



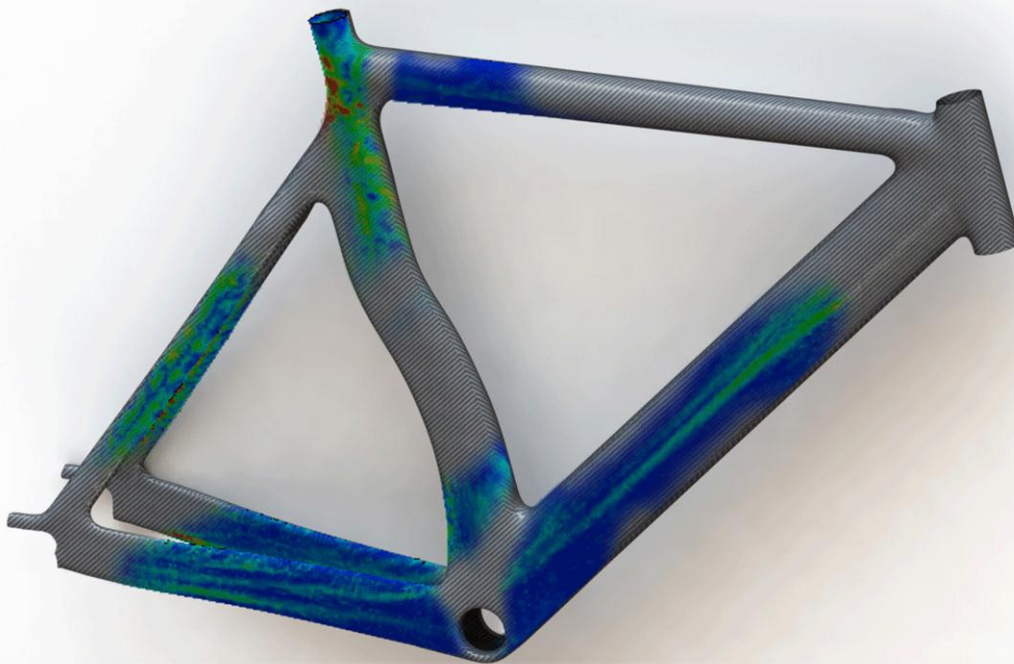
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Διπλωματική Εργασία

Αντίστροφος Σχεδιασμός & Επικύρωση Πρωτότυπου Πλαισίου Ποδηλάτου με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων



Μιχαλόπουλος Ιωάννης

Επιβλέπων Καθηγητής: Δ.Ε. Μανωλάκος

Αθήνα 2012

Περίληψη

Αντίστροφος Σχεδιασμός & Επικύρωση

Πρωτότυπου Πλαισίου Ποδηλάτου

με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η παρούσα εργασία περιγράφει την διαδικασία αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού ενός πρωτότυπου πλαισίου αγωνιστικού ποδηλάτου και την μετέπειτα επικύρωση του σχεδίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Ευρωπαϊκού Κανονισμού EN14781 περί αγωνιστικών ποδηλάτων.

Αρχικές προσπάθειες αντίστροφου σχεδιασμού μόνο με λογισμικό Computer Aided Design (CAD) απέβησαν ανεπιτυχής, και αποφασίστηκε η τρισδιάστατη σάρωση του προϊόντος με μία Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων – Αρθρωτού Βραχίονα (ΜΜΣ-ΑΒ) FARO PLATINUM ARM Model P083D του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων. Πολλαπλά νέφη σημείων, επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Geomagic προς την δημιουργία πολυγωνικών επιφανειών και τελικώς επιφανειών τύπου Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) οι οποίες βελτιστοποιήθηκαν περαιτέρω σε περιβάλλον Solidworks.

Κατόπιν, αναλύθηκαν δύο δοκιμές του Ευρωπαϊκού Κανονισμού EN14781, και το πλαίσιο μοντελοποιήθηκε ως κατασκευή σύνθετων υλικών, με δεδομένη διαστρωμάτωση υφασμάτων ανθρακονήματος. Τα προβλήματα προς επίλυση στήθηκαν με στατικά φορτία ισοδύναμα προς τις δυναμικές καταπονήσεις που θέτει ο EN14781 ώστε να ξεπεραστούν αδυναμίες του πακέτου Computer Aided Engineering (CAE) που περιλαμβάνει το Solidworks Premium, και να μπορέσει να γίνει ανάλυση ανά στρώση για καλύτερη διερεύνηση των αποτελεσμάτων που θα οδηγήσει σε ασφαλέστερα τελικά συμπεράσματα.

Με το πέρας των αναλύσεων απεδείχθη πως η επιλογή των συγκεκριμένων διαστρωματώσεων είναι μάλλον αισιόδοξη, και τελικά το πλαίσιο δεν μπορεί ν' ανταποκριθεί στις προδιαγραφές του EN14781, έτσι όπως αυτές μεταφράστηκαν στην ανάλυση της παρούσης εργασίας. Προτείνεται καταληκτικά ενίσχυση του Seat Tube με επιπλέον στρώσεις, η οποία αναμένεται να φέρει το προϊόν σε θέση να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του Κανονισμού.

Abstract

Reverse Engineering & Validation

Of a Prototype Bicycle Frame

via Finite Element Analysis

This diploma thesis describes the reverse engineering process of a prototype racing bicycle frame and the validation of the design according to the specification dictated by the European Standard EN14781 for racing bicycles.

Initial efforts of reverse engineering using only Computer Aided Design (CAD) software were unsuccessful, and it was decided that a 3D scan using a FARO PLATINUM ARM Model P083D Coordinate Measuring Machine –Arm (CMM) provided by the Rapid Prototyping & Tooling Laboratory. Multiple point clouds were processed with commercially available software (Geomagic) for the creation of polygon surfaces that were later translated into Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) type surfaces for final optimization with Solidworks.

After the design was acquired, two tests of the EN14781 Standard were analysed and the frame was modeled as a composite material shell with a given set of carbon fibre laminates. The problems that were to be solved, were set up with static loads equivalent to the dynamic ones that were explicitly dictated by the EN 14781 Standard, in order for the weaknesses of the Computer Aided Engineering (CAE) package included in Solidworks to be overlooked, and a per-ply analysis to take place. Results were possible to be more meticulously surveyed and safer conclusions could be drawn from the analyses.

With the analyses concluded, it was evident that the composite laminate lay-out that was given for validation were somewhat optimistic, as the frame could not handle the loads for either scenario of the EN14781 Standard; at least for the way those scenarios were translated for the sake of this diploma thesis. Finally it was recommended that the Seat Tube is to be fortified with additional layers that are expected to bring the product to a state of sufficient strength for the specification of the EN 14781 Standard.

Ευχαριστίες

Με την παρούσα Διπλωματική Εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στην Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλλαν με άμεσο ή έμμεσο τρόπο στις σπουδές μου και στο να γίνω Μηχανικός.

Ευχαριστώ κατ' αρχάς τον Καθηγητή κ. Δ.Ε. Μανωλάκο που όχι μόνο δέχτηκε ν' αναλάβει την διπλωματική μου εργασία , αλλά με βοήθησε τα μέγιστα να ολοκληρώσω τις υποχρεώσεις μου τάχιστα εν μέσω πολύ δύσκολων συνθηκών.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον υποψήφιο διδάκτωρ κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη που με έφερε σ' επαφή με κάτι καινούριο, μου έδωσε την ευκαιρία να συμμετάσχω σε ένα high-end προϊόν υψηλής τεχνολογίας και κυρίως με τίμησε με την εμπιστοσύνη του ζητώντας την συμβολή μου σε ένα μεγαλεπήβολο project.

Ευχαριστώ και τον Διδάκτωρ κ. Γ. Καϊσαρλή του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων για την εμπιστοσύνη του να χειριστώ τον εξοπλισμό, τον χρόνο του και την υπομονή του.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, και ιδιαίτερα τον πατέρα μου που έκανε τ' αδύνατα δυνατά προκειμένου αυτές να ολοκληρωθούν.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή	9
Σκοπός Εργασίας	9
Δομή Εργασίας.....	10
Ορισμοί & Χρήσιμες Έννοιες	11
2. Αντίστροφος Σχεδιασμός του Προϊόντος	13
Το πρόβλημα.....	13
Παραμετρικός Σχεδιασμός.....	14
Solidworks	14
3D Scanning.....	22
Αρχές Σαρωτών Τριγωνοποίησης.....	25
Polygon vs NURBS	58
3. Επικύρωση του Σχεδίου	69
Υλικά	69
Σύνθετα Υλικά.....	69
Προετοιμασία Αναλύσεων	79
Head Tube	81
Top Tube.....	81
Seat Stays.....	82
Down Tube.....	83
L & R Chain Stays.....	84
Seat Tubes 1 – 2 – 3.....	85
Head & Top Tubes overlap.....	86
Head & Down Tubes overlap.....	87
Meshing.....	88
Solver	90

Linear vs non-linear.....	91
Falling Mass.....	92
Στρώση #1	100
Στρώση #2	101
Στρώση #3	103
Στρώση #4	104
Στρώση #5	105
Στρώση #6	106
Στρώση #7	107
Στρώση #8	108
Στρώση #9	109
Στρώση #10.....	109
Στρώση #11.....	110
Στρώση #12.....	110
Στρώση #13.....	111
Στρώση #14.....	112
Στρώση #15.....	113
Στρώση #16.....	113
Falling Frame.....	114
Στρώση #1	120
Στρώση #2	121
Στρώση #3	122
Στρώση #4	123
Στρώση #5	124
Στρώση #6	125
Στρώση #7	126

Στρώση #8	127
Στρώση #9	128
Στρώση #10.....	129
Στρώση #11.....	130
Στρώση #12.....	131
Στρώση #13.....	132
Στρώση #14.....	133
Στρώση #15.....	134
Στρώση #16.....	135
4. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	136
Falling Mass Test.....	136
Falling Frame Test.....	136
Απολογισμός.....	137
5. Βιβλιογραφία.....	139

1. Εισαγωγή

Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση της διαδικασίας του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού ενός προϊόντος με τελικό σκοπό την επικύρωση του σχεδίου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τίθενται από ένα διεθνές σώμα τυποποίησης.

Πιο συγκεκριμένα, κέντρο της εργασίας είναι ένα πρωτότυπο πλαίσιο αγωνιστικού ποδηλάτου φτιαγμένα από σύνθετα υλικά (ανθρακονήματα προεμποτισμένα σε μήτρα εποξικής ρητίνης), για το οποίο θέλαμε να εξετάσουμε κατά πόσο συμμορφώνεται με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN14781 περί αγωνιστικών ποδηλάτων, με την μορφή που έχει σήμερα, και με τις διαστρωματώσεις των υφασμάτων που έχουν επιλεγεί από τον σχεδιαστή του.

Σκοπός δεν είναι η βελτιστοποίηση της μορφής, των υλικών και της χρήσης τους στο προϊόν υπό συζήτηση, αλλά η επικύρωση του σχεδίου βάσει των προδιαγραφών του EN14781.

Από την μία έχουμε τον αντίστροφο μηχανολογικό σχεδιασμό, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σ' εφαρμογές που ποικίλουν από γνήσιες περιπτώσεις Reverse Engineering, από ανταγωνιστές σχεδιαστές, έως και στον Ορθό Σχεδιασμό, ως ενδιάμεσα στάδια.

Πολλές βιομηχανίες χρησιμοποιούν ομάδες καλλιτεχνών για την δημιουργία των φυσικών μοντέλων των νέων τους προϊόντων σε κλίμακα 1:1 με την χρήση πηλού, την μορφή των οποίων στην συνέχεια εισάγουν Η/Υ για την αρχή της συνεργασίας με την ομάδα μηχανικών. Οι μηχανικοί στην συνέχεια είναι αυτοί που με κατάλληλα εργαλεία Computer Aided Engineering (CAE) θα καταφέρουν να φτιάξουν ένα προϊόν με βασικό περιορισμό την μορφή, και προδιαγραφές που ορίζονται από την αγορά και τα κυβερνώντα σώματα που θέτουν κανονισμούς ασφαλείας ή προτύπων.

Κλασικό παράδειγμα αποτελεί η αυτοκινητοβιομηχανία στο σύνολό της. Κάποια πρώτα concept σχέδια γίνονται πάντα στο χέρι και τον Η/Υ με λογισμικό Computer Aided Design (CAD) τα οποία όμως είναι καλλιτεχνικές απόψεις και δεν συγκροτούν ολοκληρωμένα μηχανολογικά σχέδια. Στην συνέχεια χτίζονται μοντέλα αυτοκινήτων από πηλό, και με διαδικασίες αντίστροφου σχεδιασμού όπως η τρισδιάστατη σάρωση περνάνε στον Η/Υ και οι μηχανικοί κάνουν κατάλληλες αλλαγές και τροποποιήσεις ώστε το όχημα να πληροί τις προδιαγραφές ασφαλείας κι απόδοσης που πρέπει.

Από την άλλη έχουμε την χρήση σύγχρονων υπολογιστικών μεθόδων με σκοπό την επικύρωση του σχεδίου του προϊόντος, για να βεβαιωθούμε ότι είναι ασφαλές κι εντός προδιαγραφών, ή να εντοπίσουμε τυχούσες αδυναμίες του και να μπορέσουμε να προτείνουμε κρίσιμες βελτιώσεις. Η ανάλυση δια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis – FEA) είναι μία αριθμητική μέθοδος με την οποία μπορούμε να προσεγγίσουμε λύσεις μερικών διαφορικών εξισώσεων (ΜΔΕ) και ολοκληρωτικών εξισώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται κατακερματίζοντας το πρόβλημα σε στοιχεία τα οποία μπορούν να επιλυθούν το ένα σε σχέση με τ' άλλο.

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα φυσικά συστήματα που περιγράφονται με ΜΔΕ και είναι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενος τρόπος επίλυσής τους από τους μηχανικούς σε πολλούς τομείς (αεροναυτική, αυτοκινητοβιομηχανία κά). Συνεισφέρει τα μέγιστα στην παρουσίαση γραφημάτων ακαμψίας και αντοχής ενός προϊόντος, δίνοντας στον μηχανικό τα απαραίτητα εργαλεία για να ελαχιστοποιήσει βάρος, υλικά και κόστη, χωρίς να βρίσκεται εκτός προδιαγραφών και χωρίς την ανάγκη κατασκευής κι ελέγχου δια του πειράματος ακριβών πρωτοτύπων.

Βλέπουμε λοιπόν πώς η ενασχόληση με το συγκεκριμένο θέμα είναι μια άριστη ευκαιρία για την γνωριμία με και την εμπάθυνση σε δύο από τα πολλά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας ενός προϊόντος σε βιομηχανική ή βιοτεχνική, το οποίο αν μη τι άλλο αποτελεί και το κέντρο της επιστήμης του Μηχανολόγου Μηχανικού.

Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ξεκινάει με την ταυτοποίηση του προϊόντος προς επεξεργασία και μία εισαγωγή σύντομης αναφοράς στον αντίστροφο σχεδιασμό, τα σύνθετα υλικά και την ανάλυση με εργαλεία FEM. Στην συνέχεια περνάμε στο κυρίως σώμα της εργασίας όπου περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε σχεδόν βήμα-βήμα. Επιθυμώ αυτή η εργασία να χρησιμεύσει ως οδηγός για οποιονδήποτε προπτυχιακό φοιτητή θα ήθελε ν' ασχοληθεί στο μέλλον με κάποιο από τα δύο θέματα, και γι' αυτό η δομή της είναι τέτοια ώστε κάποιος με βασικές γνώσεις σχεδιασμού σε περιβάλλον CAD κι ελάχιστη ενασχόληση με 3D modeling να μπορέσει ν' αναπαράγει τ' αποτελέσματά της.

Στο πρώτο κυρίως κεφάλαιο (2^ο κατά σειρά μετά την εισαγωγή) παρατίθενται με χρονολογική σειρά οι προσπάθειες να μεταφερθεί η μορφή του προϊόντος στον Η/Υ και στο δεύτερο κυρίως κεφάλαιο (3^ο κατά σειρά) θα αφιερωθούμε στην διαδικασία της επικύρωσης του σχεδίου.

Τέλος καταγράφονται τα συμπεράσματα από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Ορισμοί & Χρήσιμες Έννοιες

Αντίστροφος σχεδιασμός (Reverse Engineering) είναι η διαδικασία ανακάλυψης των τεχνολογικών αρχών μία συσκευής, ενός αντικειμένου, ενός μηχανισμού, ή ενός συστήματος μέσα από την ανάλυση της δομής, μορφής και λειτουργίας του. Το αντικείμενο προς ανάλυση συχνά χρειάζεται να λυθεί στα εξ'ω συντετεύθη για την ανάλυση των εσωτερικών του ή για την προσεκτική παρακολούθηση της λειτουργίας του. Κάποιες φορές περιλαμβάνει την διαδικασία δημιουργίας ακριβούς αντιτύπου και άλλες φορές κάποιου υποκατάστατου ή συμπληρωματικού προϊόντος. Για παράδειγμα, πολλά συμπληρωματικά αξεσουάρ διαφόρων προϊόντων, για τα οποία απαιτείται η μορφή του βασικού, τομέας με ιδιαίτερη εφαρμογή στα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης.

Πολλές φορές οι λόγοι είναι για την απόκτηση πλεονεκτήματος έναντι του ανταγωνισμού, μιας και ο αντίστροφος σχεδιασμός είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη εταιρική και βιομηχανική τακτική για την ανάλυση ανταγωνιστικών προϊόντων. Άλλωστε σε τέτοιου τύπου εφαρμογές ξεκίνησε ο αντίστροφος σχεδιασμός. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η αγορά μίας Ferrari F360 Modena από την αμερικάνικη Ford για να κατασκευάσει ένα καινούριο σπορ αυτοκίνητο υψηλών προδιαγραφών. Οι μηχανικοί της Ford, μην μπορώντας να βρουν την σωστή χρήση κι ολοκλήρωση υποσυστημάτων, ή έστω την σωστή δομή των υποσυστημάτων, αγόρασαν το τότε θεωρούμενο benchmark προϊόν για την συγκεκριμένη αγορά και με μεθόδους αντιστρόφου σχεδιασμού με βάση το προϊόν της Ferrari, κατέληξαν στην αναβίωση ενός θρύλου μισού αιώνα. Το Ford GT τελικώς ξεπέρασε σε όλους τους τομείς το προϊόν στο οποίο βασίστηκε.

Άλλες φορές όταν δημιουργείται ένα μμοντέλο από ανάστροφη μηχανολογία, ο στόχος είναι το μμοντέλο αυτό να είναι κατά το δυνατό πιστό αντίγραφο του πρωτοτύπου, ώστε να διατηρείται η ιδιόμορφη φύση του καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Αυτό θα μπορούσε να γίνει για ιστορική διατήρηση ή αποκατάσταση, για μαζική παραγωγή ενός μοναδικού αντικειμένου όπως για παράδειγμα ενός χαρακτηριστικού ξυλόγλυπτου είτε η μοντελοποίηση μιας κατεστραμμένης άρθρωσης στο γόνατο ώστε να δημιουργηθεί τεχνητό μέλος. Βασικός στόχος είναι η διατήρηση της λεπτομέρειας και της ακρίβειας του πρωτότυπου.

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για να δημιουργηθούν πιστά αντίγραφα. Ο πρώτος είναι μέσω μιας διαδικασίας να κατασκευαστεί ένα καλούπι του πρωτότυπου και στη συνέχεια να δημιουργούνται αντίγραφα με βάση αυτό το καλούπι. Ο συγκεκριμένος τρόπος πραγματοποιείται κυρίως με τεχνίτες και χωρίς την παρέμβαση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο δεύτερος είναι να παρθούν φυσικές μετρήσεις μέσω μιας διαδικασίας σάρωσης και να δημιουργηθεί ένα CAD μοντέλο το οποίο στη συνέχεια θα μπορεί να υποβληθεί σε μηχανουργική κατεργασία ώστε να παραχθεί το αντίγραφο. Στο συγκεκριμένο σημείο, όμως, θα πρέπει να αναφερθεί πως αν το αντικείμενο έχει τέτοια μορφή που να επιτρέπει την απευθείας μέτρηση των διαστάσεων του, είναι πολύ πιο γρήγορο να μετρηθούν αυτές οι διαστάσεις και να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατευθείαν το κατάλληλο λογισμικό σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή. Σε περίπτωση όμως που το αντικείμενο διαθέτει ανάγλυφες επιφάνειες, είναι πάρα πολύ δύσκολο και χρονοβόρο να παρθούν απευθείας μετρήσεις. Αυτό είναι ένα παράδειγμα στο οποίο η σάρωση ελαττώνει το χρόνο δημιουργίας του αντίγραφου

κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό και συγχρόνως διατηρεί τη λεπτομέρεια του πρωτότυπου με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ως **δίκυκλο** ορίζεται ένα οποιοδήποτε δίτροχο όχημα που κινείται αποκλειστικά (ή κυρίως) από την μυϊκή δύναμη του αναβάτη του μέσω πεταλιών, σύμφωνα πάντα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN14781 που εκδίδεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN - Comité Européen De Normalisation).

Σύμφωνα με τον ίδιο Κανονισμό, **αγωνιστικό ποδήλατο** ορίζεται αυτό με τιμόνι πολλών λαβών ώστε να επιτρέπει αεροδυναμική στάση στον αναβάτη, σύστημα μετάδοσης κίνησης πολλών ταχυτήτων, λάστιχο με πλάτος μικρότερο των 28mm και βάρος πλήρους συναρμολογημένου ποδηλάτου έως 12Kg. Συμπληρωματικές προδιαγραφές δίνονται από τον UCI (Διεθνές Σωματείο Δικυκλιστών) για ποδήλατα που συμμετέχουν σε επίσημες διοργανώσεις, αλλά ο γενικότερος ορισμός του Κανονισμού περιλαμβάνει και ποδήλατα που χρησιμοποιούνται γι' αναψυχή κι όχι μόνο ανταγωνιστικά.

Ο Κανονισμός αναπτύχθηκε κατόπιν πανευρωπαϊκής απαίτησης, και ως στόχο έχει την κατασκευή ποδηλάτων κατ' αυτόν προκειμένου αυτά να είναι κατά το δυνατόν κι εφικτόν ασφαλή. Οι δοκιμές που επιβάλλει έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την διασφάλιση της αντοχής και ανθεκτικότητας μεμονωμένων εξαρτημάτων αλλά και του ποδηλάτου ως σύνολο, απαιτώντας εξ ολοκλήρου υψηλή ποιότητα και σεβασμό των θεμάτων ασφαλείας από το στάδιο σχεδιασμού και πέρα. Το πνεύμα του Κανονισμού λοιπόν είναι περιορισμένο γενικά σε θέματα ασφαλείας και είναι μάλιστα διατυπωμένος συγκεκριμένα προς την αποφυγή τυποποίησης των εξαρτημάτων.

Κατά το γράμμα λοιπόν του EN14781, θα εξεταστεί το παρόν πρωτότυπο πλαίσιο αγωνιστικού ποδηλάτου, για να διαπιστωθεί η νομιμότητα και η ασφάλεια χρήσης του σχεδίου.

2. Αντίστροφος Σχεδιασμός του Προϊόντος

Το πρόβλημα

Το προϊόν του παρόντος θέματος, είναι ένα πρωτότυπο πλαίσιο ποδηλάτου και το κέντρο μίας διδακτορικής διατριβής του υποψήφιου διδάκτορα κ. Κιτσέλη στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, κατά την οποία εξετάζεται η εξ ολοκλήρου σχεδίαση κι υλοποίηση ενός πρωτότυπου αγωνιστικού ποδηλάτου δρόμου υψηλών προδιαγραφών.

Η μορφή του σκελετού δεν προήλθε με συμβατικές διαδικασίες ορθού σχεδιασμού με την βοήθεια λογισμικών CAD/CAE, αλλά αντ' αυτού έγιναν συνεχείς μελέτες στην αεροδυναμική σήραγγα της Σχολής μιας και πρωταρχικός στόχος του σχεδίου είναι η βέλτιστη αεροδυναμική του απόδοση.

Όταν η γεωμετρία οριστικοποιήθηκε, και κατόπιν βελτιστοποίησης μέσω πειραμάτων προς επιλογή κατάλληλων υφασμάτων ανθρακονήματος και των κατευθύνσεών τους, έμενε η επικύρωση του σχεδίου. Αυτή θα επιτυγχάνονταν με την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου στον Η/Υ και την εισαγωγή του σε κάποιο πρόγραμμα CAE για την εξομοίωση των ελέγχων που περιγράφονται στον Κανονισμό EN14781 περί αγωνιστικών ποδηλάτων και την επίλυση των προβλημάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφεται με χρονολογική σειρά η προσπάθεια του γράφοντος να ψηφιοποιήσει την γεωμετρία του πλαισίου με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια καθώς επίσης και τις εργασίες που απαιτήθηκαν για να προετοιμαστεί το μοντέλο για μελέτη μέσω FEM. Αρχικά έγιναν προσπάθειες δημιουργίας μοντέλου μόνο με την βοήθεια λογισμικού CAD και αναφορές που είτε δίνονταν είτε έπρεπε να μετρηθούν επάνω στο πρωτότυπο. Στην συνέχεια κρίθηκε απαραίτητη η τρισδιάστατη σάρωση του προϊόντος με ΜΜΣ αρθρωτού βραχίονα, στην άκρη του οποίου βρίσκεται laser scanner τριγωνοποίησης. Τ' αποτελέσματα της σάρωσης μας έδωσαν επιφάνειες ικανής ποιότητας και σωστής μορφής τύπου αρχείου για μετέπειτα εισαγωγή στο πακέτο λογισμικού CAE που είχαμε επιλέξει για να προχωρήσουμε στην επικύρωση του προϊόντος.

Παραμετρικός Σχεδιασμός

Αρχικά προμηθεύτηκα έναν πρωτότυπο πλαίσιο και σε διάστημα 2 περίπου εβδομάδων δοκίμασα με μετρήσεις και την βοήθεια υπαρχόντων γεωμετριών σε ηλεκτρονική μορφή να αναπαράξω το σχέδιο σε κάποιο πρόγραμμα CAD. Το εν λόγω λογισμικό επιλέχθηκε να είναι το σχεδιαστικό πακέτο Solidworks της εταιρείας Dassault Systèmes Solidworks Corp. (θυγατρική της Dassault Systèmes – εταιρείας που εισήγαγε το πανίσχυρο και σχεδόν industry-standard CATIA), κυρίως λόγω την μεγάλης φιλικότητας προς τον χρήστη και τα πολλά plugins που επιτρέπουν πολλές επιπρόσθετες λειτουργίες στο ίδιο περιβάλλον. Ο βασικότερος λόγος όλων όμως είναι η πολυετής προσωπική εμπειρία με την σουίτα, και η άμεση πρόσβαση σε ενσωματωμένο πακέτο CAE με ένα πολύ δυνατό pre-processor για σύνθετα υλικά.

Solidworks

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα είναι solid modeler με βάση το Parasolid και χρησιμοποιεί παραμετρική προσέγγιση με features προς δημιουργία εξαρτημάτων και συνόλων τους. Παράμετροι είναι οι περιορισμοί/προσδιορισμοί που δίδονται στις οντότητες του σχεδίου και τελικά καθορίζουν το σχήμα και την γεωμετρία του. Αυτές μπορεί να είναι αριθμητικές (διαστάσεις όπως μήκη, διαμέτροι, γωνίες κλπ) ή γεωμετρικές αναφορές και σχέσεις (δύο ή περισσότερες οντότητες ορίζονται παράλληλες, εφαπτομενικές, κάθετες, οριζόντιες και κατακόρυφες, ομόκεντρες ή ομοαξονικές κλπ). Επιπλέον αριθμητικές παράμετροι μπορούν να συσχετιστούν μέσω μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν (χωρίς να περιορίζονται σε) απλές μαθηματικές πράξεις, λογικές πράξεις (πχ if $D > 10$ then $E = 5$). Εν γένει το πρόγραμμα παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για να αποτυπωθεί ο στόχος του σχεδιαστή στο μοντέλο. Τα features με την σειρά τους είναι οι δομικές μονάδες των σχεδίων, σχήματα και λειτουργίες που συγκροτούν τα μοντέλα. Συνήθως έχουν ως βάση κάποιο 2-διάστατο σχέδιο (sketch) το οποίο αποτελείται από γεωμετρικές οντότητες όπως γραμμές, κωνικές τομές και splines. Τα sketches εν συνεχεία χρησιμοποιούνται ακολουθώντας μονοπάτια για την δημιουργία 3D γεωμετριών. Τα βασικότερα δομικά στοιχεία είναι τα extrudes, sweeps, revolves και lofts, ενώ υπάρχει πληθώρα άλλων εργαλείων για την δημιουργία οποιασδήποτε επιφανείας ή στερεού.

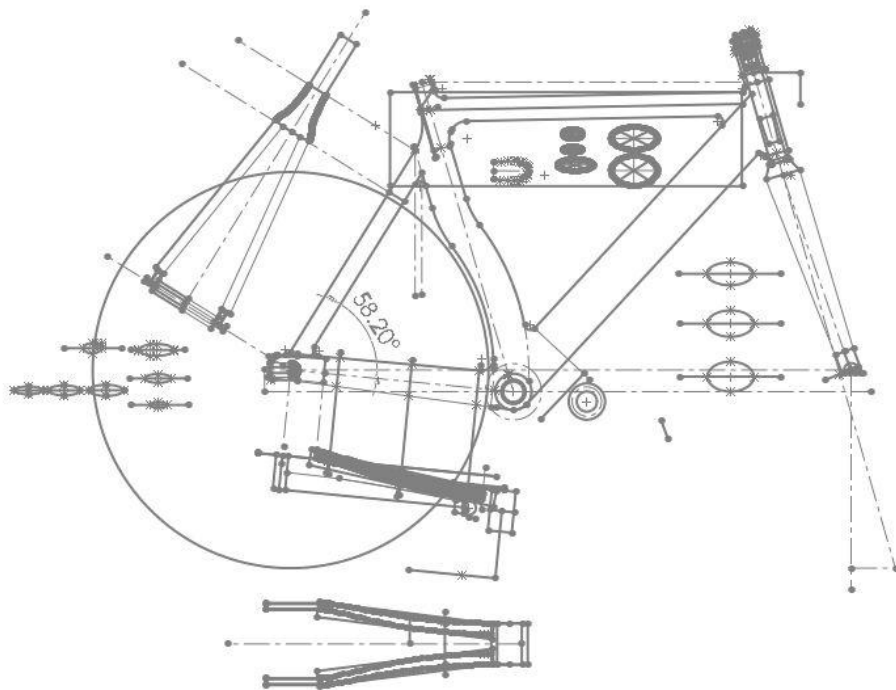
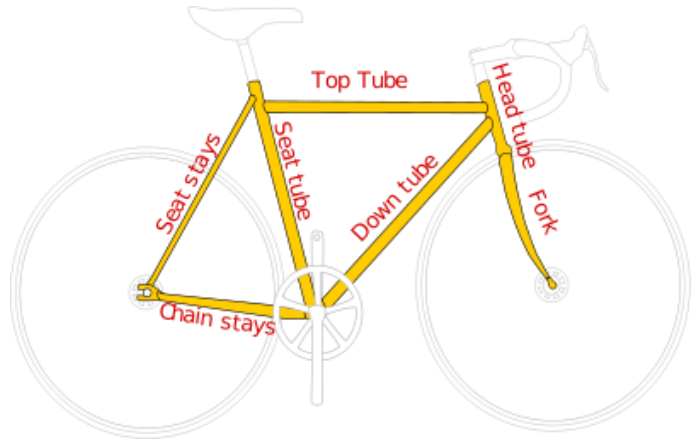
Η διαδικασία για την μεταφορά του πρωτοτύπου στο Η/Υ είχε ως εξής:

- Χωρισμός του πλαισίου σε μέρη που μπορούν να γίνουν αυτούσια features
- Απομόνωση των σχεδίων από το αρχικό συγκεντρωτικό ηλεκτρονικό σχεδιάγραμμα για τα αντίστοιχα features
- Δημιουργία των features και κατάλληλες γεωμετρικές ενώσεις τους, πιστές στο πρωτότυπο

Οι οργανικές γεωμετρίες των κυρίων τμημάτων του πλαισίου δεν παρουσίασαν σχεδόν καμία δυσκολία στην δημιουργία τους, μιας και υπήρχαν για όλα τα αντίστοιχα προφίλ και πληροφορίες για τις θέσεις τους. Πρόκληση αποτέλεσαν οι ενώσεις των κυρίων τμημάτων όπως θα φανεί κατά την περιγραφή της διαδικασίας.

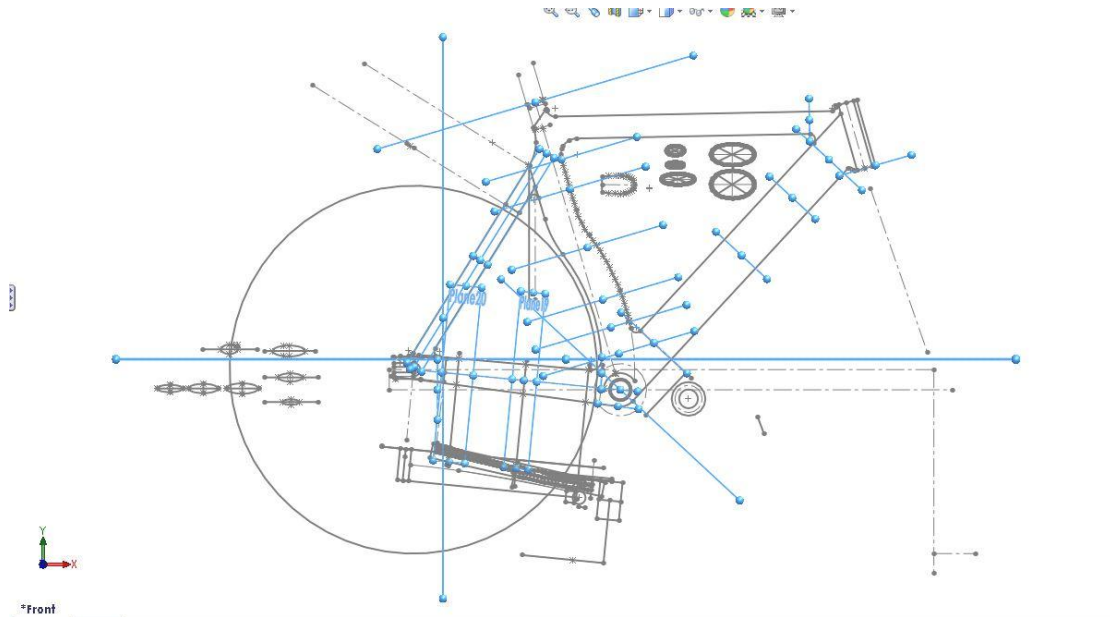
Τα διάφορα κομμάτια του πλαισίου ακολουθούν την εξής ονοματολογία:

- Chain Stays: τα μέρη το πίσω και κάτω πιρουνιού που ενώνει την μεσαία τριβή με τον πίσω άξονα και φιλοξενεί την μετάδοση ισχύος του ποδηλάτου
- Seat Stay: Το πίσω κι άνω πιρούνι που ενώνει το σημείο της σέλας και τον πίσω άξονα
- Seat Tube: Το μέρος στο οποίο εισάγεται η σέλα και το κοινό στοιχείο των εμπρός και πίσω τριγώνων που αποτελούν το πλαίσιο του ποδηλάτου
- Top Tube: Η άνω πλευρά του εμπρός τριγώνου του πλαισίου
- Down Tube: Η κάτω πλευρά του εμπρός τριγώνου του πλαισίου
- Head Tube: το 'κούτελο' του ποδηλάτου, ο σωλήνας στον οποίον τοποθετείται το πιρούνι του εμπρός τροχού και στον οποίο συναντώνται Top Tube και Down Tube



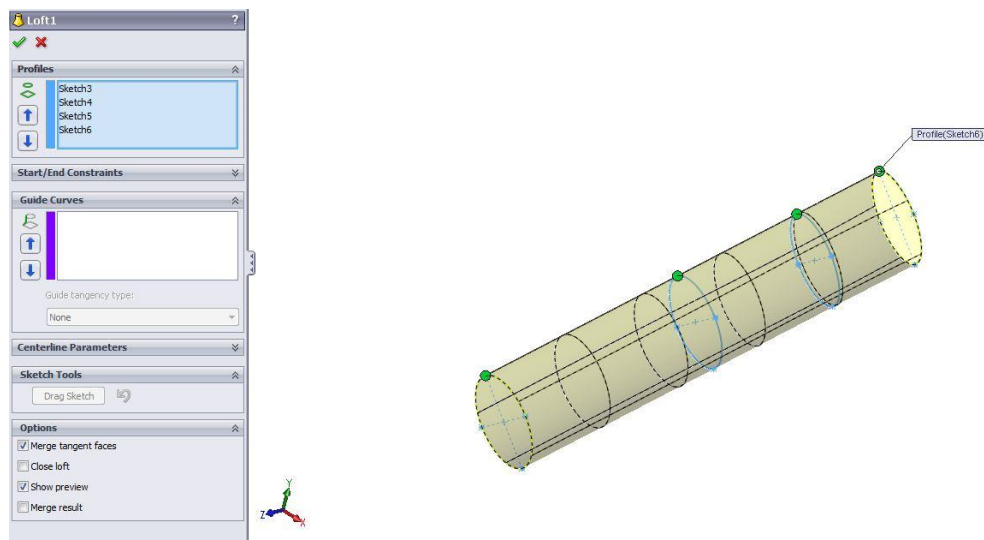
Εν αρχή ην το περίγραμμα του πλαισίου με πληροφορίες για τα προφίλ των διαφόρων τμημάτων. Από τούδε γνωστό ως Help Sketch

Θέτοντας την αρχή των αξόνων στο κέντρο της μεσαίας τριβής, άρχισαν να προστίθενται τα επίπεδα των κεντρικών γραμμών για τα stays καθώς επίσης και τα επίπεδα στα οποία θα βρίσκονται τα προφίλ των διαφόρων τμημάτων.

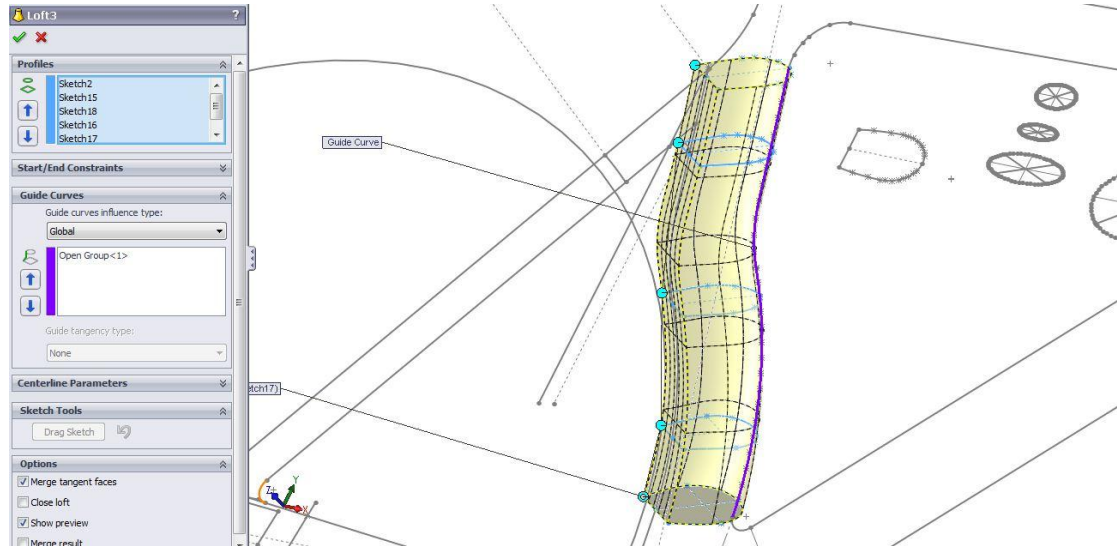


Μετά στα τμήματα με μεταβλητές γεωμετρίας άρχισαν να προστίθενται προφίλ σε αποστάσεις που έδιναν επαρκή ανάλυση και κατά συνέπεια πιστότητα της δημιουργούμενης γεωμετρίας στο πρωτότυπο.

Το Down Tube αποτελείται βασικά από ελλείψεις που μειώνονται συνεχώς σε μέγεθος από την μεσαία τριβή προς το Head Tube. Το αρχικό συγκεντρωτικό σχεδιάγραμμα προσφέρει πληροφορίες για 4 προφίλ, συμπεριλαμβανομένων και των θέσεών τους στην ευθεία που τα συνδέει. Αφού είχαν ήδη τοποθετηθεί για κάθε προφίλ το αντίστοιχο επίπεδο στην σωστή του θέση βάσει του αρχικού Help Sketch, σχεδιάστηκαν τα προφίλ και στην συνέχεια ενώθηκαν με ένα loft feature.

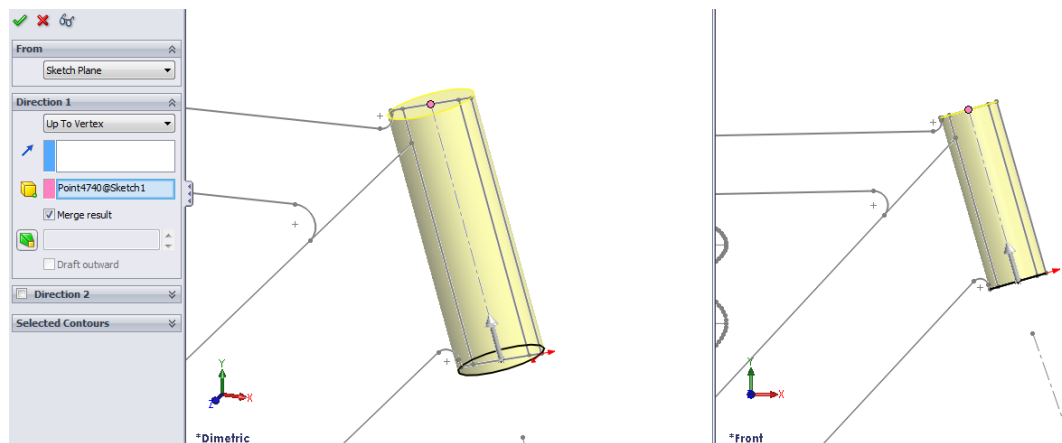


Όμοια εργαζόμαστε και για τα προφίλ που θα μας δώσουν το Seat Tube. Επιπλέον όμως αυτών, απαιτείται και μία οδηγός καμπύλη για να σχηματιστεί όπως επιθυμούμε το loft feature. Το εργαλείο Selection Manager του Solidworks μας επιτρέπει να επιλέξουμε μεμονωμένες οντότητες από sketches κι έτσι δεν χρειάζεται να μεταφέρουμε σε καινούριο sketch την spline που λειτουργεί ως οδηγός, αλλά αρκεί απλά να την επιλέξουμε από το Help Sketch.

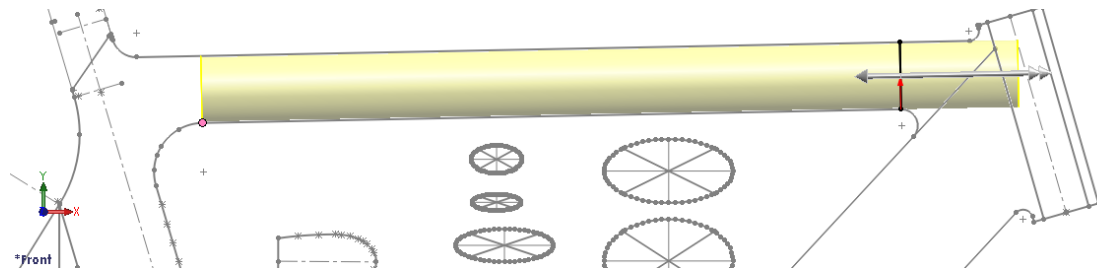


Τα υπόλοιπα κομμάτια που ολοκληρώνουν το εμπρός τρίγωνο του πλαισίου, είναι πολύ απλούστερα, μιας και πρόκειται για απλούς σωλήνες που επεκτείνονται κάθετα στο επίπεδο των αντίστοιχων προφίλ τους.

Αρχικά γίνεται το Head Tube για να δράσει ως αναφορά για το Seat Tube, και για την σωστή μεταξύ τους σύνδεση.

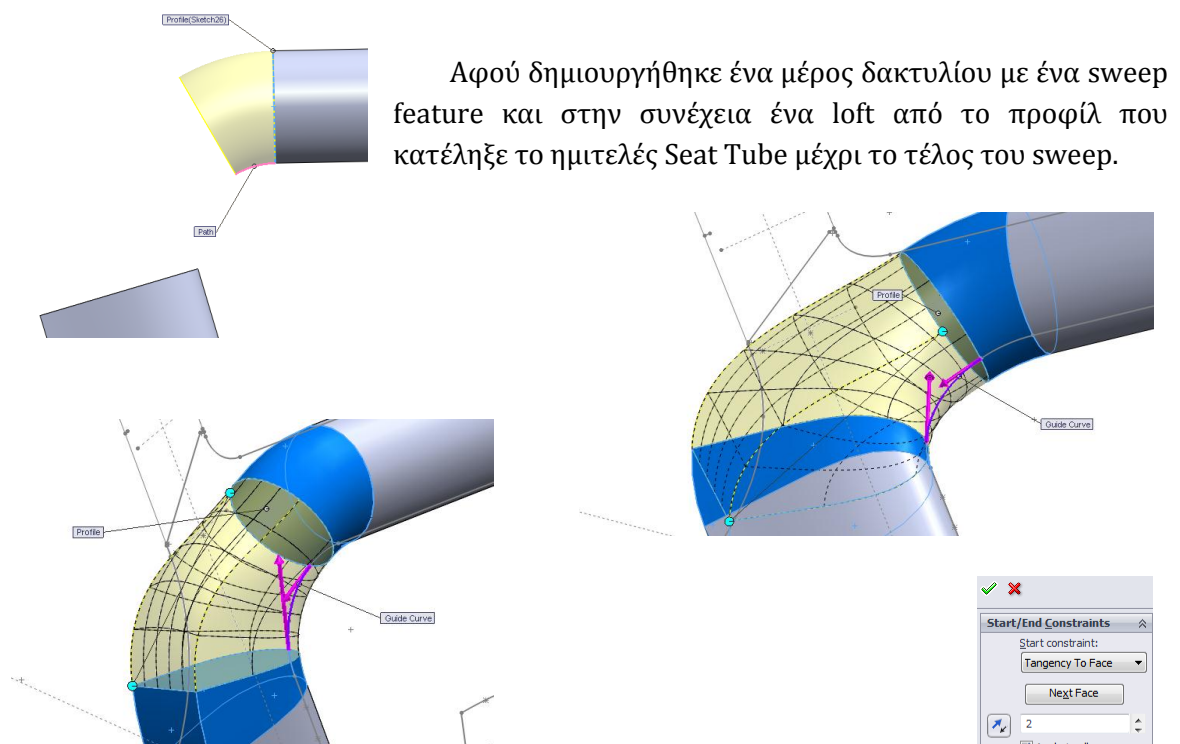


Στην συνέχεια τοποθετείται σε τυχαία θέση του Top Tube το προφίλ του, και κατόπιν δημιουργείται το Extrude feature ως εξής:



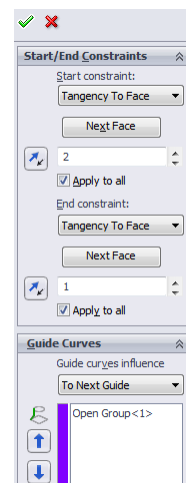
Παρατηρήστε πως το μπροστά άκρο του σωλήνα καταλήγει μέσα στο Head Tube. Η μεγαλύτερη διάμετρος του Heat Tube επιτρέπει στο Top Tube να καταλήγει εκεί. Μιας και όλες οι γεωμετρίες του μοντέλου είναι στερεά σώματα, το πρόγραμμα ενώνει Head με Top και τα θεωρεί ένα σώμα. Το πίσω τέλος παραμένει λίγο πριν το Seat Tube, μιας και στο πάνω μέρος του το Seat Tube είναι στενότερο του Top και θα πρέπει να κατασκευαστεί κατάλληλη ένωση.

Η ένωση δημιουργήθηκε με τα εξής βήματα:

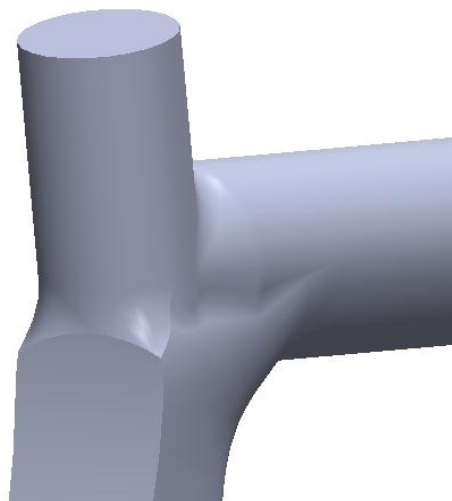
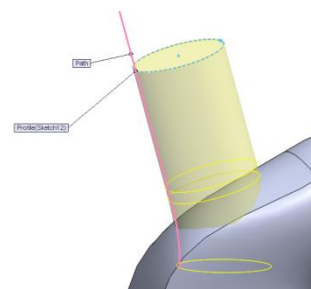


Αφού δημιουργήθηκε ένα μέρος δακτυλίου με ένα sweep feature και στην συνέχεια ένα loft από το προφίλ που κατέληξε το ημιτελές Seat Tube μέχρι το τέλος του sweep.

Για την σωστή κατασκευή απαιτήθηκε κατά το loft από το λογισμικό να παραμείνει το feature εφαπτομενικό προς τις προσκείμενες στα προφίλ επιφάνειες. Ο βαθμός στον οποίο εφαπτομενική ιδιότητα ορίζεται με μία αριθμητική τιμή στο παράθυρο διαλόγου δημιουργίας του loft.



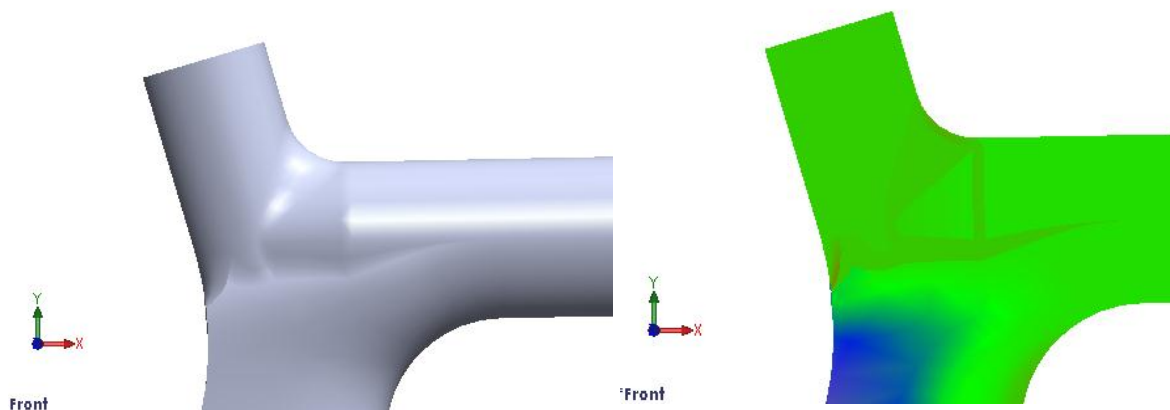
Στην συνέχεια δημιουργείται ένα καινούριο sweep κι εμφανίζεται ο σωλήνας στον οποίον μπαίνει το στέλεχος της σέλας. Τέλος το μόνο που μένει είναι να σβηστεί μοντέλο που περισσεύει, να γεμίσουν κενά και να εξαφανιστούν γωνίες με το εργαλείο Fillet.



Το fillet εφαρμόζεται σε μία ή περισσότερες ακμές του μοντέλου, αντικαθιστώντας τις με καμπύλα τμήματα των οποίων τα άκρα εφάπτονται στα πρόσωπα του μοντέλου που σχημάτισαν την αρχική ακμή.



Το τελικό αποτέλεσμα αρχίζει και κάνει φανερά τα προβλήματα της συγκεκριμένης μεθόδου:



Το διάγραμμα δεξιά δείχνει τις διακυμάνσεις στην καμπυλότητα¹ του τρισδιάστατου μοντέλου.

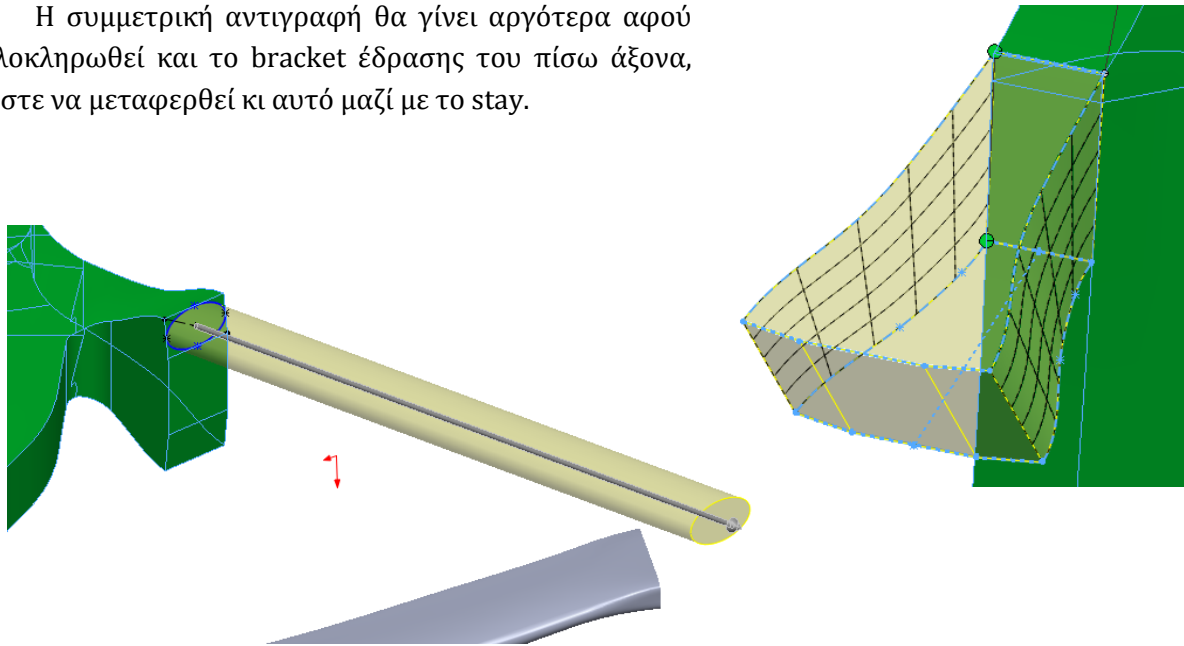
Οι διακυμάνσεις στην καμπυλότητα δεν είναι το πρόβλημα, μιας και είναι αναμενόμενο αυτή ν' αλλάζει, αλλά οι εμφανέστατες ασυνέχειες είναι αυτές που προβληματίζουν μιας και δεν

¹ Ως καμπυλότητα ορίζεται ο αντίστροφος αριθμός της ακτίνας κάποιας καμπύλης

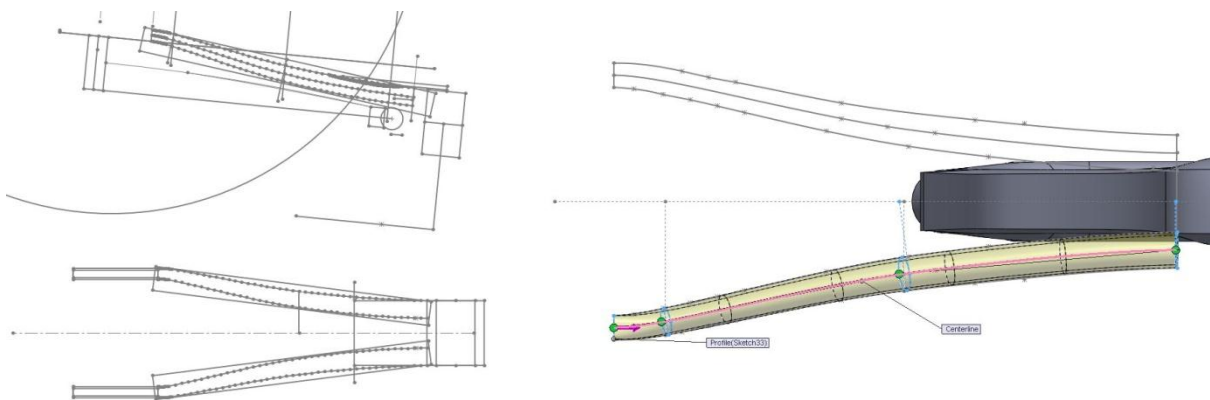
αντιπροσωπεύουν πιστά το προϊόν. Περισσότερα για το συγκεκριμένο πρόβλημα παρακάτω στο ίδιο κεφάλαιο μιας και εμφανίζεται ξανά σε εντονότερο βαθμό.

Έχοντας ολοκληρώσει το εμπρός τριγώνου, προχωράμε για την δημιουργία των Seat Stays. Αρχικά ένα loft δημιουργεί την βάση των 2 stays και στην συνέχεια ένα απλό extrude αρκεί για την δημιουργία του ενός εκ των δύο.

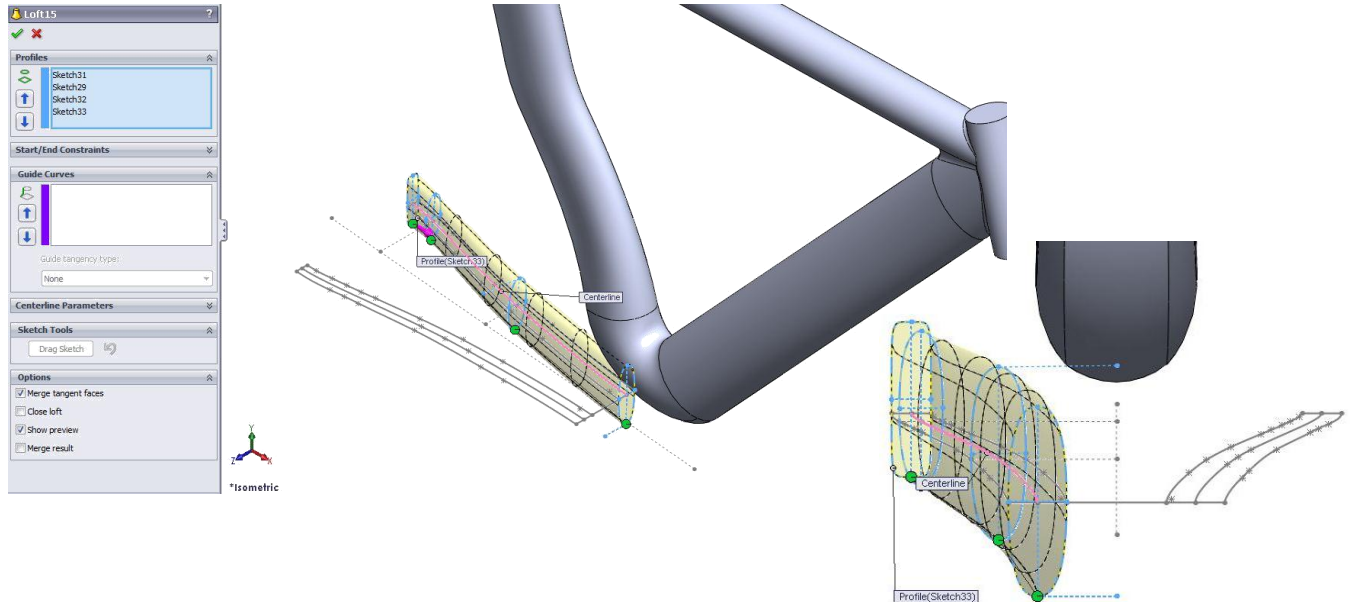
Η συμμετρική αντιγραφή θα γίνει αργότερα αφού ολοκληρωθεί και το bracket έδρασης του πίσω άξονα, ώστε να μεταφερθεί κι αυτό μαζί με το stay.



Το περίγραμμα των chain stays δίδονταν ως σύνολο σημείων. Από αυτά δημιουργήθηκαν splines που έδιναν ομαλό αποτέλεσμα χωρίς συμβιβασμό στην πιστότητα και εν συνεχεία λειτούργησαν ως οδηγοί (guide curves) για το loft feature που παρήγαγε την τελική γεωμετρία. Εκτός των οδηγών του περιγράμματος, χρησιμοποιήθηκε και κεντρική γραμμή, για να εξασφαλιστεί η σωστή θέση στον χώρο κάθε ενδιάμεσου προφίλ του loft.



Η κεντρική γραμμή εξασφαλίζει ότι η γεωμετρία που δημιουργείται ουσιαστικά ενώνοντας άπειρα προφίλ, θα έχει αυτά τα προφίλ πάντα κάθετα στην κεντρική γραμμή, δίνοντας στον σχεδιαστή ένα ακόμα εργαλείο ελέγχου σε ένα χαρακτηριστικό που είναι εν γένει δύσκολο να σχηματιστεί ντετερμινιστικά, αλλά αποτελεί περισσότερο free-hand σχεδιαστικό εργαλείο.

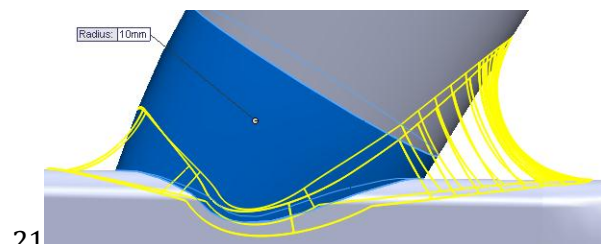
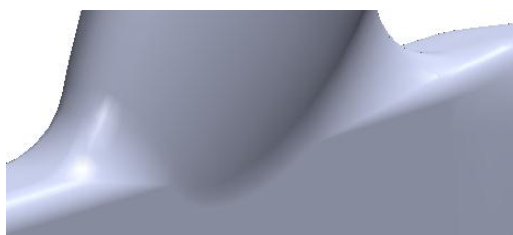


Τελικά έμεινε το bracket που φιλοξενεί τον πίσω άξονα για το οποίο ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Για αρχή δημιουργείται ένα sweep με βάση το προφίλ το τελευταίο προφίλ του loft που δημιούργησε το chain stay. Στην συνέχεια ένα ακόμα loft από το τέλος του stay seat μέχρι το ίδιο προφίλ μέσα στο chain stay για να γίνει η ένωση.

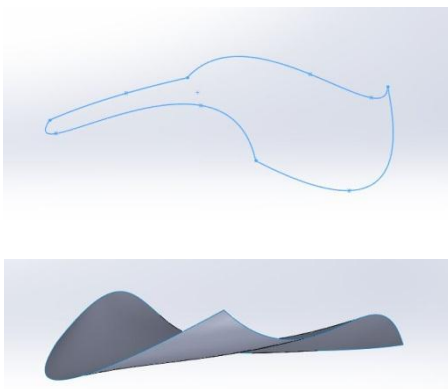
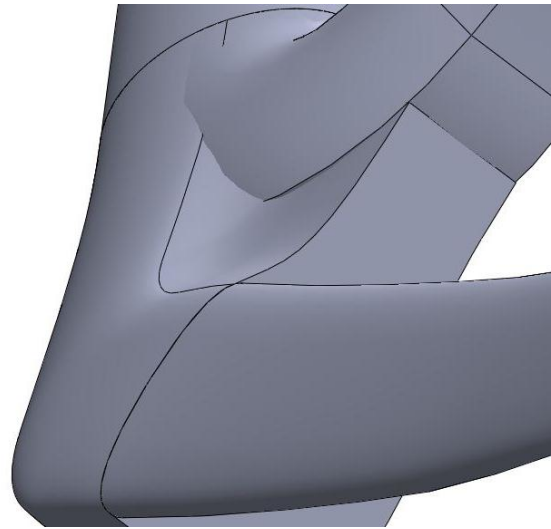


Τέλος εφαρμόζεται ένα fillet σταθερής ακτίνας 10mm για να εξασφαλιστεί η ομαλή σύνδεση μεταξύ των stays.



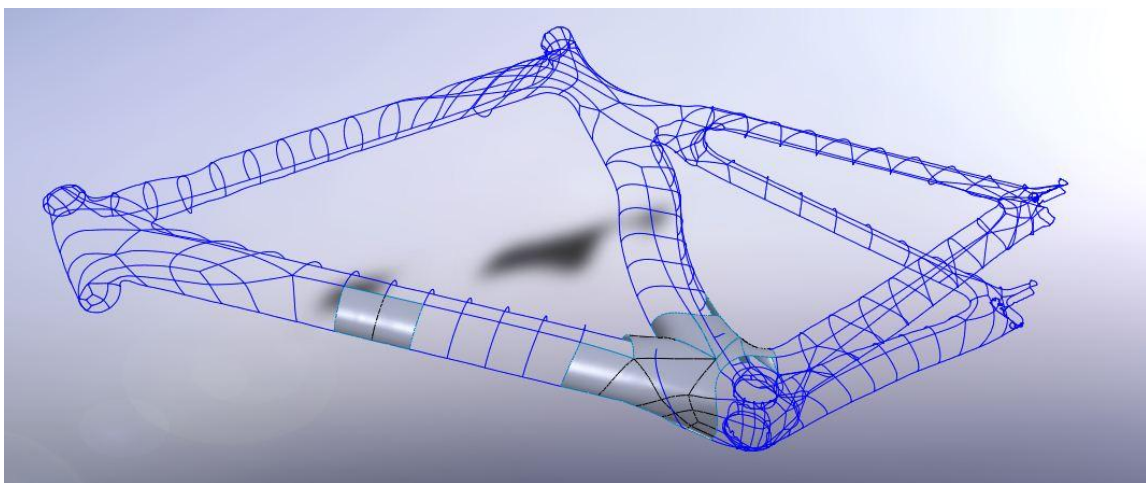
Από την στιγμή που δημιουργήθηκαν τα μεμονωμένα τμήματα του πλαισίου, το μόνο που έμενε ήταν η σωστή ένωσή τους. Κι εδώ εμφανίστηκε το πρόβλημα που τελικά υπαγόρευσε την ανάγκη μετάβασης σε ψηφιοποίηση του πλαισίου με άλλο τρόπο.

Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι κατ' ουσίαν ένα γλυπτό, και λόγω του τρόπου κατασκευής του αλλά και γιατί οι αεροδυναμικές απαιτήσεις δεν επιτρέπουν την ύπαρξη απλών γεωμετριών σύνδεσης ανάμεσα στους σωλήνες, όπως για παράδειγμα σε συγκολλητές μεταλλικές κατασκευές ποδηλάτων χαμηλότερων προδιαγραφών.



Τέτοιου είδους γεωμετρίες είναι δυνατό να γίνουν με τα εργαλεία που δίνει το Solidworks, δουλεύοντας με 3D επιφάνειες οι οποίες δημιουργούνται φτιάχνοντας σύνορα και γεμίζοντάς τα με patches.

Για να χρησιμοποιηθούν τέτοιες πρακτικές όμως, απαιτείται υψηλή ακρίβεια στις 3διάστατες καμπύλες που ορίζουν τα patches προκειμένου το μοντέλο να παραμείνει πιστό στο πρωτότυπο. Ως εκ τούτου, οι όποιες απόπειρες απέβησαν άκαρπες και τελικά το σχέδιο αν κι έφτασε αρκετά μακριά, εγκαταλείφθηκε για να αντικατασταθεί με το προϊόν μίας διαδικασίας που θα μπορούσε να δώσει απaráμιλλη πιστότητα.



3D Scanning

Το 3D scanning είναι μία διαδικασία κατά την οποία αναλύεται με κατάλληλο εξοπλισμό ένα αντικείμενο ή περιβάλλον, και συγκεντρώνονται δεδομένα σχετικά με το σχήμα του. Τα δεδομένα αυτά εν συνεχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συγκρότηση 3διάστατων μοντέλων.

Υπάρχουν 2 βασικές κατηγορίες μηχανημάτων που πραγματοποιούν 3διάστατες σαρώσεις, οι **επαφής** και οι **ενεργές μη-επαφής**.

- Οι σαρωτές επαφής εξετάζουν το αντικείμενο μέσω επαφής, ενώ αυτό ηρεμεί σε μία επίπεδη πλάκα ακριβείας, τροχισμένη και γυαλισμένη έως συγκεκριμένο μέγιστο επιφανειακής τραχύτητας. Όταν το αντικείμενο δεν είναι επίπεδο ή δεν μπορεί να ηρεμήσει σταθερά σε επίπεδη επιφάνεια, χρησιμοποιούνται κατάλληλες στηρίξεις. Τέτοιοι σαρωτές είναι 3 μορφών:
 - Σύστημα με άκαμπτους βραχίονες που διατηρούνται κάθετοι μεταξύ τους και κάθε άξονας γλιστράει σε έναν διάδρομο. Τέτοια συστήματα δουλεύουν καλύτερα για αντικείμενα μ' επίπεδες επιφάνειες ή και απλές κυρτές καμπύλες επιφάνειες.
 - Αρθρωτός βραχίονας με άκαμπτα μέρη και αισθητήρες γωνίας υψηλής ακρίβειας. Η θέση του τέλους του βραχίονα προσδιορίζεται με περίπλοκες μαθηματικές σχέσεις που υπολογίζουν γωνίες στροφής των αρθρώσεων. Ιδανικό σύστημα για εξέταση γεωμετριών μέσα σε κοιλότητες.
 - Ένας συνδυασμός των παραπάνω συστημάτων, για την χαρτογράφηση μεγάλων αντικειμένων με εσωτερικές κοιλότητες κι επικαλυπτόμενες επιφάνειες.

Τέτοιου τύπου μηχανές χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στην βιομηχανία και είναι εξαιρετικά ακριβείς. Το μεγάλο μειονέκτημά τους παρά ταύτα είναι ότι απαιτείται να βρίσκονται σ' επαφή με το αντικείμενο προς ανάλυση. Πολλές φορές αυτό οδηγεί σε αλλοίωση ή ζημιά του αντικειμένου, ενδεχόμενο το οποίο πολλές φορές είναι απαράδεκτο, μιας και μία σημαντική εφαρμογή της τρισδιάστατης σάρωσης είναι η ψηφιοποίηση αρχαιολογικών ευρημάτων κι έργων τέχνης. Δεύτερο μειονέκτημα των CMM είναι και το γεγονός ότι απαιτούν χειροκίνητη σάρωση σημείο προς σημείο, κάνοντάς τες εξαιρετικά αντι-αποδοτικές για οργανικές επιφάνειες, σχετικά πάντα με άλλες μεθόδους τρισδιάστατης σάρωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός ότι η φυσική κίνηση του βραχίονα και η τοποθέτηση της ακίδας-probe ακόμα και στις γρηγορότερες μηχανές κινείται στην τάξη μερικών εκατοντάδων Hz, ενώ μέθοδοι όπως η σάρωση με laser μπορεί να συλλέγει σημεία με ρυθμό που κινείται στην περιοχή 10 έως 500kHz.

- Οι ενεργές μέθοδοι μη-επαφής λειτουργούν με την εκπομπή κάποιας ακτινοβολίας (όπως ακτίνες X, υπέρηχοι, φως κ.ά) και ανίχνευσης της ανάκλασής της προκειμένου να εξεταστεί το εν λόγω αντικείμενο ή περιβάλλον.
 - Σαρωτές τύπου time-of-flight, που μετράνε τον χρόνο ταξιδιού του φωτός που εκπέμπουν. Μετρώντας το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην εκπομπή και την ανίχνευση, κι έχοντας ως δεδομένη την ταχύτητα του φωτός c είναι εφικτό να υπολογιστεί η απόσταση ανάμεσα στον πομπό και κάθε σημείο του αντικειμένου. Όταν ο χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα στην εκπομπή και την ανίχνευση μετρηθεί

ίσος με t , τότε η απόσταση του πομπού από το σημείο προς μέτρηση θα είναι ίση με $ct/2$. Η ακρίβεια του σαρωτή αυτού εξαρτάται προφανώς από την ακρίβεια μέτρησης του χρόνου μιας και 1 χιλιοστό απόστασης διανύεται από το φως σε περίπου 3.3 picosec (3.3×10^{-12}). Ο ανιχνευτής της δέσμης laser μπορεί να ανιχνεύσει την απόσταση ενός σημείου προς την κατεύθυνσή του. Γι' αυτό, ένας τέτοιος σαρωτής, σαρώνει όλο το πεδίο όρασής του σημείο-σημείο αλλάζοντας την κατεύθυνση του ανιχνευτή για να βρει καινούρια σημεία. Η αλλαγή επιτυγχάνεται είτε περιστρέφοντας τον ανιχνευτή, είτε χρησιμοποιώντας κάτοπτρα – ο δεύτερος τρόπος είναι πολύ ελαφρύτερος και άρα μπορεί να προσφέρει την αλλαγή πολύ γρηγορότερα και με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Τυπικοί τρισδιάστατοι σαρωτές τέτοιου τύπου μπορούν να μετρήσουν 10 με 100 χιλιάδες σημείο κάθε δευτερόλεπτο.

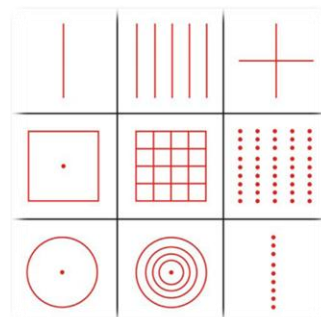
- ο Ακόλουθα υπάρχουν και οι σαρωτές τριγωνοποίησης, οι οποίοι επίσης χρησιμοποιούν το φως από laser για να ανιχνεύσουν και να εξετάσουν το περιβάλλον τους. Αντίστοιχα με τον προηγούμενο τύπο, οι σαρωτές τριγωνοποίησης εκπέμπουν μία δέσμη laser στο αντικείμενο προς εξέταση και χρησιμοποιούν μία κάμερα με την οποία ανιχνεύουν πως εμφανίζεται η τελεία της δέσμης σε διάφορα σημεία του πεδίου οράσεως της κάμερας. Η τεχνική αυτή λέγεται τριγωνοποίηση γιατί πολύ απλά η τελεία του laser πάνω στο αντικείμενο, ο πομπός και η κάμερα σχηματίζουν ένα τρίγωνο. Έχοντας ως δεδομένη την απόσταση ανάμεσα στην κάμερα και τον πομπό laser, έχουμε το μήκος της μίας πλευράς. Το μέγεθος της γωνίας της κορυφής στην οποία βρίσκεται ο πομπός είναι επίσης γνωστό και ζητείται το αντίστοιχο μέγεθος για την κάμερα, το οποίο προσδιορίζεται από την θέση της τελείας του laser στο πεδίο όρασης της κάμερα. Αυτές οι τρεις πληροφορίες προσδιορίζουν ολοκληρωτικά το σχήμα και το μέγεθος των τριγώνων και δίνουν την θέση της τελείας του laser στον χώρο για κάθε ένα απ' αυτά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αντί για μία μόνο τελεία, χρησιμοποιείται μία λωρίδα laser προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία.

Το πλεονέκτημα της πρώτης μεθόδου είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, της τάξεως ακόμα και χιλιομέτρων. Τέτοιοι σαρωτές λοιπόν, είναι ιδανικοί για την σάρωση κτηρίων ή γεωγραφικών χαρακτηριστικών. Από την άλλη, η ακρίβειά τους αποτελεί μειονέκτημα, μιας και λόγω της τεράστιας ταχύτητας του φωτός, η χρονομέτρηση του ταξιδιού από τον πομπό έως και τον δέκτη είναι εξαιρετικά δύσκολη κι ως εκ τούτου, η μέτρηση αποβαίνει σχετικά ακριβής μόνο για μεγάλες αποστάσεις, αφού είναι της τάξεως των χιλιοστών. Από την άλλη οι σαρωτές τριγωνοποίησης έχουν ακριβώς συμπληρωματικά χαρακτηριστικά. Έχουν εξαιρετικά περιορισμένη ακτίνα σάρωσης – μόλις μερικά μέτρα, αλλά μπορούν και μετρούν με τεράστια ακρίβεια η οποία μπορεί να φτάσει την τάξη δεκάτου του μικρομέτρου.

Αρχές Σαρωτών Τριγωνοποίησης

Οι σαρωτές αντικειμένων που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως σε αποστάσεις μικρότερες των δέκα μέτρων και θα μπορούσαμε να τους κατατάξουμε σε κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούν. Έτσι σε σαρωτές με έναν αισθητήρα εικόνας υπάρχει μια πηγή που προβάλλει την ακτίνα λέιζερ σε μια συγκεκριμένη και μεταβαλλόμενη προς την επιφάνεια του αντικείμενου γωνία. Ένας αισθητήρας εικόνας CCD ή CMOS βρίσκεται στην άλλη άκρη της βάσης του συστήματος και αναλαμβάνει τον εντοπισμό του σημείου ή της περιοχής που περιγράφει η ακτίνα λέιζερ καθώς ανακλάται στην επιφάνεια του αντικείμενου.

Η προβολή της ακτίνας μπορεί να σχηματίζει απλά ένα φωτεινό σημείο, μια γραμμή, ένα μοτίβο από ρίγες ή ακόμα και ένα στατικό τυχαίο πλέγμα. Η τρισδιάστατη θέση της επιφάνειας του αντικείμενου που αντανακλά την ακτίνα μπορεί να βρεθεί από το ιδεατό τρίγωνο που δημιουργείται. Η ακρίβεια μέτρησης βάθους μειώνεται ανάλογα με την απόσταση ανάμεσα στο σαρωτή και το αντικείμενο.

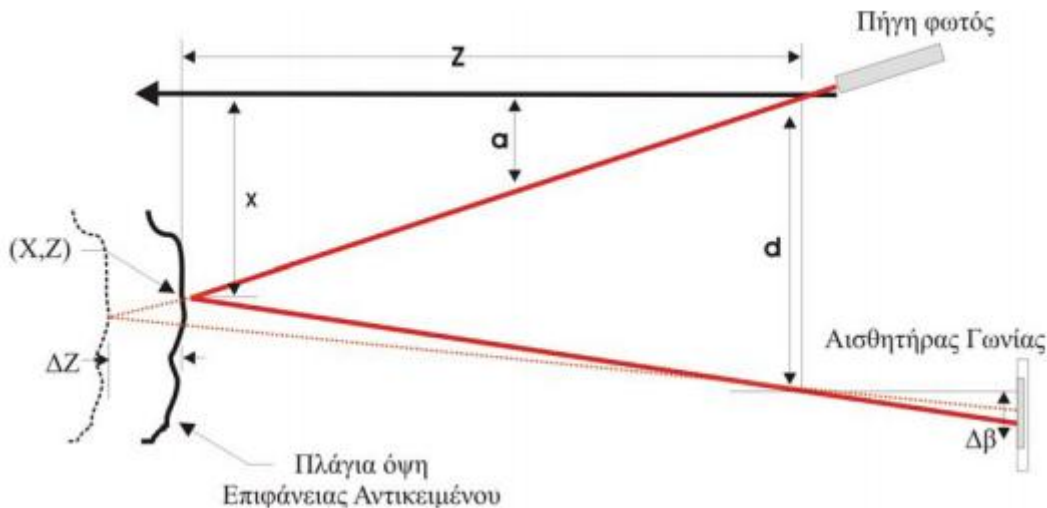


Για πρακτικούς λόγους, η απόσταση ανάμεσα στους οπτικούς αισθητήρες και στην πηγή της ακτίνας λέιζερ δεν μπορεί να μεταβάλλεται ανεξέλεγκτα. Η χρήση δύο οπτικών αισθητήρων αποτελεί μια παραλλαγή της αρχικής ιδέας τριγωνοποίησης. Οι αισθητήρες βρίσκονται στα δύο άκρα της βάσης του σαρωτή. Το σημείο αντανάκλασης της ακτίνας λέιζερ γίνεται αντιληπτό και από τους δύο αισθητήρες. Η γεωμετρική λύση είναι ίδια με αυτήν του ενός αισθητήρα άρα και τα αποτελέσματα έχουν την ίδια ακρίβεια. Ο δεύτερος αισθητήρας χρησιμοποιείται για την γρηγορότερη σάρωση αφού η πολυμορφία της επιφάνειας των αντικειμένων προκαλεί συχνά την αδυναμία του ενός αισθητήρα να φτάσει σε κάποια σημεία που την ίδια στιγμή μπορεί να είναι εμφανή στο δεύτερο αισθητήρα λόγω της διαφορετικής του θέσης και γωνίας.

Η οπτική τριγωνοποίηση είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται για περισσότερο από είκοσι χρόνια για την μέτρηση αποστάσεων. Τα τελευταία χρόνια όμως η ανάπτυξη γεωμετρικά σταθερών αισθητήρων και διόδων φωτός βελτίωσε κατά πολύ την ακρίβεια και την ταχύτητα της εν λόγω τεχνικής. Η ποικιλία στους σαρωτές τριγωνοποίησης βασίζεται κυρίως στις παρακάτω παραμέτρους:

- δομή του φωτισμού (απλό σημείο, ακτίνα λέιζερ, πολλαπλός πίνακας σημείων ή πολλαπλές δέσμες ακτινών),
- μορφή του αισθητήρα (γραμμικός πίνακας ή πλέγμα CCD ή CMOS)
- μέθοδο σάρωσης (μετακίνηση του αντικείμενου μπροστά από την πηγή φωτός ή μετακίνηση
- του ίδιου του συστήματος γύρω από το αντικείμενο).

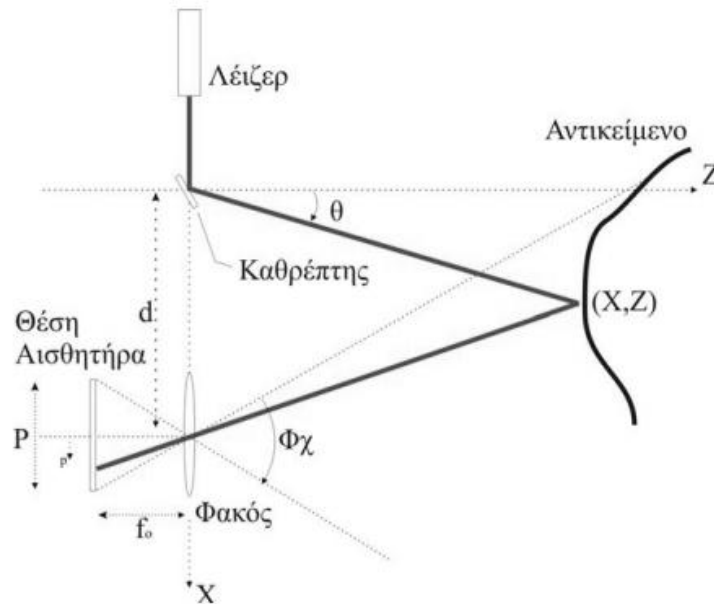
Το πρόβλημα της τριγωνοποίησης εξηγείται σε δύο διαστάσεις στην παρακάτω φωτογραφία. Η θέση του κέντρου του παλμού της δέσμης φωτός που αντανακλάται στην επιφάνεια αποτυπώνεται πάνω στον αισθητήρα εικόνας. Ο σαρωτής με την σειρά του υπολογίζει τη νοητή γραμμή που τέμνει τη δέσμη σε ένα ακριβώς σημείο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάκτηση του βάθους. Το τρισδιάστατο σχήμα του αντικειμένου προκύπτει από την μετακίνηση και περιστροφή του αντικείμενου μπροστά από την σταθερή ακτίνα που προβάλλει ο σαρωτής.



Υπάρχει επίσης και η παραλλαγή της μεθόδου όπου η σάρωση του αντικείμενου πραγματοποιείται με την ακτίνα λέιζερ να μετακινείται γύρω από το αντικείμενο. Η ακρίβεια της οπτικής τριγωνοποίησης βασίζεται στην ικανότητα εντοπισμού του κέντρου του παλμού της δέσμης σε κάθε χρονική στιγμή. Σε συστήματα οπτικής τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων, όπου το βάθος υπολογίζεται από έναν και μόνο παλμό φωτός, παράγεται ένα καθορισμένο εύρος σφαλμάτων. Τα σφάλματα αυτά εμφανίζονται λόγω της αντανάκλασης της δέσμης στην επιφάνεια του αντικείμενου αλλά και εξαιτίας των χαρακτηριστικών της ίδιας της επιφάνειας.

Η βασική γεωμετρική αρχή των συστημάτων τριγωνοποίησης περιγράφεται στην παραπάνω εικόνα. Γνωρίζοντας τις δύο γωνίες (α και $\Delta\beta$) ενός τριγώνου που είναι πάντα σχετικές με τη βάση του (d) τότε όλα τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις του τριγώνου μπορούν να ορισθούν πλήρως. Σε κάθε αλλαγή της απόστασης ΔZ , μπορεί να υπολογιστεί η γωνία $\Delta\beta$ με το θεώρημα των αντίθετων γωνιών, θεωρώντας ότι το α είναι πάντα σταθερό. Ο αισθητήρας γωνίας είναι σταθερός. Για τον υπολογισμό της θέσης της επιφάνειας του αντικείμενου απαιτείται η σάρωση της κάθε δισδιάστατης εικόνας που αποτυπώνει ο οπτικός αισθητήρας, ώστε να βρεθεί το σημείο με την μέγιστη συγκέντρωση φωτός. Η διάταξη που παρουσιάζεται είναι γνωστή ως *σύστημα μονού σημείου ακτίνας λέιζερ*.

Στην διάταξη της επόμενης εικόνας η ακτίνα φωτός αντανακλάται από έναν καθρέφτη και προβάλλεται στη συνέχεια μέσω αυτού πάνω στην επιφάνεια του αντικείμενου. Το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα φακό και ένα αισθητήριο το οποίο αποτυπώνει ψηφιακά την θέση της δέσμης φωτός πάνω στο αντικείμενο.



Με απλή τριγωνομετρία, οι συντεταγμένες (x, z) του φωτιζόμενου σημείου μπορούν να υπολογιστούν. Οι υπολογισμοί γίνονται ως εξής:

$$z = \frac{df_0}{p+f_0 \tan \theta} \quad \text{και} \quad x = \tan \theta$$

- p είναι η θέση του σημείου του αντικειμένου, όπως παρουσιάζεται πάνω στον αισθητήρα
- θ είναι η γωνία απόκλισης της ακτίνας λέιζερ
- d είναι η απόσταση ανάμεσα στον φακό και την πηγή της ακτίνας
- f_0 είναι η απόσταση ανάμεσα στον αισθητήρα και το φακό.

Οι περιορισμοί της μεθόδου τριγωνοποίησης μπορούν να αποδειχθούν αν προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε την απόκλιση σφάλματος στον άξονα z , ορίζοντας το σ_z ως μια συνάρτηση του p .

Ο νόμος διάδοσης των σφαλμάτων είναι:

$$\sigma_z \approx \frac{z^2}{f_0 d} \sigma_p$$

όπου σ_p η τυπική απόκλιση σφαλμάτων για κάθε μέτρηση του σημείου p .

Ως εκ τούτου, η τυπική απόκλιση εκφράζει την απροσδιοριστία του z που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την βάση της κάμερας και την εστιακή απόσταση του φακού. Το μέγεθος της παραμέτρου d περιορίζεται κυρίως από:

- τα κατασκευαστικά στοιχεία των οπτικών τμημάτων του συστήματος (η σταθερότητα του όλου συστήματος μειώνεται όσο το d αυξάνεται)
- τις σκιές που δημιουργούνται (προβλήματα αυτό-απόφραξης με την αύξηση του d)
- Το πεδίο όρασης Φ_χ δίνεται από τον τύπο:

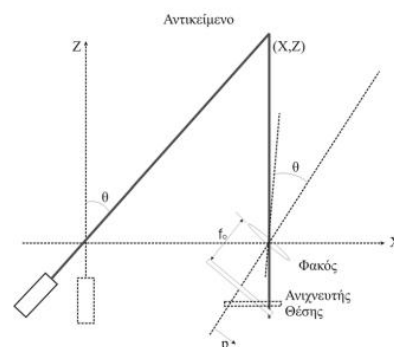
$$\Phi_\chi = 2 \tan^{-1} \frac{P}{2f_0}$$

όπου P είναι το μήκος της απόστασης θέσης του αισθητήρα.

Συνεπώς, σε μια τυπική κατασκευή ενός συστήματος σάρωσης υπάρχει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην εστιακή απόσταση, στην απροσδιοριστία μέτρησης της τρίτης διάστασης και των σκιών που μπορεί να δημιουργηθούν. Ένας τρισδιάστατος σαρωτής που βασίζεται στην τριγωνοποίηση εμφανίζει συνήθως μια τυπική απόκλιση (σ_z) της τάξης των 50 – 150 μm .

Ο Rioux παρουσίασε μια καινοτόμο προσέγγιση στην σάρωση με τριγωνοποίηση. Προτείνει ένα συγχρονισμένο σύστημα που μπορεί να σαρώσει σε πολύ μεγάλες εστιακές αποστάσεις με πολύ μικρές γωνίες τριγωνοποίησης χωρίς να τίθεται θέμα συμβιβασμού στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με μικρές γωνίες τριγωνοποίησης επιτυγχάνεται, επίσης, μείωση στην εμφάνιση πιθανών σκιών. Ο απώτερος σκοπός δεν είναι άλλος από τον συγχρονισμό της προβολής της ακτίνας λέιζερ και του εντοπισμού της.

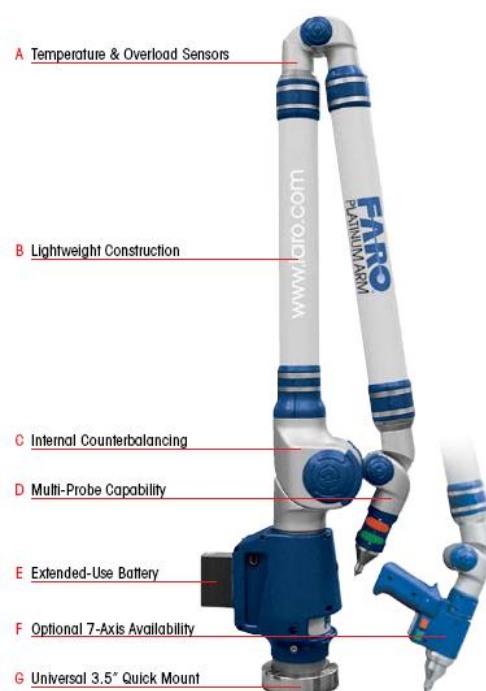
Το οπτικό πεδίο του ανιχνευτή θέσης ακολουθεί το σημείο καθώς σαρώνει τη σκηνή. Η εστιακή απόσταση του φακού σχετίζεται με το επιθυμητό βάθος πεδίου, ή την περιοχή μέτρησης και όχι με το οπτικό πεδίο. Η ανάπτυξη σαρωτών αυτόματου συγχρονισμού έχει αποφέρει σημαντικές μειώσεις στις διαστάσεις της οπτικής κεφαλής των συστημάτων.



Το Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων έχει στον εξοπλισμό του έναν σαρωτή τριγωνοποίησης **FARO PLATINUM ARM Model P083D**, ο τύπος του οποίου είναι ιδανικός για την σάρωση των οργανικών γεωμετριών του πρωτοτύπου, και χωρίς συμβιβασμούς στην ακρίβεια των. Πρόκειται για έναν χειροκίνητο φορητό μετρητικό βραχίονα τελευταίας τεχνολογίας κατασκευασμένο από την εταιρία FARO Technologies Inc (έτος κατασκευής 2007) που διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας και διάμετρο εργόσφαιρας 2,4 μέτρα. Με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές επίδοσης του κατασκευαστή, η ακρίβεια του συστήματος είναι πιστοποιημένη σύμφωνα με το πρότυπο ANSI B89 (2 Sigma Single Point Accuracy) $\pm 0.030\text{mm}$. Εκτός από τον μηχανικό αισθητήρα επαφής (ακίδα επαφής), η εν λόγω ΜΜΣ-ΑΒ διαθέτει επιπροσθέτως λέιζερ κάμερα προσαρτημένη στην απόληξη του βραχίονα για εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων χωρίς επαφή όπως ο ποιοτικός/ μετροτεχνικός έλεγχος, ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός (reverse engineering), η τρισδιάστατη μοντελοποίηση (3-D modelling) και η αντιπαραβολή νέφους σημείων με ονομαστική γεωμετρία μοντέλου CAD. Για την λέιζερ κάμερα, ο κατασκευαστής δίνει ακρίβεια $\pm 0.050\text{mm}$, βάθος πεδίου 85mm, ωφέλιμο πλάτος δέσμης σάρωσης 34mm έως 60mm ανάλογα με την απόσταση από την μετρούμενη επιφάνεια, 640 σημεία ανά δέσμη σάρωσης, 30 σαρώσεις ανά δευτερόλεπτο (frames per second), άρα 19200 σημεία ανά δευτερόλεπτο, και μήκος κύματος λέιζερ 660nm (CDRH Class II/IEC Class 2M). Για το σύστημα βραχίονα-κάμερας η ακρίβεια προδιαγράφεται στα $\pm 0.080\text{mm}$. Η ΜΜΣ-ΑΒ Faro Arm επικοινωνεί μέσω θύρας USB με Η/Υ στον οποίο είναι εγκατεστημένο κατάλληλο εξειδικευμένο λογισμικό για τη διεκπεραίωση των σαρώσεων.



Σημειώνεται ότι τα δεδομένα της μέτρησης/ ψηφιακής αποτύπωσης αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο στον Η/Υ.



Για την εκτέλεση της σάρωσης έπρεπε να γίνει κατάλληλη προετοιμασία στο πλαίσιο του ποδηλάτου. Η διαδικασία κατασκευής του γίνεται με θηλυκά καλούπια, δίνοντας πολύ καλή ποιότητα στην εξωτερική του επιφάνεια με πολύ χαμηλή τραχύτητα, απαιτούμενο χαρακτηριστικό για την βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση του ποδηλάτου. Η χαμηλή τραχύτητα όμως στην ρητίνη της μήτρας, δίνει υψηλό βαθμό αντανάκλασεων, διαθλάσεων και γενικά έντονη γυαλάδα στο εξωτερικό του πλαισίου. Αυτό, αν κι αισθητικά επιθυμητό, είναι μία παράμετρος που δυσχεραίνει την διαδικασία της σάρωσης με ενεργούς σαρωτές μη-επαφής που λειτουργούν με φως, μιας και οι ακτίνες φωτός εκτός από την ανάκλαση στην επιφάνεια του πλαισίου, μπορεί να διαθλαστούν, να προχωρήσουν προς το ύφασμα και ανάλογα με τις γωνίες ανάκλασης εκεί να επιστρέψουν από μία ουσιαστικά λάθος επιφάνεια ή να μην επιστρέψουν καν προς τον ανιχνευτή του σαρωτή. Αυτό προσθέτει σημαντικό θόρυβο στις μετρήσεις, θόρυβο που μάλιστα μπορεί να μην μπορεί να αφαιρεθεί πάντα σωστά με την χρήση λογισμικού. Επιπρόσθετα οι μαύρες ίνες άνθρακα απορροφούν το φως και αντανάκλουν ελάχιστα, επιδεινώνοντας την κατάσταση. Η λύση στο πρόβλημα ήταν απλούστατη και πολύ οικονομική. Χρησιμοποιήθηκε αστάρι μορφή σε μορφή σπρέι, το οποίο θα δημιουργούσε μία δεύτερη επιφάνεια επί του πλαισίου με ιδανικά χαρακτηριστικά για τις απαιτήσεις της σάρωσης:

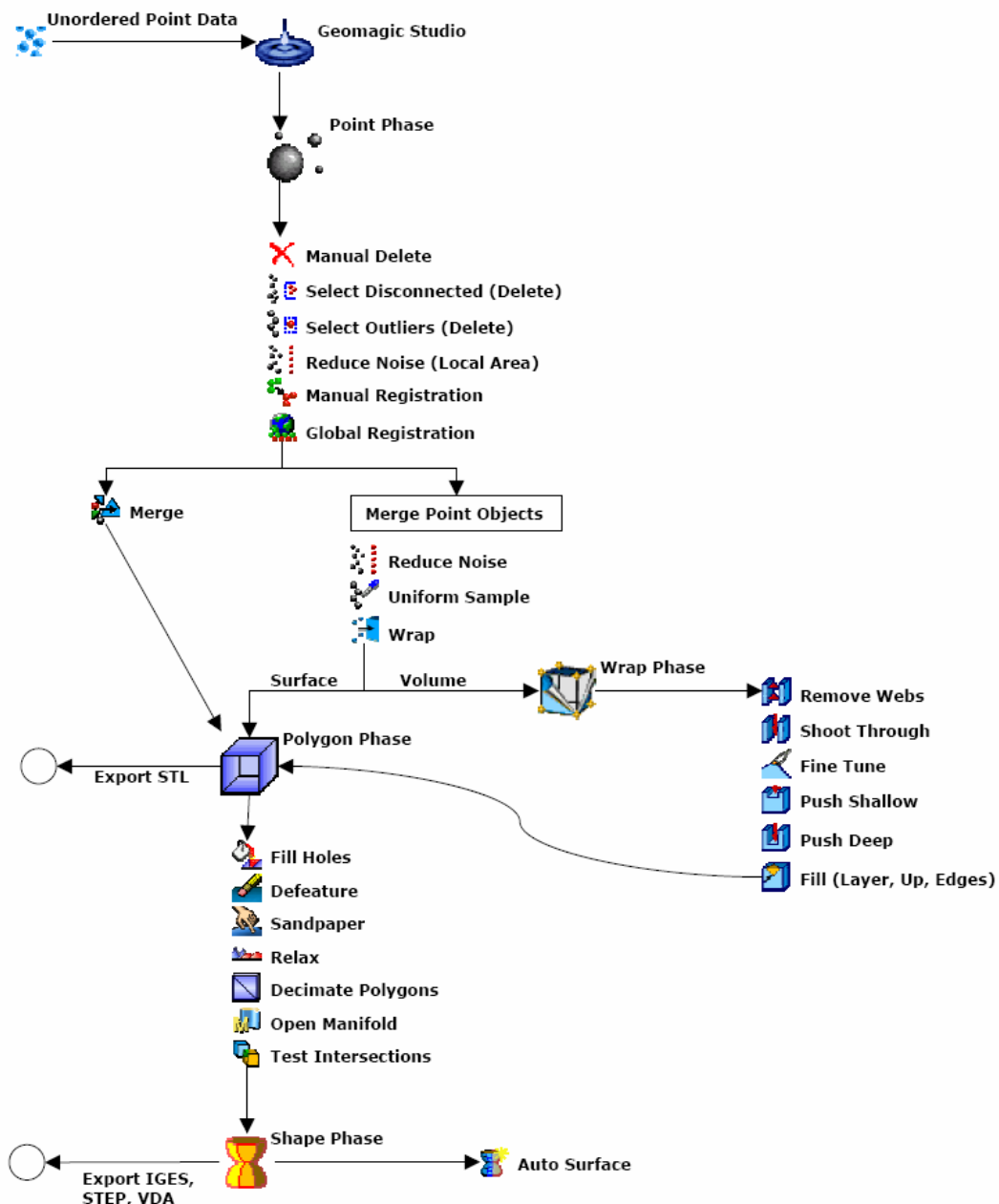
- Εξαιρετική ποιότητα επιφανείας με αρκετά χαμηλή τραχύτητα για την εξασφάλιση της ακρίβειας, αλλά ταυτόχρονα αρκετά υψηλής ώστε να διατηρείται μία ματ επιφάνεια χωρίς γυαλάδες για την αποφυγή θορύβου.
- Άσπρο χρώμα για ελάχιστη απορρόφηση φωτός.
- Πάχος επιφανείας της τάξεως των μικρομέτρων που προσθέτει ελάχιστο offset στην επιφάνεια προς μέτρηση και δεν διακυβεύει την ακρίβεια της σάρωσης.



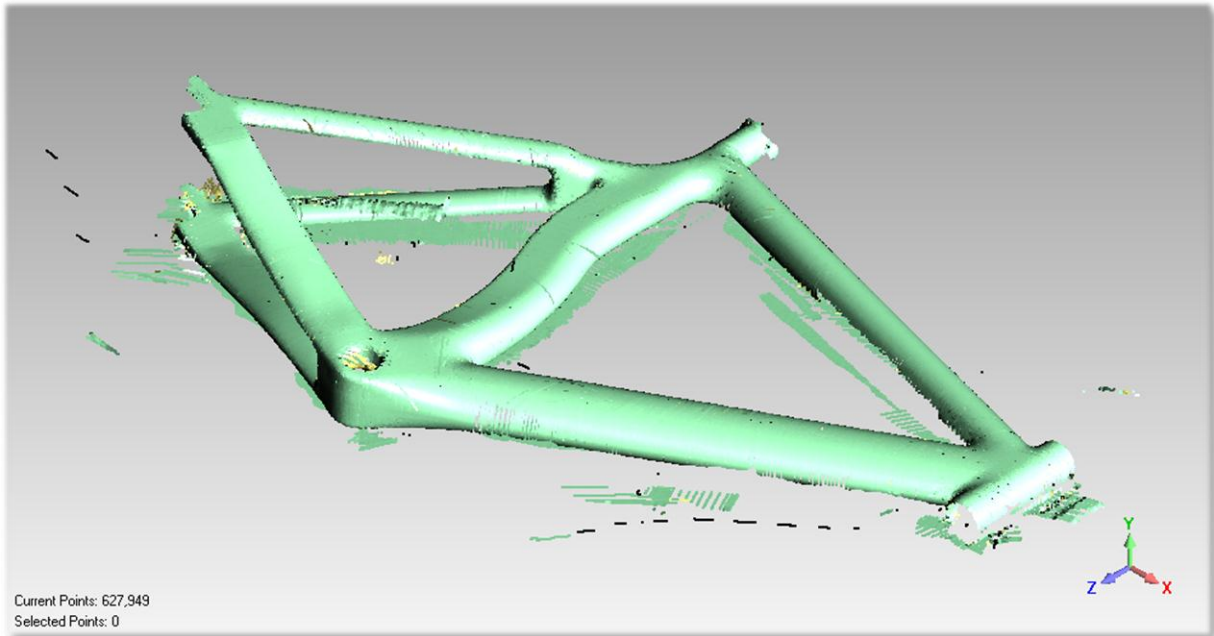
Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή, καταγραφή και επεξεργασία των σαρώσεων είναι το Geomagic Studio. Πρόκειται για industry-leading λογισμικό στην κατηγορία του και προσφέρει πανίσχυρα εργαλεία για την παραγωγή επιφανειών NURBS. Χωρίς την παραγωγή επιφανειών NURBS, και με απλή εξαγωγή σε τύπους αρχείων πολυγωνικών επιφανειών (όπως τα αρχεία STEP, OBJ, STL κλπ) η περαιτέρω επεξεργασία του μοντέλου και η εισαγωγή του σε ένα λογισμικό CAE θα ήταν πολλαπλά δυσκολότερη και η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής θα ήταν σχεδόν αδύνατη για λόγους που θα εξηγηθούν αναλυτικά παρακάτω. Το λογισμικό καταγράφει για κάθε σάρωση καινούριο νέφος σημείων και δίνει κατάλληλα εργαλεία στον χρήστη να τα εισαγάγει στο ίδιο περιβάλλον και να τα τοποθετήσει επάλληλα.

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας που ακολουθείται κατά κανόνα σε τέτοιες εργασίες έχει ως εξής:

Multiple Scans Workflow Unordered Point Data



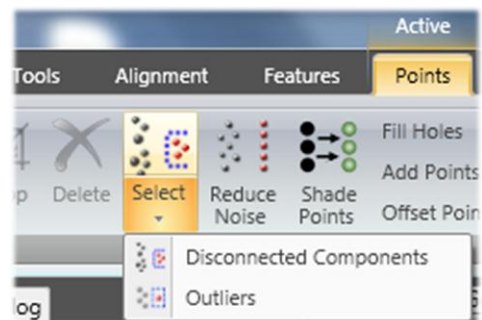
Επιλέγουμε να επεξεργαστούμε αρχικά κάθε σάρωση ξεχωριστά, προκειμένου να διώξουμε εξωτερικά του μοντέλου σημεία καθώς επίσης και να μειώσουμε τον θόρυβο. Μ' αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλίσουμε ακριβέστερο συγκερασμό των σαρώσεων ενώ ταυτόχρονα θα γίνει ευκολότερη η επεξεργασία του ολοκληρωμένου μοντέλου.



Η πρώτη σάρωση αποτελείται από περισσότερα από 627,000 σημεία με σημαντικό ποσοστό αυτών ν' αποτελούν εξωτερικά του μοντέλου ενώ ο θόρυβος δεν φαίνεται εκ πρώτης όψεως σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα.

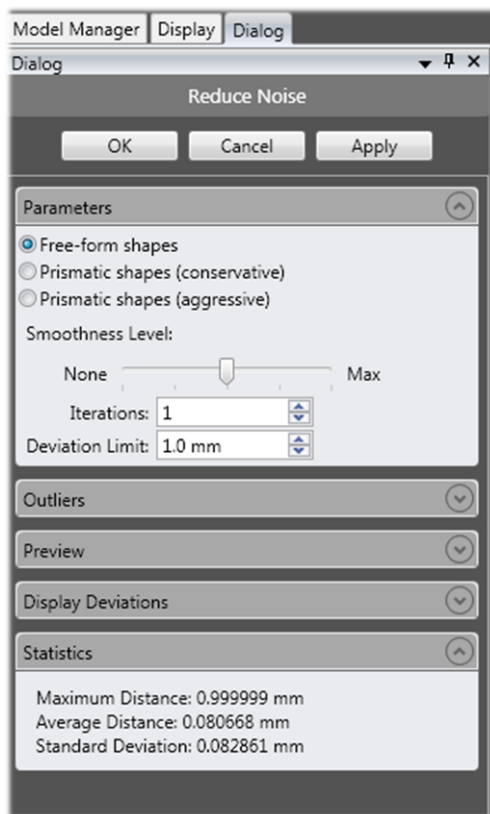
Το λογισμικό δίνει εργαλεία για την επιλογή των σημείων που δεν ανήκουν στο μοντέλο με απλή στατιστική μέθοδο.

Το εργαλείο Select Disconnected Components επιλέγει αυτόματα ομάδες σημείων που βρίσκονται εκτός του κυρίως μοντέλου. Αρχικά αναγνωρίζει την σχετική εγγύτητα σημείων μεταξύ τους, σχηματίζει ομάδες-νήσους και στην συνέχεια τις οργανώνει με βάση την μεταξύ τους απόσταση. Το παράθυρο διαλόγου δίνει την επιλογή μεταβολής κατάλληλων παραμέτρων ώστε να έχει ο χρήστης επιρροή στην διαδικασία με την οποία το λογισμικό επιλέγει τις ομάδες-νήσους.



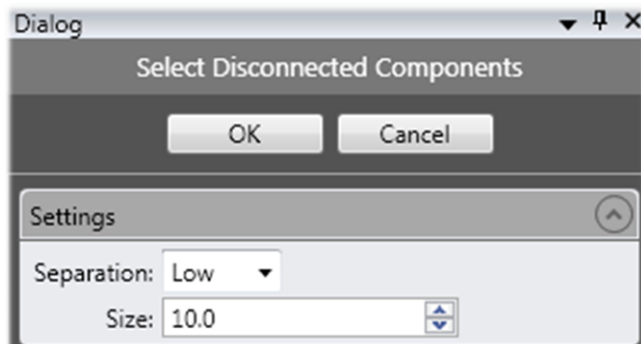
Πιο συγκεκριμένα δίνονται τρεις επιλογές Διαχωρισμού:

- Χαμηλή: κάθε απομονωμένο στοιχείο αποτελεί από μόνο του μία ομάδα του ενός. Αυτή η επιλογή δίνει τον μεγαλύτερο έλεγχο στον αριθμό των ξεχωριστών στοιχείων που θα γίνουν ομάδα



- Μεσαία: Τα απομονωμένα στοιχεία που γειτνιάζουν θεωρούνται ότι βρίσκονται σε ομάδες νήσων.

- Υψηλή: Τα απομονωμένα στοιχεία που γειτνιάζουν πολύ (σχετικά πάντα) θεωρούνται ότι



βρίσκονται σε ομάδες νήσων.

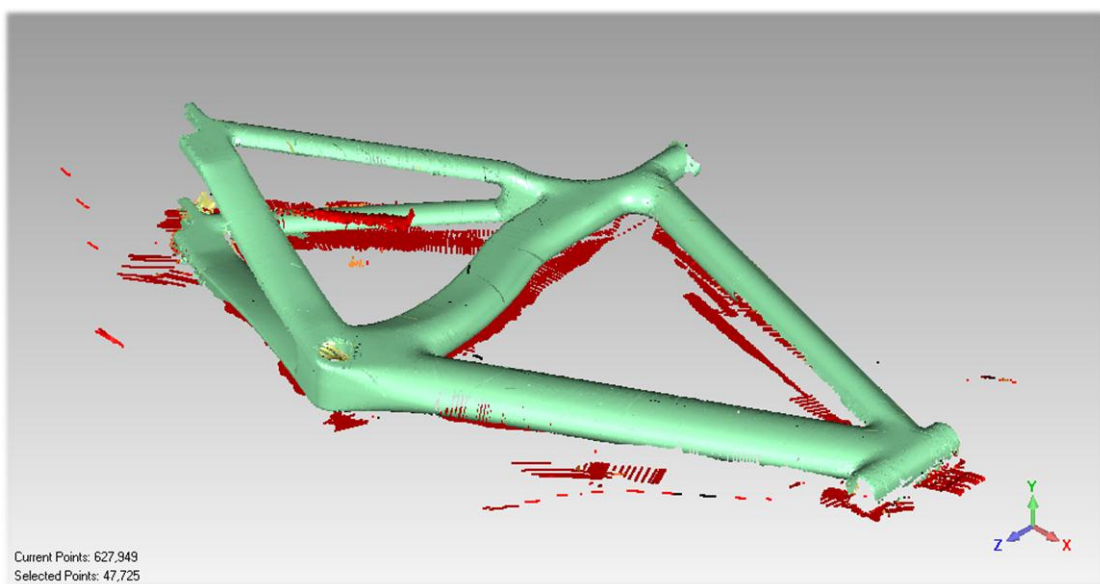
Εκτός αυτών της βασικής επιλογής Διαχωρισμού, υπάρχει κι αριθμητική παράμετρος μεγέθους. Παίρνει αριθμητικές τιμές από 0 έως 100 κι ουσιαστικά πρόκειται για ποσοστό επί του συνόλου του νέφους σημείων. Μία ομάδα σημείων κατηγοριοποιείται ως

απομονωμένη νήσος όταν το μέγεθός της είναι μικρότερο ή ίσο του ποσοστού που ορίζεται στην παράμετρο αυτή.

Στην περίπτωση μας επιλέγουμε Χαμηλή και 10% μιας και θέλουμε το λογισμικό να επιλέξει τα πολλά μικρά σημεία που σαρώθηκαν κατά λάθος μακριά από το μοντέλο και να τα διαγράψουμε.

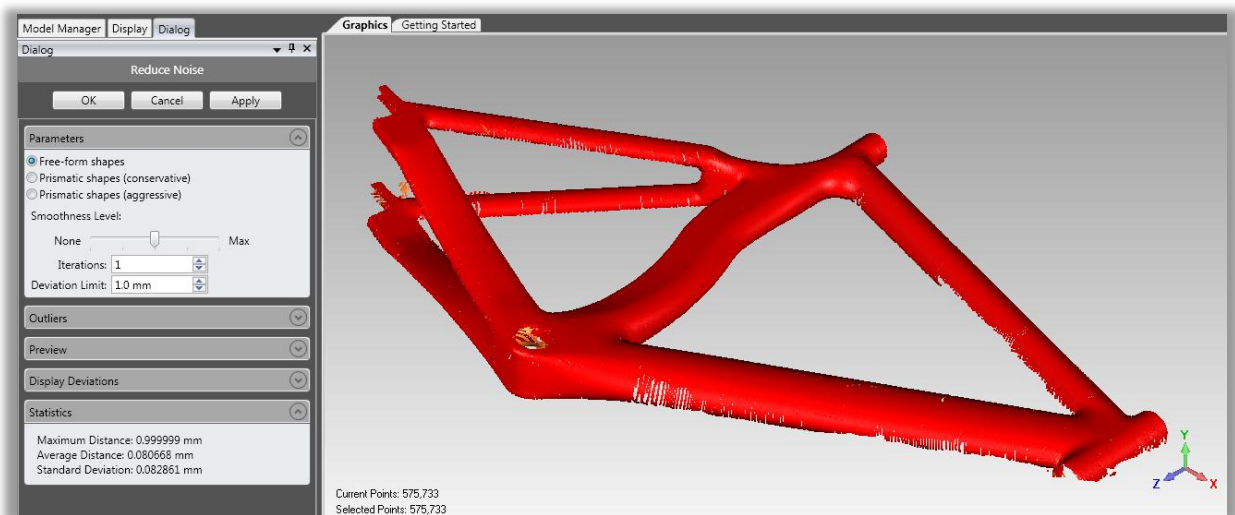
Κατόπιν δίνεται έμφαση σε μία τεράστια ομάδα σημείων που αποτελούν την τράπεζα βάσης του σαρωτή και του προϊόντος. Η απλή επιλογή με το ποντίκι είναι η ευκολότερη, γρηγορότερη και πιο αξιόπιστη μέθοδος επιλογής, μιας και όλα τα σημεία βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Επιλέγονται και διαγράφονται έτσι περίπου 48,000 σημεία από το νέφος της πρώτης σάρωσης και μένουν μόνο λειτουργίες αφαίρεσης θορύβου.

Η λειτουργία μείωσης θορύβου στο νέφος σημείων είναι άλλη μία καθαρά στατιστική λειτουργία του λογισμικού. Αντισταθμίζει τον θόρυβο από την σάρωση μετακινώντας σημεία στην στατιστική σωστή τους θέση, έχοντας ως αποτέλεσμα μία γενικά ομαλότερη επιφάνεια. Ο



θόρυβος στην σάρωση μπορεί να κάνει οξείες ακμές πιο αμβλείες και λείες/ομαλές επιφάνειες να έχουν απότομες διακυμάνσεις. Αν και γενικά η μείωση θορύβου δουλεύει καλύτερα σε επιφάνειες και όχι σε όγκους, η επιλογή των Free-form shapes προσαρμόζει την λειτουργία για οργανικές επιφάνειες, δίνοντας έμφαση στην καμπυλότητά τους.

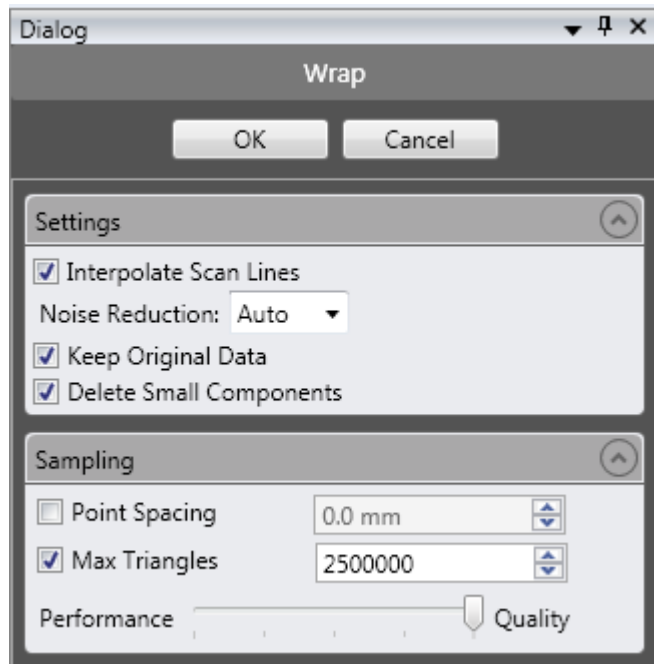
Επιλέγεται επίσης μία μέση επιθυμητή διατήρηση της καμπυλότητας, προκειμένου να μετριάσει η επιρροή της λειτουργίας και να μην υπάρξουν έντονες αλλαγές λόγω αυτής. Επιλέγεται μέγιστη αναμενόμενη απόκλιση σημείων της τάξης του 1mm, μιας και δεν αναμένουμε ιδιαίτερα μεγάλα ποσοστά θορύβου ενώ για τον ίδιο λόγο δεν ζητάμε να γίνει επαναληπτική διαδικασία, αλλά η λειτουργία να εκτελεστεί μία φορά μόνο. Από τα στατιστικά της λειτουργίας αποδεικνύεται ότι η μέση απόσταση σημείων θορύβου από τα υπόλοιπα είναι λιγότερη από 1 δέκατο του χιλιοστού, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η χρήση του primer ως εξωτερικό στρώμα του πλαισίου κάνει την σάρωση ποιοτικότερη και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ευκολότερη.



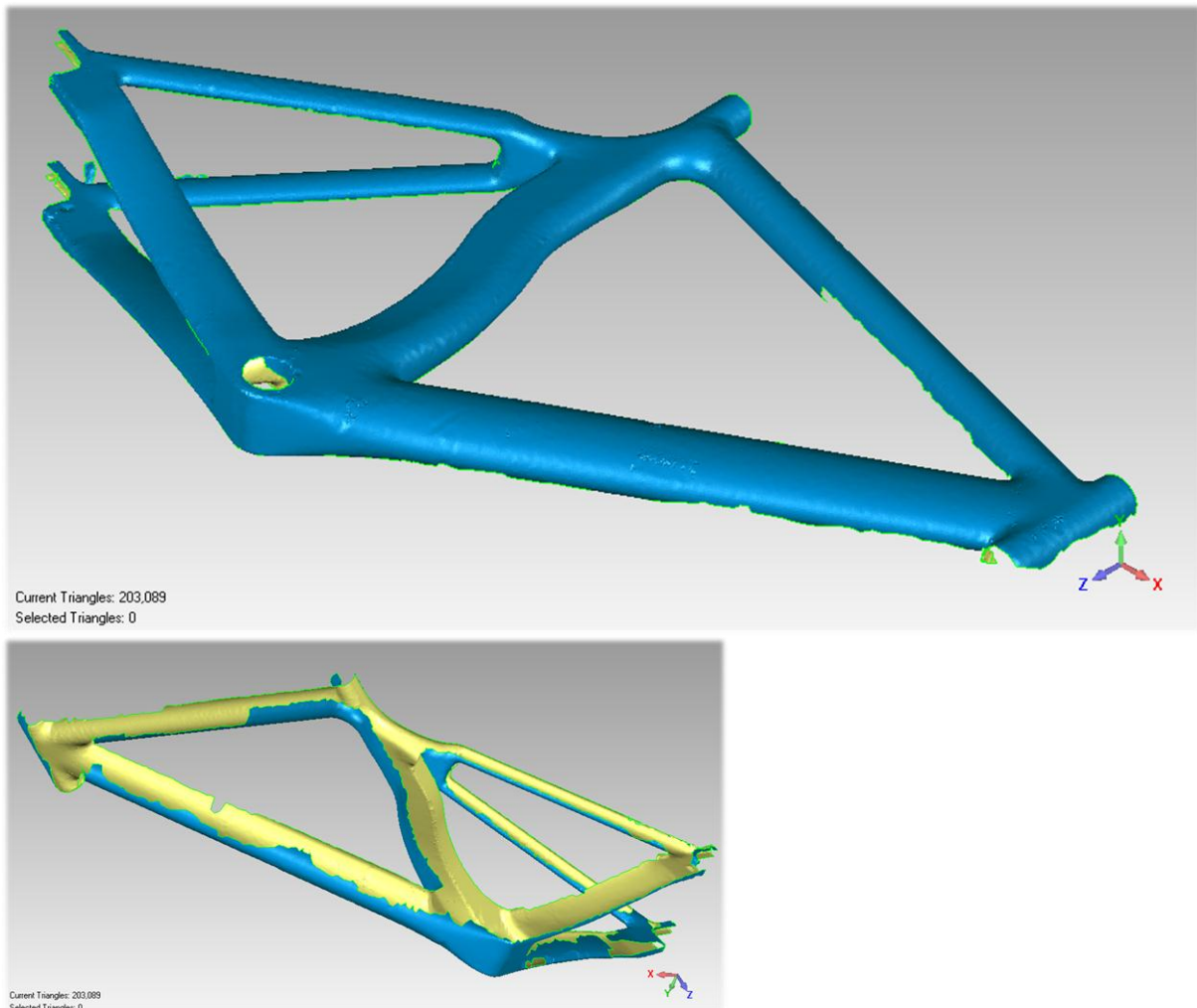
Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι κάποιες πρώτες δοκιμαστικές σαρώσεις με στόχο την εξοικείωση με τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων με το προϊόν με την γυαλιστερή εξωτερική του επιφάνεια απέδιδαν υψηλότατο θόρυβο με συνεχής σκιές πάνω από τις περισσότερες επιφάνειες. Σκιές που βρίσκονταν υψηλότερα ή χαμηλότερα από την σαρωμένη επιφάνεια, λόγω ανάκλασης και διάθλασης των ακτινών laser του σαρωτή στην γυαλιστερή εποξική ρητίνη της μήτρας του υλικού. Επειδή οι σκιές εμφανίζονταν σε σημαντικό ποσοστό επί της επιφάνειας σάρωσης, δεν εμφανίζονταν ακριβώς ως θόρυβος στο νέφος σημείων, αλλά περισσότερο ως 2 σχεδόν παράλληλες σαρώσεις. Ως εκ τούτου η στατιστική του αφαίρεση μέσω μίας αυτοματοποιημένης λειτουργίας noise reduction ήταν αδύνατη, κι αυτός ήταν ο κύριος λόγος που έπρεπε να βρεθεί ένας καινούριος τρόπος σάρωσης.

Αφού ο θόρυβος πλέον είναι σε επιτρεπτά επίπεδα για νέφος σημείων μπορούμε δια τριγωνοποίησης να δημιουργήσουμε μία επιφάνεια πολυγώνων. Η επιφάνεια δημιουργείται με το λογισμικό να χρησιμοποιεί τα σημεία ως αναφορές για την δημιουργία πολυγώνων τα οποία σχηματίζουν την επιφάνεια. Πιο απλά μπορούμε να φανταστούμε την λειτουργία σαν ένα μαλακό πλαστικό φύλο που τυλίγεται εφαρμοστά γύρω από το νέφος σημείων και αποκαλύπτει την εξωτερική του επιφάνεια.

Η λειτουργία δημιουργίας της επιφάνειας πολυγώνων γι' αυτόν τον λόγο ακριβώς ονομάζεται 'Wrap' στο Geomagic και μιας και η επιφάνεια είναι ικανοποιητικά επεξεργασμένη, το παράθυρο διαλόγου της λειτουργίας δεν χρειάζεται να έχει τις επιπρόσθετες επιλογές που εμφανίζονται σε ακανόνιστα νέφη σημείων.



Ζητάμε μέγιστο αριθμό πολυγώνων τα 2.5 εκατομμύρια, αριθμός υπερβολικός για να δώσουμε στο λογισμικό την δυνατότητα να δημιουργήσει μία επιφάνεια με την μέγιστη δυνατή ανάλυση. Επιπλέον ζητάμε να εκτελέσει μία επιπλέον μείωση θορύβου, να κρατήσει το αρχικό νέφος σημείων (Keep Original Data) και να διαγράψει μόνο τα σημεία που μπορεί να δυσκολέψουν την λειτουργία του wrapping όπως επί παραδείγματι εξωτερικά σημεία που ξέφυγαν από προηγούμενες λειτουργίες επεξεργασίας του νέφους.

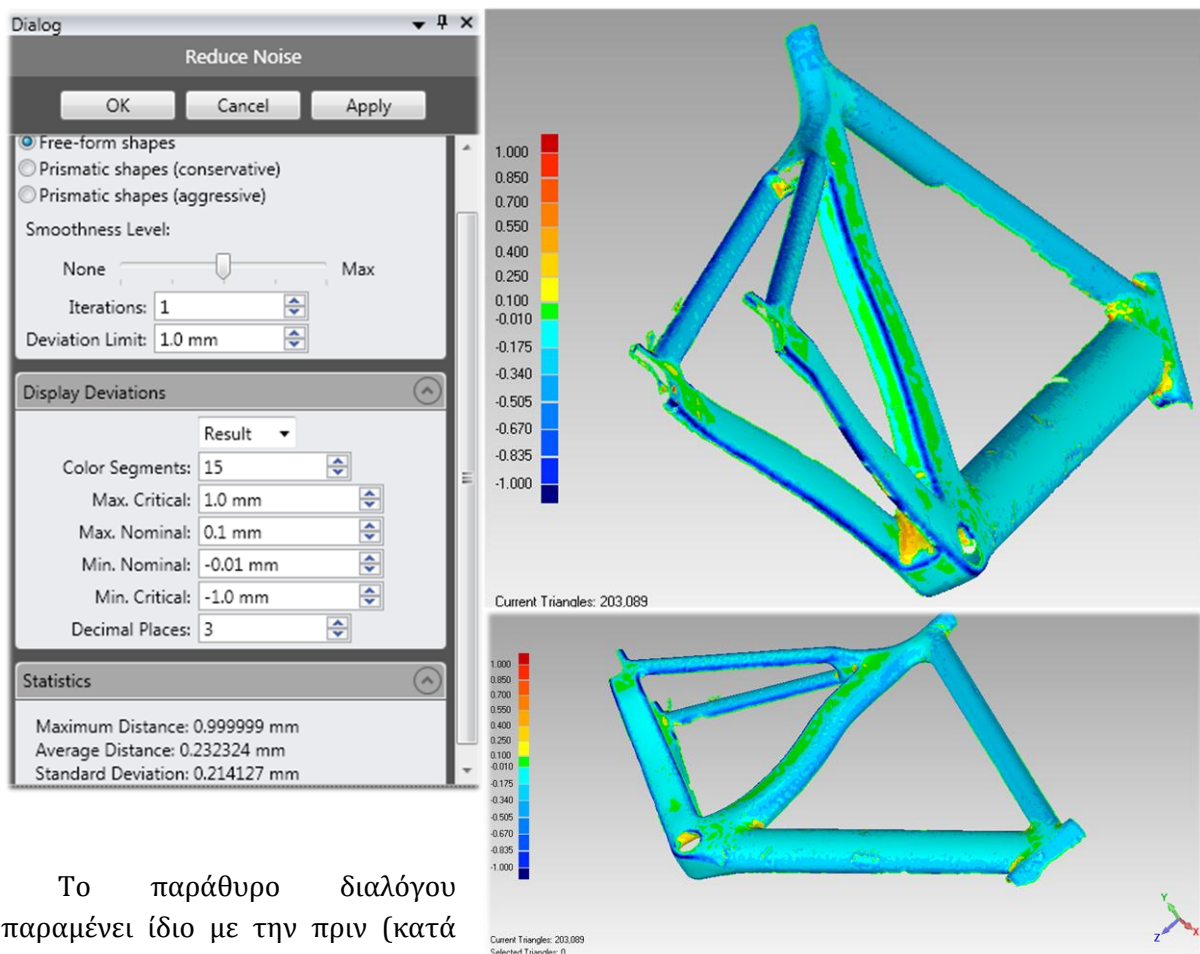


Με την εκτέλεση της λειτουργίας wrap, εμφανίζεται μία επιφάνεια που απαρτίζεται από περισσότερα από 200 χιλιάδες πολύγωνα. Η επιφάνεια αυτή, μας δίνει πλέον την δυνατότητα να εκτελέσουμε λειτουργίες βελτίωσής της προκειμένου να καταλήξουμε στην τελική γεωμετρία με την οποία θα εξαγάγουμε επιφάνειες NURBS, τις οποίες μπορούμε να βελτιώσουμε περαιτέρω στο περιβάλλον του Solidworks για να καταλήξουμε στις αναλύσεις μέσω FEM.

Επιλέγουμε να εργαστούμε στην επιφάνεια της κάθε σάρωσης ξεχωριστά και να ενώσουμε στο τέλος τα προϊόντα των εργασιών, για να επιτύχουμε σωστότερη ένωση, να πετύχουμε καλύτερο αποτέλεσμα σε κάθε επιφάνεια ξεχωριστά, αλλά και για την διευκόλυνσή μας μιας και γενικά είναι ευκολότερη η εργασία σε μικρότερου μεγέθους μοντέλα.

Η καρτέλα Polygons του Geomagic 12 περιέχει όλα τα εργαλεία που θα χρειαστεί ο χρήστης, προκειμένου να εκτελέσει επιδιορθώσεις, προσθαφαιρέσεις και γενικότερα βελτιώσεις στην γεωμετρία.

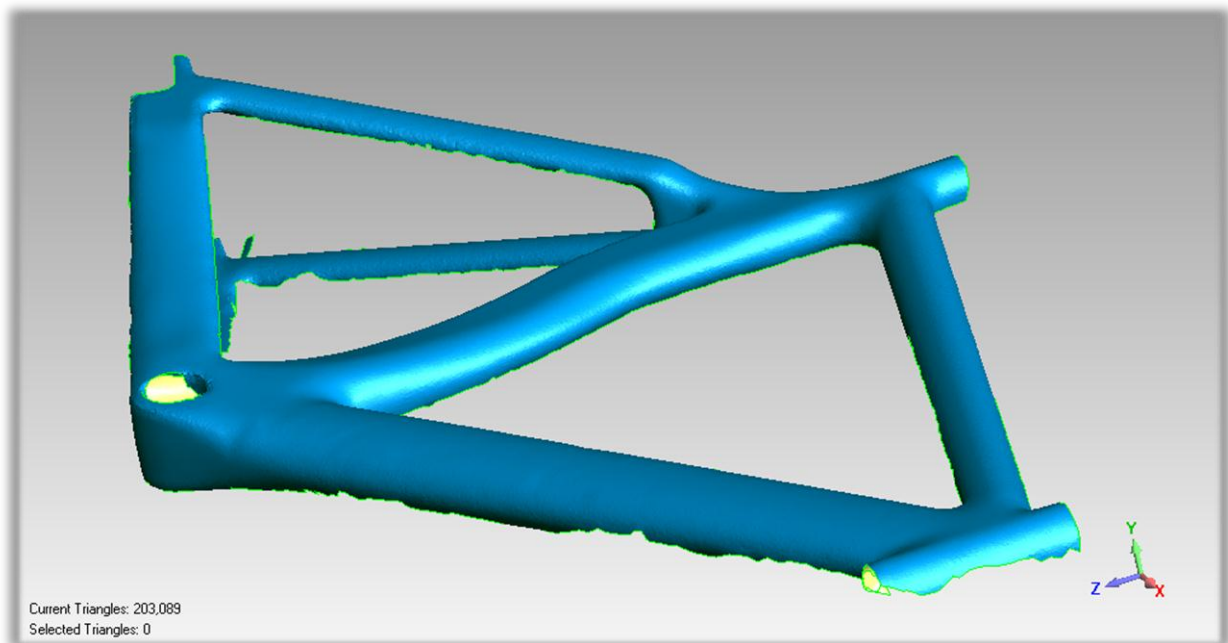
Αρχικά εργαζόμαστε πάλι για την μείωση του θορύβου, καθώς η δημιουργία των πολυγώνων προσθέτει αρκετό θόρυβο στην γεωμετρία λόγω της διαδικασίας που ακολουθείται κατά την τριγωνοποίηση των σημείων.



Το παράθυρο διαλόγου παραμένει ίδιο με την πριν (κατά την μείωση θορύβου στο νέφος σημείων) και με τις ίδιες ακριβώς ρυθμίσεις ζητάμε από το λογισμικό μία επιπλέον γραφική απεικόνιση του θορύβου για να αξιολογήσουμε την διαδικασία του wrapping.

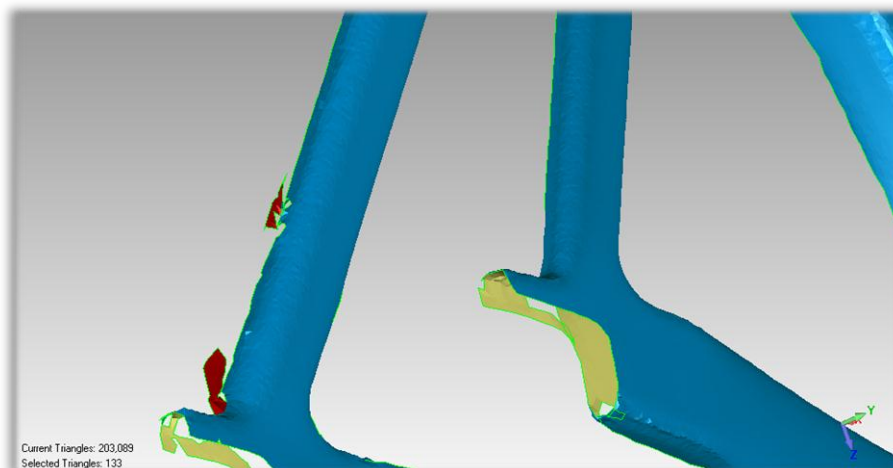
Εμφανίζονται έντονες διακυμάνσεις σε σημεία έντονης καμπυλότητας, γεγονός μάλλον αναμενόμενο μιας και η σάρωση έντονων ακμών είναι πιο δύσκολη για τον σαρωτή που χρησιμοποιούμε. Η τριγωνοποίηση που εκτελεί ο σαρωτής με μία λωρίδα δεσμών laser και έναν ανιχνευτή, επειδή ακριβώς παράγει αποτελέσματα εξαιρετικής ακρίβειας, αναπαράγει πλήρως την επιφάνεια των γωνιών του ποδηλάτου. Σ' αυτές τις γωνίες είναι γενικά πιο δύσκολο να παραχθεί καθαρή επιφάνεια χαμηλής τραχύτητας και η εναπόθεση του primer/ασταριού πολλαπλασιάζει το πρόβλημα καθώς μπορεί να συσσωρευτεί στα σημεία αυτά.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, δεν πρόκειται για ουσιαστικό πρόβλημα, αλλά απλά η λογική εξήγηση της κατανομής του θορύβου, ο οποίος φαίνεται εντονότερος στα 'προβληματικά' σημεία. Τα στατιστικά μας δείχνουν μέση απόσταση των σημείων προς διόρθωση της τάξεως των 0.23mm (με $\sigma = 0.214127mm$).



Η διαφορά είναι άμεσα εμφανής σε σχέση με πριν, και το μοντέλο έχει ήδη καθαρίσει από ακανόνιστες ομάδες πολυγώνων που ήταν προφανώς εκτός της γεωμετρίας του προϊόντος.

Εν τω μεταξύ εντοπίζουμε και διαγράφουμε κάποια τυχαία πολύγωνα στο πίσω μέρος του πλαισίου, που μάλλον δημιουργήθηκαν από σημεία που δεν καθαρίστηκαν πριν το wrapping της επιφανείας.



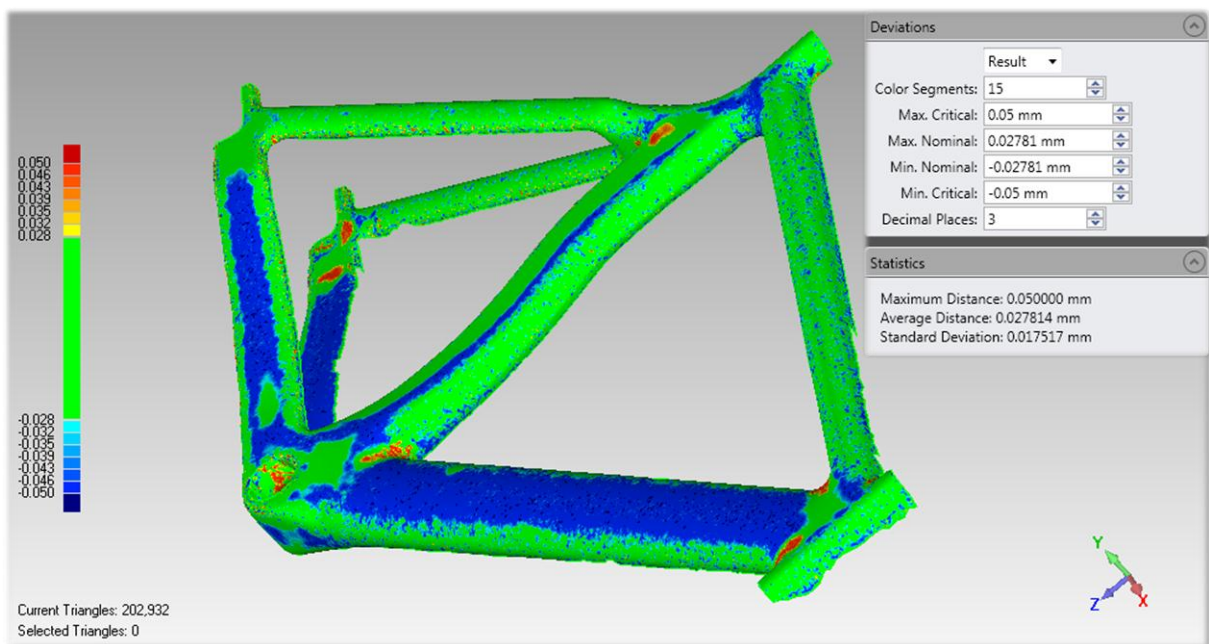
Για να ολοκληρώσουμε τις ολιστικές εργασίες στο μοντέλο μας, προχωράμε στην χαλάρωση των πολυγώνων. Η λειτουργία Relax polygons εξομαλύνει την επιφάνεια ελαχιστοποιώντας τις γωνίες μεταξύ ανεξάρτητων πολυγώνων. Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητό στον αναγνώστη, μπορούμε να φανταστούμε ένα μοντέλο από πηλό το οποίο χαϊδεύουμε με απαλές κινήσεις προκειμένου να εξασφαλίσουμε ομαλότερη επιφάνεια.

Το παράθυρο διαλόγου της λειτουργίας μας δίνει στοιχεία ελέγχου πάνω στην λειτουργία ως εξής:

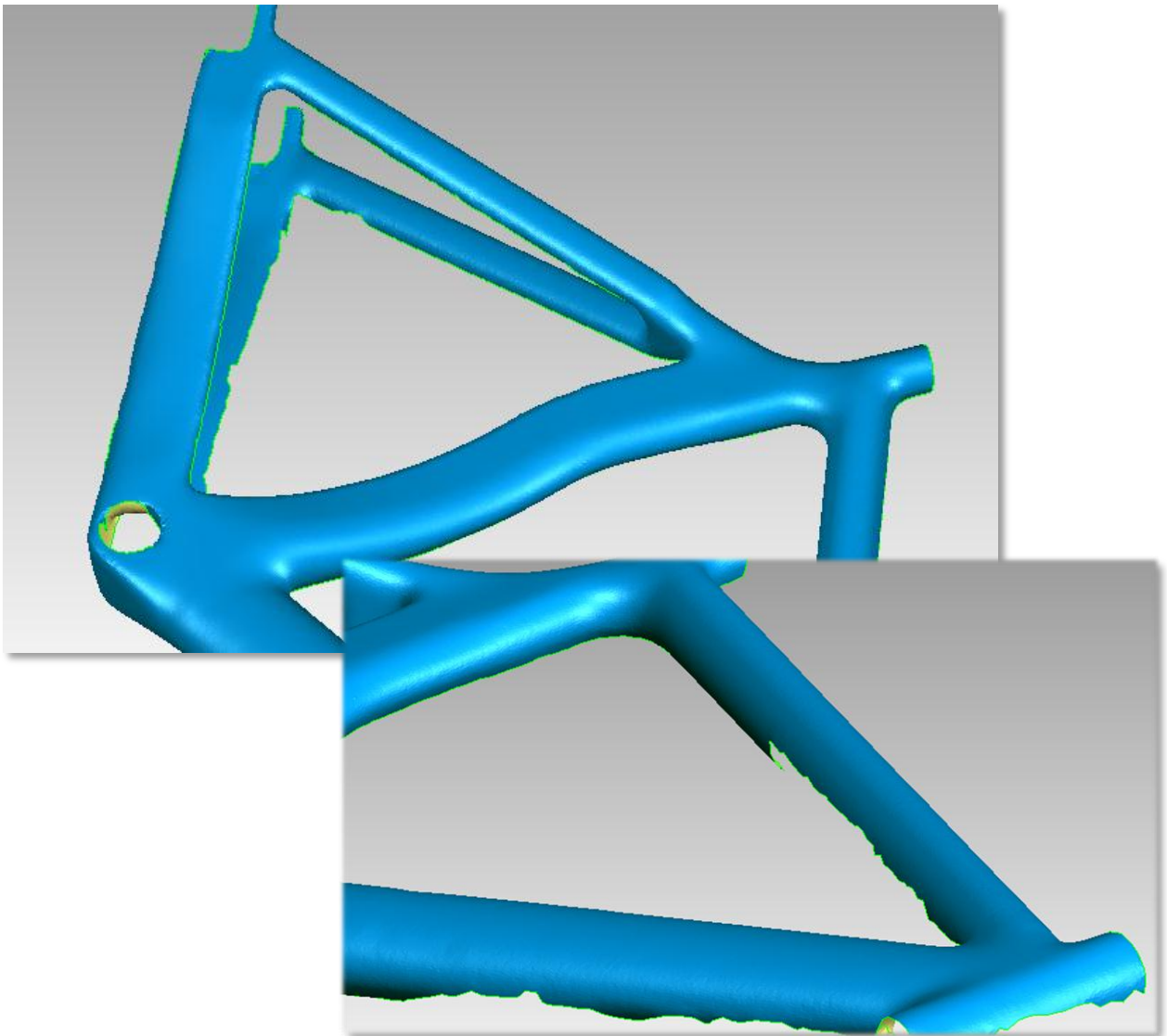
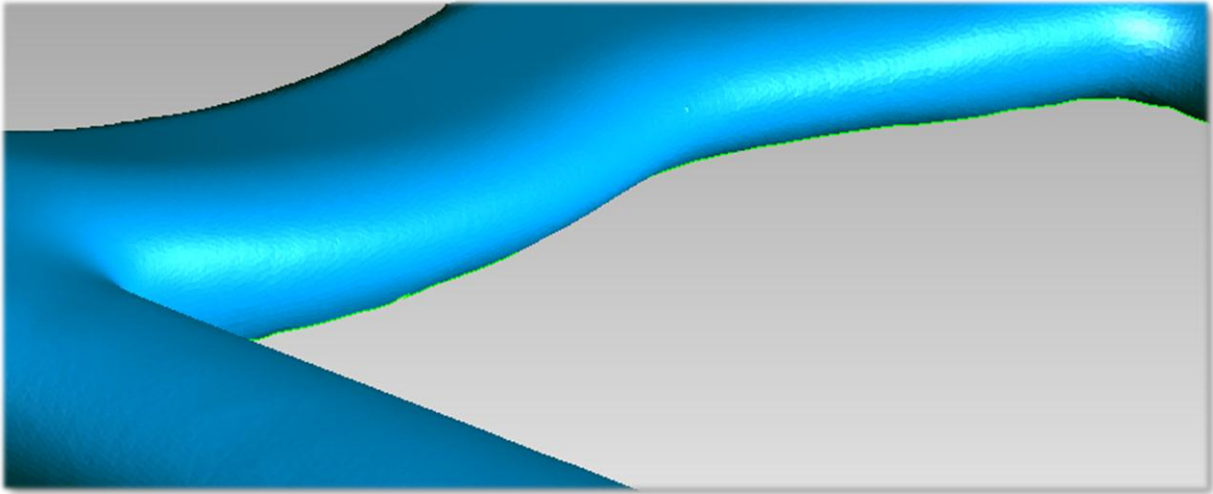
- Ομαλότητα επιφανείας
- Δύναμη εκτέλεσης λειτουργίας
- Διατήρηση Καμπυλότητας
- Μέγιστη διορθούμενη απόκλιση - το όριο της χαλάρωσης για διανύσματα των τριγώνων, αριθμός που προσδιορίζει την απόσταση της μετακίνησης κατά την κάθετη διεύθυνση
- Διόρθωση ορίων - προσδιορίζει αν θα πρέπει να κλειδωθούν οι συντεταγμένες των σημείων στα όρια της επιφανείας και να μην υποστούν χαλάρωση



Θέτοντα ξανά συντηρητικές ρυθμίσεις που θα βελτιώσουν μικρές παραφωνίες στην καμπυλότητα του μοντέλου μας, οι οποίες δεν διορθώθηκαν με την μείωση θορύβου, αξιολογούμε τα στατιστικά της λειτουργίας. Ο πολύ χαμηλός όρος αποκλίσεων (μικρότερος από 30μm) επιβεβαιώνει γι' άλλη μία φορά την πολύ καλή ποιότητα της σάρωσης και ότι τα περιθώρια βελτίωσης γι' αυτό το πέρασμα εξαντλούνται.



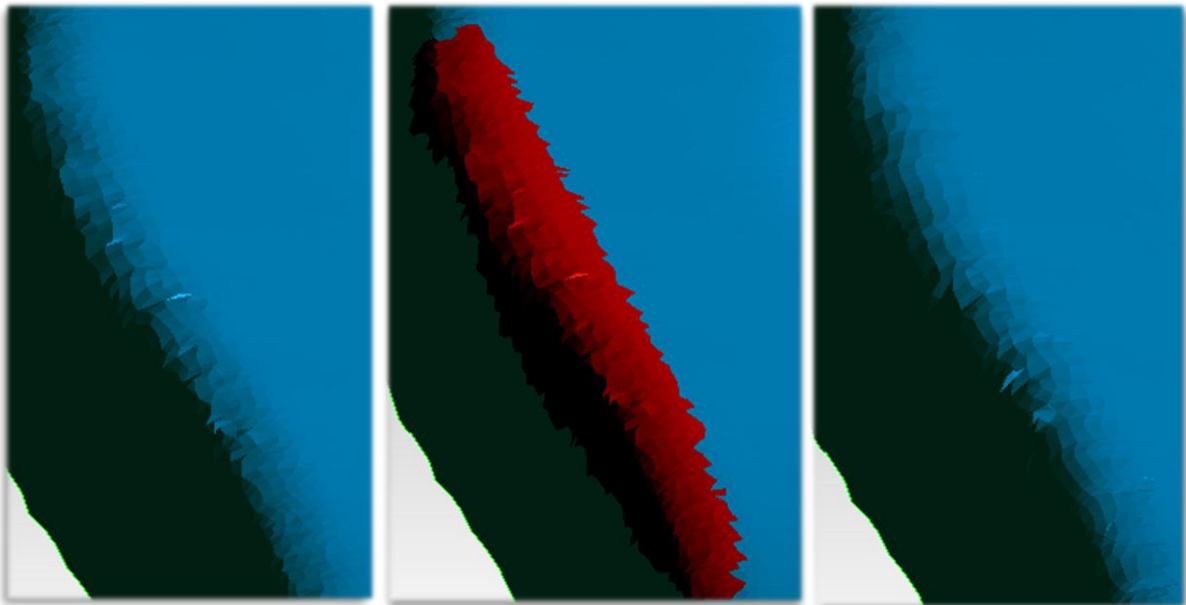
Το παραπάνω συμπέρασμα γίνεται εμφανές και με προσεκτική εξέταση του προϊόντος. Οι ακόλουθες φωτογραφίες δείχνουν λεπτομέρειες από τις μεγάλες κύριες επιφάνειές του.



Οι τελευταίες λειτουργίες που μένουν πριν αρχίσουμε την επεξεργασία των συμπληρωματικών σαρώσεων είναι τοπικές επιδιορθώσεις σε σημεία με παραμένοντα θόρυβο και ομάδες πολυγώνων που φαίνονται να βρίσκονται εκτός της αναμενόμενης γεωμετρίας.

Τέτοιες περιοχές επιδιορθώνονται με τοπική επιλογή και εκτέλεση αυτοματοποιημένων λειτουργιών όπως το Quicksmooth που εκτελεί τοπικά χαλάρωση της πολυγωνικής επιφάνειας, το re-wrap που επιχειρεί να επαναπροσδιορίσει τα πολύγωνα που σχηματίζουν την επιλεγμένη επιφάνεια ή το Sandpaper που εκτελεί λειτουργίες smooth/relax χωρίς πρότερη επιλογή αλλά με απευθείας εφαρμογή μέσω εργαλείου τύπου brush.

Παράδειγμα αποτελεί η πίσω γωνία στο Seat Tube, που σε σημεία εμφανίζει προβλήματα όπως το παρακάτω:

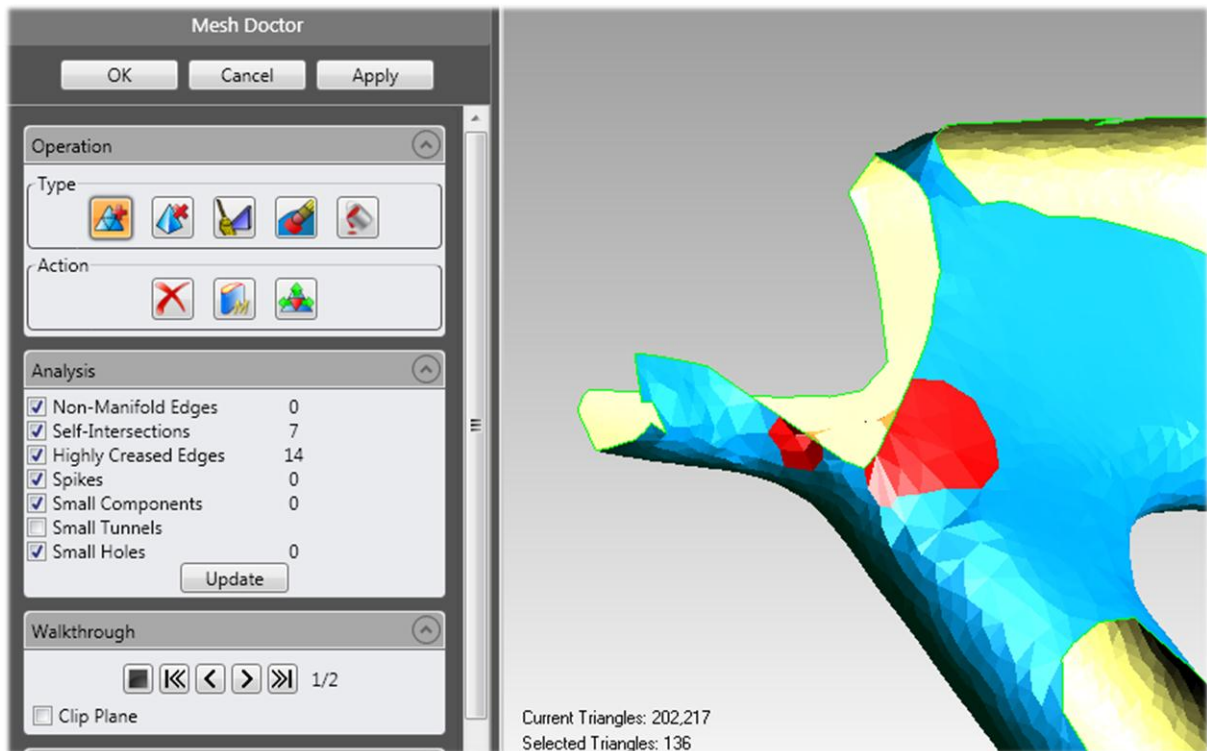


Παρόμοιες λειτουργίες εκτελούνται και στα 2 πίσω ψαλίδια του πλαισίου, μιας και οι επιφάνειες μεγάλης καμπυλότητας είναι πιο δύσκολο να τριγωνοποιηθούν από το λογισμικό και να εμφανιστούν με μεγάλη πιστότητα ως επιφάνειες πολυγώνων.

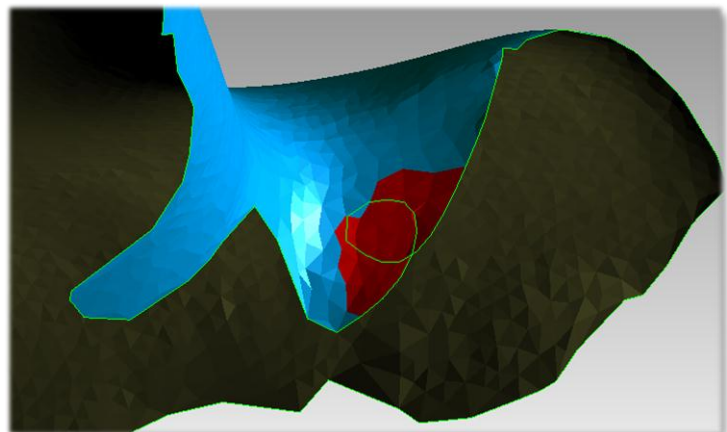
Έχοντας ολοκληρώσει και τις τοπικές εκτελούμε 2 τελευταίες λειτουργίες στο σύνολο της γεωμετρίας. Αρχικά απομακρύνουμε οποιαδήποτε καρφιά εμφανίζονται στην πολυγωνική επιφάνεια μέσω του εργαλείου Remove Spikes το οποίο ισοπεδώνει πολύγωνα που τα σχηματίζουν και τελειώνουμε με μία γενική απογραφή της εργασίας μας με το Mesh Doctor.

Το Mesh Doctor αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο εργαλείο που επιδιορθώνει όλων των ειδών τις ατέλειες στην γεωμετρία, από non-manifold πολύγωνα και self-intersections της επιφάνειας, μέχρι τρύπες στο πολυγωνικό πλέγμα και γεωμετρικές διπλού τοιχώματος τύπου τούνελ. Η λειτουργία walkthrough που ενσωματώνει δείχνει στον χρήστη κάθε μία από τις προβληματικές περιοχές ενώ ταυτόχρονα επιλέγει αυτόματα τα πολύγωνα που αποτελούν μέρος του προβλήματος και πρέπει να διορθωθούν. Τις περισσότερες ατέλειες του πλέγματος, ένα τόσο δυνατό εργαλείο μπορεί να τις διορθώσει αυτόματα με ελάχιστη είσοδο από τον χρήστη, αλλά δίνεται η δυνατότητα επίβλεψης στον χρήστη για να αποφευχθούν λάθος διορθώσεις που οδηγούν σε άκυρες γεωμετρίες ή και για να παραβλεφθούν περιοχές που ο

χρήστης είτε πιστεύει ότι δεν είναι τελικά λάθος είτε θα διορθώσει χειροκίνητα αργότερα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου παραμένει βέβαια η δυνατότητα που δίνει στον χρήστη να βρεθούν γεωμετρίες που μπορεί να μην είναι ορατές εκ πρώτης όψεως ή και να είναι πλήρως αόρατες μιας και περικλείονται από υπάρχουσες επιφάνειες.



Για το προϊόν της πρώτης σάρωσης το Mesh Doctor βρίσκει πρόβλημα μόνο στο εσωτερικό τμήμα του δεξιά bracket έδρασης του πίσω άξονα, και ένα self-intersection λόγω κακής οριοθέτησης του πλέγματος στο Head Tube. Επιλέγεται η διαγραφή των προβληματικών πολυγώνων, μιας και θα επικαλυφθούν από τις επόμενες συμπληρωματικές σαρώσεις.

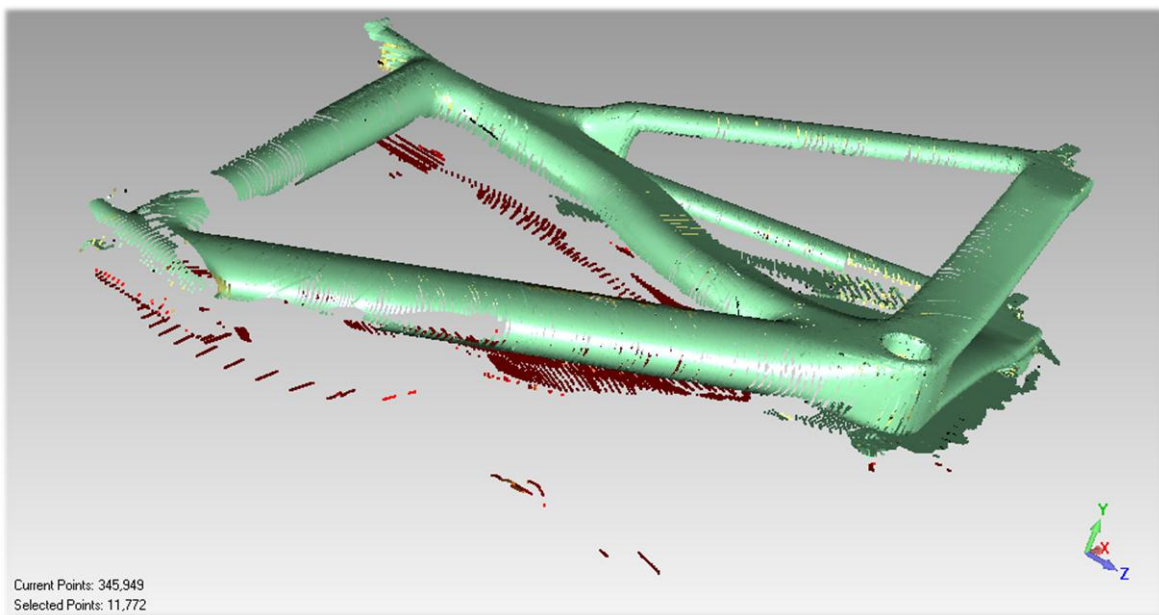


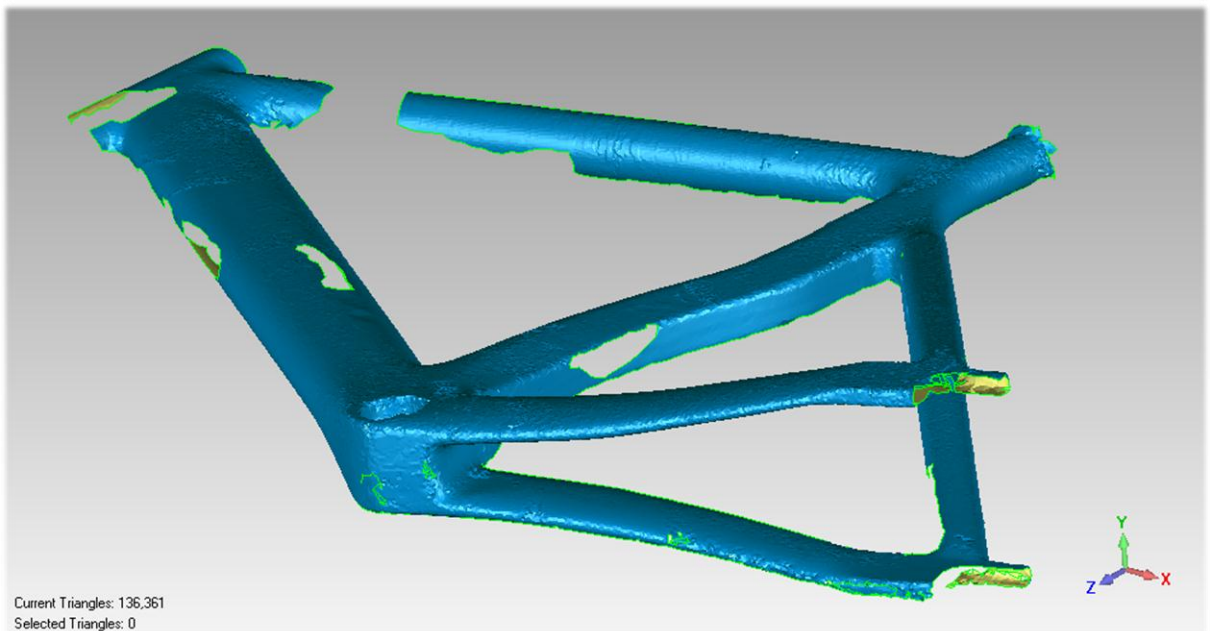
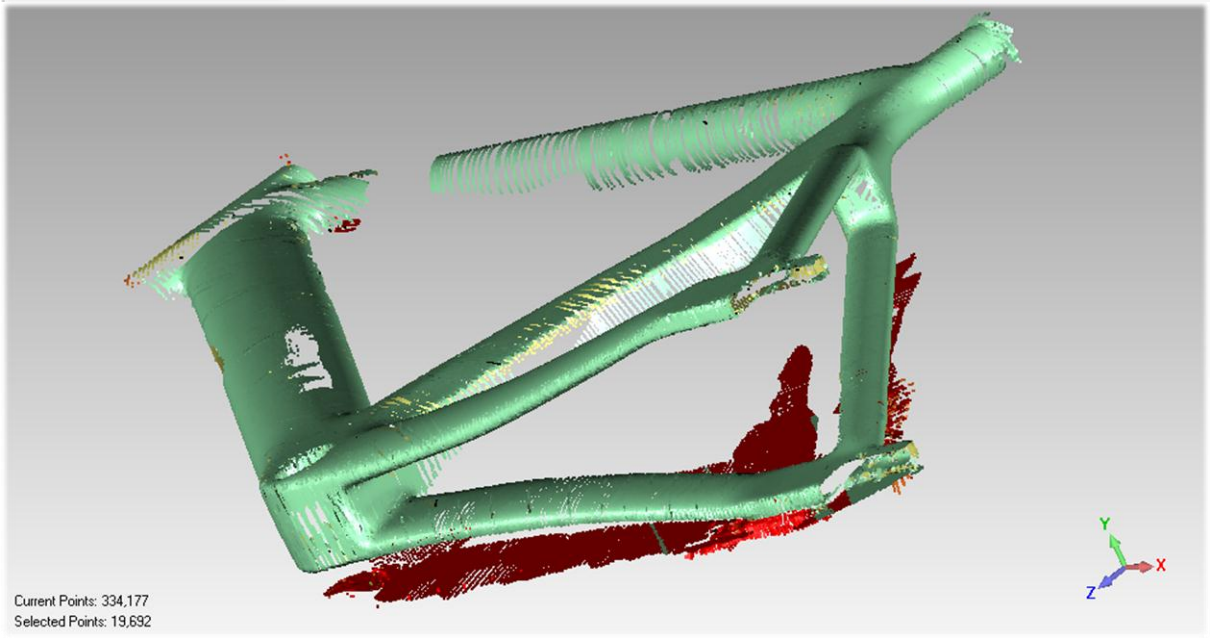
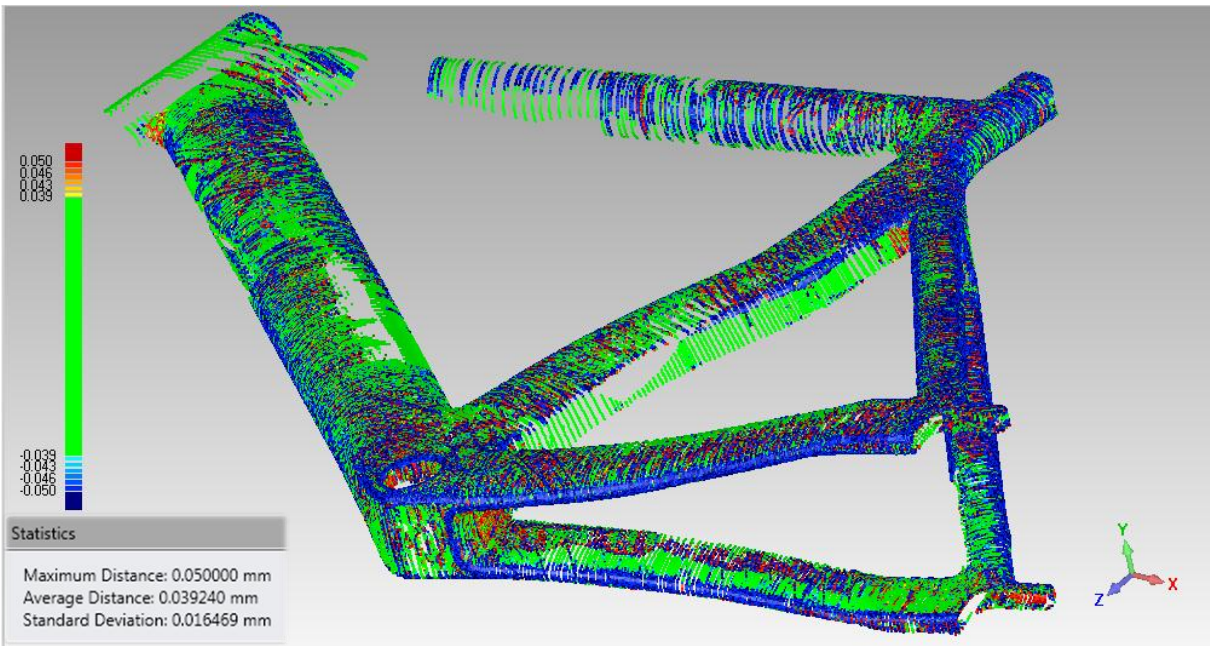
Έχοντας ολοκληρώσει την επεξεργασία της πρώτης σάρωσης, συνεχίζουμε με τα ίδια εργαλεία να εργαζόμαστε για τις συμπληρωματικές. Λόγω της γεωμετρίας του προϊόντος προς ψηφιοποίηση, ήταν αδύνατον με μία σάρωση να ληφθεί νέφος σημείων για το σύνολο του, μιας και υπάρχουν σημεία στα οποία απλούστατα δεν χωρούσε να μπει το άκρο σάρωσης του μηχανήματος κι επιφάνειες στις οποίες στηρίζονταν το πλαίσιο. Η ανάγκη για ολοκληρωτική σάρωση, παρά την απόλυτη συμμετρία του πλαισίου είναι πραγματική μιας και δεν υπάρχουν πληροφορίες με τις οποίες να βρούμε το πραγματικά επίπεδο συμμετρίας, και να το εισάγουμε στο Geomagic ή το Solidworks. Αν όμως έχουμε μία πλήρη εικόνα του μοντέλου στο Geomagic με σωστή επεξεργασία που να έχει ως βάση το προϊόν μίας σωστής σάρωσης, το λογισμικό μας δίνει την δυνατότητα ανίχνευσης του επιπέδου συμμετρίας.

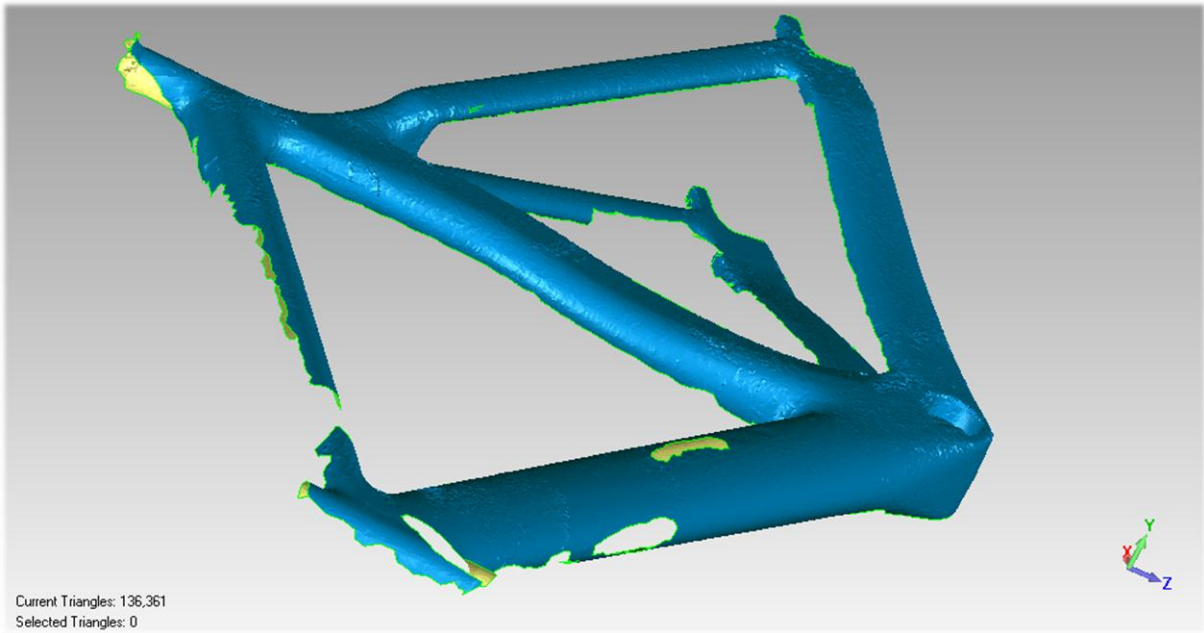
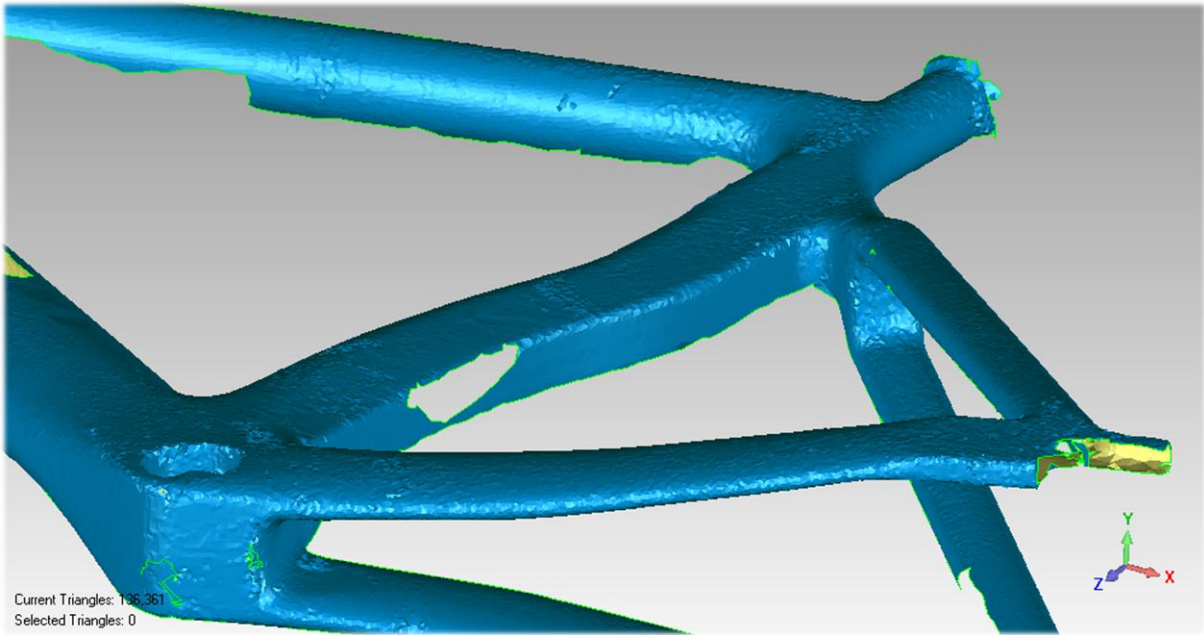
Οι επόμενες σαρώσεις δεν απαιτούν συγκεκριμένη τοποθέτηση του πρωτοτύπου. Το πλαίσιο βέβαια θα εμφανιζόταν σε διαφορετική θέση στο περιβάλλον το Geomagic, μιας και η θέση του νέφους σημείων σε σχέση με την σταθερή αρχή των αξόνων του μηχανήματος θ' άλλαζε. Όμως κατά την επάλληλη τοποθέτηση των πληροφοριών των σαρώσεων, όλες οι επιφάνειες επανατοποθετούνται στον χώρο προς δημιουργία μίας ενιαίας. Επίσης κατόπιν της εύρεσης του επιπέδου συμμετρίας του προϊόντος, αυτό τοποθετείται στην τελική του θέση με επιλεγμένη γι' αρχή των αξόνων X & Y το κέντρο του άξονα των πεντάλ και με το επίπεδο συμμετρίας να είναι το $z = 0$.

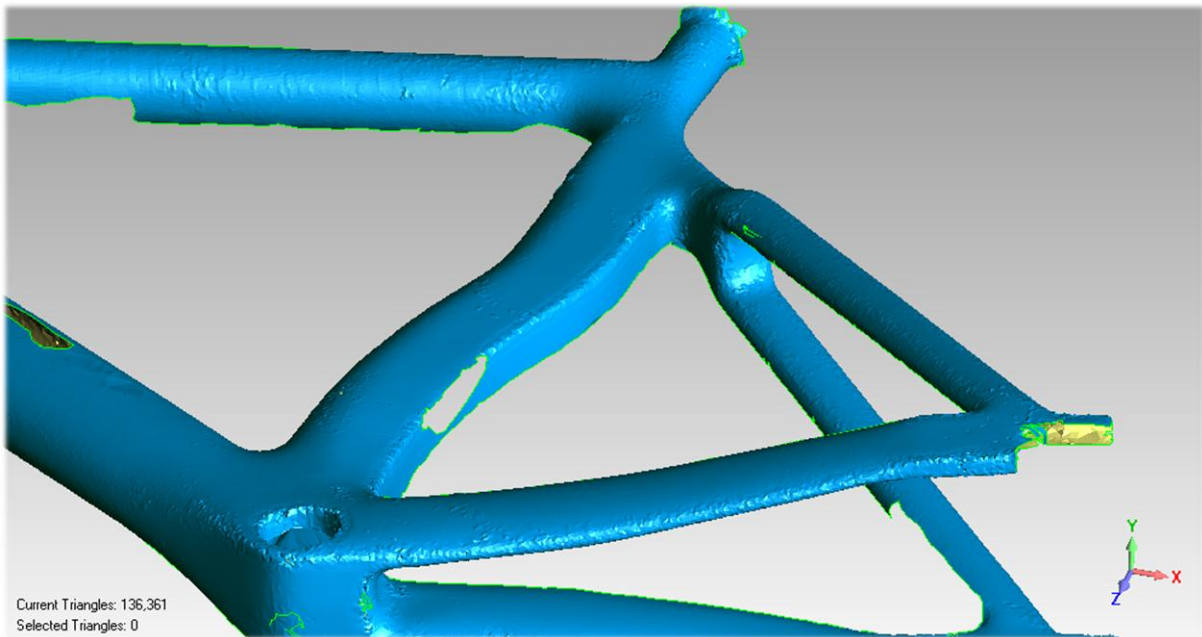
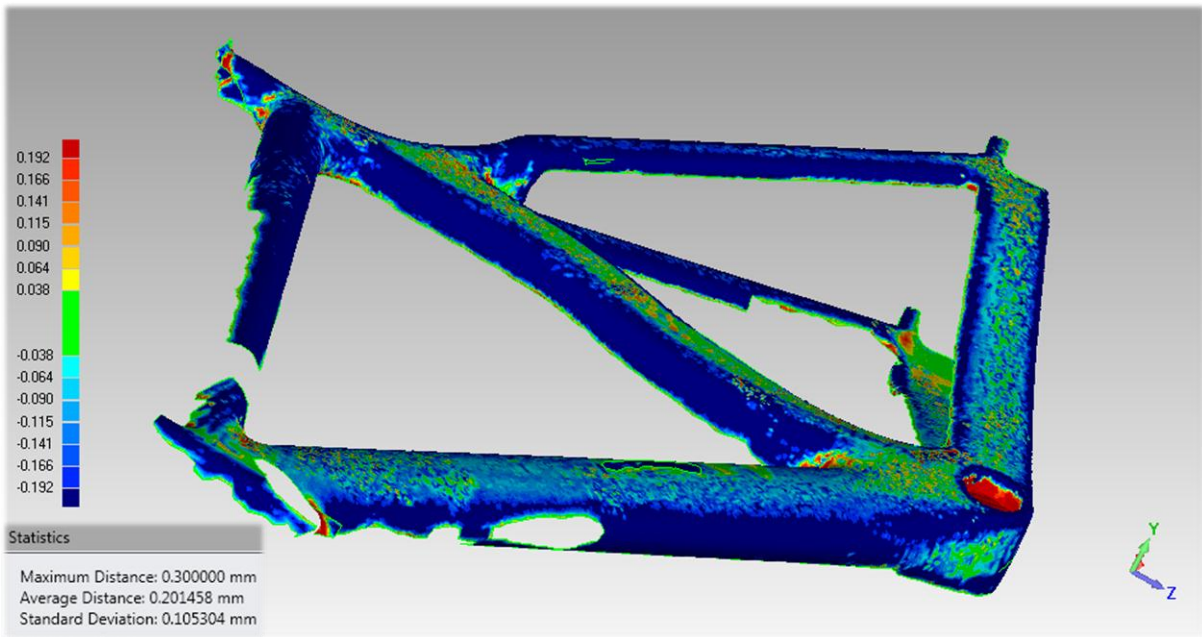
Η επόμενη σάρωση έγινε από την απέναντι πλευρά του πλαισίου, κι αν έμεναν τμήματα από τα οποία δεν πέρασε ο σαρωτής λόγω παράλειψης, ή στο τέλος της γενικής επεξεργασίας προέκυπτε ανάγκη για βελτίωση κάποιων που φαινόταν αρκετά προβληματικά, θα πραγματοποιούνταν περαιτέρω σαρώσεις.

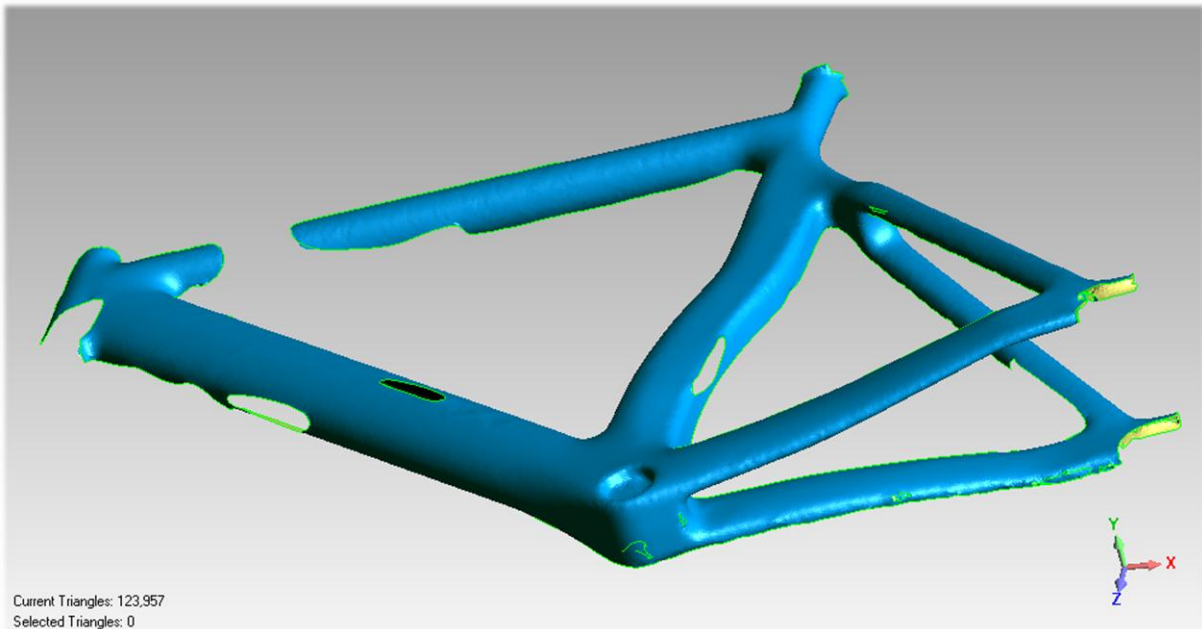
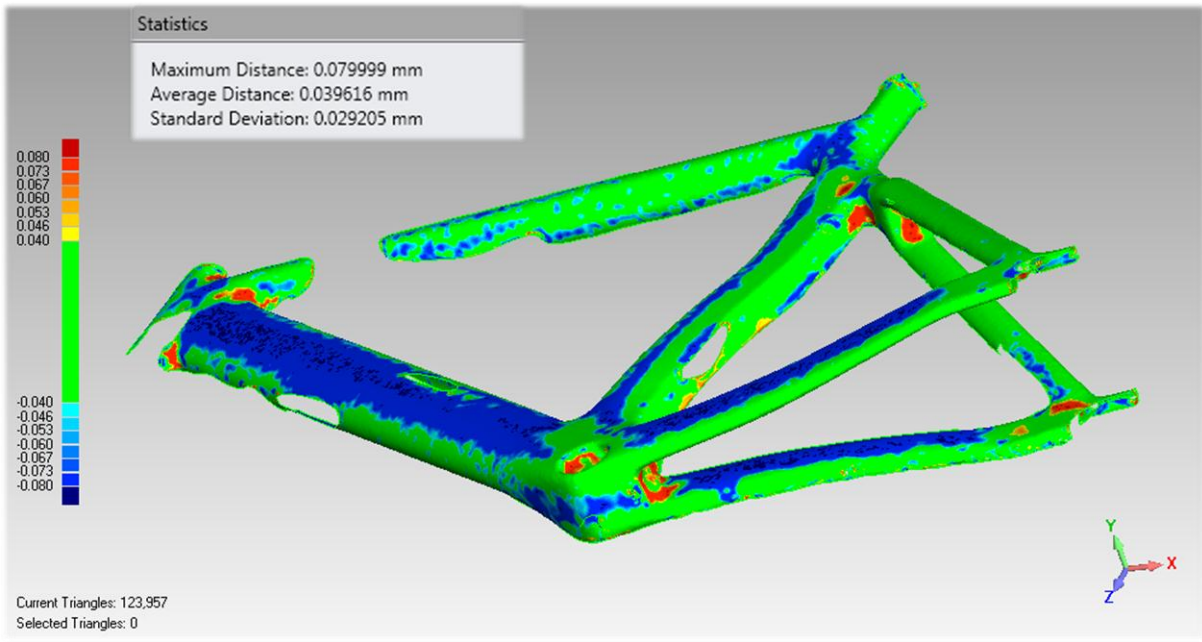
Η δεύτερη σάρωση έδωσε ένα νέφος που αποτελείται από περίπου 346 χιλιάδες σημεία και εργαζόμαστε ακριβώς όπως και στην πρώτη. Αρχικά ξεχωρίζουμε νήσους σημείων που βρίσκονται εκτός του μοντέλου, είτε αυτόματα με την βοήθεια του λογισμικού είτε χειροκίνητα με επιλογή, και στην συνέχεια εκτελούμε λειτουργίες μείωσης θορύβου. Η βήμα-βήμα ανάλυση όπως ανωτέρω, αποτελεί μάλλον πλεονασμό μιας και οι διαδικασίες έχουν εξηγηθεί ήδη, οπότε ακολουθούν ενδεικτικές φωτογραφίες της διαδικασίας.



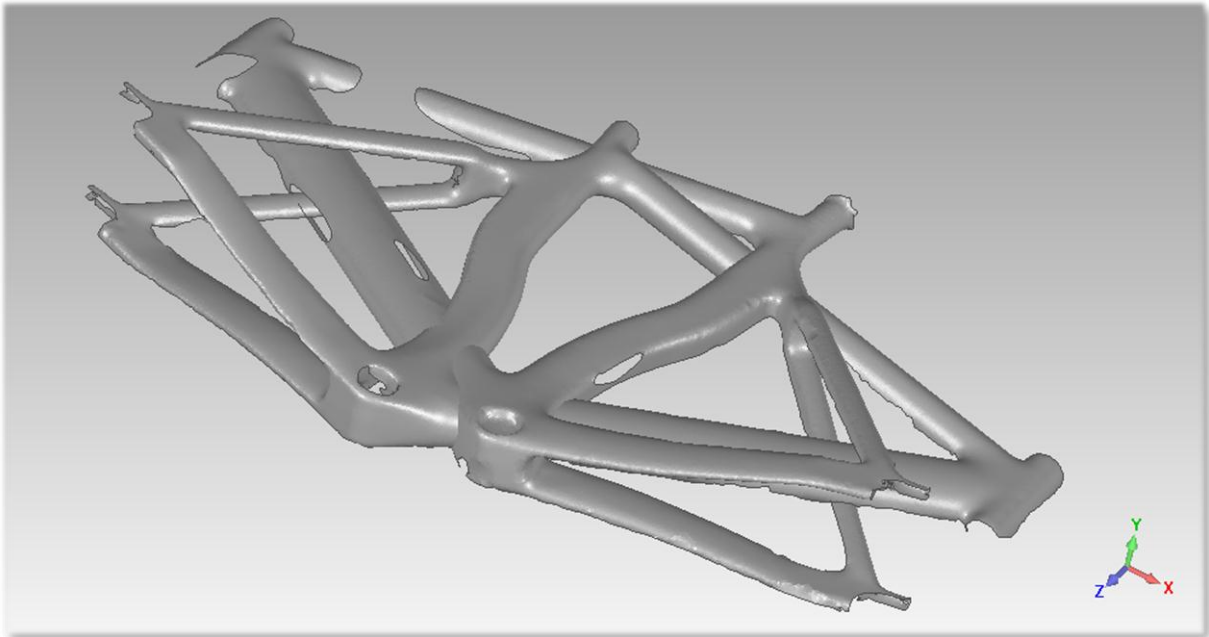






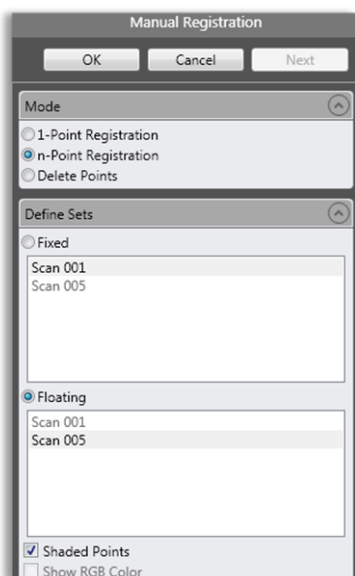


Τελειώνοντας με την επεξεργασία της δεύτερης σάρωσης προχωράμε στον συγκερασμό των αποτελεσμάτων προς δημιουργία του ολοκληρωμένου προϊόντος. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ποιότητα της ένωσης, οι πολυγωνικές επιφάνειες μετατρέπονται και πάλι σε νέφη σημείων, μιας και θα διευκολύνει τον υπολογισμό αλληλεπικαλύψεων για το λογισμικό. Η συγκεκριμένη μετατροπή δεν είναι απαραίτητη, αλλά στην περίπτωσή μας φαίνεται να δούλεψε καλύτερα για την ένωση, σε σχέση με την χρήση των πολυγωνικών επιφανειών. Στην συνέχεια εισάγουμε τα προϊόντα νέφη των δύο σαρώσεων στο ίδιο περιβάλλον.



Η ένωση των προϊόντων της επεξεργασίας των δύο σαρώσεων γίνεται σε δύο στάδια:

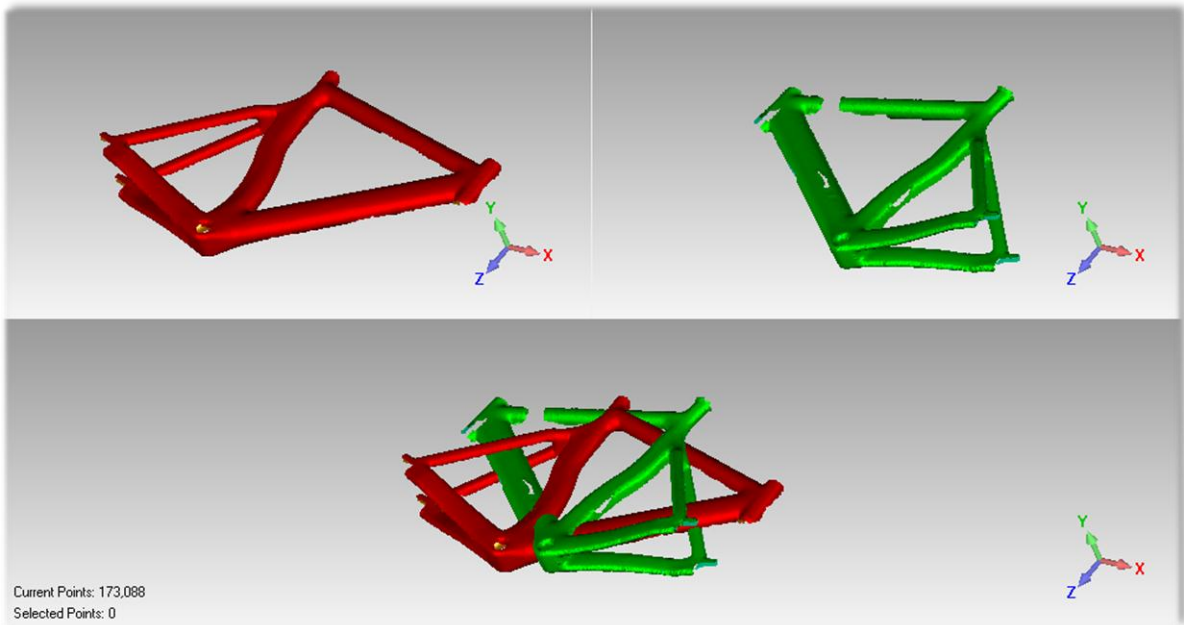
1. Με το ένα νέφος ακίνητο, μετακινούμε κατάλληλα το δεύτερο χειροκίνητα ώστε να είναι σχετικά κοντά με το εργαλείο Manual Registration.
2. Με τα νέφη πλέον σχετικά κοντά το λογισμικό αρχίζει και τα μετακινεί ώστε να ενωθούν μέχρις ότου να επιτευχθεί η επιθυμητή από τον χρήστη ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων στις αλληλεπικαλύψεις.



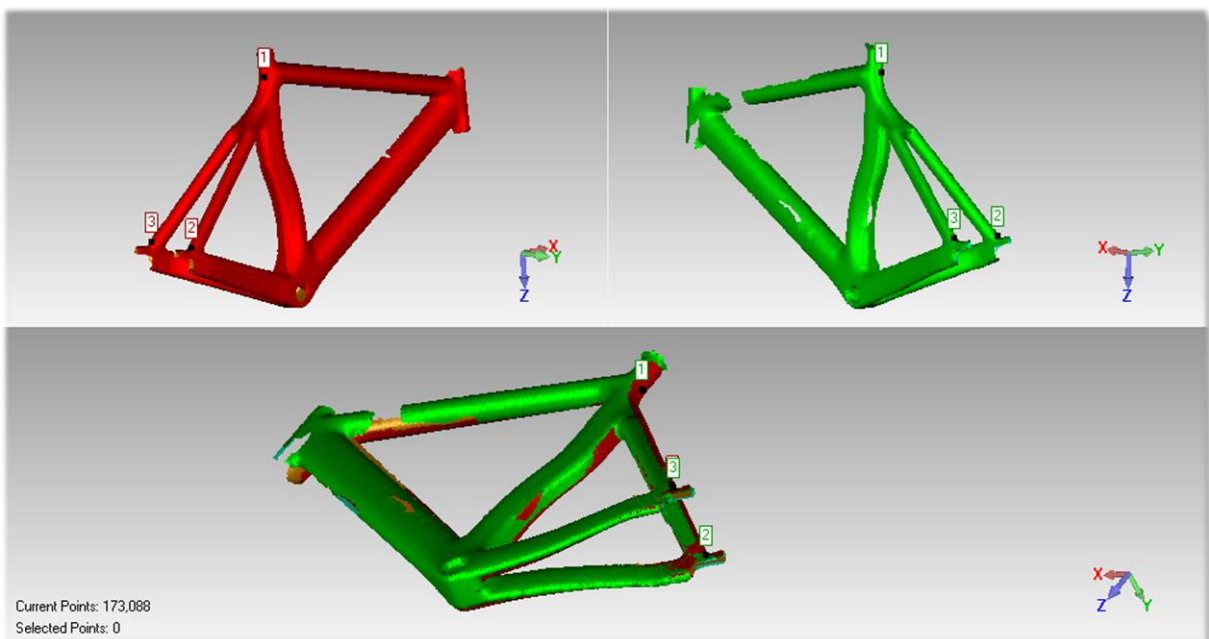
Η αρχική χειροκίνητη τοποθέτηση έχει ως εξής:

Το λογισμικό επιτρέπει την αρχική κατά προσέγγιση επάλληλη τοποθέτηση με τον προσδιορισμό αντίστοιχων σημείων των σαρώσεων. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει με την επιλογή ενός μόνο ή και περισσότερων σημείων, κατά την βούληση του χρήστη και τις απαιτήσεις των υπ' εξέτασιν σαρώσεων. Αν επιλεγεί η καταχώρηση n-point θα πρέπει να επιλεγούν 3 έως 9 αντίστοιχα σημεία.

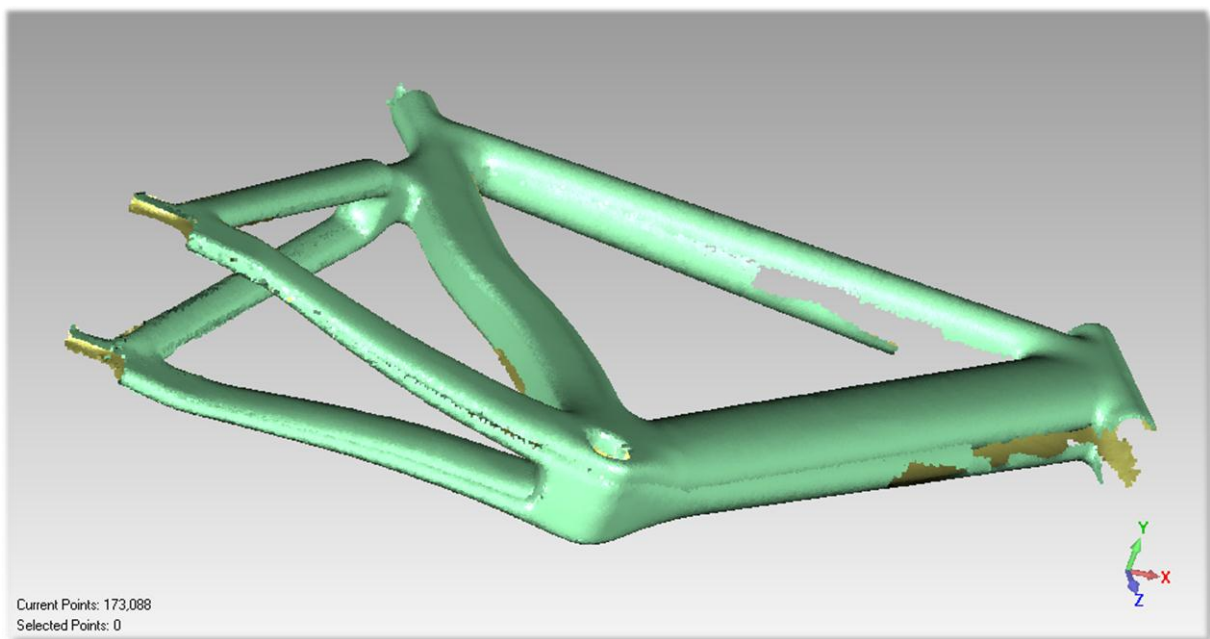
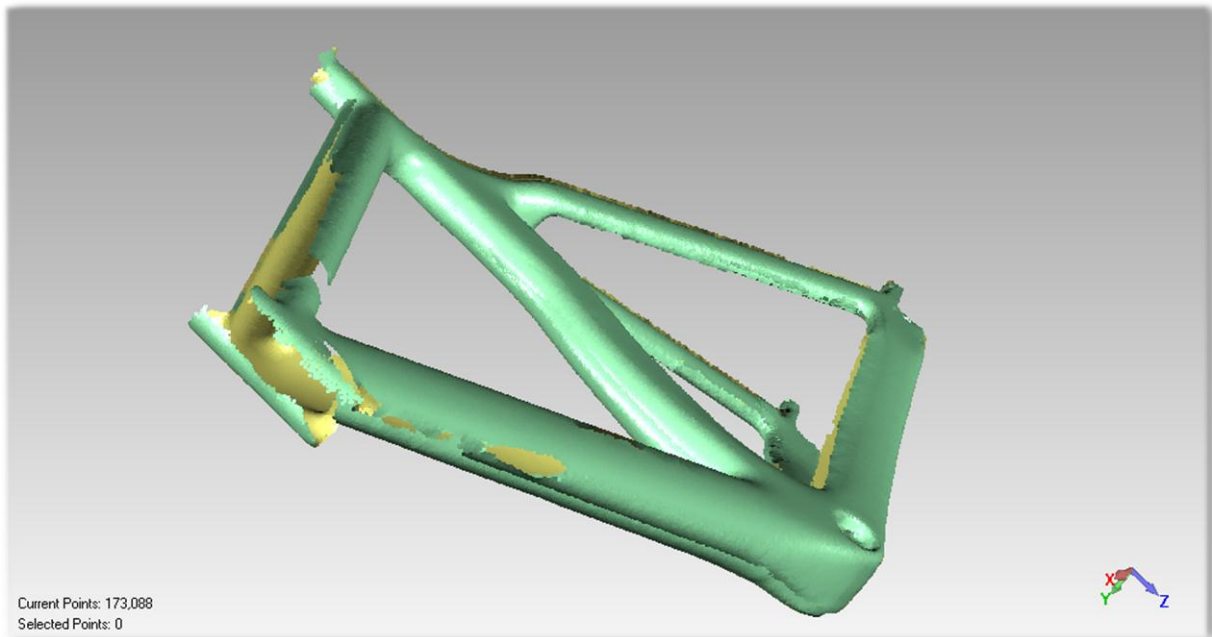
Επιλέγουμε να διατηρήσουμε σταθερή την πρώτη σάρωση και να μετακινήσουμε σχετικά μ' αυτήν την δεύτερη.



Τα καταλληλότερα αντίστοιχα σημεία είναι ένα κοντά στο επίπεδο συμμετρίας του πλαισίου και από ένα σε κάθε bracket του πίσω άξονα. Είναι εύκολο να ορίσουν την κατεύθυνση των σαρώσεων, αλλά και όντας ακραία σημεία μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την σχετική γωνία μεταξύ των σαρώσεων, κάνοντας πιο εύκολη την εκτέλεση της τελικής αυτοματοποιημένης ένωσης στο επόμενο στάδιο. Επιλέγοντάς τα, το λογισμικό επανατοποθετεί την δεύτερη (ορισμένη ως floating) σάρωση ως προς την πρώτη (ορισμένη ως fixed) με το ακόλουθο αποτέλεσμα:



Το τελικό αποτέλεσμα του πρώτου σταδίου της ένωσης είναι το εξής:

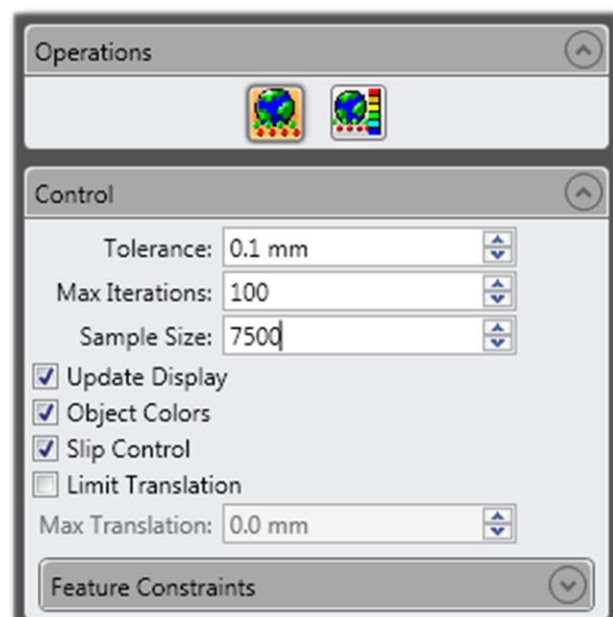


Είναι εμφανές από τις εικόνες πως παρά το γεγονός ότι τα νέφη των δύο σαρώσεων έχουν έρθει σημαντικά κοντά, παραμένουν μη-ευθυγραμμισμένα και απαιτείται συμπληρωματική εργασία. Η ακρίβεια που απαιτείται είναι αδύνατο να επιτευχθεί με χειροκίνητα μέσα, όπως η επιλογή αντίστοιχων σημείων που μόλις έλαβε χώρα, μιας και ακόμα και σε απόλυτη μεγέθυνση θα πρέπει να επιλεγούν εκατοντάδες απολύτως αντίστοιχα σημεία για να φτάσουμε σε επίπεδα ακριβείας που θα μας επιτρέψουν πέρα από την απλή αναπαράσταση του προϊόντος στον υπολογιστή, να εκτελέσουμε και περαιτέρω διεργασίες όπως η ανίχνευση γεωμετρικών τόπων όπως επίπεδα συμμετρίας, κυλίνδρους, σφαίρες κ.ά.

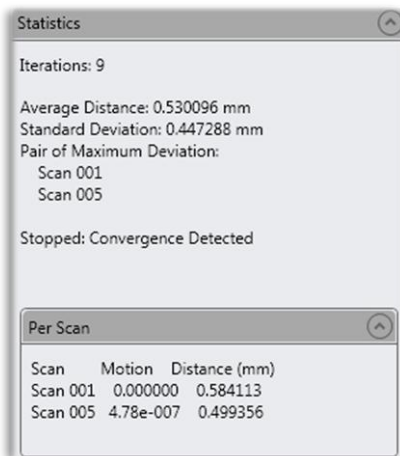
Γι' αυτόν τον λόγο ακριβώς το λογισμικό παρέχει την λειτουργία Global Registration, η οποία βελτιώνει την κατά προσέγγιση τοποθέτηση δύο αντικειμένων. Η επανατοποθέτηση γίνεται με σκοπό πανομοιότυπες περιοχές των προς ένωση αντικειμένων να καταλάβουν την ίδια θέση στον χώρο του μοντέλου και τελικώς να δημιουργηθεί ένα πιο ολοκληρωμένο, σύνθετο πλέον, αντικείμενο. Η λειτουργία Global Registration βασίζεται σε ασυνεχείς μετακινήσεις προς αυτόν τον σκοπό, με κάθε μία να μειώνει την απόσταση μεταξύ των πανομοιότυπων περιοχών. Τα στοιχεία ελέγχου της περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται σε:

- Ανοχή: η μέση απόσταση μεταξύ των σημείων των προς ένωση περιοχών που θα δώσει την εντολή για τερματισμό της λειτουργίας
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων: ο αριθμός επαναλήψεων μέχρι να επιτευχθούν οι στόχοι της λειτουργίας. Αν οι στόχοι επιτευχθούν σε λιγότερες επαναλήψεις, η λειτουργία θα τερματιστεί.
- Μέγεθος δείγματος: ο αριθμός σημείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά την επανατοποθέτηση για να οδηγήσουν την διαδικασία.

Μεγαλύτερος αριθμός σημαίνει καλύτερη ακρίβεια, αλλά μεγαλώνει πολύ τον χρόνο εκτέλεσης (ανάλογα πάντα με τις δυνατότητες του σταθμού εργασίας που εκτελείται το λογισμικό).



Δίδονται και περισσότερες επιλογές στον χρήστη οι οποίες όμως δεν βρίσκουν εφαρμογή ή δεν προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις. Μεταξύ αυτών είναι ο περιορισμός - με αυτόματα ή χειροκίνητα κριτήρια - των μετακινήσεων γι' αντικείμενα με ελάχιστα χαρακτηριστικά (όπως τμήματα καλυμμάτων) ώστε να περιοριστούν οι υπερβολικές μετατοπίσεις που παράγουν ανακριβή αποτελέσματα, αλλά και οι συσχετισμοί χαρακτηριστικών όπως σφαιρικές επιφάνειες που έχουν τοποθετηθεί επί τούτου στο προϊόν προς σάρωση για την διευκόλυνση της διαδικασίας του registration. Το προϊόν του παρόντος, αποτελεί ένα πλαίσιο ποδηλάτου με πολλές οργανικές επιφάνειες, αλλά και ξεχωριστά χαρακτηριστικά, κι ως εκ τούτου είναι σχετικά εύκολο για το λογισμικό να βρει ικανό δείγμα σημείων για να εκτελέσει το registration με ικανοποιητικότερη ακρίβεια.



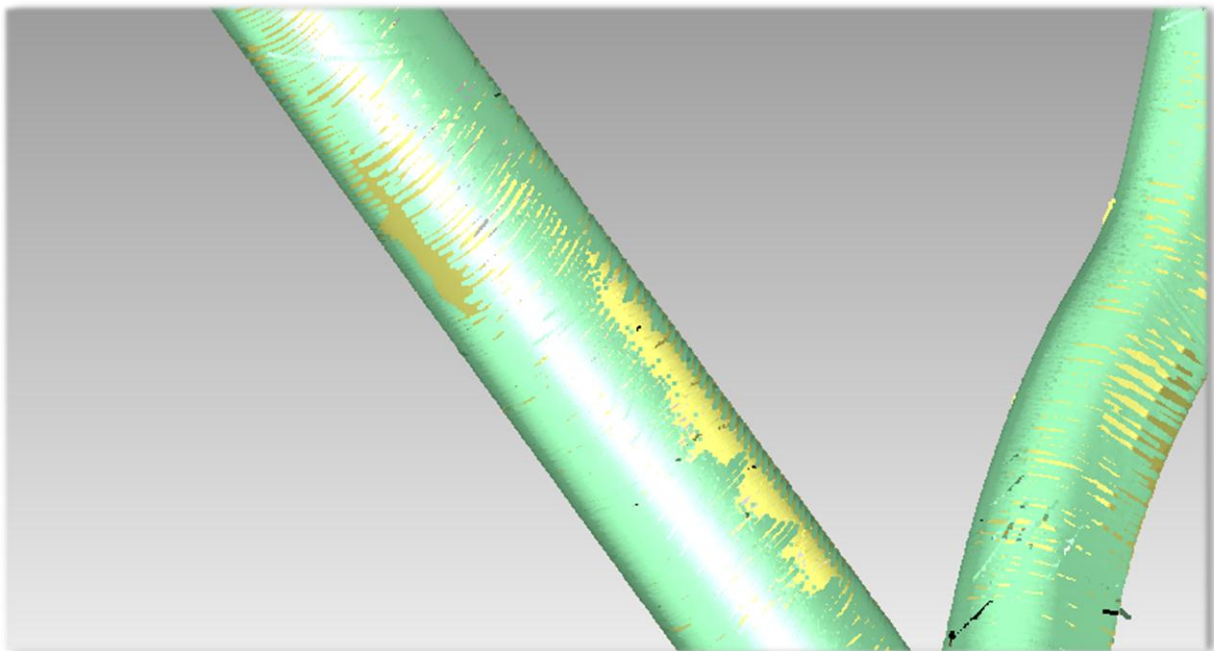
Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται κι από τα στατιστικά του Global Registration:

Το Geomagic χρειάζεται μόλις 9 επαναλήψεις για να πετύχει συνένωση με ακρίβεια μισού χιλιοστού του μέτρου.

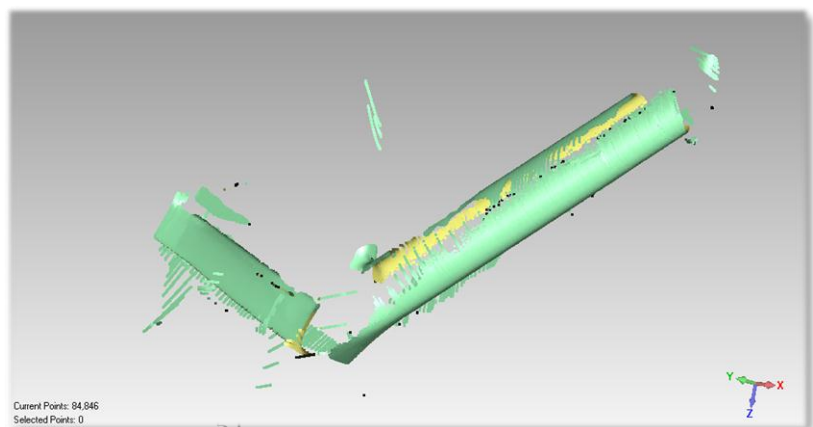
Κατόπιν της επιτυχούς τοποθέτησης πραγματοποιούμε ένωση των νεφών μέσω της εντολής Combine Point Objects.



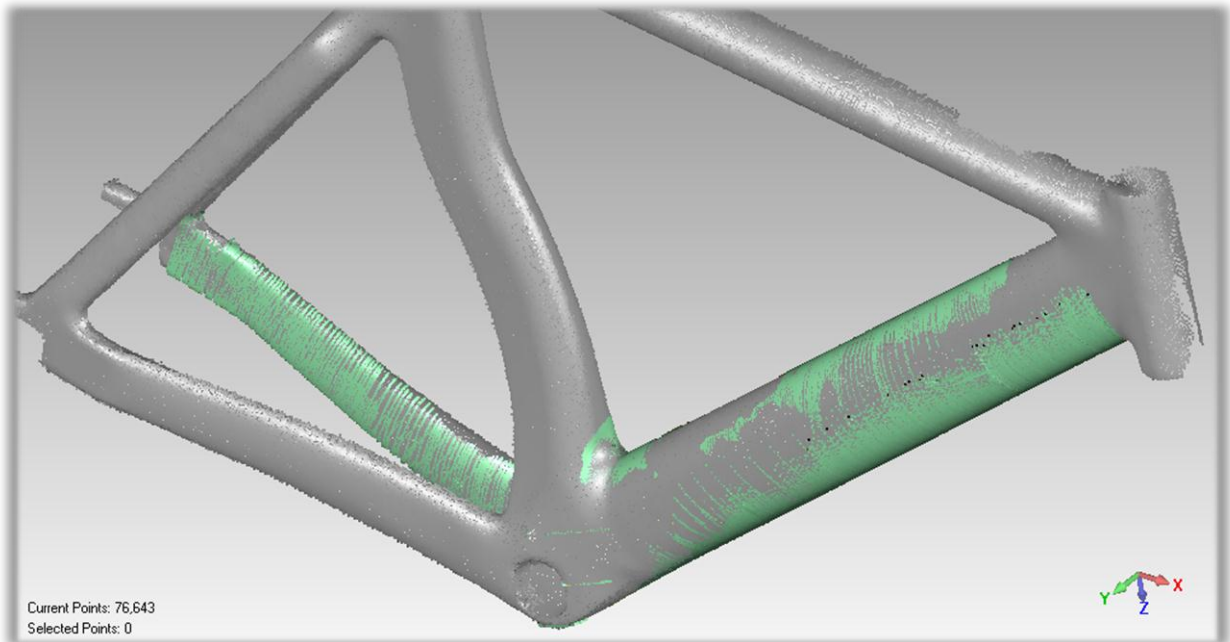
Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι κατά την πρώτη σάρωση, λόγω λανθασμένου χειρισμού του σαρωτή, αποθηκεύτηκαν δύο διαφορετικά νέφη σημείων. Μέχρι στιγμής δεν θα μπορούσαμε να ξέρουμε αν θα φανεί χρήσιμο το δεύτερο μικρό νέφος σημείων εκείνης της επίσκεψης στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων, μιας και δεν είχαμε σαφή εικόνα του ολοκληρωμένου μοντέλου και τυχόντων κενών στην επιφάνειά του.



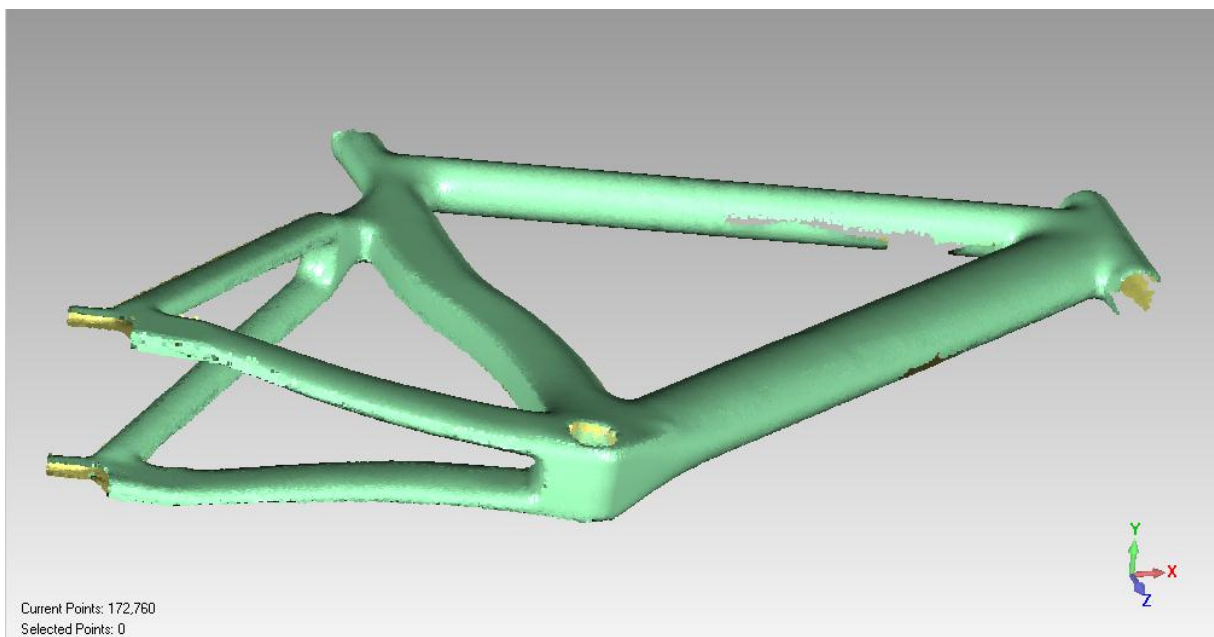
Πλέον, με ολοκληρωμένο το registration των κυρίως σαρώσεων, εξετάζουμε το προϊόν της εργασίας μας, και διαπιστώνεται ανάγκη χρήσης και της πρώτης εκείνης μικρής σάρωσης.



Αφού καθαριστεί από εξωτερικά σημεία και υποστεί κατάλληλες βελτιώσεις μείωσης θορύβου, προχωράμε σε δεύτερο Registration με το σχεδόν ολοκληρωμένο μοντέλο μας. Επειδή όμως η σάρωση αυτή έγινε μαζί με την πρώτη, και με το πλαίσιο αμετακίνητο στην τράπεζα του σαρωτή και στο πρώτο registration το νέφος της πρώτης σάρωσης αποτέλεσε την αμετακίνητη αναφορά, το ενωμένο νέφος, με το μικρό νέφος της πρώτης επίσκεψης βρίσκονται στην ίδια σχετική θέση στο χώρο του μοντέλου.



Ως εκ τούτου, απαιτείται μόνο ένα δεύτερο και τελευταίο Global Registration, απλά για να αποφευχθεί οποιαδήποτε απόκλιση, και τελικώς να προχωρήσουμε στην ένωση όλων των σημείων.

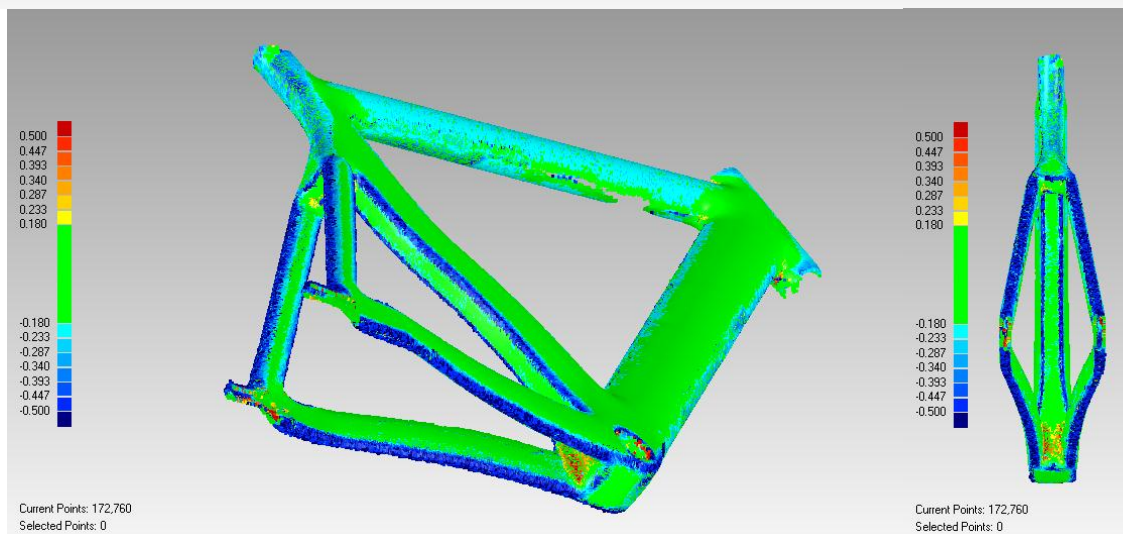
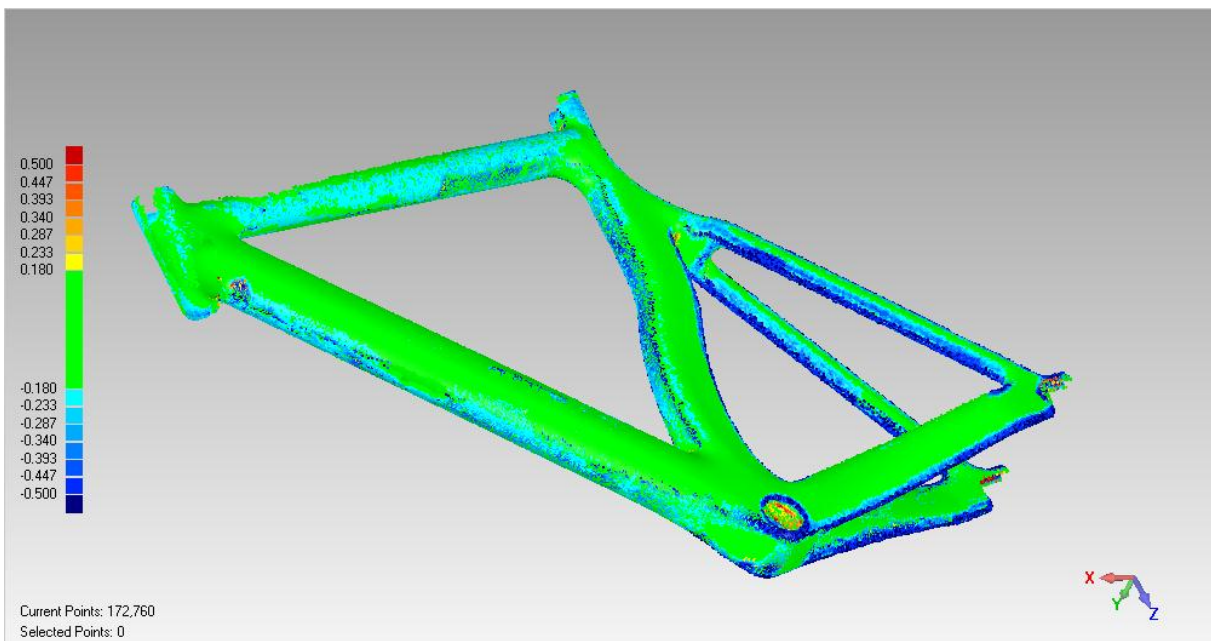


Τα υπόλοιπα κενά, είναι κενά που δεν μας απασχολούν, μιας και αποτελούν τμήματα 'εύκολων' γεωμετριών που θα επεξεργαστούν στο Solidworks αργότερα.

Το μοντέλο πλέον είναι ολοκληρωμένο από άποψη γεωμετρίας, και οι τελικές εργασίες είναι:

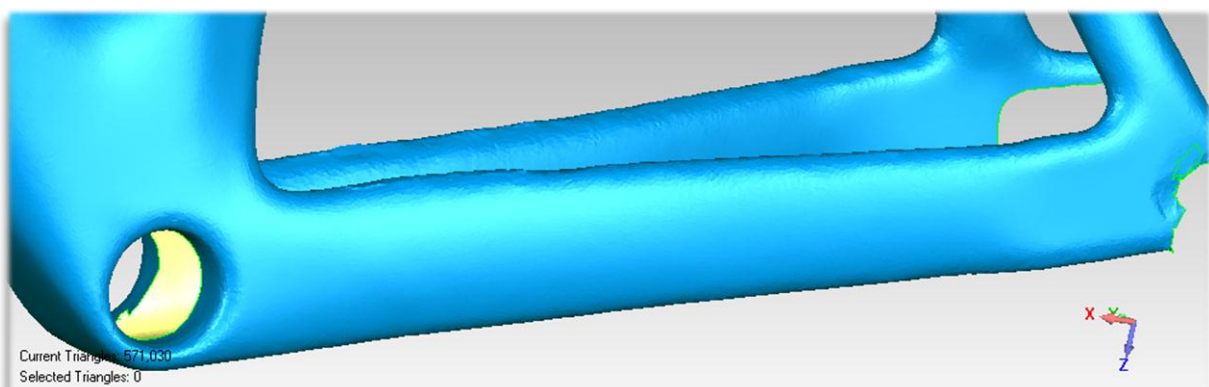
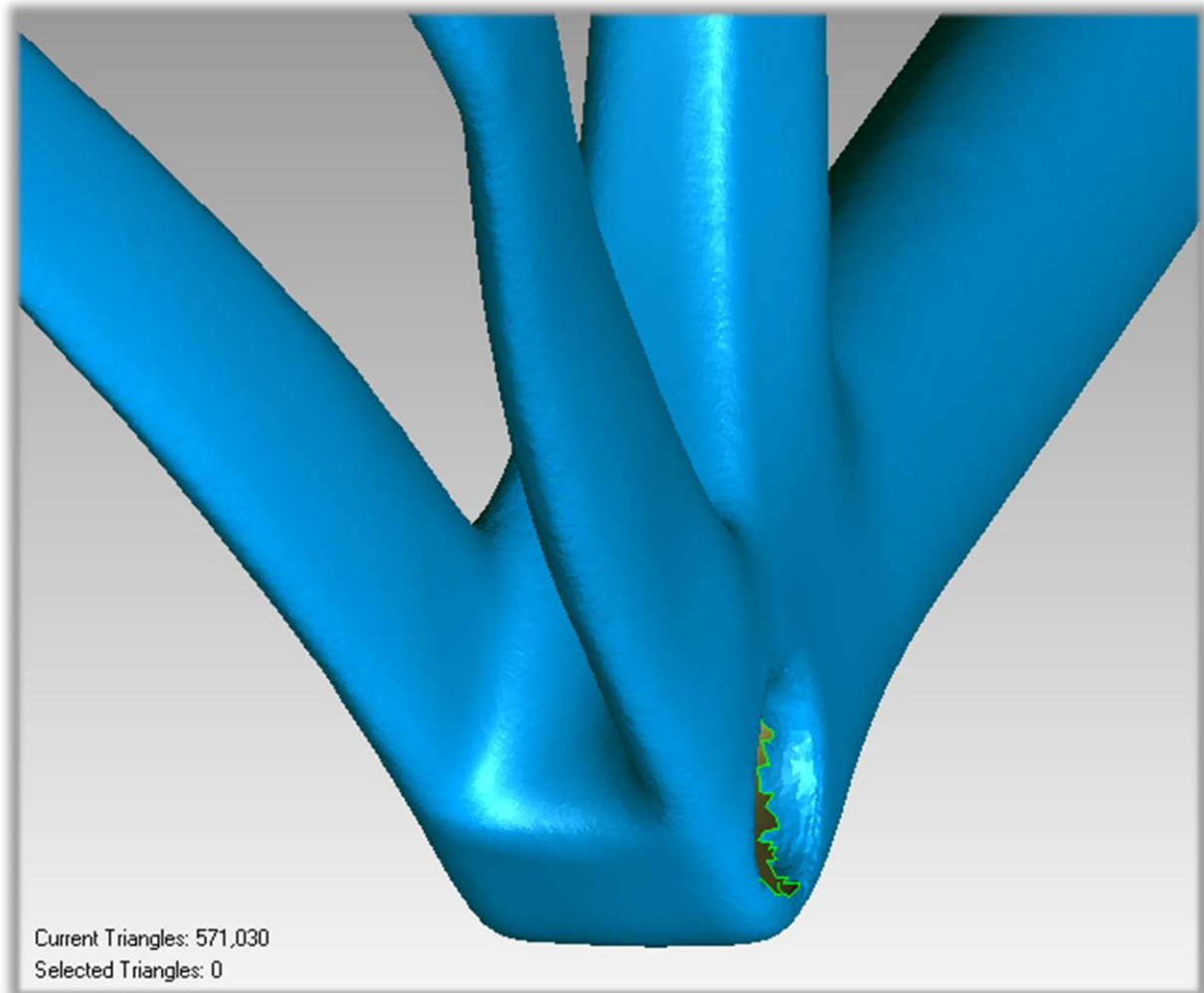
- Τελευταία μείωση θορύβου για το registered νέφος
- Wrapping του νέφους για δημιουργία πολυγωνικής επιφάνειας
- Βελτίωση της πολυγωνικής επιφάνειας
- Μετατροπή της επιφάνειας από πολυγωνική σε NURBS
- Βελτιστοποίηση της επιφάνειας NURBS για καλύτερη εισαγωγή του στο Solidworks και καλύτερη συνεργασία της με το pre-processor του Solidworks Simulation
- Ολοκλήρωση του μοντέλου στο Solidworks

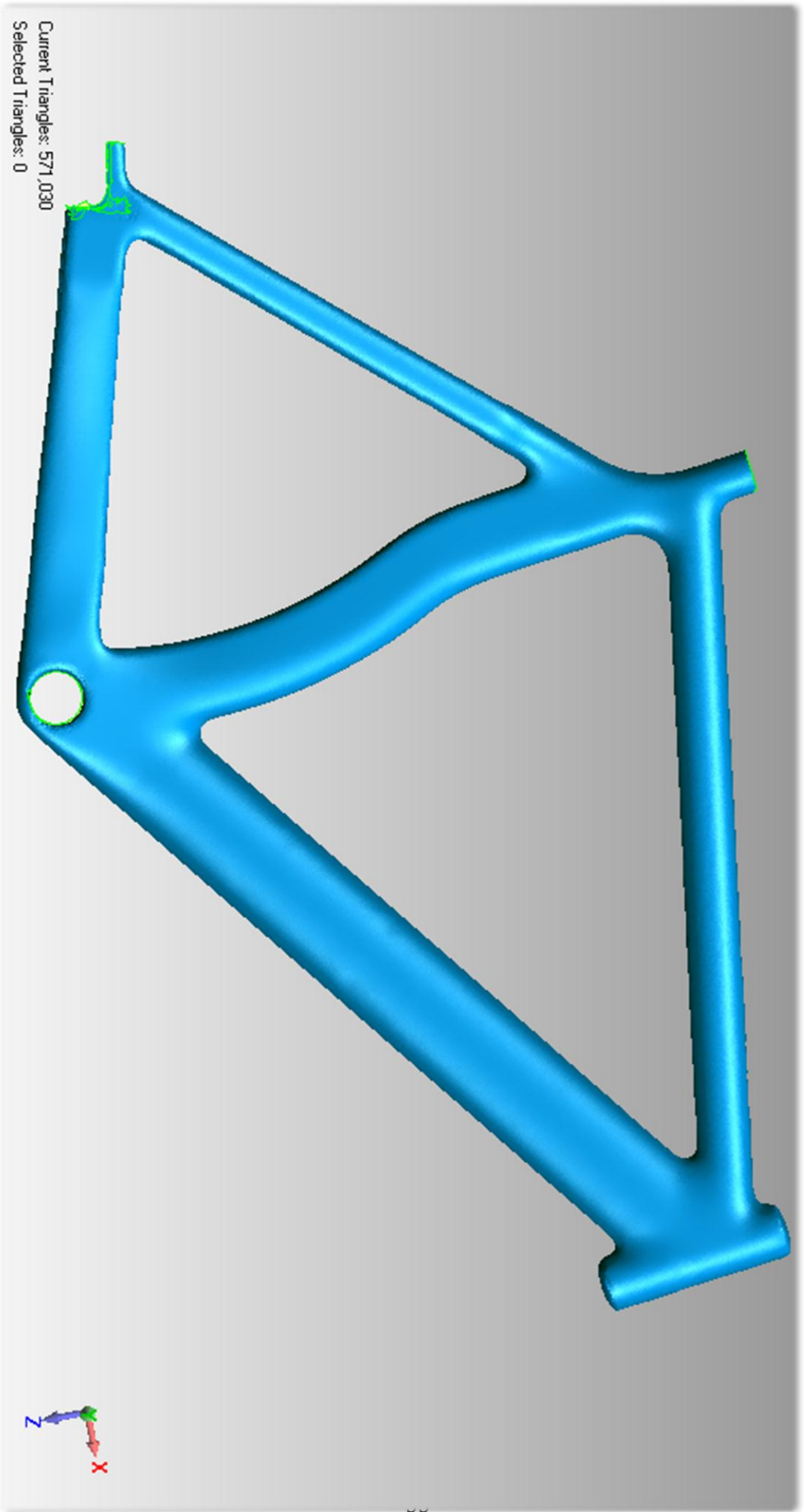
Ο θόρυβος του registered νέφους είναι μεγαλύτερος από αυτόν της κάθε συνιστώσας, μιας και προστίθενται οι ατέλειες του Global Registration. Στα τμήματα με μεγάλο δείγμα σημείων όπως το Down Tube είναι πολύ μικρός, αλλά σε τμήματα μεγάλης καμπυλότητας έχουμε περισσότερο.



Κατόπιν της μείωσης θορύβου, το τελικό νέφος σημείων 'τυλίγεται' σε πολυγωνική επιφάνεια η οποία υπόκειται στις κλασσικές διαδικασίες βελτίωσης που συζητήθηκαν νωρίτερα. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην ομαλότητα της επιφανείας και την διατήρηση των στοιχείων καμπυλότητας.

Το τελικό αποτέλεσμα μετά από πολύωρη επεξεργασία και πολυάριθμες δοκιμές με τις ρυθμίσεις των εργαλείων βελτίωσης του λογισμικού ακολουθεί στις επόμενες φωτογραφίες:

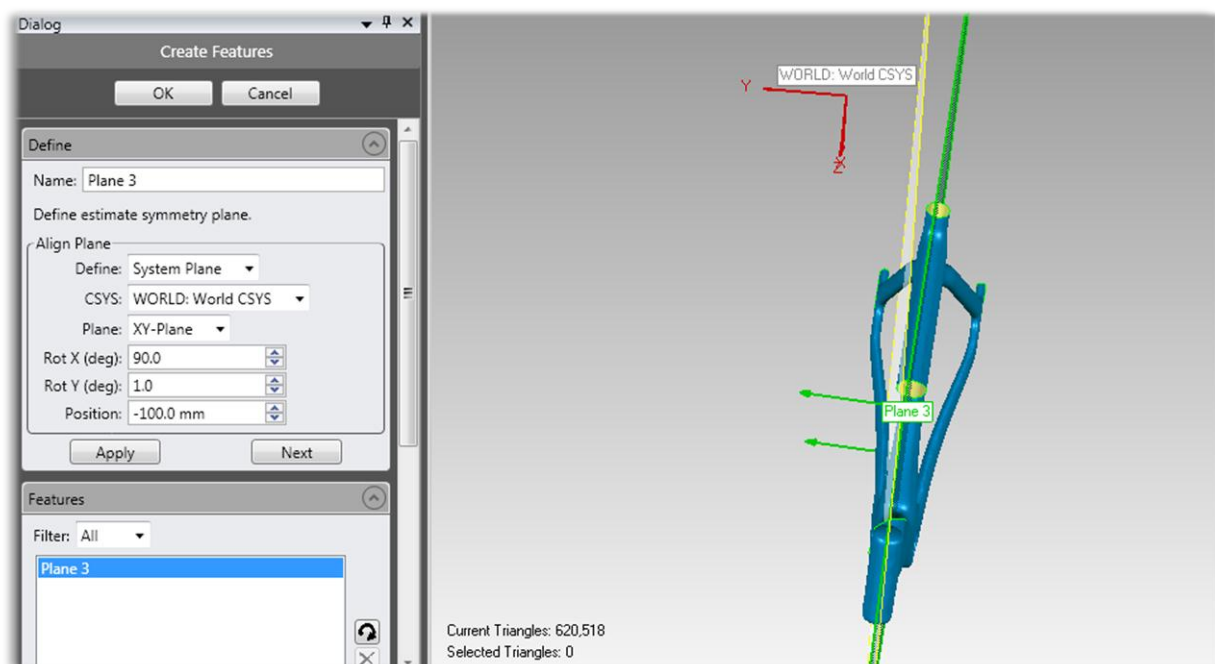
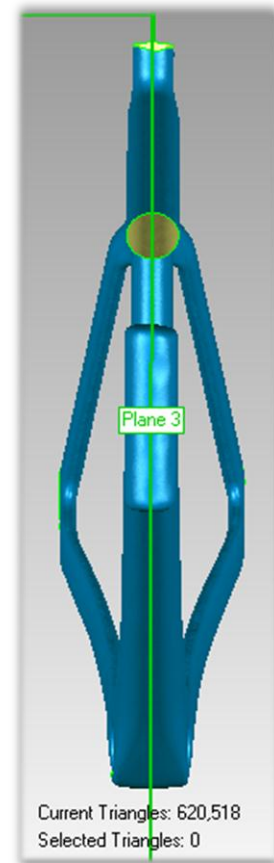




Έχοντας πλέον μία επιφάνεια που στο μεγαλύτερο ποσοστό της είναι εξαιρετικής ποιότητας εκτός σημείων με θόρυβο ή παραμορφώσεις. Τα σημεία αυτά ευτυχώς αποτελούν κομμάτια γεωμετριών που μπορούμε εύκολα να αναπαράγουμε παραμετρικά όπως στο ξεκίνημα του κεφαλαίου αυτού, και ούτως ή άλλως θα αντικαθίσταντο στην πορεία του αντίστροφου σχεδιασμού για λόγους μοντελοποίησης στο pre-processor του Solidworks Simulation.

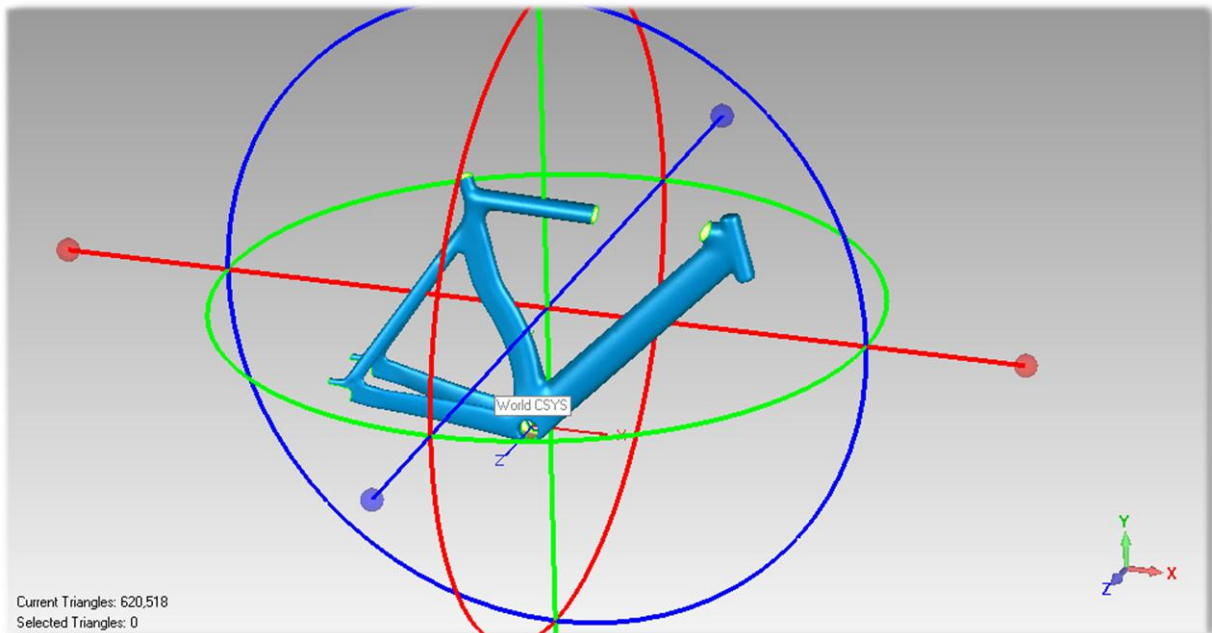
Πριν όμως προχωρήσουμε στην διαδικασία αντικατάστασής τους, επανατοποθετούμε το μοντέλο, μετακινώντας και περιστρέφοντάς το κατάλληλα ώστε το επίπεδο συμμετρίας του να είναι το εμπρόσθιο επίπεδο x-y, και η αρχή των αξόνων να βρίσκεται στον άξονα του κυλίνδρου της μεσαίας τριβής. Το Geomagics μας δίνει εργαλεία που εξαγουν δεδομένα αναφοράς –από το μοντέλο υπ’ επεξεργασία και μας επιτρέπει τον συσχετισμό των γεωμετρικών τύπων που δημιουργεί με το σύστημα συντεταγμένων του μοντέλου.

Αρχικά αφήνουμε το λογισμικό να αναλύσει το μοντέλο και να βρει το επίπεδο συμμετρίας του προϊόντος. Αφού δημιουργηθεί το επίπεδο (Plane 3 στις εικόνες), ζητάμε την ταυτοποίησή του με το επίπεδο x-y, και το λογισμικό μεταφέρει κατάλληλα το σώμα στον χώρο για να ικανοποιηθεί η συνθήκη αυτή.



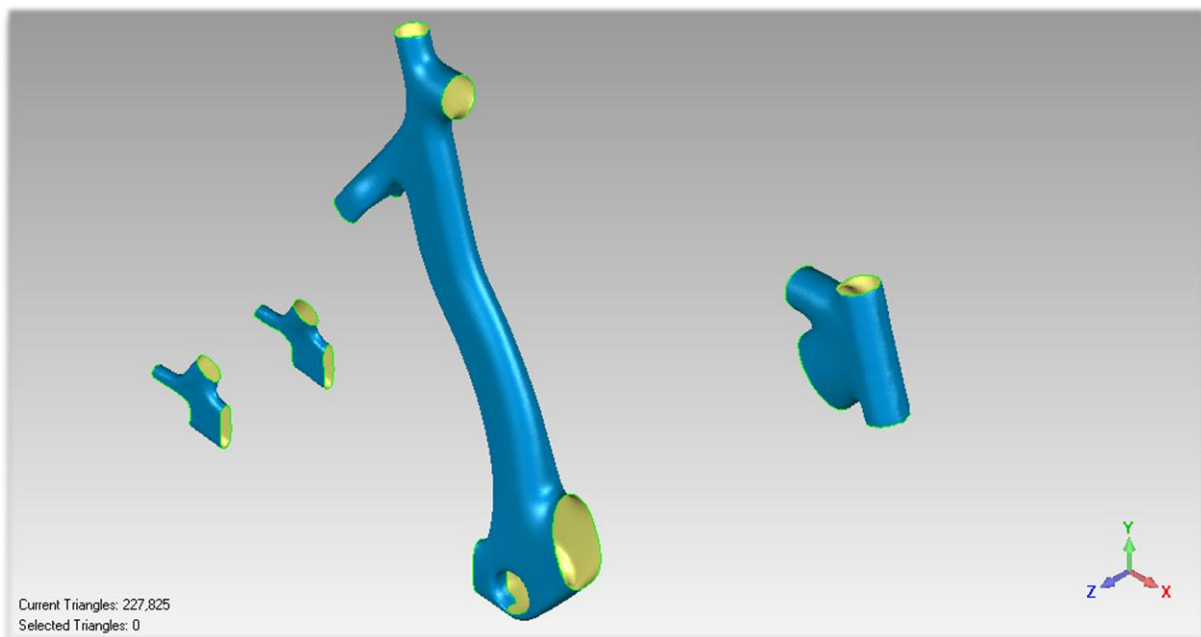
Τέλος, μετακινούμε το μοντέλο μας ως προς την αρχή των αξόνων με απλή χειροκίνητη μετακίνηση. Η ταύτιση του επιπέδου συμμετρίας με το επίπεδο x-y θα κάνει πολύ πιο εύκολη την προετοιμασία του μοντέλου για την εξομοίωση των τεστ αντοχής των Ευρωπαϊκών Κανονισμών, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ακρίβεια. Από την άλλη, η ακριβής θέση του μοντέλου σε σχέση με την αρχή των αξόνων λίγη σημασία έχει, μιας και όλες οι μετρήσεις

αποστάσεων που θα γίνουν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, θα γίνουν σε σχέση με υπάρχουσες αναφορές στο σώμα, κι όχι με απόλυτες συντεταγμένες.



Το πλαίσιο του ποδηλάτου πλέον βρίσκεται στην επιθυμητή θέση στον χώρο, και θ' αρχίσουν οι προετοιμασίες για την εισαγωγή του στο Solidworks.

Αρχικά αφαιρούνται όλα τα τμήματα του πλαισίου που μπορούν ν' αντικατασταθούν με features στον modeler του Solidworks. Ο λόγος είναι διπλός. Αφ' ενός η ακρίβεια, μιας και οποιοσδήποτε θόρυβος ή παραμόρφωση κατά μήκος των βασικών τμημάτων θα εξαφανιστούν και θα αντικατασταθούν με λείες επιφάνειες, και ο δεύτερος είναι η ευκολία ορισμού των υφασμάτων και των στρώσεών τους στο preprocessor του Simulation, όπως θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο.



Η αφαίρεση γίνεται με απλή επιλογή των πολυγώνων που θέλουμε ν' αφαιρεθούν και διαγραφή τους. Η επιλογή της κατάλληλης θέσης για την διαγραφή είναι πολύ σημαντική, αφού το νεοδημιουργηθέν προφίλ θα μεταφέρει τα χαρακτηριστικά και τις ανακρίβειές του σε όλο το loft feature. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί και χαλάρωση ορίου (Relax Polygons/fix boundary), αν και με μεγάλη προσοχή και με γενικά ασθενείς ρυθμίσεις αφού η συγκεκριμένη λειτουργία φαίνεται να μειώνει τις διατομές που προσπαθεί να διορθώσει –αν κι ελάχιστα.

Με τις αφαιρέσεις αυτές, δεν απομένει καμία επεξεργασία στην πολυγωνική επιφάνεια του μοντέλου, αλλά μόνο εργασίες που θα επιτρέψουν την δημιουργία του σωστού αρχείου δεδομένων για την εισαγωγή της γεωμετρίας στο Solidworks, όπου θα επανασηματιστούν τα features των κυρίων τμημάτων (tubes & stays) που διαγράφηκαν, και θα γίνει η ανάλυση μέσω FEM.

Polygon vs NURBS

Σχεδόν όλα τα εμπορικά πακέτα CAD που χρησιμοποιούνται από Μηχανικούς σε κάθε βιομηχανία δημιουργούν μοντέλα μ' εξωτερικές επιφάνειες τύπου NURBS ενώ ταυτόχρονα πολλοί industry-standard τύπου αρχείων 3D μοντέλων τις ενσωματώνουν. Μπορούν να τις χειριστούν εύκολα λογισμικά H/Y, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν εύκολη επεξεργασία από τον άνθρωπο με εξαιρετική ακρίβεια σε κάθε περίπτωση. Οι επιφάνειες NURBS απαιτούν μαθηματικές εκφράσεις καμπυλών που θα ορίσουν με την σειρά τους τις επιφάνειες. Η πολυγωνική επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί μέχρι στιγμής από το Geomagic από την άλλη, δεν είναι τίποτα περισσότερο από μία λίστα διανυσμάτων τα οποία δημιουργούν τρίγωνα που με την σειρά τους συνιστούν την επιφάνεια. Η απευθείας εισαγωγή της στο Solidworks σε πολυγωνική μορφή είναι δυνατή, αλλά με περιορισμούς. Επιφάνειες που αποτελούνται από περισσότερα από 25 χιλιάδες πολύγωνα προκαλούν σφάλματα στο πρόγραμμα, ενώ ακόμα και οι μικρότερες επιφάνειες ρίχνουν την απόδοση κατακόρυφα, μιας και το λογισμικό κατασκευάζει μία συνιστώσα επιφάνεια (face – πρόσωπο) για κάθε ένα πολύγωνο της συνολικής γεωμετρίας. Αν λοιπόν εισαχθεί μία επιφάνεια 10 χιλιάδων πολυγώνων, το λογισμικό θα δημιουργήσει 10 χιλιάδες μαθηματικές αναπαραστάσεις, η κάθε μία εκ των οποίων αντιστοιχεί σε ένα πολύγωνο. Και μιας και το λογισμικό είναι παραμετρικό, θα δημιουργήσει μία βάση δεδομένων με τις ιδιότητες 10 χιλιάδων επιφανειών, γεγονός που θα επιβαρύνει σημαντικά τον Κεντρικό Επεξεργαστή του H/Y (CPU), αλλά και την επεξεργαστή γραφικών του (GPU – Graphics Processor Unit).

Τα προβλήματα λοιπόν είναι δύο όσον αφορά στο μοντέλο μας:

1. Χρειάζεται με κατάλληλες εργασίας decimation να πάρουμε μία επιφάνεια από αποτελείται από περισσότερα του μισού εκατομμυρίου πολυγώνων και αφαιρώντας ή μεγαλώνοντας πολύγωνα με κατάλληλο αλγόριθμο προκειμένου να διατηρηθεί κάποια ακρίβεια να καταλήξουμε σε μία περίπου ίδια που ν' αποτελείται από λιγότερα των 25 χιλιάδων πολυγώνων. Η διαδικασία per se δεν είναι δύσκολη και την προσφέρει και το Geomagic, αλλά και άλλα λογισμικά επεξεργασίας πολυγωνικών επιφανειών όπως το Meshlab. Όμως με τόσα λίγα πολύγωνα, και

τέτοιου μεγέθους, η επιφάνεια χάνει πάρα πολύ από την πιστότητά της προς το σχεδιαζόμενο προϊόν.

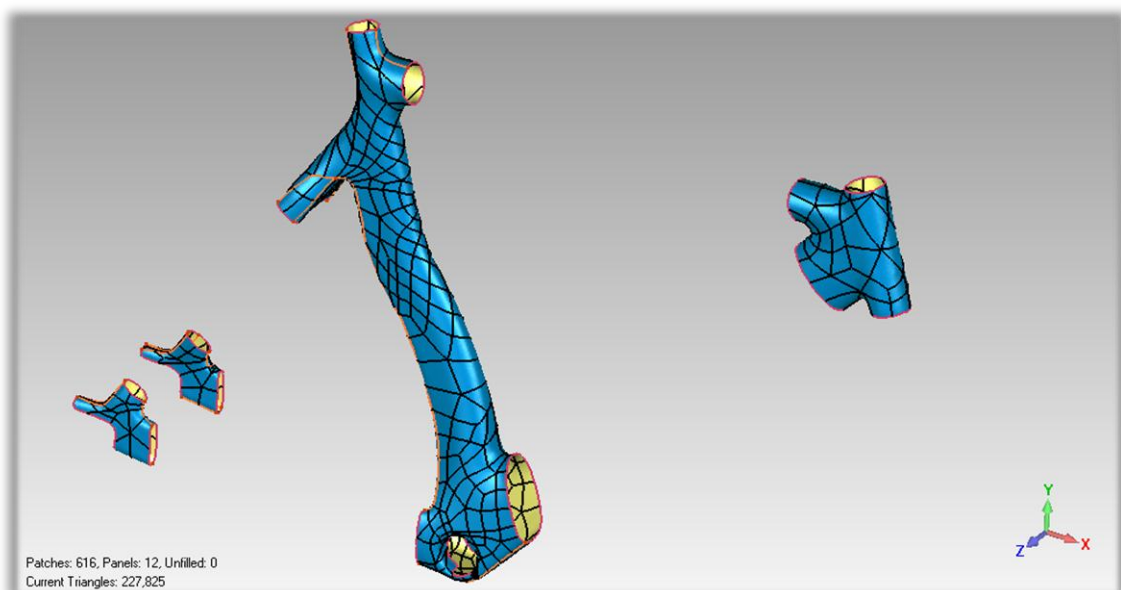
2. Ακόμα και αν με κάποιον τρόπο καταλήγαμε με ένα σχετικά ακριβές μοντέλο που θα έχει λιγότερα από 25 χιλιάδες πολύγωνα, θα είναι ένα δύσχρηστο για επεξεργασία στο περιβάλλον του Solidworks. Η εμπειρία έχει δείξει μάλιστα συχνά σφάλματα που οδηγούν στο ακανόνιστο σταμάτημα του προγράμματος, προβλήματα στο περιβάλλον των Windows, γεγονότα που δεν επιτρέπουν σε καμία περίπτωση την ανάλυση μέσω FEM, αφού συνεχώς θα χάνονται αλλαγές που δεν πρόλαβε ο χρήστης ν' αποθηκεύσει.

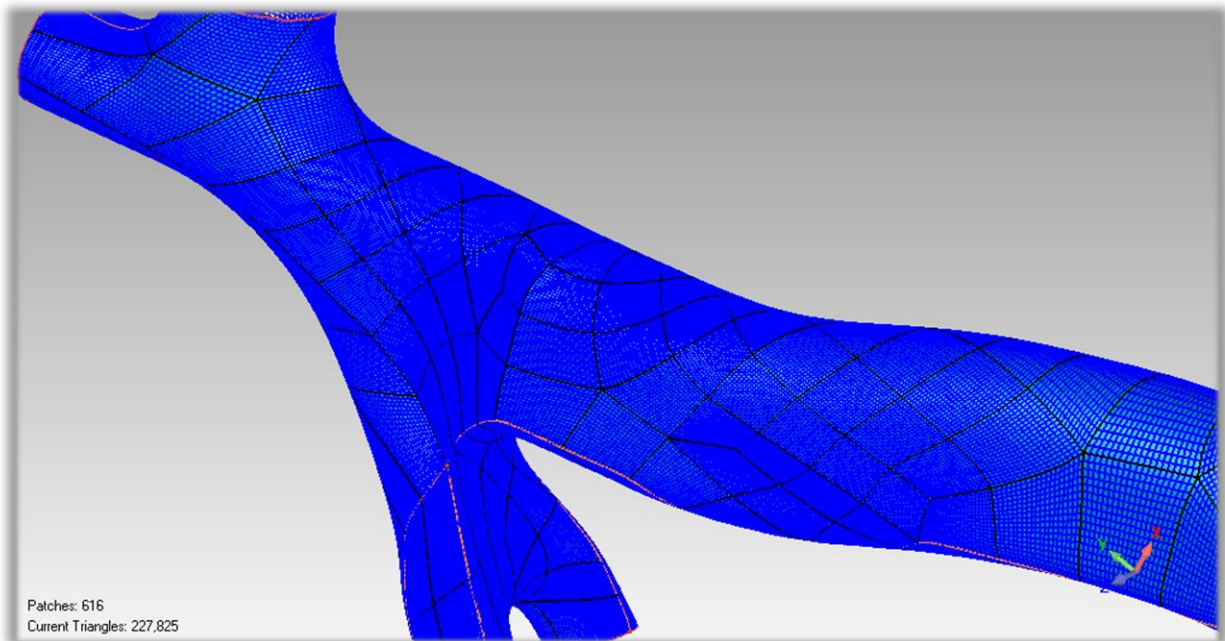
Οπότε είναι δεδομένη πλέον η απαίτηση για μετατροπή της πολυγωνικής επιφάνειας σε NURBS. Απευθείας μετάφραση δεν είναι εφικτή μιας και όπως προαναφέρθηκε η πολυγωνική επιφάνεια περιέχει μόνο δεδομένα συντεταγμένων. Αντ' αυτού θα πρέπει να δημιουργηθούν εκ του μηδενός επιφάνειες NURBS, χρησιμοποιώντας αναφορές από την πολυγωνική επιφάνεια. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερος επίπονη και γενικότερα το δυσκολότερο κομμάτι του αντίστροφου σχεδιασμού με τεχνικές τρισδιάστατης σάρωσης.

Το Geomagic όμως, προσφέρει μία πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία που με συγκεκριμένες εισόδους από τον χρήστη μπορεί να δημιουργήσει επιφάνειες NURBS που ταυτίζονται με την πολυγωνική επιφάνεια.

Η διαδικασία εν ολίγοις είναι η εξής:

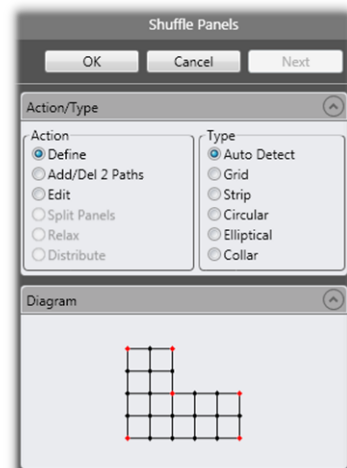
Δημιουργείται ένα πλέγμα καμπυλών που κείνται πάνω στην επιφάνεια του προϊόντος. Κάθε κλάδος του πλέγματος σχηματίζει ένα patch. Τα όριά του είναι τμήματα των καμπυλών που δημιουργήθηκαν προηγουμένως, και τα τμήματα αυτά είναι το καθένα μία επιφάνεια NURBS η οποία ταυτίζεται με την πολυγωνική επιφάνεια που καλύπτει. Τώρα πια, εκτός της πολυγωνικής επιφάνειας, υπάρχουν και πολλές επιφάνειες NURBS που όλες μαζί σχηματίζουν το προϊόν. Το σύνολο των επιφανειών μπορεί να αποθηκευθεί σε ένα αρχείο τύπου IGES, το οποίο εισάγεται εύκολα στο Solidworks και μπορεί να αποθηκευτεί στον native τύπο αρχείων του λογισμικού (.sldprt) και να γίνει πλήρης επεξεργασία.



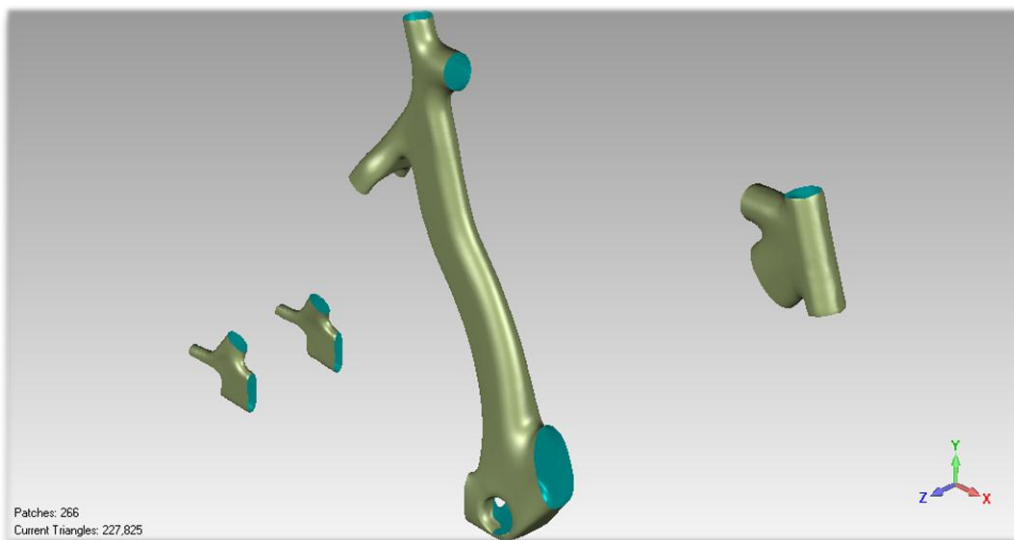


Αφού δημιουργηθούν τα patches χρειάζεται τις περισσότερες φορές να ζητηθεί από το λογισμικό η επαναδιάταξή τους. Η δημιουργία επιφανειών NURBS από τέτοια πλέγματα πολλές φορές απαιτεί συγκεκριμένες τιμές του aspect ratio που τα χαρακτηρίζει, μιας και σε διαφορετική περίπτωση, η προκύπτουσα επιφάνεια μπορεί να είναι λάθος ή και να μην προκύψει καθόλου.

Κατόπιν δημιουργείται για κάθε patch ένα μικρό πλέγμα (mesh) που ουσιαστικά αποτελεί την προεπισκόπηση της κάθε NURBS. Ο χρήστης εκεί έχει την δυνατότητα επιδιόρθωσης τυχόντων σφαλμάτων κι εποπτείας της προκύπτουσας επιφανείας.



Τελικά το λογισμικό δημιουργεί τις επιφάνειες τύπου NURBS οι οποίες ακολουθούν ακριβώς την προηγούμενη πολυγωνική επιφάνεια:



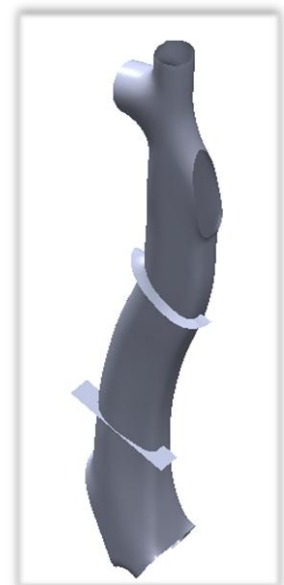
Στην συνέχεια θα γεμίσουμε τα κενά που δημιουργήσαμε στο Geomagic με features του Solidworks. Ο πρωταρχικός λόγος αναλύεται σύντομα παρακάτω:

Το preprocessor του Simulation, αναγνωρίζει κάθε σώμα, είτε στερεό είτε επιφάνεια, ως ξεχωριστό, κι επιτρέπει να οριστεί μόνο του ως shell, solid ή composite και να δημιουργήσει το κατάλληλο πλέγμα (mesh) πεπερασμένων στοιχείων. Τα surface bodies αναγνωρίζονται αυτόματα ως τέτοια που διακριτοποιηθούν με shell mesh, ενώ τα στερεά σώματα ως προεπιλογή αναγνωρίζονται ως τέτοια. Δίνεται βέβαια για στερεά σώματα η δυνατότητα να επιλεγούν πρόσωπα ενός στερεού και να οριστούν τα ως composite shells, αλλά λόγω των patches που δημιουργήθηκαν ανωτέρω στο Geomagic, υπάρχουν σώματα με τεράστιο αριθμό προσώπων και θα ήταν πολύ κοπιαστική δουλειά, αφήνοντας ταυτόχρονα μεγάλα περιθώρια λάθους, αφού θα είναι πολύ εύκολο μικρά faces να παραληφθούν ή κάποια να επιλεγούν σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις.

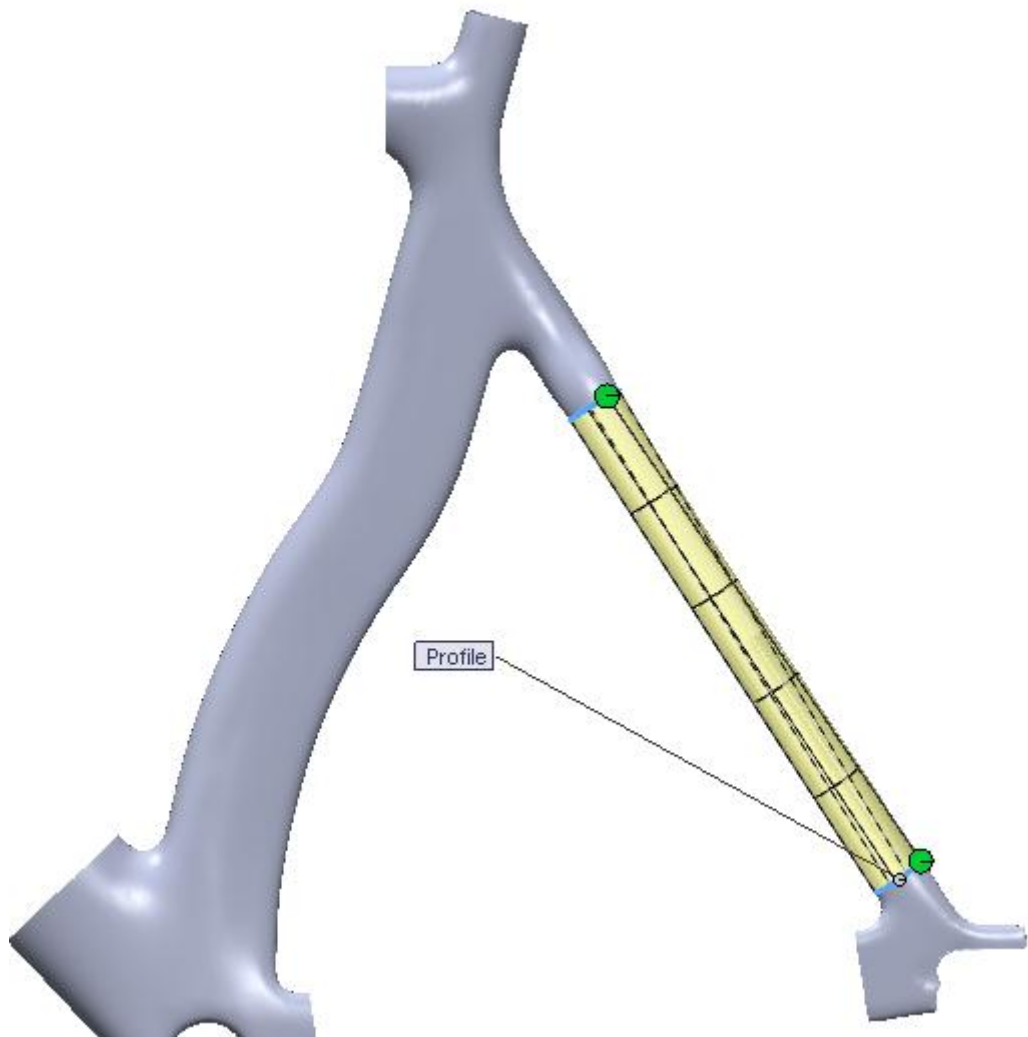
Το Solidworks, για κάθε surface feature που δημιουργείται, το αναγνωρίζει ως ξεχωριστό σώμα, μη επιτρέποντας αυτόματο merge, μιας και σ' επιφάνειες μηδενικού πάχους δεν νοείται merge γεωμετριών. Η ένωση των επιφανειών γίνεται με την εντολή Knit, όπου ουσιαστικά ράβονται οι επιφάνειες στις κοινές τους ακμές. Λόγω της λειτουργίας του Solidworks, πολλές φορές ακόμα κι όταν επιφάνειες ορίζονται με όρια τις πλευρές υφιστάμενων επιφανειών, οι προκύπτουσες απέχουν μεταξύ τους κατά κάποια μικρά, και η εντολή Knit επιτρέπει στον χρήστη να ορίσει τα όρια των αποστάσεων τα οποία θα συρραφτούν, δίνοντας περισσότερο έλεγχο στο μοντέλο. Σκοπός μας λοιπόν είναι να δημιουργήσουμε κάθε βασικό στέλεχος του πλαισίου με ένα Knit Feature που θα αναγνωρίζεται ως ξεχωριστό σώμα, επιτρέποντάς μας να ορίσουμε τα πατρών όπως μας δίνονται προς επικύρωση.

Τα υπάρχοντα κομμάτια που έχουν εισαχθεί στο περιβάλλον του Solidworks (Seat Tube, rear brackets, head tube) αποτελούν από μόνα τους αυτούσια πατρών και ξεχωριστά σώματα, εκτός του Seat Tube στο οποίο έχουμε 3 διαφορετικά πατρών. Δημιουργούμε λοιπόν κατάλληλες επιφάνειες που ορίζουν τα όρια του κάθε πατρών και χωρίζουμε σε 3 σώματα το Seat Tube, ονομάζοντας από κάτω προς τα πάνω Seat Tube #1, #2, και #3.

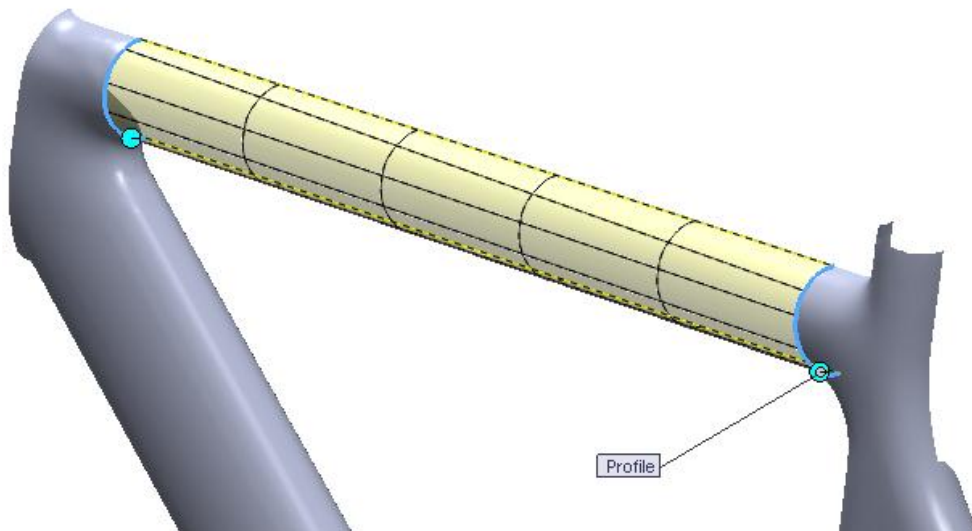
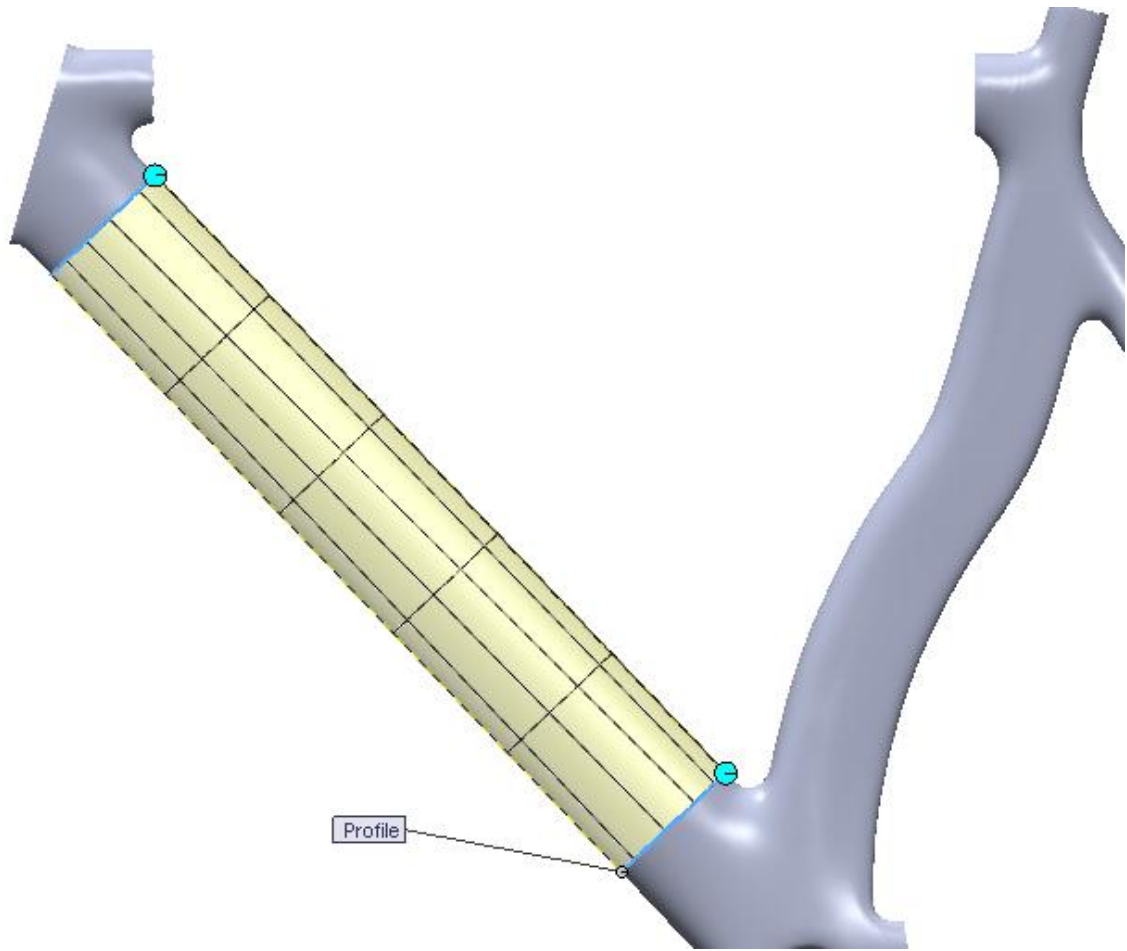
Επίσης κατά την εισαγωγή των επιφανειών στο Solidworks, εκτελούμε την λειτουργία Trim όλων των σωμάτων με το επίπεδο συμμετρίας και συνεχίζουμε να δημιουργήσουμε το μισό πλαίσιο, το οποίο θ' αντιγραφεί συμμετρικά μετά το πέρας της δημιουργίας των features. Τα lofts πολλές φορές είναι πολύ δύσκολο να δημιουργήσουν κυλινδρικές επιφάνειες, και πολύ εύκολα καταλήγουν σε twisted γεωμετρίες οι οποίες θα είναι ασύμμετρες στα Top & Down Tubes. Επίσης τα lofts των Chain & Seat Stays μπορεί να μην δημιουργηθούν απολύτως ίδια, με ελάχιστες διαφορές που θα προσθέσουν ασυμμετρίες.



Ξεκινάμε με τα Seat Stays. Δημιουργούμε το loft ορίζοντας κατάλληλα τα connectors για το ελάχιστο δυνατό twist.

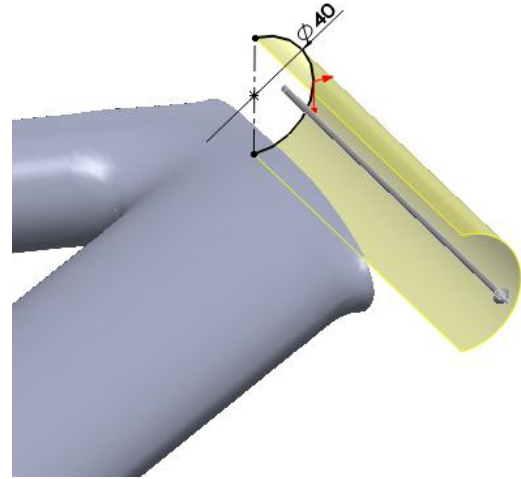


Στην συνέχεια προχωράμε με το loft του Down Tube και του Top Tube.

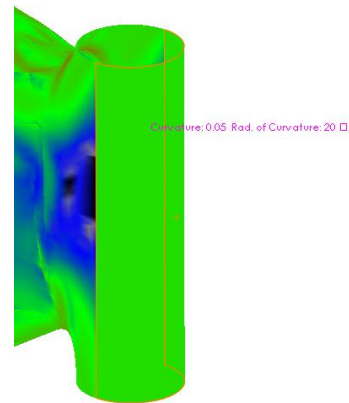
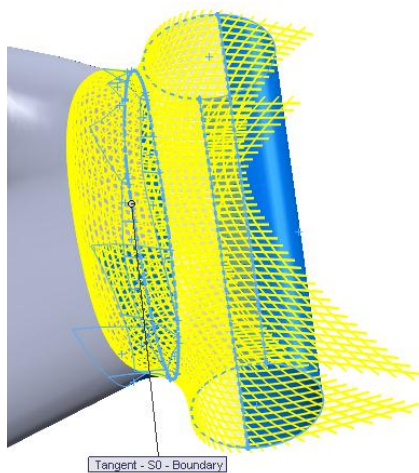


Όσον αφορά στο Head Tube, επιλέγουμε να διαγράψουμε το προϊόν του 3D scanning μιας και υπήρχε αρκετός θόρυβος που δημιουργούσε ανωμαλίες στην επιφάνεια που δεν μπόρεσαν να διορθωθούν. Πριν την διαγραφή, χρησιμοποιούμε τα δεδομένα της σάρωσης ως αναφορά για ένα sketch που θ' αποτελέσει την βάση του νέου, εντελώς παραμετρικού, στοιχείου.

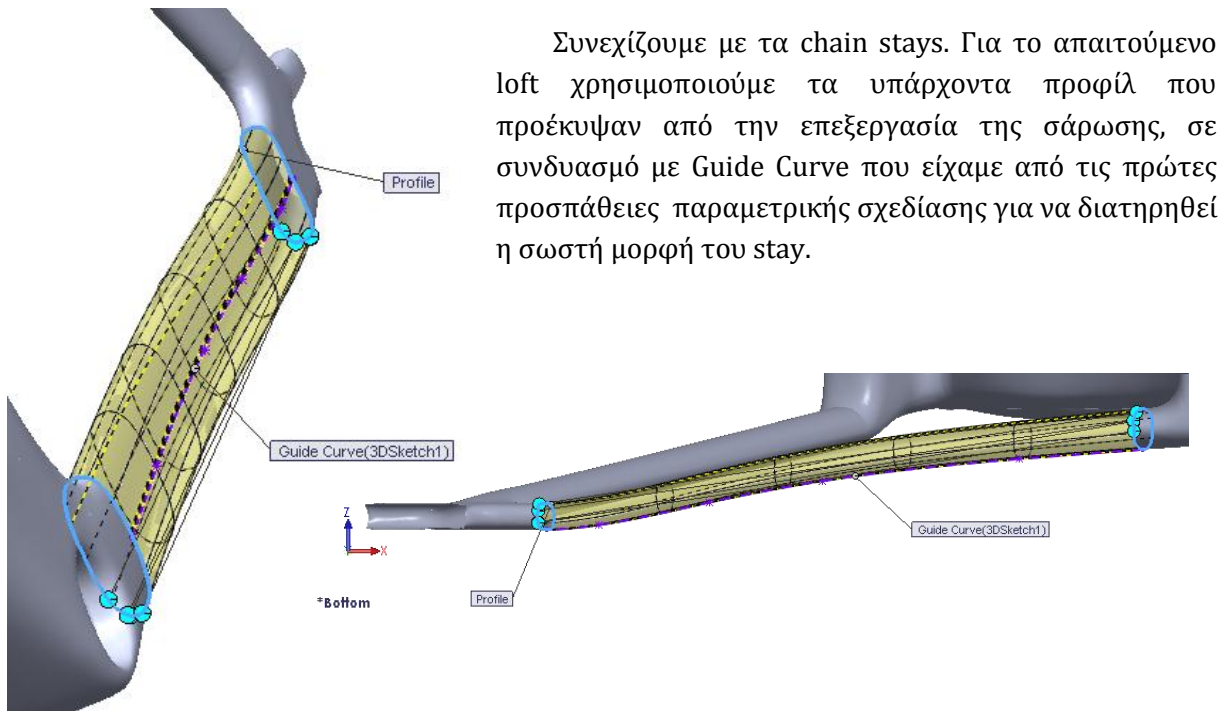
Ξεκινάμε με ένα Extrude Surface που στον χώρο βρίσκεται στο ίδιο σημείο με την επιφάνεια που αντικαθιστά, όμως έχει ακριβώς 40mm διάμετρο, χωρίς τις διακυμάνσεις που είχε η προηγούμενη επιφάνεια.



Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις άκρες της ημι-κυλινδρικής επιφανείας και τις άκρες του υπόλοιπου πλαισίου, ζητάμε από το Solidworks με την εντολή Boundary Surface, να ενώσει τα σύνορα ενώ ταυτόχρονα απαιτούμε η προκύπτουσα επιφάνεια να παραμένει σε κάθε σύνορο εφαπτομενική με την συνορεύουσα.



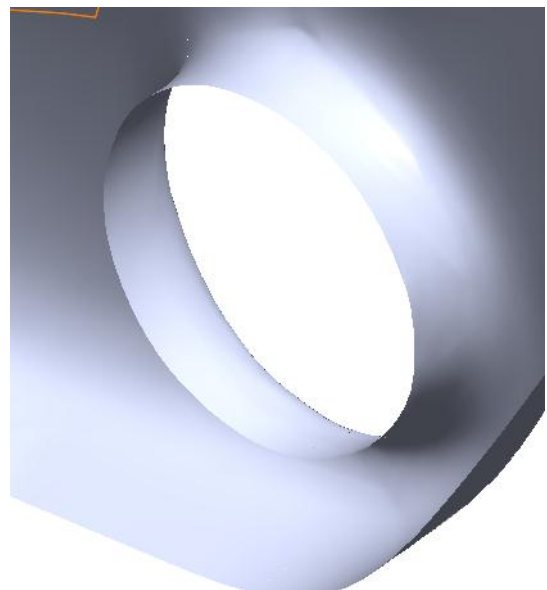
Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί ένας απόλυτα ευθύς μισός κύλινδρος, που ενώνεται σωστά με το υπόλοιπο πλαίσιο, έχοντας έτσι διατηρήσει την πιστότητα στο πρωτότυπο, αλλά και έχοντας μία πεντακάθαρη επιφάνεια που θα χρησιμεύσει ως αναφορά στις παρακάτω δοκιμές μας.



Συνεχίζουμε με τα chain stays. Για το απαιτούμενο loft χρησιμοποιούμε τα υπάρχοντα προφίλ που προέκυψαν από την επεξεργασία της σάρωσης, σε συνδυασμό με Guide Curve που είχαμε από τις πρώτες προσπάθειες παραμετρικής σχεδίασης για να διατηρηθεί η σωστή μορφή του stay.

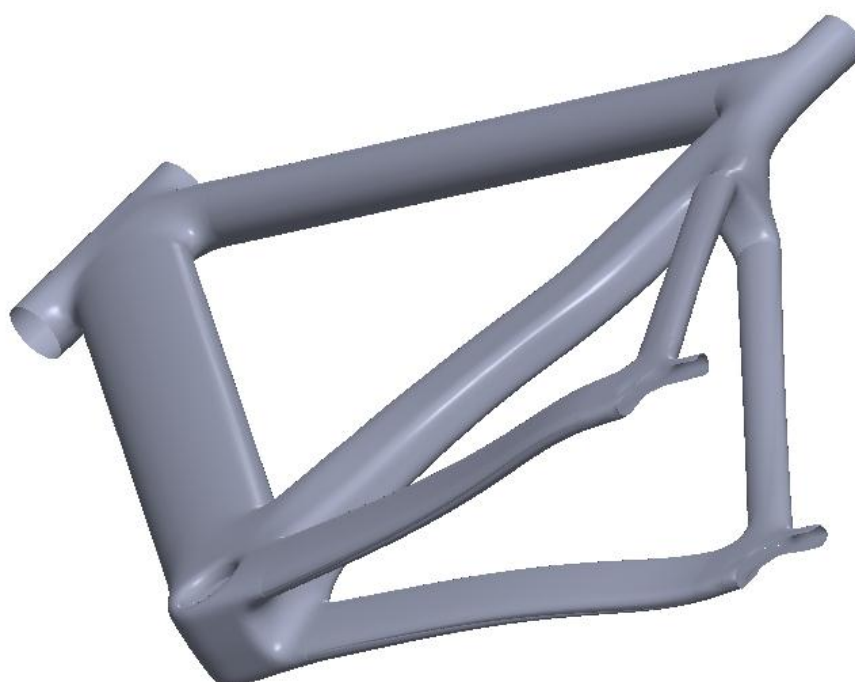
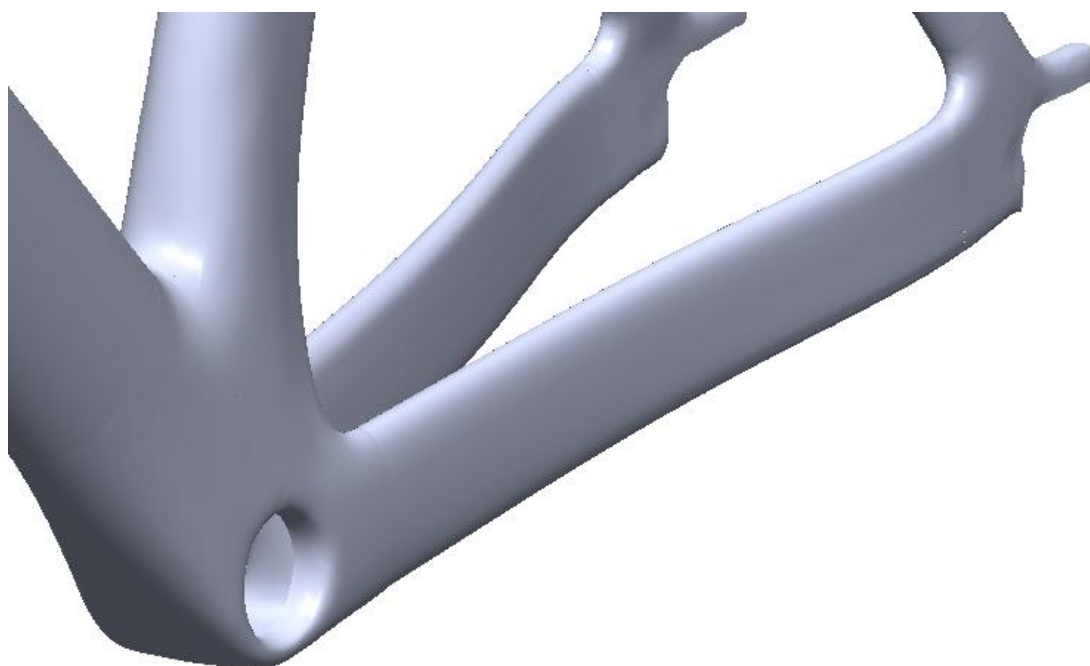
Κατά την διάρκεια της σάρωσης υπήρχε μεγάλη δυσκολία στην πρόσβαση του άξονα των πεντάλ, μιας και το τότε πρωτότυπο που δόθηκε προς ψηφιοποίηση ήταν ένα εκ των πρώτων κατασκευασθέντων κι είχε ακόμα σακούλες κενού μέσα στις κοιλότητές του. Ως αποτέλεσμα, η μορφή του εσωτερικού της μεσαίας τριβής ήταν μόνο στην μία πλευρά σωστή, ενώ στην άλλη είτε έλειπαν περιοχές είτε άλλες ήταν αρκετά μετατοπισμένες.

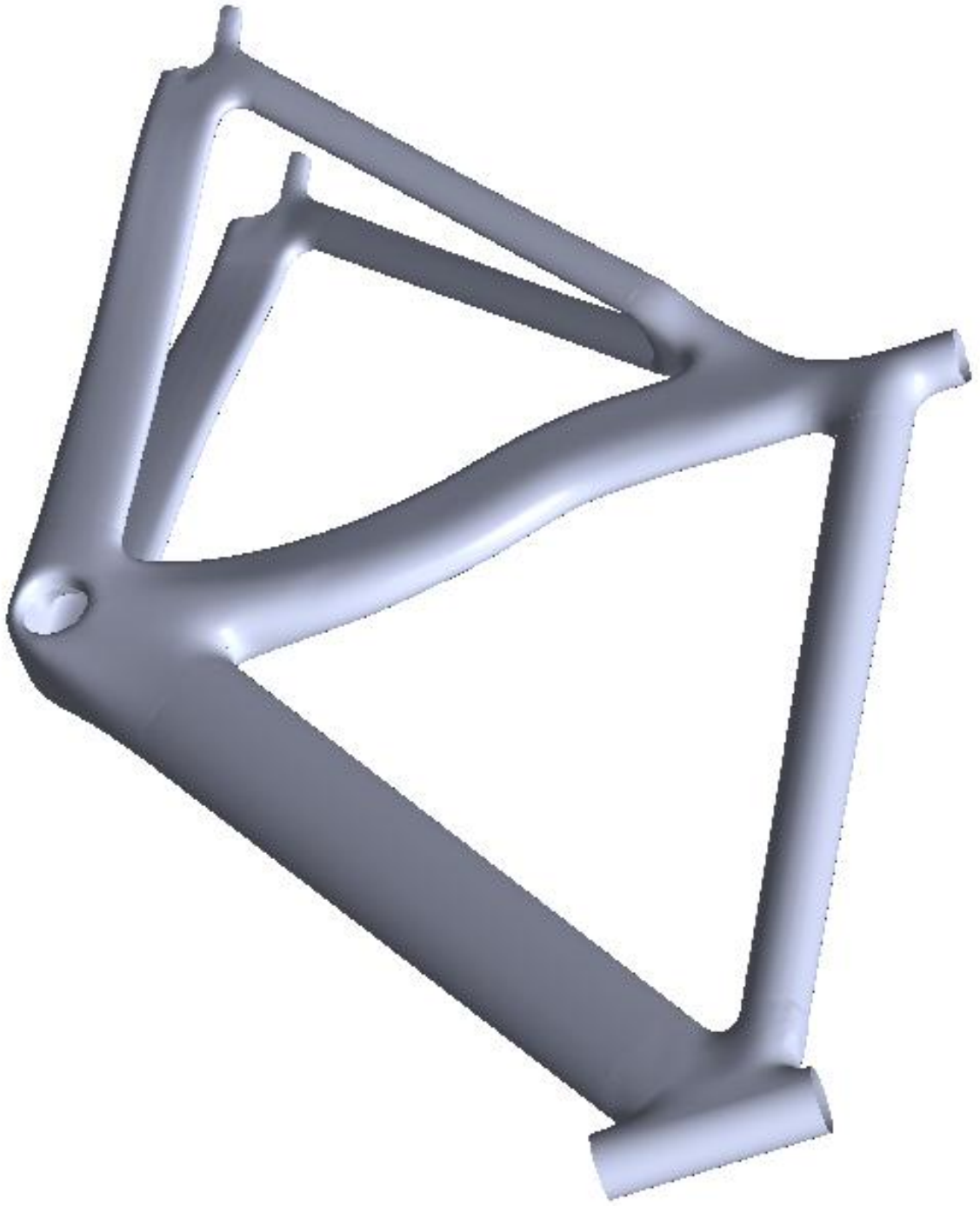
Η πλευρά με τα σωστά χαρακτηριστικά, καθαρίστηκε με ένα επίπεδο trim για να δημιουργηθεί σωστό σύνορο, και με την συμμετρική αντιγραφή του Seat Tube #1 μεταφέρθηκε κι απέναντι, με την προβληματική πλευρά απλά να εξαφανίζεται στην διαδικασία.



Το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται απόλυτα ικανοποιητικό, με ελάχιστες παραφωνίες σε πολύ λίγα σημεία, και οι οποίες δεν κρίνονται άξιες περαιτέρω προσπάθειας μιας και η τάξη μεγέθους τους είναι τέτοια, που το meshing που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, δεν θα έχει αρκετή ανάλυση για να υπάρξει διαφορά στις αναλύσεις μας.

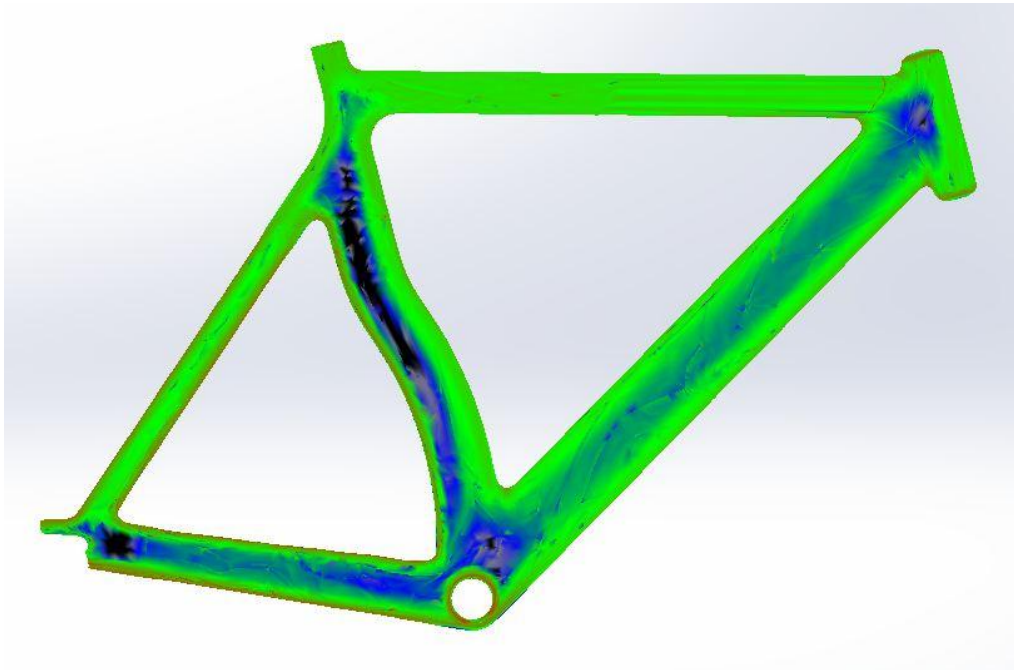
Παρατίθενται φωτογραφίες με λεπτομέρειες:



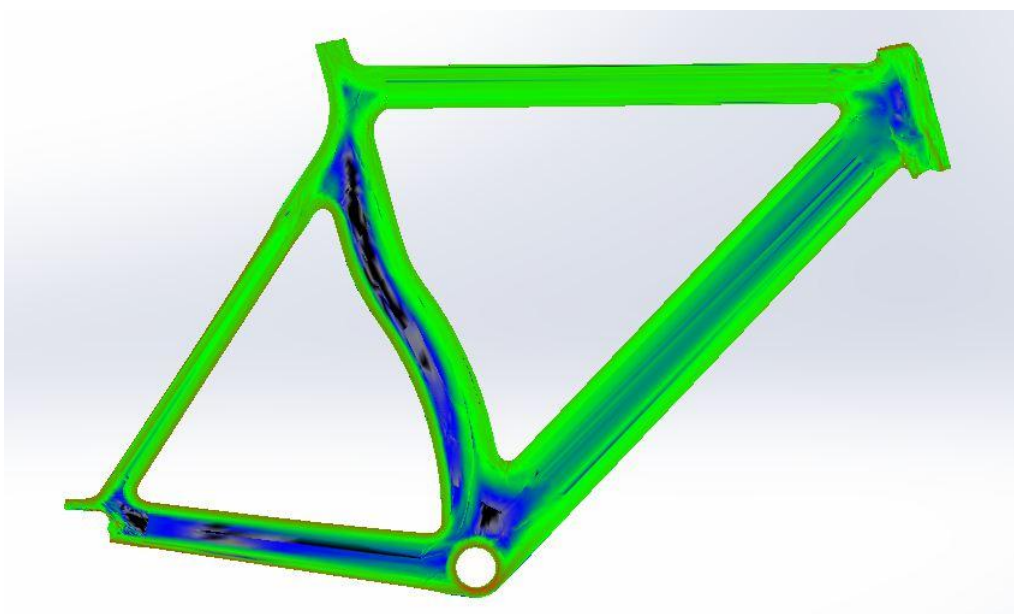


Πέρα από την καλύτερη συνεργασία του καινούριου μοντέλου, που προέκυψε με πρόσθεση features στο περιβάλλον του Solidworks, με το Simulation pre-processor, η ποιότητα των επιφανειών και του μοντέλου εν γένει ήταν ένας δεύτερος σοβαρότατος λόγος.

Πριν την πλήρη αποκοπή των κύριων τμημάτων της πολυγωνικής επιφάνειας στο περιβάλλον του Geomagis, το τελικό προϊόν της τότε επεξεργασίας αφέθηκε να μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε NURBS-τύπου επιφάνειες με την διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως. Το αποτέλεσμα εισήχθη ως αρχείο IGES στο Solidworks και με το εργαλείο αξιολόγησης καμπυλότητας είχαμε το εξής αποτέλεσμα:



Είναι εμφανείς οι ασυνέχειες στην αλλαγή της καμπυλότητας ενώ επίσης φαίνεται ακόμα και σ αυτήν την εικόνα χαμηλής ανάλυσης το παραμένον πρόβλημα του θορύβου στο πάνω μέρος των Chain Stays. Παραθέτουμε προς σύγκριση την ίδια ανάλυση για το υβρίδιο που δημιουργήσαμε στο Solidworks:



3. Επικύρωση του Σχεδίου

Υλικά

Με την γεωμετρία πλέον έτοιμη, και πριν ορίσουμε τις φορτίσεις και στηρίξεις στο μοντέλο μας, θα πρέπει αρχικά να ορίσουμε τα υλικά που χρησιμοποιούνται.

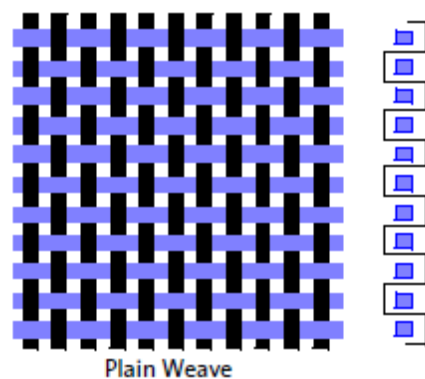
Σύνθετα Υλικά

Υφάσματα

Οι ίνες ενίσχυσης μπορεί να είναι πλεγμένες σε υφάσματα. Οι ίνες που έχουν κατεύθυνση αυτήν του τυλίγματος (στο ρόλο που είναι τυλιγμένο το ύφασμα) ονομάζονται ίνες τυλίγματος (wrap fibers) και αυτές που έχουν κάθετη κατεύθυνση από αυτήν που ονομάζονται υφάδια. Υπάρχουν πολλά είδη υφάσματος που χρησιμοποιούνται συνήθως στην βιομηχανία.

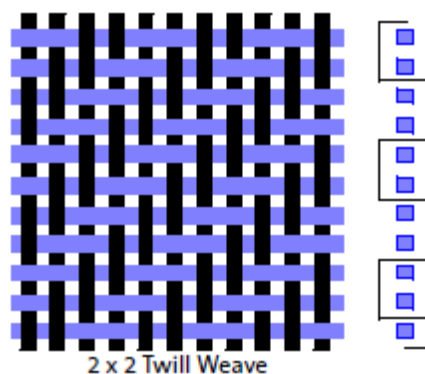
Απλή ύφανση

Ίνες τυλίγματος πλέκονται με τα υφάδια κάθε φορά που τα συναντούν. Το τελικό ύφασμα είναι πολύ σταθερό, αλλά δύσκολο να ακολουθήσει απότομες αλλαγές στην επιφάνεια που εφαρμόζεται (καλούπι). Τέτοιου είδους πλεκτά μπορούν να έχουν πολύ περισσότερες ίνες τυλίγματος και να μοιάζουν σχεδόν με την μορφή του μονοδιευθυντικού.



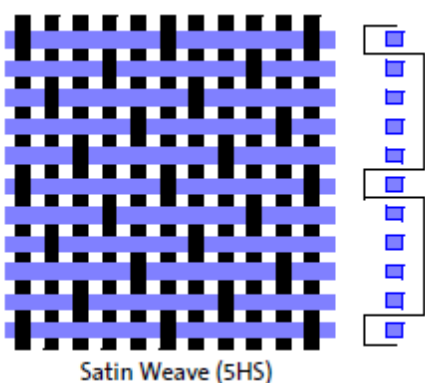
Διαγώνια ύφανση

Οι ίνες περνούν πάνω και κάτω από κάποιον αριθμό δεσμίδων ινών, π.χ. 2x2 διαγώνια ύφανση είναι ένα ύφασμα του οποίου οι ίνες περνούν 2 δεσμίδες από πάνω και 2 από κάτω. Αυτή η ύφανση χρησιμοποιείται σε πιο πολύπλοκες επιφάνειες.



Satin

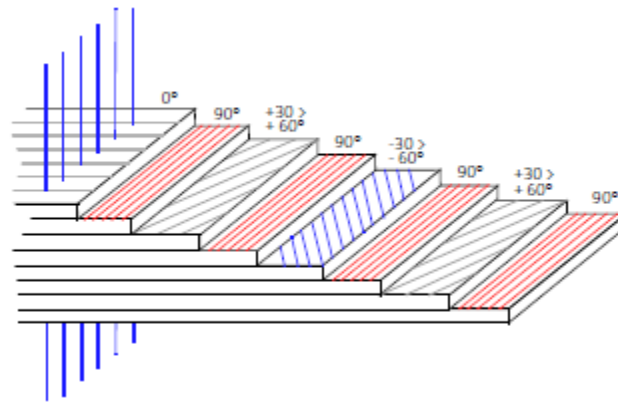
Οι ίνες περνούν πάνω από έναν αριθμό δεσμίδων αλλά κάτω από μόνο μία. Αυτή η πλέξη παράγει πολύ πιο επίπεδο ύφασμα που εύκολα ακολουθεί πολύπλοκες επιφάνειες. Το μειονέκτημα αυτής της



πλέξης είναι ότι στην μία πλευρά του έχει κυρίως ίνες τυλίγματος ενώ στην άλλη κυρίως υφάδια.

Πολυαξονικό επίπεδο ύφασμα

Ένα πολυαξονικό ύφασμα αποτελείται από μονοδιευθυντικά υφάσματα με διαφορετικές κατευθύνσεις ραμμένα μεταξύ τους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως και το πλεκτό ύφασμα. Πολυδιευθυντικά υφάσματα μπορούν να παραχθούν σε πάχη που δεν είναι πρακτικό ή οικονομικό να παραχθούν τα πλεκτά υφάσματα. Επίσης τα πολυδιευθυντικά υφάσματα μπορούν να ακολουθήσουν πολύπλοκες επιφάνειες ενώ επιτυγχάνεται γρήγορα μεγάλο μέρος διαστρωμάτωσης. Παρόλα αυτά πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή ώστε η διαστρωμάτωση να είναι ισορροπημένη και τα βαριά υφάσματα είναι δύσκολο να αντιγράψουν μικρές λεπτομέρειες.



Προεμποτισμένα υφάσματα

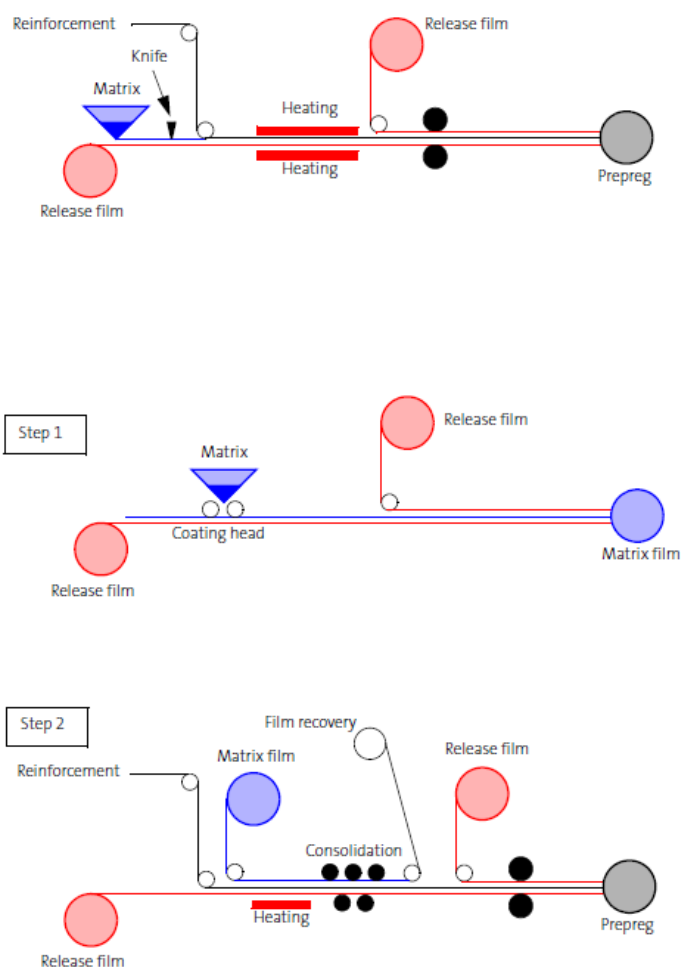
Ένα προεμποτισμένο ύφασμα αποτελείται από το υλικό της ενίσχυσης εμποτισμένο με μία μήτρα ρητίνης σε ένα ελεγχόμενο βαθμό. Η ρητίνη μπορεί να είναι μερικώς ψημένη (αναφέρεται ως β στάδιο) και σε αυτήν την μορφή εφαρμόζεται στο πλεκτό ύφασμα. Τα προεμποτισμένα υφάσματα μπορεί να είναι πλεκτά ή μονοδιευθυντικά.

Παραγωγή προεμποτισμένου υφάσματος

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι παραγωγής προεμποτισμένου υφάσματος: η μέθοδος ένωσης της ρητίνης με τις ίνες με θέρμανση (hotmelt) και η μέθοδος λουτρού διαλύτη (solvent dip).

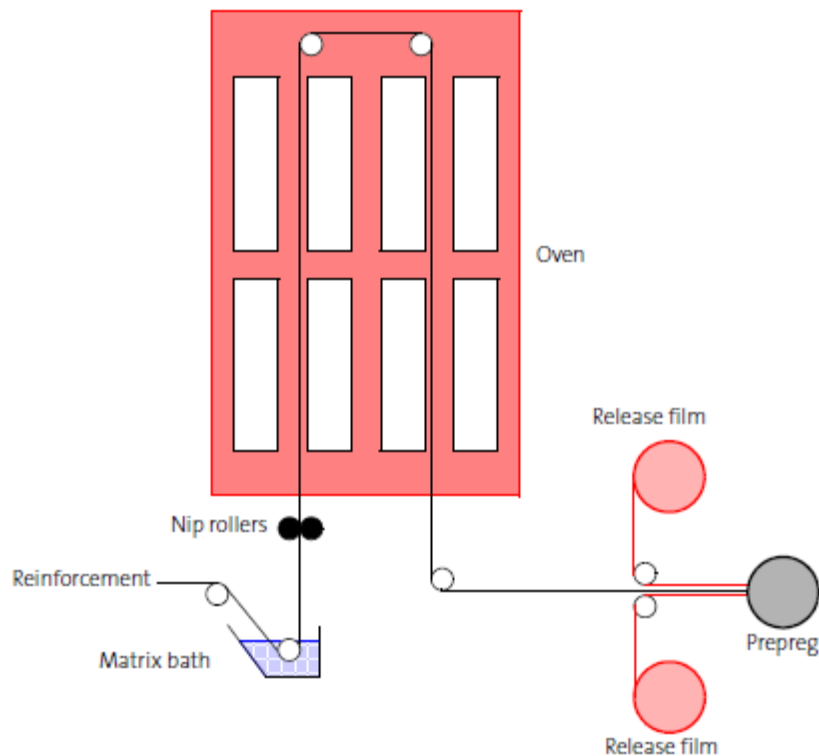
Ένωσης της ρητίνης και των ινών με θέρμανση

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί μονοδιευθυντικό ή πλεκτό προεμποτισμένο ύφασμα. Αυτή η μέθοδος απαιτεί δύο στάδια διαδικασίας. Στο πρώτο στάδιο προθερμασμένη ρητίνη στρώνεται σε ένα φύλλο (με βάση το χαρτί) και δημιουργείται ένα λεπτό φιλμ. Η ενίσχυση και το φιλμ αυτό έρχονται σε επαφή στην μηχανή παραγωγής προεμποτισμένου υφάσματος. Ο εμποτισμός της ρητίνης στην ίνα επιτυγχάνεται με θέρμανση και πίεση από ράουλα. Το τελικό προϊόν τυλίγεται σ' έναν κύλινδρο (πυρήνα).



Ένωση της ρητίνης και των ινών σε λουτρό διαλύτη

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την παραγωγή πλεκτού prepreg. Σε αυτήν την τεχνική η ρητίνη είναι διαλυμένη σε ένα λουτρό διαλύτη και το ύφασμα βυθίζεται στο λουτρό διαλύτη της ρητίνης. Ο διαλύτης εξατμίζεται από το εμποτισμένο ύφασμα επειδή περνά μέσα από φούρνο.



Τα υφάσματα είναι ένα μονοδιευθυντικό (M40J Unidirectional) κι ένα 2x2 twill πλεκτό (T300 Woven), και τα δύο προεμποτισμένα με την ίδια εποξική ρητίνη. Τα χαρακτηριστικά και η περιγραφή της ρητίνης δίνονται σε spec sheets από την Advanced Composites Group, την εταιρεία πώλησής τους. Πρόκειται για την σειρά VTM 260, η οποία χαρακτηρίζεται από καλές μηχανικές ιδιότητες, μικρό ιξώδες κατά την διάρκεια του ψησίματος και καλά χαρακτηριστικά διαχείρισης των προεμποτισμένων κατά την διάρκεια της διαστρωμάτωσης.

Χαρακτηριστικά Ρητίνης

- Πολύ καλά χαρακτηριστικά σε καλούπωμα με σακούλα κενού.
- Λεπτόρρευστες κατά την διάρκεια του ψησίματος.
- Έως 30 μέρες ζωής εκτός ψυγείου στους 21°C.
- 12 μήνες ζωής εντός ψυγείου στους -18°C.
- VTM 263 υψηλού ιξώδους σε σχέση με τις άλλες ρητίνες της σειράς, κατάλληλη για μερικό εμποτισμό υφασμάτων ή πλήρη εμποτισμό ελαφρών υφασμάτων.
- VTM264 μεσαίου ιξώδους κατάλληλη για εμποτισμό έως και μεσαίου βάρους υφασμάτων πλεκτών ή μονοδιευθυντικών.
- VTM266 μικρού ιξώδους κατάλληλη για εμποτισμό υφασμάτων μεγάλου βάρους έως και 2400 gr/m².
- VTM 267 μικρή ευαισθησία στην θερμοκρασία, ελεγχόμενο κολλώδες, κατάλληλη για μερικό εμποτισμό.
- Όλες οι ρητίνες της σειράς αυτής είναι πλήρως συμβατές και μπορούν να ψηθούν μαζί.

Resin	Tack @15°C (60°F)	Tack @21°C (70°F)	Glass UD	Carbon UD	Glass Woven	Carbon Woven
VTM263	Low	Low/Medium	N/A	N/A	<300g/m ²	<300g/m ²
VTM264	Low	Medium	<400g/m ²	<600g/m ²	<900g/m ²	<900g/m ²
VTM266	Medium	High	<600g/m ²	<600g/m ²	>900g/m ²	>900g/m ²
VTM267	Very Low	Low	Differential coating of heavy reinforcements			

Κύκλος θερμικής διαδικασίας σκλήρυνσης της ρητίνης με την μέθοδο της σακούλας κενού.

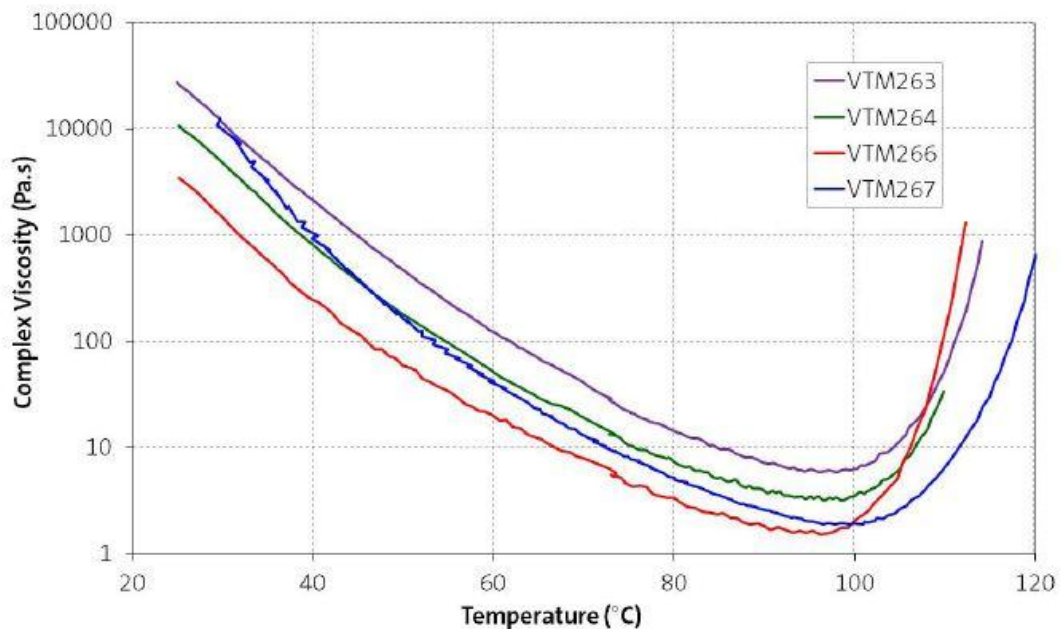
- Εφαρμογή 980 mbar κενού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος στην διαστρωμάτωση
- Θέρμανση στους 65°C με μέγιστο ρυθμό 2°C/min για μικρές κατασκευές και για μεγάλες ο ρυθμός πρέπει να μειωθεί σε 0.5°C/min.
- Διατηρείστε το κενό και την θερμοκρασία για 16 ώρες.
- Ο μέγιστος ρυθμός ψύξης που επιτρέπεται είναι 3°C/min υπό κενό.
- Σταματήστε την διατήρηση του κενού.
- Ξεκαλουπώστε το τεμάχιο.

Optional Cure Cycles

Cure Temperature	Time	Developed Tg (DMA E' Onset)
65°C (149°F)	16 hours	80°C (176°F)
80°C (176°F)	5 hours	95°C (203°F)
100°C (212°F)	2 hour	115°C (239°F)
120°C (248°F)	1 hour	120°C (248°F)

Note: The minimum cure temperature for the VTM260 Series of prepreps is 65°C (149°F).

Dynamic Viscosity of VTM260 Series Resins at 2°C/minute



Επιπλέον ψήσιμο

Για εφαρμογές που χρειάζονται μέγιστη αντοχή στη θερμοκρασία ή γενικά προστασία από το περιβάλλον είναι ουσιώδες να γίνει επιπλέον ψήσιμο για να αναπτυχθεί η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία υάλωσης.

- Τα τεμάχια μπορούν να τοποθετηθούν σε προθερμασμένο φούρνο ή να θερμανθούν με ρυθμό 3°C/min στην αρχική θερμοκρασία (την τελική θερμοκρασία του πρώτου ψησίματος).
- Συνεχίστε να θερμαίνετε μέχρι τους 120°C με ρυθμό 0.3°C/min.
- Διατηρείστε στους 120°C για μία ώρα τουλάχιστον.
- Τα τεμάχια μπορούν να ψυχθούν με μέγιστο ρυθμό 2°C/min έως την θερμοκρασία δωματίου.
- Τα μεγάλα τεμάχια πρέπει να στηριχτούν σωστά ώστε να μην παραμορφωθούν.

Υγεία και ασφάλεια

Οι ρητίνες της σειράς αυτής μπορούν να προκαλέσουν αλλεργική αντίδραση είτε άμεσα (με την πρώτη επαφή) είτε μετά από χρόνια επαφή. Αποφεύγετε την επαφή με το δέρμα. Γάντια και προστατευτικός ρουχισμός είναι απαραίτητα. Εάν υπάρξει επαφή με την ρητίνη μην χρησιμοποιήσετε διαλυτικό για την απομάκρυνσή της παρά μόνο νερό και σαπούνι ή/και κρέμα απομάκρυνσης της ρητίνης. Η εξάτμιση των αντλιών δεν πρέπει να βρίσκεται στον χώρο εργασίας αλλά να βγαίνει σε εξωτερικό χώρο.

Δεδομένα ινών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πλαισίου είναι της TORAYCA και πρόκειται για την T300 στο πλεκτό ύφασμα, και για την M40J στο μονοδιευθυντικό ύφασμα:

TECHNICAL
DATA SHEET
No. CFA-001

TORAYCA® T300 DATA SHEET

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

FIBER PROPERTIES

	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 ³	1.76 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter	2.8E-04 in.	7 μm	
Yield			
1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	40A, 40B	1.0 %	TY-030B-05
& Amount	40D	0.7 %	TY-030B-05
	50A, 50B	1.0 %	TY-030B-05
Twist	Twisted, Untwisted, or Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

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

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.

FIBER PROPERTIES

	English	Metric	Test Method
Tensile Strength	640 ksi	4,410 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus	54.7 Msi	377 GPa	TY-030B-01
Strain	1.2 %	1.2 %	TY-030B-01
Density	0.064 lbs/in ³	1.77 g/cm ³	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	50A, 50B	1.0 %	TY-030B-05
& Amount			
Twist	Twisted, Untwisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

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

Επιπρόσθετα για το προεμποτισμένο ύφασμα υπάρχουν τα στοιχεία:

Mechanical properties of VTM264 prepregs cured for 5 hours at 80°C (176°F). Tested at room temperature, dry.

Property	Test Method	Units	Material	
			VTM264/CF0302*-42%RW	VTM264/T700-300-35%RW
0° Tensile Strength	ASTM D3039	MPa (ksi)	700 (102)	2575 (373.5)
0° Tensile Modulus		GPa (msi)	60.0 (8.70)	131 (19.0)
90° Tensile Strength	ASTM D3039	MPa (ksi)	745 (108)	40 (5.80)
90° Tensile Modulus		GPa (msi)	60.5 (8.77)	9.1 (1.32)
0° Compression Strength	ASTM D3410	MPa (ksi)	540 (78.3)	1235 (179)
0° Compression Modulus		GPa (msi)	54.0 (7.83)	118 (17.1)
90° Compression Strength	ASTM D3410	MPa (ksi)	560 (81.2)	182 (26.4)
90° Compression Modulus		GPa (msi)	53.0 (7.69)	-
Interlaminar Shear Strength (ILSS)	ASTM D2344	MPa (ksi)	71.0 (10.3)	88.6 (12.9)
In-Plane Shear Strength (IPSS)	ASTM	MPa (ksi)	95.0 (13.8)	85.7 (12.4)
In-Plane Shear Modulus (IPSM)	D3518	GPa (msi)	3.90 (0.57)	3.94 (0.57)

Data normalised to 55%Vf except interlaminar shear strength and in-plane shear strength and modulus.

*CF0302 is a 2x2twill, 199g/m² fabric with FT300B 40B fibres.

Ουσιαστικά έχω όλα τα απαραίτητα στοιχεία για το πλεκτό προεμποτισμένο ύφασμα (T300) γιατί είναι σχεδόν ίδιο με αυτό του τελευταίου πίνακα (δεύτερη στήλη από δεξιά). Αλλά δεν έχω για το μονοδιευθυντικό προεμποτισμένο ύφασμα (M40J). Η τελευταία στήλη του πίνακα αυτού όμως δίνει τις ιδιότητες του μονοδιευθυντικού T300 με την ρητίνη που χρησιμοποιούμε. Επίσης από τα spec sheets της TORAYCA έχουμε τις ιδιότητες των ινών του μονοδιευθυντικού T300 και M40J.

Κάνοντας μια σύμβαση, ότι η σχέση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών διατηρείται και στο προεμποτισμένο, μπορούμε να βρούμε τις ιδιότητες του προεμποτισμένου μονοδιευθυντικού M40J.

π.χ. Αντοχή σε εφελκυσμό για T300 3,530 MPa, ενώ για M40J 4,410 MPa

$$UTS_{M40J} = 1.249 UTS_{T300}$$

Ιδιότητες που δεν υπήρχαν προστέθηκαν από άλλα υλικά της βιβλιοθήκης του Solidworks, όπως ο λόγος Poisson, ή δημιουργήθηκαν αυθαίρετα, όπως το όριο διαρροής το οποίο θεωρήθηκε ελάχιστα πάνω από την αντοχή σε εφελκυσμό, θεωρώντας ότι οι ίνες και η μήτρα δεν παραμορφώνονται πριν καταρρεύσουν.

Έτσι προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας των υλικών:

T300 Woven		
Elastic Modulus in X	6.00E+10	N/m ²
Elastic Modulus in Y	6.05e+010	N/m ²
Elastic Modulus in Z	1.00E+10	N/m ²
Poisson's Ration in XY	0.26	N/A
Poisson's Ration in YZ	0.3	N/A
Poisson's Ration in XZ	0.3	N/A
Shear Modulus in XY	3.9E+09	N/m ²
Shear Modulus in YZ		N/m ²
Shear Modulus in XZ		N/m ²
Mass Density	1000	kg/m ³
Tensile Strength in X	7E+08	N/m ²
Tensile Strength in Y	7.45E+08	N/m ²
Compressive Strength in X	5.4E+08	N/m ²
Compressive Strength in Y	5.6E+08	N/m ²
Shear Strength in XY	95000000	N/m ²
Yield Strength	3E+09	N/m ²
Thermal Exp Coefficient in X	0.003	/K
Thermal Exp Coefficient in Y		/K
Thermal Exp Coefficient in Z		/K
Thermal Conductivity in X	10.46	W/(m·K)
Thermal Conductivity in Y		W/(m·K)
Thermal Conductivity in Z		W/(m·K)
Specific Heat	795	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

M40J Unidirectional		
Elastic Modulus in X	2.15E+14	N/m ²
Elastic Modulus in Y	9.1E+09	N/m ²
Elastic Modulus in Z	9.1E+09	N/m ²
Poisson's Ration in XY	0.26	N/A
Poisson's Ration in YZ	0.3	N/A
Poisson's Ration in XZ	0.3	N/A
Shear Modulus in XY	3.94E+09	N/m ²
Shear Modulus in YZ		N/m ²
Shear Modulus in XZ		N/m ²
Mass Density	1000	kg/m ³
Tensile Strength in X	3.22E+09	N/m ²
Tensile Strength in Y	40000000	N/m ²
Compressive Strength in X	1.07E+09	N/m ²
Compressive Strength in Y	1.82E+08	N/m ²
Shear Strength in XY	8.57E+07	N/m ²
Yield Strength	3.25E+09	N/m ²
Thermal Exp Coefficient in X	0.003	/K
Thermal Exp Coefficient in Y		/K
Thermal Exp Coefficient in Z		/K
Thermal Conductivity in X	68.61	W/(m·K)
Thermal Conductivity in Y		W/(m·K)
Thermal Conductivity in Z		W/(m·K)
Specific Heat	711	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

Η πυκνότητα κι άλλες ιδιότητες που δεν επηρεάζουν το μοντέλο και τις εξομοιώσεις των δοκιμών, έχουν λογικά αλλά τυχαία νούμερα.

Προετοιμασία Αναλύσεων

Με την γεωμετρία πλέον έτοιμη και τα χαρακτηριστικά των υλικών προσδιορισμένα, χρειάζεται να δημιουργηθεί το μοντέλο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού Κανονισμού EN14781 περί αγωνιστικών ποδηλάτων δρόμου. Το μοντέλο δεν χρειάζεται να ικανοποιεί ακριβώς τις συνθήκες που περιγράφονται στα τεστ του κανονισμού μιας και δεν πρόκειται για διαδικασία βελτιστοποίησης, αλλά για διαδικασία επικύρωσης του σχεδίου. Πρέπει δηλαδή το πλαίσιο του ποδηλάτου απλά να περνάει τις δοκιμές χωρίς να χρειάζεται να εξετάσουμε σε ποιον βαθμό τα περνάει ή πως μπορεί να γίνει ελαφρύτερο ή πιο ασφαλές ως προς τις δοκιμές. Μπορούμε λοιπόν να κάνουμε τροποποιήσεις στις δοκιμές ή στο πώς αντικατοπτρίζονται στο μοντέλο μας, κι αν αυτές δεν είναι απολύτως ισοδύναμες αρκεί απλά να κάνουν τα τεστ πιο δύσκολα.



Ο κανονισμός EN14781 περί αγωνιστικών ποδηλάτων δρόμου περιέχει όλες τις απαιτήσεις για την πιστοποίηση ενός ασφαλούς αγωνιστικού ποδηλάτου. Από όλες τις δοκιμές στις οποίες θα πρέπει να καταβληθούν επιτυχώς όλα τα κρίσιμα κομμάτια ενός αγωνιστικού ποδηλάτου (από την άποψη της αντοχής) μέχρι την παραμικρή λεπτομέρεια όπως ροπές σύσφιξης όλων των κοχλιών στήριξης ή/και σύνδεσης.

Όσον αφορά στο πλαίσιο του ποδηλάτου, υπάρχουν τέσσερις συγκεκριμένα τεστ αντοχής: δύο τεστ σύγκρουσης που εξετάζουν τον εμπρόσθιο λαιμό (Head Tube) σε μετωπική σύγκρουση και την γενικότερη αντοχή του πλαισίου σε πτώση κι άλλα δύο τεστ κόπωσης του υλικού κατασκευής. Οι δοκιμές κόπωσης δεν θα εξεταστούν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, για τον μοναδικό λόγο ότι δεν υπήρχαν έτοιμες καμπύλες S-N για τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Οι καμπύλες αυτές θα μπορούσαν να εξαχθούν πειραματικά αλλά τέτοιες εργασίες ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσης διπλωματικής εργασίας η οποία θα περιοριστεί στην εξέταση των άλλων δύο.

Χρησιμοποιώντας το Solidworks Simulation, θα ορίσουμε τα κατάλληλα stacks για κάθε τμήμα του ποδηλάτου, και θα δημιουργήσουμε κατάλληλο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Εφόσον αυτό ολοκληρωθεί, θα μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τα ίδια ακριβώς στοιχεία για διάφορες στηρίξεις και διάφορες φορτίσεις του μοντέλου, εξομοιώνοντας τις διάφορες δοκιμές που υπαγορεύονται στον EN14781.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, δεν θα μοντελοποιηθούν επίσης και οι υπερκαλύψεις στις ενώσεις των καλουπιών. Θα συμπεριληφθούν μόνο οι ενισχύσεις στο δέσιμο του Head Tube με τα Top & Down Tubes, μιας και πρόκειται για ιδιαίτερα κρίσιμη γεωμετρία που στην πρώτη δοκιμή συγκεντρώνεται σημαντικό ποσοστό των καταπονήσεων σ' αυτό. Επίσης είναι αρκετά μεγάλης επιφάνειας συγκεντρωμένη μάλιστα στην ίδια περιοχή, και η έλλειψη του επιπλέον υλικού σε τέτοιο ποσοστό του μοντέλου θα επηρέαζε σε σημαντικό βαθμό τ' αποτελέσματα. Η συνολική επιφάνεια των επικαλύψεων του Head Tube με τους κοντινούς σωλήνες είναι λίγο μεγαλύτερη από 28000 mm² ενώ η επιφάνεια όλου του πλαισίου είναι περίπου 416500 mm², που σημαίνει ότι οι ενισχύσεις του head tube αποτελούν το 6.7% της συνολικής επιφάνειας του πλαισίου.

Οι αλληλεπικαλύψεις που επιβάλλει η κατασκευή του πλαισίου με τα τρία καλούπια στις ενώσεις τους είναι περίπου πλάτους 10mm και οι ενώσεις τρέχουν για περίπου 5.5m στο σύνολο του πλαισίου, άρα συνολικά αποτελούν λίγο περισσότερο από το 13% της επιφάνειας του πλαισίου. Μπορεί το ποσοστό να είναι σημαντικό, αλλά βρίσκεται διασκορπισμένο σε όλο το μήκος του πλαισίου. Σε κάθε περίπτωση, θα εξετάσουμε τ' αποτελέσματα των μελετών μας και θα αποφανθούμε κατόπιν για την περιήληψη όλων των επικαλύψεων και πως αυτή θα τα επηρεάσει.

Το πλαίσιο χωρίζεται σε 11 τμήματα, το καθένα με δικές του στρώσεις.

- | | | |
|--------------------------|---------------|----------------|
| – Head Tube | – Top Tube | – Seat Stays |
| – Head/Top Tube overlap | – Down Tube | – L Chain Stay |
| – Head/Down Tube overlap | – Seat Tube 1 | – R Chain Stay |
| | – Seat Tube 2 | |
| | – Seat Tube 3 | |

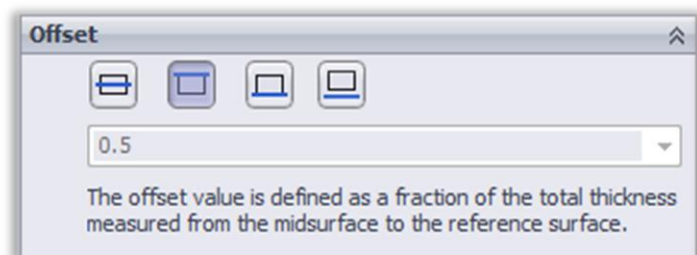
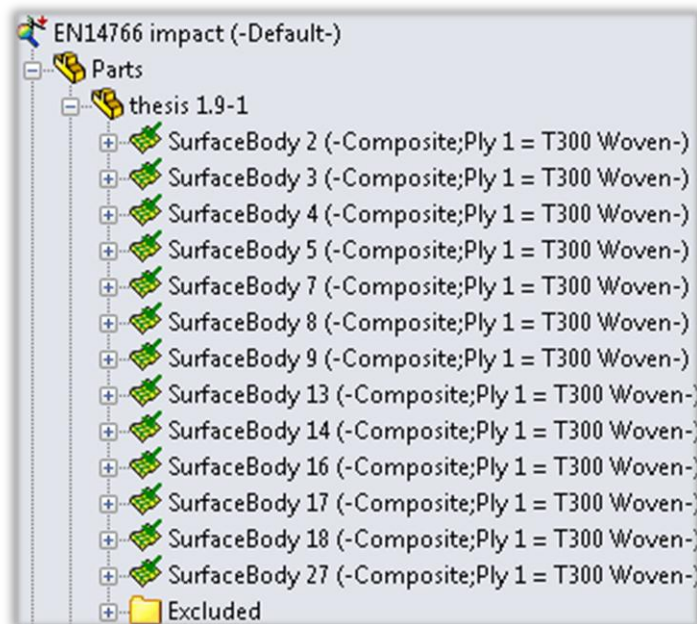
Για κάθε τμήμα δημιουργήθηκε μέσω Excel ένα αρχείο οριοθετημένο με κόμματα (.csv) στο οποίο αναφέρεται το υλικό, η κατεύθυνση, και το πάχος της κάθε στρώσης. Οι διαστρωματώσεις για κάθε τμήμα του πλαισίου ακολουθούν αναλυτικά παρακάτω.

Σημειώνεται πως στην περίπτωση του Head Tube το οποίο αποτελείται μόνο από πλεκτό ύφασμα T300, δίνεται το stack βάσει του κώδικα Laminate Orientation Code Devised by Air Force Materials Laboratory, Wright-

Patterson Air Force Base, Dayton-Ohio, by P.A. Parmley. Βάσει αυτού του κώδικα, πρώτο αναφέρεται η κατώτατη στρώση, και διαβάζοντας προς τα δεξιά βλέπουμε την διεύθυνση των ανώτερων στρωμάτων προς την εξωτερική επιφάνεια του Head Tube.

Για όλα τα υπόλοιπα τμήματα του πλαισίου δίνεται σε πινακοποιημένη μορφή το stack της καθεμιάς, με πρώτο στρώμα αυτό της εξωτερικής επιφάνειας μιας κι έτσι εισάγονται και στο pre-processor του Solidworks Simulation.

Επίσης σε κάθε προσδιορισμό του stack για κάθε τμήμα, ορίζεται στο pre-processor πως η επιφάνεια του μοντέλου είναι η άνω επιφάνεια του σύνθετου υλικού, για να τοποθετηθεί σωστά η μεμβράνη των πεπερασμένων στοιχείων και



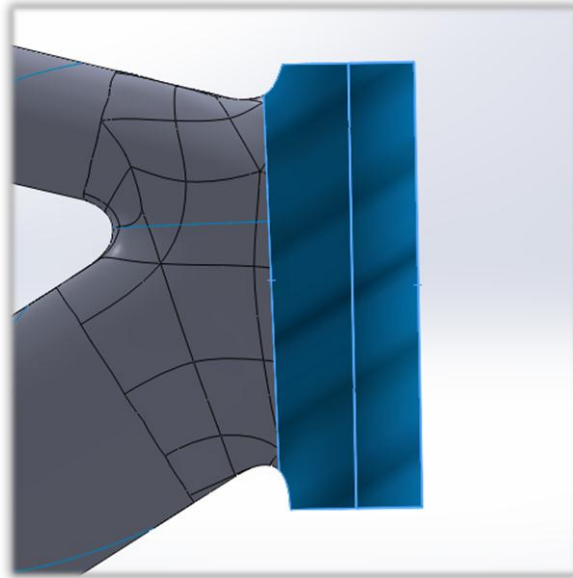
να υπολογιστούν σωστά οι τάσεις σε κάθε στρώμα.

Head Tube

Το Head Tube έχει 10 πλεκτά υφάσματα T300 και κανένα μονοδιευθυντικό. Οι διευθύνσεις των υφασμάτων είναι:

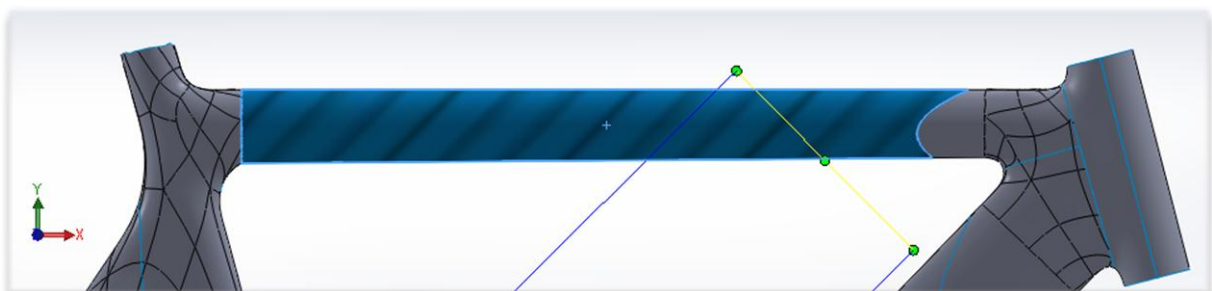
[90/45/(0/-

45/90/45)₂]_T



Top Tube

#	Thickness	Angle	Material
1	0.25	45	T300 Woven
2	0.15	0	M40J Unidirectional
3	0.25	-45	T300 Woven
4	0.15	0	M40J Unidirectional



Seat Stays

#	Thickness	Angle	Material
1	0.25	45	T300 Woven
2	0.15	0	M40J Unidirectional
3	0.25	-45	T300 Woven



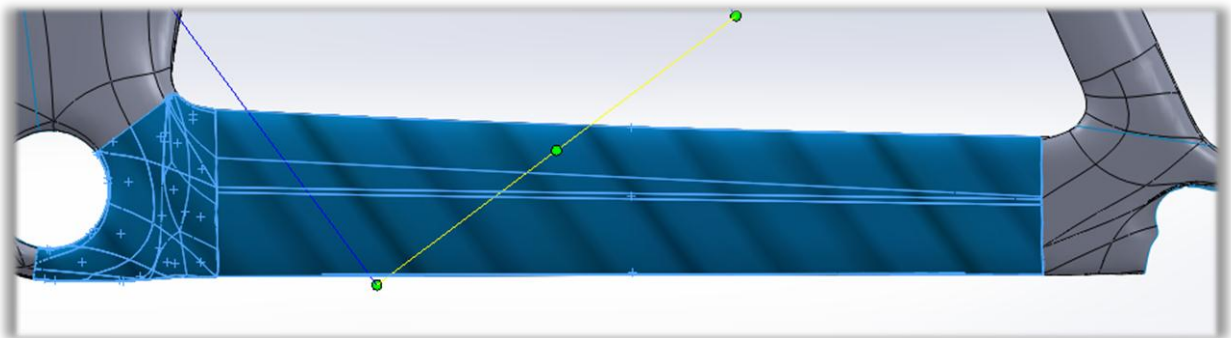
Down Tube

#	Thickness	Angle	Material
1	0.25	45	T300 Woven
2	0.15	0	M40J Unidirectional
3	0.25	-45	T300 Woven
4	0.15	0	M40J Unidirectional
5	0.25	45	T300 Woven
6	0.15	0	M40J Unidirectional



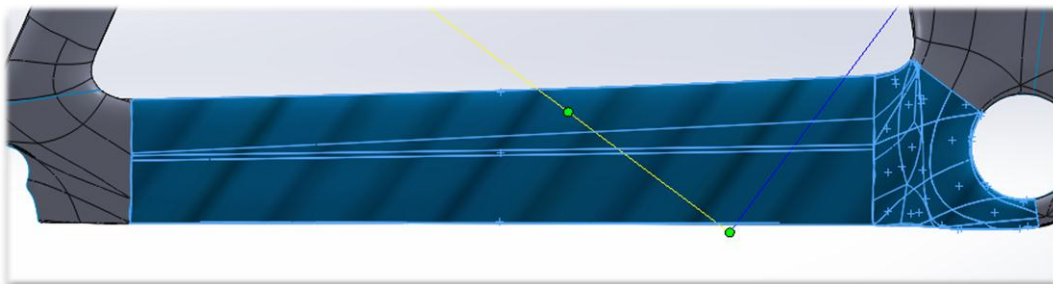
L & R Chain Stays

#	Thickness	Angle	Material
1	0.25	45	T300 Woven
2	0.15	0	M40J Unidirectional
3	0.25	-45	T300 Woven
4	0.15	0	M40J Unidirectional
5	0.25	45	T300 Woven
6	0.15	0	M40J Unidirectional



Μόνο για το δεξί chain stay επιπλέον:

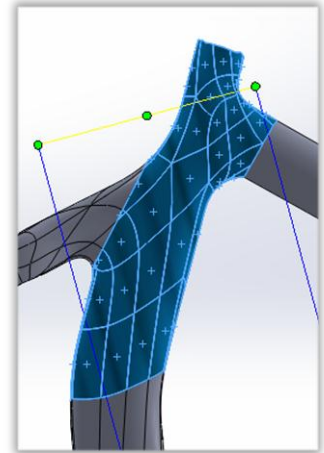
7	0.25	45	T300 Woven
8	0.15	0	M40J Unidirectional



Seat Tubes 1 - 2 - 3

Seat Stay 3

#	Thickness	Angle	Material
1	0.25	45	T300 Woven
2	0.25	0	T300 Woven
3	0.25	0	M40J Unidirectional

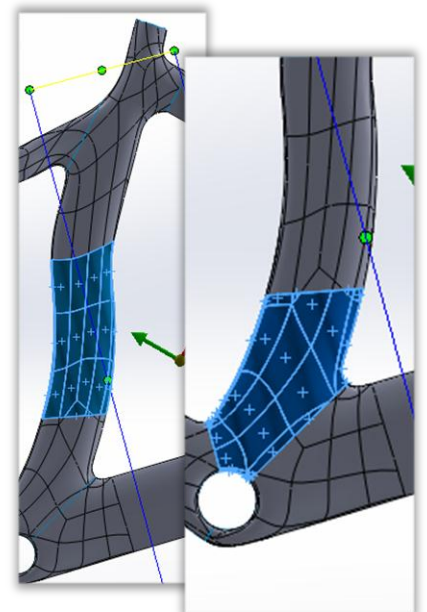


Seat Stay 2

4	0.15	0	M40J Unidirectional
---	------	---	---------------------

Seat Stay 1

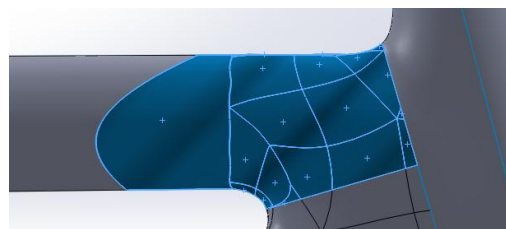
5	0.25	0	M40J Unidirectional
---	------	---	---------------------



Το Seat Tube χωρίζεται σε 3 περίπου ίσα κομμάτια και όπως κατεβαίνουμε από το σημείο της σέλας μέχρι τον άξονα των πεντάλ αυξάνουμε τον αριθμό των στρώσεων. Από τον άξονα των πεντάλ τα τελευταία δύο μονοδιευθυντικά στρώματα M40J, κόβονται και σταματούν στα αντίστοιχα σημεία αλλαγής της καμπυλότητας του Seat Tube.

Head & Top Tubes overlap

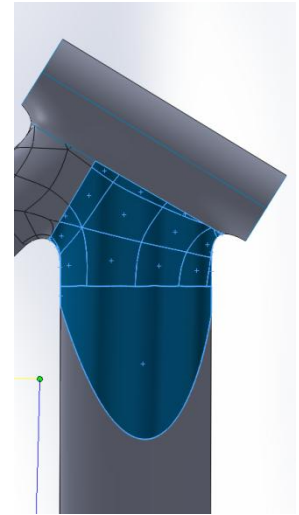
Οι αλληλεπικαλύψεις δημιουργούνται εναλλάσσοντας τις στρώσεις του Head Tube και του Top Tube:



#	Thickness	Angle	Material
1	0.25	45	T300 Woven
2	0.25	45	T300 Woven
3	0.25	90	T300 Woven
4	0.15	0	M40J Unidirectional
5	0.25	-45	T300 Woven
6	0.25	-45	T300 Woven
7	0.25	0	T300 Woven
8	0.15	0	M40J Unidirectional
9	0.25	45	T300 Woven
10	0.25	90	T300 Woven
11	0.25	-45	T300 Woven
12	0.25	0	T300 Woven
13	0.25	45	T300 Woven
14	0.25	90	T300 Woven

Head & Down Tubes overlap

#	Thickness	Angle	Material
1	0.25	45	T300 Woven
2	0.25	45	T300 Woven
3	0.25	90	T300 Woven
4	0.15	0	M40J Unidirectional
5	0.25	-45	T300 Woven
6	0.25	-45	T300 Woven
7	0.25	0	T300 Woven
8	0.15	45	M40J Unidirectional
9	0.25	45	T300 Woven
10	0.25	90	T300 Woven
11	0.25	0	T300 Woven
12	0.15	-45	M40J Unidirectional
13	0.25	-90	T300 Woven
14	0.25	0	T300 Woven
15	0.25	45	T300 Woven
16	0.25	90	T300 Woven



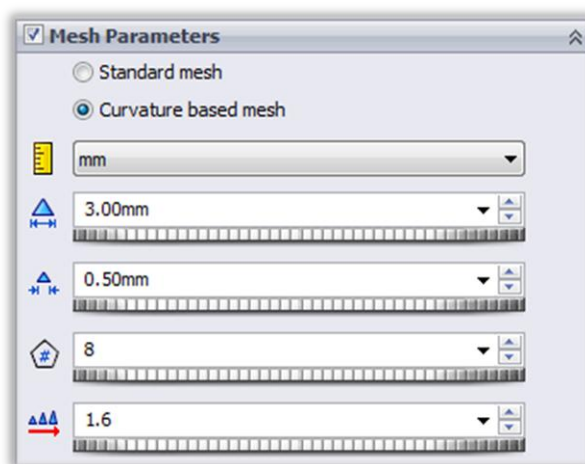
Meshing

Το Solidworks Simulation μας επιτρέπει αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία για επιφάνειες, στερεά και μεικτές γεωμετρίες. Στην περίπτωση μας, έχουμε μείξη επιφανειών (τα τμήματα του πλαισίου που έχουν γίνει ξεχωριστά σώματα το καθένα) και στερεού σώματος που είναι η διαμορφωμένη χαλύβδινη ράβδος που αντικαθιστά το εμπρόσθιο πιρούνι κατ' απαίτηση της CEN για τον EN14781 όπως θα δούμε παρακάτω.

Επίσης μας δίνεται η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε πλέγμα τύπου Voronoi-Delaunay, με το οποίο όμως δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η καμπυλότητα του σώματος και όλα τα στοιχεία του πλέγματος έχουν σταθερό μέγεθος, και σε πλέγμα που βασίζεται στην καμπυλότητα του μοντέλου. Ενεργοποιούμε την δεύτερη επιλογή μιας κι έτσι ο αλγόριθμος θα δημιουργήσει περισσότερα και μικρότερα στοιχεία σε περιοχές υψηλής καμπυλότητας αυτόματα. Στην περίπτωση επιλογής της κλασσικού πλέγματος, θα έπρεπε χειροκίνητα να δείξουμε στο λογισμικό που επιθυμούμε μεγαλύτερη ανάλυση, επιλέγοντας περιοχές μία-μία.

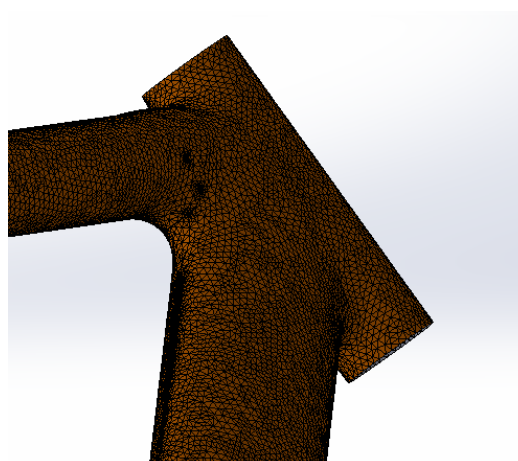
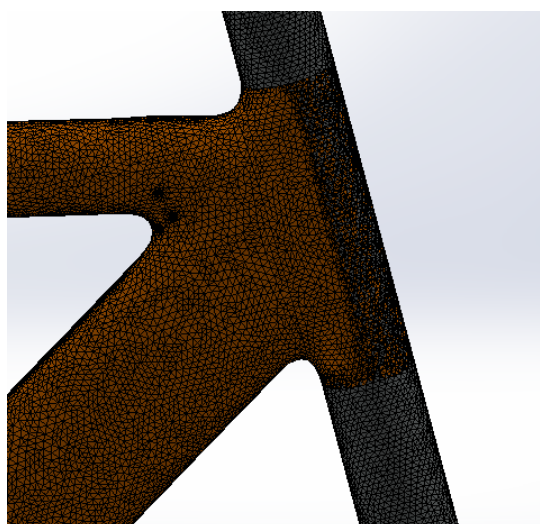
Οι παράμετροι εισόδου για την δημιουργία του πλέγματος είναι:

- Μέγιστο μέγεθος στοιχείου
- Ελάχιστο μέγεθος στοιχείου
- Ελάχιστος αριθμός στοιχείων σε έναν κύκλο
- Λόγος αύξησης μεγέθους στοιχείων που χρησιμοποιείται για την μετάβαση από τις περιοχές χαμηλής προς αυτές υψηλής καμπυλότητας



Το λογισμικό ορίζει το πλέγμα συνολικά ως επιφάνεια μηδενικού πάχους, και για κάθε σώμα που έχουμε ορίσει νωρίτερα, διαβάζει το σύνολο των χρησιμοποιούμενων υφασμάτων και υπολογίζει το πάχος του.

Έχοντας ορίσει τις απαραίτητες παραμέτρους το λογισμικό δημιουργεί το πλέγμα μας κι έχουμε με καφέ χρώμα το πλέγμα επιφανειών και με γκρι το πλέγμα της στερεάς ράβδου:

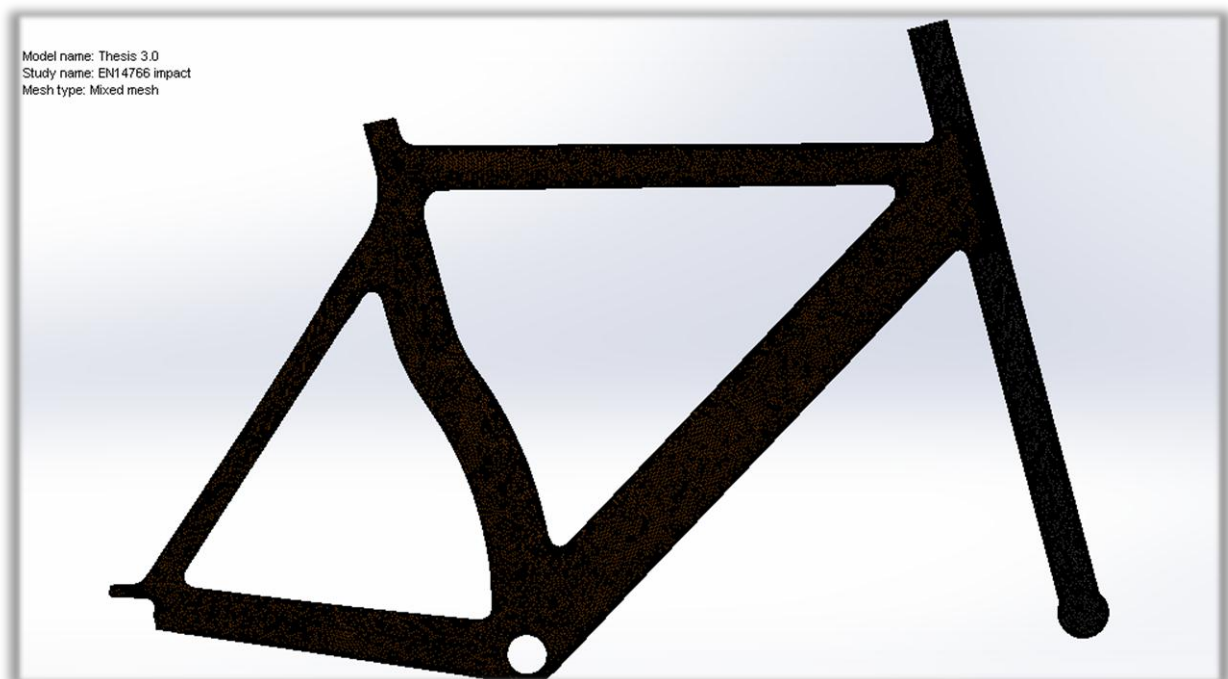




Mesh Details	
Study name	EN14766 impact (-Default-)
Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used	Curvature based mesh
Jacobian points	4 points
Jacobian check for shell	On
Max Element Size	3 mm
Min Element Size	0.5 mm
Mesh quality	Draft
Total nodes	115899
Total elements	376979

Όπως φαίνεται και στις λεπτομέρειες του πλέγματος, όπως αυτές δίνονται από το λογισμικό, δημιουργήθηκαν 376,979 στοιχεία κι έχουμε 115,899 κόμβους στο μοντέλο μας.

Οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος θα υπολογισθούν μετά τον ορισμό αρχικών συνθηκών του προβλήματος, όπως στηρίξεις και φορτίσεις, και κατά την επίλυσή του.



Solver

Πριν προχωρήσουμε στις αρχικές συνθήκες της κάθε ανάλυσης, αξίζει να γίνει μία σύντομη αναφορά στον επιλυτή που χρησιμοποιεί το λογισμικό.

Η βασική εξίσωση στην ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ορίζει τις προκύπτουσες των αρχικών συνθηκών τάσεις ως το γινόμενο των μετατοπίσεων του κάθε στοιχείου επί την δυσκαμψία (ή ελαστικότητα) του. Η εξίσωση αυτή εκφράζεται με την μητρική μορφή $[F] = [K] \cdot [U]$, και αυτό το σύστημα είναι που θα πρέπει να λυθεί για την λήψη των αποτελεσμάτων. Το Solidworks προσφέρει δύο επιλογές στον τρόπο με τον οποίο επιλύει την εξίσωση, έναν ευθύ κι έναν επαναληπτικό

→ **Direct Sparse Solver**

Ο άμεσος επιλυτής δημιουργεί ολόκληρους τους πίνακες που χρησιμοποιούνται για την συγκρότηση της βασικής εξίσωσης, μεταξύ των οποίων βρίσκεται όχι μόνο ο πίνακας δυσκαμψίας K , αλλά και ο αντίστροφός του. Κατόπιν του υπολογισμού τους ο επιλυτής πρέπει να λύσει ένα απλό γινόμενο το οποίο περιγράφεται $[K]^{-1} \cdot [F] = [K]^{-1} \cdot [K] \cdot [U]$. Σημειώνεται εδώ πως ο υπολογισμός του αντίστροφου πίνακα απαιτεί πολλούς υπολογιστικούς πόρους, και πιο συγκεκριμένα προσωρινή μνήμη (RAM).

→ **FFEPlus Solver**

Ο επιλυτής αυτός λειτουργεί επαναληπτικά. Κατόπιν του ορισμού των αρχικών συνθηκών, ο επιλυτής θέτει τυχαίες τιμές στα στοιχεία του πίνακα παραμόρφωσης $[U]$. Στην συνέχεια επιλύει την βασική εξίσωση, βρίσκει την διαφορά της τυχαίας τιμής από το αποτέλεσμα και διορθώνει τις τιμές κατάλληλα για την επόμενη επανάληψη. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι σύγκλισης, η οποία από προεπιλογή ορίζεται 10^{-8} και μπορεί κατά την διάρκεια της επίλυσης να αλλαχθεί σε οποιοδήποτε επίπεδο, προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία.

Ο μεν ευθύς επιλυτής έχει πλεονέκτημα (δεδομένης αρκετής μνήμης RAM για τον σταθμό εργασίας που εκτελείται ο επιλυτής) για προβλήματα μέχρι 300,000 βαθμούς ελευθερίας, απαιτώντας λιγότερη μνήμη από τον επαναληπτικό FFEPlus. Επίσης σε προβλήματα πολλών τεμαχίων σε επαφή, ή σε προβλήματα με μεγάλες διακυμάνσεις στην ελαστικότητα των τεμαχίων, ο ευθύς επιλυτής είναι πιο αποδοτικός.

Εν τούτοις, όταν το πρόβλημα ξεπεράσει τους 300,000 βαθμούς ελευθερίας, ο επαναληπτικός επιλυτής απαιτεί λιγότερους πόρους, χωρίς όμως να λύνει το πρόβλημα πολύ ταχύτερα.

Μιας και οι δύο δοκιμές μας ξεπερνούν το μισό εκατομμύριο DOF η επιλογή του FFEPlus επαναληπτικού solver ήταν μονόδρομος, μιας και δεν ήταν διαθέσιμος κάποιος σταθμός εργασίας με μεγάλα αποθέματα φυσικής μνήμης. Ακόμα και να υπήρχε όμως τέτοια δυνατότητα, η επιλογή του Direct Sparse θα ήταν λιγότερο αποδοτική από άποψη πόρων, χωρίς να προσφέρει ταχύτητα επίλυσης. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο αναλύσεις χρειάστηκαν 2 (falling frame) και 3 (falling mass) για την επίλυσή τους, επιλέγοντας και στις δύο περιπτώσεις όριο σύγκλισης το 10^{-5} .

Linear vs non-linear

Οι αναλύσεις που θα γίνουν αποφασίζονται να γίνουν γραμμικές παρά το γεγονός ότι αναμένονται τάσεις που θα ξεπεράσουν κατά πολύ το UTS των υλικών μας. Οι λόγοι είναι δύο:

1. Το Solidworks Simulation παρέχει εξαιρετικά εργαλεία για μη-γραμμικές αναλύσεις ισοτροπικών υλικών, αλλά δυστυχώς δεν παρέχει την δυνατότητα για την δημιουργία καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων για ορθοτροπικά υλικά όπως τα δικά μας. Ο ορισμός αντίστοιχου ισότροπου υλικού ίσως ήταν μία παραδοχή εντός της απαιτούμενης ακρίβειας για το πλεκτό T300 ύφασμα που έχει συγκρίσιμες ιδιότητες στους άξονες X και Y. Οι ιδιότητες κατά τον άξονα Z δεν επηρεάζουν τ' αποτελέσματά μας, μιας και έχουμε επιφάνειες ελάχιστου πάχους, και τα υφάσματα που λαμβάνουν τις τάσεις μπορούν να θεωρηθούν ότι βρίσκονται σε επίπεδη εντατική κατάσταση. Η παραδοχή όμως ενός ισοτροπικού M40J μονοδιευθυντικού υφάσματος θα ήταν ιδιαίτερα ανακριβής, μιας κι εμφανίζει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες στον άξονα X και τις πολύ χειρότερες ιδιότητες της ρητίνης που αποτελεί την μήτρα στο άξονα Y.
2. Η παραδοχή γραμμικότητας και μετά το σημείο θραύσης μπορεί να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα στον μηχανικό θεωρώντας για παράδειγμα ότι περιοχές στις οποίες αναπτύσσονται τάσεις 2x UTS θα είχαν τάσεις κάτω από το UTS αν μόνο εκεί προστεθεί επιπλέον υλικό για να παραλάβει τις τάσεις. Η ανακρίβεια που εισέρχεται έχει να κάνει με την διαφορετική κατανομή των τάσεων στο σύνολο του σώματος, αλλά για τις ανάγκες της επικύρωσης που μας ενδιαφέρει καθαρά αν το σχέδιο ικανοποιεί τις προδιαγραφές μας ή όχι, τέτοιου είδους χονδροειδή συμπεράσματα είναι αρκετά.

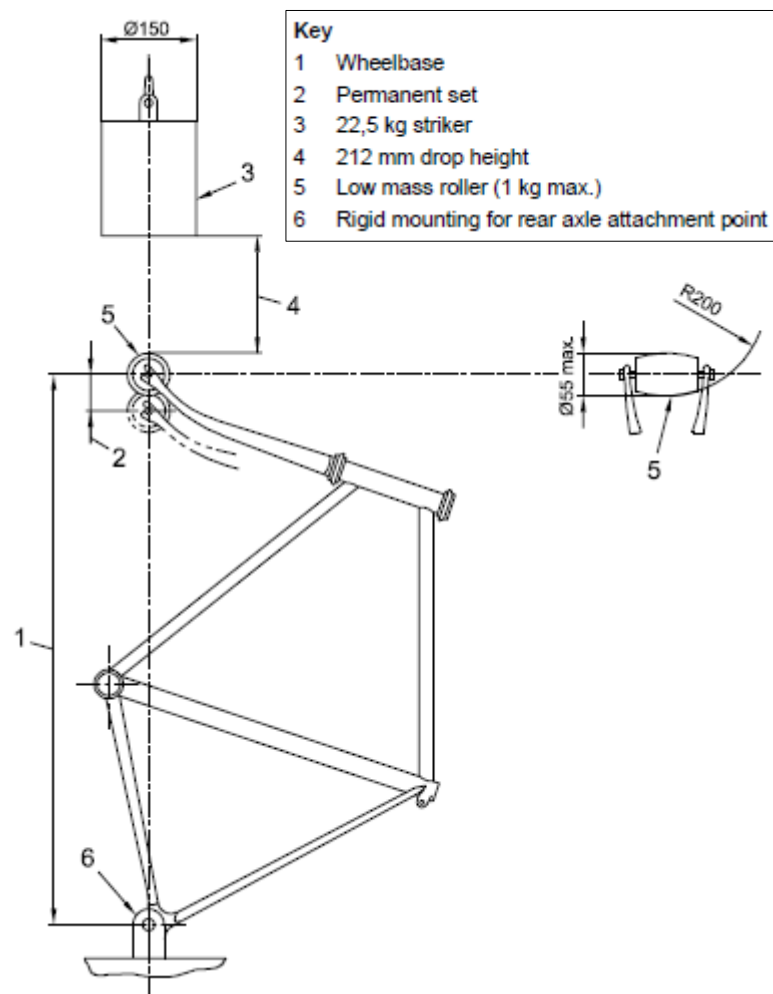
Θυμίζουμε ότι κέντρο της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμφωνίας του προϊόντος με τις προδιαγραφές αντοχής που θέτονται από την CEN στα πλαίσια του EN14781. Επαναλαμβάνουμε λοιπόν ότι τ' αποτελέσματά μας είναι τύπου go/no-go και σε περίπτωση διαπίστωσης συμμόρφωσης ή μη του σχεδίου με τις προδιαγραφές αντοχής, το συμπέρασμα μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές και σαφές.

Falling Mass

Η πρώτη δοκιμή εξετάζει την σύγκρουση του ποδηλάτου με εμπόδιο. Απαιτεί το ποδήλατο τοποθετημένο με την ευθεία που ενώνει τους άξονές του να βρίσκεται στην κατακόρυφο, συναρμολογημένο με ένα εμπρόσθιο πιρούνι που τηρεί τον ίδιο κανονισμό. Στην άκρη του τοποθετείται ατσάλινη διαμόρφωση που ορίζεται από τον κανονισμό. Για κατασκευαστές πλαισίων που μπορεί να μην έχουν στην διάθεσή του πιρούνια, επιτρέπεται από την CEN ν' αντικατασταθούν με μία μασίφ μπάρα από ατσάλι που να καταλήγει στην ίδια διαμόρφωση. Μιας και δεν παρέχεται πιρούνι προς μοντελοποίηση και εισαγωγή στις μελέτες μας, μοντελοποίησα στο Solidworks μία μπάρα που ν' ακολουθεί τις προδιαγραφές και την εισήγαγα στο μοντέλο μας δημιουργώντας ένα assembly.

Αφού το ποδήλατο στηρίζεται όπως περιγράφεται παραπάνω, βάρος 22.5 Kgr αφήνεται να ηρεμήσει στο roller. Κατόπιν ανυψώνεται στα 212mm κι αφήνεται να πέσει. Το βάρος όπως είναι λογικό θ' αναπηδήσει μερικές φορές και κατόπιν θα ηρεμήσει στο roller. Για να περάσει την δοκιμή το πλαίσιο θα πρέπει μετά την ηρεμία το μεταξόνιο του ποδηλάτου να μετρηθεί έως και 15mm μικρότερο σε σχέση με το μεταξόνιο χωρίς βάρος στην άκρη του roller. Επίσης θα πρέπει σε όλο το πλαίσιο να μην εντοπίζονται ρωγμές ή σπασίματα και θα πρέπει σε περίπτωση ανάρτησης να μην υπάρχει διαχωρισμός των εξαρτημάτων της.

Η δοκιμή εξετάζει την ύπαρξη πλαστικών παραμορφώσεων και την έκτασή τους. Για παράδειγμα στην περίπτωση μεταλλικού πλαισίου, αν το υλικό διέρρει λόγω της κρούσης, αναμένεται να παραμορφωθεί το head tube, αλλάζοντας την γωνία του πιρουνιού και μειώνοντας κατά πολύ το μεταξόνιο μετά την κρούση. Στην περίπτωση μας, αν το ανθρακόνημα καταρρεύσει από το φορτίο της κρούσης δεν θα υπάρξει μόνιμη παραμόρφωση χωρίς σπασίματα, αφού όταν ξεπεραστεί το όριο διαρροής του υλικού, η ελαστικότητά του μηδενίζεται. Θα πρέπει δηλαδή το πλαίσιο να απορροφήσει την σύγκρουση και να μην ξεπεραστεί το όριο διαρροής των 3 GPa σε κανένα σημείο του προκειμένου να περάσει το τεστ. Σε περίπτωση μεταλλικού πλαισίου, θα έπρεπε να κάνουμε μη-γραμμική ανάλυση, αναμένοντας πλαστικές παραμορφώσεις οι οποίες θα έδιναν μόνιμα μειωμένο μεταξόνιο.



Ιδανικά θα γίνονταν δυναμική ανάλυση του μοντέλου μας, μιας και η πτώση βάρους και η ακόλουθη σύγκρουση είναι ένα καθαρά δυναμικό φαινόμενο. Το Solidworks Simulation προσφέρει δυνατότητα για δυναμικές αναλύσεις, με το μειονέκτημα όμως, της εξαίρεσης αποτελεσμάτων ανά στρώμα (per ply analysis). Τα αποτελέσματα που εξάγονται από την λύση του μοντέλου είναι συνολικά σε όλον τον όγκο του υλικού, και δεν μπορούν να παρατεθούν ανά στρώμα, και δεν μπορούμε έτσι να έχουμε πλήρη εποπτεία για την συμπεριφορά των υφασμάτων και την συμμετοχή τους στην αντοχή απέναντι στην συγκεκριμένη δοκιμή.

Γι' αυτό επιλέχθηκε η αντικατάσταση της δυναμικής καταπόνησης με μίας ισοδύναμης στατικής. Το φορτίο που δέχεται το πλαίσιο από την πτώση του striker μπορεί να υπολογιστεί από την κινητική ενέργεια του και με απλές και ρεαλιστικές παραδοχές για την απορρόφηση της σύγκρουσης από το πλαίσιο και πιο συγκεκριμένα το Head Tube και την ατσάλενια μπάρα.

Πιο συγκεκριμένα η κινητική ενέργεια που θα έχει το striker την στιγμή της σύγκρουσης θα είναι ακριβώς ίση με την δυναμική ενέργεια του όταν ηρεμεί 212mm πάνω από το σημείο της σύγκρουσης:

$$E = m \times g \times h = 22.5Kg \times 9.80665 \frac{m}{sec^2} \times 212mm$$

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι το βέλος κάμψης της μπάρας, αθροισμένο με την παραμόρφωση που επιτρέπει το head tube και το υπόλοιπο πλαίσιο είναι συνολικά 5mm. Τότε το έργο που καταναλώνεται από το πλαίσιο κατά την διάρκεια της σύγκρουσης είναι:

$$W = F \times s$$

με F την δύναμη που θ' ασκήσει το πλαίσιο και το πιρούνι για να επιβραδύνει σε απόσταση s το striker

Τότε η δύναμη είναι:

$$F = \frac{W}{s}, \text{ όπου } W = E = m \times g \times h$$

$$F = \frac{m \times g \times h}{s} = 9355.54N$$

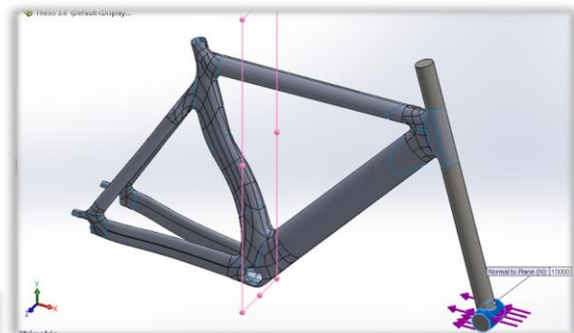
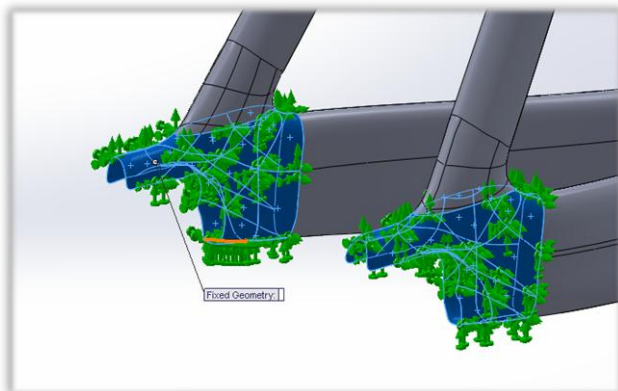
Άρα το φορτίο που ασκείται στο πλαίσιο θα είναι περίπου 9.4KN. Όπως γράφτηκε και στην αρχή της παραγράφου όμως, οι μελέτες μας δεν έχουν σκοπό την βελτιστοποίηση του σχεδίου, αλλά την επικύρωσή του για τις δεδομένες προδιαγραφές. Για να εξασφαλίσουμε λοιπόν την τήρηση των προδιαγραφών, θα εξετάσουμε το ποδήλατο για 10KN.

Επίσης τα 5mm είναι μία πρόβλεψη η οποία αποφέρει υψηλό φορτίο υποθέτοντας ένα πολύ δύσκαμπτο πλαίσιο, το οποίο θ' αντιδράσει με μεγάλο φορτίο επιβραδύνοντας σε πολύ μικρή απόσταση το striker. Ένα πιο εύκαμπτο πλαίσιο, θα επέτρεπε μεγαλύτερη συνολική παραμόρφωση, και ταυτόχρονα το φορτίο θα ήταν ανάλογα χαμηλότερο.

Λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών άνθρακα με τον πολύ υψηλό συντελεστή ελαστικότητας, τα πλαίσια που κατασκευάζονται με σύνθετα υλικά καταλήγουν να είναι πολύ πιο δύσκαμπτα σε σχέση με αντίστοιχες μεταλλικές κατασκευές. Η παραμόρφωση του λαιμού αναμένεται να είναι πολύ μικρή λοιπόν και το μεγαλύτερο ποσοστό της παραμόρφωσης θα προέρχεται από την κάμψη της μπάρας.

Πρόχειροι υπολογισμοί, επιβεβαιώνονται από μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο Solidworks Simulation και μας δίνουν βέλος κάμψης περί τα 0.77mm ανά KN κάθετης στο άξονα της μπάρας καμπτικής δύναμης, για μοχλό ίσο με την απόσταση του κατώτερου σημείου του Head Tube από τον εμπρόσθιο άξονα. Με την συμμετοχή και του πλαισίου, αναμένεται μεγαλύτερη παραμόρφωση, αφού πλαίσιο και μπάρα θα λειτουργούν ως ελατήρια εν σειρά με συνολική ελαστική σταθερά μικρότερη από την σταθερά του καθενός.

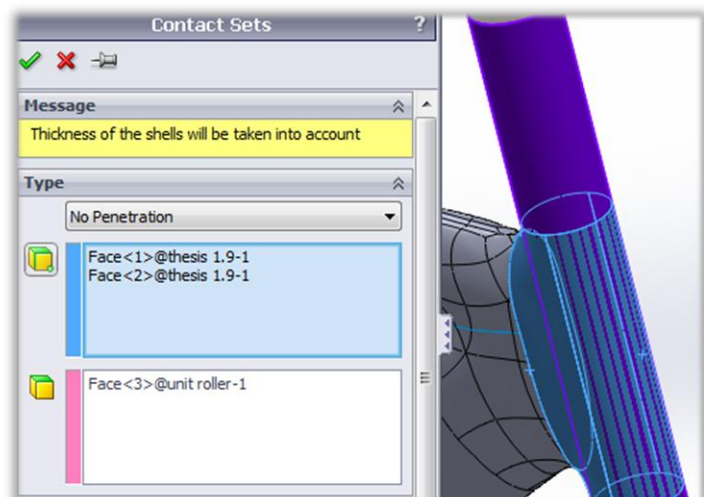
Ορίζουμε λοιπόν 10KN φορτίο κάθετο στο επίπεδο YZ και συνεχίζουμε με τις στηρίξεις.

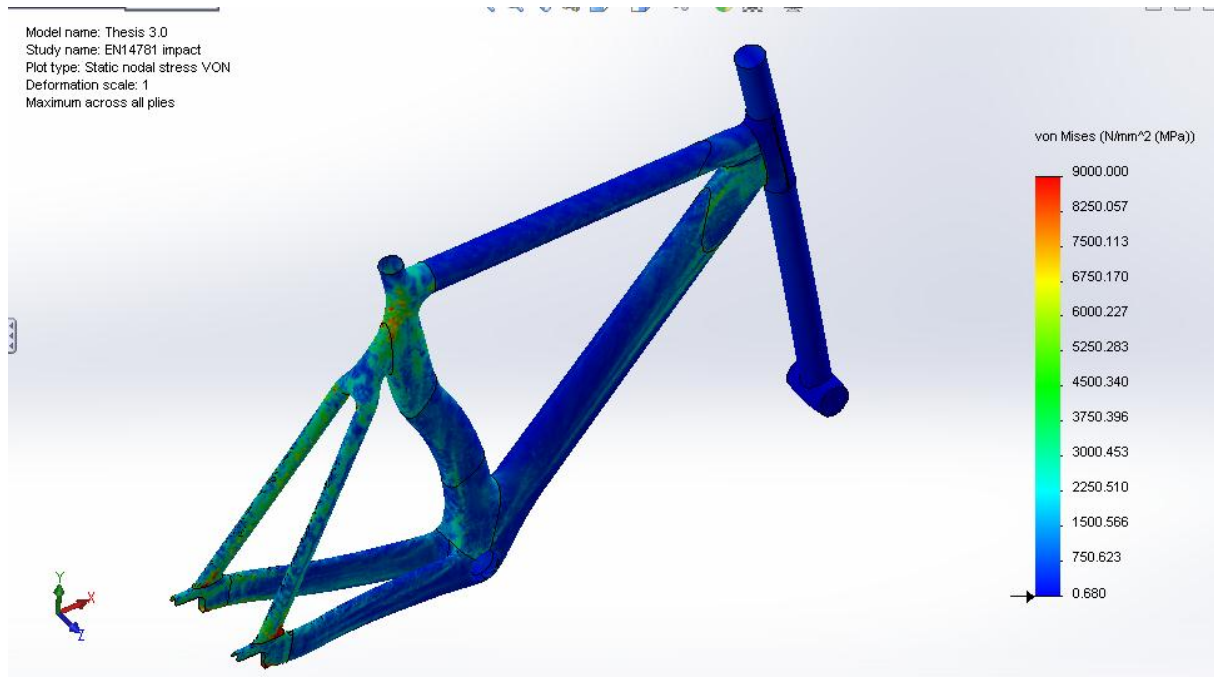


Ο Κανονισμός επιβάλλει στο σημείο πρόσδεσης του πίσω άξονα (Σημείο 6 στο διάγραμμα), πάκτωση για να παραμείνει το πλαίσιο στην θέση του καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής. Για να μην μοντελοποιήσουμε επιπλέον μεταλλικά brackets και προσθέσουμε επιπλέον περιορισμούς επαφής, επιβαρύνοντας το μοντέλο μας, προσδιορίζουμε πάκτωση σε

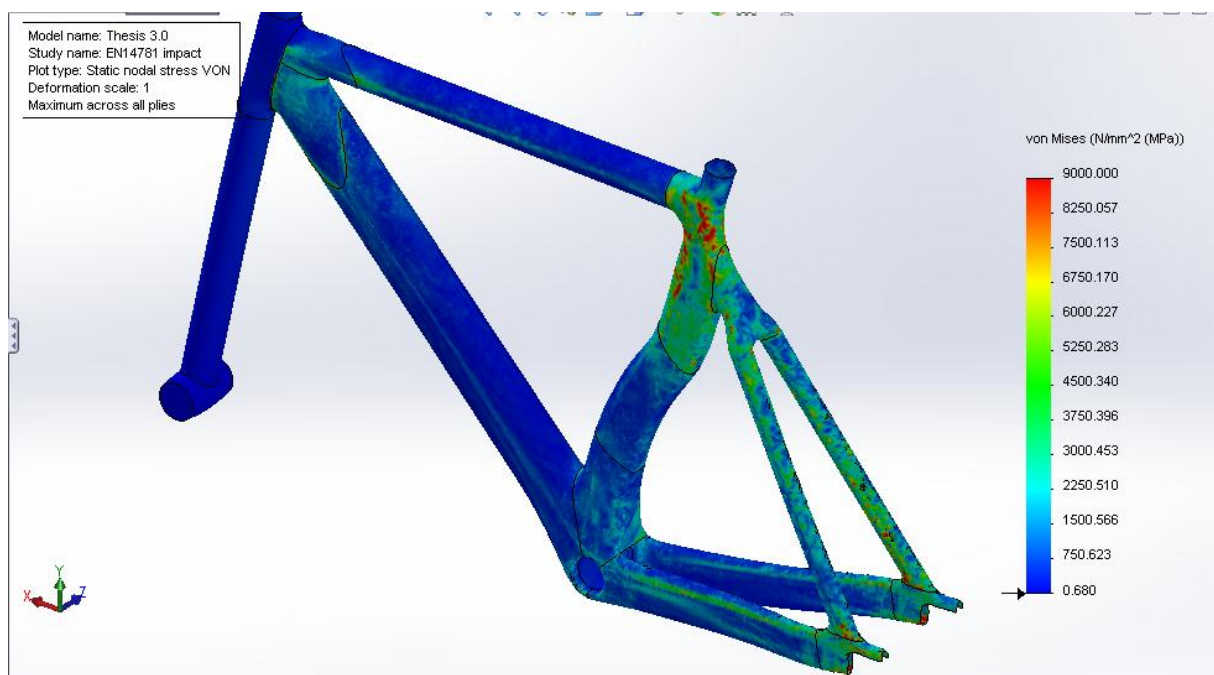
όλη την επιφάνεια που θα στηριχτούν αυτά. Η μοναδική σύμβαση που γίνεται είναι ότι τα brackets είναι απαραμόρφωτα, χωρίς ν' απορροφούν μέρος της φόρτισης, οπότε και πάλι η ανάλυση είναι μη-πραγματική μεν, για χειρότερο σενάριο αυτής δε.

Τέλος ορίζουμε τις συνθήκες επαφής της μπάρας με τον λαιμό του πλαισίου, θέτοντας no penetration, surface-to-surface συνθήκη:





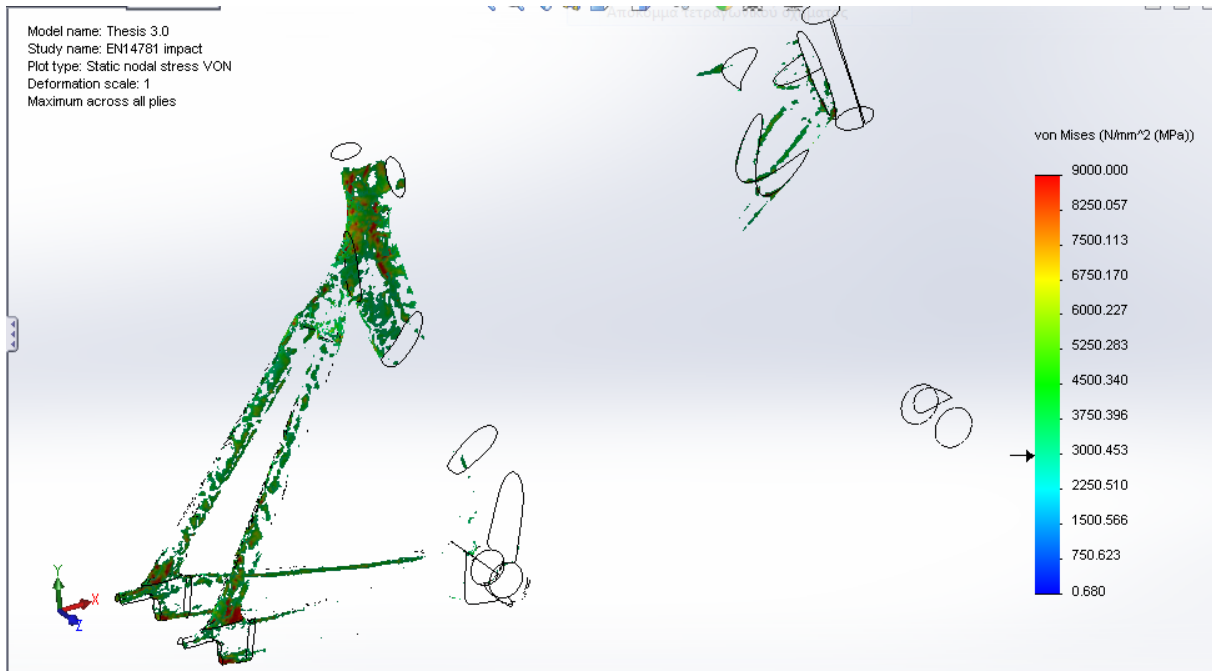
Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν την μέγιστη ισοδύναμη κατά von Misses τάση στο σύνολο των στρώσεων.



Υπάρχει σημαντικό ποσοστό του πλαισίου στο οποίο οι αναπτυσσόμενες τάσεις ξεπερνάνε 2 έως 3 φορές το UTS των υλικών μας και το οποίο βρίσκεται στα επίπεδα των 3000 MPa & 700MPa ανάλογα την στρώση.

Για να καταλάβουμε καλύτερα το πρόβλημα, προχωρούμε σε πιο λεπτομερή ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Με το εργαλείο iso-clipping του post-processor του Solidworks Simulation, μπορούμε να δούμε σε ποιες περιοχές του πλαισίου αναπτύσσονται τάσεις που είναι τουλάχιστον ίσες με τον αριθμό που ζητάμε.



Το πάνω διάγραμμα δείχνει όλες τις περιοχές που η ανάλυσή μας προβλέπει ότι θα καταρρεύσουν και το κάτω δείχνει τα σημεία με τάσεις τουλάχιστον 2 φορές πάνω από το όριο διαρροής του M40J Uni .

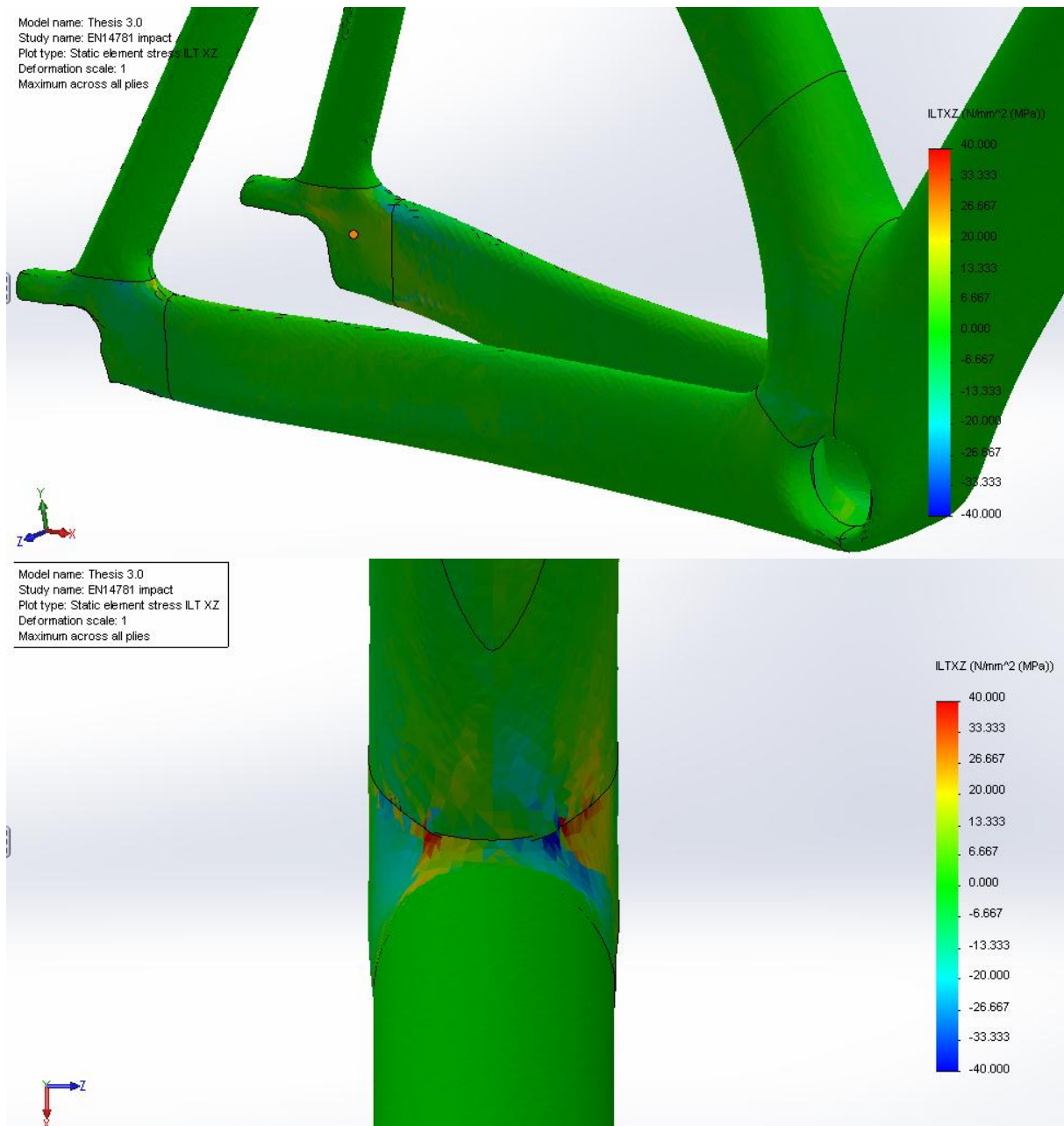


Είναι φανερό λοιπόν πως για την συντριπτική πλειοψηφία των προβληματικών περιοχών, οι αναπτυσσόμενες τάσεις βρίσκονται στην περιοχή 1~2 x UTS. Για τις στρώσεις T300 Woven όμως οι τάσεις είναι περίπου 8.5 φορές πάνω από το όριο διαρροής.

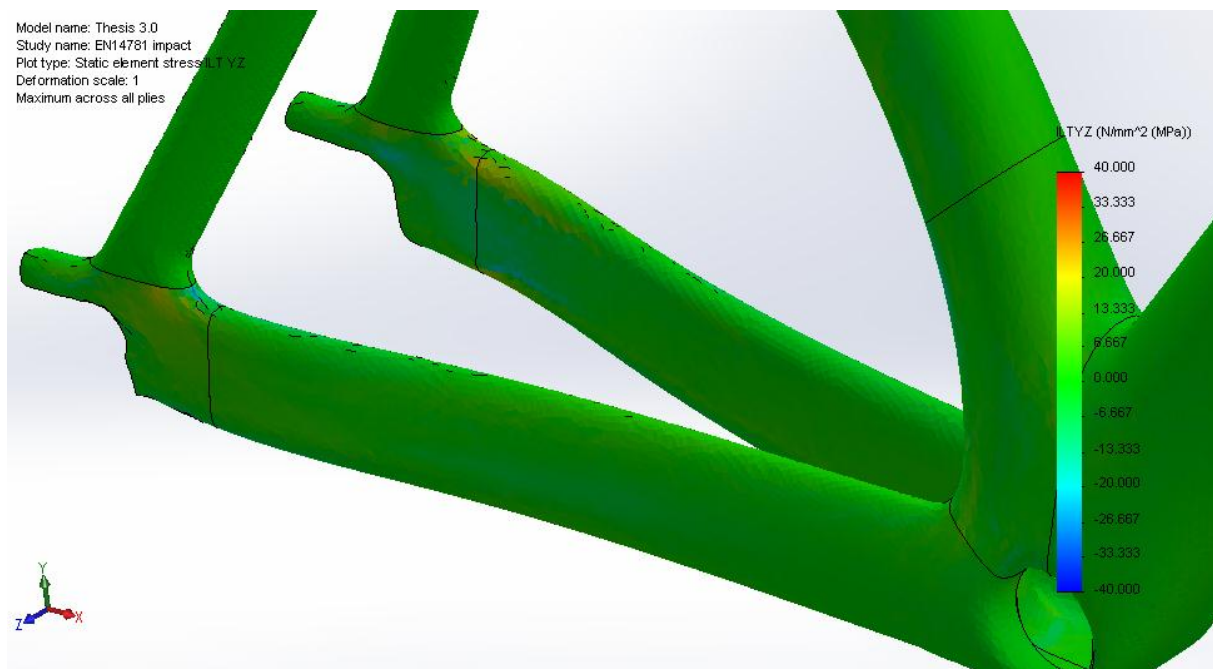
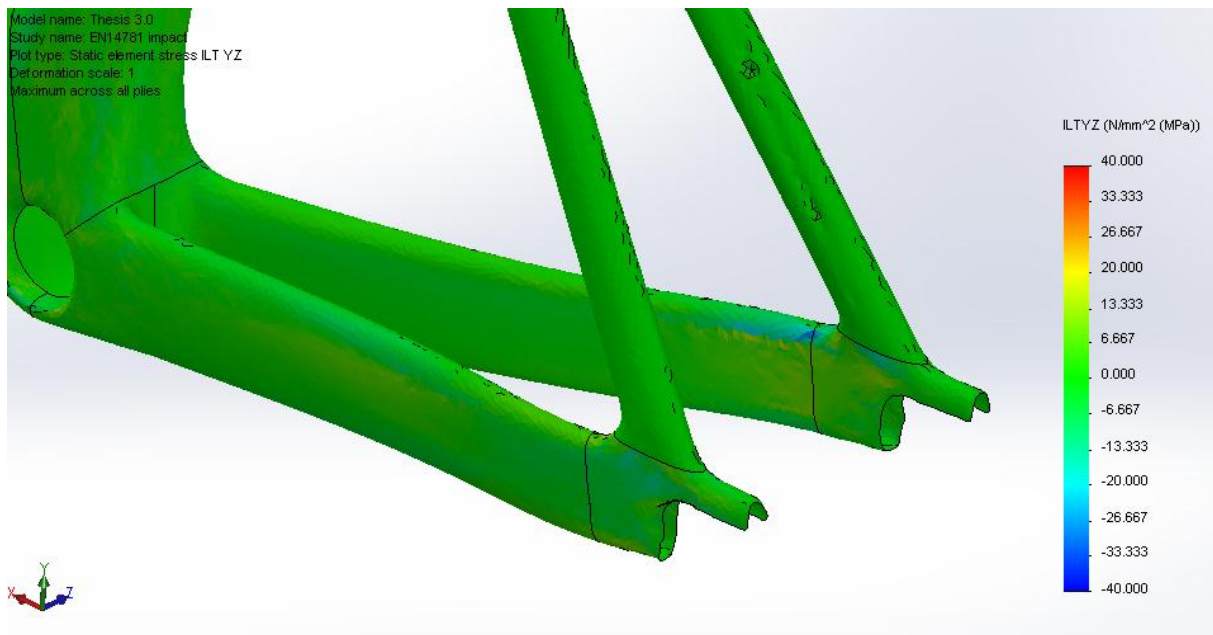
Οι προβληματικές περιοχές των Chain Stays είναι αυτές στις οποίες κανονικά υπάρχουν διπλάσιες στρώσεις από αυτές του μοντέλου μας, μιας κι εκεί βρίσκονται τα parting lines του τρίτου καλουπιού. Το ίδιο ισχύει και για μεγάλο μέρος των σημείων των seat stays, και με την προσθήκη των επιπλέον στρώσεων στο μοντέλο μας, η παραλαβή τάσεων από αυτές θα αλλάξει την κατάσταση προς το καλύτερο και για τις περιοχές εκτός των overlaps. Η περιοχή που φαίνεται να αντιμετωπίζει σοβαρό πρόβλημα και να χρήζει ενίσχυσης είναι το τελευταίο κομμάτι του Seat Tube, στο οποίο υπάρχουν μεγάλες περιοχές μακριά από τις αλληλεπικαλύψεις. Επίσης σε αρκετά μεγάλο μέρος του αναπτύσσονται τάσεις που ξεπερνούν κατά 2 φορές το όριο διαρροής των υλικών μας.

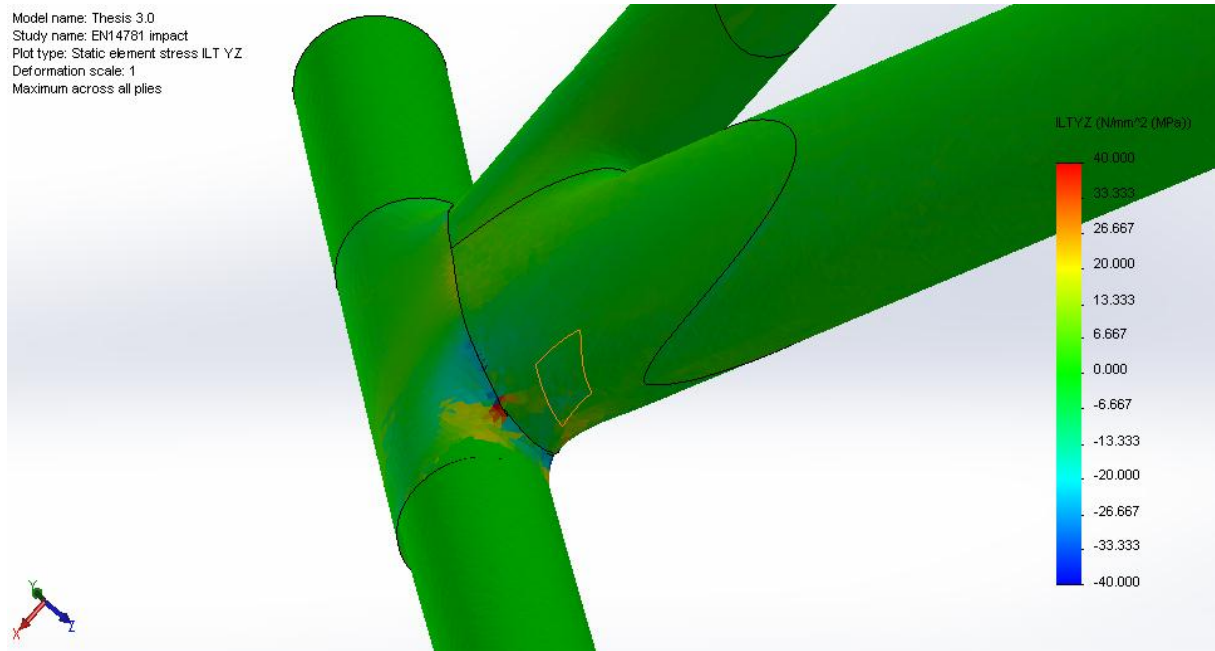
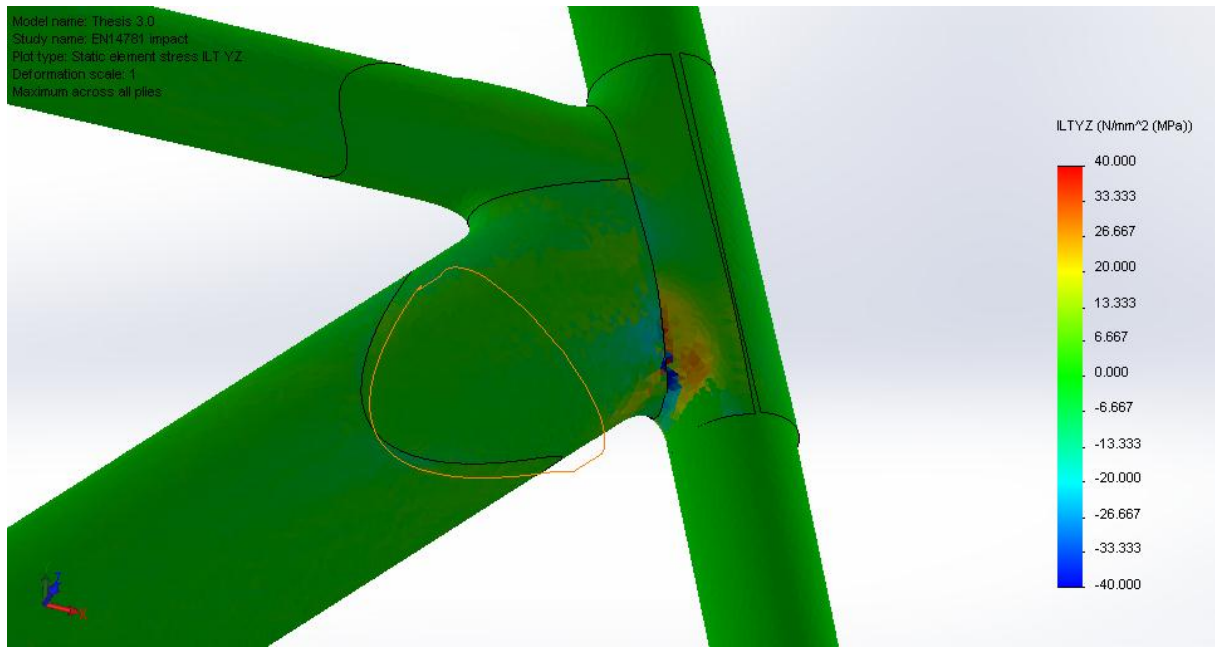
Εξετάζουμε στην συνέχεια τις τάσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στις στρώσεις:

Τάσεις στο επίπεδο XZ του κάθε υφάσματος:



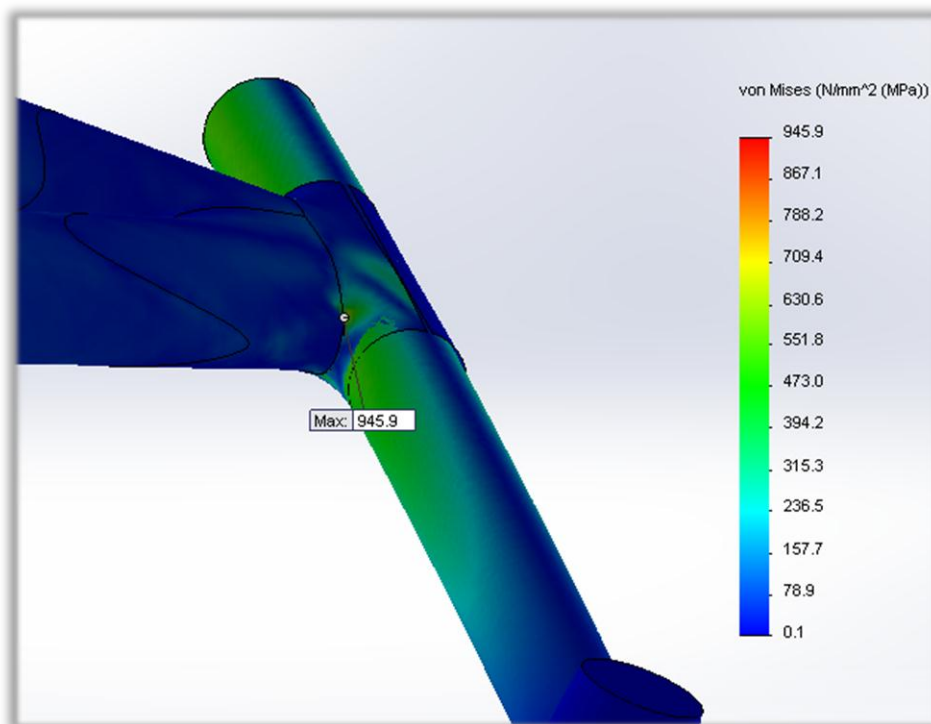
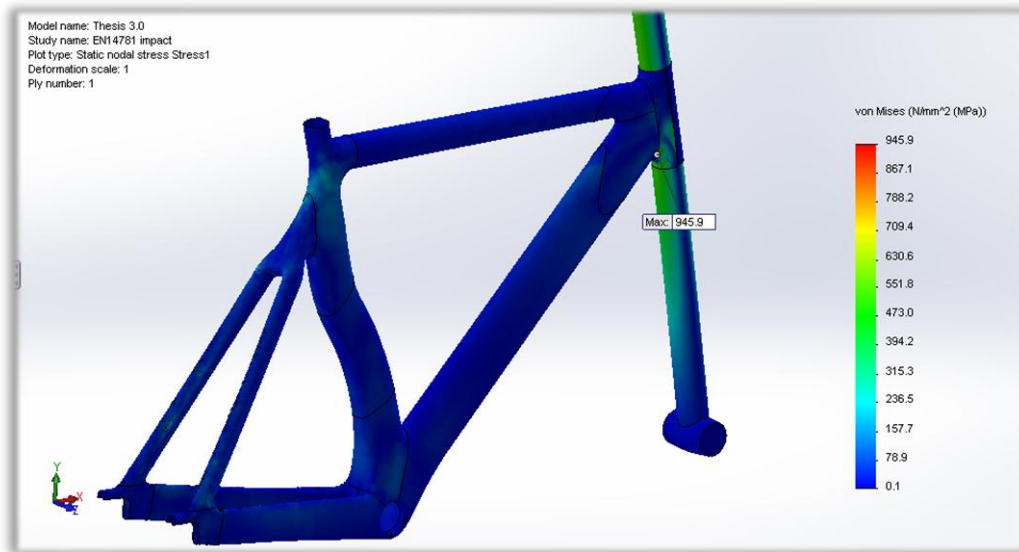
Τάσεις στο επίπεδο YZ του κάθε υφάσματος:



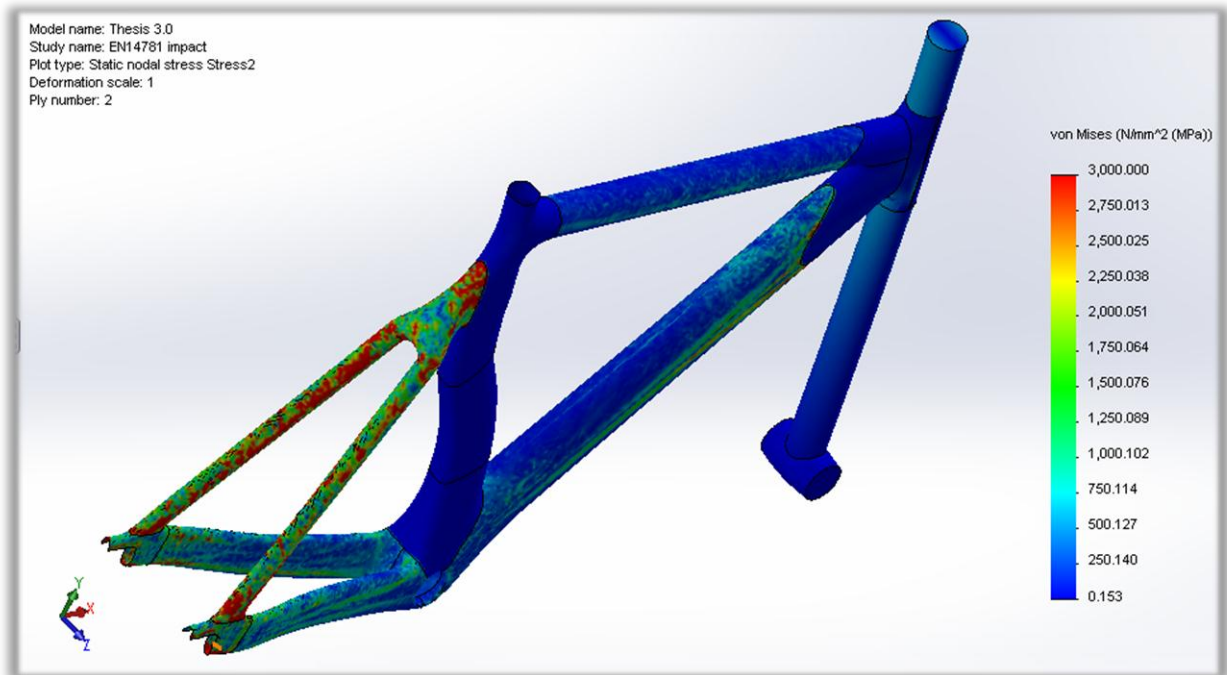
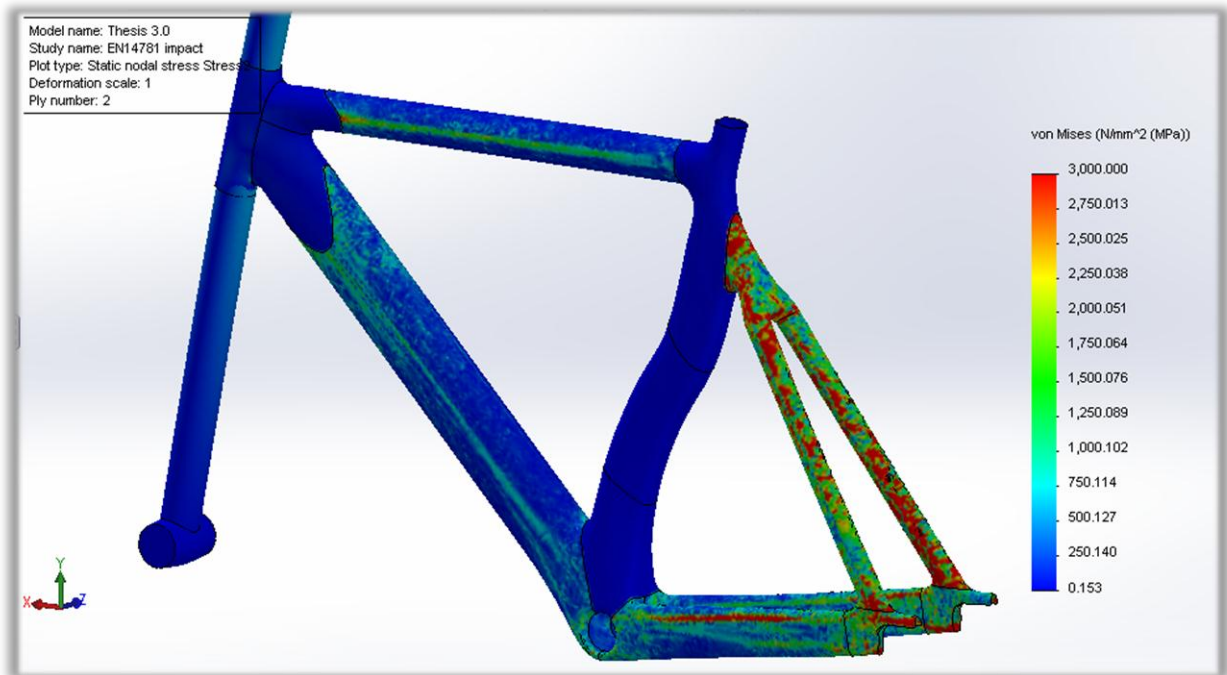


Στην συνέχεια εξετάζουμε προσεκτικότερα την κάθε στρώση:

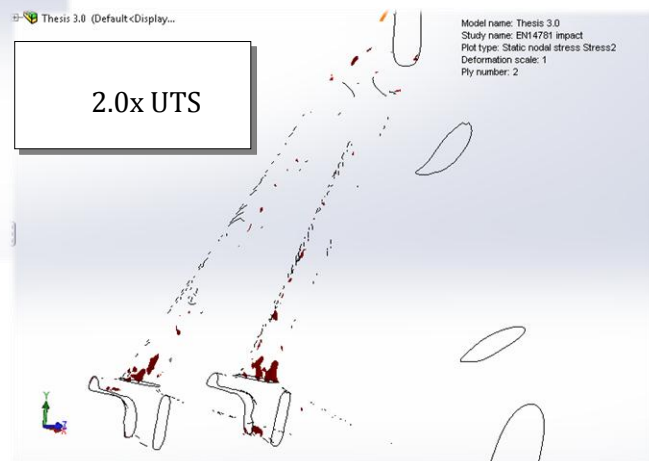
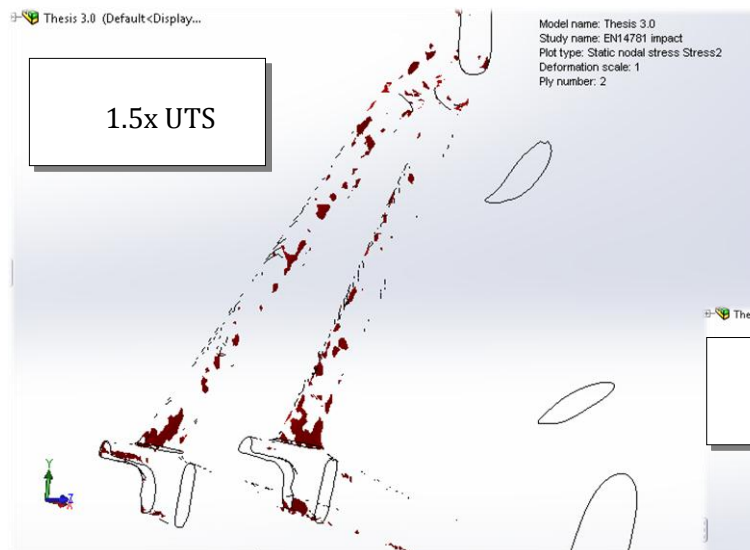
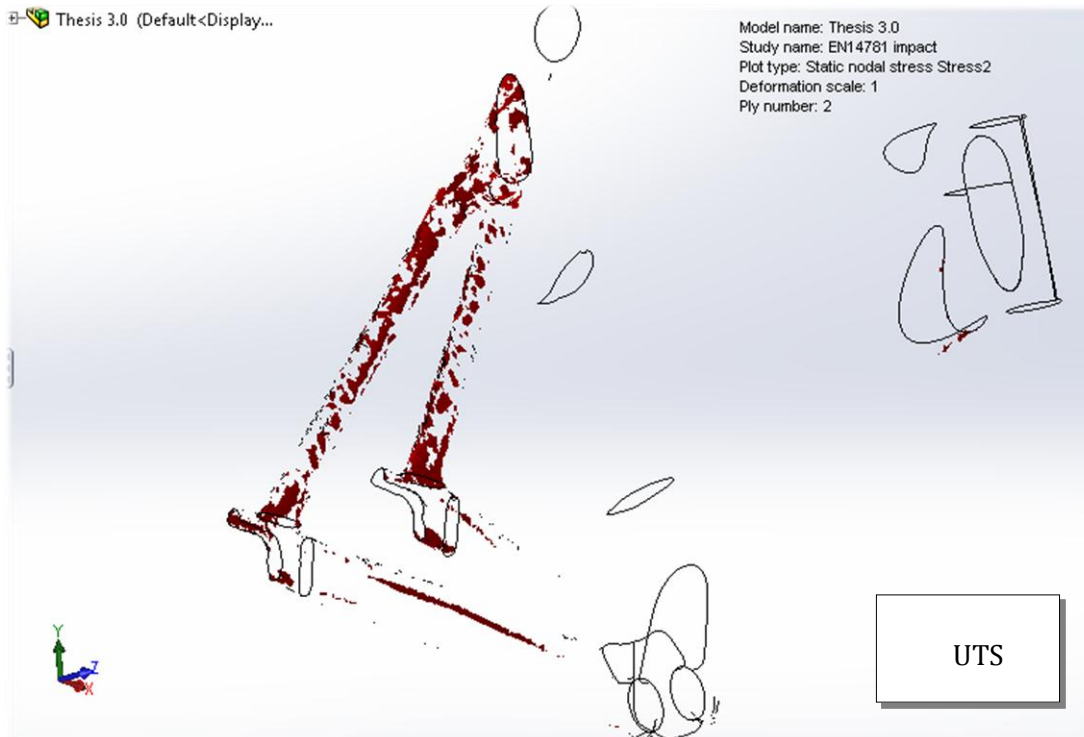
Στρώση #1



Στρώση #2

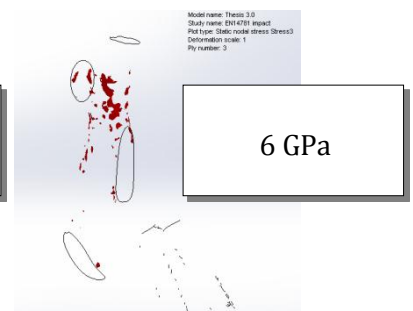
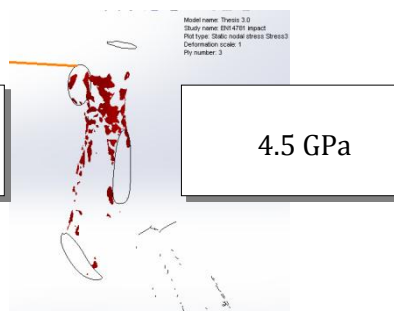
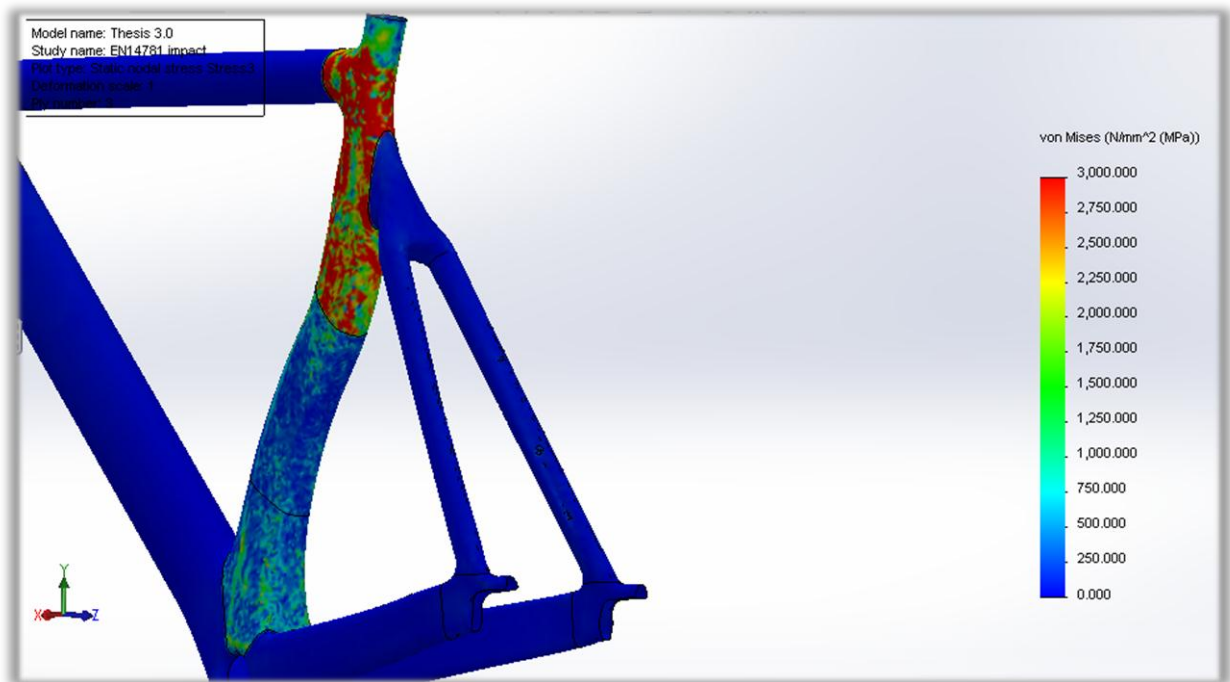
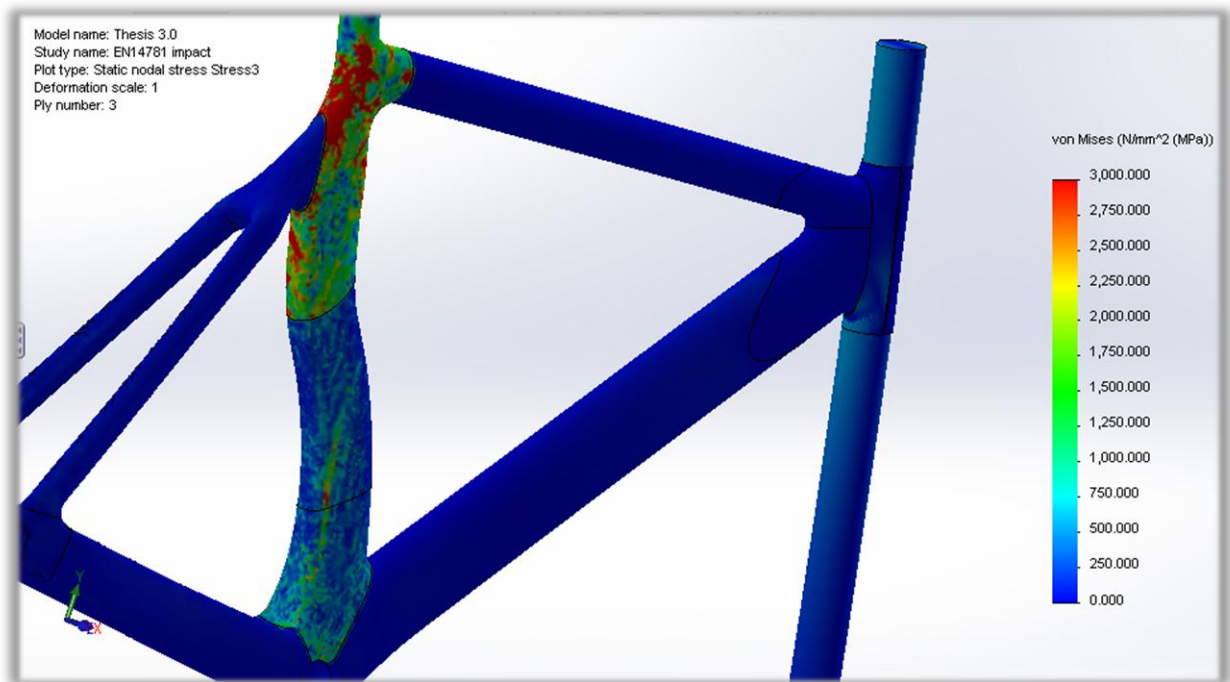


Η δεύτερη στρώση, είναι η πρώτη στρώση μονοδιευθυντικού υφάσματος σε όλο το πλαίσιο (εκτός των overlaps). Βλέπουμε ότι αναπτύσσονται ιδιαίτερα μεγάλες τάσεις, και προβλέπεται κατάρρευση, οπότε προχωράμε σε iso clipping για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων:

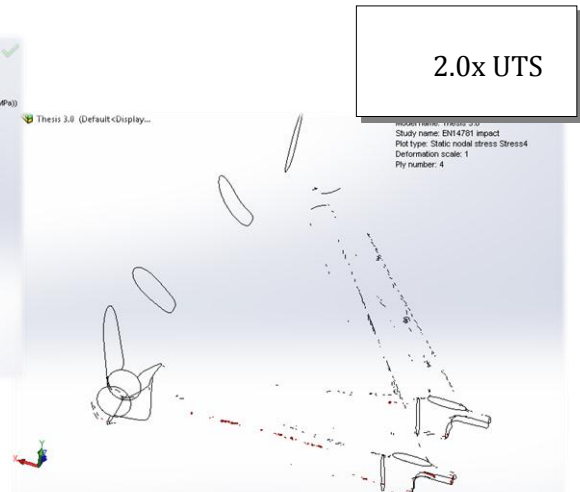
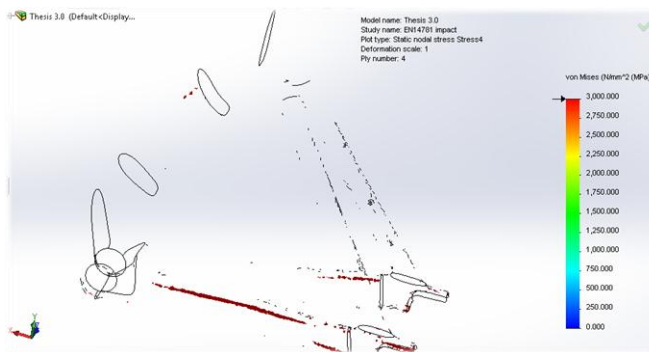
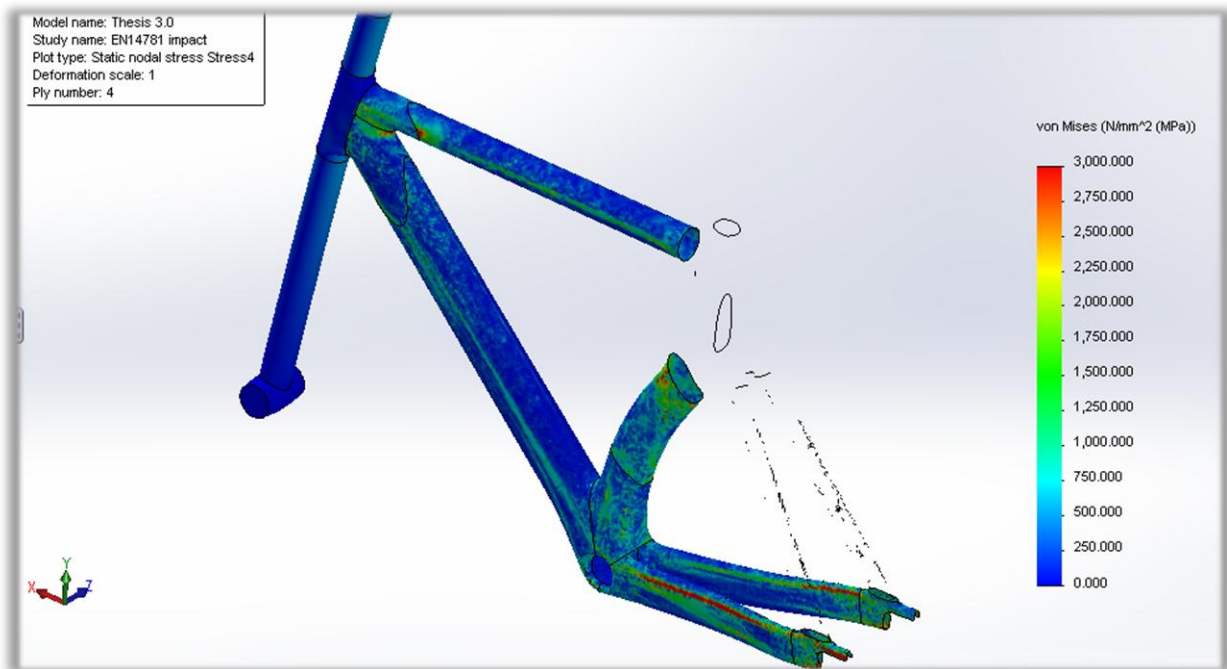
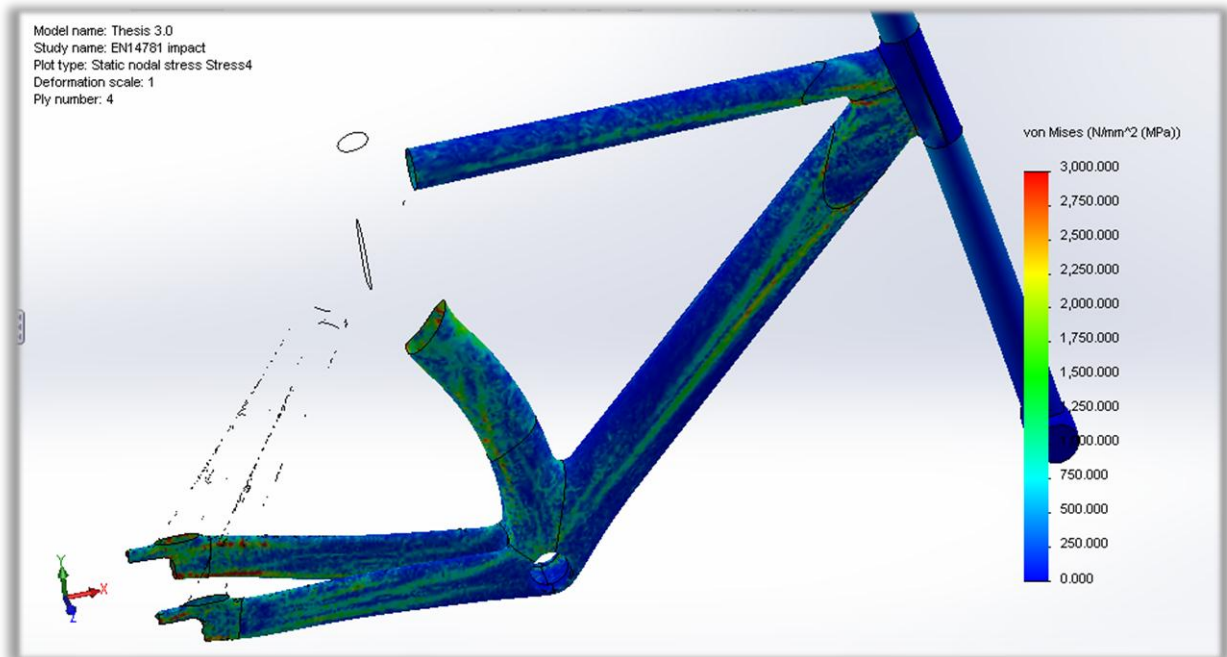


Η υπέρβαση του UTS και πάλι είναι εντοπισμένη στα σημεία των overlaps και μάλιστα ελάχιστα ξεπερνούν το διπλάσιο της τιμής του. Κατά συνέπεια το 2^ο στρώμα, αναμένεται να μην παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα.

Στρώση #3

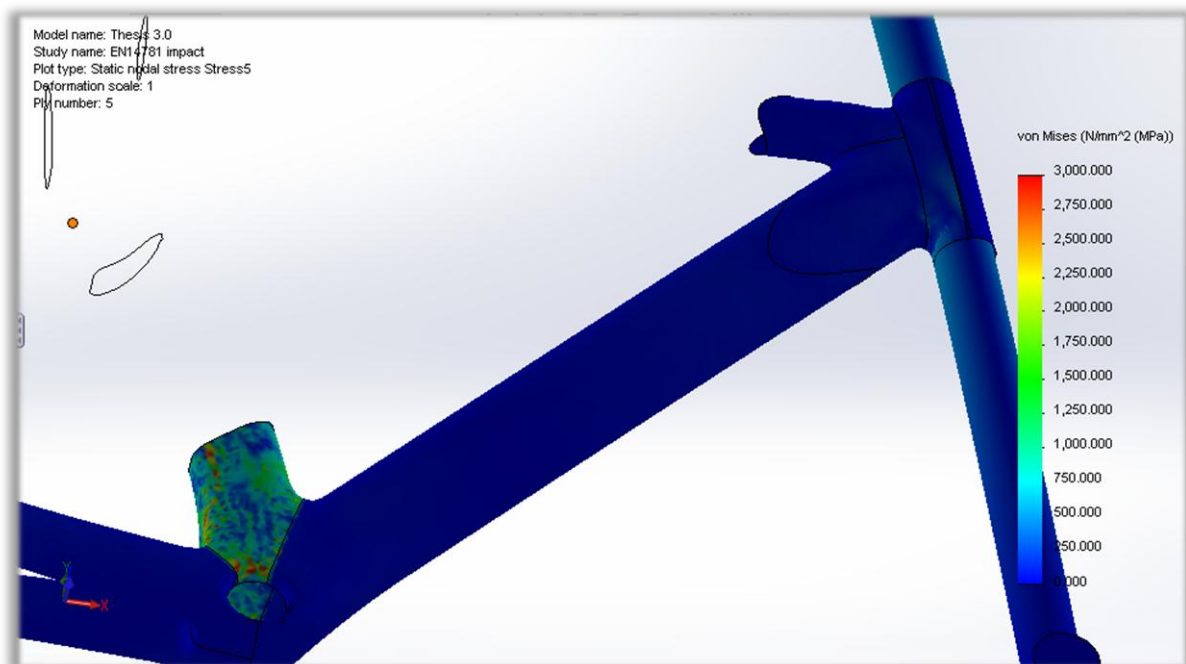
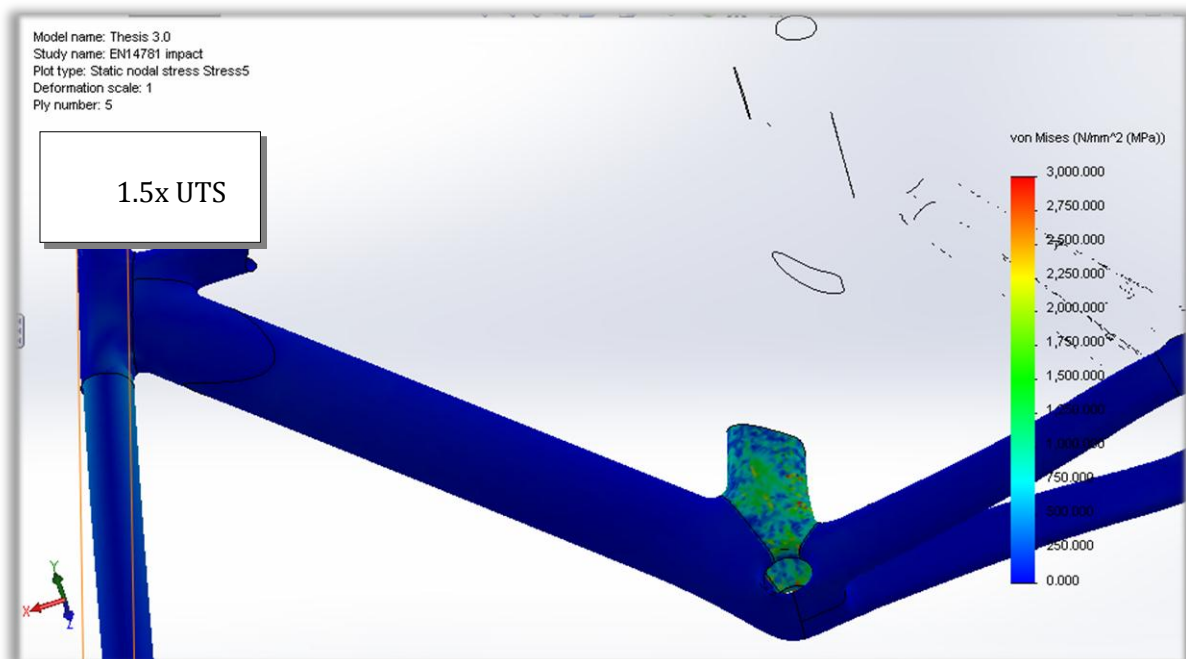


Στρώση #4



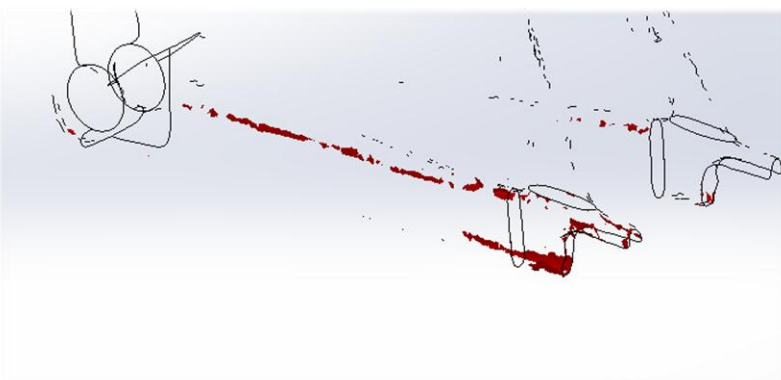
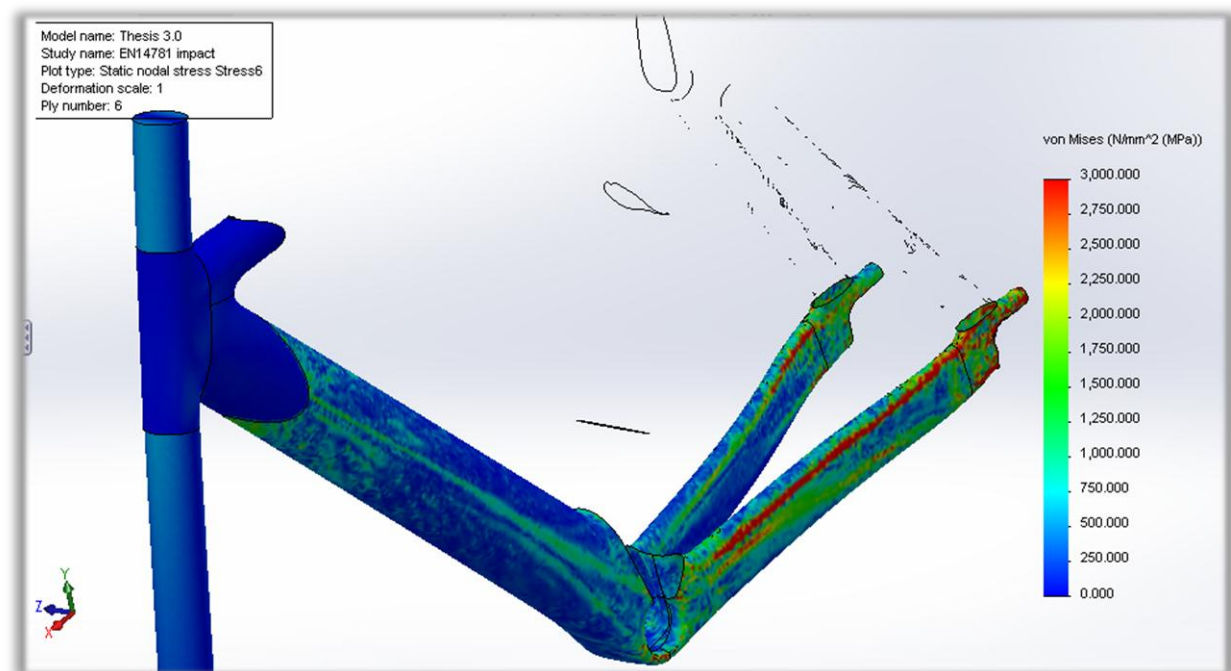
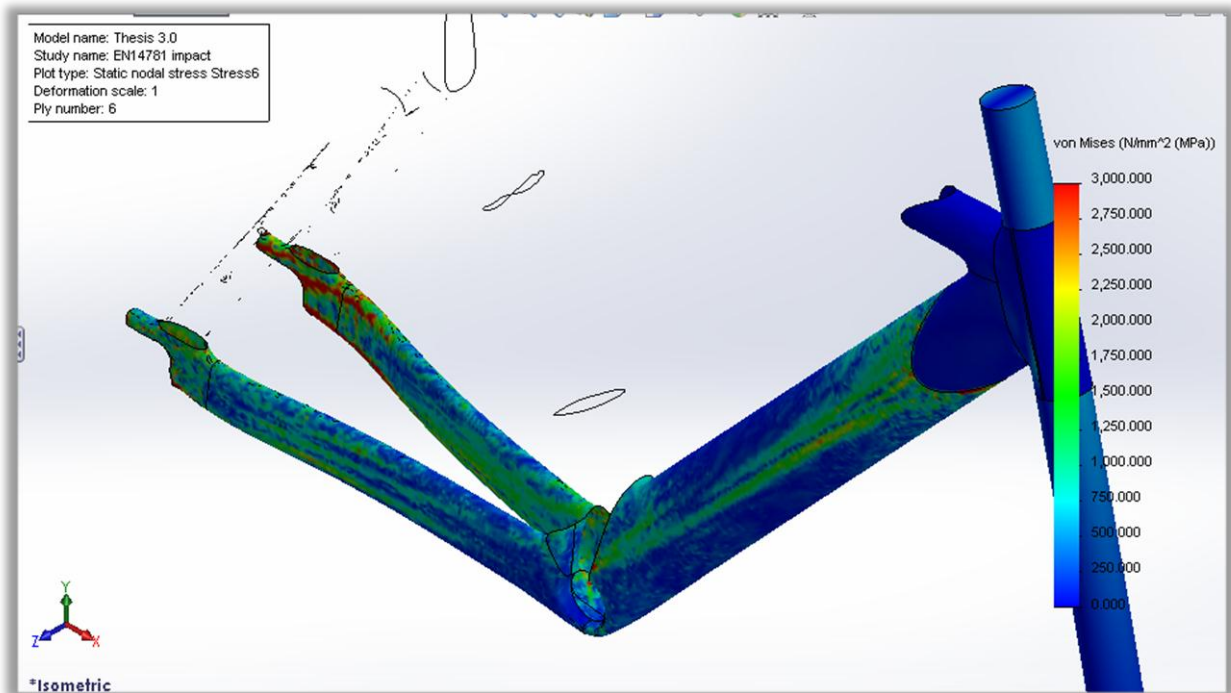
2.0x UTS

Στρώση #5



Η 5^η στρώση (T300 Woven) έχει μία μεγάλη περιοχή στην οποία οι τάσεις ξεπερνούν κατά 3-4 φορές το UTS του υφάσματος, και είναι βέβαιο ότι το στρώμα έχει καταρρεύσει.

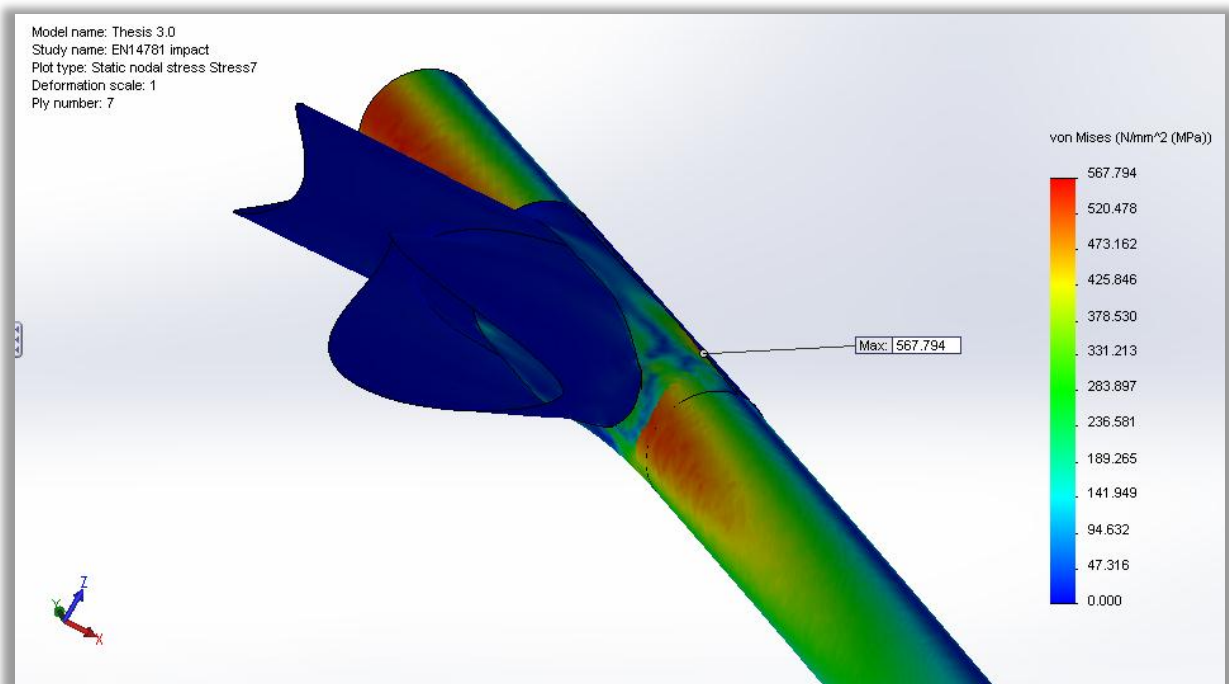
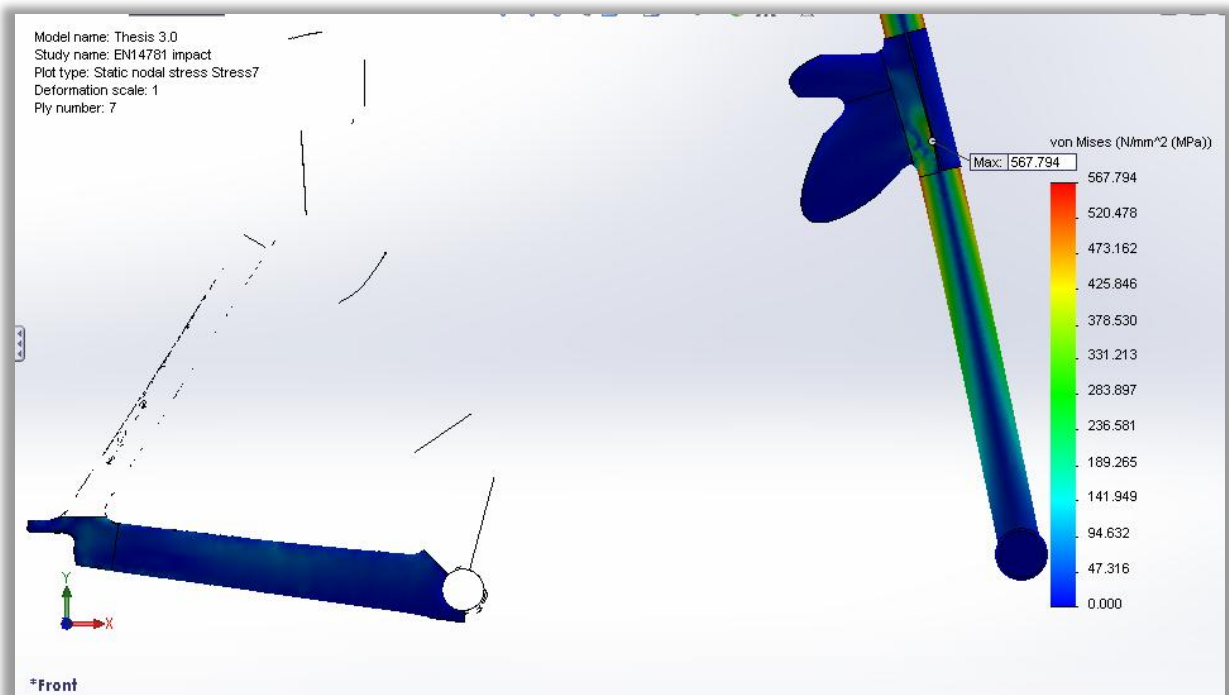
Στρώση #6



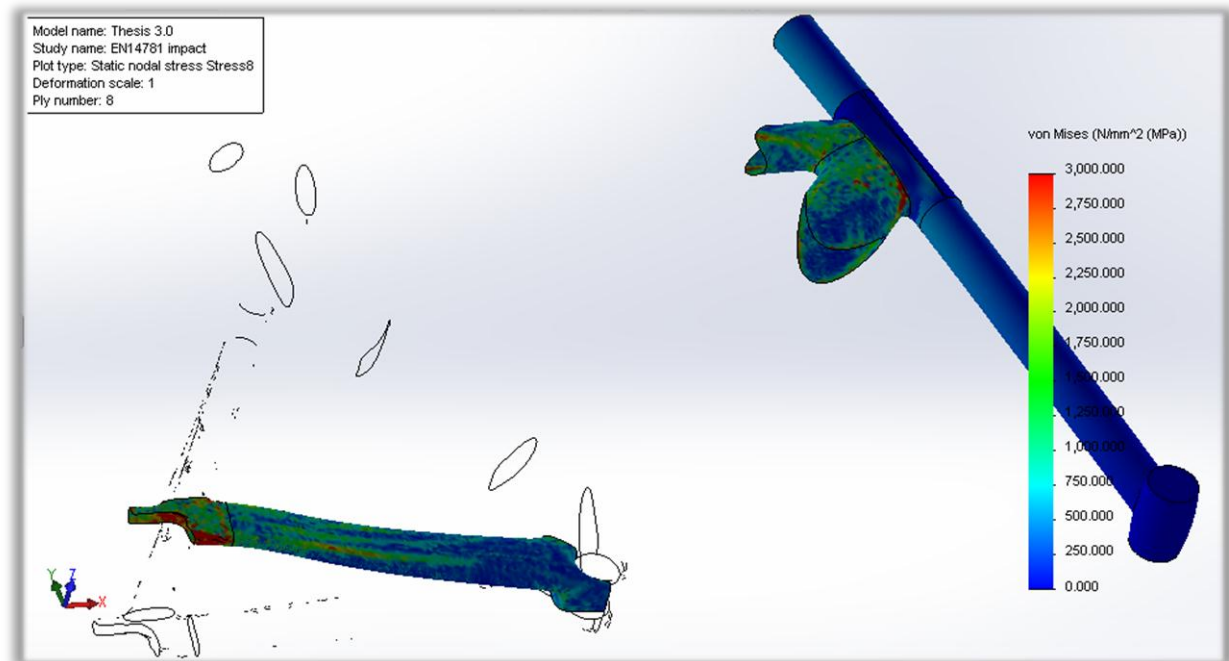
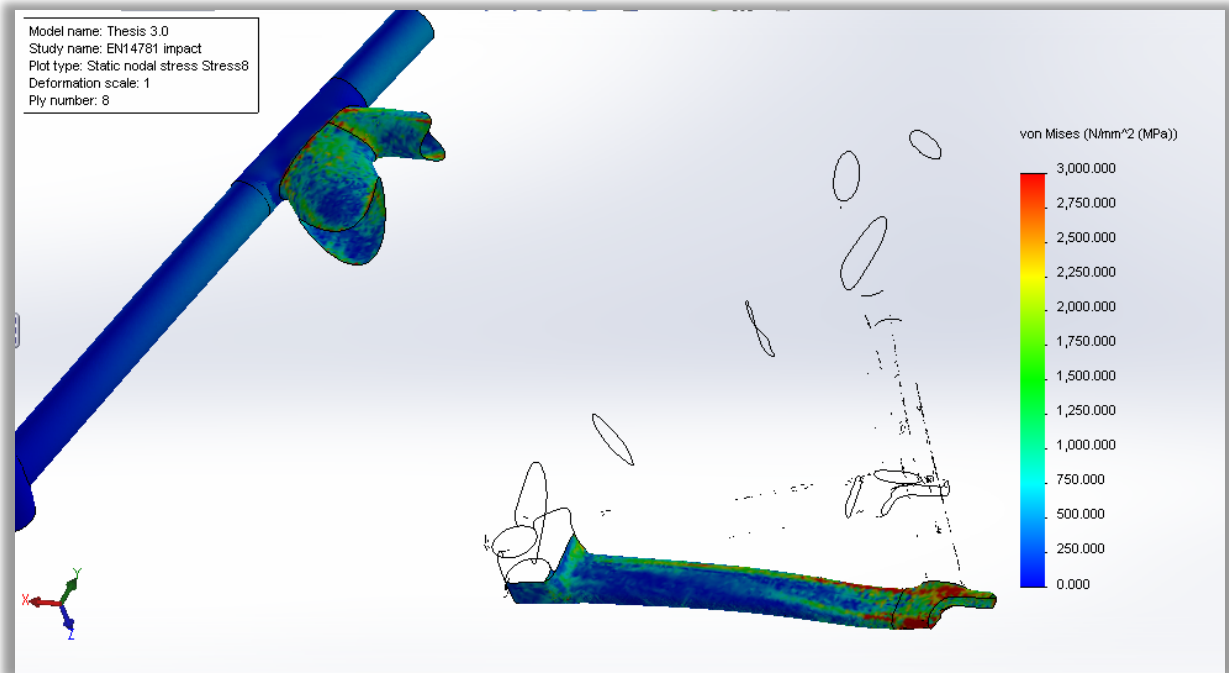
Η εικόνα αριστερά δείχνει τις περιοχές με τάσεις μεγαλύτερες των 4000MPa.

Όλες είναι στα overlaps, οπότε θεωρούμε ότι όλα βαίνουν καλώς και για την 6^η στρώση.

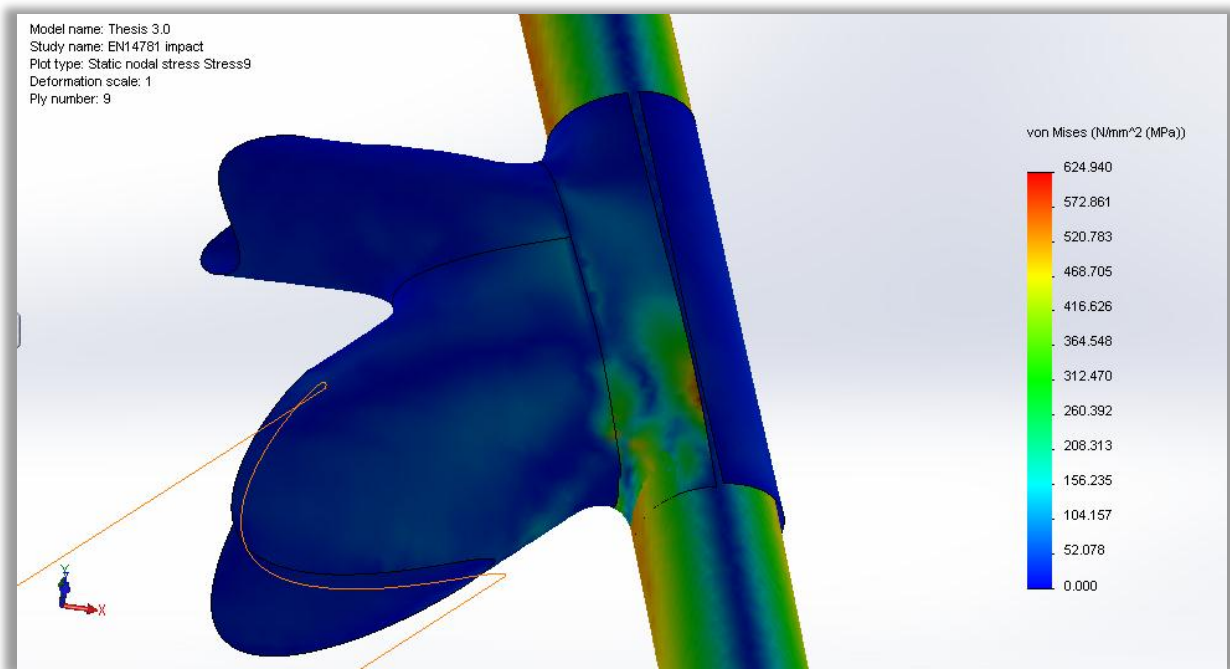
Στρώση #7



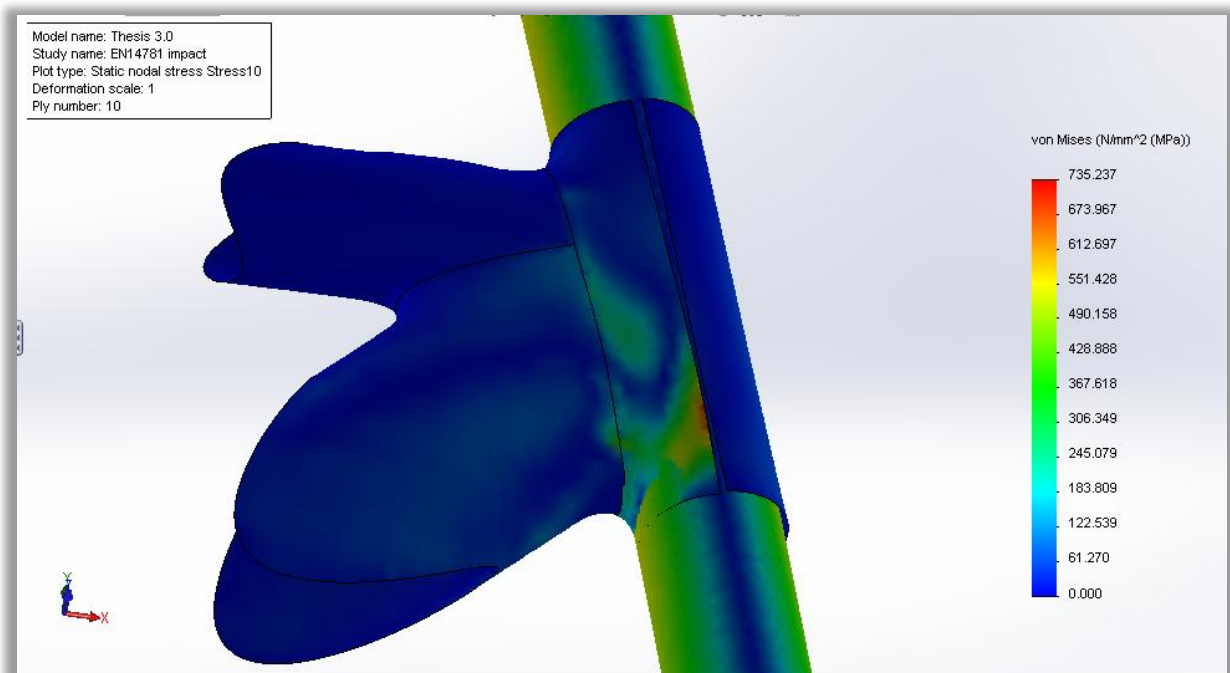
Στρώση #8



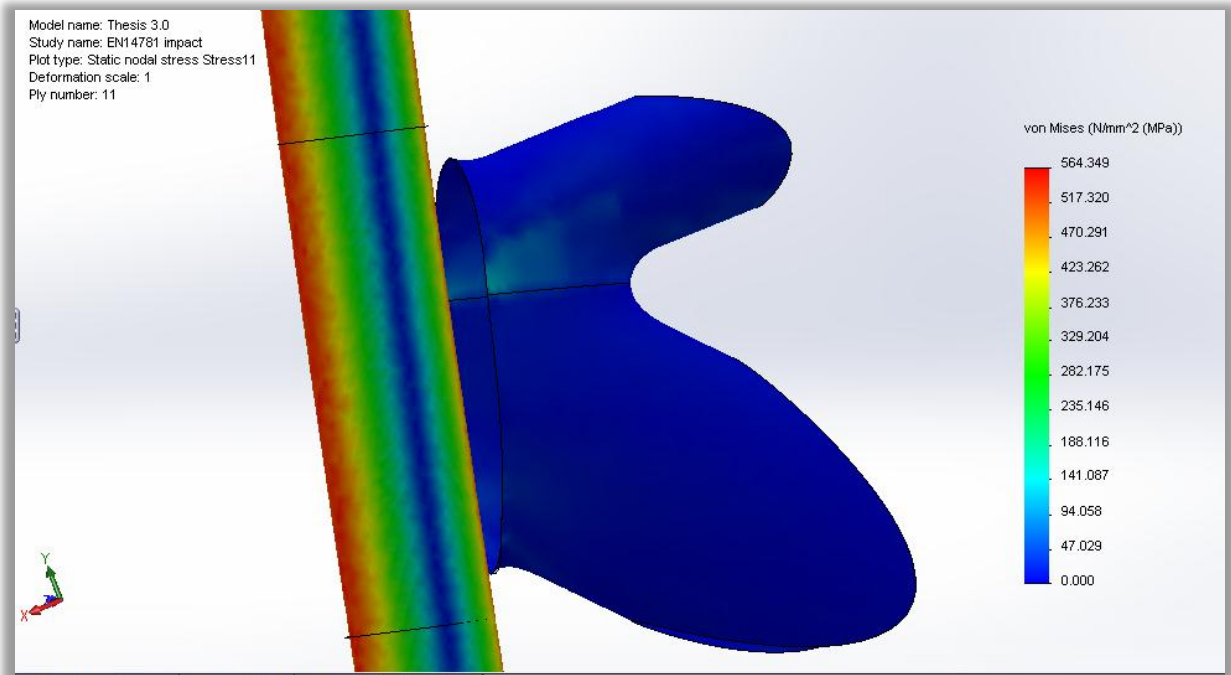
Στρώση #9



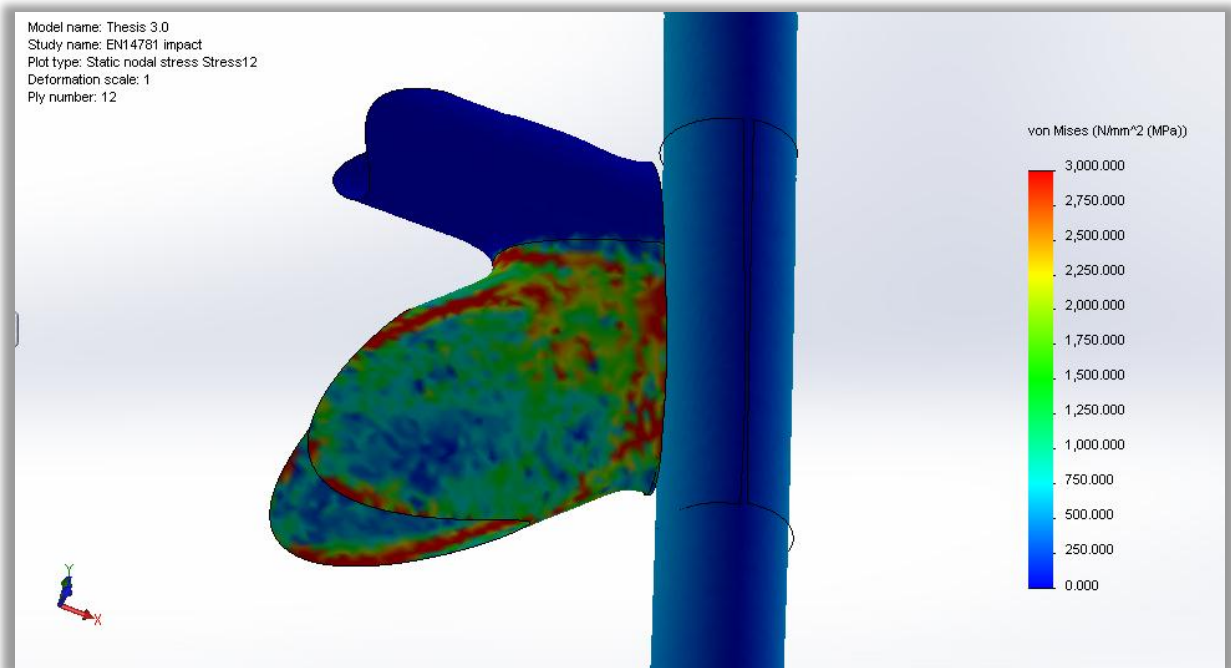
Στρώση #10

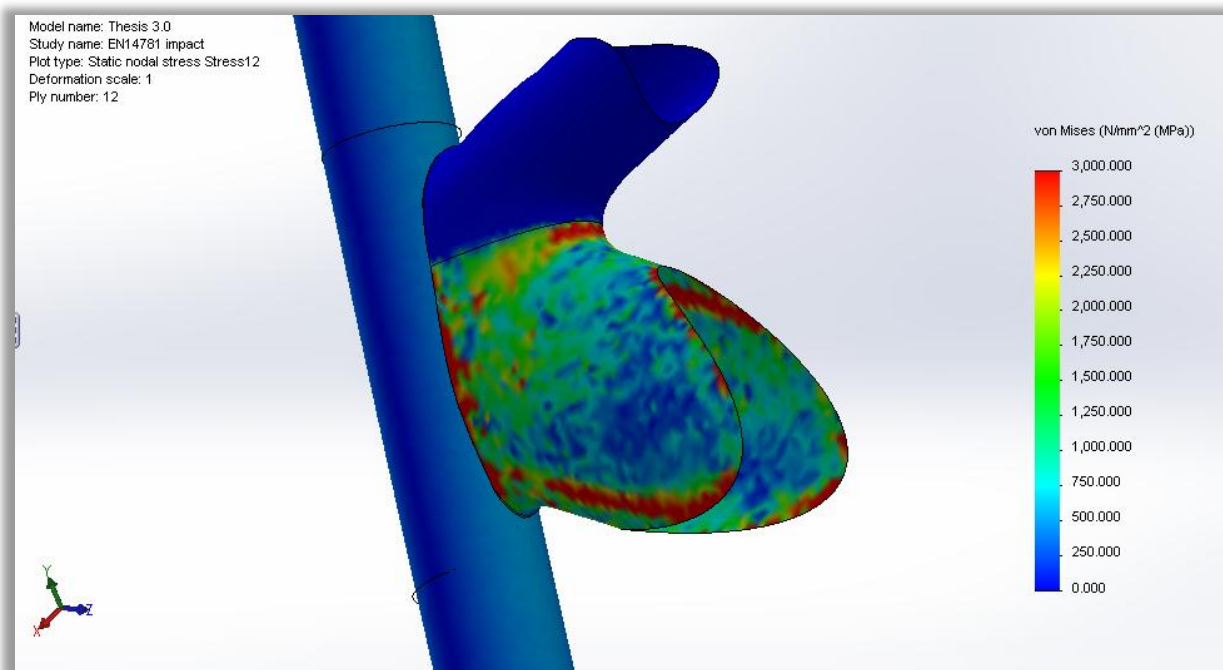


Στρώση #11

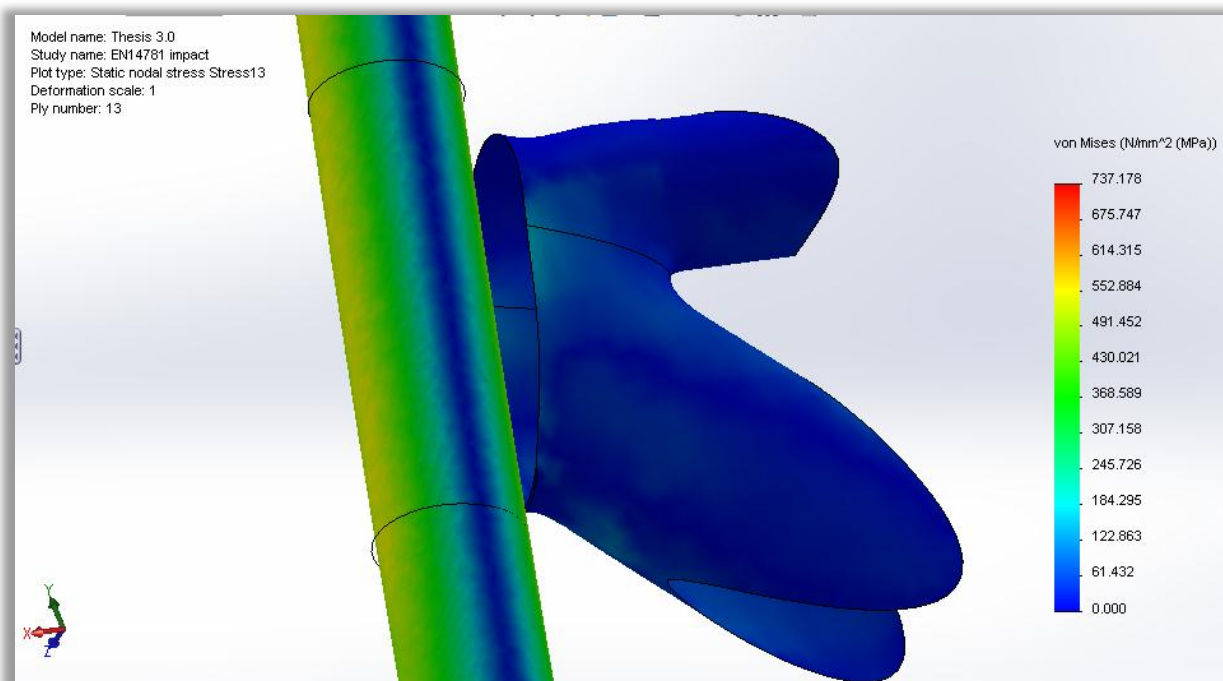


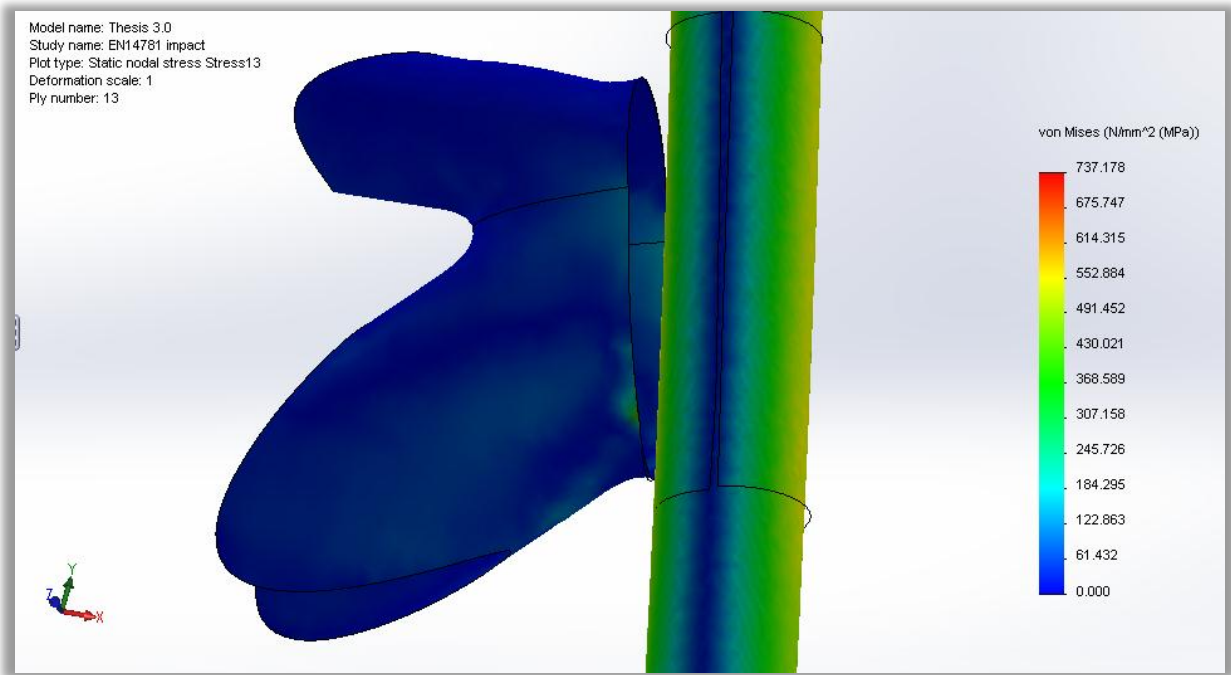
Στρώση #12



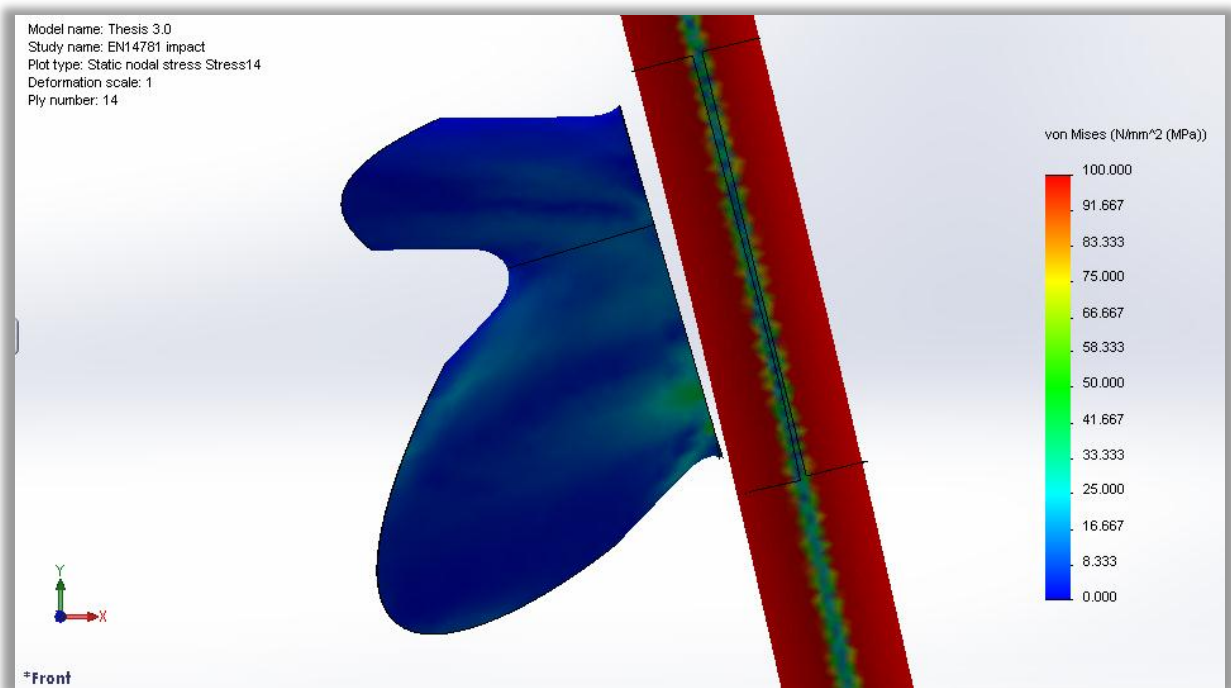


Στρώση #13

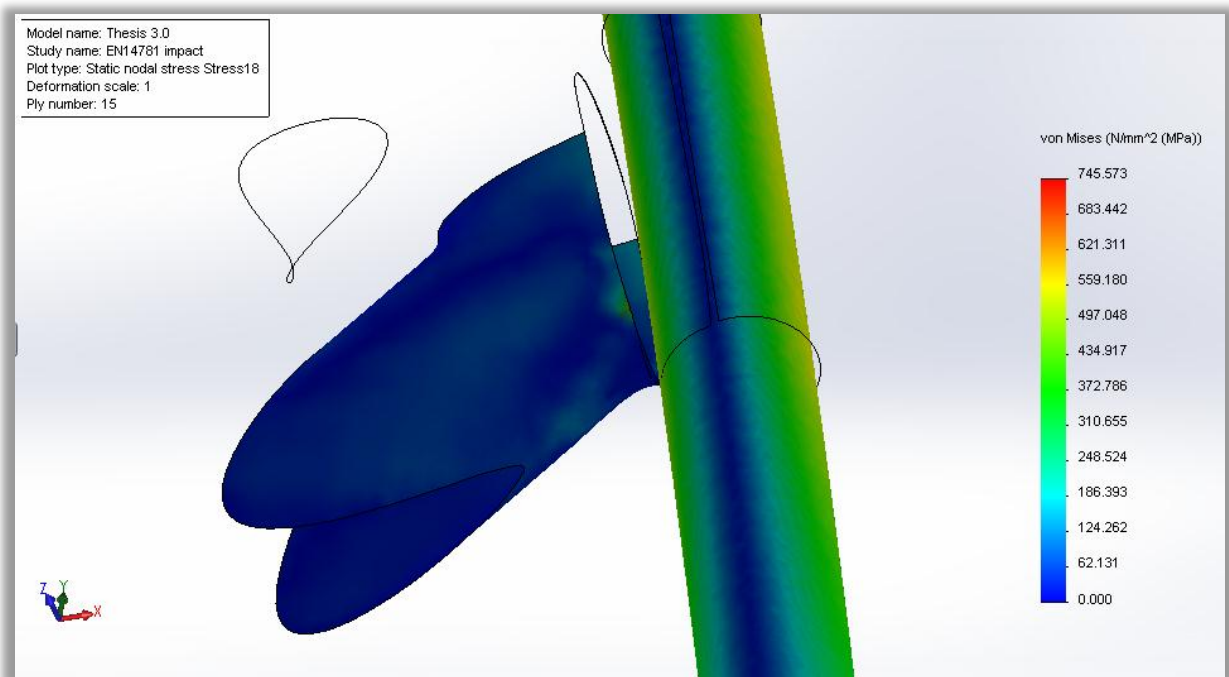




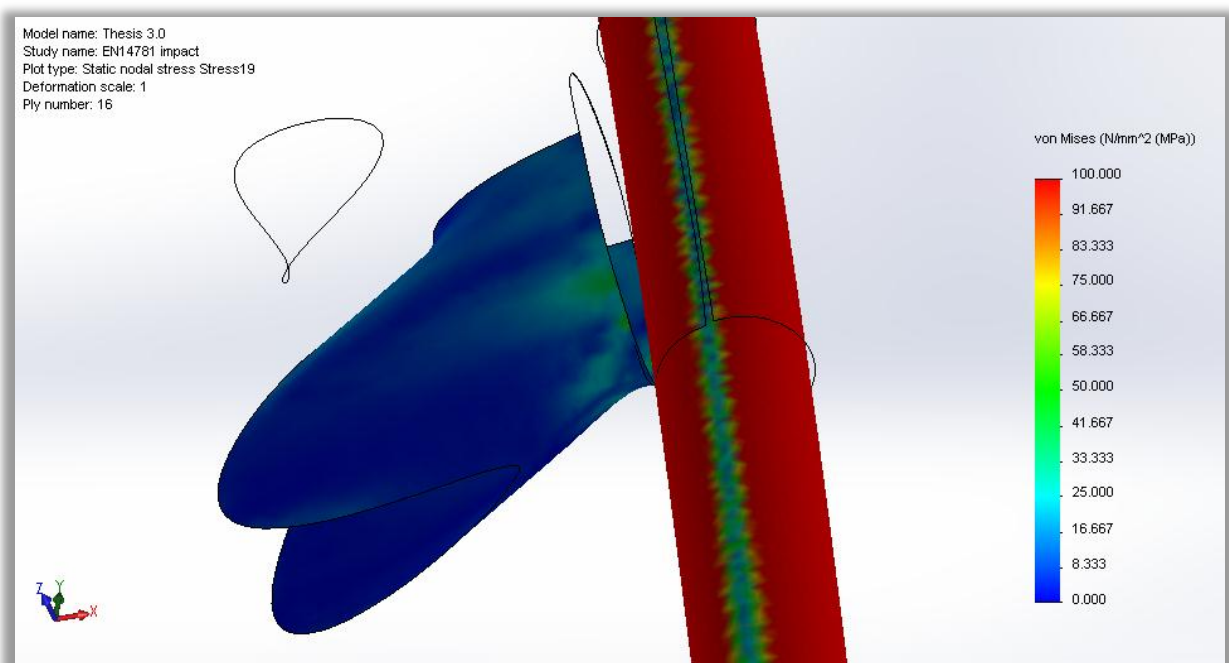
Στρώση #14



Στρώση #15



Στρώση #16

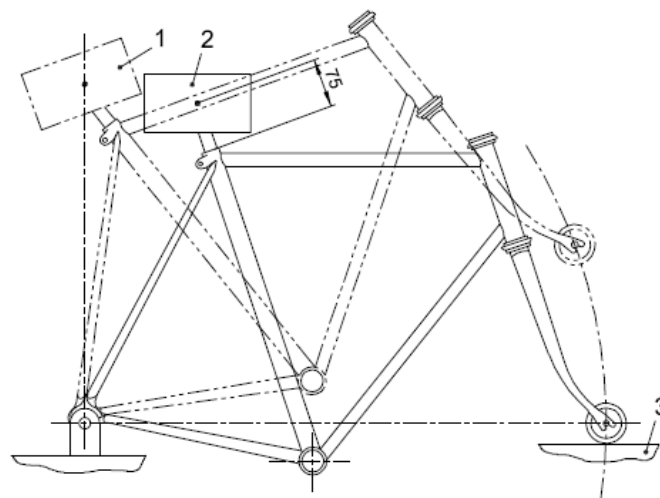


Falling Frame

Η δεύτερη δοκιμή εξετάζει την αντοχή του πλαισίου σε περίπτωση απώλειας επαφής του εμπρός τροχούς με τον αναβάτη πάνω σ' αυτό, και απότομη επαναφορά από ύψος.

Για τον λόγο αυτό, στο σημείο του πίσω άξονα τοποθετείται άρθρωση, ενώ ταυτόχρονα τοποθετείται βάρος μάζας 70Kgr, σε απόσταση 75mm από το τέλος του Seat Tube. Τέλος το πλαίσιο σηκώνεται περιστρεφόμενο μέχρις ισορροπίας και αφήνεται να χτυπήσει αμόνι, που προσομοιώνει το έδαφος.

Dimension in millimetres

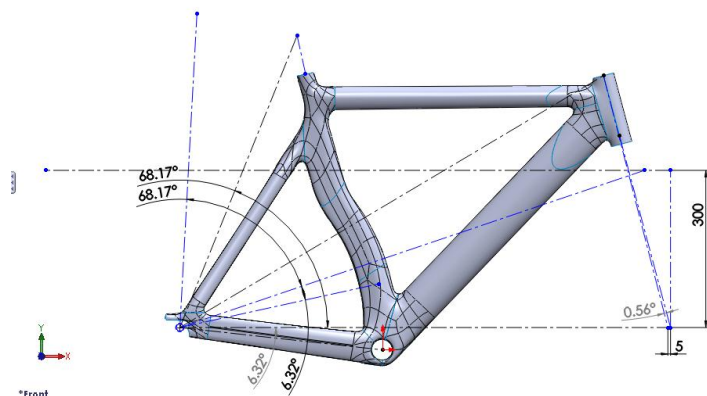


Key

- 1 Mass vertically above rear axle
- 2 Mass 70 kg
- 3 Steel anvil

Για να μπορέσουμε να έχουμε αποτελέσματα ανά στρώση, θα χρειαστεί να εξομοιώσουμε την δυναμική καταπόνηση με μία αντίστοιχη στατική. Θεωρούμε ότι το σώμα μάζας 70 Kgr θα ασκήσει φορτίο στο πλαίσιο ίσο με την δύναμη της σύγκρουσης του πλαισίου με το επίπεδο αναφοράς στο αμόνι.

Υπολογίζουμε με την βοήθεια ενός βοηθητικού sketch στο Solidworks ότι το κέντρο βάρους της μάζας θα βρίσκεται 42mm κατακόρυφα πάνω από την θέση με το πλαίσιο να βρίσκεται οριζόντια, και το εμπρός πιρούνι ν' ακουμπά το αμόνι/έδαφος.



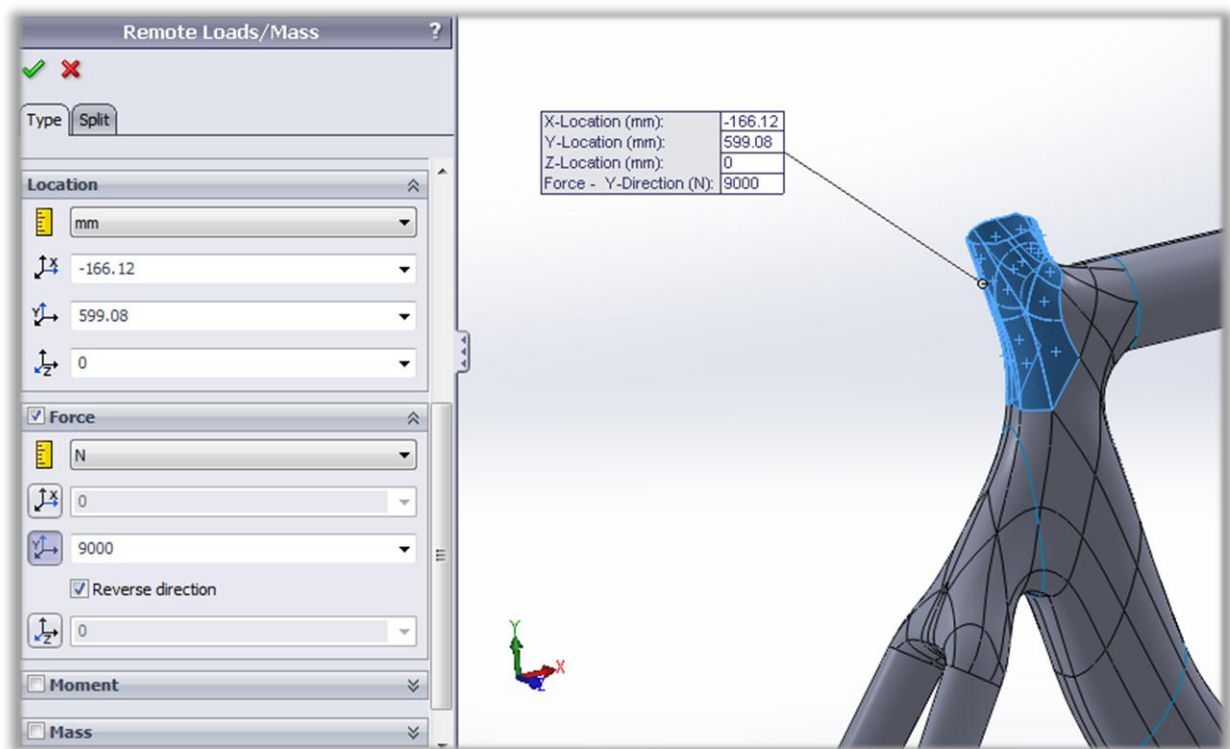
Θεωρούμε επίσης ότι η μάζα θα επιβραδυνθεί μέσα σε 3.5mm κατακόρυφης μετακίνησης του κέντρο βάρους της (το οποίο αντιστοιχεί με κατακόρυφη μετατόπιση περίπου 25mm στο κατώτερο σημείο του Head Tube) και όμοια με πριν υπολογίζουμε την δύναμη της σύγκρουσης:

$$E = m \times g \times h = 70Kg \times 9.80665 \frac{m}{sec^2} \times 42mm$$

$$F = \frac{m \times g \times h}{s} = 8237.59N$$

Άρα το φορτίο που ασκείται στο πλαίσιο θα είναι περίπου 8.2KN. Όπως και πριν για να εξασφαλίσουμε ότι οι αναλύσεις μας θα είναι αν όχι απόλυτα ίσες, τουλάχιστον δυσκολότερες από την πραγματική δοκιμή, θέτουμε ισοδύναμο φορτίο 9KN. Και πάλι υπολογίζουμε πολύ μικρή παραμόρφωση του πλαισίου λόγω μεγάλης αναμενόμενης ακαμψίας. Θα δούμε με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, την προκύπτουσα μετατόπιση στην κορυφή του Seat Tube και θα εξετάσουμε κατά πόσο οι προβλέψεις μας εύστοχες.

Ορίζουμε λοιπόν 9KN φορτίο κάθετο στο επίπεδο. Το φορτίο τίθεται ως Remote Load με ειδική λειτουργία του pre-processor του Simulation, που επιτρέπει την μεταφορά ενός φορτίου από οποιοδήποτε σημείο του περιβάλλοντος σε οποιαδήποτε οντότητα του μοντέλου.



Θέτουμε ως πρόσωπα εφαρμογής του φορτίου, τα πρόσωπα στα οποία εφάπτεται το στέλεχος στήριξης της σέλας του ποδηλάτου.

Ο Κανονισμός επιβάλλει στο σημείο πρόσδεσης του πίσω άξονα άρθρωση για να μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα το πλαίσιο. Για να μην μοντελοποιήσουμε επιπλέον μεταλλικά brackets και προσθέσουμε επιπλέον περιορισμούς επαφής, επιβαρύνοντας το μοντέλο μας, προσδιορίζουμε πάκτωση σε όλη την επιφάνεια που θα στηριχτούν αυτά. Η σύμβαση είναι εξαιρετικά ανακριβείς μεν, τα προκύπτοντα αποτελέσματα δε θα είναι μετατοπισμένα προς το 'χειρότερο' μιας και το μοντέλο θα επιβαρύνεται με τάσεις που στην πραγματικότητα δεν θα υπάρχουν καν λόγω ελευθερίας περιστροφής του. Η συνθήκη αυτή μεταφέρεται αυτούσια λοιπόν από την προηγούμενη μας ανάλυση.

Επίσης ο κανονισμός αυτήν την φορά επιβάλλει πιρούνι το οποίο συμφωνεί με το άρθρο 4.9.5 περί αντοχής του. Μιας και δεν παρέχεται πιρούνι κατάλληλων προδιαγραφών, αποφάσισα να χρησιμοποιήσω και πάλι την χαλύβδινη μπάρα της προηγούμενης δοκιμής. Το σενάριο είναι κατά πολύ δυσμενέστερο της πραγματικής δοκιμής, μιας και η δύσκαμπτη μασίφ χαλύβδινη μπάρα θα υποχωρήσει πολύ λιγότερο από κάποιο ανθρακονημάτινο ή ελαφρύ μεταλλικό πιρούνι, γεγονός που πολλαπλασιάζει την δύναμη της σύγκρουσης, και κατά συνέπεια το ισοδύναμο στατικό φορτίο.

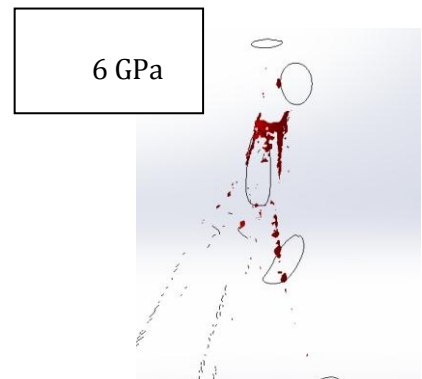
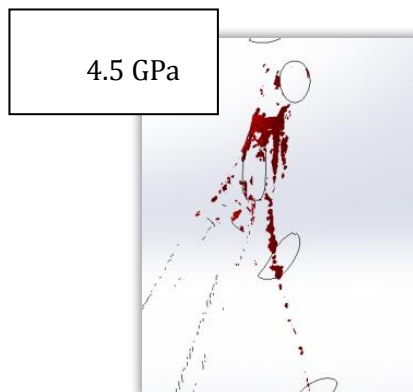
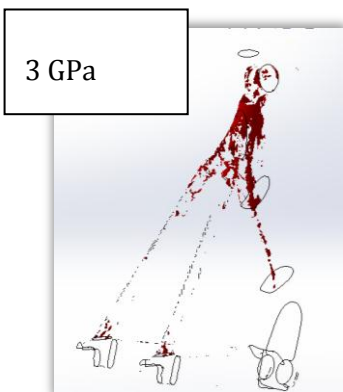
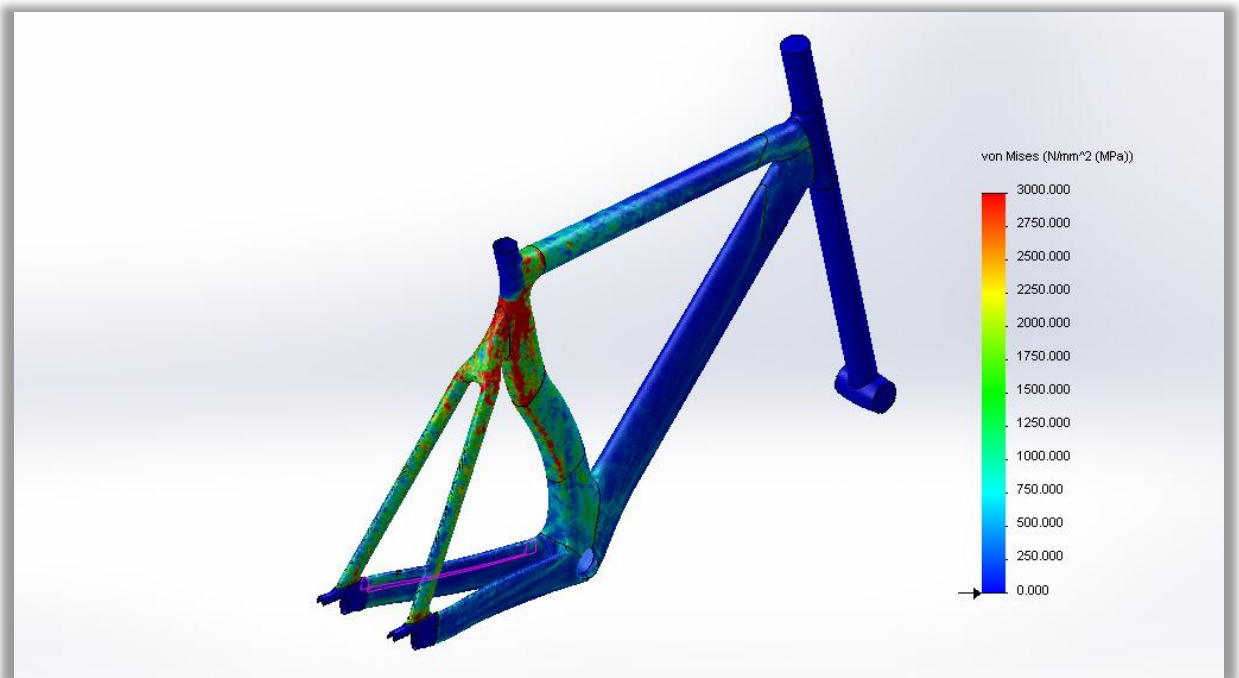
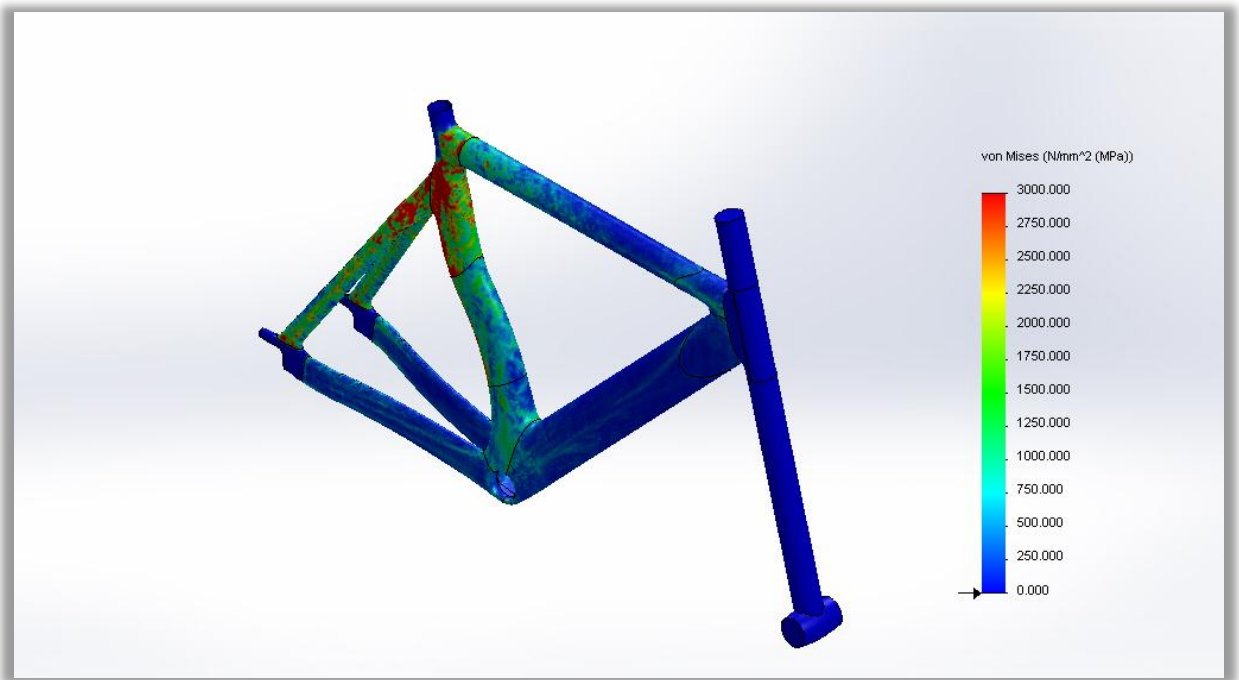
Οι επόμενες αρχικές συνθήκες που θέτουμε απαγορεύουν στην κυλινδροειδή διαμόρφωση της μπάρας να μετακινηθούν κάθετα στο επίπεδο XZ, ουσιαστικά περιορίζοντάς το στην επιφάνεια του αμονιού/πατώματος της δοκιμής.



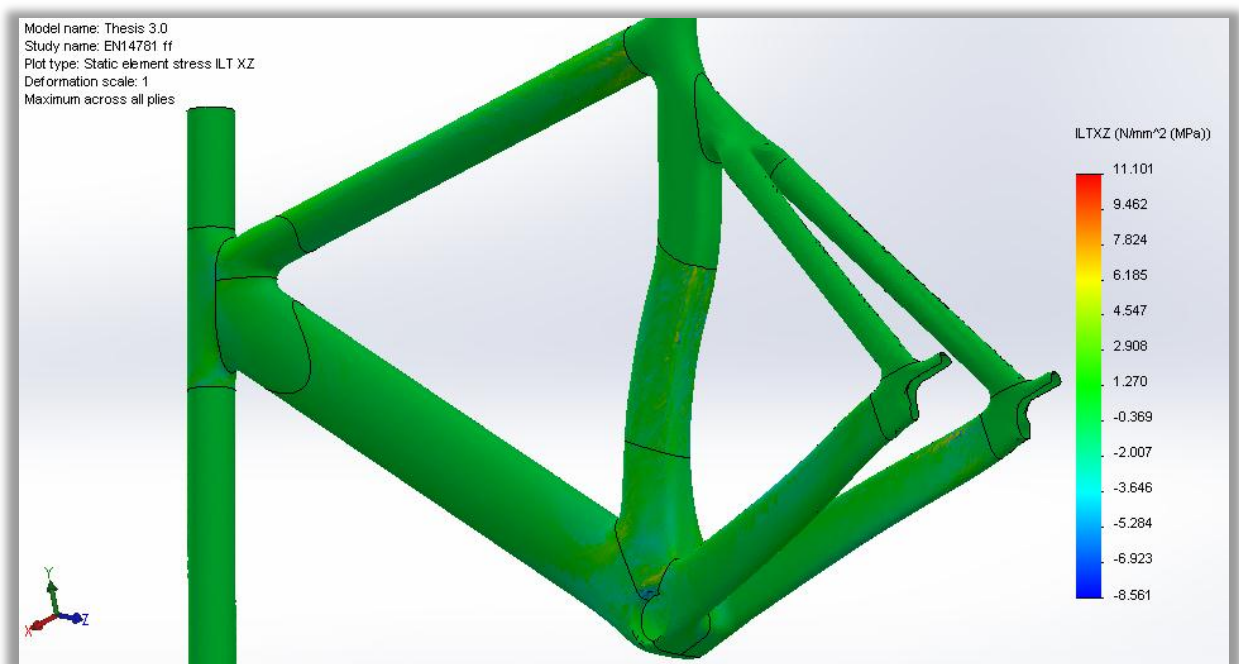
Τέλος προσθέτουμε μία ακόμα συνθήκη μη σχετικής κίνησης ως προς τον άξονα της μπάρας, αυτής και του πλαισίου, μοντελοποιώντας την στήριξη του πιρουνιού στο πλαίσιο. Θέτουμε λοιπόν μηδενική μετατόπιση κάθετα της κάτω κυκλικής ακμής του Head Tube ως προς το επίπεδο XZ.

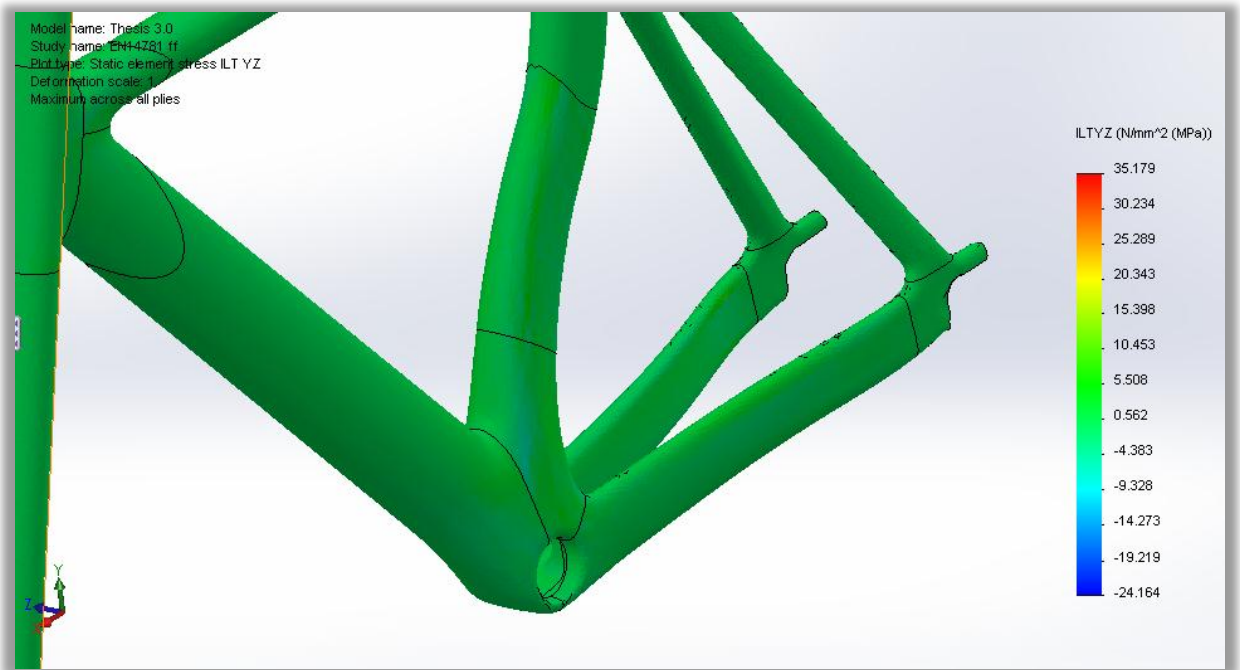
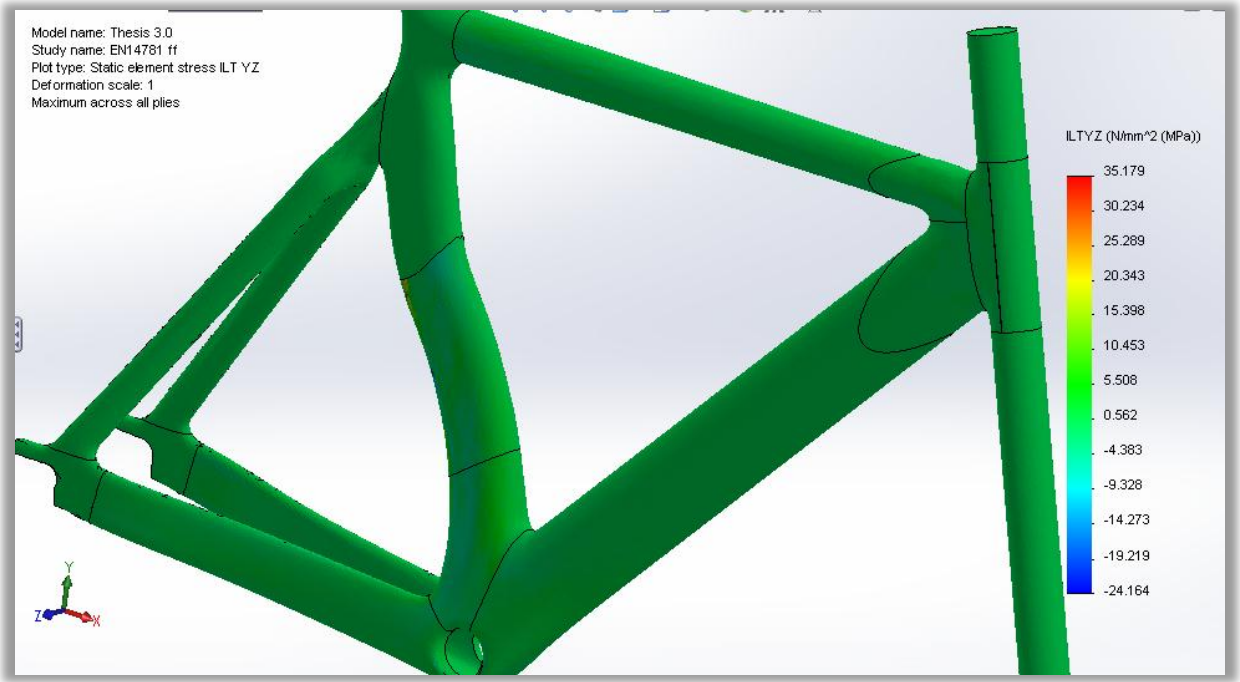
Επιτρέπουμε λοιπόν στα σημεία του πλαισίου να κινηθούν προς τα κάτω, αλλά το Head Tube θα κινηθεί μόνο πάνω σε επίπεδο παράλληλο του XZ.



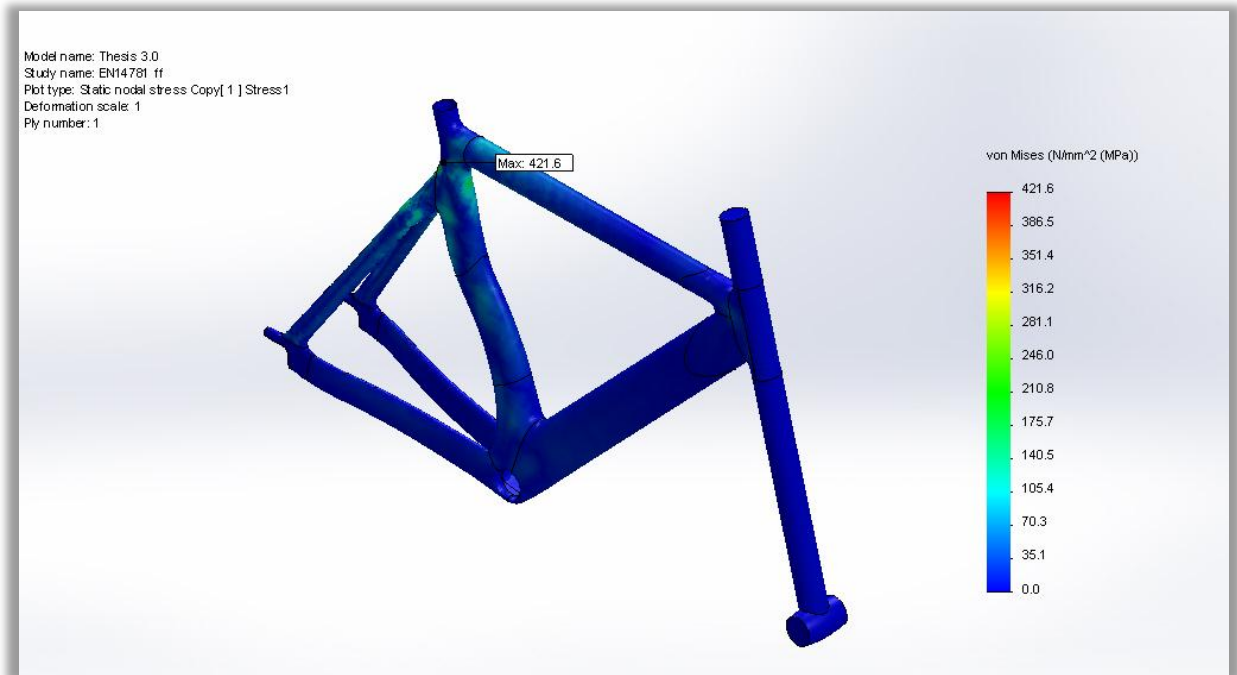


Εξετάζουμε επίσης τις τάσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στις στρώσεις, αρχικά στο επίπεδο XZ της κάθε στρώσης:

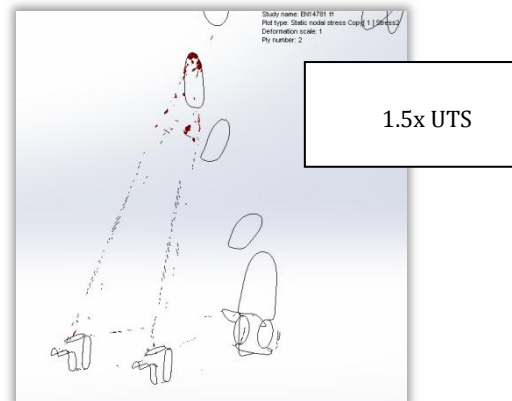
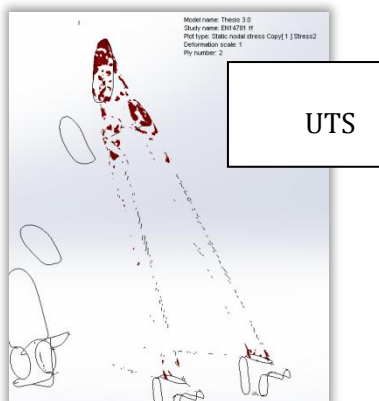
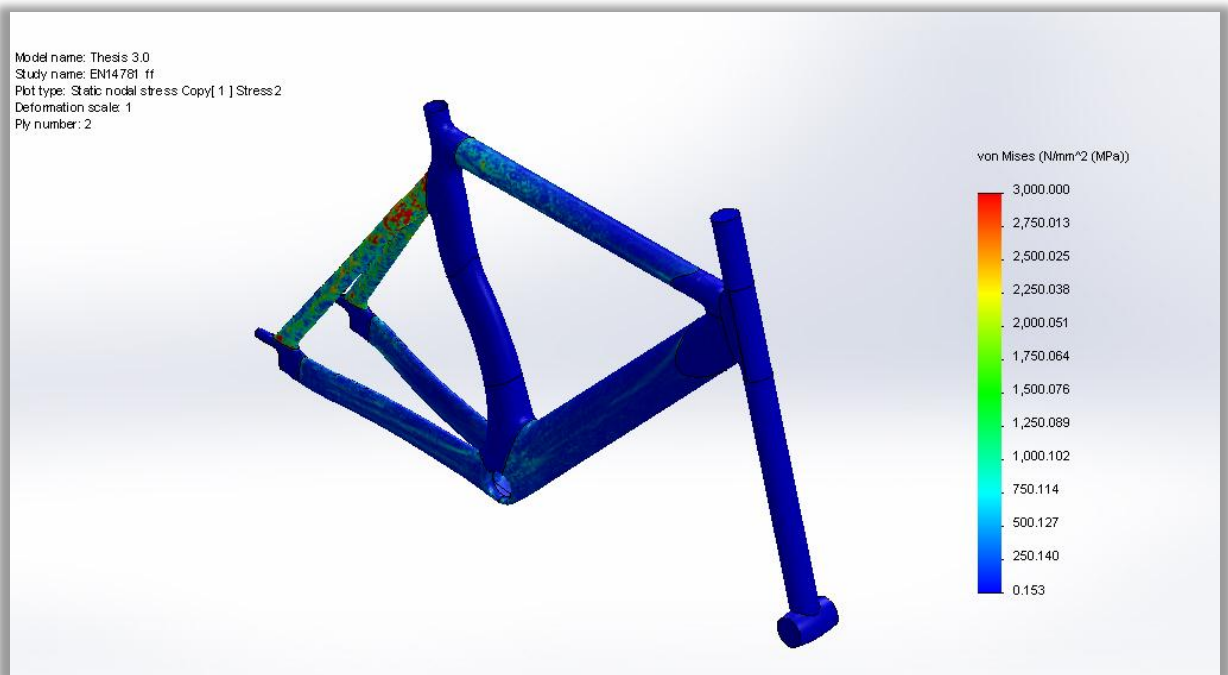
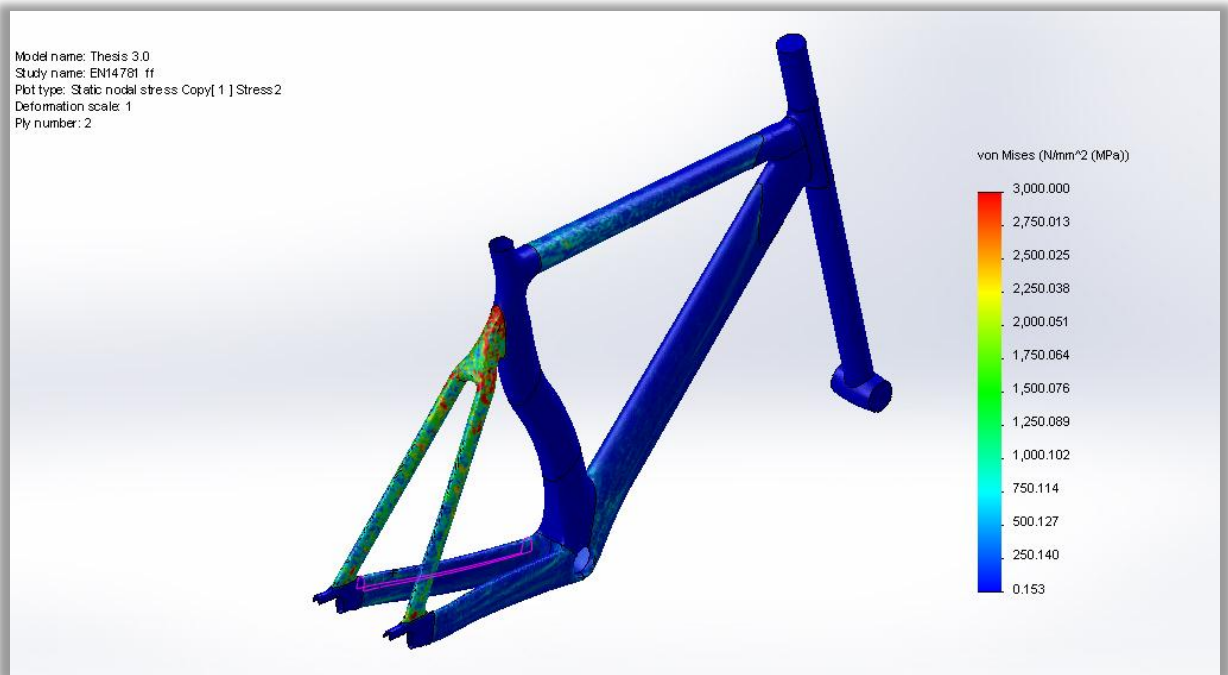




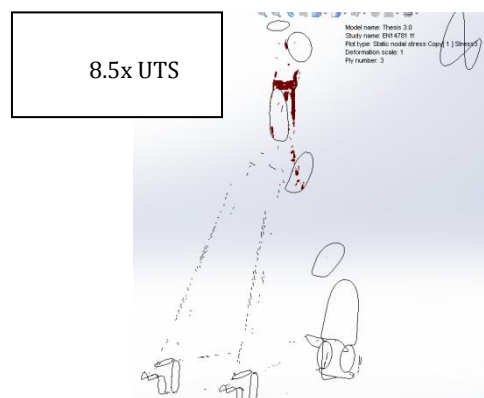
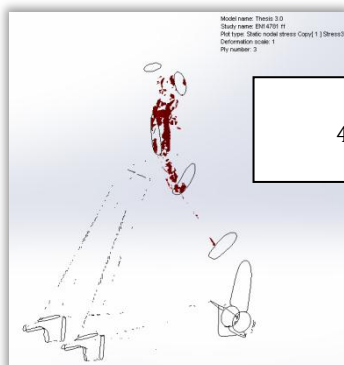
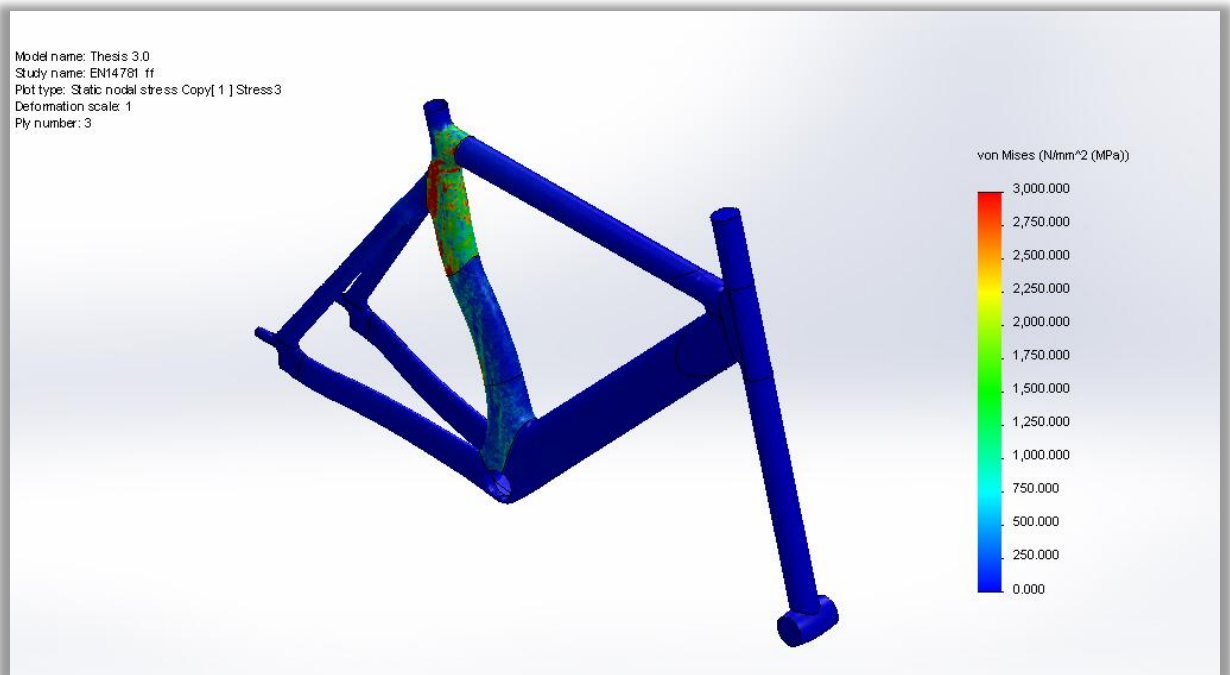
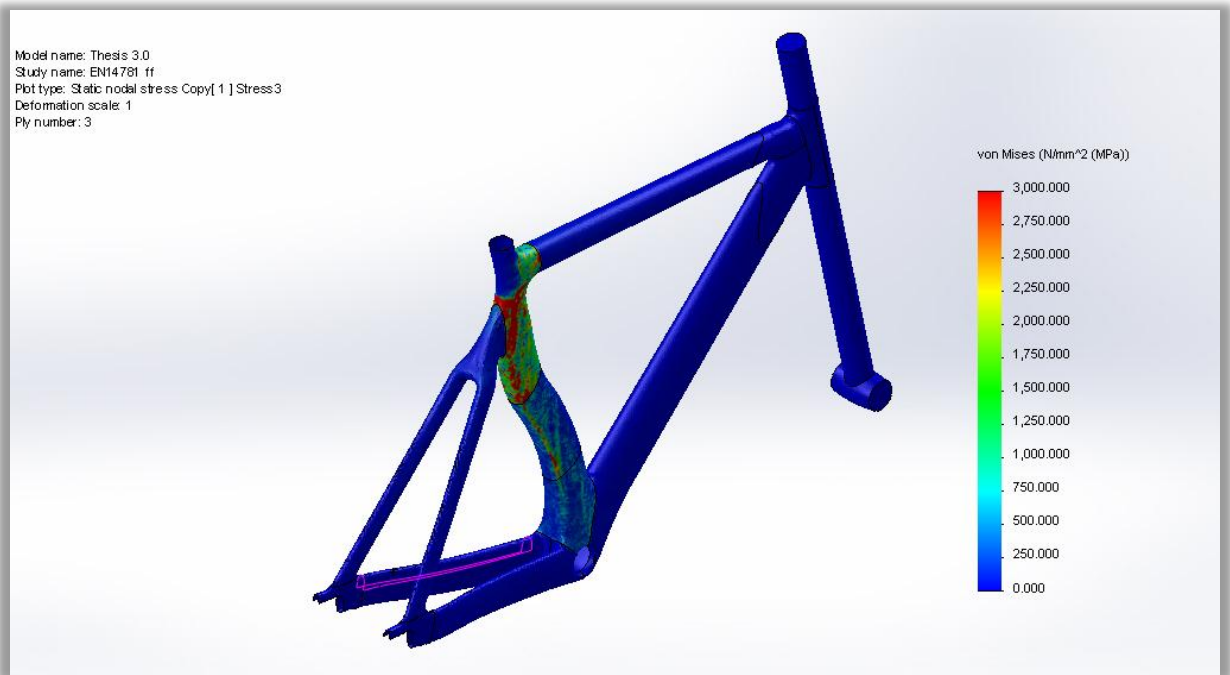
Στρώση #1



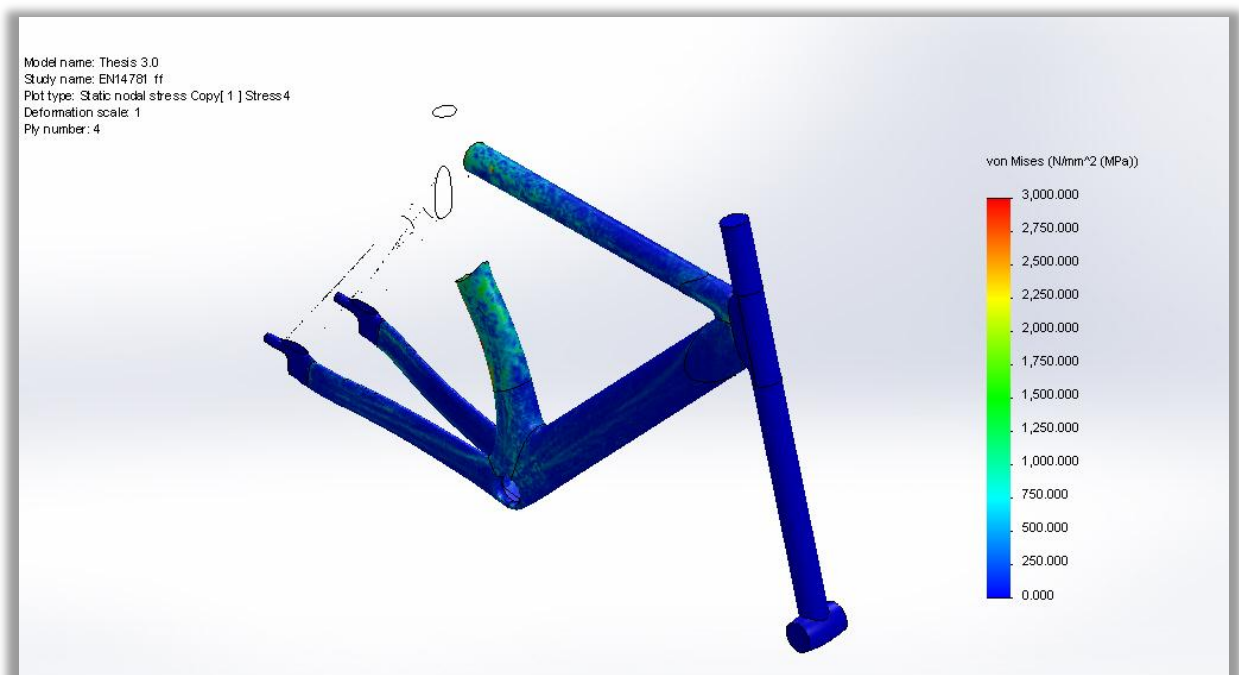
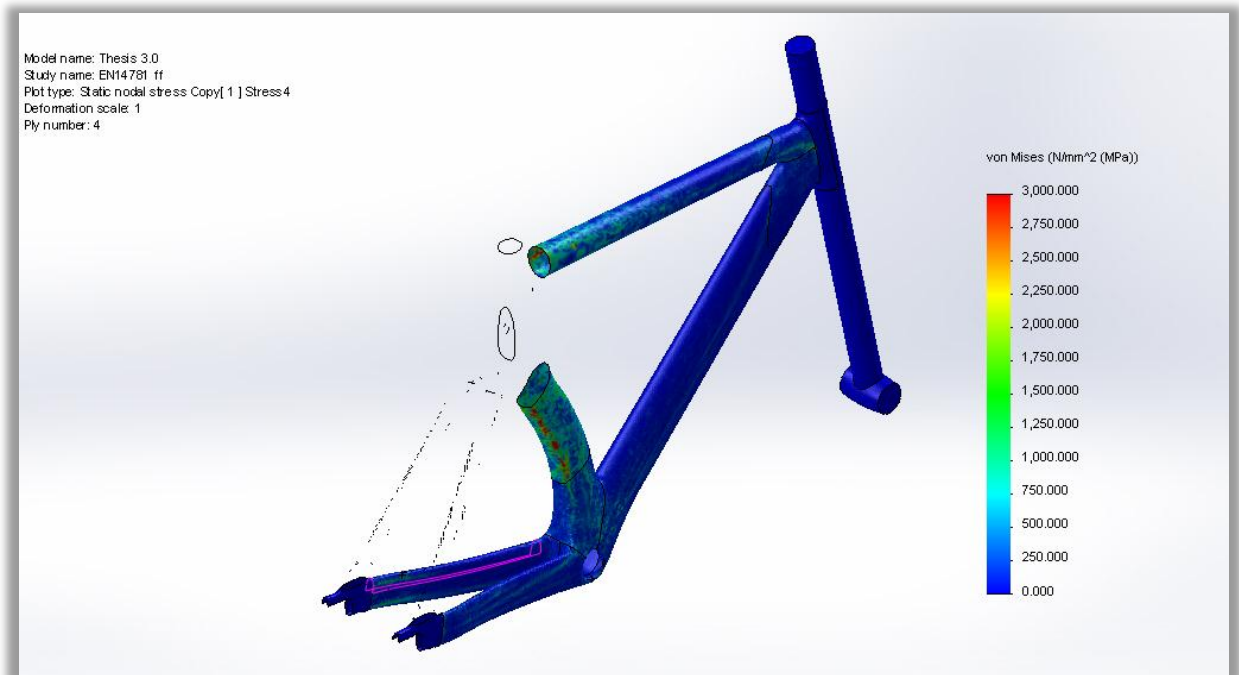
Στρώση #2



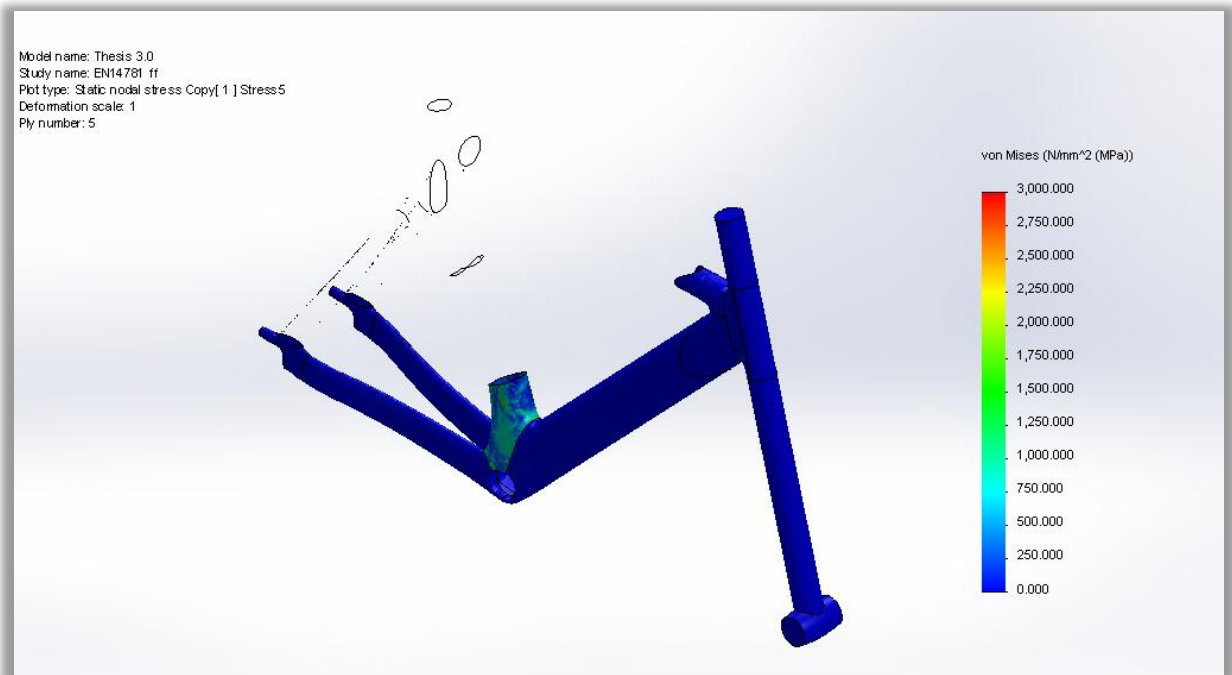
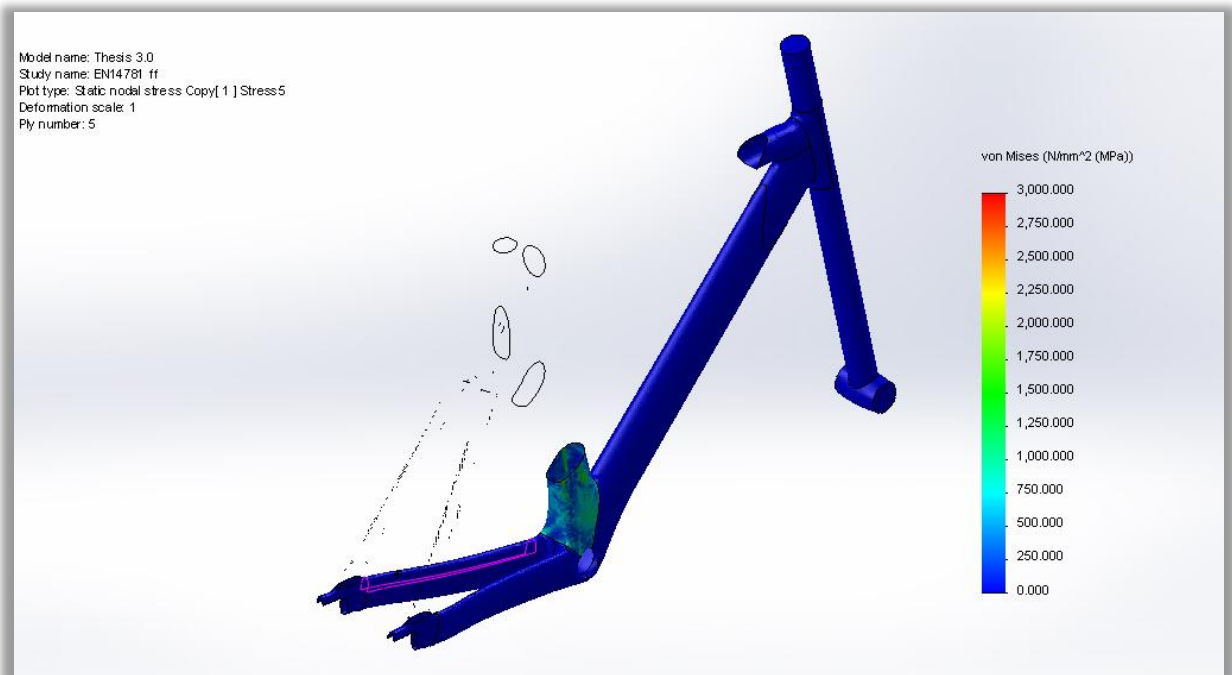
Στρώση #3



Στρώση #4

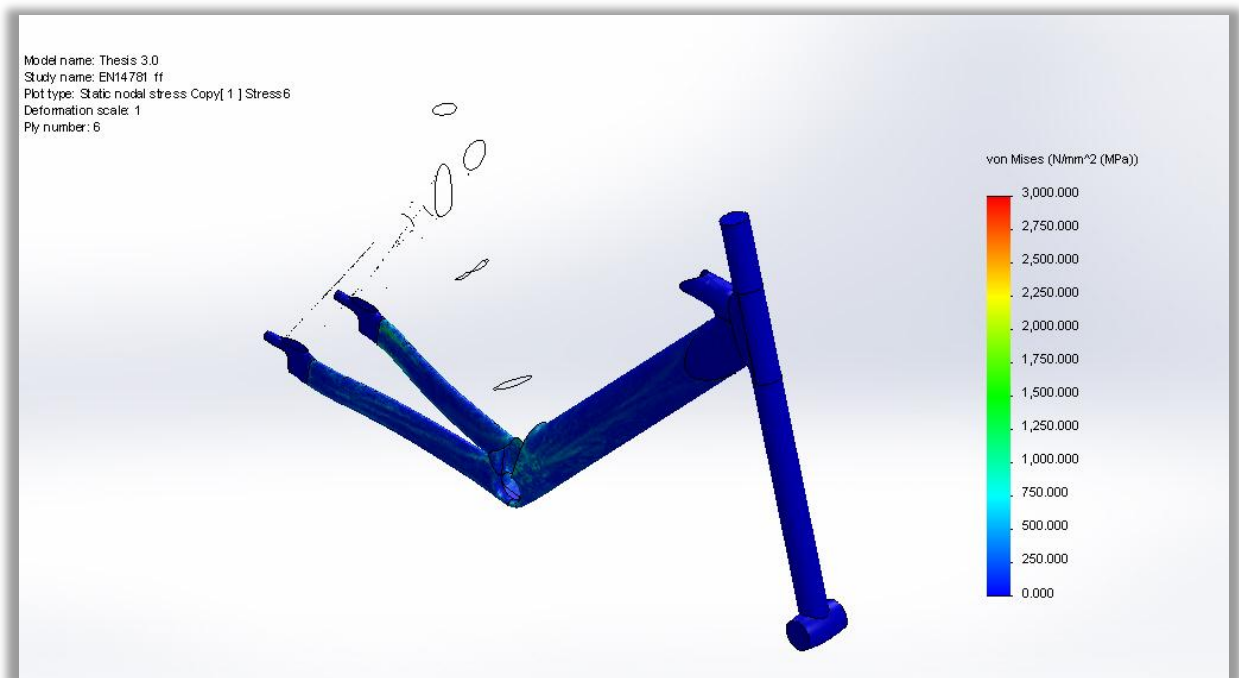
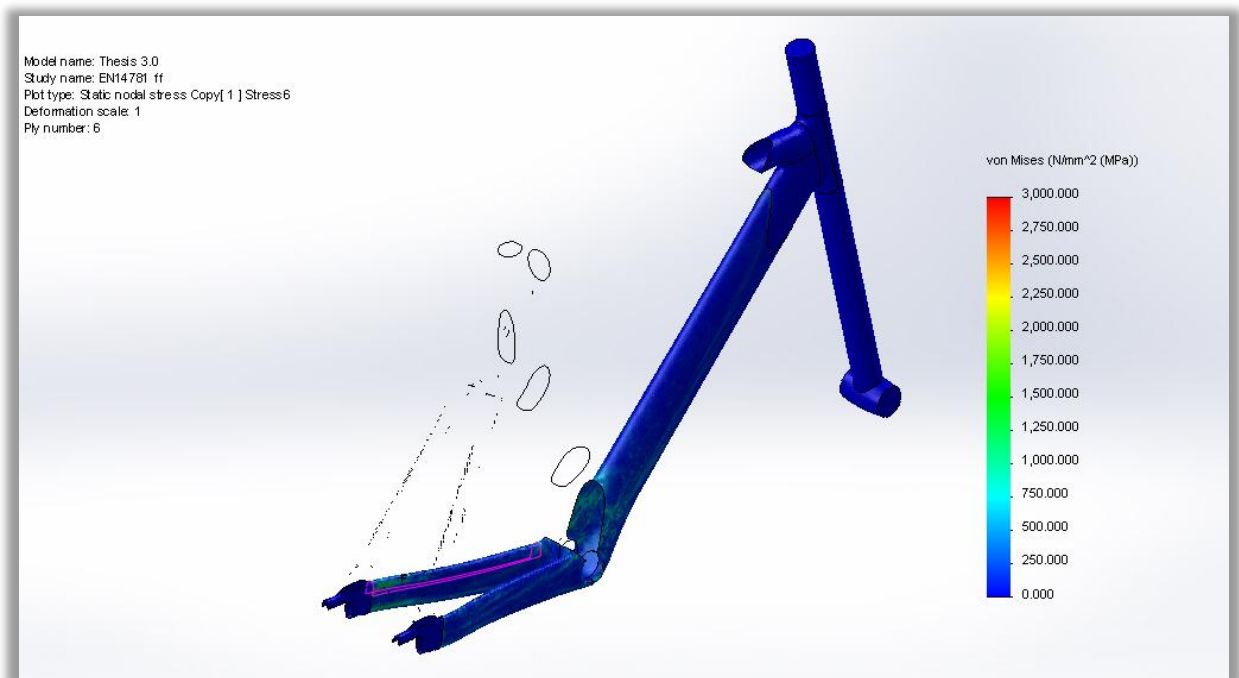


Στρώση #5



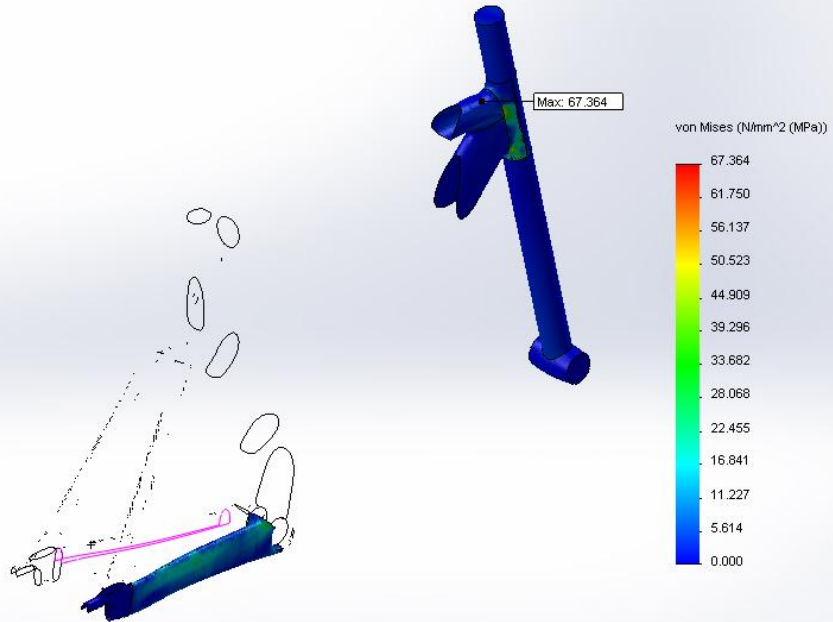
Στο 5^ο στρώμα (3^ο στρώμα T300), υπάρχουν μεγάλες περιοχές που ξεπερνούν κατά πολύ το όριο διαρροής σε εφελκυσμό και κατά συνέπεια το στρώμα αυτό καταρρέει.

Στρώση #6

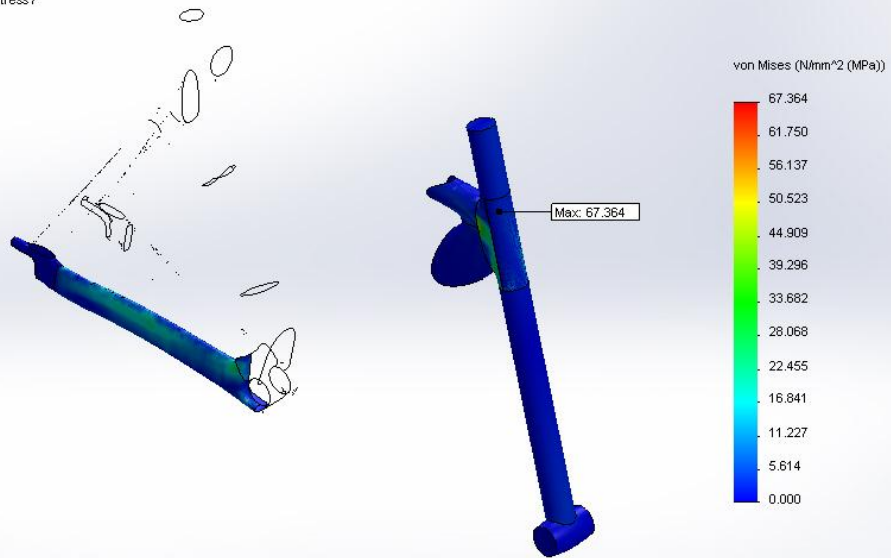


Στρώση #7

Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781 ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress7
Deformation scale: 1
Ply number: 7

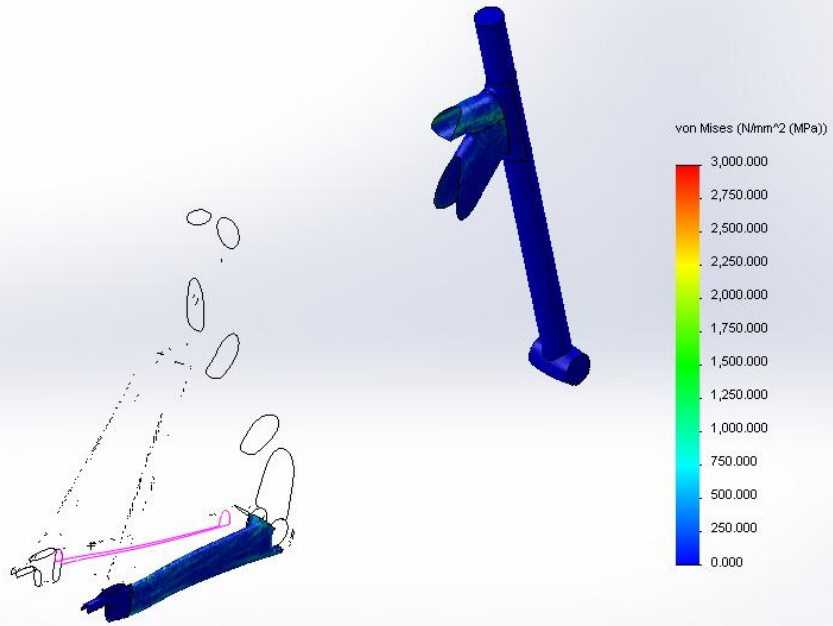


Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781 ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress7
Deformation scale: 1
Ply number: 7

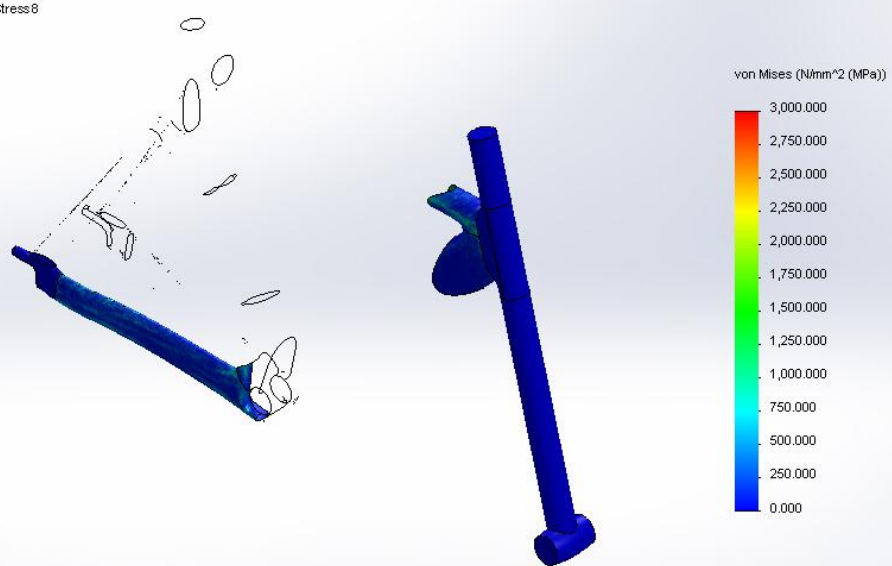


Στρώση #8

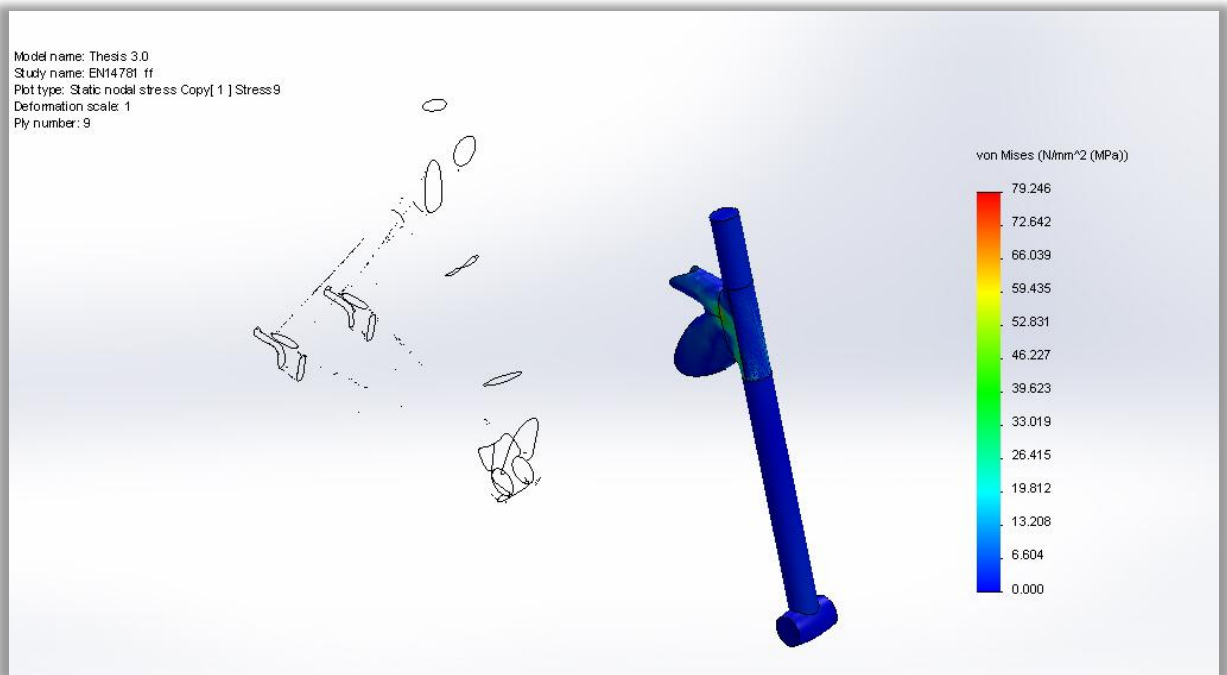
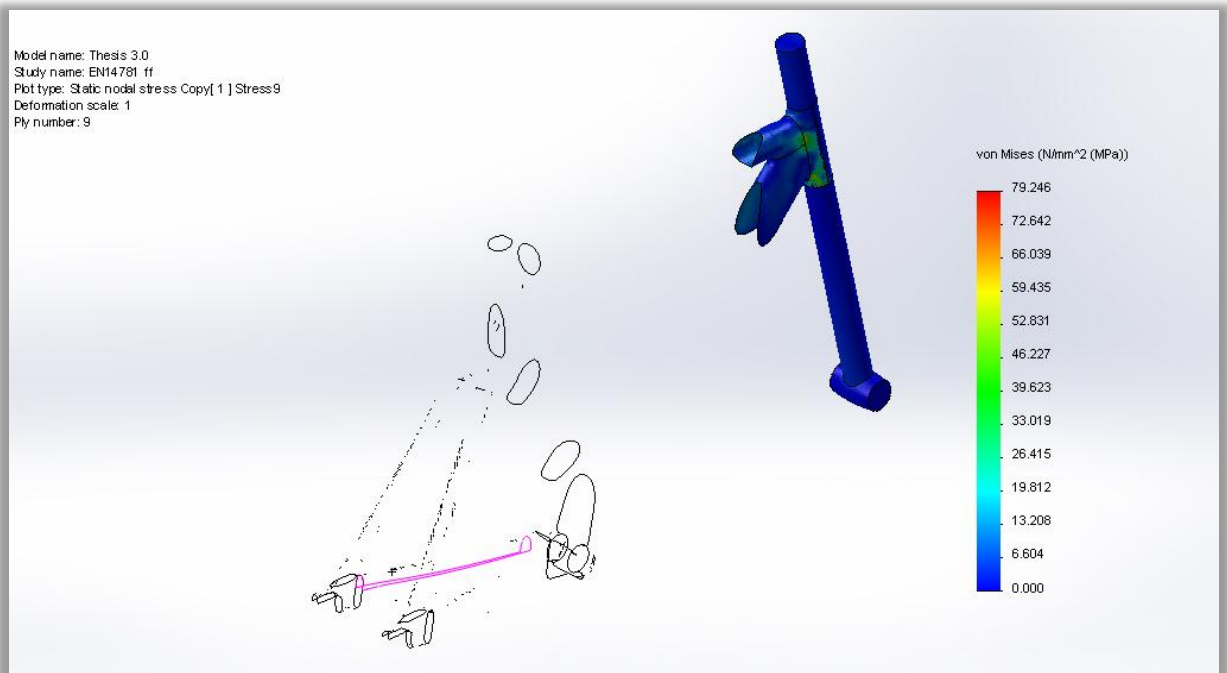
Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781_ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress8
Deformation scale: 1
Ply number: 8



Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781_ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress8
Deformation scale: 1
Ply number: 8

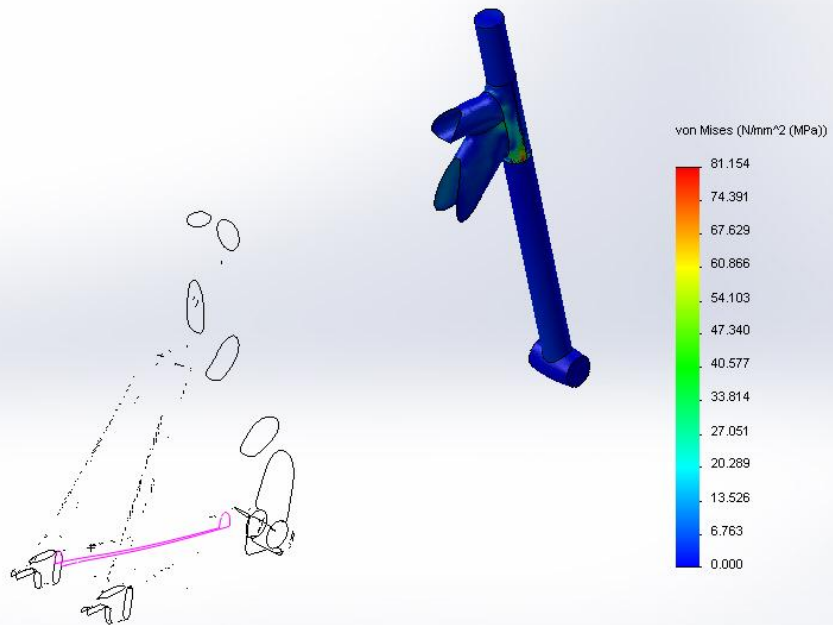


Στρώση #9

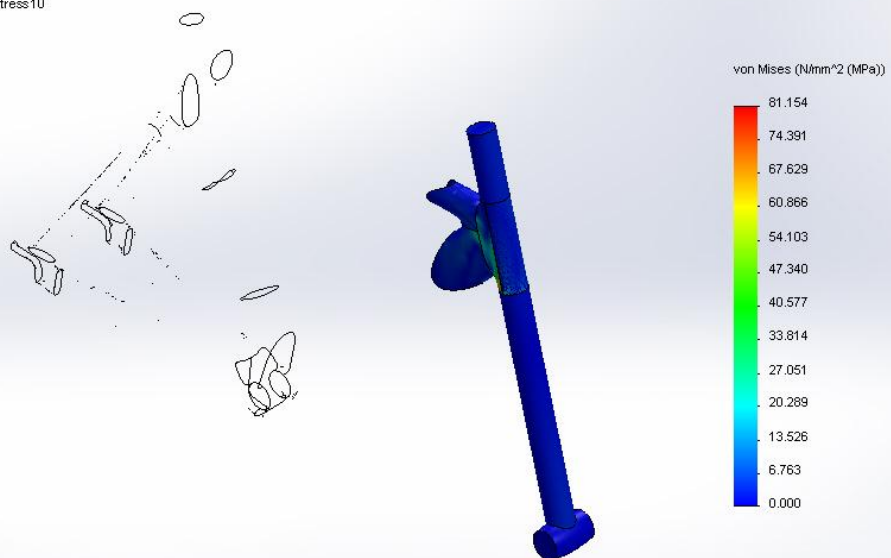


Στρώση #10

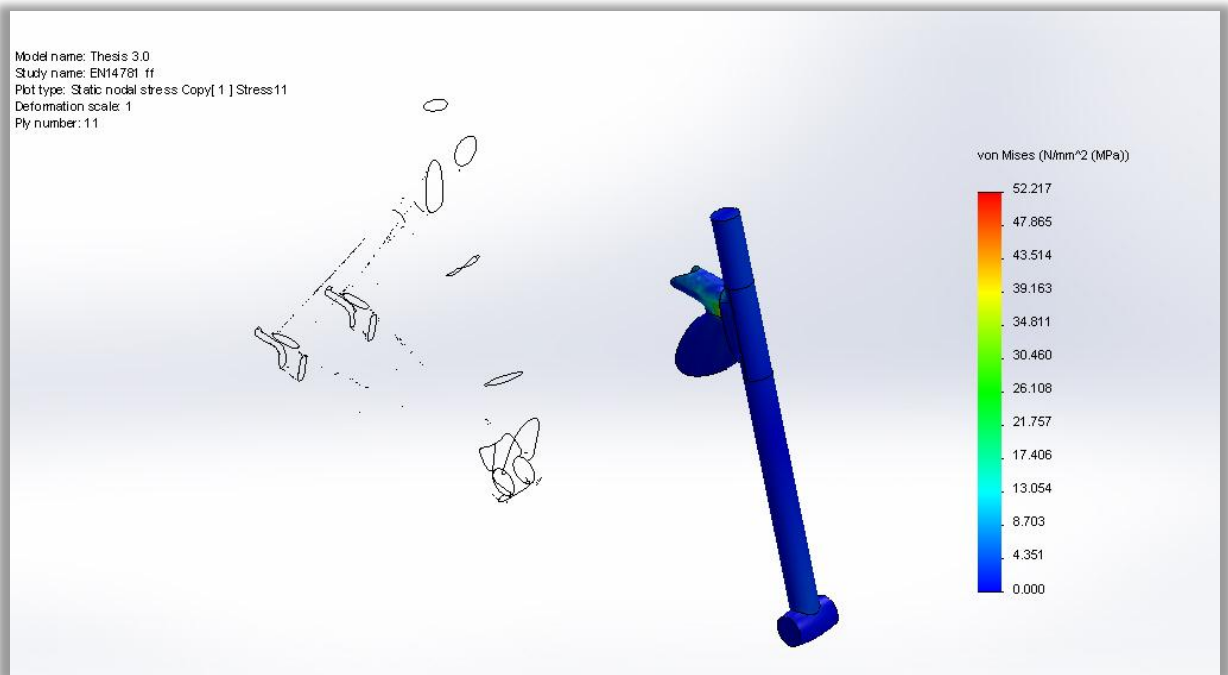
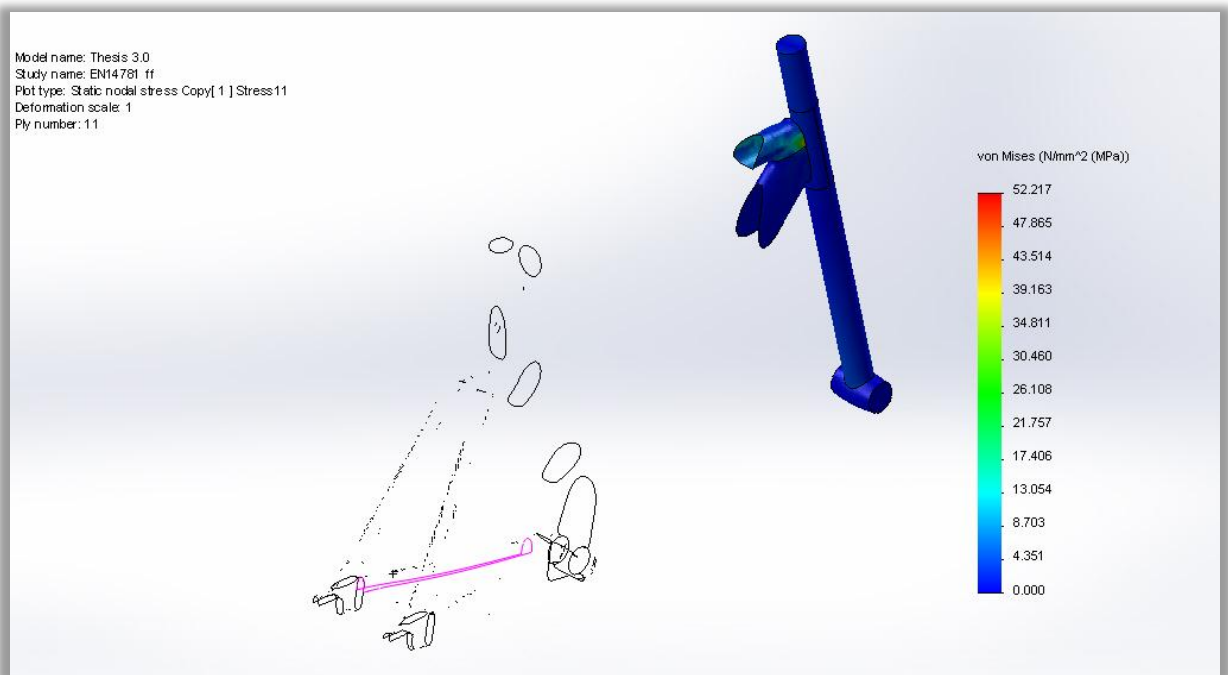
Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781 ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress10
Deformation scale: 1
Ply number: 10



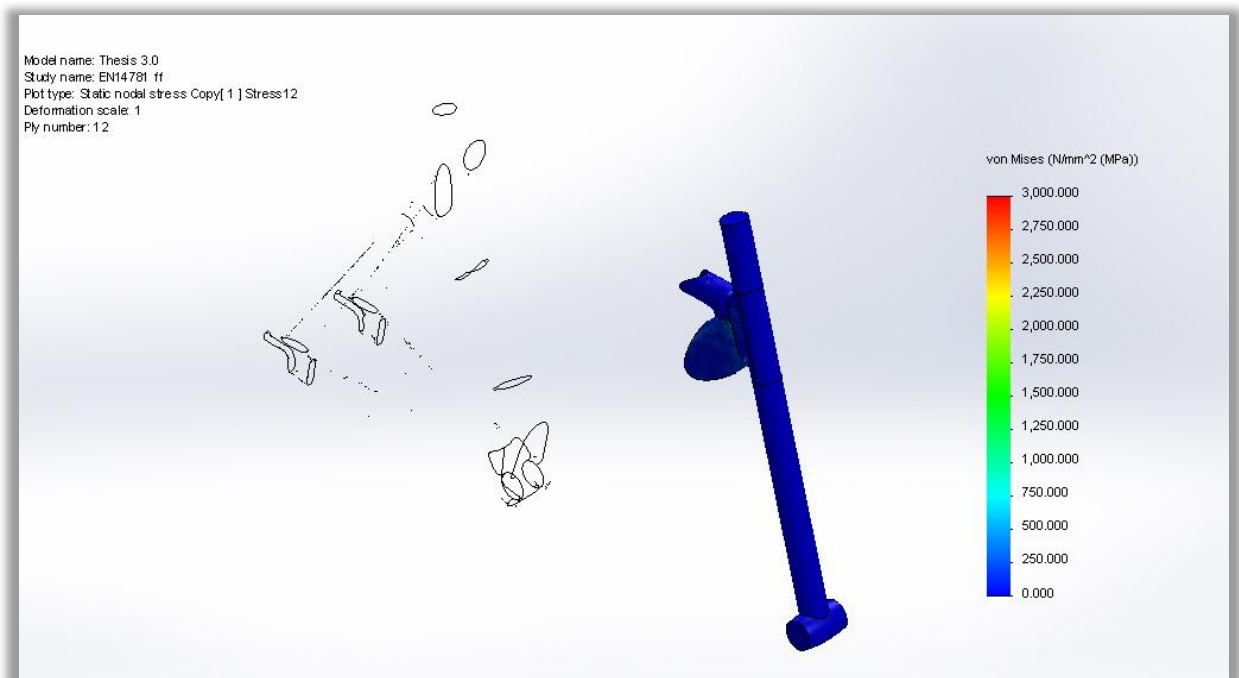
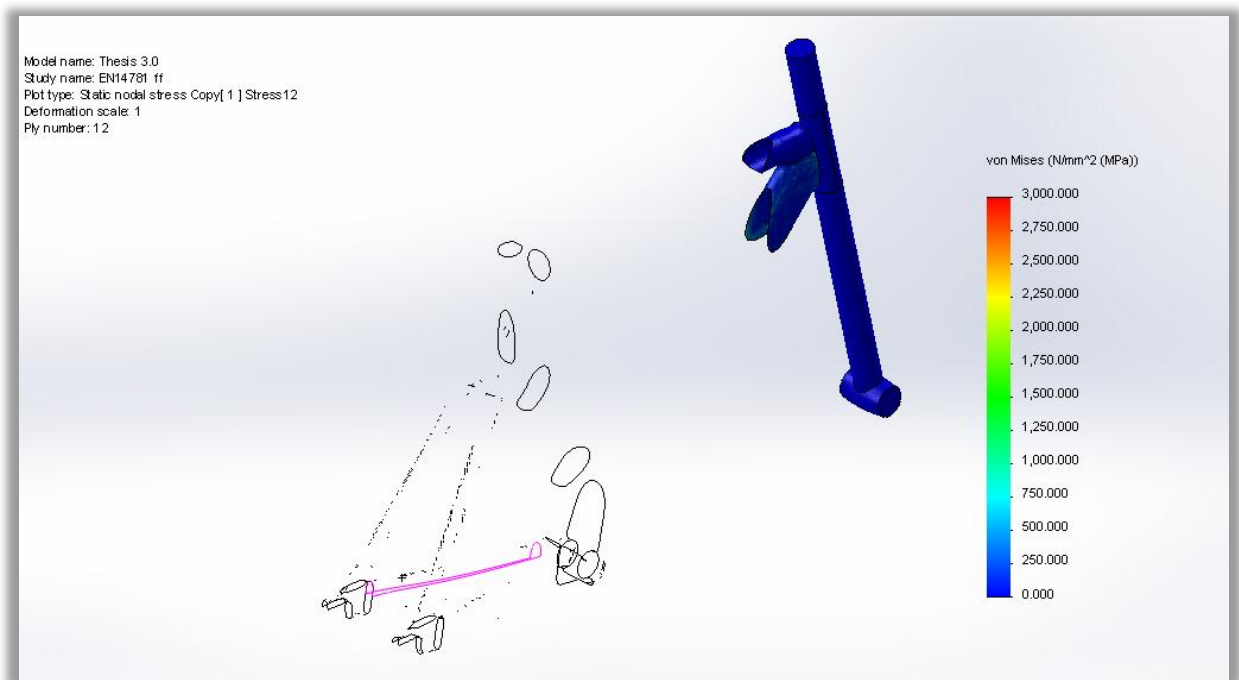
Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781 ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress10
Deformation scale: 1
Ply number: 10



Στρώση #11

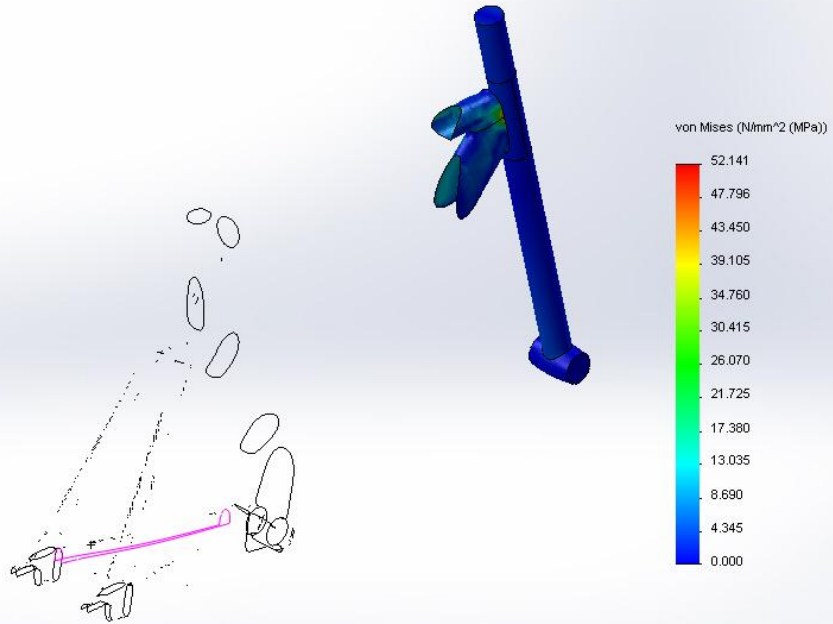


Στρώση #12

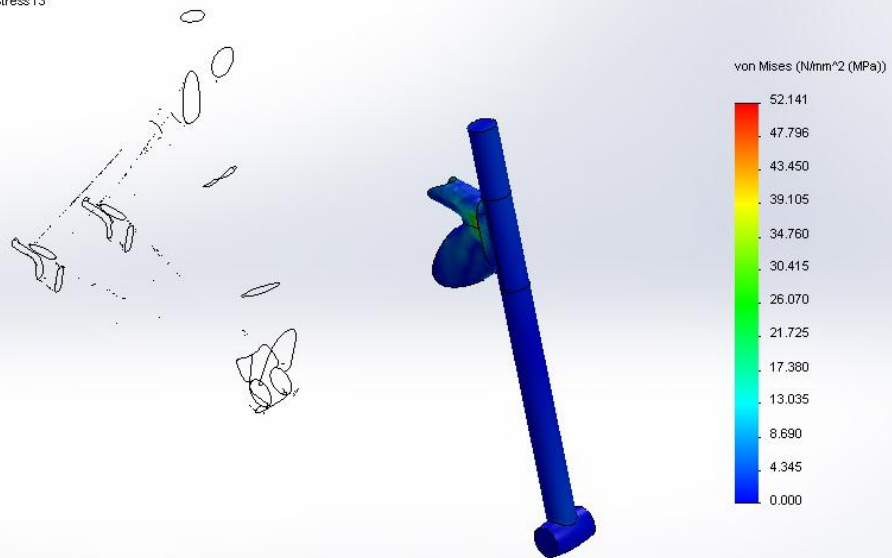


Στρώση #13

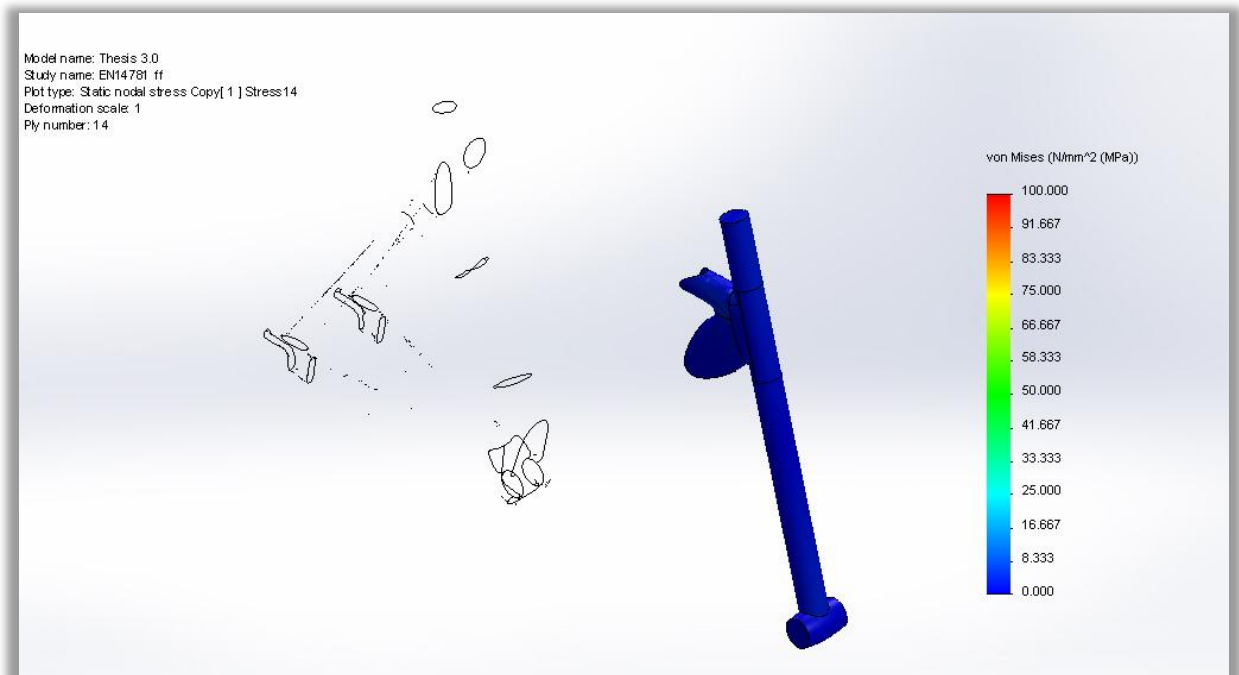
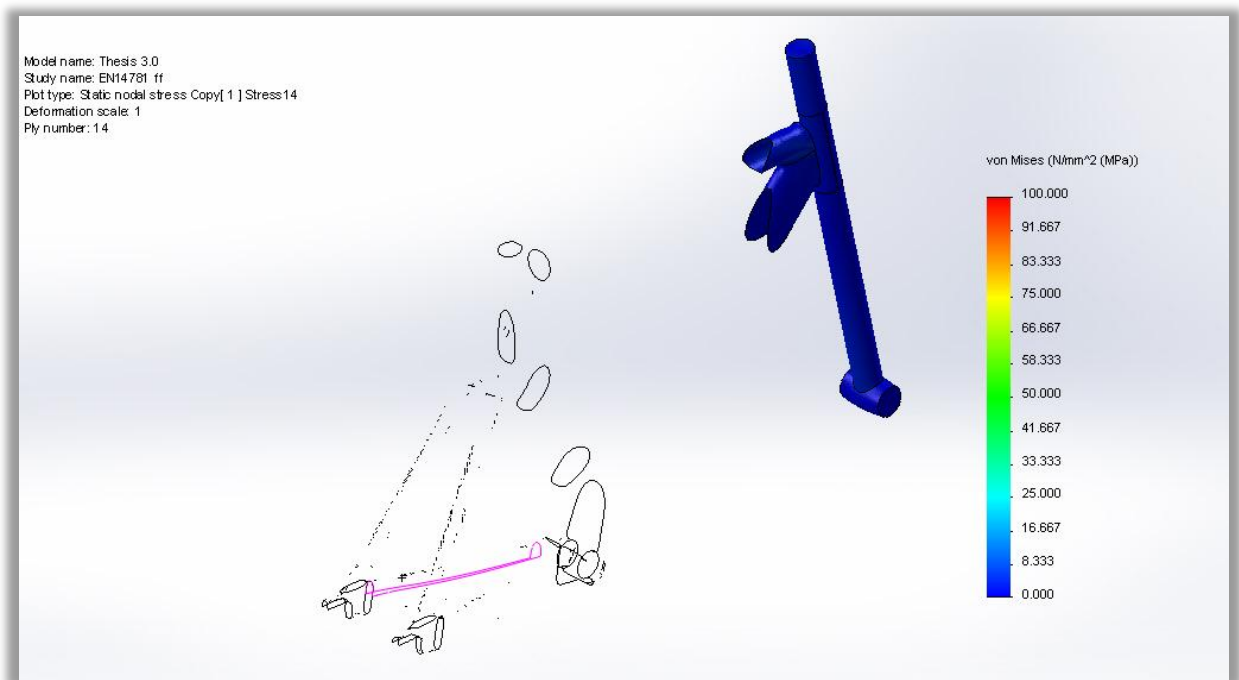
Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781 ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress13
Deformation scale: 1
Ply number: 13



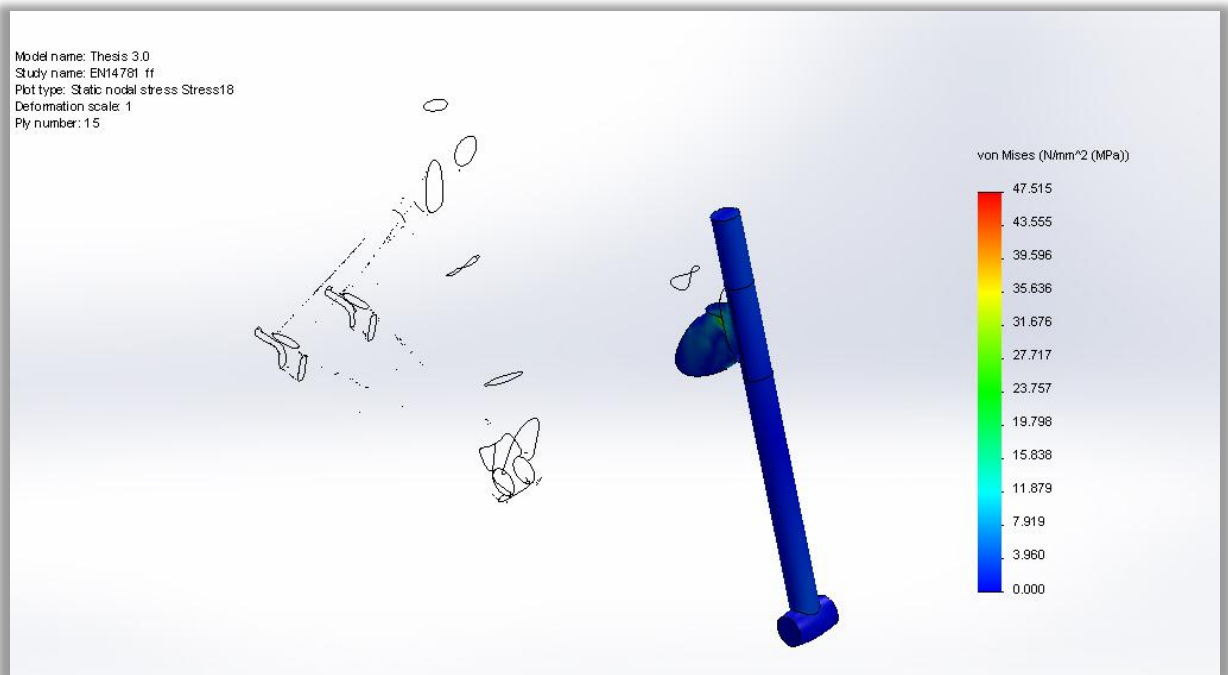
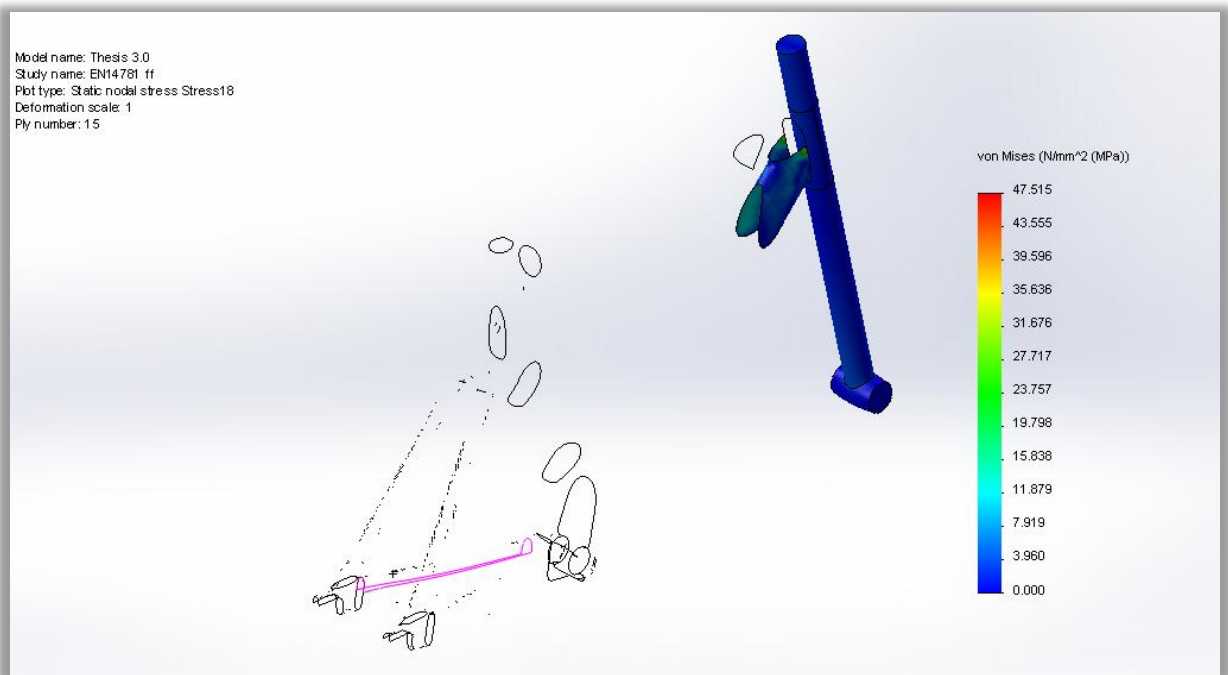
Model name: Thesis 3.0
Study name: EN14781 ff
Plot type: Static nodal stress Copy[1] Stress13
Deformation scale: 1
Ply number: 13



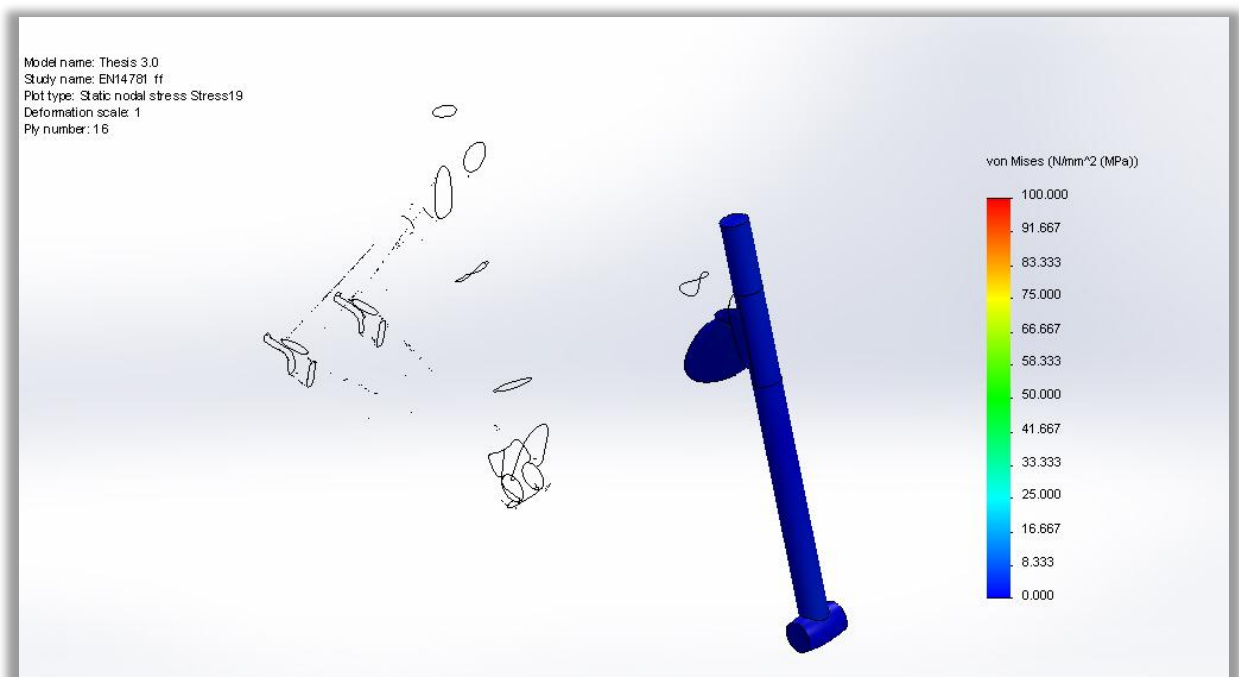
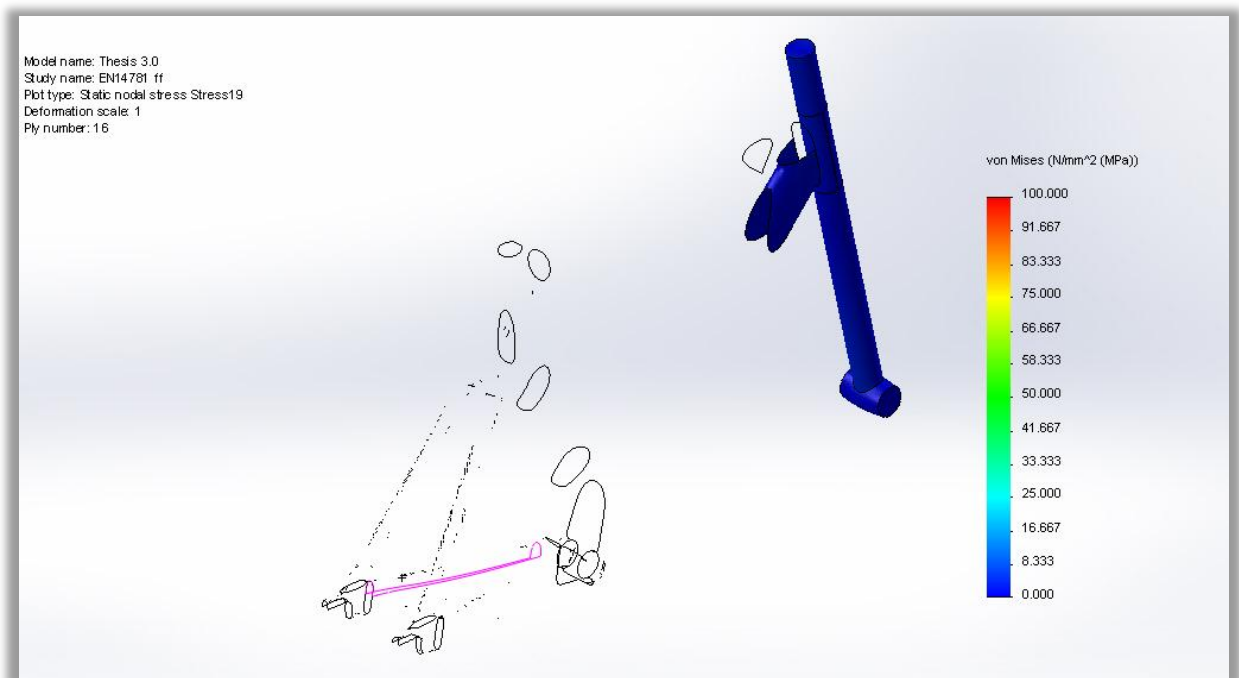
Στρώση #14



Στρώση #15



Στρώση #16



4. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Falling Mass Test

Τ' αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι αρκετά σαφή.

Εν γένει τα περισσότερα τμήματα του πλαισίου ανταπεξέρχονται πολύ καλά στις ανάγκες του πρώτου τεστ του EN14781, αλλά το Seat Tube που δρα ως συνδετικός κρίκος των βασικών τριγώνων υποφέρει. Η επιλογή του σχεδιαστή να μειώσει τις διαστρωματώσεις κατά την άνοδο προς το σημείο της σέλας αποδεικνύεται ανεπαρκής για τις ανάγκες της πρώτης δοκιμής, και κρίνεται απαραίτητο να ενισχυθεί με επιπλέον στρώσεις προκειμένου να συμμορφωθεί με τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού Κανονισμού. Στο 3^ο και τελευταίο στρώμα του πάνω τμήματος του Seat Tube, οι ισοδύναμες κατά von Misses τάσεις που αναπτύσσονται είναι έως και 2 φορές πάνω από το UTS, πράγμα που σημαίνει ότι αν τα επιπλέον 2 στρώματα M40J υψηλής αντοχής που ξεκινάνε από τον άξονα των πεντάλ συνέχιζαν μέχρι πάνω, το συγκεκριμένο τμήμα θα συμπεριφερόταν πολύ καλύτερα στην δοκιμή.

Οι υπόλοιπες περιοχές στις οποίες φαίνεται ν' αναπτύσσονται τάσεις μεγαλύτερες του ή κοντά στο UTS, είναι όλες περιοχές αλληλεπικαλύψεων στρώσεων στις ενώσεις των καλουπιών. Το παραπάνω υλικό που υπάρχει στο προϊόν σε σχέση με το μοντέλο, σε συνδυασμό με την πολύ μικρή υπέρβαση των τάσεων (της τάξης του +50% περίπου) μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι στο προϊόν, οι περιοχές αυτές είναι ασφαλείς. Προσθέτοντας τις ενισχύσεις στο σύνολο του Seat Tube που θα αναδιανεύουν τις τάσεις στο σύνολο του πλαισίου, είναι σίγουρο πως τα τμήματα αυτά αναμένεται να μην καταρρεύσουν και να μην εμφανίσουν ρωγμές ή σπασίματα κατά την διάρκεια της δοκιμής.

Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι τα όρια αποκόλλησης των στρώσεων δεν πλησιάζονται καν όπως φαίνονται στα διαγράμματα των διαστρωματικών τάσεων (interlaminar stresses), και ότι η ασύμμετρη φύση των τάσεων σε ένα συμμετρικό πλαίσιο οφείλονται στις 2 επιπλέον στρώσεις υφάσματος του δεξιού chain stay.

Falling Frame Test

Τα αποτελέσματα κι αυτής της δοκιμής είναι εξίσου σαφή. Η αδυναμία του Seat Tube γίνεται και πάλι εμφανής. Βέβαια το πλαίσιο συνολικά φαίνεται ν' ανταπεξέρχεται πολύ καλύτερα στην δοκιμή αυτή σε σχέση με πριν, μιας και μόνο το 3^ο στρώμα υφασμάτων φαίνεται να αντιμετωπίζει πρόβλημα. Το στρώμα αυτό στο τελευταίο κομμάτι του Seat Tube είναι μονοδιευθυντικό M40J και οι τάσεις φτάνουν έως και 2 φορές το UTS του.

Άλλα σημεία με προβλήματα βρίσκονται στο δέσιμο της βάσης των Seat Stays και του Seat Tube στο 2^ο συνολικά στρώμα (M40J Unidirectional), όπου οι τάσεις φτάνουν περίπου στο +30-50% του UTS του υλικού και αναμένουμε τα γενναϊόδωρα overlaps του δεσίματος να είναι αρκετά για την διαχείριση του προβλήματος.

Δεδομένων των ενισχύσεων που απαιτούνται για το ασφαλές πέρασμα της πρώτης δοκιμής, η δεύτερη φαίνεται να είναι ακόμα πιο εύκολη για το πλαίσιο. Ειδικότερα αν συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε ένα σχεδόν άκαμπτο στέλεχος αντί πρότυπου πιρουινιού, που υποχωρώντας αρκετά περισσότερο καμπτόμενο και προς τα εμπρός, θα μεγάλωνε σημαντικά την απόσταση επιβράδυνσης, μειώνοντας το ισοδύναμο στατικό φορτίο της δοκιμής μας, θεωρείται βέβαιο ότι αν το Seat Tube είναι όλο ίδιο με το κατώτερο τμήμα του, το προϊόν δεν θα έχει απολύτως κανένα πρόβλημα να πιστοποιηθεί και γι' αυτό το άρθρο του EN14781.

Απολογισμός

Συνοψίζοντας θα πρέπει ν' αναφερθούμε και στην διαδικασία αντίστροφου σχεδιασμού, αλλά και στο αν τελικά το πλαίσιο επικυρώνεται βάσει των επιλεγμένων άρθρων του Ευρωπαϊκού κανονισμού EN14781.

Το προϊόν υπό συζήτηση στην παρούσα του σύνθεση δεν μπορεί να περάσει τα δύο πρώτα τεστ του Ευρωπαϊκού Κανονισμού EN14781 περί αγωνιστικών δικύκλων, έτσι όπως αυτά προσεγγίστηκαν στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Θεωρείται επιπλέον ασφαλές συμπέρασμα τ' ότι το πλαίσιο θα χρειαστεί ενισχύσεις τουλάχιστον καθ' όλο το μήκος του Seat Tube για να μπορούμε να πούμε ότι θα μπορέσει ν' ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των δοκιμών του Κανονισμού.

Η διαδικασία του αντίστροφου σχεδιασμού ήταν με διαφορά η δυσκολότερη και πιο επίπονη για τον γραφών, όχι τόσο γιατί ήταν ένα καινούριο γνωστικό αντικείμενο, αλλά γιατί είναι πολύ εύκολο να γίνουν τρομακτικά λάθη χωρίς κάποιος να το καταλάβει μέχρι να είναι πολύ αργά.

Θα πρέπει ο μηχανικός που ξεκινά τον αντίστροφο μηχανολογικό σχεδιασμό ενός προϊόντος, να έχει συνέχεια κατά νου τις ανάγκες που πρέπει να υπηρετήσει το προκύπτον σχέδιό του. Στην δική μας περίπτωση απαίτησης επικύρωσης για παράδειγμα, οι πρώτες λάθος απόπειρες δημιουργίας επιφανειών τύπου NURBS, χωρίς να είναι λάθος ως μορφές ή ανακριβείς έφεραν το χάος στην διαδικασία της ανάλυσης με FEM. Patches με 'κακά' aspect ratio που είχαν προκύψει από αυτόματη λειτουργία στο Geomagic χωρίς αναδιάταξη (πχ Shuffle ->Grid) ή έστω κάποια ελάχιστη χειροκίνητη διόρθωση, αν και δημιούργησαν επιφάνειες που εισήχθησαν χωρίς πρόβλημα στο Solidworks, έφεραν προβλήματα στα πλέγματα που δημιουργούσε το pre-processor του Simulation. Προβλήματα που έκαναν το solver να πέφτει σε απροσδιόριστα σφάλματα λόγω κακής συνάντησης των υφασμάτων ή που επέφεραν μηδενικές Ιακωβιανές οριζουσες σε σημεία της γεωμετρίας κοντά στο επίπεδο συμμετρίας. Επίσης οι ώρες που χρειάστηκαν για να φτάσει η επιφάνεια στην σημερινή ποιότητα ξεπερνούν τις 70, χωρίς να υπολογίσουμε άλλες περίπου 30 ώρες προσπάθειας σωστής μεταφοράς από πολυγωνική σε

NURBS. Σημειώνεται βέβαια ότι ήταν ένα εντελώς καινούριο γνωστικό αντικείμενο για μένα και μάλιστα σε ένα αντικείμενο σημαντικού μεγέθους, οργανικής περίπλοκης γεωμετρίας και με ιδιαίτερη απαίτηση σε ακρίβεια. Σε αντιστοιχία, η επεξεργασία των κενών και η δημιουργία των συμπληρωματικών features στο περιβάλλον του Solidworks κράτησε λιγότερο από 10 ώρες.

Τέλος η ανάλυση με εμπορικά πακέτα CAE θα πρέπει να προσεγγίζεται μ' εξαιρετική προσοχή από το μηχανικό. Η ευκολία χρήσης προγραμμάτων όπως το παλιότερο COSMOSWorks της Solidworks –μετέπειτα Simulation- ή και του Workbench του πακέτου ANSYS, με όμορφα διαγράμματα τάσεων και πολλαπλά εργαλεία post-processing δίνουν πολλές φορές την ψευδαίσθηση της ευκολίας χρήσης μέσω της ελάχιστης εισόδου από τον χρήστη.

Πολλές φορές μοντέλα στήνονται λάθος, διακριτοποιούνται λάθος, λύνονται με λάθος solvers και βγάζουν λάθος αποτελέσματα τα οποία μπορούν επίσης να ερμηνευτούν με λάθος τρόπο. Είναι απολύτως απαραίτητο να μοντελοποιείται σωστά το κάθε πρόβλημα, κάνοντας σωστή χρήση του εκάστοτε CAE προγράμματος και ορίζοντας προσεκτικά κάθε παράμετρο του μοντέλου.

Είναι εξαιρετικό σημαντικό να γίνονται λογικές παραδοχές, των οποίων η επίδραση στο μοντέλο και στο σενάριο καταπόνησής του να είναι απολύτως γνωστή και ν' αντανακλάται στα αποτελέσματα. Οι παραδοχές, ακόμη και χονδροειδής είναι πολλές φορές όχι απλά επιθυμητή αλλά εκ των ων ουκ άνευ στην δουλειά του Μηχανικού μιας και αν χρησιμοποιηθούν σωστά μπορούν να εξηγήσουν μια συμπεριφορά ενός προβλήματος βοηθώντας τον να φτάσει γρηγορότερα σε μία λύση. Εκτός της επικύρωσης του σχεδίου (design validation) που επιτρέπουν τέτοιου μεγέθους συμβάσεις και παραδοχές, ακόμα και στην βελτιστοποίηση προτείνονται πρόχειροι υπολογισμοί που θα μας δείξουν την συμπεριφορά του προβλήματος στην μεγάλη αλλαγή παραμέτρων του, ώστε να μπορούμε να εντοπίσουμε την περιοχή τιμών στην οποία αναμένεται να βρεθεί η βέλτιστη τιμή.

Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει ο μηχανικός που θα ελέγξει με την βοήθεια κάποιου προσεγγιστικού μοντέλου το οτιδήποτε θα πρέπει να έχει κατά νου τα λεγόμενα του George E. P. Box, Καθηγητή Στατιστικής στο Πανεπιστήμιο του Wisconsin και πρωτοπόρου στους τομείς του ελέγχου ποιότητας, ανάλυσης χρονοσειρών και σχεδιασμού πειραμάτων:

Essentially, all models are wrong, but some are useful

5. Βιβλιογραφία

The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning

N. Vukasinovic, D. Bracun, University of Ljubiana, 2009

Combination of a Vision System and a Coordinate Measuring Machine for the Reverse Engineering of Freeform Surfaces

V. Carbone, M. Carocci, E. Savio, G. Sansoni and L. De Chiffre

Reverse engineering and its relevance to industrial engineering: a critical review

Bidanda, Bopaya | Hosni, Yasser A

Διερεύνηση της δυνατότητας δημιουργίας πολύπλοκων στερεών αντικειμένων σε συστήματα CAD από νέφη σημείων, που προκύπτουν από μηχανές σάρωσης επιφανειών

Θωμαδάκης, Ευάγγελος Γ., Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ - Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Κατασκευών. Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας

Τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα

Παναγιώτης Τσίγκος, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ - Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας MK&AE

Geomagic Studio reverse engineering technology and applications

Tsinghua University Press

Advanced mechanics of composite materials

Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov

EUROPEAN STANDARD EN 14781 November 2005, Racing bicycles - Safety requirements and test methods

European Committee For Standardization

Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2012

Paul Kurowski, SDC Publications

Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά

Δημήτρης Ι. Παντελής

Σημειώσεις μαθήματος Προηγμένα υλικά

Δημήτριος Μανωλάκος