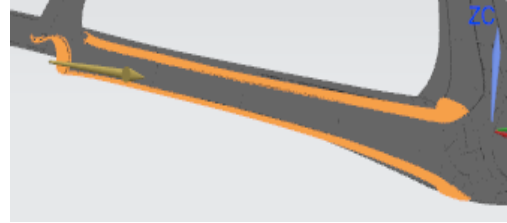
Βάση για την πρώτη διαστρωμάτωση SL στο μέγεθος L αποτέλεσε η 21<sup>η</sup> δοκιμή που έγινε κατά την αναζήτηση της STD διαστρωμάτωσης. Καθώς η διαδικασίες αναζήτησης των κατάλληλων συνταγών διεξαγότουσαν ταυτόχρονα, με κάθε αλλαγή στο σχέδιο του σκελετού στην STD διαστρωμάτωση, άλλαζε αντίστοιχα το σχήμα του σκελετού στην SL διαστρωμάτωση.

Για την εύρεση της SL συνταγής έγιναν συνολικά 55 δοκιμές που περιλαμβάνουν αλλαγές τόσο στις διαστρωματώσεις όσο και στα σχέδια του μοντέλου του σκελετού.

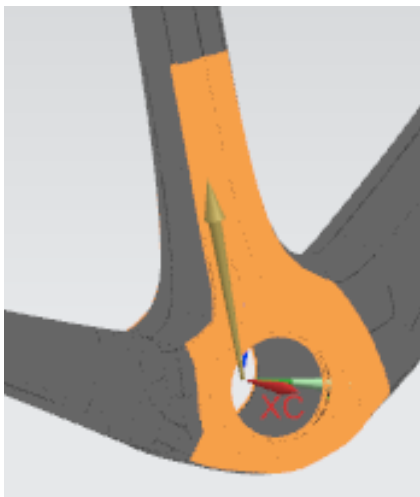
Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, αλλάζουν λίγο τα τμήματα του σκελετού που έχουν διαφορετικές διαστρωματώσεις. Οι αλλαγές αυτές εντοπίζονται στα chain stays, down tube και seat tube 1/4. Ο λόγος είναι ότι προστίθενται στρώσεις όχι σε όλη την επιφάνεια των αντίστοιχων τμημάτων, αλλά σε συγκεκριμένα μόνο τμήματά τους. Οι αλλαγές φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



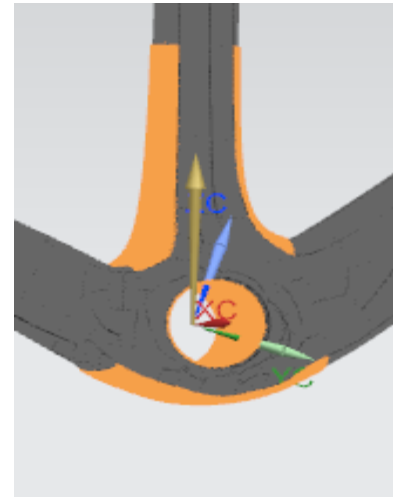
Εικόνα 100 τμήμα του chain stay που περιέχει και τις στρώσεις «αριστερά - δεξιά»



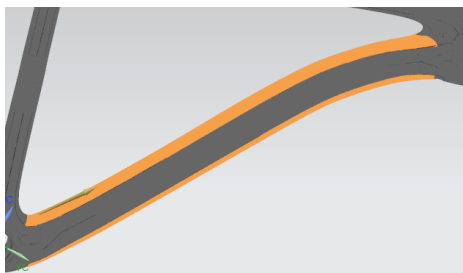
Εικόνα 101 τμήμα του chain stay που δεν περιέχει τις στρώσεις «αριστερά - δεξιά»



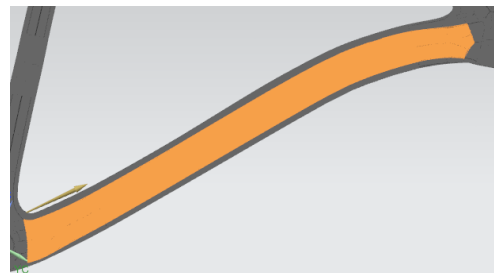
Εικόνα 102 τμήμα του seat tube 1/4 που περιέχει τις στρώσεις «πλαϊνά»



Εικόνα 103 τμήμα του seat tube 1/4 που δεν περιέχει τις στρώσεις «πλαϊνά»



Εικόνα 104 τμήμα του down tube που περιέχει τις στρώσεις «πάνω - κάτω»



Εικόνα 105 τμήμα του down tube που δεν περιέχει τις στρώσεις «πάνω - κάτω»

Σε περίπτωση που δεν αναφέρεται κάτι αντίστοιχο στην διαστρωμάτωση, τα τμήματα μένουν ίδια με τις δοκιμές για την διαστρωμάτωση STD.

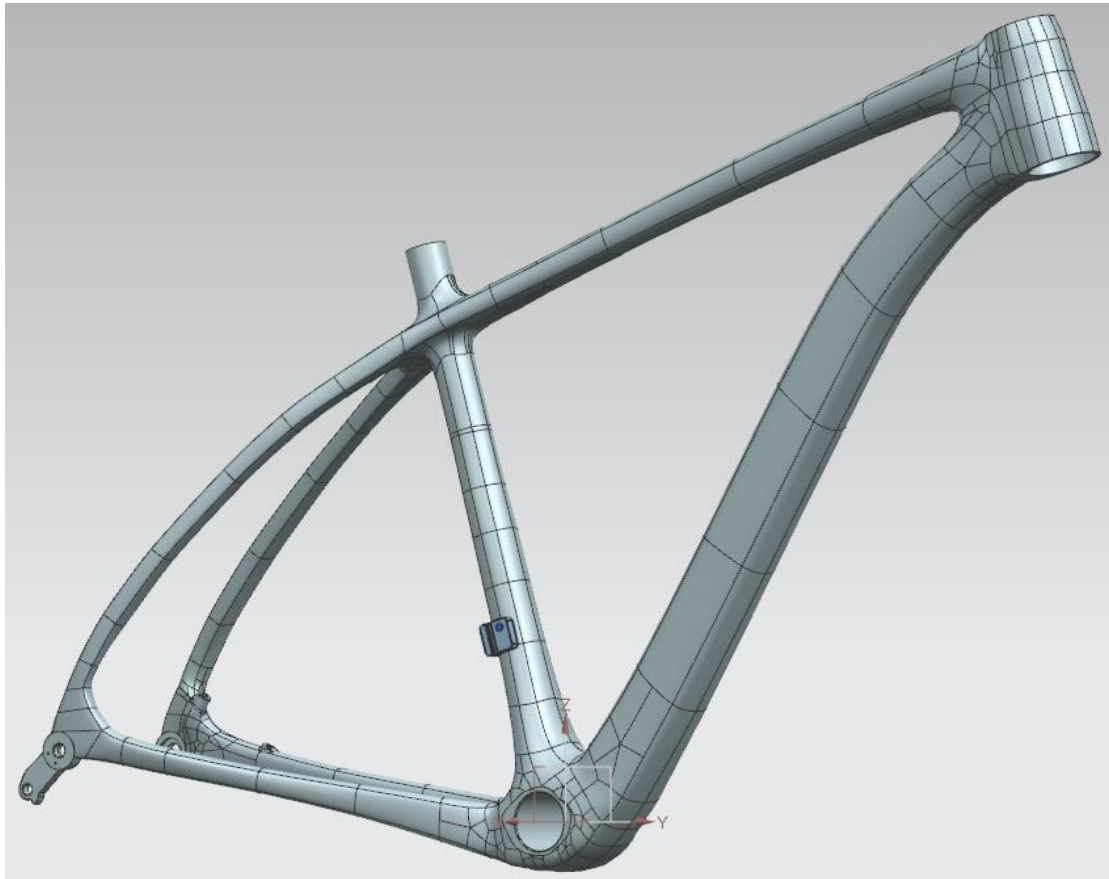




## 8<sup>η</sup> δοκιμή

Σε αυτήν την δοκιμή αλλάζει το σχήμα του σκελετού, ενώ η διαστρωμάτωση είναι όμοια με της δοκιμής 6.

Το νέο σχήμα του σκελετού φαίνεται παρακάτω



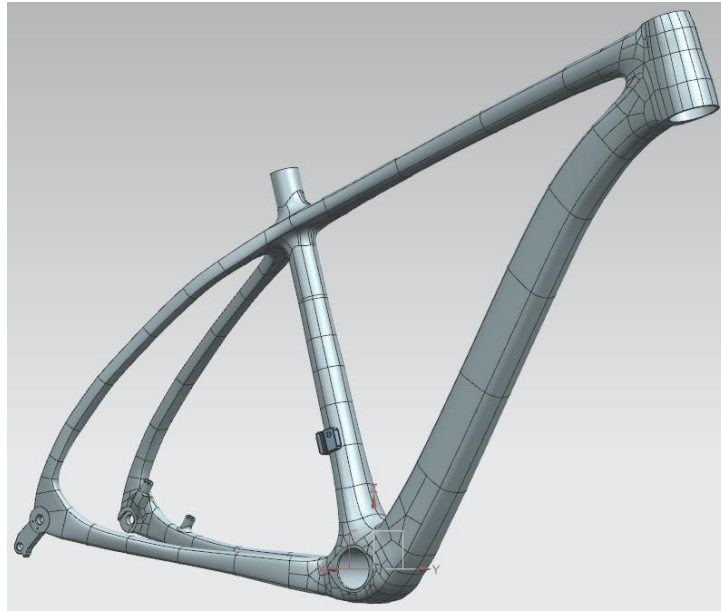
*Εικόνα 106 Μοντέλο σκελετού κατά την 8<sup>η</sup> δοκιμή*





### 24<sup>η</sup> δοκιμή

Στη δοκιμή αυτή, αλλάζει το σχήμα του σκελετού, ενώ διατηρείται η ίδια συνταγή με την δοκιμή 23. Το νέο σχέδιο του σκελετού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 107 Μοντέλο σκελετού κατά την 24<sup>η</sup> δοκιμή*

### 27<sup>η</sup> δοκιμή

Μέχρι και τη δοκιμή 27, διατηρείται η διαστρωμάτωση της δοκιμής 23 και γίνονται μικρές αλλαγές στο σχέδιο του σκελετού, ανάλογες με αυτές που έγιναν κατά την αναζήτηση της STD διαστρωμάτωσης. Το νέο μοντέλο του σκελετού είναι το παρακάτω.



*Εικόνα 108 Μοντέλο σκελετού κατά την 27<sup>η</sup> δοκιμή*







<b>DRAW &amp; CUT</b>									
Drawer Cutter:					Date:				
					<b>EXACT</b>				
Layer	α/α	HEAD TUBE M40J-HR40	DOWN TUBE M40J-HR40	CHAIN STAYS M40J- HR40	α/α	SEAT STAYS	SEAT TUBE M40J- HR40	α/α	TOP TUBE
a	1	Woven ±45 M40J	Woven ±45 M40J	Woven ±45 M40J	4	Woven ±45 M40J	Woven ±45 M40J	5	Woven ±45 M40J
b	7	Woven 0/90	UD 0	UD 0	10	Woven 0/90	UD FULL 4/4	11	Woven ±45 M40J
c	13	Woven ±45	Woven ±45	UD 0	16	Woven ±45	Woven ±45	12	Woven 0/90 M40J
d	17	Woven 0/90	UD 0	UD 0	20	UD FULL 4/4	UD FULL 4/4	24	Woven 0/90
e	21	Woven ±45	Woven 0/90	Woven 0/90	24	Woven 0/90	Woven 0/90	28	UD 0 1/4
f	25	Woven 0/90	UD 0	UD 0 αριστερά-δεξιά	28	UD 0 1/4	UD 0 1/4	32	UD 90 1/4 πλάι
g	29	Woven ±45	UD 0	Woven ±45	33	UD 0			
h				Woven 0/90	34				
				<i>Gear Cable Reinf</i>					<i>Break Cable Reinf</i>
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Break Cable Reinf</i>					
Drawer Cutter:					Date:				
					<b>OVER</b>				
Layer	α/α	HEAD TUBE M40J-HR40	DOWN TUBE M40J-HR40	CHAIN STAYS M40J- HR40	α/α	SEAT STAYS	SEAT TUBE M40J- HR40	α/α	TOP TUBE
a	1	Woven ±45 M40J	Woven ±45 M40J	Woven ±45 M40J	4	Woven ±45 M40J	Woven ±45 M40J	5	Woven ±45 M40J
b	7	Woven 0/90	UD 0	UD 0	10	Woven 0/90	UD FULL 4/4	11	UD FULL 4/4
c	13	Woven ±45	Woven ±45	UD 0	16	Woven ±45	Woven ±45	20	UD FULL 4/4
d	17	Woven 0/90	UD 0	UD 0	24	Woven 0/90	Woven 0/90	28	UD 0 1/4
e	21	Woven ±45	Woven 0/90	Woven 0/90	24	Woven 0/90	Woven 0/90	32	UD 90 1/4 πλάι
f	25	Woven 0/90	UD 0	UD 0 αριστερά-δεξιά	33	UD 0			
g	29	Woven ±45	UD 0	Woven ±45	34	UD 0			
h				Woven ±45	35				
				UD 0	36				
				Woven 0/90					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					<i>Break Cable Reinf</i>
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					
				<i>Water Bottle Reinf</i>					
				<i>BB Solid Reinf</i>					
				<i>Gear Cable Reinf</i>					



### 55<sup>η</sup> δοκιμή

Στην τελική δοκιμή διατηρείται η διαστρωμάτωση της δοκιμής 54 και αλλάζει το σχέδιο του σκελετού, όπως και στην αναζήτηση της STD διαστρωμάτωσης

Το τελικό σχέδιο του σκελετού είναι το παρακάτω.



*Εικόνα 109 Μοντέλο σκελετού κατά την 55<sup>η</sup> δοκιμή*

Οι μέγιστες μετατοπίσεις σε mm των προσομοιώσεων για κάθε δοκιμή που αναλύθηκε παραπάνω συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	1,683	0,622	1,290	0,645	0,505	2,011	1,823
6η	1,724	0,628	1,334	0,667	0,506	2,080	1,884
8η	2,304	0,692	1,460	0,730	0,566	2,162	1,989
18η	1,156	0,675	1,150	0,575	0,519	1,979	1,846
23η	1,405	0,662	1,203	0,602	0,549	1,961	1,810
24η	2,070	0,678	1,203	0,601	0,638	2,008	1,862
27η	1,836	0,555	1,186	0,593	0,553	1,944	1,785
36η	1,844	0,634	1,190	0,595	0,587	1,999	1,836
43η	1,965	0,606	1,203	0,602	0,583	1,948	1,791
50η	2,864	0,592	1,502	0,751	0,580	2,006	1,826
54η	2,904	0,614	1,512	0,756	0,589	2,095	1,907
55η	2,463	0,659	1,535	0,768	0,544	2,079	1,911

*Πίνακας 38 Μέγιστες μετατοπίσεις ανά δοκιμή στην αναζήτηση της διαστρωμάτωσης SL*

Ειδικά για την τελευταία δοκιμή παρατίθενται και οι πίνακες των μέγιστων φορτίων σε MPa ανά στρώση για κάθε τεστ και φόρτιση.

Falling mass	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	192,97	-216,46	171,35	-219,84	224,22
Ply 2 (b)	186,55	-213,66	176,77	-154,05	215,43
Ply 3 (c)	169,30	-143,76	154,30	-152,10	176,70
Ply 4 (d)	177,13	-175,76	161,11	-122,48	177,18
Ply 5 (e)	191,28	-151,03	188,17	-157,14	267,84
Ply 6 (f)	245,97	-194,02	209,64	-132,22	250,65
Ply 7 (g)	293,99	-201,71	293,70	-174,37	348,92
Ply 8 (h)	35,83	-87,10	1,46	-4,09	85,22
Ply 9 (i)	53,75	-129,59	31,22	-72,09	128,25

Πίνακας 39 Φορτία κατά το τεστ πίπτουσας μάζας ανά στρώση στην 55<sup>η</sup> δοκιμή

Falling frame	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	79,49	-112,09	79,77	-109,21	136,85
Ply 2 (b)	103,69	-178,43	62,06	-51,07	176,11
Ply 3 (c)	59,91	-104,21	44,74	-103,06	103,95
Ply 4 (d)	69,21	-76,87	64,04	-95,59	119,46
Ply 5 (e)	61,03	-116,74	46,89	-70,21	116,33
Ply 6 (f)	52,72	-108,32	67,18	-98,85	140,84
Ply 7 (g)	61,57	-81,16	94,74	-102,01	140,19
Ply 8 (h)	41,67	-28,47	3,12	-4,28	40,89
Ply 9 (i)	58,93	-32,87	64,30	-92,20	120,09

Πίνακας 40 Φορτία κατά το τεστ πτώσης σκελετού ανά στρώση στην 55<sup>η</sup> δοκιμή

Horizontal forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	78,82	-68,34	74,12	-57,54	78,06
Ply 2 (b)	88,02	-68,93	60,74	-61,27	84,87
Ply 3 (c)	53,45	-58,64	56,23	-55,62	63,99
Ply 4 (d)	66,50	-65,24	53,80	-59,34	66,05
Ply 5 (e)	57,05	-69,48	61,90	-68,40	96,29
Ply 6 (f)	73,51	-89,03	50,15	-76,08	90,68
Ply 7 (g)	76,46	-106,20	65,92	-106,58	125,25
Ply 8 (h)	56,17	-20,88	2,65	-1,37	55,05
Ply 9 (i)	76,63	-21,44	43,27	-28,25	75,97

Πίνακας 41 Φορτία υπό την επίδραση της οριζόντιας δύναμης F1 ανά στρώση στην 55<sup>η</sup> δοκιμή

Horizontal forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	34,17	-39,41	26,77	-37,06	39,03
Ply 2 (b)	34,47	-44,10	30,64	-30,37	42,44
Ply 3 (c)	29,32	-26,73	27,81	-28,11	31,99
Ply 4 (d)	32,62	-33,25	29,67	-26,90	33,02
Ply 5 (e)	34,74	-28,53	34,20	-30,95	48,14
Ply 6 (f)	44,52	-36,76	38,04	-25,07	45,34
Ply 7 (g)	53,10	-38,23	53,29	-32,96	62,63
Ply 8 (h)	10,44	-28,09	0,68	-1,33	27,53
Ply 9 (i)	10,72	-38,32	14,13	-23,13	37,99

Πίνακας 42 Φορτία υπό την επίδραση της οριζόντιας δύναμης F2 ανά στρώση στην 55<sup>η</sup> δοκιμή

Vertical force	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	117,15	-131,80	116,65	-127,76	185,58
Ply 2 (b)	215,00	-241,12	47,92	-69,42	241,90
Ply 3 (c)	77,15	-117,94	76,32	-118,46	155,10
Ply 4 (d)	198,00	-223,42	75,72	-92,01	223,20
Ply 5 (e)	210,72	-237,36	42,38	-47,62	241,87
Ply 6 (f)	37,23	-72,92	37,66	-55,76	81,40
Ply 7 (g)	50,12	-52,87	43,14	-68,55	79,14
Ply 8 (h)	26,26	-15,42	1,37	-2,50	26,36
Ply 9 (i)	44,37	-44,36	28,86	-53,02	67,55

Πίνακας 43 Φορτία κατά το τεστ κατακόρυφης δύναμης ανά στρώση στην 55<sup>η</sup> δοκιμή

Peddalling forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	112,62	-98,45	155,60	-94,36	175,73
Ply 2 (b)	84,90	-141,85	45,99	-54,75	148,53
Ply 3 (c)	66,87	-94,63	100,34	-87,89	137,77
Ply 4 (d)	89,63	-79,30	42,76	-70,81	91,52
Ply 5 (e)	83,29	-89,63	83,01	-65,14	113,28
Ply 6 (f)	114,91	-91,49	76,02	-51,32	128,66
Ply 7 (g)	125,66	-112,67	65,58	-89,14	124,32
Ply 8 (h)	56,06	-23,70	3,22	-4,28	55,69
Ply 9 (i)	119,19	-69,64	67,52	-91,40	118,41

Πίνακας 44 Φορτία κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F1 ανά στρώση στην 55<sup>η</sup> δοκιμή

Peddalling forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	148,06	-104,14	112,86	-137,32	166,25
Ply 2 (b)	103,71	-163,60	63,65	-44,87	161,81
Ply 3 (c)	95,34	-95,26	55,08	-62,03	130,09
Ply 4 (d)	93,32	-88,36	56,21	-96,32	120,40
Ply 5 (e)	90,21	-109,86	80,69	-108,74	121,32
Ply 6 (f)	109,65	-106,69	75,73	-97,74	139,03
Ply 7 (g)	120,00	-107,86	112,57	-103,26	142,47
Ply 8 (h)	14,49	-65,27	1,72	-2,70	64,91
Ply 9 (i)	115,71	-69,41	35,43	-47,42	113,63

Πίνακας 45 Φορτία κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F2 ανά στρώση στην 55<sup>η</sup> δοκιμή





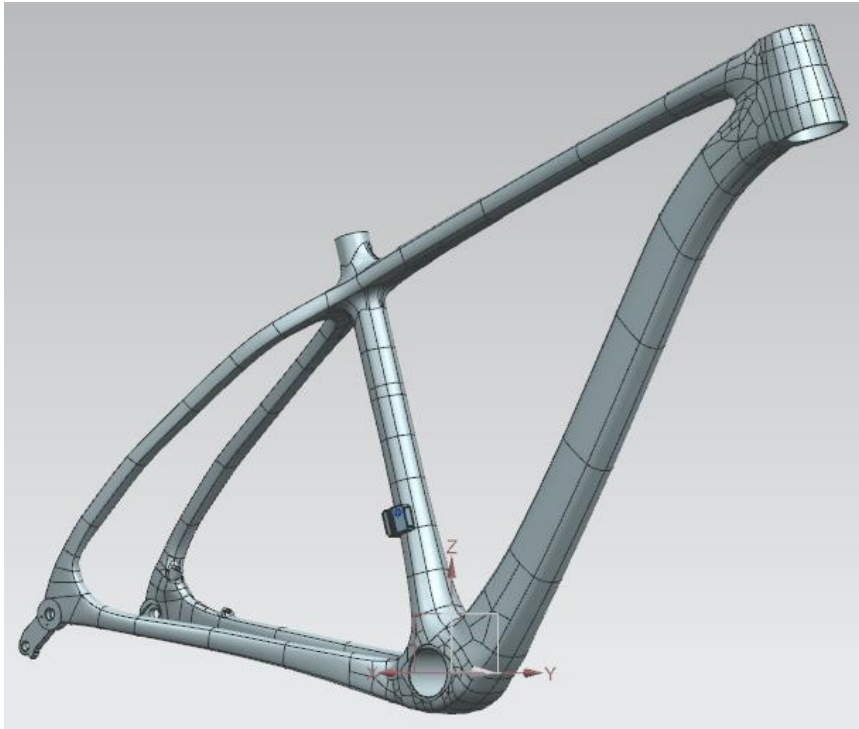




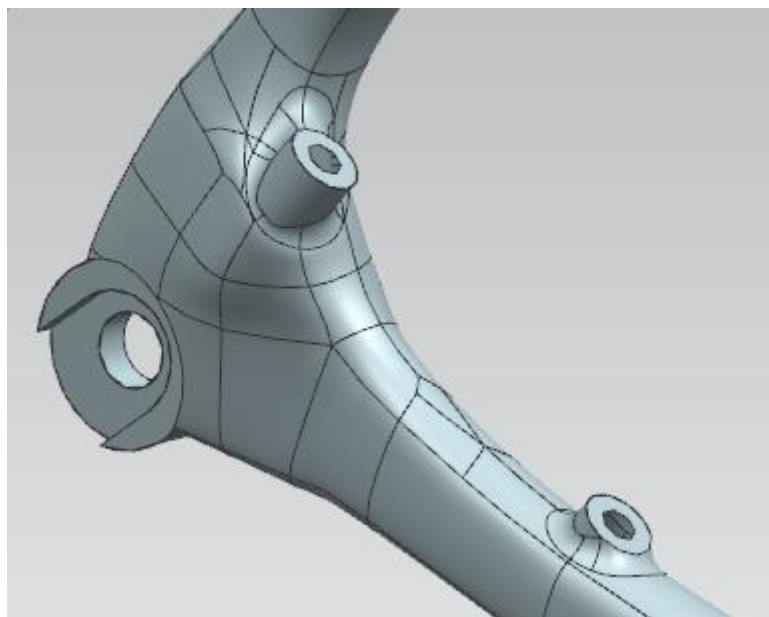


## 5<sup>η</sup> δοκιμή

Στην πέμπτη δοκιμή η διαστρωμάτωση παραμένει η ίδια, αλλά αλλάζει στο σχέδιο του σκελετού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 110 Μοντέλο σκελετού κατά την 5<sup>η</sup> δοκιμή*



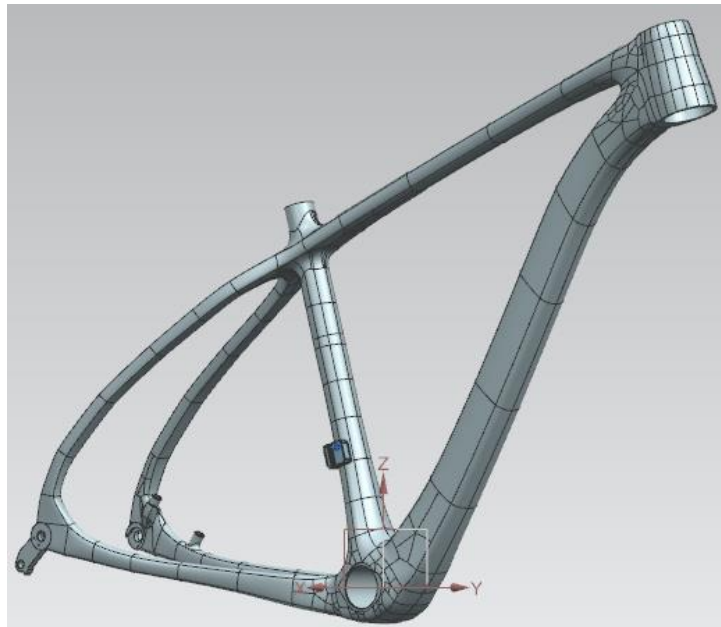
*Εικόνα 111 Λεπτομέρεια στην βάση του δισκόφρενου*



### 8<sup>η</sup> δοκιμή

Στην όγδοη δοκιμή αλλάζει και πάλι το σχήμα του σκελετού, ενώ η διαστρωμάτωση παραμένει η ίδια με την δοκιμή 7.

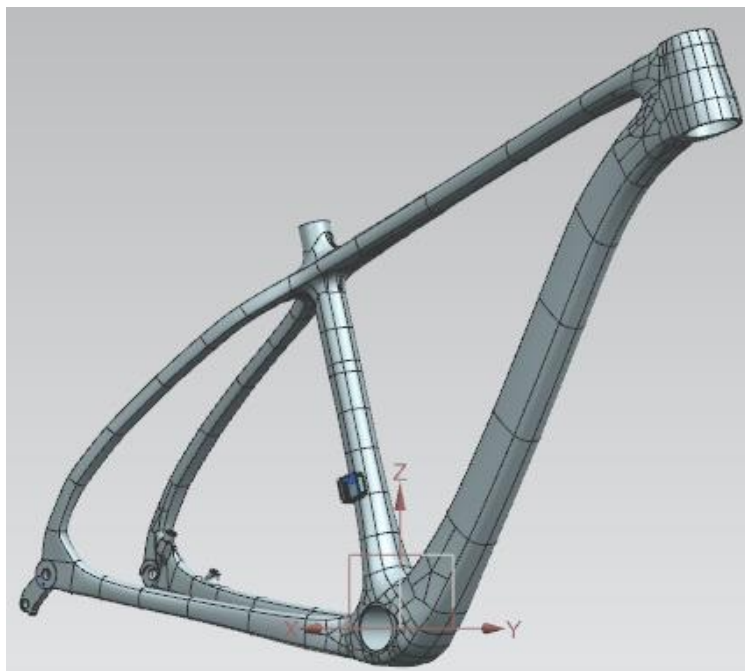
Το νέο σχήμα του σκελετού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 112 Μοντέλο σκελετού στην 8<sup>η</sup> δοκιμή

### 10<sup>η</sup> δοκιμή

Αλλάζει και πάλι το σχήμα του σκελετού, ενώ η διαστρωμάτωση διατηρείται.



Εικόνα 113 Μοντέλο σκελετού στην 10<sup>η</sup> δοκιμή







Συνολικά, φαίνονται στον επόμενο πίνακα οι μέγιστες μετατοπίσεις σε mm ανά δοκιμή για κάθε τεστ.

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	2,667	0,622	1,536	0,768	0,458	2,366	2,137
2η	2,639	0,622	1,534	0,767	0,458	2,354	2,125
3η	2,440	0,624	1,485	0,743	0,457	2,337	2,112
4η	2,435	0,624	1,484	0,742	0,457	2,337	2,113
5η	1,940	0,482	1,347	0,674	0,452	2,090	1,910
7η	2,172	0,449	1,398	0,699	0,436	2,118	1,927
8η	2,829	0,637	1,413	0,707	0,546	2,240	2,065
10η	2,562	0,579	1,407	0,703	0,507	2,154	1,971
11η	2,589	0,619	1,423	0,711	0,520	2,249	2,065
12η	2,580	0,619	1,421	0,711	0,520	2,249	2,065

Πίνακας 53 Μέγιστες μετατοπίσεις ανά δοκιμή για την διαστρωμάτωση STD του μεγέθους M

Ειδικά για την τελευταία δοκιμή παρατίθενται και οι πίνακες των μέγιστων φορτίων σε MPa ανά στρώση για κάθε τεστ και φόρτιση.

Falling mass	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	133,72	-136,70	133,75	-146,80	147,89
Ply 2 (b)	248,94	-214,80	90,20	-110,56	241,66
Ply 3 (c)	137,29	-102,93	140,41	-114,24	128,20
Ply 4 (d)	212,82	-160,82	87,90	-85,44	207,66
Ply 5 (e)	109,27	-98,61	101,99	-97,02	160,08
Ply 6 (f)	200,97	-213,97	130,92	-115,41	207,83
Ply 7 (g)	165,13	-164,67	164,15	-166,68	212,26
Ply 8 (h)	41,84	-75,70	3,93	-6,24	73,35

Πίνακας 54 Φορτία κατά το τεστ της πίπτουσας μάζας στην 12<sup>η</sup> δοκιμή

Falling frame	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	55,37	-55,59	48,76	-54,17	88,45
Ply 2 (b)	104,73	-107,39	14,71	-9,71	107,03
Ply 3 (c)	43,86	-53,63	51,63	-72,11	71,80
Ply 4 (d)	74,09	-72,16	47,94	-70,28	94,72
Ply 5 (e)	41,74	-66,19	38,42	-71,96	88,26
Ply 6 (f)	94,49	-104,29	11,61	-13,06	104,73
Ply 7 (g)	28,84	-34,77	52,12	-50,95	69,51
Ply 8 (h)	54,09	-85,11	8,43	-8,64	81,71

Πίνακας 55 Φορτία κατά το τεστ πτώσης του σκελετού στην 12<sup>η</sup> δοκιμή

Horizontal forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	57,10	-50,04	53,82	-50,37	56,88
Ply 2 (b)	90,28	-91,17	49,30	-31,57	90,14
Ply 3 (c)	45,29	-35,93	42,46	-36,18	45,96
Ply 4 (d)	62,44	-73,69	35,08	-33,36	72,23
Ply 5 (e)	4,17	-40,24	41,83	-40,65	51,02
Ply 6 (f)	75,86	-73,60	46,51	-46,86	73,90
Ply 7 (g)	66,38	-59,67	66,03	-59,75	75,20
Ply 8 (h)	49,14	-26,94	4,91	-4,89	47,17

Πίνακας 56 Φορτία κατά το τεστ με οριζόντια δύναμη F1 στην 12<sup>η</sup> δοκιμή

Horizontal forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	25,02	-28,55	25,19	-26,91	28,44
Ply 2 (b)	45,58	-45,14	15,79	-24,65	45,07
Ply 3 (c)	17,97	-22,65	18,09	-21,23	22,98
Ply 4 (d)	36,85	-31,22	16,68	-17,64	36,11
Ply 5 (e)	20,12	-20,09	20,32	-20,91	25,61
Ply 6 (f)	36,80	-37,93	23,43	-23,26	36,95
Ply 7 (g)	29,83	-33,19	29,87	-33,02	37,60
Ply 8 (h)	13,47	-24,57	2,45	-2,46	23,58

Πίνακας 57 Φορτία κατά το τεστ με οριζόντια δύναμη F2 στην 12<sup>η</sup> δοκιμή

Vertical force	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	45,24	-69,15	45,01	-68,03	95,16
Ply 2 (b)	107,51	-127,16	7,39	-9,51	127,24
Ply 3 (c)	37,80	-63,62	37,61	-62,86	73,22
Ply 4 (d)	114,13	-137,52	56,82	-73,48	137,56
Ply 5 (e)	60,74	-73,26	22,95	-37,63	83,74
Ply 6 (f)	76,44	-93,43	8,48	-8,60	92,96
Ply 7 (g)	19,26	-27,92	24,07	-30,71	37,64
Ply 8 (h)	30,37	-39,07	3,20	-4,70	37,46

Πίνακας 58 Φορτία κατά το τεστ κατακόρυφης δύναμης στην 12<sup>η</sup> δοκιμή

Peddalling forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	41,40	-45,76	53,34	-50,96	84,98
Ply 2 (b)	106,14	-103,39	17,22	-23,96	104,69
Ply 3 (c)	49,82	-44,67	48,01	-48,46	54,63
Ply 4 (d)	86,01	-83,47	30,09	-71,69	85,26
Ply 5 (e)	45,20	-54,76	42,55	-45,88	75,82
Ply 6 (f)	84,88	-94,14	20,92	-14,73	96,05
Ply 7 (g)	47,58	-57,60	51,54	-66,13	105,79
Ply 8 (h)	101,30	-57,61	8,44	-9,23	101,19

Πίνακας 59 Φορτία κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F1 στην 12<sup>η</sup> δοκιμή

Pedalling forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	81,82	-59,40	105,03	-58,33	108,02
Ply 2 (b)	202,12	-100,53	24,44	-28,97	199,63
Ply 3 (c)	87,79	-49,77	34,32	-69,21	87,41
Ply 4 (d)	137,91	-79,59	30,47	-71,75	137,40
Ply 5 (e)	76,56	-56,79	49,13	-74,47	89,16
Ply 6 (f)	150,89	-98,22	18,59	-16,11	150,71
Ply 7 (g)	44,43	-55,95	47,17	-50,50	94,16
Ply 8 (h)	34,12	-91,91	5,19	-5,71	91,42

*Πίνακας 60 Φορτία κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F2 στην 12<sup>η</sup> δοκιμή*

## 2.6.5 Εύρεση διαστρωμάτωσης SL για το μέγεθος M.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την εύρεση κατάλληλης διαστρωμάτωσης SL για το μέγεθος M, η οποία βασίστηκε τόσο στην αντίστοιχη διαστρωμάτωση του μεγέθους L, όσο και στην διαστρωμάτωση STD του μεγέθους M.

Όπως και στην διαστρωμάτωση SL του μεγέθους L, παρουσιάζονται αλλαγές στα τμήματα του σκελετού με κοινή διαστρωμάτωση. Οι αλλαγές είναι ίδιες και στα δύο μεγέθη οπότε δεν γίνεται περαιτέρω διευκρίνηση σε αυτό το σημείο.

Συνολικά έγιναν 9 διαφορετικές δοκιμές με αλλαγές στον σκελετό αλλά και στην διαστρωμάτωση. Οι βασικότερες παρουσιάζονται στη συνέχεια.















Συνολικά, φαίνονται στον επόμενο πίνακα οι μέγιστες μετατοπίσεις ανά δοκιμή για κάθε τεστ.

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
1η	2,351	0,583	1,491	0,745	0,401	2,270	2,060
2η	2,351	0,583	1,489	0,744	0,401	2,270	2,059
3η	1,814	0,425	1,341	0,671	0,375	1,982	1,823
4η	1,847	0,424	1,347	0,673	0,375	1,993	1,833
5η	2,557	0,622	1,390	0,695	0,481	2,179	2,030
7η	2,997	0,680	1,572	0,786	0,524	2,187	2,006
8η	2,480	0,677	1,433	0,717	0,515	2,129	1,966
9η	2,522	0,679	1,438	0,719	0,517	2,128	1,964

*Πίνακας 67 Μέγιστες μετατοπίσεις ανά δοκιμή κατά τις προσομοιώσεις για την διαστρωμάτωση SL του μεγέθους M*

Ειδικά για την τελευταία δοκιμή παρατίθενται και οι πίνακες των μέγιστων φορτίων σε MPa ανά στρώση για κάθε τεστ και φόρτιση.

Falling mass	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	189,37	-246,62	243,40	-234,66	226,01
Ply 2 (b)	216,74	-209,54	167,36	-183,46	215,02
Ply 3 (c)	201,51	-198,63	142,13	-161,72	200,25
Ply 4 (d)	212,22	-172,09	221,79	-162,20	243,71
Ply 5 (e)	191,09	-188,40	165,90	-151,18	202,22
Ply 6 (f)	160,44	-160,14	223,64	-171,36	252,91
Ply 7 (g)	275,49	-208,64	271,55	-210,04	353,42
Ply 8 (h)	134,20	-191,99	66,29	-182,14	194,38
Ply 9 (i)	180,51	-180,62	33,99	-51,90	181,04
Ply 10 (j)	34,72	-75,50	2,62	-4,04	73,75

*Πίνακας 68 Φορτία κατά το τεστ πίπτουσας μάζας*

Falling frame	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	93,92	-101,38	103,96	-110,55	122,39
Ply 2 (b)	116,01	-159,90	61,58	-39,30	154,05
Ply 3 (c)	99,39	-94,81	48,28	-92,95	99,29
Ply 4 (d)	63,79	-93,14	71,96	-91,95	122,02
Ply 5 (e)	89,13	-88,61	66,83	-35,01	89,25
Ply 6 (f)	78,97	-91,41	101,52	-123,65	137,03
Ply 7 (g)	68,58	-91,91	106,78	-117,14	129,81
Ply 8 (h)	96,38	-88,98	114,45	-107,34	126,38
Ply 9 (i)	40,88	-30,34	107,13	-109,58	126,06
Ply 10 (j)	52,65	-40,78	6,86	-6,87	51,56

*Πίνακας 69 Φορτία κατά το τεστ πτώσης του σκελετού*

Horizontal forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	81,19	-76,75	83,32	-76,13	81,64
Ply 2 (b)	97,27	-68,31	74,60	-62,04	97,13
Ply 3 (c)	89,47	-67,65	66,01	-55,43	89,31
Ply 4 (d)	83,77	-67,71	55,82	-66,60	83,72
Ply 5 (e)	70,77	-67,01	80,75	-64,23	82,41
Ply 6 (f)	70,24	-61,23	66,32	-71,31	79,15
Ply 7 (g)	78,07	-79,49	77,74	-78,53	91,00
Ply 8 (h)	109,09	-50,10	72,13	-60,93	108,10
Ply 9 (i)	70,54	-65,31	56,78	-57,42	69,27
Ply 10 (j)	51,63	-24,13	3,56	-3,67	50,36

Πίνακας 70 Φορτία κατά το τεστ με οριζόντια δύναμη F1

Horizontal forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	38,38	-40,59	38,06	-41,66	40,82
Ply 2 (b)	34,15	-48,64	31,02	-37,30	48,56
Ply 3 (c)	33,83	-44,73	27,71	-33,01	44,65
Ply 4 (d)	33,86	-41,89	33,30	-27,91	41,86
Ply 5 (e)	33,51	-35,38	32,11	-40,37	41,21
Ply 6 (f)	30,62	-35,12	35,65	-33,16	39,57
Ply 7 (g)	39,75	-39,03	39,27	-38,87	45,50
Ply 8 (h)	25,05	-54,54	30,46	-36,06	54,05
Ply 9 (i)	32,66	-35,27	28,71	-28,39	34,64
Ply 10 (j)	12,07	-25,82	1,83	-1,78	25,18

Πίνακας 71 Φορτία κατά το τεστ με οριζόντια δύναμη F2

Vertical force	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	73,80	-115,21	74,35	-113,33	126,82
Ply 2 (b)	126,25	-146,99	62,27	-48,11	147,54
Ply 3 (c)	69,85	-106,68	71,02	-104,86	134,82
Ply 4 (d)	128,13	-154,69	75,41	-92,64	155,14
Ply 5 (e)	103,60	-124,92	47,03	-33,33	145,68
Ply 6 (f)	92,28	-111,63	48,87	-88,20	111,65
Ply 7 (g)	45,07	-65,79	49,99	-73,31	76,73
Ply 8 (h)	62,24	-49,91	59,60	-67,16	71,21
Ply 9 (i)	21,27	-32,55	53,77	-64,54	74,43
Ply 10 (j)	26,73	-20,71	3,44	-4,01	26,56

Πίνακας 72 Φορτία κατά το τεστ κατακόρυφης δύναμης

Pedalling forces F1	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	81,21	-111,60	109,75	-84,02	136,05
Ply 2 (b)	97,66	-127,62	56,12	-31,00	136,19
Ply 3 (c)	82,45	-104,28	93,19	-80,57	119,43
Ply 4 (d)	80,98	-81,74	41,95	-85,07	118,52
Ply 5 (e)	79,63	-93,82	83,13	-65,17	136,65
Ply 6 (f)	80,94	-115,08	77,66	-68,70	124,15
Ply 7 (g)	98,06	-139,15	61,56	-58,89	140,02
Ply 8 (h)	132,87	-114,54	112,18	-109,41	131,95
Ply 9 (i)	57,92	-62,80	106,84	-112,94	131,94
Ply 10 (j)	76,50	-38,33	6,75	-7,05	76,17

Πίνακας 73 Φορτία κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F1

Pedalling forces F2	Stress 11 Maximum	Stress 11 Minimum	Stress 22 Maximum	Stress 22 Minimum	Von Mises
Ply 1 (a)	130,10	-87,95	160,62	-115,32	158,27
Ply 2 (b)	206,59	-158,11	61,41	-36,56	205,64
Ply 3 (c)	178,32	-85,62	67,07	-68,54	177,79
Ply 4 (d)	84,01	-81,97	72,75	-99,12	114,64
Ply 5 (e)	140,00	-80,60	78,37	-57,03	139,88
Ply 6 (f)	124,72	-110,44	96,83	-132,48	155,15
Ply 7 (g)	109,52	-135,08	105,82	-123,45	138,31
Ply 8 (h)	154,85	-98,71	62,31	-65,19	154,69
Ply 9 (i)	52,80	-57,90	46,95	-66,80	103,12
Ply 10 (j)	23,31	-81,60	2,95	-3,72	81,25

Πίνακας 74 Φορτία κατά το τεστ με δύναμη πεταλαρίσματος F2

## 2.6.6 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 επιβίωσης. 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 παρακάτω εικόνα 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

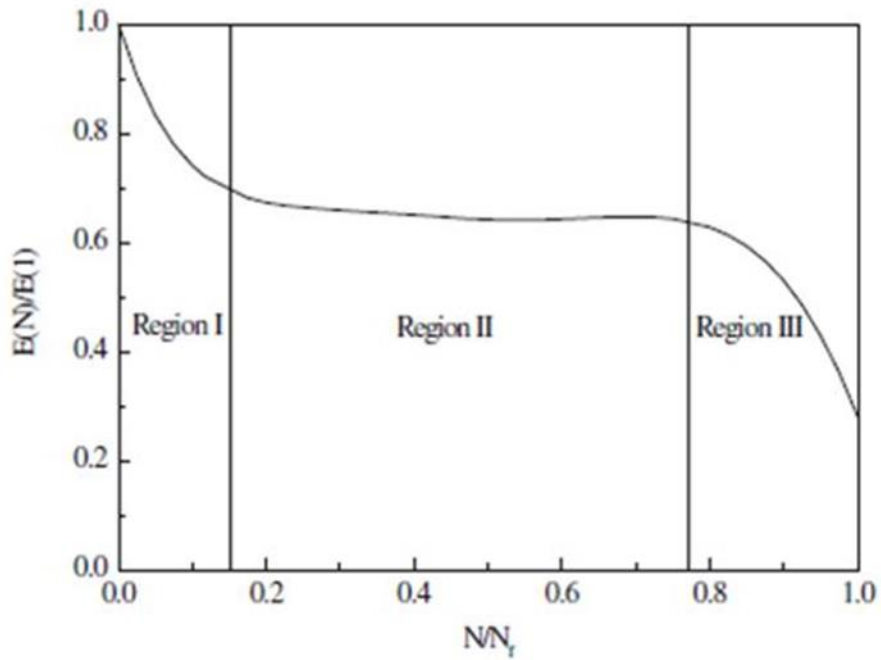
Εικόνα 114 Πίνακας προσέγγισης καμπυλών S - N

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).

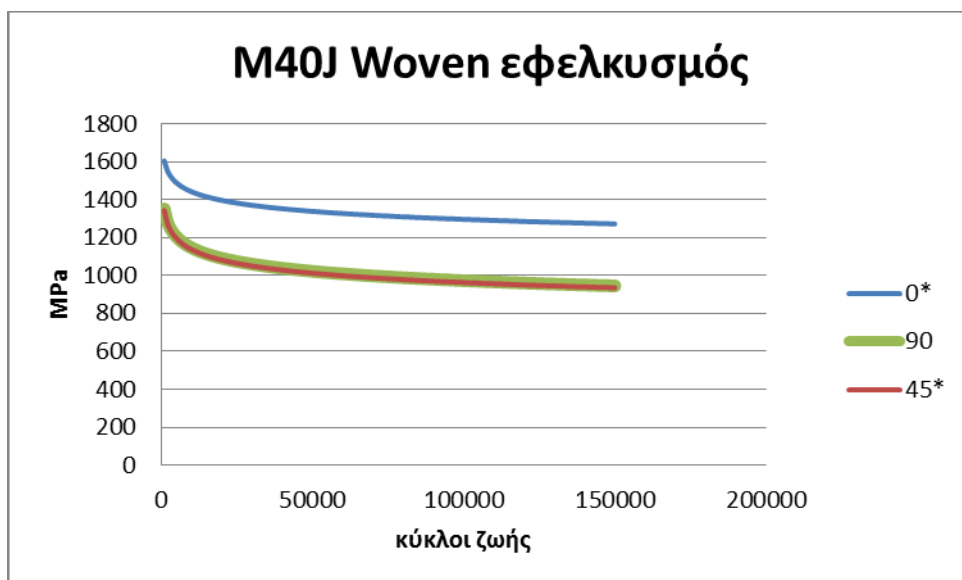
Στην ενδιάμεση περιοχή, η ακαμψία υλικού αποδομείται σε ένα σταθερό και μέτριο ρυθμό. Τέλος, σημαντική επιδείνωση του υλικού μπορεί να παρατηρηθεί κοντά στο τέλος της διάρκειας ζωής κόπωσης.

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 επόμενη εικόνα απεικονίζεται η μείωση του μέτρου ελαστικότητας ανάλογα με τις επαναλήψεις.

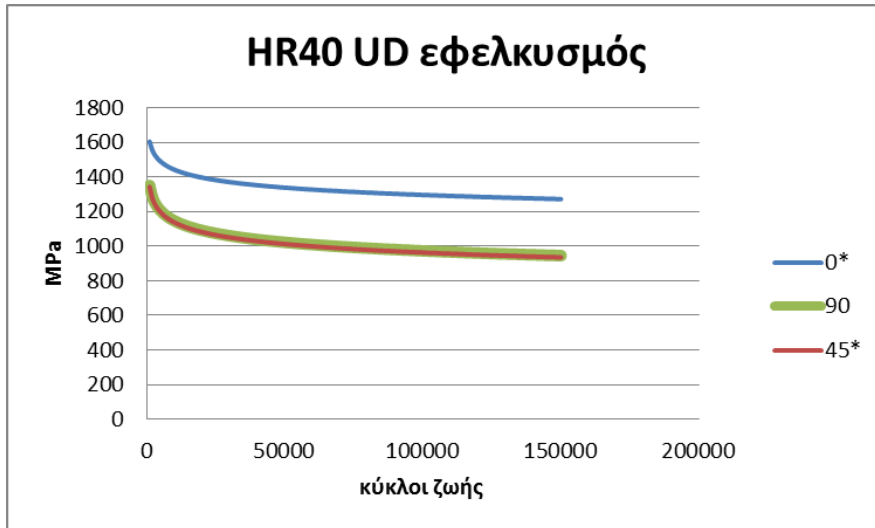


Εικόνα 115 Διάγραμμα μείωσης μέτρου ελαστικότητας ως προς τις επαναλήψεις

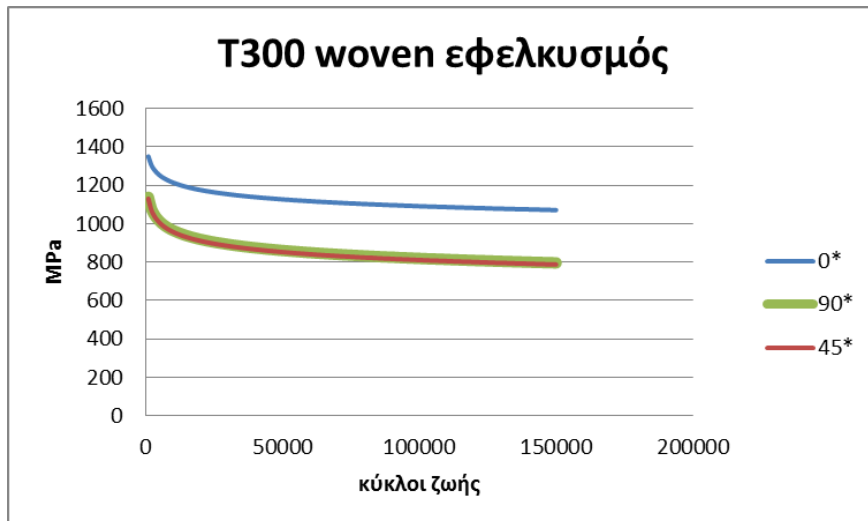
Σύμφωνα με τα προηγούμενα λοιπόν προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα S-N για τα υλικά που χρησιμοποιούμε. Μετά από ανάλυση που έγινε στο λογισμικό πακέτο του nx προέκυψε ότι το μοντέλο αντέχει.



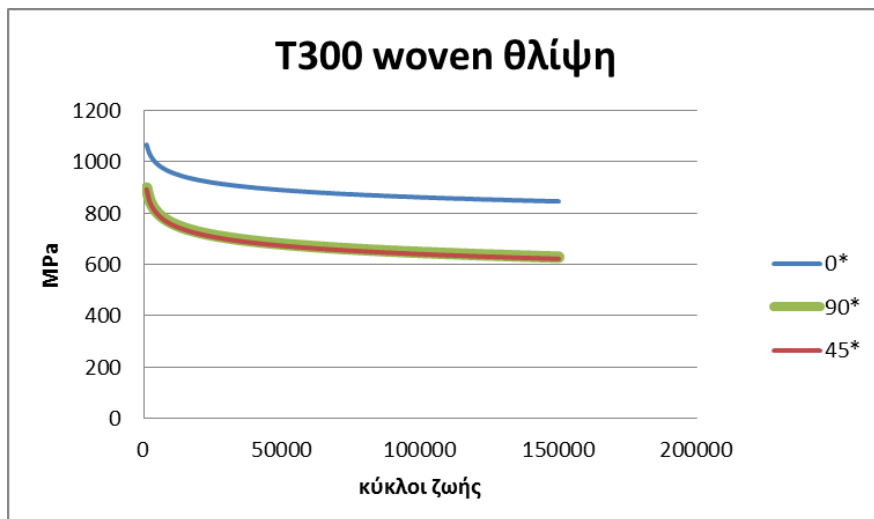
Εικόνα 116 Διάγραμμα κόπωσης του M40J woven



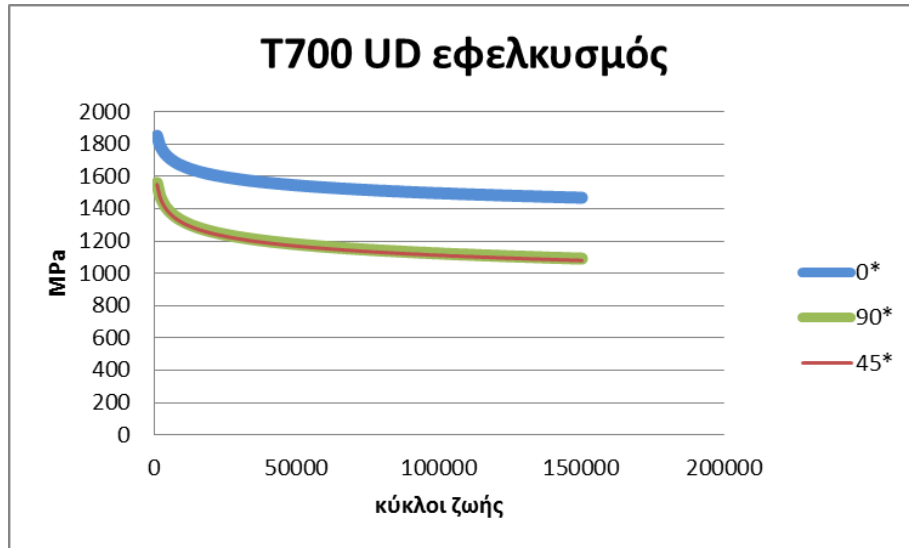
Εικόνα 117 Διάγραμμα κόπωσης του HR40 UD



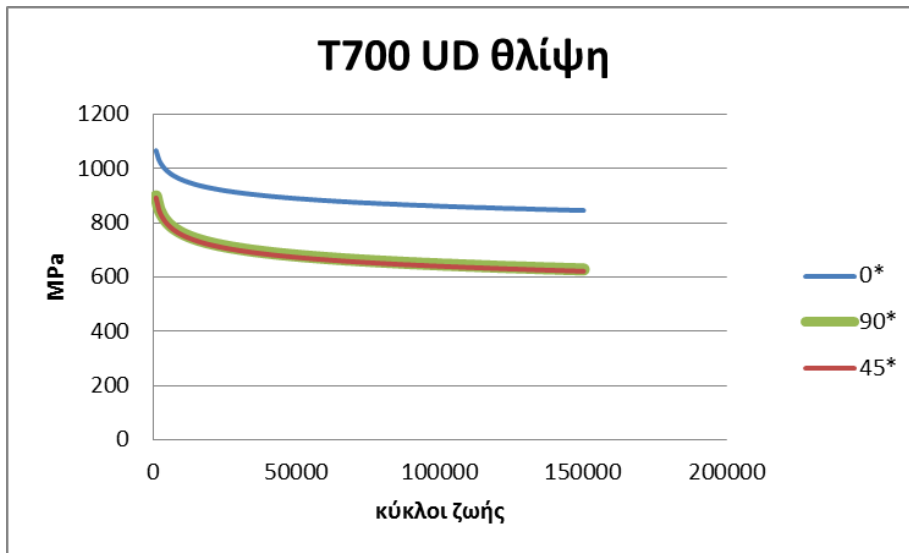
Εικόνα 118 Διάγραμμα κόπωσης του T300 woven σε εφελκυσμό



Εικόνα 119 Διάγραμμα κόπωσης του T300 woven σε θλίψη



Εικόνα 120 Διάγραμμα κόπωσης T700 UD σε εφελκυσμό



Εικόνα 121 Διάγραμμα κόπωσης του T700 UD σε θλίψη



### 3. Σχεδιασμός καλουπιού

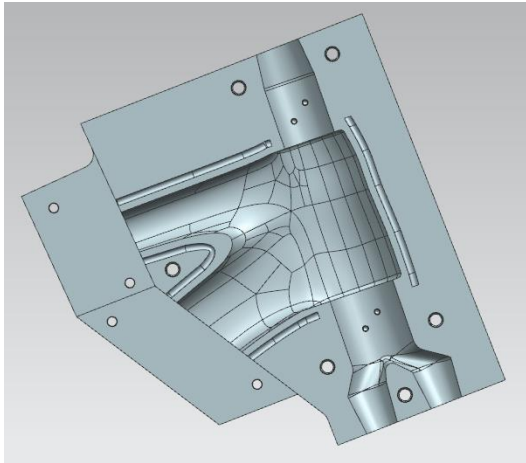
Το θέμα που μας απασχόλησε περισσότερο κατά τον σχεδιασμό του καλουπιού ήταν η δημιουργία ενός ενιαίου σκελετού (monocoque). Οι σκελετοί που κυκλοφορούν στην αγορά αποτελούνται, με ελάχιστες εξαιρέσεις, από τρία συνήθως κομμάτια τα οποία στη συνέχεια ενώνονται με ισχυρή κόλλα. Το πρόβλημα σε αυτές τις κατασκευές εντοπίζεται σε αυτές ακριβώς τις ενώσεις: επειδή στις ενώσεις έχω περισσότερο υλικό, στις περιοχές πριν και μετά την κόλληση μπορεί να αστοχήσει το υλικό. Επιπλέον, μπορεί να προκύψουν προβλήματα ευθυγράμμισης, ειδικά στον πίσω άξονα. Έτσι, για να επιτευχθεί καλύτερης ποιότητας προϊόν, επιλέχθηκε η δημιουργία ενός ενιαίου σκελετού. Αυτό όμως έχει ως συνέπεια το σχεδιασμό ενός πιο περίπλοκου καλουπιού.

Ένα ακόμα στοιχείο που επηρέασε το σχεδιασμό του καλουπιού είναι οι περιορισμένες διαστάσεις της μηχανής CNC που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των διαφόρων κομματιών του καλουπιού. Έτσι, κάθε κομμάτι του σκελετού έχει διαφορετικό καλούπι τα οποία στη συνέχεια ενώνονται με επιπλέον κοχλίες. Η λογική που ακολουθήθηκε είναι όλα τα εξωτερικά κομμάτια καλουπιών της αριστερής μεριάς να ενωθούν κατάλληλα με κοχλίες και στη συνέχεια να μείνουν δεμένα ως ένα ενιαίο κομμάτι, και αντίστοιχα όλα τα εξωτερικά κομμάτια της δεξιάς μεριάς να σχηματίζουν ένα δεύτερο ενιαίο κομμάτι. Τέλος, τα εσωτερικά κομμάτια των καλουπιών στα seat stays και chain stays ενώνονται σε ένα τρίτο κομμάτι.

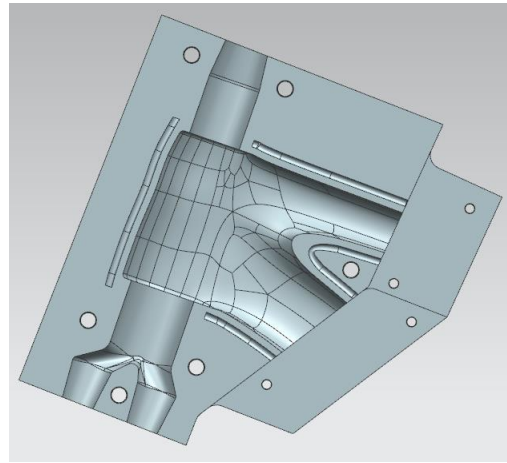
Επιπλέον, αποφασίστηκε ότι τα νύχια στο πίσω μέρος του σκελετού (στο σημείο που δένει ο πίσω άξονας) δεν θα κατασκευαστούν ως ξεχωριστά κομμάτια τα οποία στη συνέχεια θα ενωθούν με τον σκελετό. Αντίθετα, θα είναι και αυτά από ανθρακόνημα, και μάλιστα νύχια και σκελετός θα είναι ενιαίο κομμάτι, γεγονός που οδήγησε σε αλλαγή του σχεδίου του σκελετού όπως θα φανεί στην συνέχεια.

#### 3.1 Σχεδιασμός καλουπιού για το μέγεθος L

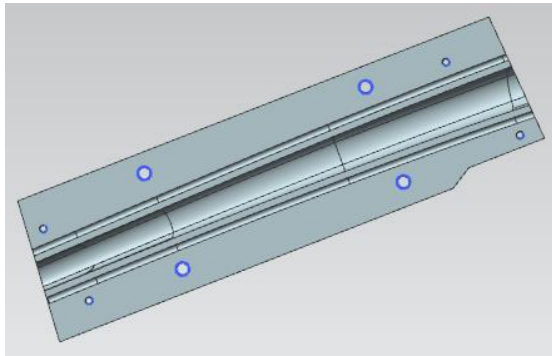
Ο σκελετός είχε σχεδιαστεί αρχικά ως συμμετρικός ως προς το επίπεδο YZ και στη συνέχεια είχαν σχεδιαστεί κάποιες λεπτομέρειες ασύμμετρα στα seat stays και στα chain stays, όπως η βάση του πίσω δισκόφρενου. Το γεγονός αυτό έκανε πιο εύκολο το σχεδιασμό των καλουπιών για τα head tube, top tube και down tube, καθώς είχαν ως επίπεδο συμμετρίας το επίπεδο YZ, άρα οι parting lines των καλουπιών αυτών βρίσκονταν στο ίδιο επίπεδο. Τα καλούπια αυτών των κομματιών παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



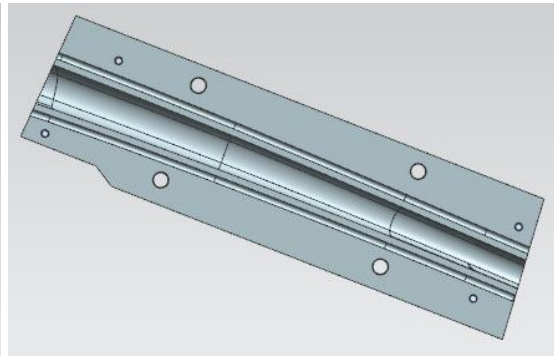
Εικόνα 122 Αριστερό καλούπι του head tube



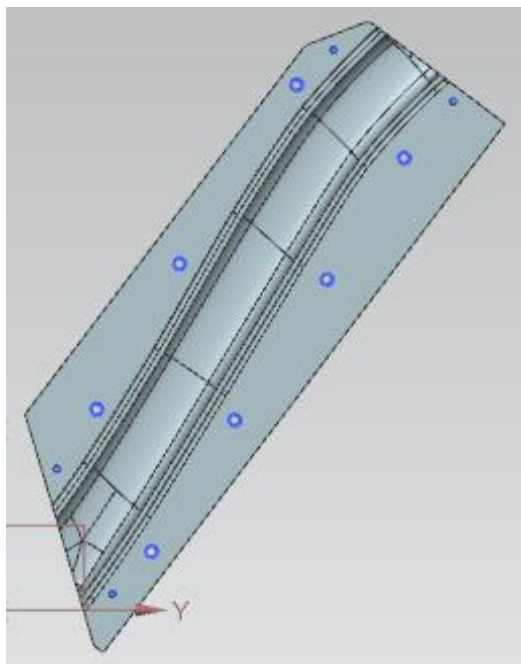
Εικόνα 123 Δεξί καλούπι του head tube



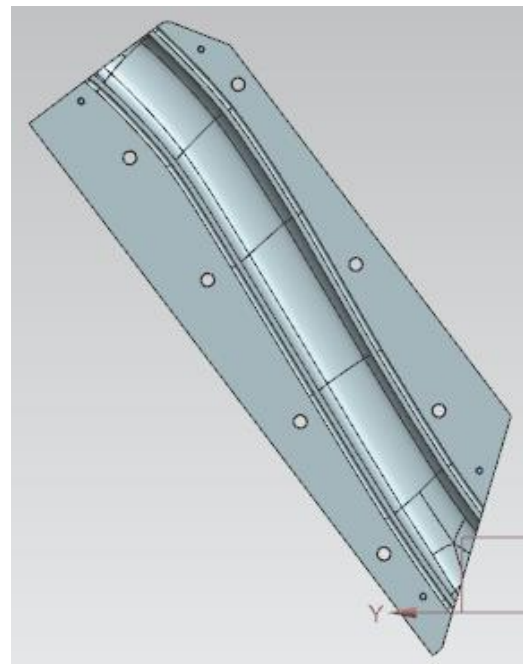
Εικόνα 124 Αριστερό καλούπι του top tube



Εικόνα 125 Δεξί καλούπι του top tube

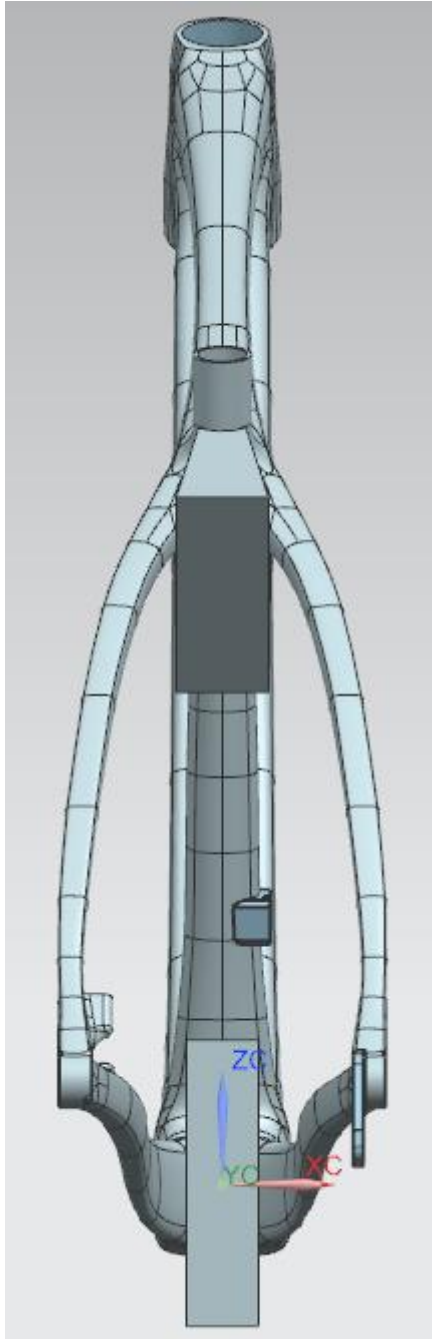


Εικόνα 126 αριστερό καλούπι του down tube

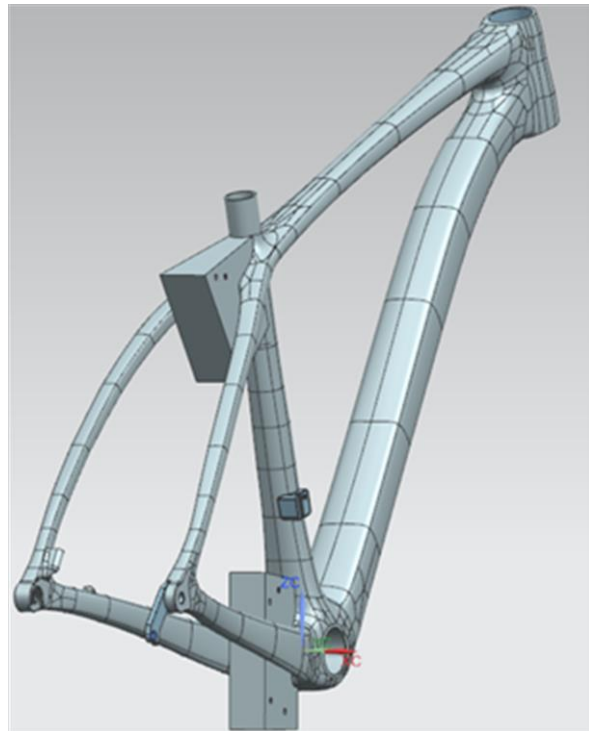


Εικόνα 127 Δεξί καλούπι του down tube

Στην επόμενη φάση του σχεδιασμού, μας απασχόλησαν τα καλούπια των seat stays και chain stays. Για να μπορεί να ανοίγει εύκολα το καλούπι σχεδιάστηκαν δυο σφήνες, μία στην περιοχή που τα seat stays ενώνονται με το seat tube και μία στην περιοχή που τα chain stays ενώνονται πάλι με το seat tube.



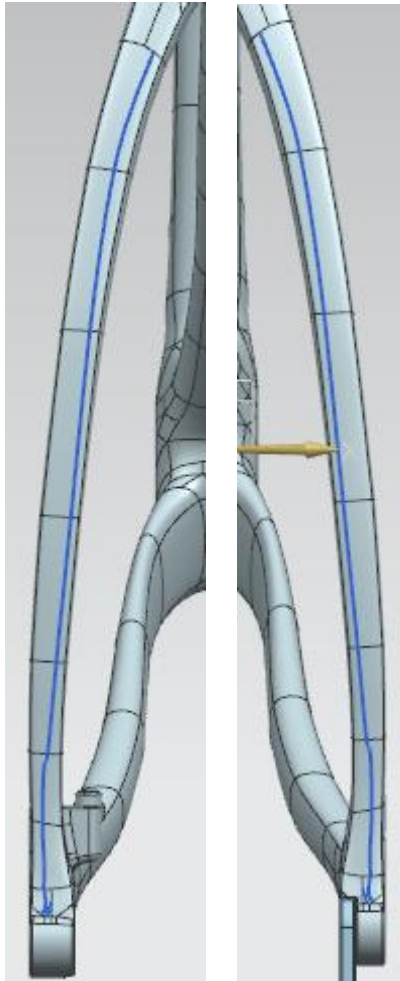
Εικόνα 128 Τοποθέτηση σφηνών στα seat stays και chain stays σε πίσω όψη



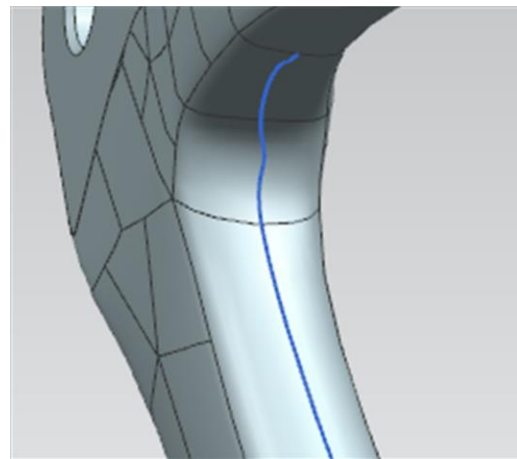
Εικόνα 129 Τοποθέτηση σφηνών ανάμεσα στα seat stays και chain stays σε άλλη όψη

Το κύριο πρόβλημα σε αυτή τη φάση του σχεδιασμού ήταν ότι οι parting lines των καλουπιών για τα seat stays και τα chain stays δεν βρίσκονταν πάνω σε ένα επίπεδο. Έτσι σχεδιάστηκαν πάνω στο μοντέλο οι γραμμές εκατέρωθεν των οποίων αλλάζει η καμπυλότητα των επιφανειών σε αυτά τα κομμάτια, με τη λογική ότι το

καλούπι θα ανοίγει στην κατεύθυνση του άξονα X. Οι καμπύλες αυτές φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



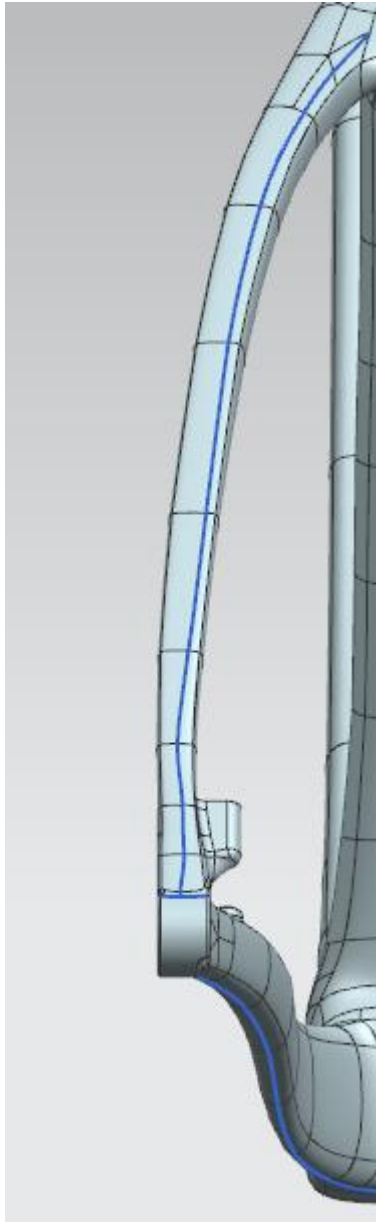
*Εικόνα 130 Parting lines στα seat stays*



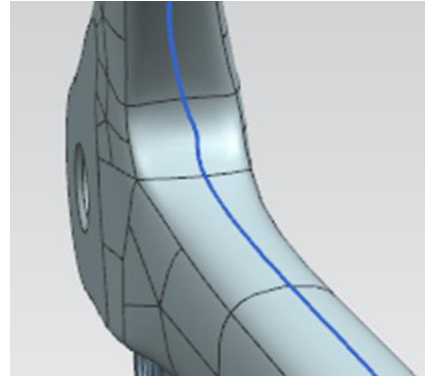
*Εικόνα 131 Parting lines στην εσωτερική ένωση του αριστερού chain stay με το αριστερό seat stay*

Όπως παρατηρείται, οι γραμμές αυτές εμφανίζουν πολλές καμπύλες οι οποίες μάλιστα βρίσκονται κοντά σε ακμές του μοντέλου γεγονός που δυσκολεύει το σχεδιασμό των καλουπιών. Έτσι γεννήθηκε η ανάγκη να αλλάξει και πάλι το σχέδιο έτσι ώστε οι γραμμές να γίνουν πιο ομαλές και να βρίσκονται πιο κεντρικά.

Στο τελικό σχέδιο η μορφή των καμπυλών είναι η εξής:

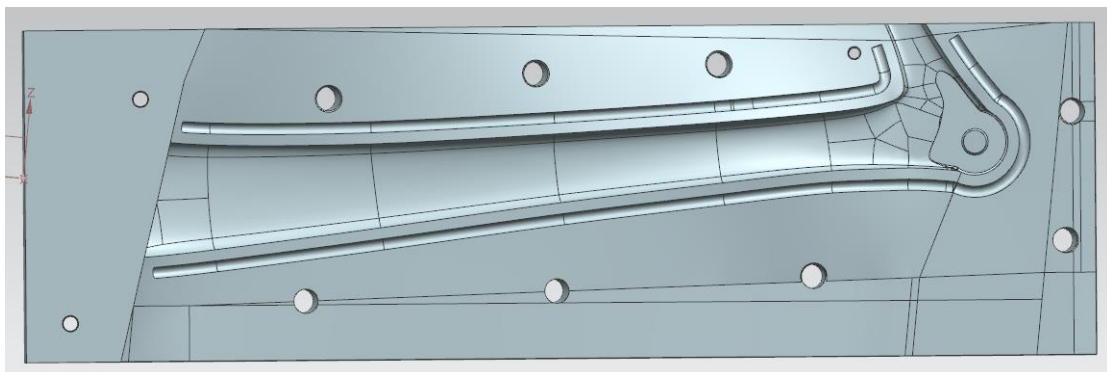


*Εικόνα 132 Parting lines στο αριστερό seat stay και chain stay*

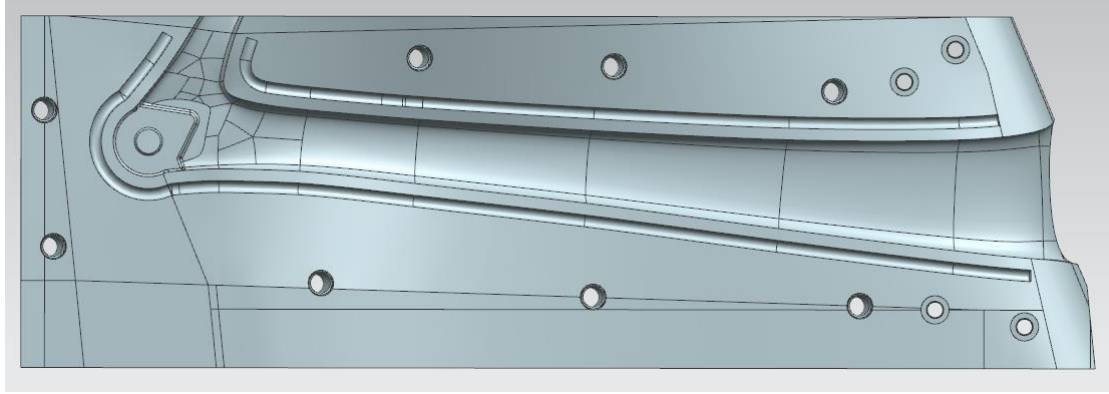


*Εικόνα 133 Parting lines στην εσωτερική ένωση του δεξιού seat stay και chain stay*

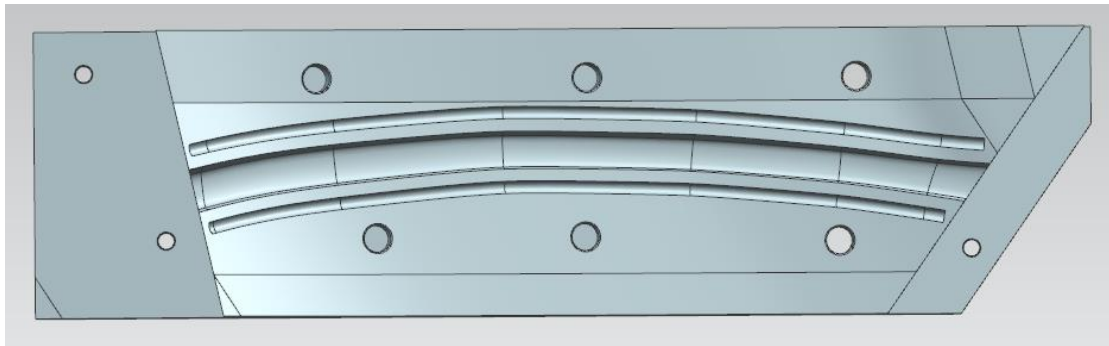
Έχοντας πλέον ως οδηγούς πιο ομαλές καμπύλες, ήταν δυνατός ο σχεδιασμός των καλουπιών για το δεξί seat stay και chain stay, τα οποία απεικονίζονται στη συνέχεια.



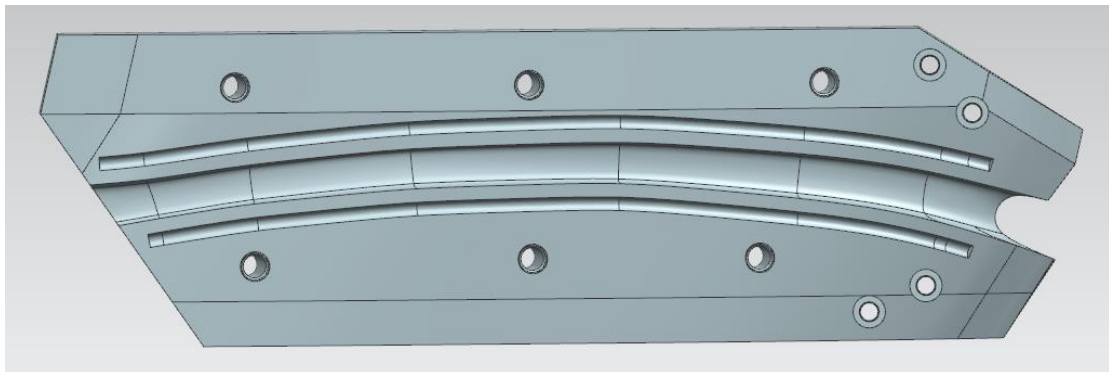
*Εικόνα 134 εξωτερικό καλούπι δεξιού chain stay*



*Εικόνα 135 Εσωτερικό καλούπι του δεξιού chain stay*



*Εικόνα 136 Εξωτερικό καλούπι του δεξιού seat stay*



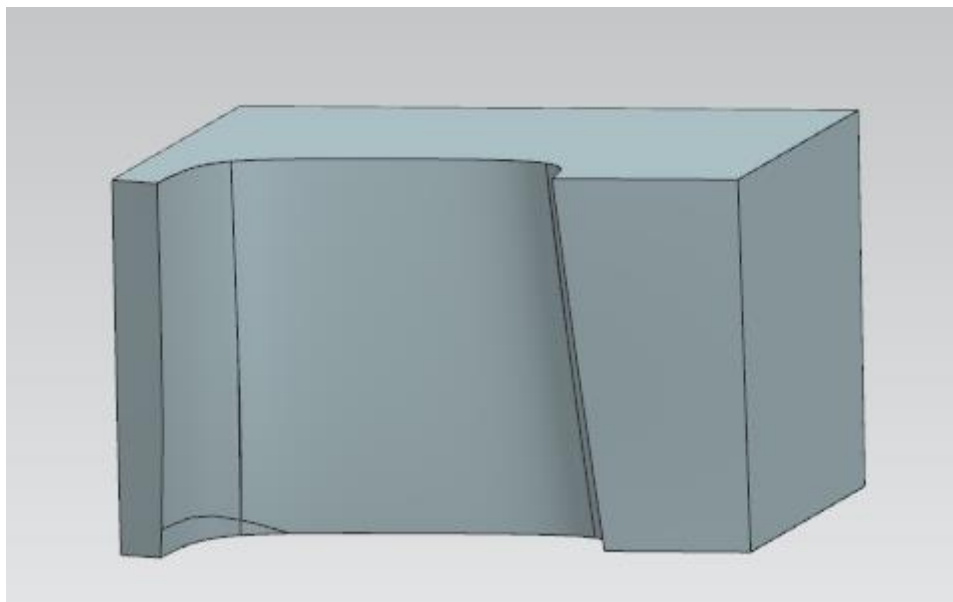
*Εικόνα 137 Εσωτερικό καλούπι του δεξιού seat stay*

Στο αριστερό seat stay και chain stay αλλάζει η μορφή των καλουπιών, καθώς στην ένωση αυτών των κομματιών υπάρχει η βάση του πίσω δισκόφρενου.

Σε αυτήν τη φάση του σχεδιασμού αντιμετωπίστηκε ένα ακόμα πρόβλημα: πώς θα μπορέσω να έχω απευθείας στο σκελετό τα σπειρώματα πάνω στη βάση του

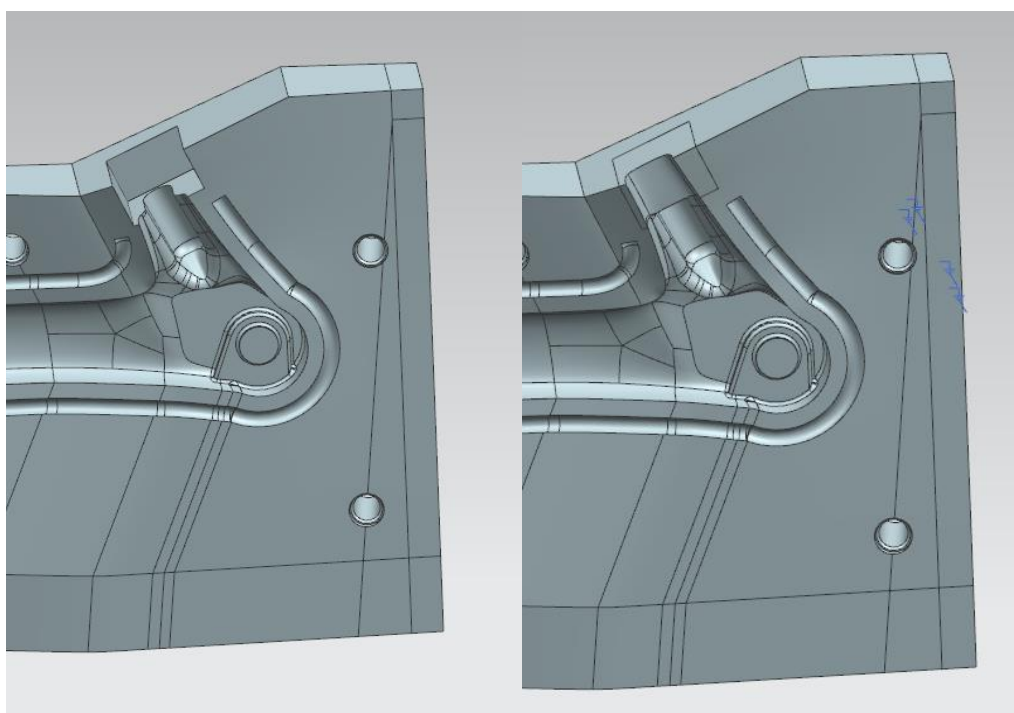
δισκόφρενου. Αυτό αντιμετωπίστηκε στη συνέχεια με κατάλληλες διαμορφώσεις στα καλούπια και την εισαγωγή κάποιων inserts.

Για την βάση του φρένου που βρίσκεται μέσα από το αριστερό seat stay σχεδιάστηκε το insert της φωτογραφίας.



*Εικόνα 138 Insert στη βάση του δισκόφρενου πίσω*

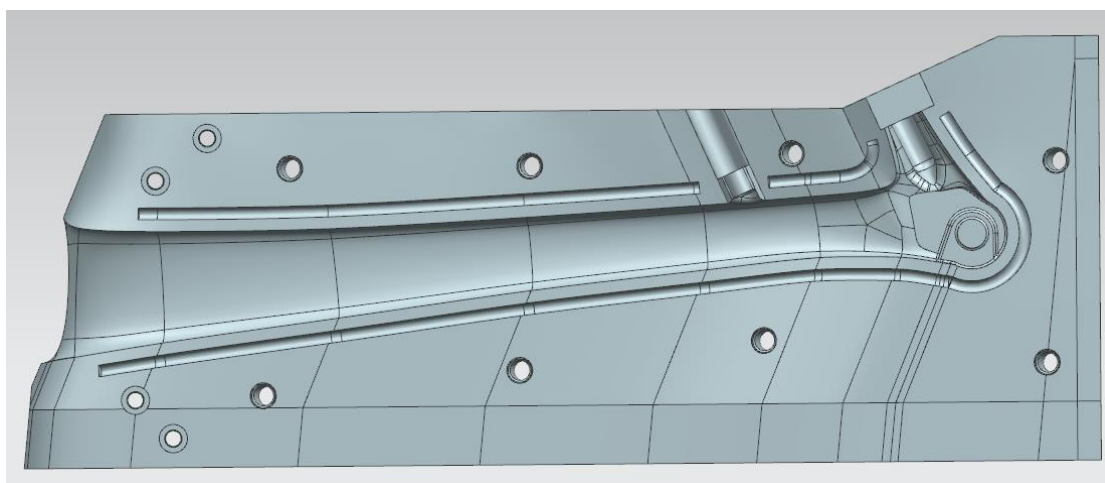
Το κομμάτι αυτό μπαίνει μέσα στο εσωτερικό καλούπι του αριστερού chain stay στην αντίστοιχη διαμόρφωση.



*Εικόνα 139 Εσωτερικό καλούπι του αριστερού chain stay χωρίς το insert για την πίσω βάση του δισκόφρενου (αριστερά) και με το insert για την πίσω βάση του δισκόφρενου (δεξιά)*

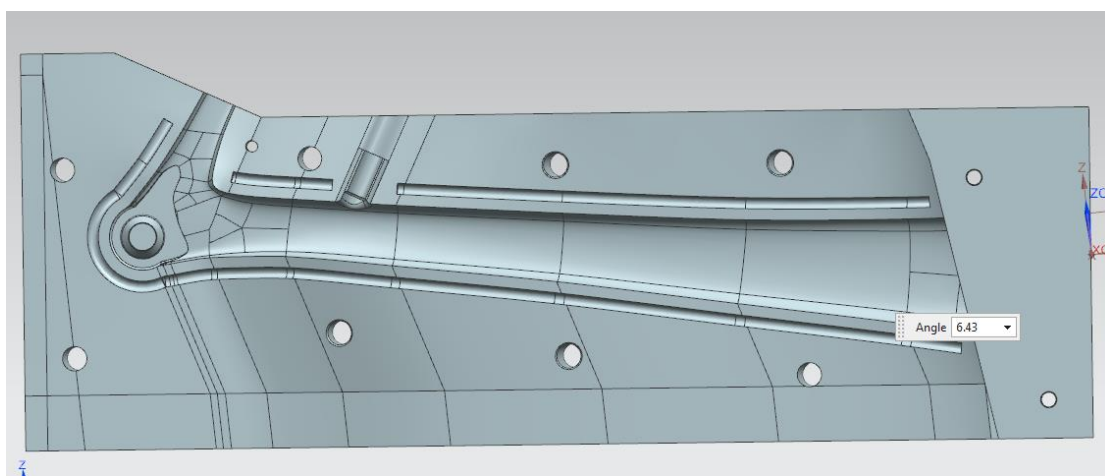
Στο πάνω μέρος του insert θα υπάρχει κατάλληλη διαμόρφωση έτσι ώστε να χωράει κεφάλι βίδας M5. Στον κοχλία αυτόν θα βιδώνεται το αντίστοιχο σπείρωμα που θα βρίσκεται τελικά πάνω στον σκελετό. Το σπείρωμα αυτό θα είναι από αλουμίνιο. Στη συνέχεια θα τυλίγεται με ανθρακονήματα έτσι ώστε κατά το ψήσιμο το σπείρωμα να ενωθεί με το ανθρακόνημα. Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι όλο το κομμάτι των νυχιών και των βάσεων του δισκόφρενου, εκτός από την διαστρωμάτωση που έχει επιλεγθεί, θα έχει επιπλέον υλικό carbon και ουσιαστικά θα είναι συμπαγές, έτσι ώστε να αντέχει το πλαίσιο τις φορτίσεις κατά την πέδηση.

Αντίστοιχη λογική ακολουθήθηκε και για την μπροστινή βάση του φρένου που βρίσκεται πάνω στο αριστερό chain stay, χωρίς όμως να σχεδιαστεί επιπλέον ξεχωριστό κομμάτι. Αντίθετα, το ίδιο το καλούπι έχει κατάλληλη διαμόρφωση έτσι ώστε να μπορεί να εισαχθεί κοχλίας M5.



*Εικόνα 140 Εσωτερικό καλούπι του αριστερού chain stay*

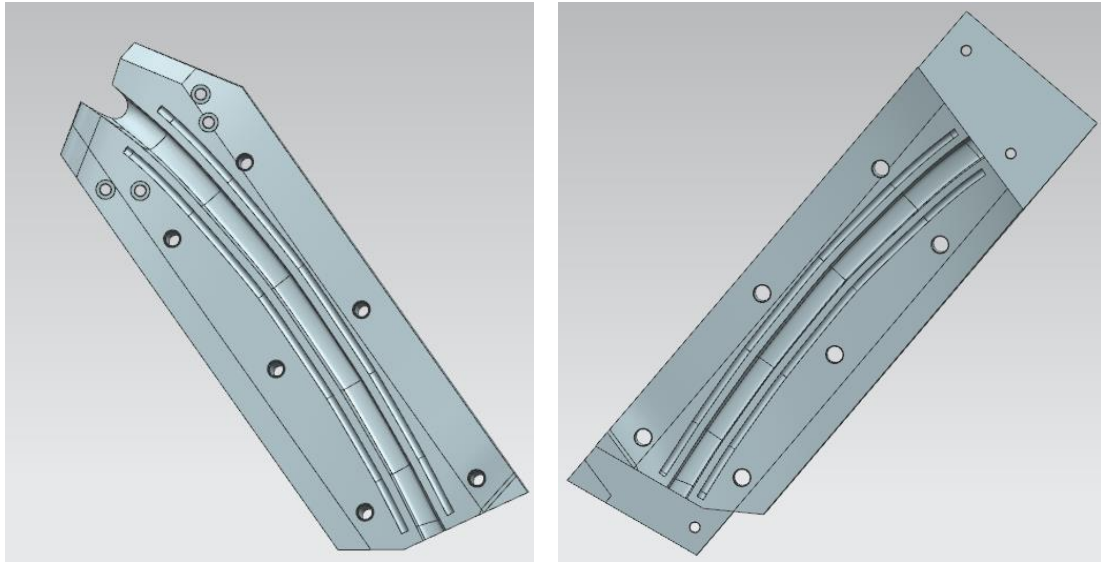
Το εξωτερικό καλούπι του αριστερού chain stay σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εφαρμόζει πλήρως στο insert και να αφήνει αρκετό χώρο για το κεφάλι της βίδας στην μπροστινή βάση του δισκόφρενου.



*Εικόνα 141 Εξωτερικό καλούπι του αριστερού chain stay*

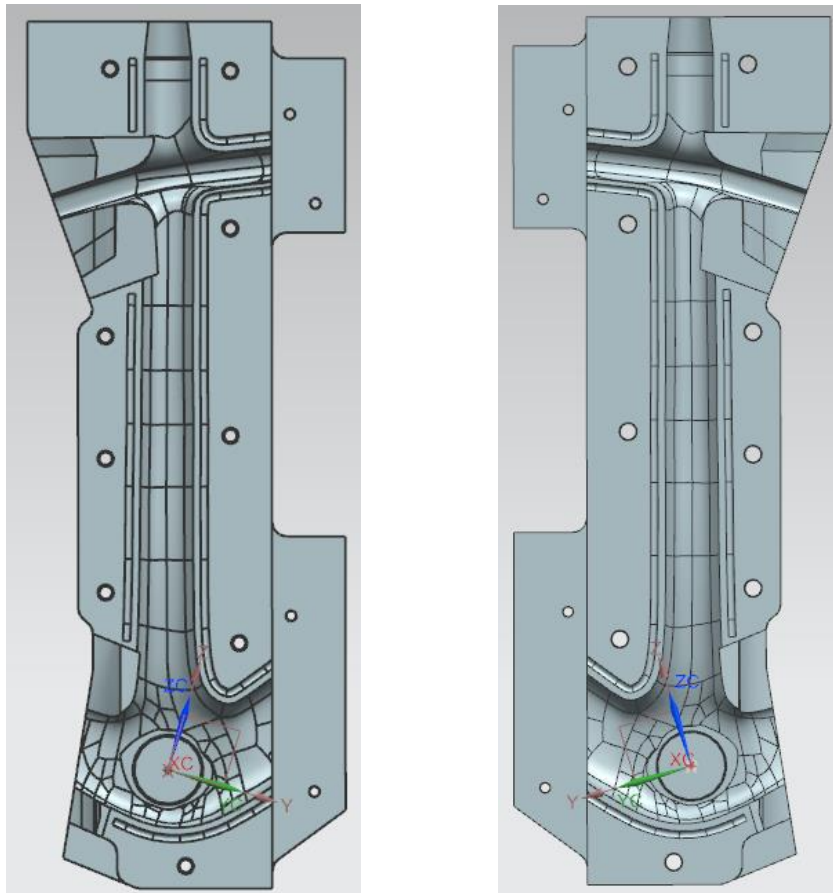


Με βάση το καλούπι για το αριστερό chain stay παράχθηκε το καλούπι για το αριστερό seat stay.



Εικόνα 142 Εσωτερικό (αριστερά) και εξωτερικό (δεξιά) καλούπι για το αριστερό seat stay

Τελικά σχεδιάστηκε και το καλούπι για το seat tube, το οποίο, όπως και το head tube, top tube και down tube, έχει επίπεδο συμμετρίας το επίπεδο YZ. Έτσι, χρησιμοποιώντας και τις επιφάνειες των γύρω καλουπιών, το σχήμα του καλουπιού του seat tube φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

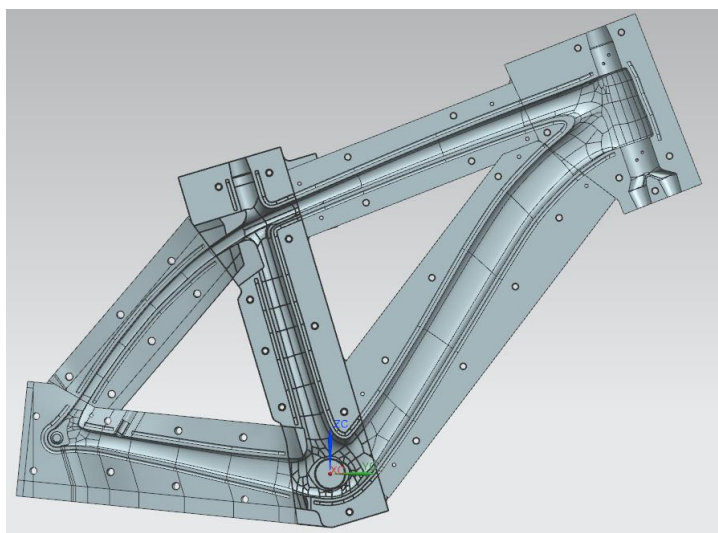


Εικόνα 143 Αριστερό και δεξί καλούπι του seat tube

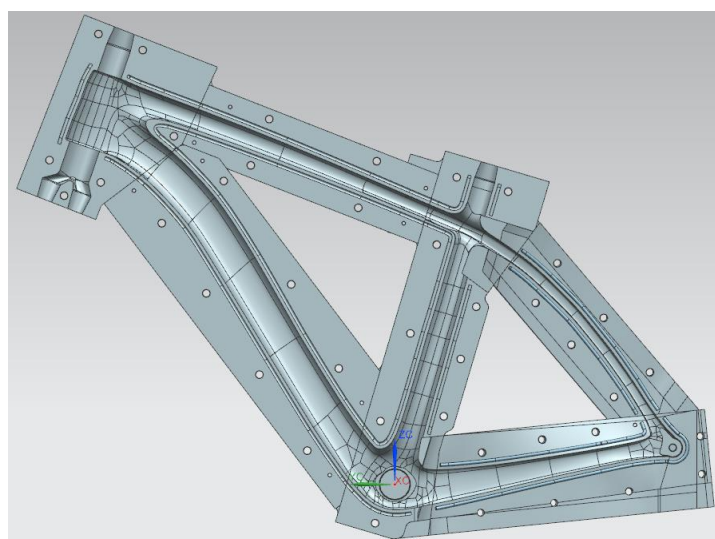
Από την αρχή του σχεδιασμού του καλουπιού υπήρχε η λογική τα επιμέρους κομμάτια των καλουπιών να ενώνονται με κοχλίες και να σχηματίζουν τελικά τρία μεγαλύτερα κομμάτια:

- Το αριστερό κομμάτι, που περιλαμβάνει το αριστερό καλούπι του head tube, top tube, down tube, seat tube και τα εξωτερικά καλούπια του αριστερού seat stay και του αριστερού chain stay.
- Το δεξί κομμάτι, που περιλαμβάνει τα δεξιά καλούπια των head tube, top tube, down tube, seat tube και τα εξωτερικά καλούπια των δεξιών seat stay και chain stay
- Το μεσαίο κομμάτι, που αποτελείται από τα εσωτερικά καλούπια των seat stays και chain stays και τις δύο σφήνες.

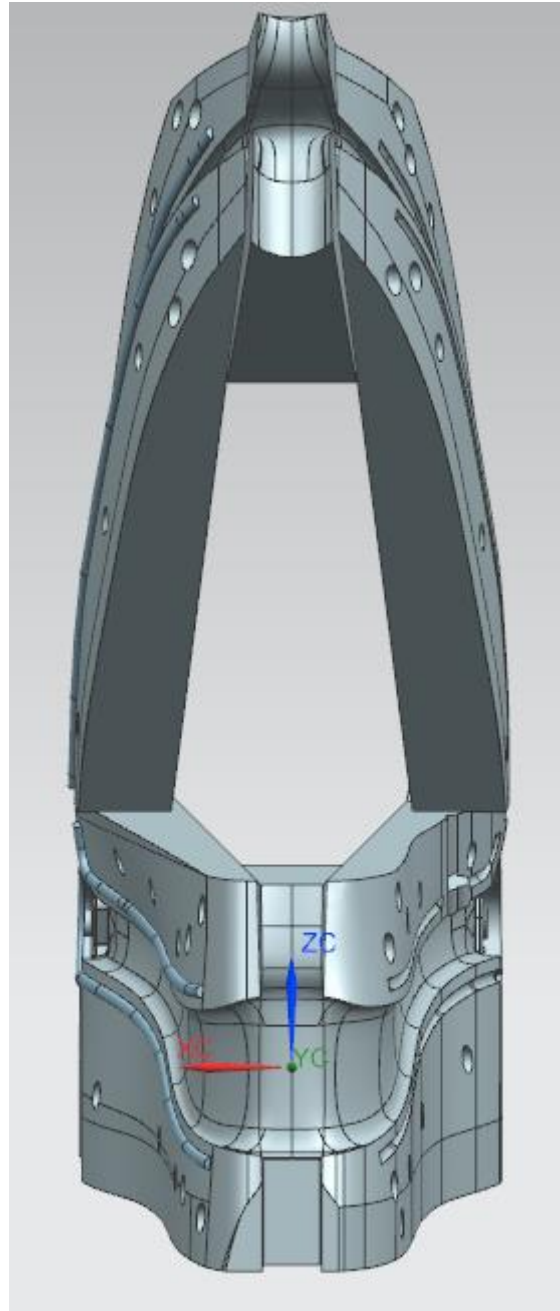
Γι'αυτό το λόγο στα σχέδια των καλουπιών υπάρχουν κατάλληλες διαμορφώσεις, προεξοχές και τρύπες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύνδεσή τους με τον τρόπο που περιγράφεται παραπάνω.



Εικόνα 144 Αριστερό κομμάτι καλουπιών



Εικόνα 145 Δεξί κομμάτι καλουπιών



*Εικόνα 146 Μεσαίο κομμάτι καλουπιών*

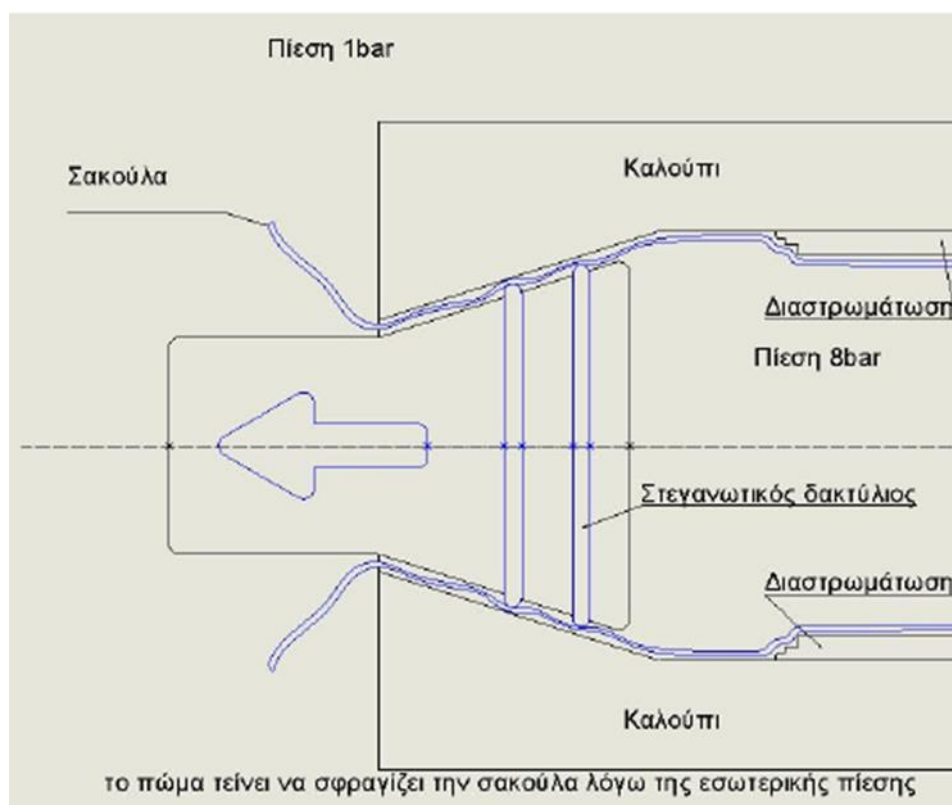
Στις ενώσεις των καλουπιών του αριστερού και του δεξιού μέρους θα υπάρχουν και κεντραριστικοί πείροι, έτσι ώστε να επιτευχθεί πλήρης ευθυγράμμιση του σκελετού.

Αντίθετα, για την ένωση των εσωτερικών κομματιών με τις σφήνες, χρησιμοποιούνται μόνο πειρόβιδες, καθώς οι σφήνες θα πρέπει να μπορούν να αφαιρεθούν με ευκολία, έτσι ώστε να απελευθερωθούν στην συνέχεια τα εσωτερικά κομμάτια.

Στα σχέδια των καλουπιών παρατηρούνται επιπρόσθετα κάποια αυλάκια δίπλα στις διαμορφώσεις. Ο σκοπός του σχεδιασμού αυτών των αυλακιών είναι η απομάκρυνση της περίσσειας ρητίνης, η οποία ρευστοποιείται με την αύξηση της θερμοκρασίας και διαρρέει από τους αρμούς.

Επιπλέον, παρατηρούνται στα καλούπια του head tube και του seat tube ειδικές διαμορφώσεις κωνικής μορφής. Οι διαμορφώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για το σφράγισμα της σακούλας πίεσης με το καλούπι.

Η λογική του σφραγίσματος της σακούλας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η στεγάνωση της σακούλας επιτυγχάνεται μέσω στεγανωτικών δακτύλιων σιλικόνης. Επιλέχθηκαν δακτύλιοι σιλικόνης για να αντέχουν στην θερμοκρασία.

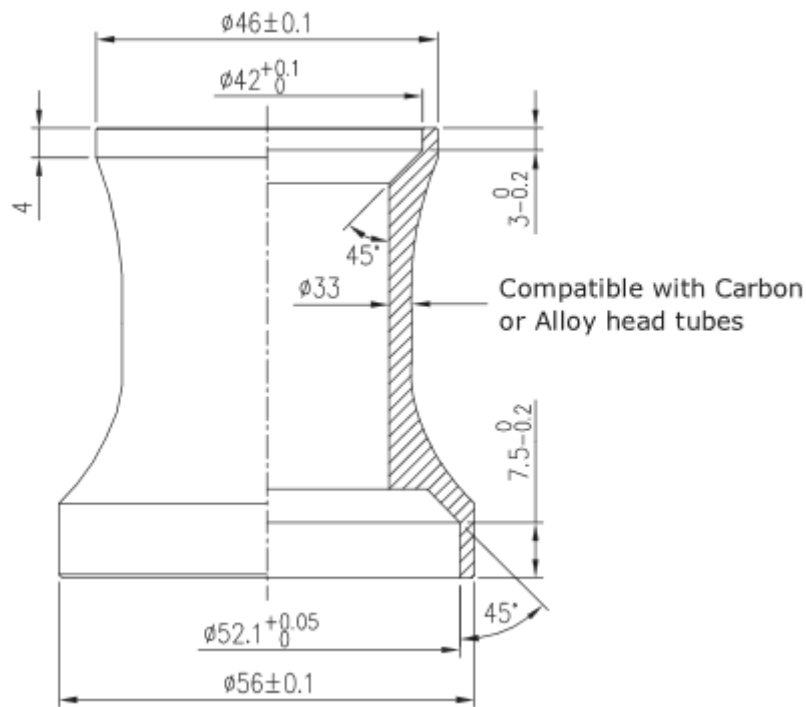


Εικόνα 147 Σφράγισμα σακούλας πίεσης

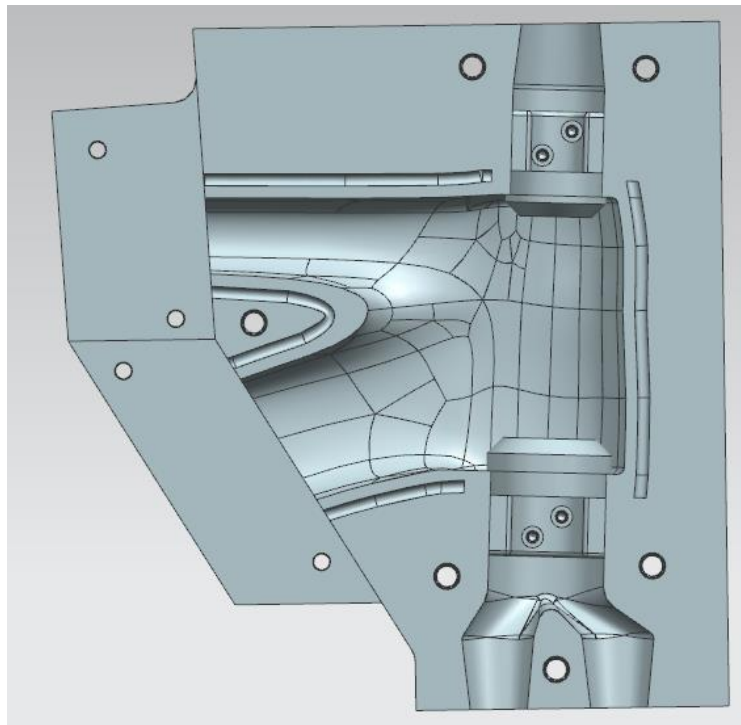
Στην περίπτωση μας, επιλέγεται η χρήση δύο σακούλων. Η πρώτη εισέρχεται από το πάνω μέρος του head tube και περνάει μέσα από το down tube. Στη συνέχεια περνάει από τα δύο chain stays και τελικά ανεβαίνει και εξέρχεται από την κορυφή του seat tube. Η δεύτερη σακούλα εισέρχεται από το κάτω μέρος του head tube και περνάει μέσα από το top tube. Στη συνέχεια περνάει μέσα από τα δύο seat stays, και βγαίνει από το κάτω μέρος του head tube, αφού περάσει ξανά μέσα από το top tube.

Το τελευταίο στοιχείο που προστίθεται στο καλούπι είναι κάποια inserts στο head tube. Η έδραση του steerer του πηρουιού πάνω στον σκελετό γίνεται μέσω ρουλεμάν, τα οποία μαζί με κάποιες ειδικές βάσεις, τα ποτήρια, αποτελούν το head set. Με βάση τα head sets που κυκλοφορούν στην αγορά σχεδιάστηκαν δύο αλουμινένια κομμάτια τα οποία δένονται πάνω στο καλούπι του head tube αφού έχει

στρωθεί το carbon και μέσω των οποίων περνάνε οι σακούλες πίεσης. Έτσι η εσωτερική πλευρά του head tube έχει τις κατάλληλες διαστάσεις έτσι ώστε μετά το ψήσιμο του σκελετού να μην χρειάζεται να κολληθεί κάποιο επιπλέον κομμάτι για να υπάρχει σωστή εφαρμογή με το head set.



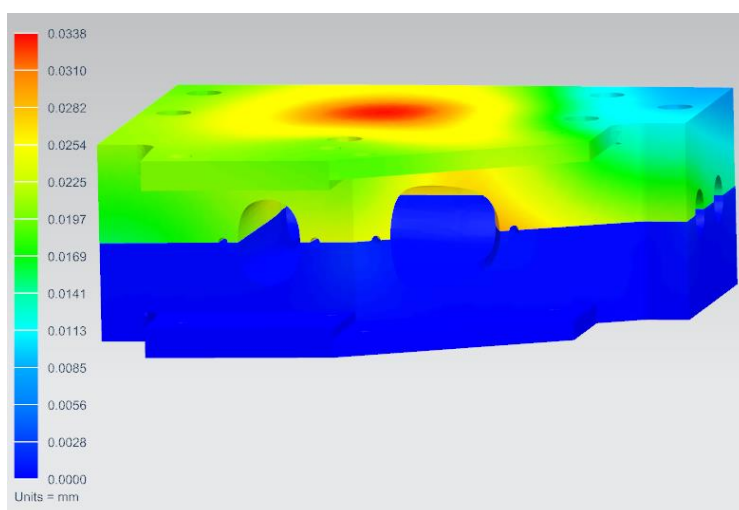
Εικόνα 148 Εσωτερικές διαστάσεις στο head tube για σωστή εφαρμογή του head set



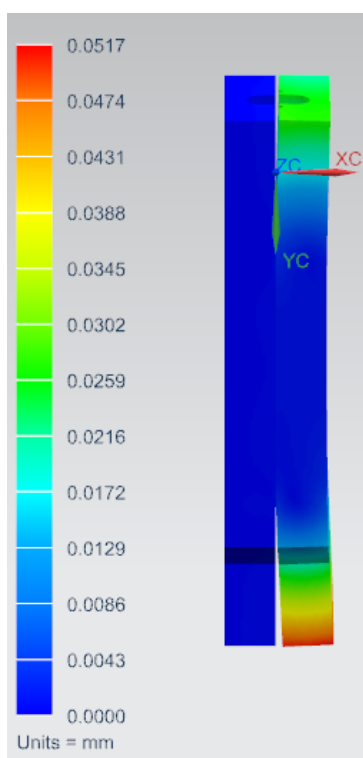
Εικόνα 149 Insert τοποθετημένα στο αριστερό καλούπι του headtube

## 3.2 Έλεγχος αντοχής καλουπιού

Αφού επιλέχθηκαν τα επιμέρους στοιχεία του καλουπιού έγινε η μελέτη του καλουπιού στις συνθήκες πίεσης που θα του εφαρμοστούν, που είναι 8 bar. Χάριν ευκολίας εξετάστηκε ξεχωριστά το καλούπι κάθε κομματιού, χρησιμοποιώντας κάθε φορά τις ελάχιστες δυνατές βίδες. Οι βίδες μοντελοποιήθηκαν ως 1D beam elements. Ενδεικτικά στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι παραμορφώσεις λόγω πίεσης στα καλούπια του head tube και του top tube.



Εικόνα 150 Παραμορφώσεις λόγω πίεσης στο καλούπι του head tube



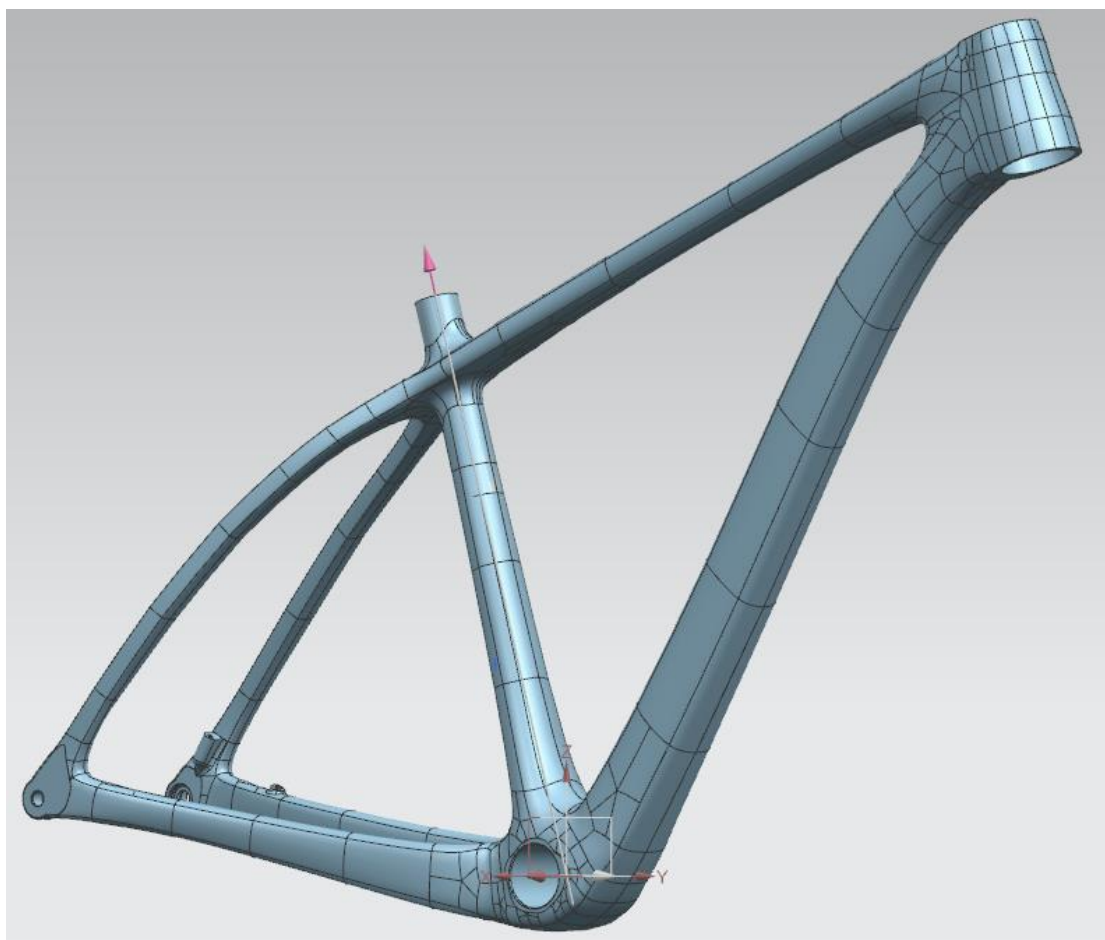
Εικόνα 151 Παραμορφώσεις λόγω πίεσης στο καλούπι του top tube

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τάσεις, καθώς και οι μετατοπίσεις λόγω της πίεσης στο καλούπτι είναι πολύ μικρές. Άρα ο αριθμός κοχλιών που έχει επιλεγεί επαρκεί έτσι ώστε να κλείνει σωστά το καλούπτι.

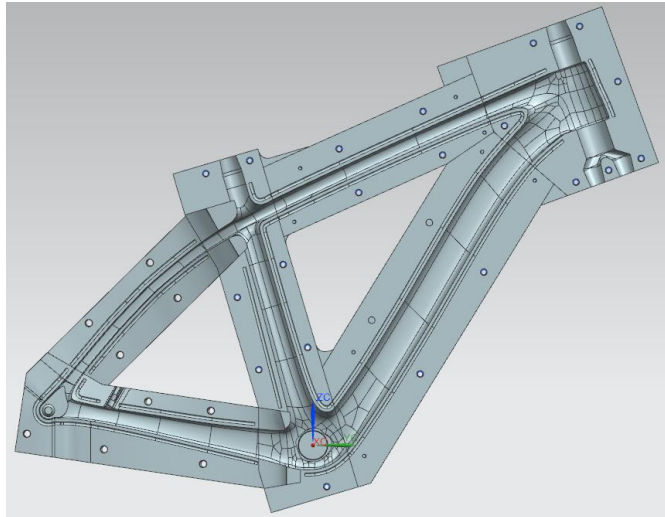
Ο λόγος που δεν επιθυμούμε μεγάλο αριθμό κοχλιών είναι διότι θέλουμε το «λύσιμο» του καλουπιού να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Επειδή το καλούπτι είναι από αλουμίνιο, καθώς κρυώνει μόλις βγει από το φούρνο, συστέλλεται γρηγορότερα από την ανθρακονημάτινο σκελετό. Συνεπώς, αν έχω πολλούς κοχλίες, υπάρχει περίπτωση η συστολή του καλουπιού να προκαλέσει ρωγμές ή ακόμα και σπάσιμο του σκελετού.

### 3.3 Σχεδιασμός καλουπιού για το μέγεθος M.

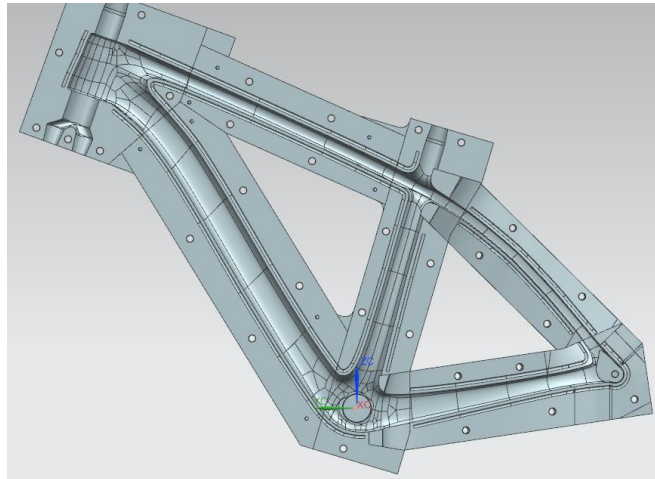
Ακριβώς η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του καλουπιού για το μέγεθος M. Ο σκελετός υπέστη αλλαγές στα πίσω νύχια, αφού πλέον θα είναι και αυτά ανθρακονημάτινα, αλλά και στα seat stays και chain stays, έτσι ώστε οι parting lines που σχηματίζονται να είναι ομαλές για να είναι πιο εύκολη η παραγωγή των σχεδίων των καλουπιών. Το τελικό σχέδιο του σκελετού στο μέγεθος M και το αντίστοιχο καλούπτι παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



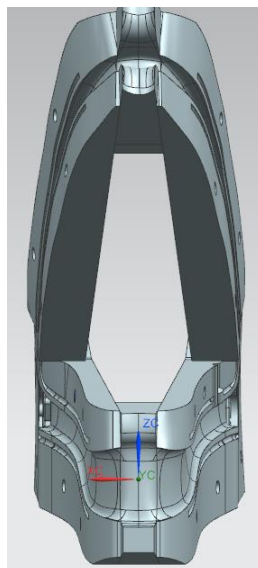
Εικόνα 152 τελικό μοντέλο σκελετού μεγέθους M



Εικόνα 153 αριστερό κομμάτι καλουπιών σκελετού μεγέθους M



Εικόνα 154 Δεξί κομμάτι καλουπιών σκελετού μεγέθους M



Εικόνα 155 Μεσαίο κομμάτι καλουπιών σκελετού  
μεγέθους M



### 3.4 Έλεγχος των νέων σχεδίων του σκελετού

Κατά τον σχεδιασμό του καλουπιού, ήταν απαραίτητη η αλλαγή του σχεδίου του σκελετού και στα δύο μεγέθη. Έτσι χρησιμοποιώντας τα νέα σχέδια για τα μεγέθη L και M και τις τελικές διαστρωματώσεις στις οποίες καταλήξαμε παραπάνω, τρέξαμε ξανά τις προσομοιώσεις.

#### 1. Έλεγχος της τελικής διαστρωμάτωσης STD για το μέγεθος L

Οι μέγιστες μετατοπίσεις σε mm δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
50η (τελική διαστρωματώσεων)	2,027	0,733	1,350	0,675	0,577	2,172	2,018
51η (μετά τις αλλαγές λόγω καλουπιού)	1,991	0,740	1,357	0,678	0,621	2,266	2,086

*Πίνακας 75 Σύγκριση μετατοπίσεων μεταξύ τελικής δοκιμής κατά την αναζήτηση της STD διαστρωμάτωσης για το μέγεθος L και των αποτελεσμάτων με το τελικό μοντέλο του σκελετού μεγέθους L.*

Τα μέγιστα φορτία που αναπτύσσονται ανά στρώση και ανά τεστ συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός στρώσης	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces F1	Horizontal forces F2	Vertical force	Pedalling forces F1	Pedalling forces F2
Ply 1 (a)	114,74	98,43	53,25	26,62	95,00	92,91	90,35
Ply 2 (b)	195,03	139,56	76,39	38,20	183,25	133,36	123,52
Ply 3 (c)	93,32	84,26	47,50	23,75	101,59	90,55	90,42
Ply 4 (d)	171,19	115,33	67,44	33,72	142,45	107,86	130,58
Ply 5 (e)	117,41	130,77	72,99	36,49	100,65	117,52	140,80
Ply 6 (f)	185,29	151,04	85,07	42,53	114,95	165,66	182,35
Ply 7 (g)	194,05	79,40	73,11	36,55	46,70	105,03	109,58
Ply 8 (h)	276,09	108,83	102,31	51,16	54,81	101,06	218,42

*Πίνακας 76 Μέγιστα φορτία Von Mises ανά στρώση για κάθε τεστ*

## 2. Έλεγχος της τελικής διαστρωμάτωσης SL για το μέγεθος L

Οι μέγιστες μετατοπίσεις σε mm δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
55η (τελική διαστρωματώσεων)	2,463	0,659	1,535	0,768	0,544	2,079	1,911
56η (μετά τις αλλαγές λόγω καλουπιού)	2,521	0,749	1,521	0,761	0,590	2,173	2,003

Πίνακας 77 Σύγκριση μετατοπίσεων μεταξύ τελικής δοκιμής κατά την αναζήτηση της SL διαστρωμάτωσης για το μέγεθος L και των αποτελεσμάτων με το τελικό μοντέλο του σκελετού μεγέθους L.

Τα μέγιστα φορτία που αναπτύσσονται ανά στρώση και ανά τεστ συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός στρώσης	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces F1	Horizontal forces F2	Vertical force	Pedalling forces F1	Pedalling forces F2
Ply 1 (a)	223,16	164,93	79,35	39,76	130,14	171,15	168,55
Ply 2 (b)	216,67	170,66	82,73	41,36	160,94	157,28	161,47
Ply 3 (c)	175,37	99,70	63,61	31,81	162,02	125,41	158,91
Ply 4 (d)	176,48	124,40	65,98	32,99	168,55	152,82	156,09
Ply 5 (e)	268,15	184,60	100,74	50,37	164,64	143,63	194,69
Ply 6 (f)	247,11	144,19	89,28	44,64	108,16	158,58	160,61
Ply 7 (g)	349,31	197,77	125,37	62,68	150,18	189,50	218,79
Ply 8 (h)	88,45	73,12	77,75	38,88	44,96	98,89	231,72
Ply 9 (i)	92,75	132,21	91,22	45,61	81,48	127,97	248,39

Πίνακας 78 Μέγιστα φορτία Von Mises ανά στρώση για κάθε τεστ

### 3. Έλεγχος της τελικής διαστρωμάτωσης STD για το μέγεθος M

Οι μέγιστες μετατοπίσεις σε mm δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
12η (τελική διαστρωμάτωση)	2,580	0,619	1,421	0,711	0,520	2,249	2,065
13η (μετά τις αλλαγές λόγω καλουπιού)	1,875	0,458	1,335	0,667	0,463	2,257	2,075

*Πίνακας 79 Σύγκριση μετατοπίσεων μεταξύ τελικής δοκιμής κατά την αναζήτηση της STD διαστρωμάτωσης για το μέγεθος M και των αποτελεσμάτων με το τελικό μοντέλο του σκελετού μεγέθους M.*

Τα μέγιστα φορτία που αναπτύσσονται ανά στρώση και ανά τεστ συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός στρώσης	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces F1	Horizontal forces F2	Vertical force	Pedalling forces F1	Pedalling forces F2
Ply 1 (a)	163,51	73,56	68,13	34,07	91,10	110,10	96,69
Ply 2 (b)	211,66	95,74	84,57	42,28	140,66	113,86	150,93
Ply 3 (c)	109,41	62,20	42,45	21,23	94,70	94,36	86,00
Ply 4 (d)	176,96	74,38	77,65	38,83	133,25	108,58	105,19
Ply 5 (e)	114,22	81,08	60,18	30,09	72,25	140,68	128,63
Ply 6 (f)	205,01	94,84	70,77	35,38	167,98	186,03	187,02
Ply 7 (g)	192,35	58,72	47,41	23,71	41,29	106,36	93,84
Ply 8 (h)	75,67	86,19	78,25	39,13	56,79	94,78	96,62

*Πίνακας 80 Μέγιστα φορτία Von Mises ανά στρώση για κάθε τεστ*

#### 4. Έλεγχος της τελικής διαστρωμάτωσης SL για το μέγεθος M

Οι μέγιστες μετατοπίσεις σε mm δίνονται στον επόμενο πίνακα.

Δοκιμή	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces		Vertical Force	Pedalling forces	
			F1	F2		F1	F2
9η (τελική διαστρωμάτωση)	2,522	0,679	1,438	0,719	0,517	2,128	1,964
10η (μετά τις αλλαγές λόγω καλουπιού)	1,716	0,489	1,329	0,665	0,463	2,063	1,907

Πίνακας 81 Σύγκριση μετατοπίσεων μεταξύ τελικής δοκιμής κατά την αναζήτηση της SL διαστρωμάτωσης για το μέγεθος M και των αποτελεσμάτων με το τελικό μοντέλο του σκελετού μεγέθους M.

Τα μέγιστα φορτία που αναπτύσσονται ανά στρώση και ανά τεστ συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός στρώσης	Falling mass	Falling frame	Horizontal forces F1	Horizontal forces F2	Vertical force	Pedalling forces F1	Pedalling forces F2
Ply 1 (a)	255,60	122,72	110,05	55,03	142,05	175,43	152,00
Ply 2 (b)	224,92	138,11	107,32	53,66	146,89	140,68	154,12
Ply 3 (c)	218,98	100,93	100,31	50,16	178,18	121,25	136,59
Ply 4 (d)	176,12	117,36	94,52	47,26	174,95	133,25	159,34
Ply 5 (e)	220,39	87,83	78,82	39,41	165,57	134,40	123,13
Ply 6 (f)	235,33	116,12	91,96	45,98	103,08	134,64	120,19
Ply 7 (g)	284,58	113,39	105,77	52,88	91,89	171,04	171,85
Ply 8 (h)	264,04	110,39	90,98	45,49	72,20	190,72	192,96
Ply 9 (i)	255,47	107,93	79,79	39,89	67,75	112,51	111,89
Ply 10 (j)	68,15	67,45	76,86	38,43	47,69	85,08	103,66

Πίνακας 82 Μέγιστα φορτία Von Mises ανά στρώση για κάθε τεστ

## Επίλογος

Συγκρίνοντας τις μετατοπίσεις και τα φορτία μεταξύ των μοντέλων πριν και μετά τη δημιουργία του καλουπιού, είναι εμφανές ότι η αλλαγή που έγινε στο σχέδιο στις περισσότερες περιπτώσεις μας ωφελεί, καθώς μειώνονται οι παραμορφώσεις. Τα σημεία που οι παραμορφώσεις στο τελικό μοντέλο είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του μοντέλου πριν τη δημιουργία του καλουπιού, παρατηρείται ότι οφείλονται στην ύπαρξη ανθρακονημάτων νυχιών. Υπενθυμίζουμε ότι κατά τις αναλύσεις, σε αντίθεση με την πραγματικότητα, τα νύχια και οι βάσεις του δισκόφρενου δεν είναι συμπαγή. Έτσι παραμορφώνονται περισσότερο, πράγμα που εμφανίζεται και στα αποτελέσματα.

Όσον αφορά στην κόπωση των ανθρακονημάτων, παρατηρείται ότι τα φορτία αν και έχουν αυξηθεί λίγο, παραμένουν αρκετά χαμηλά, με αποτέλεσμα να μην τίθεται θέμα αστοχίας λόγω κόπωσης.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το ψήσιμο του σκελετού θα γίνει σε φούρνο με μέγιστη θερμοκρασία 65 °C. Λόγω της μικρής διαφοράς με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις στο καλούπι. Ωστόσο, στο μέλλον αξίζει να γίνει και μία θερμική μελέτη έτσι ώστε το πλαίσιο του σκελετού να μπορεί να ψηθεί και σε υψηλότερες θερμοκρασίες για εξοικονόμηση χρόνου.

Στο μέλλον, επίσης, αξίζει να γίνει περαιτέρω ανάλυση για το σχεδιασμό των άλλων δύο μεγεθών του σκελετού, τα S και XL, καθώς και των αντίστοιχων καλουπιών. Επιπρόσθετα, η αναζήτηση κάποιων πιο άκαμπτων υλικών θα οδηγήσει σε πιο ελαφριά πλαίσια, καθώς είναι προφανές ότι δεν χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη αντοχή των υλικών που ήταν διαθέσιμα.

## 4. Παράρτημα

Ιδιότητες ινών από την Toray

TECHNICAL  
DATA SHEET  
No. CFA-014

# TORAYCA® M40J DATA SHEET

MJ type high modulus fiber with enhanced tensile and compressive strength over M series fibers. Mainly used for premium sporting goods, aerospace, and industrial applications.

### F I B E R P R O P E R T I E S

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		640 ksi	4,410 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		54.7 Mei	377 GPa	TY-030B-01
Strain		1.2 %	1.2 %	TY-030B-01
Density		0.064 lbs/in <sup>3</sup>	1.77 g/cm <sup>3</sup>	TY-030B-02
Filament Diameter		2.0E-04 in.	5 μm	
Yield	3K	13,181 ft/lbs	113 g/1000m	TY-030B-03
	6K	6,620 ft/lbs	225 g/1000m	TY-030B-03
	12K	3,310 ft/lbs	450 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
	Twist	Twisted, Untwisted		

### F U N C T I O N A L P R O P E R T I E S

CTE	-0.83 α·10 <sup>-6</sup> /°C
Specific Heat	0.17 Cal/g·°C
Thermal Conductivity	0.164 Cal/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.0 x 10 <sup>-3</sup> Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	>99 %
Na + K	<50 ppm

### C O M P O S I T E P R O P E R T I E S \*

Tensile Strength	360 ksi	2,450 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	33.5 Mei	230 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.1 %	1.1 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	185 ksi	1,270 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	220 ksi	1,520 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	28.5 Mei	195 GPa	ASTM D-790
ILSS	13.0 ksi	9 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	7.5 ksi	53 MPa	ASTM D-3039

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

T O R A Y C A R B O N F I B E R S A M E R I C A , I N C .

# TORAYCA® M46J DATA SHEET

MJ type high modulus fiber with enhanced tensile and compressive strength over M series fibers. Mainly used for premium sporting goods, aerospace, and industrial applications.

## F I B E R P R O P E R T I E S

		English	Metric	Test Method
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		

## F U N C T I O N A L P R O P E R T I E S

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

## C O M P O S I T E P R O P E R T I E S \*

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.

T O R A Y C A R B O N F I B E R S A M E R I C A , I N C .

# 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.

## F I B E R P R O P E R T I E S

		English	Metric	Test Method
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		

## F U N C T I O N A L P R O P E R T I E S

CTE	-0.41 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.19 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	$1.7 \times 10^{-3} \Omega\cdot\text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

## C O M P O S I T E P R O P E R T I E S \*

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.

T O R A Y C A R B O N F I B E R S A M E R I C A , I N C .



# TORAYCA® T700S DATA SHEET

Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.

## FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in <sup>3</sup>	1.80 g/cm <sup>3</sup>	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 µm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E		0.3 %	TY-030B-05
	F0E		0.7 %	TY-030B-05
	Twist	Never twisted		

## FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE		-0.38 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat		0.18 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity		0.0224 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity		$1.6 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$
Chemical Composition: Carbon		93 %
Na + K		<50 ppm

## COMPOSITE PROPERTIES \*

Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	245 ksi	1,670 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	17.5 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	69 MPa	ASTM D-3039

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

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

## Ιδιότητες για το HR40

### PYROFIL™

	Type	Number of Filaments	Filament Diameter	Yield	Tensile Strength			Tensile Modulus			Elongation	Density
			μ m	mg/m	kg/mm <sup>2</sup>	Mpa	Ksi	ton/mm <sup>2</sup>	GPa	Msi	%	g/cm <sup>3</sup>
HT Series	TR 30S 3L	3,000	7	200	420	4,120	600	24.0	234	34	1.8	1.79
	TR 50S 6L	6,000	7	400	500	4,900	710	24.5	240	35	2.0	1.82
	TR 50S12L	12,000	7	800								
	TR 50S15L	15,000	7	1,000								
	TR 50D12L	12,000	7	800	510	5,000	720	24.5	240	35	2.1	1.82
	TRH50 18M	18,000	6	1000	540	5,300	770	25.5	250	36	2.1	1.82
	TRH50 60M	60,000	6	3,200	490	4,830	700	25.5	250	36	1.9	1.81
TRW40 50L	50,000	8	3,750	420	4,120	600	24.5	240	35	1.7	1.80	
IM Series	MR 60H 24P	24,000	5	960	580	5,680	820	29.5	290	42	1.9	1.81
HM Series	MS 40 12M	12,000	6	600	450	4,410	640	35.0	345	50	1.3	1.77
	HR 40 12M	12,000	6	600	450	4,410	640	40.0	395	57	1.1	1.82
	HS 40 12P	12,000	5	430	470	4,610	670	46.0	455	65	1.0	1.85

### GRAFIL™

	Type	Number of Filaments	Filament Diameter	Yield	Tensile Strength			Tensile Modulus			Elongation	Density
			μ m	mg/m	kg/mm <sup>2</sup>	Mpa	Ksi	ton/mm <sup>2</sup>	GPa	Msi	%	g/cm <sup>3</sup>
HT Series	34-700	12,000	7	800	490	4,830	700	24.0	234	34	2.0	1.80
		24,000	7	1,600								
	37-800	30,000	6	1,675	560	5,520	800	26.0	255	37	2.1	1.81



## PYROFIL™ HR40

### Typical Fiber Properties

Tow Tensile	Strength	670 4610	ksi MPa	JIS R 7601
	Modulus	57 390	msi GPa	
Typical Density		0.066 1.82	lb.in. <sup>3</sup> g/cm <sup>3</sup>	JIS R 7601
Typical Yield	12K	825 600	yds/lb mg/m	JIS R 7601

### Typical Mechanical Properties

Tensile Properties	0°	Strength	423 2920	ksi MPa	ASTM D3039 / 0°8ply
		Modulus	33.1 228	msi GPa	ASTM D3039 / 0°8ply
	90°	Strength	8.7 60	ksi MPa	ASTM D3039 / 0°16ply
		Modulus	1.04 7.2	msi GPa	ASTM D3039 / 0°16ply
Compressive Properties	0°	Strength	194 1340	ksi MPa	ASTM D3039 / 0°16ply
		Modulus	28.5 197	msi GPa	ASTM D3039 / 0°16ply
	90°	Strength	24.5 169	ksi MPa	ASTM D3410 / 0°20ply
		Modulus	1.16 8.0	msi GPa	ASTM D3410 / 0°20ply
Flexural Properties	0°	Strength*	278 1920	ksi MPa	ASTM D790 / 0°16ply, L/D=32, Vf=61%
		Modulus*	29.6 204	msi GPa	ASTM D790 / 0°16ply, L/D=32, Vf=61%
	90°	Strength	16 110	ksi MPa	ASTM D790 / 0°16ply, L/D=16, Vf=61%
		Modulus	1.1 7.0	msi GPa	ASTM D790 / 0°16ply, L/D=16, Vf=61%
ILSS	Strength	12 83	ksi MPa	ASTM D2344 / 0°16ply, L/D=4, Vf=59%	

- 250F Epoxy Prepregs
- Resin: Mitsubishi Rayon #350 resin system
- Tensile and compressive properties are normalized to 60% fiber volume

5900 88th Street  
 Sacramento, CA  
 95828, USA  
 Tel: 916.386.1733  
 Fax: 916.383.7668  
 Web: www.grafil.com



# Γενικά στοιχεία για τους βασικούς τύπους υφασμάτων από την εταιρεία Performance Composites



PERFORMANCE  
COMPOSITES

CARBON  
FIBRE TUBES

FIBRE  
TYPES

FIBRE  
ANGLES

CARBON  
FIBRE  
PROFILES

EXAMPLE  
PROFILES

MECHANICAL  
PROPERTIES

MATERIALS &  
EQUIPMENT  
SUPPLIES

CONTACT

## Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials, Fibre / Epoxy resin (120°C Cure)

Fibres @ 0° (UD), 0/90° (fabric) to loading axis, Dry, Room Temperature, Vf = 60% (UD), 50% (fabric)

	Symbol	Units	Std CF Fabric	HMCF Fabric	E glass Fabric	Kevlar Fabric	Std CF UD	HMCF UD	M55** UD	E glass UD	Kevlar UD	Boron UD	Steel S97	Al. L65	Tit. dtd 5173
Young's Modulus 0°	E1	GPa	70	85	25	30	135	175	300	40	75	200	207	72	110
Young's Modulus 90°	E2	GPa	70	85	25	30	10	8	12	8	6	15	207	72	110
In-plane Shear Modulus	G12	GPa	5	5	4	5	5	5	5	4	2	5	80	25	
Major Poisson's Ratio	v12		0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.25	0.34	0.23			
Ult. Tensile Strength 0°	Xt	MPa	600	350	440	480	1500	1000	1600	1000	1300	1400	990	460	
Ult. Comp. Strength 0°	Xc	MPa	570	150	425	190	1200	850	1300	600	280	2800			
Ult. Tensile Strength 90°	Yt	MPa	600	350	440	480	50	40	50	30	30	90			
Ult. Comp. Strength 90°	Yc	MPa	570	150	425	190	250	200	250	110	140	280			
Ult. In-plane Shear Stren.	S	MPa	90	35	40	50	70	60	75	40	60	140			
Ult. Tensile Strain 0°	ext	%	0.85	0.40	1.75	1.60	1.05	0.55		2.50	1.70	0.70			
Ult. Comp. Strain 0°	exc	%	0.80	0.15	1.70	0.60	0.85	0.45		1.50	0.35	1.40			
Ult. Tensile Strain 90°	eyt	%	0.85	0.40	1.75	1.60	0.50	0.50		0.35	0.50	0.60			
Ult. Comp. Strain 90°	eyc	%	0.80	0.15	1.70	0.60	2.50	2.50		1.35	2.30	1.85			
Ult. In-plane shear strain	es	%	1.80	0.70	1.00	1.00	1.40	1.20		1.00	3.00	2.80			
Thermal Exp. Co-ef. 0°	Alpha1	Strain/K	2.10	1.10	11.60	7.40	-0.30	-0.30	-0.30	6.00	4.00	18.00			
Thermal Exp. Co-ef. 90°	Alpha2	Strain/K	2.10	1.10	11.60	7.40	28.00	25.00	28.00	35.00	40.00	40.00			
Moisture Exp. Co-ef 0°	Beta1	Strain/K	0.03	0.03	0.07	0.07	0.01	0.01		0.01	0.04	0.01			
Moisture Exp. Co-ef 90°	Beta2	Strain/K	0.03	0.03	0.07	0.07	0.30	0.30		0.30	0.30	0.30			
Density		g/cc	1.60	1.60	1.90	1.40	1.60	1.60	1.65	1.90	1.40	2.00			

\*\* Calculated figures

## 5. Βιβλιογραφία

- Σημειώσεις μαθήματος Προηγμένα υλικά  
Δημήτριος Μανωλάκος
- Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά  
Δημήτρης Ι. Παντελής
- NONLINEAR MECHANICAL RESPONSE OF CFRP LAMINATES UNDER OFF-AXIS TENSILE LOADING  
Shinji Ogihara\*, Eishin Adachi\*\* and Satoshi Kobayashi\*\*\*
- NX Laminate Composites Student Guide October, 2011  
MT15029-s-nx8
- Fatigue of Fiber-reinforced Composites  
Anastasios P. Vassilopoulos • Thomas Keller
- Advanced Mechanics of Composite Materials  
Valery V. Vasiliev – Evgeny V. Morozov
- Carbon Fiber Composites  
Deborah D. L. Chung
- Composite Materials Design and Applications  
Daniel Gay – Suong V. Hoa Stephen – W. Tsai
- Composites for Construction – Structural Design with FRP Materials  
Lawrence C. Bank
- Engineering Mechanics of Composite Materials  
Isaac Daniel – Ori Ishai
- Fiber Reinforced Composites Materials Manufacturing and Design  
P. K. Mallick
- «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.
- " Fatigue in composites Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics"  
Edited by Bryan Harris
- Investigation on tension–tension fatigue performances and reliability fatigue life of T700/MTM46 composite laminates
- Fiber direction and stacking sequence design for bicycle frame made of carbon/epoxy composite laminate  
Thomas Jin-Chee Liu , Huang-Chieh Wu
- Bicycle frame with multiple layer tube  
Simon I. (Dajia Town, TW)  
Wang, Kun-hsi (Da-an Shiang, TW)
- Utilization of FEA in the design of composite bicycle frames  
Larry B. Lessard, James A. Nemes and Patrick L. Lizotte
- A method for quantifying impact loads from stone impact in mountain biking  
F. Höchtl, W. W. Gleixner, M. Pernicka, V. Senner
- Transference of 3D accelerations during cross country mountain biking  
Paul W. Macdermid, Philip W. Fink, Stephen R. Stannard
- Leading Edge Composite Material research

Tobias G.Wouters

- Σχεδιασμός και κατασκευή ανθρακονημάτινου τιμονιού αγωνιστικού ποδηλάτου - Μάρκος Κατσιπίης

Επιβλέπων Καθηγητής Ε.Μ.Π. Κος Δημ. Μανωλάκος

- Σχεδιασμός και μελέτη τιμονιού για αγωνιστικό ποδήλατο ορεινής ποδηλασίας Σπύρος Φλέσσας

Επιβλέπων καθηγητής ΕΜΠ Κος Δημ. Μανωλάκος

- Σχεδιασμός και μελέτη πιρουνιού αγωνιστικού ποδηλάτου κατασκευασμένο από cfrp

Γλυμής Ευθύμιος

Επιβλέπων καθηγητής ΕΜΠ Κος Δημ. Μανωλάκος

## Ιστοσελίδες

<http://www.torayca.com>

<http://www.carbonfiber.gr.jp>

<http://www.bikefitting.com/>

<http://www.advanced-composites.co.uk/>

<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/>

<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075T6>