



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»



Μεταπτυχιακή Εργασία

Πιλοτική εφαρμογή και αποτίμηση ελάφρυνσης μηχανολογικών εξαρτημάτων για προσθετική κατασκευή, με συνδυασμό τοπολογικής βελτιστοποίησης και πλεγματικών δομών

Pilot study & assessment of lightweighting for additive manufactured mechanical components, by combined use of topology optimization and lattice structures

Καναβούτσος Σοφοκλής
Διπλωματούχος Μηχανικός Αυτοματισμού

Επιβλέπων: Δρ. – Μηχ. Σ. Πολύδωρας, ΕΔΙΠ Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Μάθημα: 1109 - Τεχνολογίες και Εφαρμογές Προσθετικής Κατασκευής/3D Εκτύπωσης

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2023

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάδειξη μιας υβριδικής προσέγγισης σχεδιασμού με το συνδυασμό δύο ανεξάρτητων τεχνικών ελάφρυνσης μηχανολογικών εξαρτημάτων, της τοπολογικής βελτιστοποίησης και των πλεγματικών δομών. Και οι δύο τεχνικές αποσκοπούν στη μείωση της μάζας και του βάρους μηχανολογικών εξαρτημάτων, ικανοποιώντας παράλληλα τις όποιες απαιτήσεις αντοχής των εξαρτημάτων στις μηχανικές καταπονήσεις που αυτά δέχονται.

Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση και ανάλυση της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Δίνεται ο ορισμός της και περιγράφονται οι διάφορες επικρατούσες μέθοδοι και τα βήματα εφαρμογής τους, στα πλαίσια του μηχανολογικού σχεδιασμού. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από ενδεικτικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την παραπάνω διαδικασία σχεδιασμού καθώς και διάφορα σχεδιαστικά λογισμικά που την υποστηρίζουν.

Στην συνέχεια αναλύεται η τεχνική ελάφρυνσης μηχανολογικών εξαρτημάτων με χρήση πλεγματικών δομών. Περιγράφονται οι διακριτοί τύποι των πλεγματικών δομών, οι ιδιότητες τους, η διαδικασία σχεδιασμού τους καθώς και λογισμικά που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τους. Δίνεται έμφαση στις μηχανικές ιδιότητες ενός εξαρτήματος που τα ενσωματώνει, με την βοήθεια της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, βγάζοντας χρήσιμα συμπεράσματα.

Ακολουθεί η παρουσίαση μιας τεχνικής για το συνδυασμό και των δύο μεθόδων ελάφρυνσης στον σχεδιασμό ενός μηχανολογικού εξαρτήματος. Από τον νέο αυτό υβριδικό σχεδιασμό και με την χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, εξάγεται και αναδεικνύεται σειρά πλεονεκτημάτων από τον συνδυασμό τοπολογικής βελτιστοποίησης και πλεγματικών δομών.

Κατόπιν υλοποιείται, περιγράφεται και απεικονίζεται περίπτωση εφαρμογής, με σχεδιασμό ενός συγκεκριμένου μηχανολογικού εξαρτήματος με συνδυαστική - υβριδική ελάφρυνση σε αυτό. Χρησιμοποιείται το λογισμικό Autodesk «Fusion 360» για τον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση του εξαρτήματος και εν συνεχεία το Autodesk - «Netfabb», για τη δημιουργία και ενσωμάτωση σε αυτό πλεγματικών δομών, επιτυγχάνοντας έτσι υβριδικό σχεδιασμό.

Τέλος για σκοπούς αξιολόγησης, υλοποιείται προσθετική κατασκευή του εξαρτήματος σε τρισδιάστατο εκτυπωτή μετάλλου και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ολοκληρωμένη εφαρμογή της διαδικασίας σχεδιασμού με υβριδική ελάφρυνση.

Abstract

This thesis aims to highlight a hybrid design approach that combines two independent techniques for lightweighting mechanical components, topological optimization and lattice structures. Both these techniques aim towards mass and weight reduction of mechanical components, while satisfying any given strength requirements of the components against mechanical loads they receive.

At first, topological optimization is introduced and analyzed. It is defined and various established methods are described, as well as, their utilization steps, within the context of mechanical design. Results from indicative finite element analyses are presented, along with advantages deriving from the above design process and several design software suites that support it.

Next, the lightweighting technique of mechanical components via Lattice Structures is analyzed. Discrete types of lattices, their properties, their design process, as well as, software suites for their creation are described. Emphasis is placed on the mechanical properties of a component that incorporates them, with the help of finite element analysis, drawing useful conclusions.

Subsequently, a technique for the combined utilization of the above two methods on a mechanical component is presented. From this new hybrid design and using finite element analysis, a number of advantages from the combination of topological optimization and lattice structures are extracted and highlighted.

Later, an application case is attempted, described and illustrated, the design of a specific mechanical component with combined-hybrid lightweighting. Autodesk "Fusion 360" software is used for the design and optimization of the component and then Autodesk "Netfabb" to create and integrate Lattice Structures into it, thus achieving hybrid design.

Finally, for evaluation purposes, the part is additively manufactured in a metal-capable 3D printer and the conclusions obtained from the integrated application of the design process with hybrid lightweighting are presented.

Ευχαριστώ θερμά, τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας στο ΔΠΜΣ, Δρ. Σταμάτιο Πολύδωρα, μέλος ΕΔΙΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη, και τη στενή και διαρκή του καθοδήγηση, στην εκπόνηση ενός σύγχρονου και απαιτητικού κατασκευαστικού θέματος.

Ο γράφων και ο επιβλέπων, ευχαριστούν αμφότεροι θερμά την εταιρεία AutoDesk για την δωρεάν διάθεση εκπαιδευτικών αδειών των πολύτιμων και απαραίτητων για την εργασία προϊόντων λογισμικού που παράγει, και εξίσου την εταιρεία ANiMA για την ευγενική χορηγία της δωρεάν προσθετικής κατασκευής σε μέταλλο με τεχνολογία SLM του κύριου αντικειμένου μελέτης, όπως αυτό παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Summary.....	3
Κατάλογος Εικόνων.....	7
Κατάλογος Συντμήσεων.....	11
1 Εισαγωγή	
1.1 Σκοπός Εργασίας	12
1.2 Δομή Εργασίας.....	12
2 Τοπολογική Βελτιστοποίηση Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
2.1 Τι είναι η τοπολογική βελτιστοποίηση.....	13
2.2 Μέθοδοι SIMP-ESO.....	13
2.3 Χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης για ελάφρυνση μηχανολογικών εξαρτημάτων.	15
2.4 Πλεονεκτήματα εφαρμογής της τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	16
2.5 Τοπολογική βελτιστοποίηση και προγράμματα CAD.....	17
2.6 Τεχνική σχεδιασμού τοπολογικής βελτιστοποίησης με χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA).....	19
2.7 Χρήση τεχνολογιών πρόσθετης κατασκευής για την υλοποίηση κατασκευών που έχουν υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση	21
3 Πλεγματικές δομές	
3.1 Τι είναι οι πλεγματικές δομές και ποιος είναι ο σκοπός σχεδιασμού εξαρτημάτων με χρήση πλεγματικών δομών.....	24
3.2 Κατηγορίες πλεγματικών δομών και βασικά χαρακτηριστικά.....	26
3.3 Τύποι πλεγματικών δομών και ιδιότητες.....	27
3.4 Εφαρμογές σε εξαρτήματα με εργαλεία CAD.....	29
3.5 Διαδικασία σχεδιασμού πλεγματικών δομών.....	32
3.6 Μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων με πλεγματικές δομές	34

3.7 Χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής για την υλοποίηση κατασκευών με χρήση πλεγματικών δομών.....	37
---	----

4 Υβριδικός σχεδιασμός με τοπολογική βελτιστοποίηση και πλεγματικές δομές

4.1 Ο υβριδικός σχεδιασμός με τοπολογική βελτιστοποίηση και πλεγματικές δομές και οι στόχοι του.....	39
4.2 Διαδικασία για την επίτευξη του υβριδικού σχεδιασμού.....	40
4.3 Μηχανικές ιδιότητες εξαρτημάτων που έχει εφαρμοστεί ο υβριδικός σχεδιασμός και σύγκριση με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA).....	43

5 Εφαρμογή του υβριδικού σχεδιασμού

5.1 Εφαρμογή του υβριδικού σχεδιασμού σε μηχανολογικό εξάρτημα με σκοπό την κατασκευή του σε τρισδιάστατο εκτυπωτή, με χρήση των λογισμικών της Autodesk	47
--	----

6 Προσθετική κατασκευή και πειραματική δοκιμή

6.1 Προσθετική κατασκευή	80
6.2 Πειραματική δοκιμή.....	85

7 Συμπεράσματα και επεκτάσεις.....90

8 Βιβλιογραφία - Πηγές - Αναφορές.....91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1	Παράδειγμα τοπολογικής βελτιστοποίησης φορτισμένης δοκού.	14
Εικόνα 1.2	Παράδειγμα σχεδίασης βραχίονα με τοπολογική βελτιστοποίηση.....	15
Εικόνα 1.3	Κατασκευή συνδέσμου για αεροδιαστημική εφαρμογή με χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης	16
Εικόνα 1.4	Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό με χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης, με το πρόγραμμα NX της Siemens.....	18
Εικόνα 1.5	Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό με χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης, με το πρόγραμμα	19
Εικόνα 1.6	Τυπικά βήματα διαδικασίας σχεδιασμού τοπολογικής βελτιστοποίησης	19
Εικόνα 1.7	Διάγραμμα ροής για την λειτουργία της επαναληπτικής διαδικασίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης	20
Εικόνα 1.8	Διαδικασία σχεδιασμού τοπολογικής βελτιστοποίησης με χρήση FEA.....	21
Εικόνα 1.9	Διαδικασία κατασκευής εξαρτήματος που έχει υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή.....	22
Εικόνα 1.10	Στιγμιότυπο από την διαδικασία κατασκευής μηχανολογικού εξαρτήματος σε τρισδιάστατο εκτυπωτή.....	22
Εικόνα 1.11	Μεταλλική βάση στήριξης κατασκευασμένη σε τρισδιάστατο εκτυπωτή SLM	23
Εικόνα 2.1	Μεταλλικό εξάρτημα κατασκευασμένο σε φρέζα CNC	24
Εικόνα 2.2	Κηρήθρες μελισσών	25
Εικόνα 2.3	Μικρογραφία από τμήμα οστού ανθρώπινης κνήμης.....	25
Εικόνα 2.4	Κύβοι κατασκευασμένοι με TPMS, ακτινωτά και επίπεδα πλέγματα αντίστοιχα.....	26
Εικόνα 2.5	Τύποι πλεγματικών δομών, χωρισμένοι ανά κατηγορίες.....	27
Εικόνα 2.6	Αποτελέσματα σε δοκιμή πίεσης διάφορων τύπων πλεγματικών δομών	28
Εικόνα 2.7	Διάγραμμα πίεσης-πυκνότητας των πλεγματικών δομών του παραπάνω πίνακα	28
Εικόνα 2.8	Διάγραμμα Ελαστικότητας-πυκνότητας των πλεγματικών δομών	29
Εικόνα 2.9	Κάθισμα αγωνιστικού ποδηλάτου με πλεγματικές δομές	29
Εικόνα 2.10	Μηχανολογικά εξαρτήματα (βάσης στήριξης)κατασκευασμένα με πλεγματικές δομές.....	30
Εικόνα 2.11	Βραχιώνας έδρασης για αεροδιαστημική εφαρμογή κατασκευασμένος με χρήση πλεγματικών δομών	30
Εικόνα 2.12	Στιγμιότυπο από την διαδικασία σχεδιασμού πλεγματικών δομών σε μηχανολογικό εξάρτημα στο πρόγραμμα Netfabb	31
Εικόνα 2.13	Πετάλι αυτοκινήτου σχεδιασμένο στο πρόγραμμα nTopology με χρήση πλεγματικών δομών ακτινών (Beam)	32

Εικόνα 2.14	Εξάρτημα στο οποίο καθορίζεται ο χώρος που θα εφαρμοστούν οι πλεγματικές δομές.....	33
Εικόνα 2.15	Το ίδιο εξάρτημα στο οποίο έχουν εφαρμοστεί οι πλεγματικές δομές	34
Εικόνα 2.16	Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο ίδιο εξάρτημα, πριν και μετά την εφαρμογή των πλεγματικών δομών.....	35
Εικόνα 2.17	Χρήση εξάγωνων πλεγματικών δομών στην κατασκευή κράνους.....	35
Εικόνα 2.18	Εναλλάκτης θερμότητας με χρήση γυροειδών πλεγματικών δομών (TPMS) σχεδιασμένος στο λογισμικό nTopology	36
Εικόνα 2.19	Ορθοπεδικά εμφυτεύματα με πλεγματικές δομές.....	37
Εικόνα 2.20	Μεταλλικό μηχανολογικό εξάρτημα με πλεγματικές δομές κατασκευασμένο σε τρισδιάστατο εκτυπωτή τύπου SLM.....	38
Εικόνα 3.1	Μηχανολογικό εξάρτημα αυτοκινήτου, στο οποίο έχει εφαρμοστεί υβριδικός σχεδιασμός τοπολογικής βελτιστοποίησης και πλεγματικών δομών. Έχει κατασκευαστεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή SLM	41
Εικόνα 3.2	Επεξήγηση του διαχωρισμού των τμημάτων σχεδιασμού, που εφαρμόζεται με την τοπολογική βελτιστοποίηση και τις πλεγματικές δομές ..	41
Εικόνα 3.3	Το διάγραμμα ροής που ακολουθείται για την επίτευξή του υβριδικού σχεδιασμού	42
Εικόνα 3.4	Αριστερά στο σχέδιο α παρατηρούμε το υβριδικό τελικό μοντέλο με ομοιογενείς πλεγματικές δομές ενώ στο σχέδιο b με ανομοιογενείς πλεγματικές δομές. Τέλος στο σχέδιο c εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων κατά την τοπολογική βελτιστοποίηση..	43
Εικόνα 3.5	Στιγμιότυπα από την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	44
Εικόνα 3.6	Στιγμιότυπα από την διαδικασία του υβριδικού σχεδιασμού και διάγραμμα μετατόπισης	45
Εικόνα 3.7	Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων της δοκού με τις τρεις διαφορετικές τεχνικές σχεδιασμού ελάφρυνσης.....	46
Εικόνα 4.1	Επεξήγηση των εργαλείων σχεδίασης του προγράμματος Fusion 360.....	47
Εικόνα 4.2	Στιγμιότυπο από την πορεία σχεδιασμού του βραχίονα.....	48
Εικόνα 4.3	Διαδικασία εξώθησης με την εντολή Extrude	49
Εικόνα 4.4	Το εξάρτημα μετά τη διαδικασία εξώθησης.....	49
Εικόνα 4.5	Διαδικασία από την μετατροπή των γωνιών του εξαρτήματος σε καμπύλες με την εντολή “Fillet”, στην προκύπτουσα περίπτωση έχει αισθητικό χαρακτήρα.....	50
Εικόνα 4.6	Μεταφορά του εξαρτήματος στο περιβάλλον προσομοίωσης του Fusion 360.....	50
Εικόνα 4.7	Επιλογή της διαδικασίας προσομοίωσης, στην περίπτωσή μας επιλέχθηκε η στατική πίεση	51
Εικόνα 4.8	Επιλογή υλικού του εξαρτήματος από την επιλογή Study Materials, το υλικό θα είναι αλουμίνιο AlSi10mg.....	51
Εικόνα 4.9	Εντολή για τον καθορισμό των βάσεων στήριξης	52
Εικόνα 4.10	Επιλογή των βάσεων στήριξης και καθορισμός του τύπου “fixed”	52
Εικόνα 4.11	Από την κατηγορία “Loads” και την επιλογή “Structural Loads” επιλέγουμε το φορτίο του βραχίονα	53

Εικόνα 4.12	Στιγμιότυπο από τη διαδικασία και τον καθαρισμό του φορτίου	53
Εικόνα 4.13	Έλεγχος πριν την έναρξη διαδικασίας της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.....	54
Εικόνα 4.14	Στιγμιότυπο διαδικασίας του υπολογισμού των αποτελεσμάτων	54
Εικόνα 4.15	Αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, Safety Factor ..	55
Εικόνα 4.16	Αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, για την μετατόπιση του βραχίονα	55
Εικόνα 4.17	Στιγμιότυπο από τη διαδικασία και τον καθαρισμό της δύναμης παράλληλα στον άξονα Χ.....	56
Εικόνα 4.18	Αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, Safety Factor, για την δύναμη που ασκείται παράλληλα με τον άξονα Χ	56
Εικόνα 4.19	Αποτελέσματα από την μετατόπιση του βραχίονα για το φορτίο παράλληλα στον άξονα Χ.....	57
Εικόνα 4.20	Μετάβαση στο περιβάλλον προσομοίωσης για την βελτιστοποίηση	58
Εικόνα 4.21	Καθορισμός έδρασης και φορτίων στον βραχίονα	58
Εικόνα 4.22	Καθορισμός τμημάτων που δεν θα συμμετέχουν στην βελτιστοποίηση	59
Εικόνα 4.23	Καθορισμός συμμετρικής βελτιστοποίησης ως προς τον άξονα Χ.....	59
Εικόνα 4.24	Αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης του βραχίονα.....	60
Εικόνα 4.25	Στιγμιότυπο από το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης από την πίσω όψη ...	61
Εικόνα 4.26	Στιγμιότυπο από το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, από διαφορετική οπτική γωνία.....	61
Εικόνα 4.27	Εξαγωγή του βελτιστοποιημένου αποτελέσματος με την εντολή “Promote” ..	62
Εικόνα 4.28	Στιγμιότυπο από το βελτιστοποιημένο σχέδιο στο περιβάλλον “Design”.....	62
Εικόνα 4.29	Στιγμιότυπο από την διαδικασία της μετατροπής του αρχείου τύπου “Mesh”	63
Εικόνα 4.30	Στιγμιότυπο από την διαδικασία επαναφοράς της λείας επιφάνειας του βελτιστοποιημένου εξαρτήματος.....	63
Εικόνα 4.31	Στιγμιότυπο από την επιλογή παραμέτρου, της εντολής “Smooth”	64
Εικόνα 4.32	Μετατροπή του σχεδίου τύπου mesh σε τύπου “Solid” με την εντολή “Convert mesh”	64
Εικόνα 4.33	Το βελτιστοποιημένο εξάρτημα μετά την μετατροπή του σε αρχείο “Solid” Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	

Δεν βρέθηκαν καταχωρήσεις πίνακα εικόνων.Εικόνα 4.35Το βελτιστοποιημένο εξάρτημα μετά τον επανα

Εικόνα 4.36	Στιγμιότυπο από την διαδικασία της προετοιμασίας για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο βελτιστοποιημένο βραχίονα	66
Εικόνα 4.37	Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τον συντελεστή ασφαλείας.....	67
Εικόνα 4.38	Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τον συντελεστή ασφαλείας από διαφορετική γωνία.....	67
Εικόνα 4.39	Το σημείο όπου παρατηρείτε η τιμή 2,018 του συντελεστή ασφαλείας	68
Εικόνα 4.40	Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την μετατόπιση του βελτιστοποιημένου βραχίονα	68

Εικόνα 4.41	Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για δύναμη παράλληλα με τον άξονα Χ.....	69
Εικόνα 4.42	Το σημείο που παρατηρείται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας 2,319	69
Εικόνα 4.43	Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την μετατόπιση του βραχίονα, για δύναμη παράλληλα με τον άξονα Χ.....	70
Εικόνα 4.44	Δομικές πληροφορίες του βελτιστοποιημένου βραχίονα	70
Εικόνα 4.45	Δημιουργία νέου τμήματος του βραχίονα, το οποίο θα αντικατασταθεί με πλεγματικές δομές.....	71
Εικόνα 4.46	Ο βραχίονας μαζί με το νέο τμήμα στο περιβάλλον του netfabb	72
Εικόνα 4.47	Το νέο τμήμα εισάγεται κάτω από την κατηγορία "Lattices"	73
Εικόνα 4.48	Στιγμιότυπο από την έναρξη της διαδικασίας σχεδιασμού των πλεγματικών δομών.	73
Εικόνα 4.49	Ολοκλήρωση της σχεδίασης των πλεγματικών δομών στο τμήμα του σχεδίου	74
Εικόνα 4.50	Στιγμιότυπο από τις τελικές διορθώσεις των πλεγματικών δομών	74
Εικόνα 4.51	Ο βραχίονας μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού.....	75
Εικόνα 4.52	Η πρόσοψη του βραχίονα μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού	75
Εικόνα 4.53	Η πίσω όψη του βραχίονα μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού	76
Εικόνα 4.54	Ο βραχίονας μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού στο Fusion 360	76
Εικόνα 4.55	Ο βραχίονας μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού με τις πληροφορίες των δομικών χαρακτηριστικών	77
Εικόνα 4.56	Στιγμιότυπο από τη διαδικασία κατασκευής μεταλλικού εξαρτήματος στον εκτυπωτή SLM 280 HL	77
Εικόνα 4.57	Διαδικασία επιλογής τρισδιάστατου εκτυπωτή και εισαγωγής του εξαρτήματος προς κατασκευή	78
Εικόνα 4.58	Στιγμιότυπο από την διαδικασία προσομοίωσης της κατασκευής	79
Εικόνα 5.1	Το αποτέλεσμα των σχεδίων με AlSi10mg & SS316 αντίστοιχα	80
Εικόνα 5.2	Ο εκτυπωτής Zrapid iDEN160	81
Εικόνα 5.3	Παράμετροι του τρισδιάστατου εκτυπωτή Zrapid iDEN160	81
Εικόνα 5.4	Το αποτέλεσμα της κατασκευής πριν την αφαίρεση των supports.....	82
Εικόνα 5.5	Το αποτέλεσμα της προσθετικής κατασκευής από ανοξείδωτο χάλυβα 316 .	83
Εικόνα 5.6	Ο βραχίονας στην πίσω όψη του.....	83
Εικόνα 5.7	Στιγμιότυπο του βραχίονα από διαφορετική γωνία	84
Εικόνα 5.8	Λεπτομέρεια από το αποτέλεσμα της κατασκευής του βραχίονα	84
Εικόνα 5.9	Στιγμιότυπο από την διαδικασία της πειραματικής δοκιμής.....	85
Εικόνα 5.10	Στιγμιότυπο από την τοποθέτηση του ωρολογιακού μικρομέτρου.....	86
Εικόνα 5.11	Στιγμιότυπο κατά την άσκηση δύναμης κάθετα στον άξονα σχεδίασης Χ	87
Εικόνα 5.12	Στιγμιότυπο λίγο πριν την άσκηση δύναμης παράλληλα στον άξονα σχεδίασης Χ	88

Κατάλογος Συντμήσεων

SIMP:	Solid Isotropic Material with Penalization
ESO:	Evolutionary Structural Optimization
LSM:	Level Set Method
FSD:	Fully Stressed Design
BESO:	Bidirectional ESO
CAO:	Computer Aided Optimization
SERA:	Sequential Element Rejection and Admission
SKO:	Soft Kill Option
ITD:	Isolines Topology Design
CAD:	Computer Aided Design
CAE:	Computer Aided Engineering
FEA:	Finite Element Analysis
LSM:	Level Set method
CNC:	Computer Numerical Control
3D:	3 Dimensions
SLM:	Selective Laser Melting
TPMS:	Triply periodic minimal surface
CAM:	Computer Aided Manufacturing
STL:	Stereolithography
3MF:	3D Manufacturing Format

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάδειξη μιας νέας και καινοτόμου τεχνικής σχεδίασης μηχανολογικών εξαρτημάτων με σκοπό την ελάφρυνσή τους, χωρίς υποβάθμιση της μηχανικής τους αντοχής και επίδοσης στην εκάστοτε εφαρμογή. Η νέα αυτή τεχνική αποτελείται από τον συνδυασμό δύο προγενέστερων τεχνικών σχεδίασης, τις μεθόδους της τοπολογικής βελτιστοποίησης και των πλεγματικών δομών. Οι τεχνικές αυτές είναι πλέον αρκετά γνωστές, αλλά δεν είναι πάντα οι ιδανικότερες για εφαρμογή, κάτω από ιδιαίτερες συνθήκες.

Μέσα από την διπλωματική εργασία γίνεται μια παρουσίαση και επεξήγηση του υβριδικού αυτού σχεδιασμού, για το πως μπορεί και συνδυάζει τα εκάστοτε πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου, ενώ παράλληλα περιορίζει τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από αυτές. Αναδεικνύονται περιπτώσεις εφαρμογών που ο συγκεκριμένος υβριδικός σχεδιασμός υπερτερεί έναντι των μεμονωμένων μεθόδων σχεδιασμού που τον συγκροτούν.

Τέλος η συγκεκριμένη εργασία στοχεύει ο εκάστοτε αναγνώστης να μπορεί να καταλάβει με σαφήνεια και να εφαρμόζει με επιτυχία τα βήματα που οδηγούν στην επίτευξη του υβριδικού σχεδιασμού, χωρίς να έχει απαραίτητα εξειδικευμένες γνώσεις και εκτεταμένο θεωρητικό υπόβαθρο στις μεθόδους ελάφρυνσης.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας.

Η διπλωματική εργασία είναι δομημένη έτσι ώστε να είναι κατά το δυνατόν φιλική και εύκολα κατανοητή από τον αναγνώστη της. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή επί της πρώτης και δημοφιλέστερης τεχνικής ελάφρυνσης μηχανολογικών εξαρτημάτων, της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Στην συνέχεια παρουσιάζεται και η μέθοδος σχεδίασης των πλεγματικών δομών, που συναντάμε όλο και περισσότερο με διάφορες παραλλαγές. Αργότερα γίνεται μια παρουσίαση του συνδυαστικού των δύο παραπάνω υβριδικού σχεδιασμού και των πλεονεκτημάτων του.

Σε όλα τα παραπάνω κεφάλαια υπάρχουν απεικονίσεις από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, σε κάθε μέθοδο σχεδίασης ξεχωριστά και σχολιασμός των αποτελεσμάτων σε κάθε εικόνα.

Τέλος υλοποιείται συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής, με υβριδική σχεδίαση ενός εξαρτήματος προς ελάφρυνσή. Πρόκειται για ένα οδηγό «βήμα προς βήμα» με πλούσιο φωτογραφικό περιεχόμενο και χρήση ευρέως διαδεδομένων στον τεχνικό κόσμο λογισμικών του οίκου Autodesk, που χρησιμοποιήθηκαν στη ν εργασία με δωρεάν εκπαιδευτικές άδειες

2 Τοπολογική βελτιστοποίηση

2.1 Τι είναι η τοπολογική βελτιστοποίηση

Η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι μια μαθηματική μέθοδος που αποσκοπεί στη δημιουργία της βέλτιστης δομής σε μια κατασκευή. Πρόκειται για μια αλγοριθμική διαδικασία που αναδεικνύει έναν αποτελεσματικότερο σχεδιασμό, βασισμένη σε ένα σύνολο περιορισμών και τη βέλτιστη κατανομή του υλικού. Αφορά στον αριθμό των συνδεδεμένων στοιχείων και των ορίων που έχουν τεθεί σε μια κατασκευή.

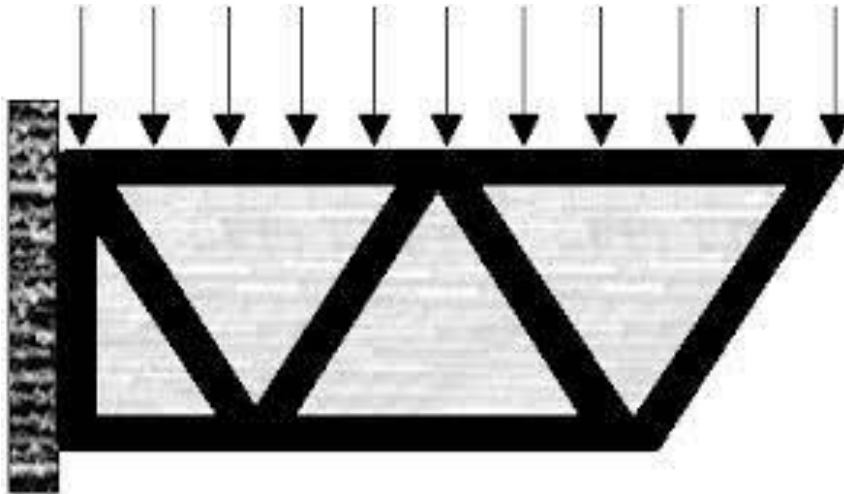
Οι τεχνικές και οι μέθοδοι της τοπολογικής βελτιστοποίησης οδηγούν στον επανασχεδιασμό της αρχικής κατασκευής, αφαιρώντας της υλικό, έχοντας γνωστά τα εξής: τις διαστάσεις, τα ασκούμενα φορτία και τις συνθήκες στήριξης της κατασκευής.

2.2 Μέθοδοι SIMP-ESO

Υπάρχουν πολλές τεχνικές για να πετύχουμε τον σχεδιασμό μια κατασκευής με τοπολογική βελτιστοποίηση. Η πιο δημοφιλής μέθοδος είναι η S.I.M.P. (Solid Isotropic Material with Penalization).

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποσκοπεί στη βέλτιστη κατανομή υλικού σε δεδομένο χώρο για δεδομένο φορτίο, με συγκεκριμένες οριακές συνθήκες στην αντοχή και στις απαιτήσεις ασφαλείας. Το αποτέλεσμα της χρήσης της μεθόδου είναι η βέλτιστη δομική τοπολογία, η οποία επιτυγχάνεται με την αναδιανομή του υλικού. Η λογική της συγκεκριμένης μεθόδου προσδιορίζει, για κάθε σημείο του χώρου, την παρουσία ή μη υλικού σε αυτό.

Κάθε τμήμα της κατασκευής διακρίνεται από ένα πεπερασμένο πλέγμα στοιχείων, που ονομάζονται ισότροπες στερεές μικροδομές. Κάθε στοιχείο είναι είτε γεμάτο με υλικό για τις περιοχές που απαιτείται είτε το υλικό αφαιρείται και παραμένει κενό. Η κατανομή πυκνότητας του υλικού στην περιοχή υπολογισμού είναι διακριτή. Επομένως, σε κάθε στοιχείο εκχωρείται μια δυαδική τιμή ίση με 1, όπου το υλικό είναι απαραίτητο και ίση με 0, όπου η ύπαρξη υλικού δεν είναι απαραίτητη και ως εκ τούτου αφαιρείται. Στο προσεχές σχήμα απεικονίζεται μια φορτωμένη δοκός, όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος SIMP για την τοπολογική βελτιστοποίηση της κατασκευής.



Εικόνα 1.1: Παράδειγμα τοπολογικής βελτιστοποίησης φορτισμένης δοκού. [1]

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούνται με μαύρο χρώμα τα στοιχεία όπου εκχωρήθηκε τιμή ίση με 1.1 και το υλικό παρέμεινε ακέραιο. Αντιθέτως, με γκρι χρώμα παρατηρούνται τα στοιχεία όπου εκχωρήθηκε τιμή ίση με 0 άρα το υλικό αφαιρέθηκε.

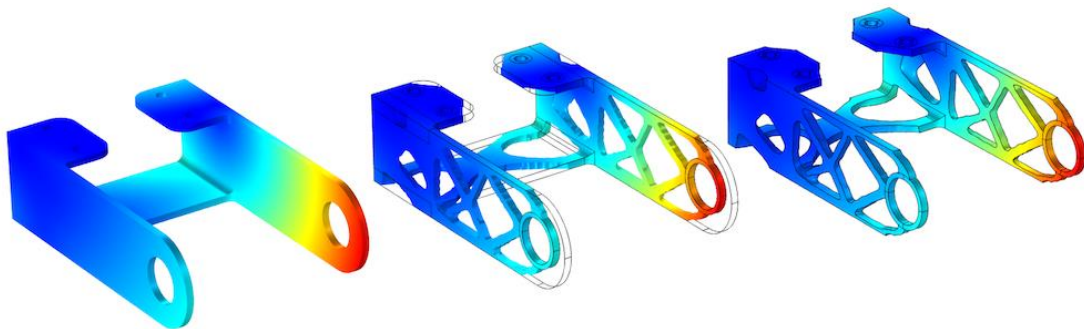
Η μέθοδος ESO (Evolutionary Structural Optimization) αναπτύχθηκε από τους Υ. Xie και τον Grand Steven το 1993. Πρόκειται για μια απλή τεχνική βελτιστοποίησης που βασίζεται στην προοδευτική αφαίρεση του υλικού από μια κατασκευή με τη μικρότερη ενεργειακή συμμετοχή. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία που αφαιρεί ή προσθέτει μια πεπερασμένη ποσότητα υλικού χρησιμοποιώντας το κριτήριο RC, το οποίο καθορίζει το υλικό με τη μικρότερη ενεργειακή συμμετοχή, που στη συνέχεια αφαιρείται. Το συγκεκριμένο κριτήριο δεν βασίζεται απαραίτητα σε αυστηρά υπολογισμένες συνθήκες ευαισθησίας, επιτρέποντας έτσι στην ESO να πλεονεκτεί στην εφαρμογή της, ιδίως όταν η τοπολογική βελτιστοποίηση περιλαμβάνει πολύπλοκες φυσικές διεργασίες.

Άλλες μέθοδοι τοπολογικής βελτιστοποίησης:

- LSM, Level Set Method
- FSD, Fully Stressed Design
- BESO, Bidirectional ESO
- CAO, Computer Aided Optimization
- SERA, Sequential Element Rejection and Admission
- SKO, Soft Kill Option
- ITD, Isolines Topology Design

2.3 Χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε μηχανολογικό εξοπλισμό.

Τα τελευταία χρόνια η τοπολογική βελτιστοποίηση παρουσιάζει μια ραγδαία εξέλιξη στον χώρο της κατασκευής μηχανολογικών εξαρτημάτων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τα νέα σύγχρονα προγράμματα σχεδιασμού και υπολογισμού, δίνεται η δυνατότητα στους μηχανικούς-σχεδιαστές, να σχεδιάζουν και να μελετούν όλο και πιο περίπλοκες κατασκευές. Οι τεχνολογικοί τομείς που περιλαμβάνουν κατασκευές μηχανολογικών εξαρτημάτων απαιτούν πλέον τον σχεδιασμό τους με το μικρότερο δυνατό βάρος, τηρουμένων όλων των κριτηρίων των συνθηκών λειτουργίας. Επιπρόσθετοι στόχοι που επιτυγχάνονται με την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι η μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής και η εξοικονόμηση πρώτης ύλης.



Εικόνα 1.2: Παράδειγμα σχεδίασης βραχίονα με τοπολογική βελτιστοποίηση. [2]

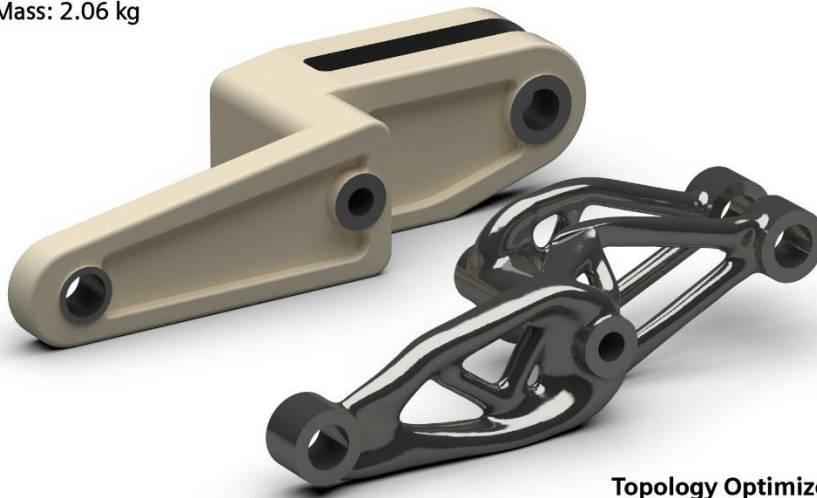
Στον παραπάνω βραχίονα (Εικόνα 1.2), μετά τον επανασχεδιασμό του με εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης, έχει αφαιρεθεί το 50% του υλικού του, ικανοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις αντοχής στις φορτίσεις που δέχεται το εξάρτημα.

Η ελάφρυνση των μηχανολογικών εξαρτημάτων είναι καθοριστικός παράγοντας σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία κ.α. Στους τομείς αυτούς η αύξηση του κόστους μελέτης, σχεδιασμού και της κατασκευής για ένα εξάρτημα δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας. Όμως, το μειωμένο βάρος που θα επιτευχθεί στο σύνολο ενός συστήματος (π.χ. διαστημόπλοιο, αεροπλάνο, αυτοκίνητο υψηλών επιδόσεων) θα επιφέρει πολλά οφέλη στην οικονομία (π.χ. καύσιμα) αλλά και στη βελτιωμένη επίδοση του συστήματος (π.χ. αυτοκίνητο υψηλών επιδόσεων). Για τον λόγο αυτό οι παραπάνω τομείς είναι οι πρώτοι που εφάρμοσαν την τοπολογική βελτιστοποίηση με στόχο την ελάφρυνση των τελικών κατασκευών τους.

Original Part

Volume: 263,346 cubic mm

Mass: 2.06 kg



Topology Optimized Part

Volume: 97,884 cubic mm

Mass: 0.766 kg

Εικόνα 1.3: Κατασκευή συνδέσμου για αεροδιαστημική εφαρμογή με χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης. [3]

Παραπάνω (Εικόνα 1.3) απεικονίζεται ένας σύνδεσμος που προορίζεται για αεροδιαστημική εφαρμογή. Παρατηρούμε το αντικείμενο στην αρχική του μορφή, καθώς και το νέο αντικείμενο που έχει προκύψει μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση. Παρατηρώντας τα χαρακτηριστικά δίπλα σε κάθε αντικείμενο διαπιστώνεται ότι η μείωση βάρους, μετά από την τοπολογική βελτιστοποίηση, αγγίζει το 63%.

2.4 Πλεονεκτήματα εφαρμογής τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος της τοπολογικής βελτιστοποίησης προσφέρει αδιαμφισβήτητα πολλά οφέλη στους κλάδους των κατασκευών. Η εφαρμογή της σε περισσότερα έτερα τεχνολογικά περιβάλλοντα αποδεικνύεται εξίσου ωφέλιμη. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των πλεονεκτημάτων:

- Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι η ικανότητα της να αφαιρεί οποιοδήποτε περιττό βάρος από μια κατασκευή. Το πλεονάζον βάρος σε ένα μηχανολογικό εξάρτημα επηρεάζει αρνητικά την ενεργειακή του απόδοση στη μεταφορά του. Η μείωση του βάρους του συνδέεται άρρηκτα με την εξοικονόμηση κόστους.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι η General Electric χρησιμοποίησε τοπολογική βελτιστοποίηση για τον σχεδιασμό ενός βραχίονα κινητήρα αεροσκάφους και πέτυχε μείωση του βάρους του κατά 84%. Αυτή η τροποποίηση σε ένα μικρό

μέρος του κινητήρα, εξοικονόμησε στις αεροπορικές εταιρείες σχεδόν 31 εκατομμύρια δολάρια [4], βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση.

- Η ταχύτερη διαδικασία σχεδιασμού. Η τοπολογική βελτιστοποίηση μπορεί να μειώσει δραστικά τον απαιτούμενο χρόνο για την ανάπτυξη των προϊόντων, με λογικό επακόλουθο το μειωμένο κόστος. Η αυτοματοποιημένη διαδικασία σχεδιασμού της τοπολογικής βελτιστοποίησης παράγει εξαρτήματα με καλύτερη απόδοση σε συντομότερο χρόνο από όσον θα χρειαζόταν με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού. Μια ταχύτερη διαδικασία σχεδιασμού ερμηνεύεται επίσης ως ταχύτερη διάθεση του τελικού προϊόντος σε κυκλοφορία, σε μία ανταγωνιστική αγορά που βρίθεται από καινοτόμα προϊόντα.
- Εξοικονόμηση πρώτων υλών. Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτρέπει τη σπατάλη υλικών αλλά και αποβλήτων. Όλο και περισσότεροι τομείς στη βιομηχανία καταφεύγουν στη λύση της τοπολογικής βελτιστοποίησης λόγω της φιλικής προς το περιβάλλον φύσης της.

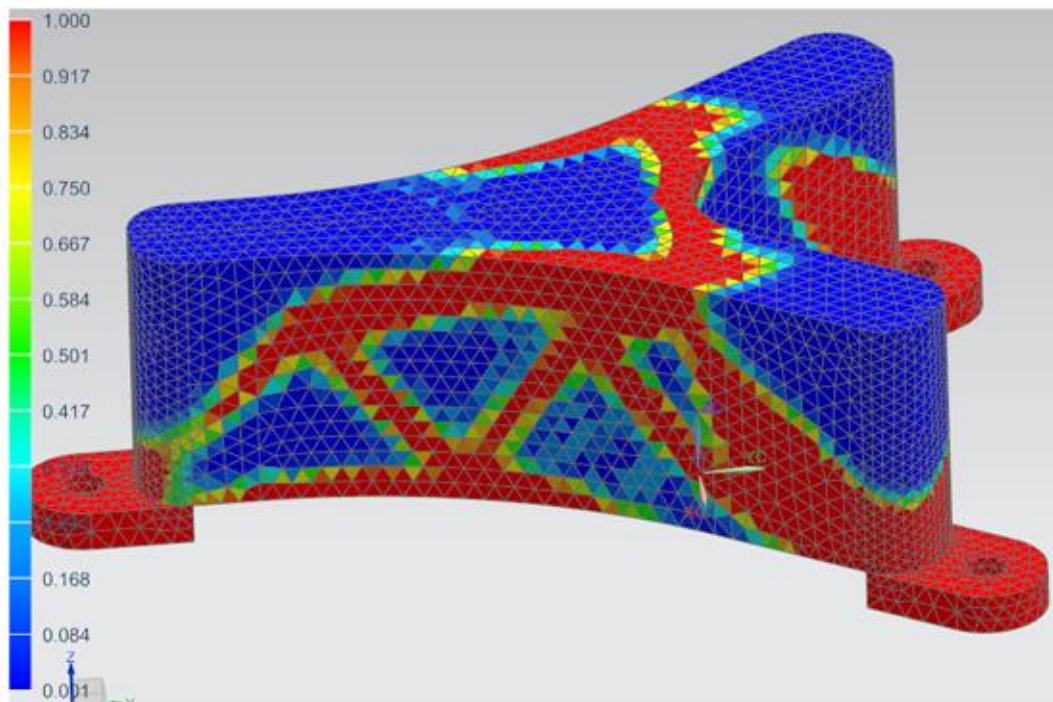
2.5 Τοπολογική βελτιστοποίηση και προγράμματα CAD

Το σχέδιο για το οποίο θέλουμε να πραγματοποιηθεί η επαναληπτική διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης δημιουργείται με βάση εμπορικά προσαρμοσμένα εργαλεία σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design) και υπολογιστικής μελέτης CAE (Computer Aided Engineering). Μέσω της τοπολογικής βελτιστοποίησης, όπως είδαμε νωρίτερα, τροποποιείται σε ένα εξάρτημα το σχήμα του, το μέγεθος καθώς και η τοπολογία της αρχικής μορφής του. Ταυτόχρονα όμως, πρέπει να ικανοποιούνται και τα όρια στις μηχανικές καταπονήσεις του εξαρτήματος που έχουν τεθεί από τον μηχανικό-σχεδιαστή.

Τα εμπορικά προγράμματα CAD που υποστηρίζουν εφαρμογές τοπολογικής βελτιστοποίησης διαθέτουν και τη δυνατότητα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA - Finite Element Analysis). Στην ανάλυση αυτή βασίζεται η επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού του μηχανολογικού εξαρτήματος. Από την ίδια ανάλυση όμως εξάγουμε και τα αποτελέσματα για την ικανοποίηση των ορίων που έχουν τεθεί, ως προς τις μηχανικές καταπονήσεις που δέχεται το μηχανολογικό εξάρτημα.

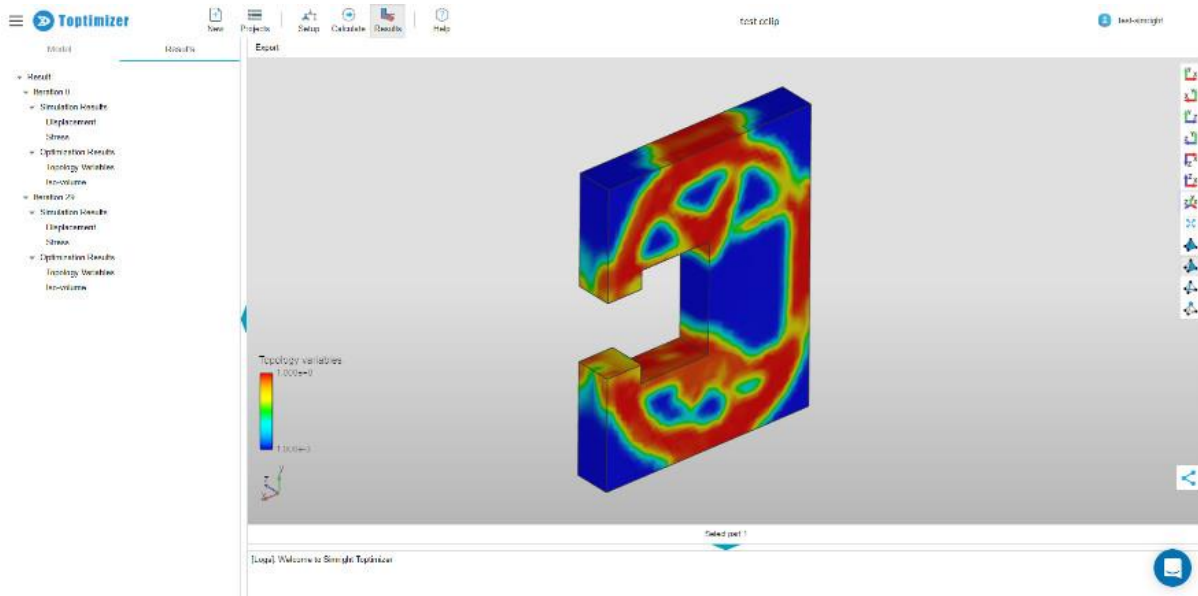
Ακολουθεί πίνακας με λίστα προγραμμάτων που υποστηρίζουν τον σχεδιασμό με χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης:

<u>Πρόγραμμα σχεδιασμού</u>	<u>Μέθοδος Τ.Ο.</u>
Nastran	ESO
nTopology	<u>SIMP</u>
Altair Inspire & Altair OptiStruct	<u>SIMP</u>
Ansys Mechanical	<u>LSM</u>
Solidworks	<u>LSM</u>
Creo	<u>LSM</u>
Tosca Structure	<u>SIMP</u>
Comsol	SIMP



Εικόνα 1.4: Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό με χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης, με το πρόγραμμα NX της Siemens. [5]

Στην εικόνα 1.4 παρατηρούμε με κόκκινο χρώμα το υλικό με την μεγαλύτερη ενεργειακή συμμετοχή.

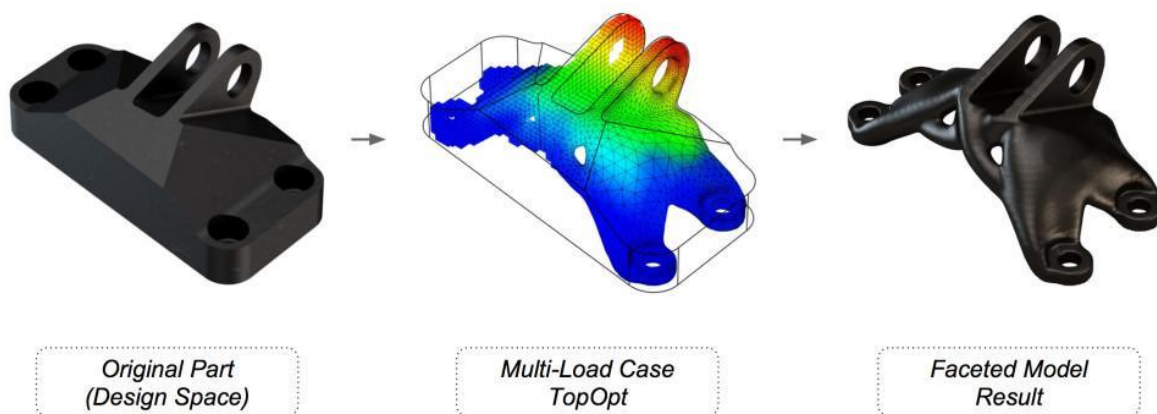


Εικόνα 1.5: Στιγμιότυπο από τον σχεδιασμό, με χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης, με το πρόγραμμα toptimizer. [6]

Στην εικόνα 1.5 παρατηρούμε με κόκκινο χρώμα το υλικό που θα παραμείνει μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση, σε σχέση με τον αρχικό του όγκο.

2.6 Τεχνική σχεδιασμού τοπολογικής βελτιστοποίησης με χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA)

Η τοπολογική βελτιστοποίηση εκτελείται στο τελικό στάδιο του σχεδιασμού, όταν στο προβλεπόμενο προϊόν-εξάρτημα πρέπει να επιτευχθεί η ελάφρυνσή του. Ως εκ τούτου, το βασικό μοντέλο σχεδίασης είναι ήδη διαθέσιμο για την επαναληπτική διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.



Εικόνα 1.6: Τυπικά βήματα διαδικασίας σχεδιασμού τοπολογικής βελτιστοποίησης. [7]

Όπως έχει προαναφερθεί, για να αποφασίσουμε το υλικό που θα πρέπει να αφαιρεθεί, χρησιμοποιούμε την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Από την ανάλυση αυτή

συμπεραίνουμε την ποσότητα του υλικού που θα πρέπει να αφαιρεθεί από το αντικείμενο επεξεργασίας καθώς και επαληθεύουμε ότι το τελικό προϊόν πληροί τα όρια που έχουν τεθεί από τον μηχανικό-σχεδιαστή.

Η επαναληπτική διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης περιγράφεται με το ακόλουθο διάγραμμα ροής (Εικόνα 7) :

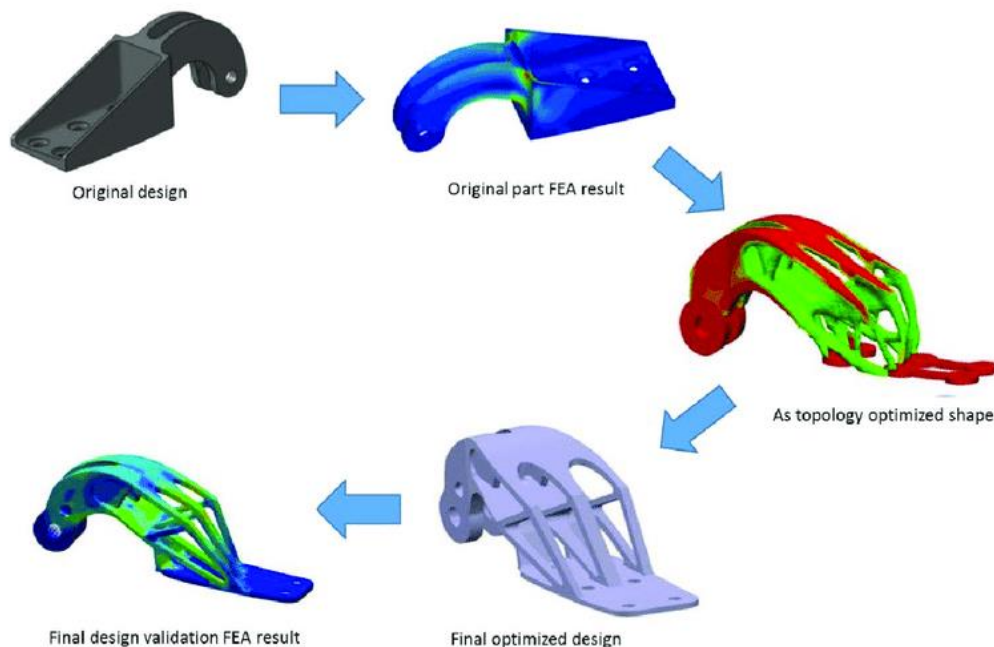


Εικόνα 1.7: Διάγραμμα ροής για την λειτουργία της επαναληπτικής διαδικασίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης. [8]

Παρατίθενται τα βήματα για την επίτευξη της τοπολογικής βελτιστοποίησης:

1. Αρχικά, ο σχεδιαστής εισάγει στο αντίστοιχο πρόγραμμα το βασικό μοντέλο σχεδίασης για το οποίο θέλουμε να επιτευχθεί η ελάφρυνσή του.
2. Στη συνέχεια, ο χρήστης ορίζει τα εξωτερικά φορτία, τις οριακές συνθήκες, τους περιορισμούς και τις ιδιότητες υλικού. Ο χρήστης θέτει τις περιοχές όπου δεν θα συμμετάσχουν στην αφαίρεση του υλικού, π.χ. ο χώρος γύρω από την έδραση μιας βίδας ή ενός ρουλεμάν.
3. Στην επόμενη φάση, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνει υπόψη την ελάχιστη γεωμετρική σχεδίαση και αναλύει τον χώρο σχεδιασμού σε μικρότερες περιοχές, όπως τα σημεία φόρτωσης και τα σημεία έδρασης.

4. Η τοπολογική βελτιστοποίηση δημιουργεί ένα βασικό πλέγμα του μικρότερου σχεδιαστικού χώρου βασιζόμενη στα πεπερασμένα στοιχεία.
5. Μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αξιολογείται η κατανομή της τάσης και η ενέργεια καταπόνησης του πλέγματος για να βρεθεί το βέλτιστο φορτίο ή τάση που μπορεί να αντέξει κάθε στοιχείο.
6. Το πρόγραμμα, στη συνέχεια, ασκεί ψηφιακά πίεση στο σχέδιο από διάφορες γωνίες, αξιολογεί τη δομική του ακεραιότητα και βρίσκει περιττό υλικό που μπορεί να αφαιρεθεί.
7. Το λογισμικό ελέγχει κάθε πεπερασμένο στοιχείο για ακαμψία, τάση, μετατόπιση έναντι της προκαθορισμένης απαίτησης, για να προχωρήσουμε στην τελική αφαίρεση του περιττού υλικού.
8. Τέλος, με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας γίνεται ο τελικός σχεδιασμός με τα τμήματα του υλικού που παραμένουν από το αρχικό σχέδιο του αντικειμένου.



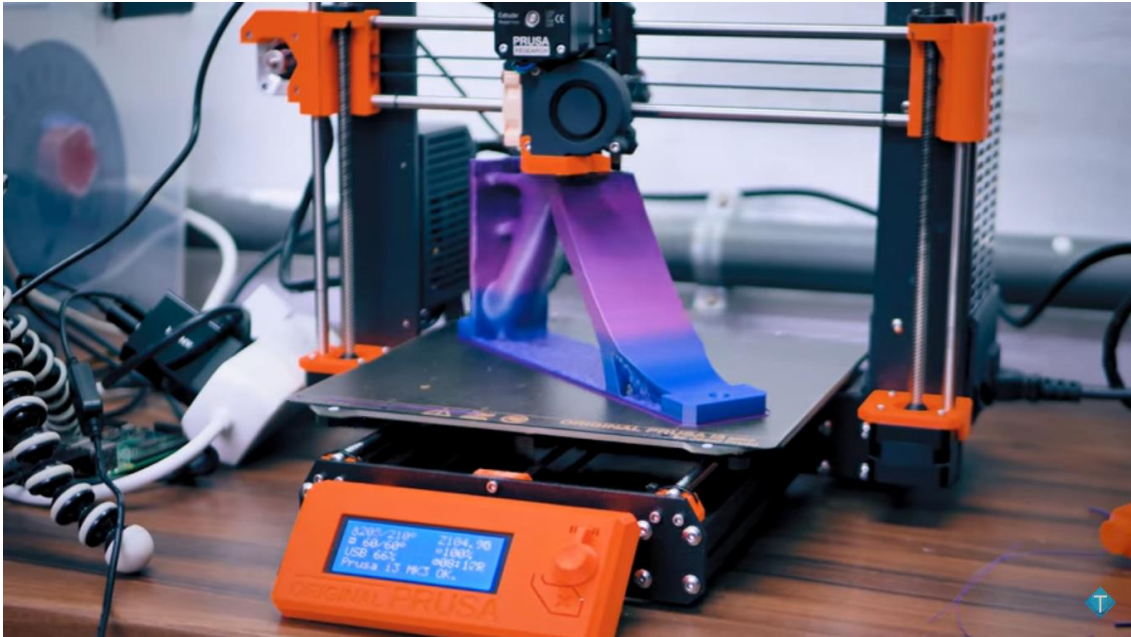
Εικόνα 1.8: Διαδικασίας σχεδιασμού τοπολογικής βελτιστοποίησης με χρήση FEA. [9]

2.7 Χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής για την υλοποίηση κατασκευών που έχουν υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση.

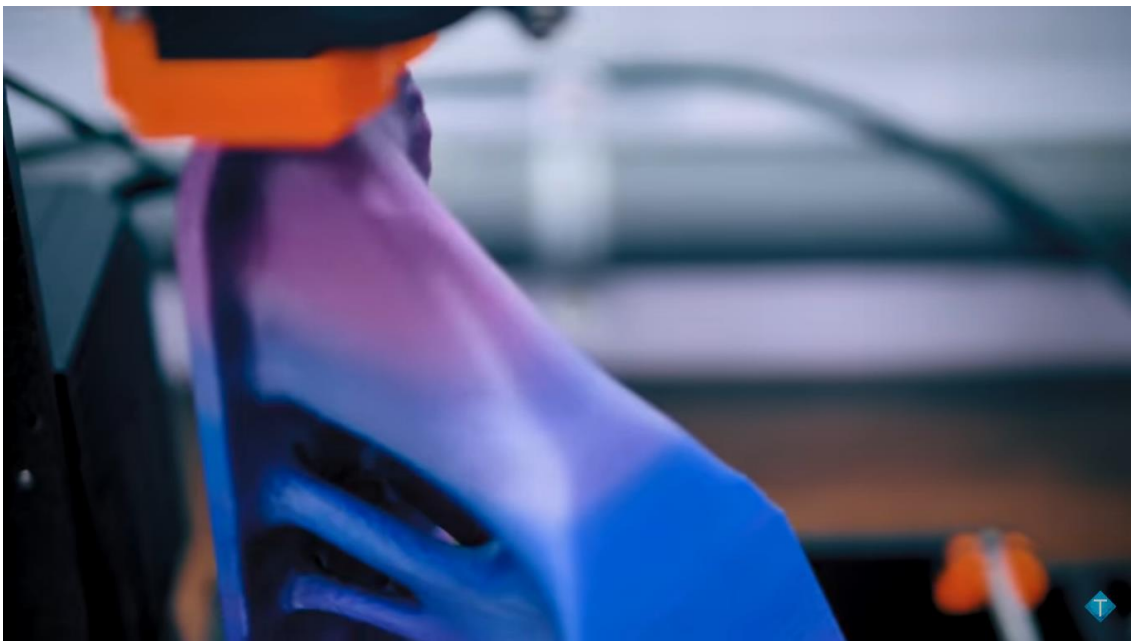
Η τοπολογική βελτιστοποίηση καταλήγει σε αρκετά περίπλοκα αποτελέσματα τελικού σχεδιασμού μηχανολογικών εξαρτημάτων. Όσον αφορά στα επίπεδα μηχανολογικά εξαρτήματα (2 & 2,5 διαστάσεων) οι κλασικές κατασκευαστικές μέθοδοι αφαίρεσης υλικού με εργαλειομηχανές CNC, όπως ο τόρνος, η φρέζα και η κοπή με λέιζερ, έχουν τη δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων που έχουν υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση με αρκετά καλά αποτελέσματα.

Σε διαφορετική περίπτωση, στα αμιγώς τρισδιάστατης γεωμετρίας εξαρτήματα, η δυσκολία

προσέγγισης ενός κοπτικού εργαλείου για την αφαίρεση υλικού σε ένα μη επίπεδο μηχανολογικό εξάρτημα που έχει υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση, καθιστά τη χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής αναγκαία.



Εικόνα 1.9: Διαδικασία κατασκευής εξαρτήματος που έχει υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή. [10]



Εικόνα 1.10: Στιγμιότυπο από την διαδικασία κατασκευής μηχανολογικού εξαρτήματος σε τρισδιάστατο εκτυπωτή . [10]

Στην εικόνα 1.10, παρατηρούμε ότι τις δομές που έχει το συγκεκριμένο αντικείμενο, είναι εξαιρετικά δύσκολο να τις προσεγγίσει ένα κοπτικό εργαλείο κάποιας CNC εργαλειομηχανής (π.χ. Φρέζα) για να κατασκευαστεί με την κλασικές μεθόδους αφαίρεσης υλικού. Αντιθέτως,

είναι εύκολο να κατασκευαστούν με τεχνολογίες πρόσθετης κατασκευής, όπως ο παραπάνω τρισδιάστατος εκτυπωτής 2,5 αξόνων.



**Εικόνα 1.11: Μεταλλική βάση στήριξης κατασκευασμένη σε τρισδιάστατο εκτυπωτή SLM .
[11]**

Στην εικόνα 1.11 παρατηρούμε μια μεταλλική βάση στήριξης, η οποία έχει κατασκευαστεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή μετάλλου (SLM). Στο πίσω μέρος της εικόνας εμφανίζεται το αντικείμενο πριν υποστεί τοπολογική βελτιστοποίηση. Και σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή του συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί με χρήση συμβατικών εργαλειομηχανών CNC.

Κεφάλαιο 3: Πλεγματικές δομές.

3.1 Τι είναι οι πλεγματικές δομές και ποιος είναι ο σκοπός σχεδιασμού εξαρτημάτων με χρήση πλεγματικών δομών.

Ταυτόχρονα με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα των κατασκευών και ειδικότερα στις κατασκευές εξαρτημάτων, αναπτύσσονται όλο και περισσότερες τεχνικές για την ελάφρυνσή τους. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μέθοδος της τοπολογικής βελτιστοποίησης και των χαρακτηριστικών αυτής. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται μια άλλη τεχνική ελάφρυνσης εξαρτημάτων, αυτή των πλεγματικών δομών.

Στα συμπαγή τμήματα των κατασκευών και δη των μεταλλικών ο εκάστοτε μηχανικός-σχεδιαστής στοχεύει να επιτύχει το μικρότερο δυνατό πορώδες.



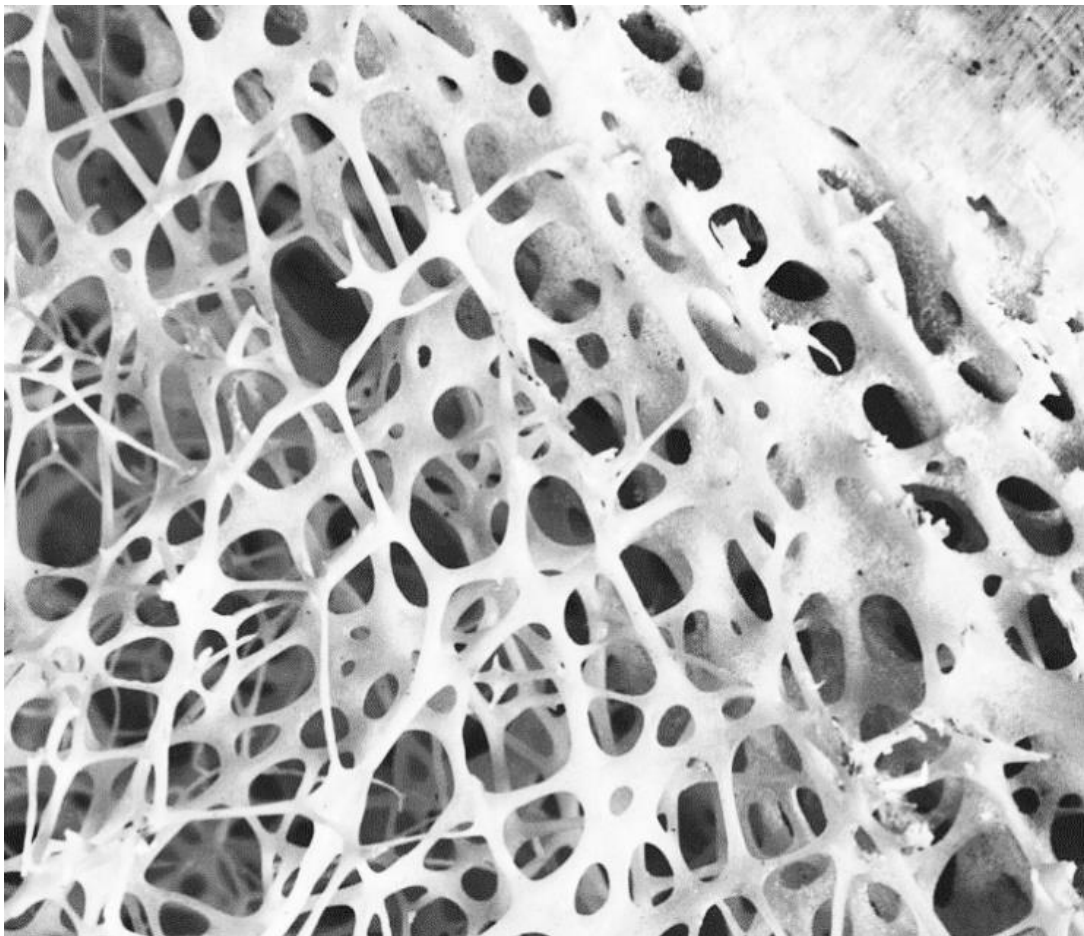
Εικόνα 2.1: Μεταλλικό εξάρτημα κατασκευασμένο σε φρέζα CNC. [12]

Στην εικόνα 2.1, παρατηρείται μια μεταλλική βάση, η οποία έχει κατασκευαστεί σε φρέζα CNC. Με τη συγκεκριμένη διαδικασία αφαίρεσης υλικού επιτυγχάνεται μηδενικό πορώδες στην κατασκευή μηχανολογικών εξαρτημάτων που αποσκοπεί στη βέλτιστη απόδοση των μηχανικών καταπονήσεων που δέχεται ένα εξάρτημα.

Στη φύση όμως, παρατηρούνται διάφορες φυσικές κατασκευές από διαφορετικά υλικά με έντονη πορώδη δομή. Οι συγκεκριμένες φυσικές δομές δείχνουν να ανταποκρίνονται εξαιρετικά καλά σε μεγάλα για τα δεδομένα τους φορτία.



Εικόνα 2.2: Κηρήθρες μελισσών . [13]



Εικόνα 2.3: Μικρογραφία από τμήμα οστού ανθρώπινης κνήμης . [14]

Παραπάνω απεικονίζονται δυο φυσικές κατασκευές. Στην εικόνα 2.3 παρατηρούμε τις εξάγωνες περιοδικές κυψελωτές δομές από τις οποίες σχηματίζονται οι κηρήθρες των μελισσών και στις οποίες τίθεται η πρώτη ύλη. Ομοίως, στην εικόνα 2.3 παρατηρούμε ότι το οστό της ανθρώπινης κνήμης έχει μια σπογγώδη δομή σε ένα τμήμα του. Οι πλεγματικές δομές στο οστό είναι στοχαστικές.

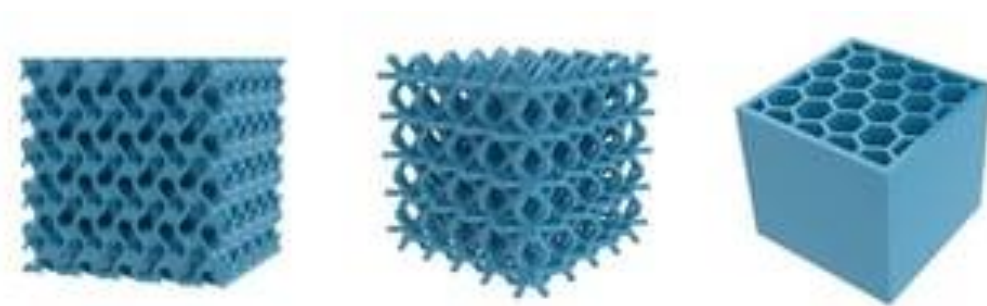
Συνεπώς, πλεγματικές δομές θεωρούνται και αποκαλούνται, δομές υλικού που αποτελούνται από μοναδιαία επαναλαμβανόμενα κελιά πλήρωσης χώρου, που μπορούν να κατασκευαστούν κατά μήκος οποιουδήποτε άξονα χωρίς κενά μεταξύ τους. Οι πλεγματικές δομές αποτελούν μια επιπλέον λύση για τους μηχανικούς-σχεδιαστές μηχανολογικών εξαρτημάτων που, εκτός από την ελάφρυνση των κατασκευών, αποσκοπούν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και στη μείωση του χρόνου κατασκευής, διατηρώντας παράλληλα τα δομικά χαρακτηριστικά τους και την απαραίτητη αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται τα εξαρτήματα.

3.2 Κατηγορίες πλεγματικών δομών και βασικά χαρακτηριστικά.

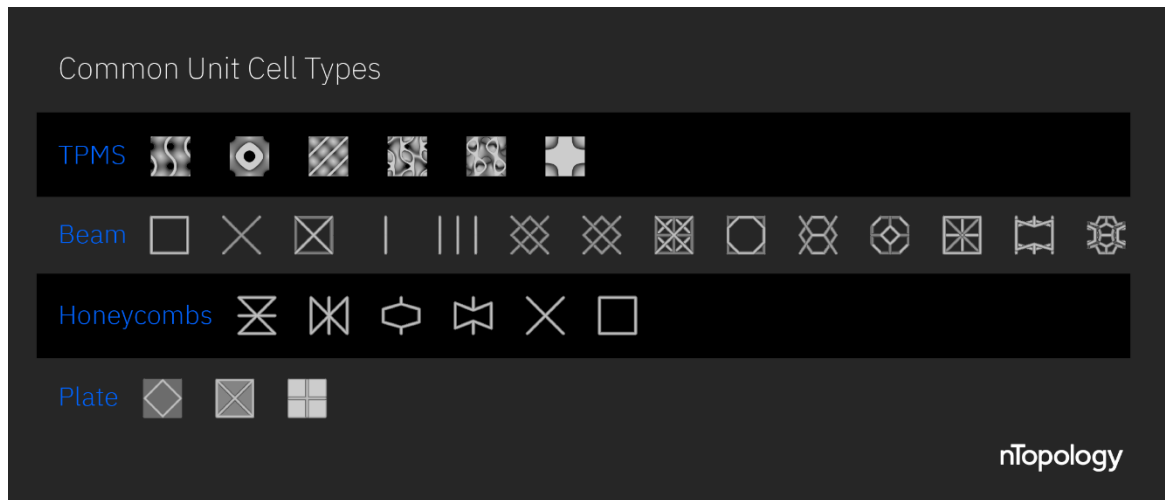
Οι πλεγματικές δομές κατηγοριοποιούνται κατά βάση σε περιοδικές και στοχαστικές. Οι κατηγορίες αλλά και ο τύπος πλέγματος (ή κελιού) που καλείται ο σχεδιαστής να επιλέξει, εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες που θέλει να πετύχει στο μηχανολογικό εξάρτημα.

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες περιοδικών πλεγματικών δομών, με την κάθε κατηγορία να περιλαμβάνει διάφορους τύπους πλεγμάτων. Οι κατηγορίες χωρίζονται ως εξής:

1. Επίπεδα πλέγματα (Planar Lattices) . Αυτή η κατηγορία μας προσφέρει υψηλή ακαμψία σε συγκεκριμένη κατεύθυνση. Στην συγκεκριμένη κατηγορία συγκαταλέγονται και δυο υποκατηγορίες, αυτές των κηρήθρων (honeycombs) και των πλεγματικών πλακών (Plate Lattice).
2. Πλέγματα Ράβδων/Δοκίδων (Beam Lattices). Η συγκεκριμένη κατηγορία μπορεί να μας προσφέρει υψηλή ακαμψία σε σχέση με το βάρος αλλά και μεγάλη ελαστικότητα, πάντα αναλογικά με το πάχος των ακτινών που θα επιλεγθεί.
3. TPMS πλέγματα (Triply periodic minimal surface). Πρόκειται για πλέγματα βασισμένα σε τριγωνομετρικές κατά βάση συναρτήσεις. Τα συγκεκριμένα πλέγματα αποδίδουν καλά σε κάθε είδους μηχανική καταπόνηση.



Εικόνα 2.4: Κύβοι κατασκευασμένοι με TPMS, ακτινωτά και επίπεδα πλέγματα αντίστοιχα. [15]












Εικόνα 2.5: Τύποι πλεγματικών δομών, χωρισμένοι ανά κατηγορίες. [16]

3.3 Τύποι πλεγματικών δομών και ιδιότητες.

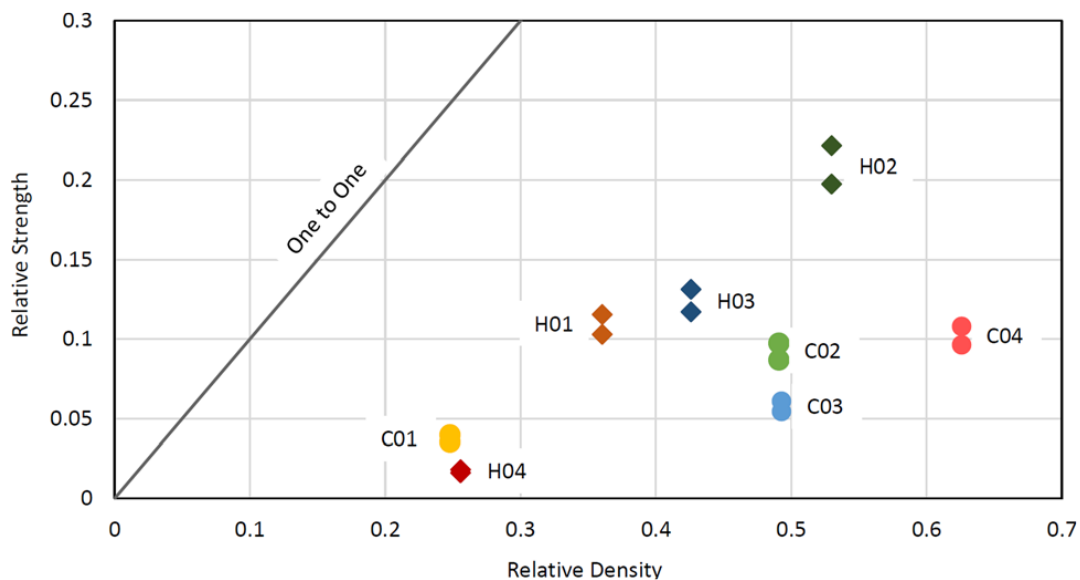
Ο τύπος των πλεγματικών δομών (κατά μοναδιαία κυψέλη) είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του εξαρτήματος, στο οποίο εφαρμόζεται η προαναφερθείσα μέθοδος για την ελάφρυνση του. Ο τύπος του πλέγματος (ή κυψέλης) καθορίζει τις περισσότερες από τις διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες που θα έχει η συγκεκριμένη δομή στο σύνολό της.

Ο σχεδιαστής-μηχανικός καλείται να επιλέξει έναν τύπο δομής στο σχεδιαστικό του πρόγραμμα, ανάλογα με τις ιδιότητες που θέλει να έχει το τελικό εξάρτημά του. Ακολουθούν χαρακτηριστικοί πίνακες με βάση πρόσφατη σχετική δημοσιευμένη έρευνα, διαφόρων τύπων πλεγματικών δομών μαζί με τις μετρήσεις ως προς την πυκνότητα τους και την ανθεκτικότητά τους σε διαφορετικές μηχανικές καταπονήσεις.

Ακολουθούν αποτελέσματα από δοκιμές διάφορων τύπων πλεγματικών δομών. Στην εικόνα 2.6 που ακολουθεί, παρουσιάζονται δύο διαφορετικές κατηγορίες πλεγμάτων. Τα πλέγματα όπου αρχίζουν με το γράμμα «C» βασίζονται σε ορθογώνιες πρισματικές γεωμετρίες, ενώ τα πλέγματα που αρχίζουν με γράμμα «H» σε εξαγωνική δομή. Ο αριθμός που ακολουθεί αφορά μόνο την αρίθμηση τους.

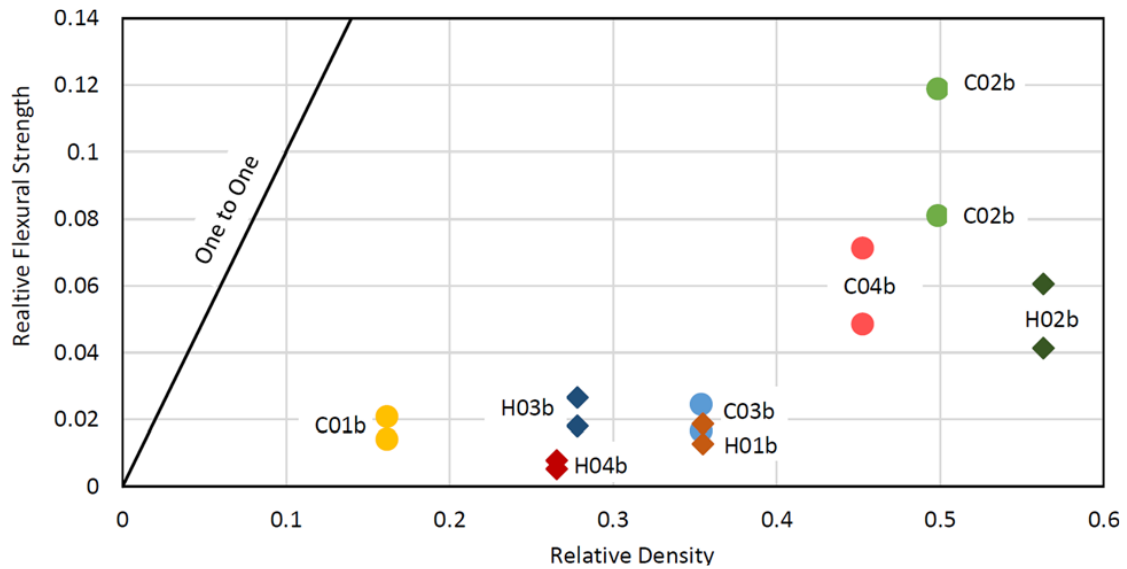
Name	Unit structure	Relative density (Netfabb)	Yield strength (MPa)	Relative yield strength	
				Low	High
C01		0.25	2.49	0.035	0.040
C02		0.49	6.11	0.087	0.097
C03		0.49	3.82	0.054	0.061
C04		0.63	6.78	0.096	0.108
H01		0.36	7.25	0.103	0.115
H02		0.53	13.9	0.197	0.221
H03		0.43	8.24	0.117	0.131
H04		0.26	1.14	0.016	0.018
Solid		1.00	62.8–70.4	—	—

Εικόνα 2.6: Αποτελέσματα σε δοκιμή πίεσης διάφορων τύπων πλεγματικών δομών. [17]



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα πίεσης-πυκνότητας των πλεγματικών δομών του παραπάνω πίνακα. [17]

Παρατηρώντας τον πίνακα (εικόνα 2.6) καθώς και το διάγραμμα (εικόνα 2.7) συμπεραίνεται ότι η αντοχή στις πιέσεις που δέχεται η κάθε πλεγματική δομή είναι ανάλογη της πυκνότητας της. Επίσης, διαπιστώνεται ότι οι εξαγωνικές πλεγματικές δομές (H01-H04) συμπεριφέρονται καλύτερα σε αυτού του τύπου την μηχανική καταπόνηση.



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα Ελαστικότητας-πυκνότητας των πλεγματικών δομών. [17]

Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 2.8) παρατηρούμε ότι η ελαστικότητα της κάθε πλεγματικής δομής είναι ανάλογη της πυκνότητάς της. Σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνουμε ότι οι τετραγωνικές πλεγματικές δομές έχουν καλύτερη συμπεριφορά στη συγκεκριμένη μηχανική καταπόνηση.

3.4 Εφαρμογές και εργαλεία CAD.

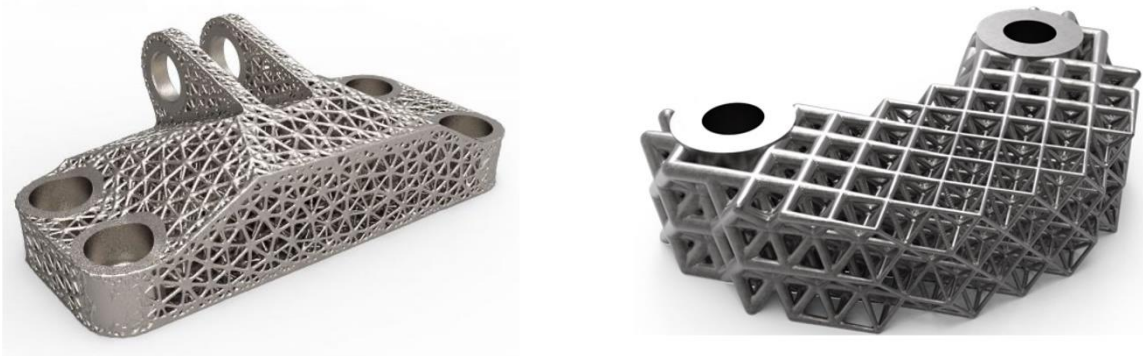
Υπάρχει πληθώρα περιπτώσεων όπου μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των πλεγματικών δομών για ελάφρυνση μηχανολογικών εξαρτημάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται διάφορες περιπτώσεις με εφαρμογή πλεγματικών δομών, καθώς και προγράμματα CAD που υποστηρίζουν τον σχεδιασμό με πλεγματικές δομές.



Εικόνα 2.9: Κάθισμα αγωνιστικού ποδηλάτου με πλεγματικές δομές. [15]

Στην εικόνα 2.9 παρατηρούμε ένα κάθισμα αγωνιστικού ποδηλάτου από υλικό Nylon-6, το οποίο έχει κατασκευαστεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Αποτελείται από εξαγωνικά

πλέγματα και ο σχεδιασμός, εκτός από τη μείωση του βάρους του, επέφερε και μείωση 26% της πίεσης που ασκείται στα τμήματα του σώματος του αναβάτη. [19]



Εικόνα 2.10: Μηχανολογικά εξαρτήματα (βάσεις στήριξης) κατασκευασμένα με πλεγματικές δομές. [18]



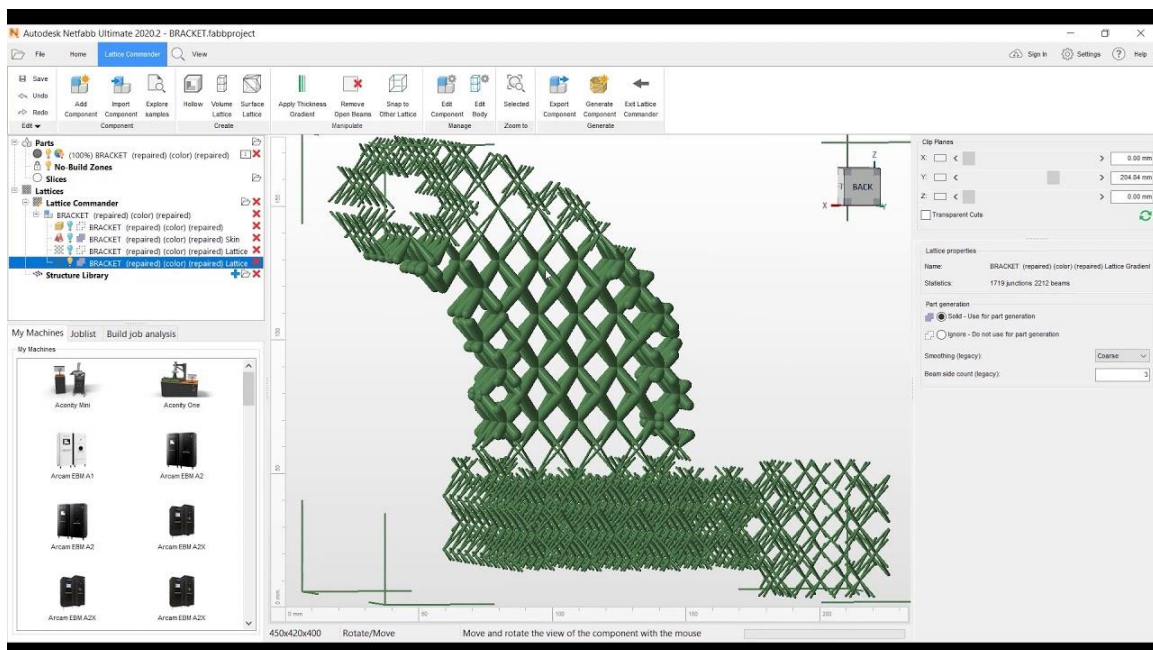
Εικόνα 2.11: Βραχιώνας έδρασης για αεροδιαστημική εφαρμογή κατασκευασμένος με χρήση πλεγματικών δομών. [19]

Στην εικόνα 2.11 παρατηρούμε έναν βραχιώνα στήριξης κατασκευασμένο από τιτάνιο (Ti6AlV4) με πλεγματικές δομές. Η μείωση του βάρους που επετεύχθη φτάνει το 67% [19]

Όπως και στην τοπολογική βελτιστοποίηση, έτσι και στην σχεδίαση των πλεγματικών δομών, καθοριστικό ρόλο έχει η επιλογή προγράμματος σχεδίασης CAD, όπου υποστηρίζει τον σχεδιασμό των πλεγματικών δομών. Κάθε πρόγραμμα δεν υποστηρίζει όλους τους τύπους πλέγματος αλλά δίνεται η δυνατότητα μεταβολής της πυκνότητας των πλεγμάτων.

Ακολουθεί λίστα με προγράμματα CAD που υποστηρίζουν τον σχεδιασμό των πλεγματικών δομών:

1. nTopology nTop
2. Autodesk Fusion 360
3. Gen3D Sulis
4. Autodesk Netfabb
5. Siemens NX
6. Carbon Design Engine
7. Altair Optistruct & Inspire
8. Materialize 3-Matic



Εικόνα 2.12: Στιγμιότυπο από την διαδικασία σχεδιασμού πλεγματικών δομών σε μηχανολογικό εξάρτημα στο πρόγραμμα Netfabb . [20]



Εικόνα 2.13: Πετάλι αυτοκινήτου σχεδιασμένο στο πρόγραμμα nTopology με χρήση πλεγματικών δομών ακτινών (Beam) . [21]

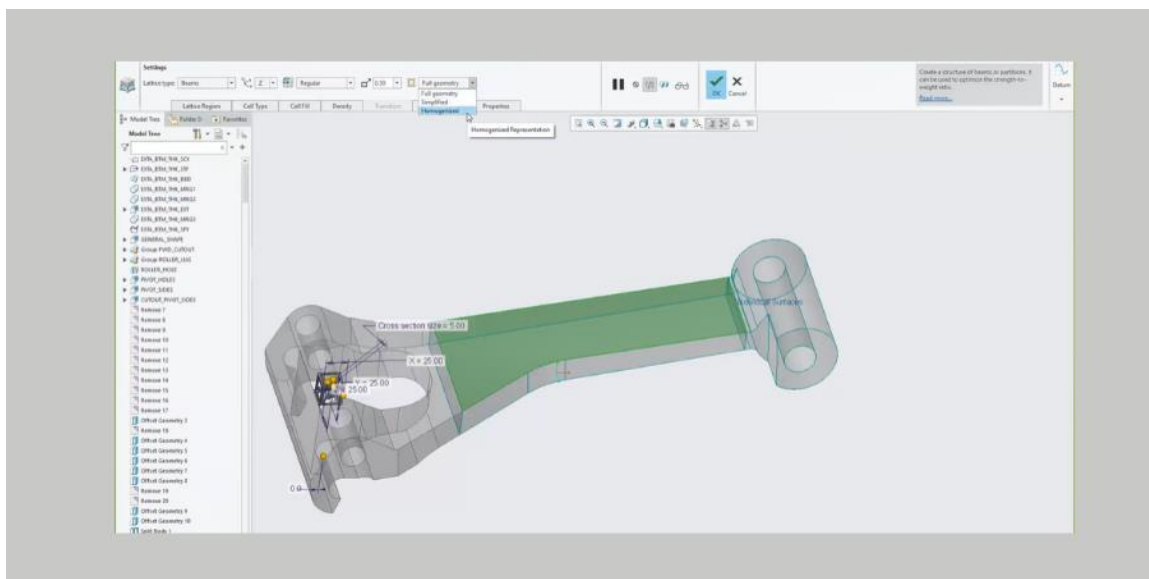
3.5 Διαδικασία σχεδιασμού πλεγματικών δομών.

Η εφαρμογή των πλεγματικών δομών εκτελείται, όπως και στην τοπολογική βελτιστοποίηση, στο τελικό στάδιο του σχεδιασμού του εκάστοτε μοντέλου, όπου ο μηχανικός-σχεδιαστής καλείται να επιτύχει την ελάφρυνσή του. Με τα σύγχρονα συστήματα CAD είναι πλέον εύκολο να δημιουργηθούν πολύπλοκες πλεγματικές δομές. Οι διαδικασίες στα προαναφερόμενα προγράμματα είναι πλέον γρήγορες και αρκετά απλοποιημένες, ώστε να επιτευχθεί η προσαρμογή αυτών των δομών στο τελικό μοντέλο. Δύναται να καθορίζονται οι ιδιότητες ενός πλέγματος, να δημιουργείται η δομή του και έπειτα να δοκιμάζεται το τελικό αποτέλεσμα. Δέον να σημειωθεί ότι όλες οι παραπάνω διαδικασίες περιλαμβάνονται στο ίδιο σχεδιαστικό περιβάλλον.

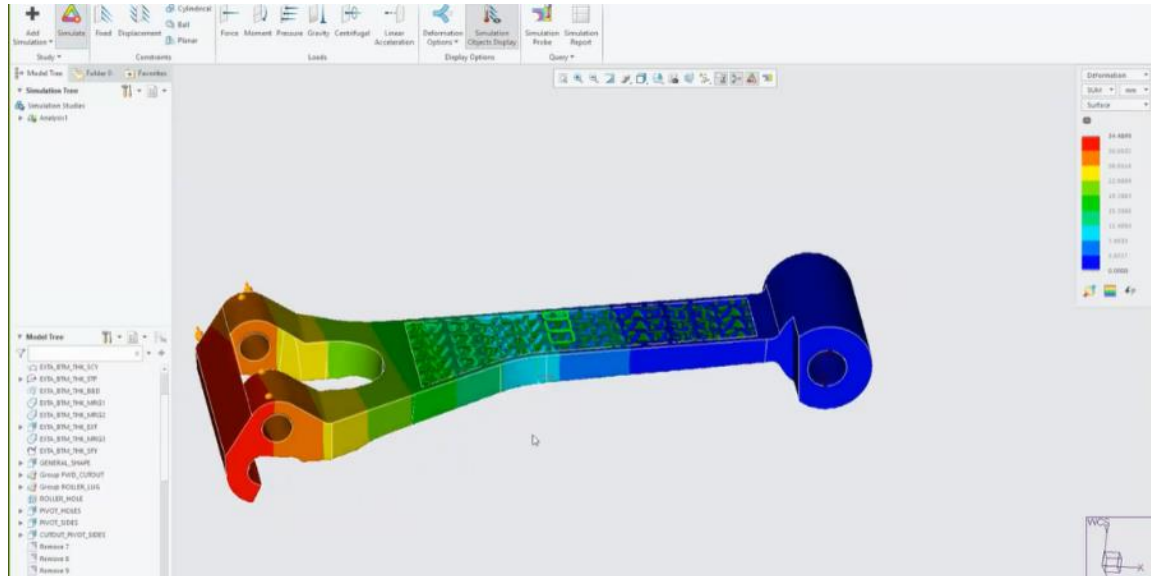
Ακολουθούν βασικά βήματα σχεδίασης.

1. Ο μηχανικός-σχεδιαστής εισάγει στο αντίστοιχο πρόγραμμα το βασικό μοντέλο για το οποίο θέλουμε να επιτευχθεί η ελάφρυνσή του.
2. Ο χρήστης θέτει τις περιοχές που δεν θα συμμετάσχουν στην αφαίρεση του υλικού, π.χ. ο χώρος γύρω από την έδραση μιας βίδας ή ενός ρουλεμάν, όπως και στην τοπολογική βελτιστοποίηση.
3. Αφού έχει καθοριστεί ο χώρος όπου το συμπαγές τμήμα του αντικειμένου θα αντικατασταθεί με πλεγματικές δομές, ο χρήστης επιλέγει τον τύπο πλέγματος που θέλει να χρησιμοποιήσει. Η επιλογή του τύπου γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά των μηχανικών ιδιοτήτων που έχει ο κάθε τύπος.

4. Αφού γίνει η εφαρμογή των πλεγματικών δομών, ο χρήστης προχωρά στη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων όπου αξιολογείται η κατανομή της τάσης και η καταπόνηση που δέχεται το εξάρτημα.
5. Το λογισμικό ελέγχει κάθε πεπερασμένο στοιχείο για ακαμψία, τάση, μετατόπιση έναντι της προκαθορισμένης απαίτησης.
6. Ανάλογα με τα αποτελέσματα, ο χρήστης μπορεί να προχωρήσει σε αλλαγή της πυκνότητας των πλεγματικών δομών αλλάζοντας την μάζα ανά πλέγμα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει, όπου κριθεί απαραίτητο, διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα στο ίδιο εξάρτημα, ακόμα και διαφορετικούς τύπους πλέγματος. Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.
7. Τέλος, με την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων γίνεται ο τελικός σχεδιασμός με τα τμήματα του υλικού που παραμένουν από το αρχικό σχέδιο του αντικειμένου.



Εικόνα 2.14: Εξάρτημα στο οποίο καθορίζεται ο χώρος που θα εφαρμοστούν οι πλεγματικές δομές . [22]



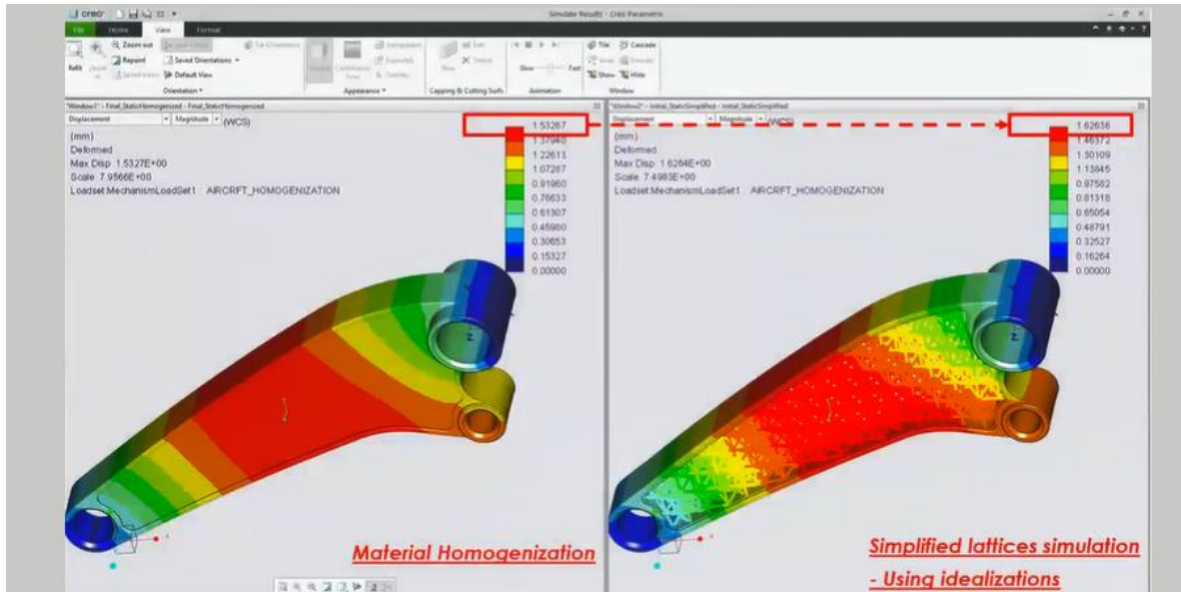
Εικόνα 2.15: Το ίδιο εξάρτημα στο οποίο έχουν εφαρμοστεί οι πλεγματικές δομές . [22]

Στις εικόνες 2.14 και 2.15, παρατηρούμε ένα μηχανολογικό εξάρτημα κατά τη διαδικασία εφαρμογής πλεγματικών δομών σε αυτό. Στην εικόνα 2.14 καθορίζεται ο χώρος ο οποίος θα αντικατασταθεί με πλεγματικές δομές. Στην εικόνα 2.15 στο ίδιο εξάρτημα έχει γίνει η εφαρμογή των πλεγματικών δομών και πραγματοποιείται η διαδικασία της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Από τη συγκεκριμένη ανάλυση εξάγουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα ότι με τη συγκεκριμένη δομή καλύπτονται οι αρχικές απαιτήσεις στις μηχανικές καταπονήσεις που πρέπει να αντέχει το εξάρτημα.

3.6 Μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων με πλεγματικές δομές.

Οι μηχανικοί-σχεδιαστές αξιοποιούν τις πλεγματικές δομές για την ελάφρυνση εξαρτημάτων για εφαρμογές αεροδιαστημικής ή αυτοκινήτων υψηλών επιδόσεων, διάφορα βιομηχανικά μηχανήματα, πρόσθετων μελών κ.α. Σε αυτούς τους τομείς η μείωση του βάρους των εξαρτημάτων είναι κρίσιμη, όπως είναι και η δομική ακεραιότητα τους. Όπως έχει ήδη λεχθεί, με τη χρήση πλεγματικών δομών επιτυγχάνεται μείωση της συμπαγούς μάζας χωρίς συμβιβασμούς στην απόδοση. Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους τύπους πλέγματος, είναι εφικτές μειώσεις βάρους 40%-50% ή και ακόμα υψηλότερες.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των πλεγματικών δομών σε εφαρμογές ελάφρυνσης είναι ότι λόγω της δομής τους είναι εξαιρετικά ανθεκτικές σε ζημιές από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. πρόσκρουση ξένου αντικείμενο). Η συγκεκριμένη ιδιότητα, καθιστά κατάλληλα τα εξαρτήματα με πλεγματικές δομές, για κρίσιμες εφαρμογές όπου το εξάρτημα πρέπει να αντέξει σημαντικά φορτία και καταπονήσεις.



Εικόνα 2.16: Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο ίδιο εξάρτημα, πριν και μετά την εφαρμογή των πλεγματικών δομών. [22]

Στην εικόνα 2.16 παρατηρούμε τη συμπεριφορά ενός εξαρτήματος πριν και μετά την εφαρμογή των πλεγματικών δομών. Με τον νέο σχεδιασμό του εξαρτήματος παρατηρούμε ότι συμπεριφέρεται εξίσου καλά στην καταπόνηση που δέχεται ενώ ταυτόχρονα έχει μια βελτιωμένη συμπεριφορά ως προς την ελαστικότητα του.

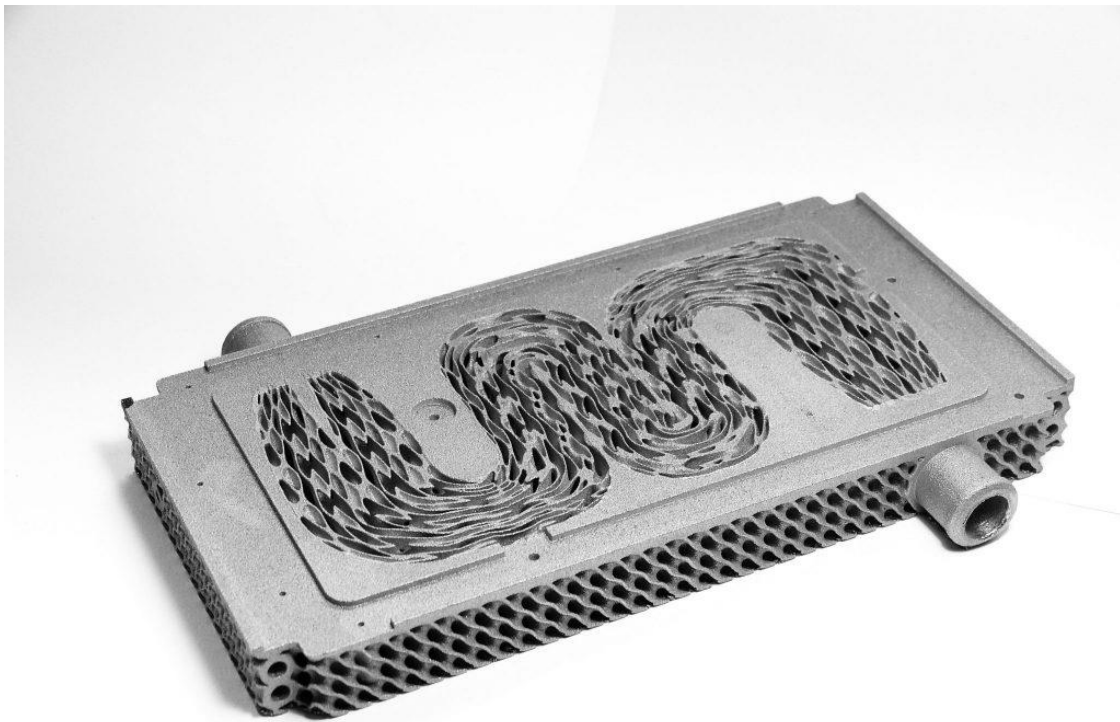
Οι πλεγματικές δομές σε ένα εξάρτημα μπορούν επίσης να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να έχουν υψηλή απορρόφηση ενέργειας ή απορρόφηση κραδασμών. Επιπρόσθετα, οι πλεγματικές δομές μπορούν να βελτιώσουν τις ιδιότητες απορρόφησης κραδασμών ενός προϊόντος και να αντικαταστήσουν τους παραδοσιακούς αφρούς με προστατευτικό εξοπλισμό όπως τα κράνη.



Εικόνα 2.17: Χρήση εξάγωνων πλεγματικών δομών στην κατασκευή κράνους. [15]

Άλλη ιδιότητα των πλεγματικών δομών, εκτός από την ελάφρυνση των εξαρτημάτων, είναι η θερμική τους συμπεριφορά. Ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας είναι ανάλογος με τη διαθέσιμη επιφάνεια μεταφοράς της θερμότητας. Οι πλεγματικές δομές παρέχουν μεγάλη επιφάνεια, ακόμα μεγαλύτερη και από την αρχική τους δομή. Συγκεκριμένα ο γυροειδής τύπος πλέγματος (TPMS), είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για εφαρμογές θερμικής διαχείρισης όπως ο εναλλάκτης θερμότητας.

Τα γυροειδή (gyroid) πλέγματα εκτός από την υψηλή αναλογία αντοχής – βάρους, παρέχουν σημαντική αναλογία επιφάνειας προς όγκο. Αυτό καθιστά τα γυροειδή πλέγματα αποτελεσματικά για την κατασκευή εναλλακτών θερμότητας που προσφέρουν υψηλότερη απόδοση. Αντίστοιχοι εναλλάκτες θερμότητας υψηλής απόδοσης βρίσκουν εφαρμογή σε αεροσκάφη, οχήματα, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ψύξη ηλεκτρονικών ειδών κ.α.



Εικόνα 2.18: Εναλλάκτης θερμότητας με χρήση γυροειδών πλεγματικών δομών (TPMS) σχεδιασμένος στο λογισμικό nTopology. [15]

Η Ιταλική εταιρεία ανάπτυξης προϊόντων Puntozero μετά την συνεργασία με την ομάδα της Formula SAE Dynamis PRC, σχεδίασε την παραπάνω ψήκτρα για τον μετατροπέα υψηλής τάσης (εικόνα 2.18). Η συγκεκριμένη ψήκτρα βασίζεται σε γυροειδή πλέγματα (TPMS), είναι 25% ελαφρύτερη και είχε 300% μεγαλύτερη επιφάνεια από την αρχική της δομή. [25]

3.7 Χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής για την υλοποίηση κατασκευών με χρήση πλεγματικών δομών.

Για την κατασκευή εξαρτημάτων με πλεγματικές δομές είναι δυνατή η κατασκευή απλών δικτυωμάτων χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής όπως η κατεργασία με CNC, η συγκόλληση ή η χύτευση. Για παράδειγμα, η άτρακτος ενός αεροσκάφους εμπεριέχει πλεγματικές δομές που κατασκευάζεται με συγκόλληση λεπτών λωρίδων αλουμινίου.

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, επιτρέπουν να κατασκευάζονται απευθείας πλεγματικές δομές με υψηλή πολυπλοκότητα και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και πιο οικονομικά. Η δυσκολία προσέγγισης των κοπτικών εργαλείων των εργαλειομηχανών CNC και η περιορισμένη ευελιξία και ακρίβεια, στις τεχνικές συγκόλλησης και χύτευσης, καθιστά τη χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών αναγκαία.



Εικόνα 2.19: Ορθοπεδικά εμφυτεύματα με πλεγματικές δομές. [15]



Εικόνα 2.20: Μεταλλικό μηχανολογικό εξάρτημα με πλεγματικές δομές κατασκευασμένο σε τρισδιάστατο εκτυπωτή τύπου SLM . [23]

Στις περιπτώσεις των εξαρτημάτων που παρατηρούμε στις εικόνες 2.19 και 2.20, αλλά και σε προγενέστερες, η χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι αναγκαία λόγω της ιδιαιτερότητας των πλεγματικών δομών και την ακρίβεια της κατασκευής που πρέπει να επιτευχθεί.

4 Υβριδικός σχεδιασμός με τοπολογική βελτιστοποίηση και πλεγματικές δομές.

4.1 Ο υβριδικός σχεδιασμός τοπολογικής βελτιστοποίησης και των πλεγματικών δομών και οι στόχοι του.

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν δυο τεχνικές σχεδιασμού με στόχο την ελάφρυνση των μηχανολογικών εξαρτημάτων. Ανεξάρτητα από τον κοινό βασικό στόχο των δυο τεχνικών σχεδιασμού, η κάθε τεχνική προσδίδει στο εξάρτημα διαφορετικά αποτελέσματα στις μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται. Τα διαφορετικά αυτά χαρακτηριστικά των δυο τεχνικών, μπορούμε να τα συνδυάσουμε πραγματοποιώντας στο τελικό μοντέλο σχεδιασμού, έναν υβριδικό σχεδιασμό της τοπολογικής βελτιστοποίησης και των πλεγματικών δομών.

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής με χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών, δίνουν επιπλέον τη δυνατότητα να εκτελεστούν περίπλοκες κατασκευές που μπορεί να προκύψουν από τις προαναφερθείσες τεχνικές σχεδιασμού, χωρίς να είναι απαραίτητα η μόνη μέθοδος κατασκευής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Συνήθως, η εφαρμογή του υβριδικού σχεδιασμού, της τοπολογικής βελτιστοποίησης και των πλεγματικών δομών σε ένα μηχανολογικό εξάρτημα, αποδίδει ένα τελικό μοντέλο σχεδιασμού με μια αρκετά περίπλοκη γεωμετρία. Για τον λόγο αυτό, η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι απαραίτητη με μόνη εναλλακτική λύση, σε περιορισμένες εφαρμογές, αυτή της χύτευσης σε καλούπια.

Στην τοπολογική βελτιστοποίηση, αφαιρώντας το υλικό με την χαμηλότερη ενεργειακή συμμετοχή στο εξάρτημα, μένει ένα συμπαγές τμήμα του αρχικού μοντέλου σχηματίζοντας κάποια νεύρα στην δομή του, ως προς της εδράσεις του. Η τοπολογική βελτιστοποίηση έχει αρκετά καλά αποτελέσματα ως προς τα τις μόνιμες πιέσεις που δέχεται το εξάρτημα, την ακαμψία του, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται σημαντική ελάφρυνσή του. Σε εφαρμογές όπου μπορεί να είναι εκτεθειμένο ένα τέτοιο εξάρτημα μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα σε περίπτωση επαφής ξένου σώματος με τα νεύρα του εξαρτήματος.

Στις πλεγματικές δομές έχουμε μια αντικατάσταση του υλικού του εξαρτήματος με πλεγματικές δομές, αλλάζοντας το πορώδες του εξαρτήματος στο σύνολο του αρχικού του όγκου. Η τεχνική αυτή ενδέχεται να μειώνει σε ορισμένες περιπτώσεις την αντοχή στις πιέσεις που μπορεί να δεχτεί το εξάρτημα χωρίς να παρεκκλίνει των αρχικών απαιτήσεων, ενώ βελτιώνεται η ελαστικότητα του και επιτυγχάνεται μια καλύτερη συμπεριφορά στις εφαρμογές που χρειάζεται απορρόφηση ενέργειας (κρουστικές πιέσεις στο εξάρτημα).

Οι στόχοι του υβριδικού σχεδιασμού σε ένα μηχανολογικό εξάρτημα είναι να συνδυάσουμε τα πλεονεκτήματα που μας δίνει μεμονωμένη η κάθε τεχνική σχεδιασμού, όπως αυτά περιγράφονται νωρίτερα. Παράλληλα στοχεύει στη μείωση ή και εξάλειψη αστάθμιστων παραγόντων που ενδέχεται να προκύψουν από τις επιμέρους τεχνικές σχεδιασμού, κατά την εκτέλεση μιας εφαρμογής.

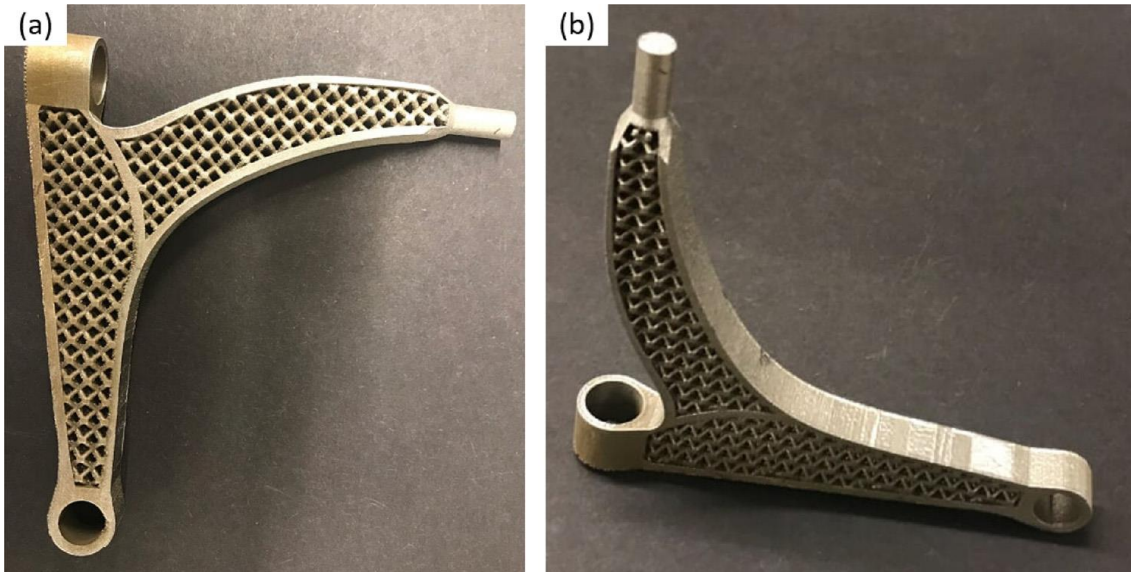
4.2 Διαδικασία για την επίτευξη του υβριδικού σχεδιασμού.

Η διαδικασία για την επίτευξη του υβριδικού σχεδιασμού αποτελείται από σύνθεση των βημάτων σχεδίασης της τοπολογικής βελτιστοποίησης και των πλεγματικών δομών.

Βήματα σχεδίασης υβριδικού σχεδιασμού:

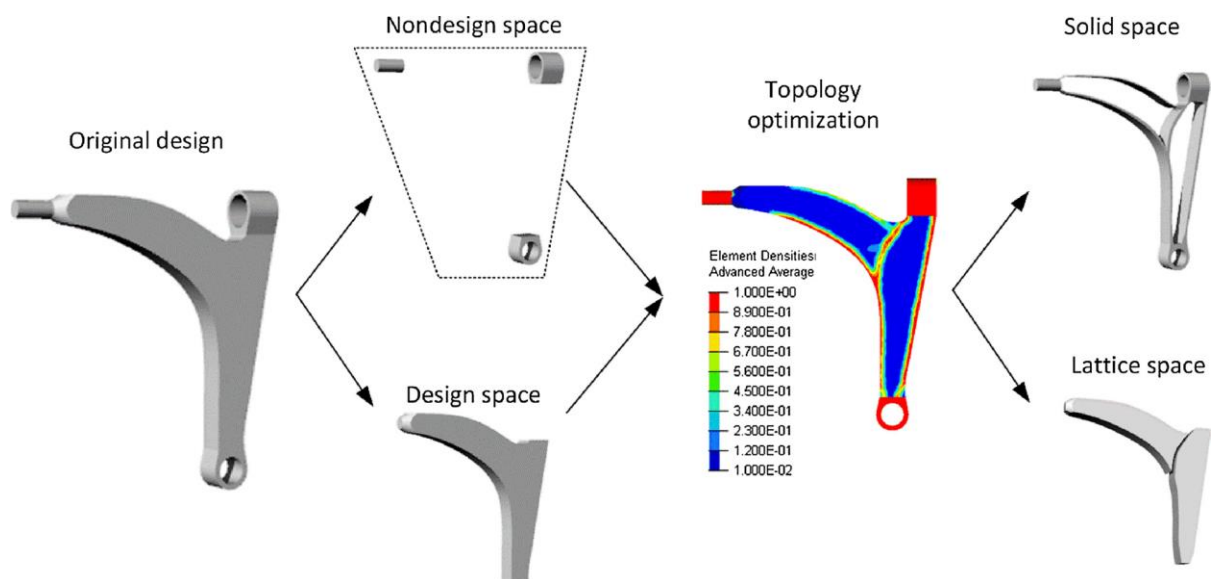
1. Εισαγωγή αρχικού μοντέλου σχεδιασμού στο αντίστοιχο πρόγραμμα.
2. Ο χρήστης θέτει τις περιοχές που δεν θα συμμετάσχουν στην αφαίρεση του υλικού, π.χ. ο χώρος γύρω από την έδραση μιας βίδας ή ενός ρουλεμάν.
3. Στη συνέχεια ο χρήστης ορίζει τα εξωτερικά φορτία, τις οριακές συνθήκες, τους περιορισμούς και τις ιδιότητες υλικού.
4. Στο επόμενο βήμα ο χρήστης προχωράει στην τοπολογική βελτιστοποίηση του εξαρτήματος για να αφαιρέσει το υλικό από το εξάρτημα με την μικρότερη ενεργειακή συμμετοχή.
5. Αφού δημιουργηθεί η νέα δομή του εξαρτήματος, χωρίζεται το σχέδιο του εξαρτήματος σε δυο τμήματα. Το 1ο τμήμα είναι η νέα συμπαγής δομή που προκύπτει από την τοπολογική βελτιστοποίηση και το 2^ο τμήμα είναι το τμήμα του υλικού που αφαιρείται κατά τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.
6. Στο 2^ο τμήμα, που αφαιρείται κατά τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης, γίνεται αντικατάσταση με πλεγματικές δομές. Ο τύπος του πλέγματος επιλέγεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες που θέλει ο χρήστης να επιτύχει στο εξάρτημά του.
7. Στο επόμενο στάδιο γίνεται προσομοίωση με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του υβριδικού μοντέλου.
8. Πραγματοποιείται μια βελτιστοποίηση του πάχους των πλεγματικών δομών.
9. Γίνεται τελικός έλεγχος αν χρειάζεται κάποια επιπλέον βελτιστοποίηση στις πλεγματικές δομές.
10. Αν δεν χρειάζεται κάποια άλλη βελτιστοποίηση, γίνεται η τελική δημιουργία των πλεγματικών δομών.
11. Δημιουργία του τελικού υβριδικού σχεδιασμού με την ένωση των δυο τμημάτων, της τοπολογικής βελτιστοποίησης και των πλεγματικών δομών.
12. Κατασκευή του εξαρτήματος με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Η λογική του συγκεκριμένου σχεδιασμού είναι απλά ότι το τμήμα του υλικού που αφαιρείται κατά τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης, αναπληρώνεται με πλεγματικές δομές. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις οι βάσεις έδρασης δεν συμμετέχουν στην ελάφρυνση του εξαρτήματος. Στο τμήμα των πλεγματικών δομών γίνεται κανονικά επαναληπτικός έλεγχος για τη βελτίωση του πάχους των δομών, εάν αυτό είναι απαραίτητο.



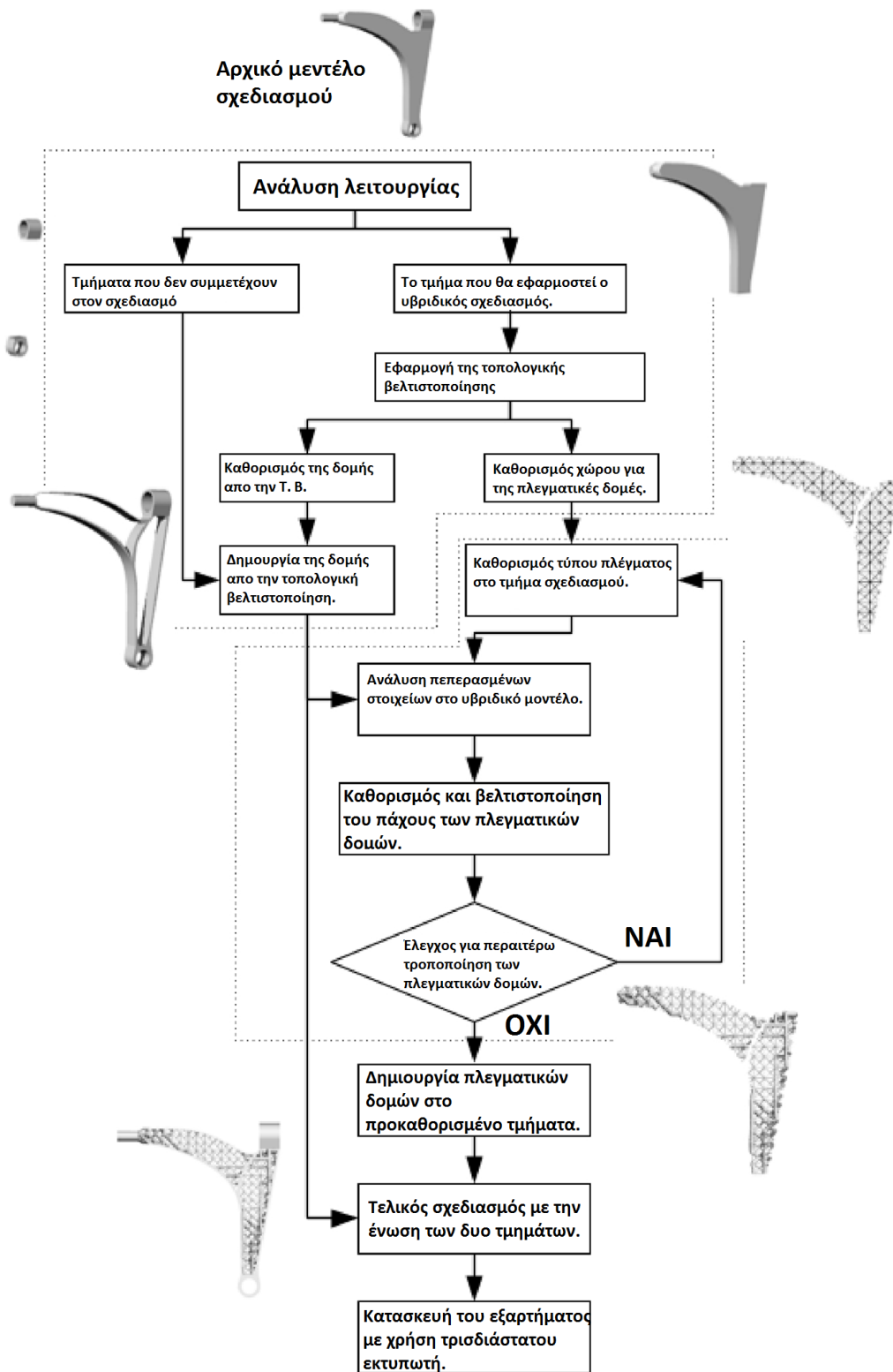
Εικόνα 3.1: Μηχανολογικό εξάρτημα αυτοκινήτου, στο οποίο έχει εφαρμοστεί υβριδικός σχεδιασμός τοπολογικής βελτιστοποίησης και πλεγματικών δομών. Έχει κατασκευαστεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή SLM . [24]

Στην εικόνα 3.1 παρατηρούμε τις συμπαγείς δομές που έχει το εξάρτημα και προέρχονται από την τοπολογική βελτιστοποίηση, καθώς και το τμήμα του εξαρτήματος το οποίο έχει αντικατασταθεί με τις πλεγματικές δομές. Ακολουθούν εικόνες και περιγραφή για τη διαδικασία του υβριδικού σχεδιασμού που εφαρμόστηκε στο συγκεκριμένο εξάρτημα.

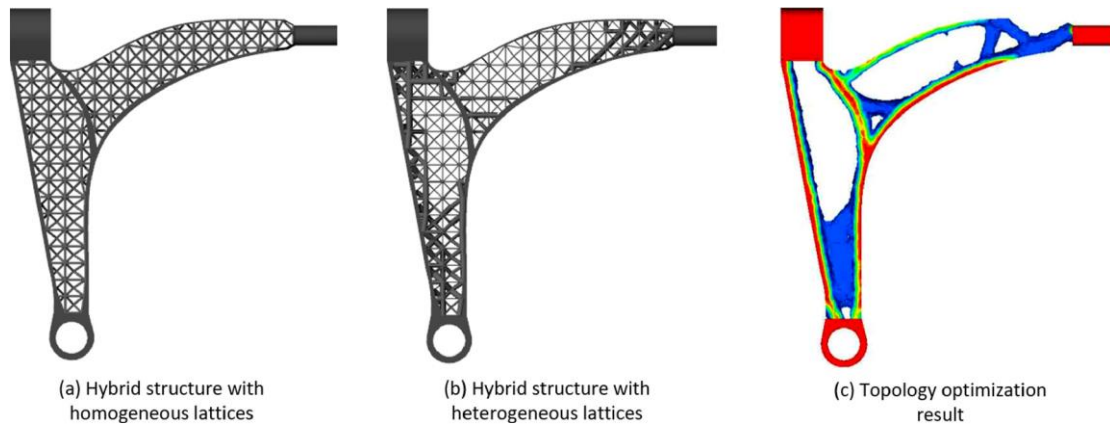


Εικόνα 3.2: Επεξήγηση του διαχωρισμού των τμημάτων σχεδιασμού, που εφαρμόζεται με την τοπολογική βελτιστοποίηση και τις πλεγματικές δομές . [24]

Ακολουθεί διάγραμμα ροής της προαναφερθείσας διαδικασίας:



Εικόνα 3.3: Το διάγραμμα ροής που ακολουθείται για την επίτευξη του υβριδικού σχεδιασμού.[24]



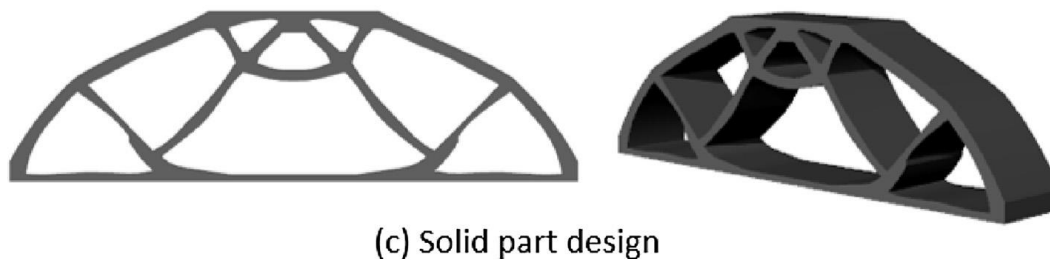
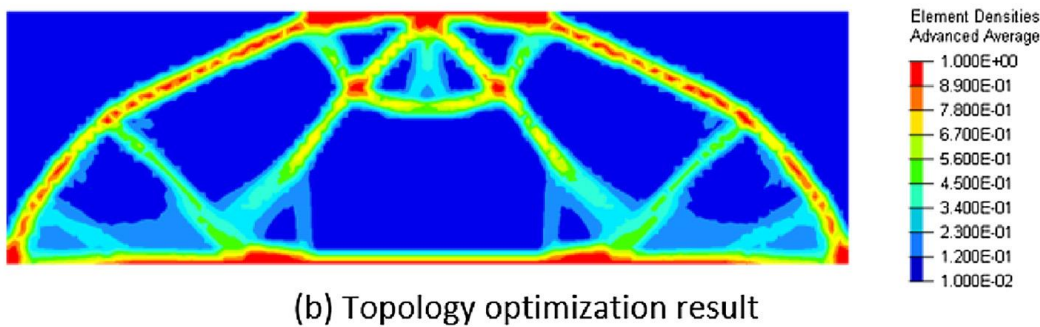
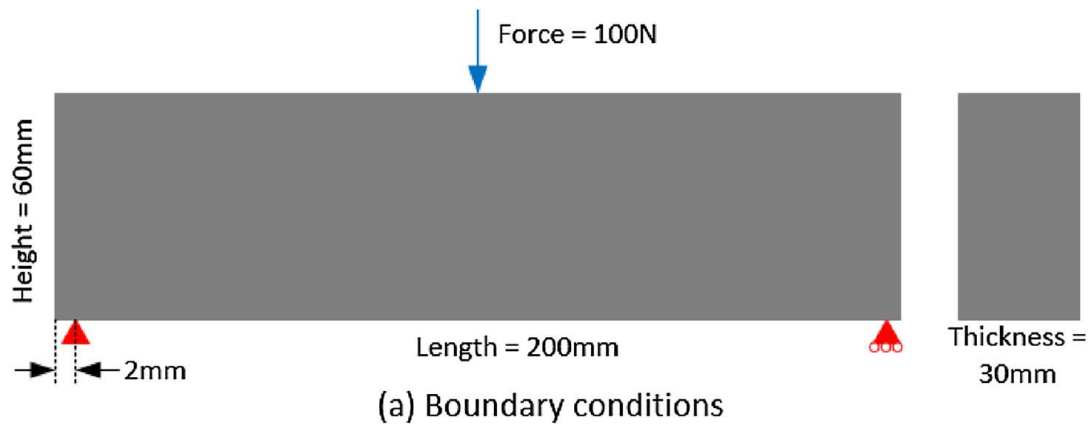
Εικόνα 3.4: Αριστερά στο σχέδιο α παρατηρούμε το υβριδικό τελικό μοντέλο με ομοιογενείς πλεγματικές δομές ενώ στο σχέδιο b με ανομοιογενείς πλεγματικές δομές. Τέλος στο σχέδιο c εμφανίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων κατά την τοπολογική βελτιστοποίηση.[24]

Ο υβριδικός σχεδιασμός δίνει στον μηχανικό-σχεδιαστή του εξαρτήματος τη δυνατότητα ύπαρξης ανομοιογενών πλεγματικών δομών. Βασισμένος στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ο σχεδιαστής μπορεί να αυξήσει το πάχος των πλεγμάτων σε ένα μόνο τμήμα του εξαρτήματος αλλά και να χρησιμοποιήσει διαφορετικό τύπο πλέγματος, όπου το κρίνει απαραίτητο.

4.3 Μηχανικές ιδιότητες εξαρτημάτων στις οποίες έχει εφαρμοστεί ο υβριδικός σχεδιασμός και σύγκριση με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA).

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων ενός εξαρτήματος ως προς τις μηχανικές καταπονήσεις που αυτό δέχεται. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων έχει εφαρμοστεί αρχικά στο εξάρτημα με τοπολογική βελτιστοποίηση, στη συνέχεια στο ίδιο εξάρτημα που έχει επανασχεδιαστεί με χρήση πλεγματικών δομών και τέλος στο ίδιο εξάρτημα στο οποίο έχει πραγματοποιηθεί υβριδικός σχεδιασμός, με τη συνδυαστική εφαρμογή των δυο προηγούμενων τεχνικών.

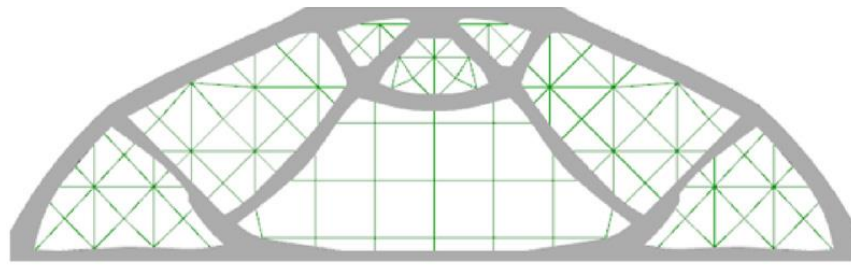
Στόχος είναι η εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων για τα οφέλη του υβριδικού σχεδιασμού σε ένα μηχανολογικό εξάρτημα. Το εξάρτημα στο οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, για τρεις διαφορετικές τεχνικές σχεδιασμού, είναι μια δοκός με διαστάσεις 200x60x30 (Μήκος, ύψος, πλάτος).



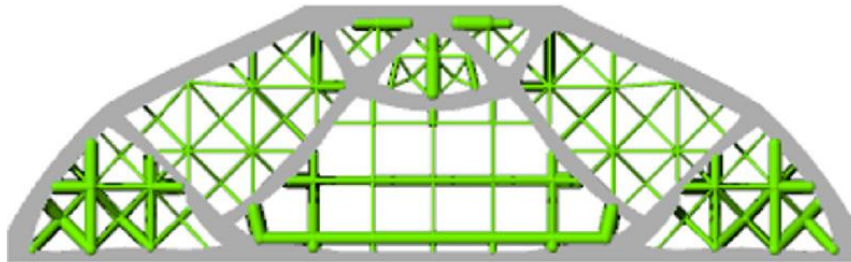
Εικόνα 3.5: Στιγμιότυπα από την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.[24]

Στην εικόνα 3.5 παρατηρούμε στο σχέδιο α την αρχική μορφή της δοκού. Στο σχέδιο β παρατηρούμε την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που γίνεται στο πλαίσιο της διαδικασίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Τέλος στο σχέδιο c παρατηρούμε το σχήμα του εξαρτήματος μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση.

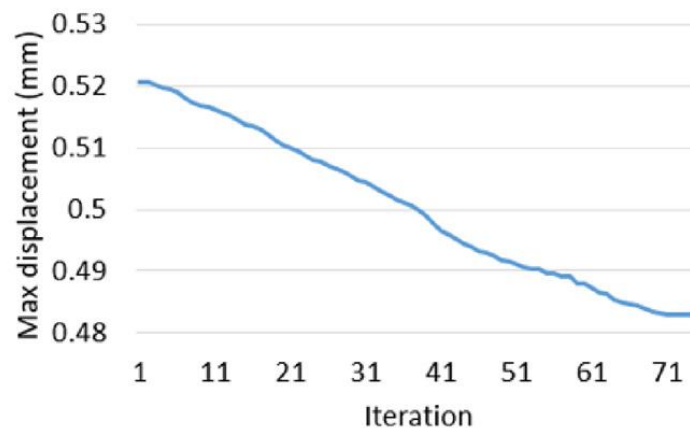
Ακολουθεί η αναπλήρωση του τμήματος που αφαιρέθηκε με πλεγματικές δομές. Με βάση την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που απεικονίζεται στην εικόνα 3.5, ο μηχανικός-σχεδιαστής επιλέγει ανομοιογενείς πλεγματικές δομές.



(a) Modified lattice wireframe



(b) Optimized lattice structure

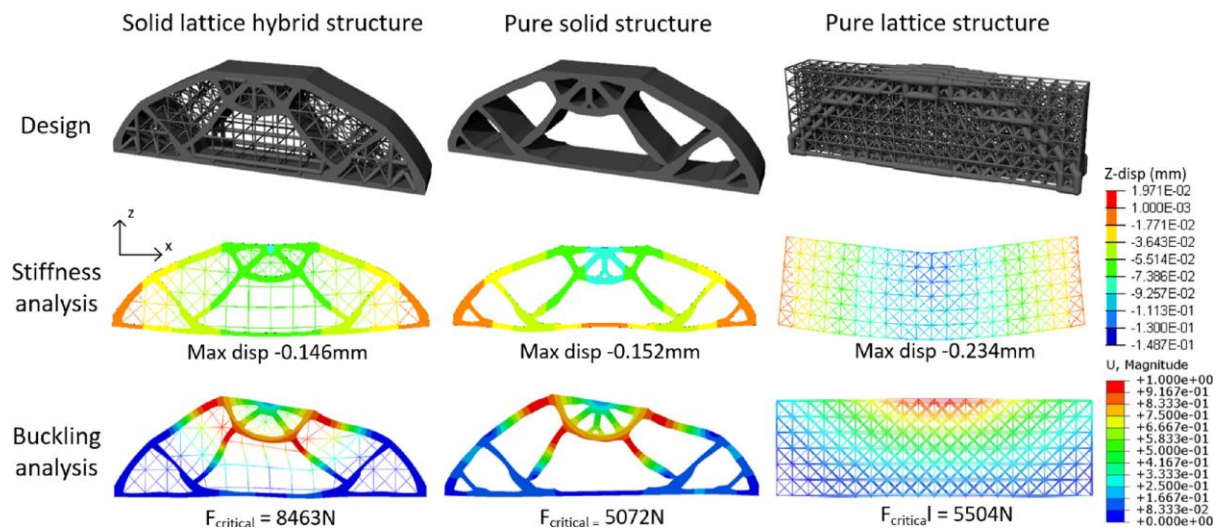


(c) Decrease of the maximum displacement with iterations

Εικόνα 3.6: Στιγμιότυπα από την διαδικασία του υβριδικού σχεδιασμού και διάγραμμα μετατόπισης .[24]

Στην εικόνα 3.6 παρατηρούμε στο σχέδιο α τον αρχικό υβριδικό σχεδιασμό της δοκού. Στο σχέδιο β της ίδιας εικόνας παρατηρούμε το τελικό μοντέλο του υβριδικού σχεδιασμού μετά από επαναλήψεις επανασχεδιασμού των πλεγματικών δομών. Στο τελικό μοντέλο επιλέχθηκε να υπάρχουν ανομοιογενείς πλεγματικές δομές, όχι μόνο διαφορετικού πάχους αλλά και διαφορετικού τύπου πλέγματα στο ίδιο εξάρτημα. Τέλος, παρατηρούμε ένα διάγραμμα μετατόπισης-επαναλήψεων σχεδιασμού πλεγματικών δομών. Η αύξηση των επαναλήψεων και επομένως η βελτίωση των πλεγματικών δομών, αύξησε σημαντικά την αντοχή του εξαρτήματος στην μετατόπιση που είχε στην ίδια πίεση.

Ακολουθεί εικόνα με τη σύγκριση των τριών διαφορετικών σχεδιασμών που προκύπτουν από τον υβριδικό σχεδιασμό, την τοπολογική βελτιστοποίηση και τις πλεγματικές δομές αντίστοιχα:



Εικόνα 3.7: Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων της δοκού με τις τρεις διαφορετικές τεχνικές σχεδιασμού ελάφρυνσης .[24]

Στην εικόνα 3.7 παρατηρούμε ότι :

1. Το μοντέλο με τον υβριδικό σχεδιασμό έχει καλύτερη ακαμψία σε σχέση με τα δυο αντίστοιχα μοντέλα. Η δυσμενέστερη ακαμψία παρατηρείται στο μοντέλο με τις πλεγματικές δομές.
2. Το υβριδικό μοντέλο παρατηρούμε ότι έχει πολύ καλύτερη αντοχή σε σχέση με τα δυο αντίστοιχα μοντέλα. Τη δυσμενέστερη αντοχή παρουσιάζει το μοντέλο με την τοπολογική βελτιστοποίηση.

Επομένως, βάσει των ως άνω αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, τεκμαίρεται ότι ο υβριδικός σχεδιασμός είναι η βέλτιστη τεχνική ελάφρυνσης. Αυτό διότι πετυχαίνει σε μεγάλο βαθμό τον συνδυασμό των πλεονεκτημάτων που έχουν οι δυο επιμέρους τεχνικές ελάφρυνσης: η τοπολογική βελτιστοποίηση και οι πλεγματικές δομές.

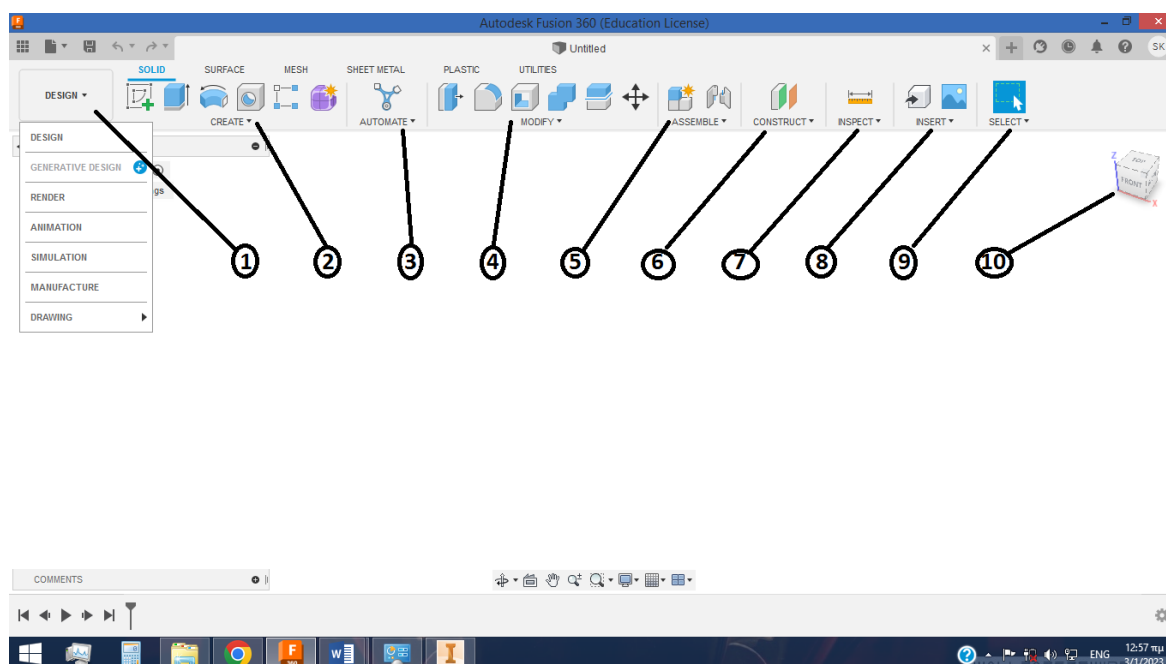
5 Εφαρμογή του υβριδικού σχεδιασμού.

5.1 Εφαρμογή του υβριδικού σχεδιασμού σε μηχανολογικό εξάρτημα με σκοπό την κατασκευή του σε τρισδιάστατο εκτυπωτή, με χρήση των λογισμικών της Autodesk.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας οδηγός, βήμα προς βήμα, για τη σχεδίαση και εφαρμογή του υβριδικού σχεδιασμού για την ελάφρυνση ενός μηχανολογικού εξαρτήματος. Για την εφαρμογή του υβριδικού σχεδιασμού επιλέχθηκε ένα εξάρτημα ευρέως διαδεδομένο στην καθημερινότητά μας, ένας βραχίονας πεταλιέρας ποδηλάτου (bike crank arm).

Η ανάγκη για ελάφρυνση του συνολικού βάρους των ποδηλάτων, προέρχεται από κατασκευαστές που δραστηριοποιούνται στην κατασκευή ποδηλάτων, κυρίως για αγωνιστική χρήση. Για τις συγκεκριμένες κατηγορίες ποδηλάτων, υπάρχει δυνατότητα να επιλέγονται δαπανηρά υλικά ή και δαπανηρές μέθοδοι κατεργασίας για το σύνολο των τμημάτων ενός αγωνιστικού ποδηλάτου, προκειμένου να επιτευχθεί η ελάφρυνσή του.

Για τον σχεδιασμό του συγκεκριμένου εξαρτήματος επιλέχθηκε το πρόγραμμα της Autodesk, Fusion 360. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσφέρει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, σε ένα εύκολο και εύχρηστο σχεδιαστικό περιβάλλον. Για τους λόγους αυτούς, καθίσταται ιδανική η επιλογή του ως σχεδιαστικό μέσο για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

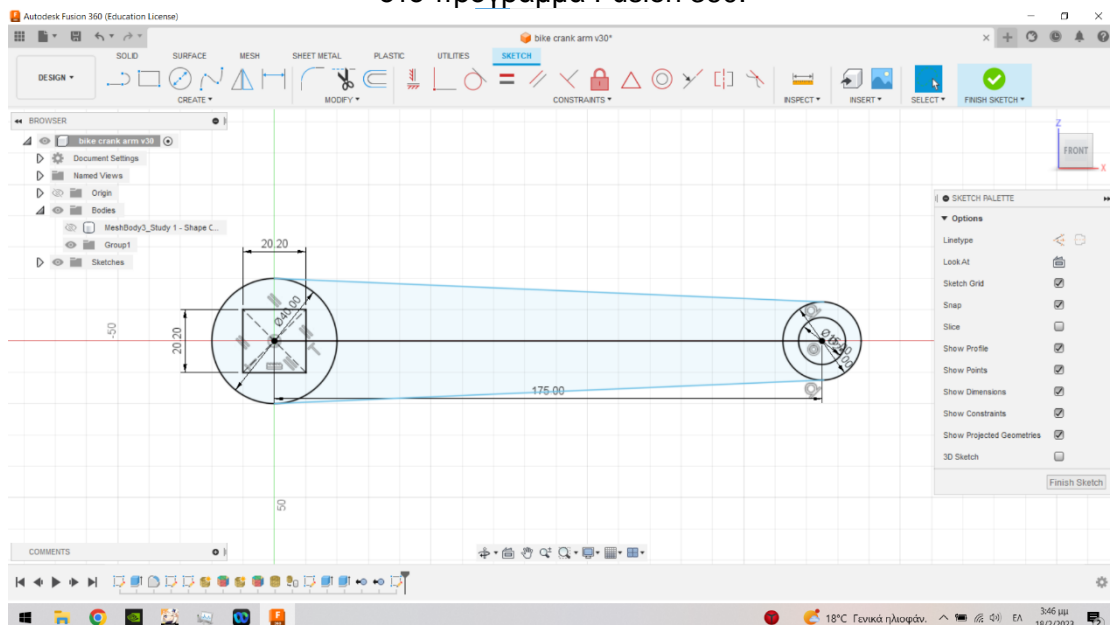


Εικόνα 4.1: Επεξήγηση των εργαλείων σχεδίασης του προγράμματος Fusion 360.

1. Εφαρμογές που υποστηρίζει το Fusion 360. (Σχεδίαση, απεικόνιση, προσομοίωση, κατασκευή κ.α.)
2. “Create”. Εδώ βρίσκονται τα βασικά εργαλεία σχεδιασμού που καθορίζουν το σχήμα του αντικειμένου.

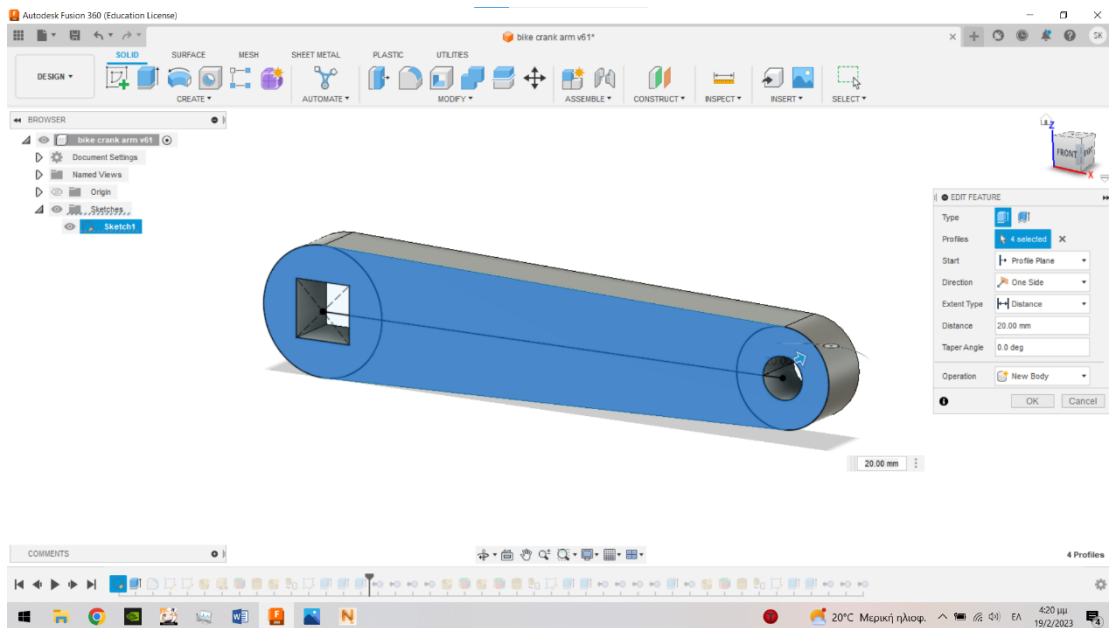
3. "Automate". Πρόκειται για λειτουργία που δημιουργεί αυτόματα ένα σχέδιο στον κενό χώρο για τη σύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων.
4. "Modify". Είναι οι λειτουργίες που στοχεύουν στη μετατροπή τμήματος ή τμημάτων του αρχικού μοντέλου σχεδίασης, όπως τη μετατροπή των γωνιών στις άκρες ενός εξαρτήματος, την ένωση εξαρτημάτων σε ένα και το ανάστροφο κ.α.
5. "Assemble". Η λειτουργία στοχεύει στη σύνδεση με καθορισμένο τρόπο για διαφορετικά εξαρτήματα, προκειμένου να γίνει ο τελικός σχεδιασμός ενός μηχανισμού.
6. "Construct". Πρόκειται για λειτουργία που δημιουργεί ένα νέο πλάνο σχεδιασμού από μια πρόσοψη του εξαρτήματος.
7. "Inspect". Λειτουργία που περιλαμβάνει διάφορα εργαλεία μετρήσεων.
8. "Insert". Λειτουργία που εισάγει αντικείμενα τα οποία που μπορούν να βοηθήσουν στον σχεδιασμό π.χ. εικόνα ή αρχείο pdf με σχέδιο δύο διαστάσεων.
9. "Select". Λειτουργία για την επιλογή και μαρκάρισμα αντικειμένων.
10. Τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου σχεδιασμού. Από τον συγκεκριμένο κύβο αλλάζει την γωνία θέασης του αντικειμένου.

Ακολουθούν τα βήματα για τη διαδικασία σχεδιασμού ενός βραχίονα πεταλιέρας ποδηλάτου στο πρόγραμμα Fusion 360:

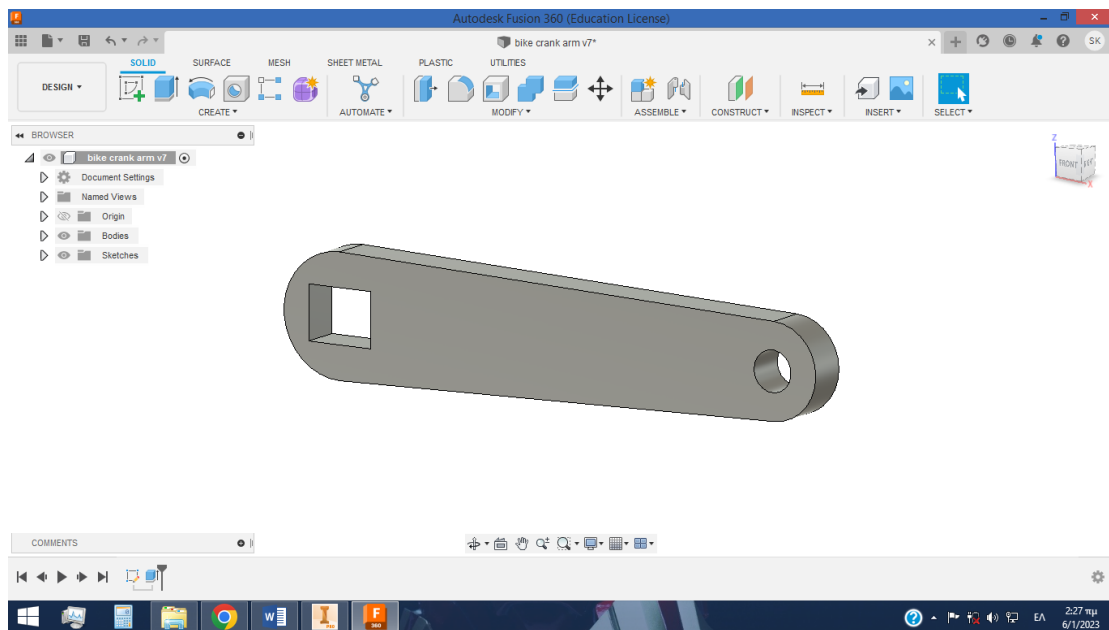


Εικόνα 4.2: Στιγμιότυπο από την πορεία σχεδιασμού του βραχίονα .

Στο περιβάλλον "Sketch", χρησιμοποιούμε τα αντίστοιχα εργαλεία (π.χ. line, circle, rectangles) από τις επιλογές "Create", για να εντάξουμε στο σχέδιο διάφορα σχήματα που μας εξυπηρετούν στη διαδικασία σχεδιασμού.

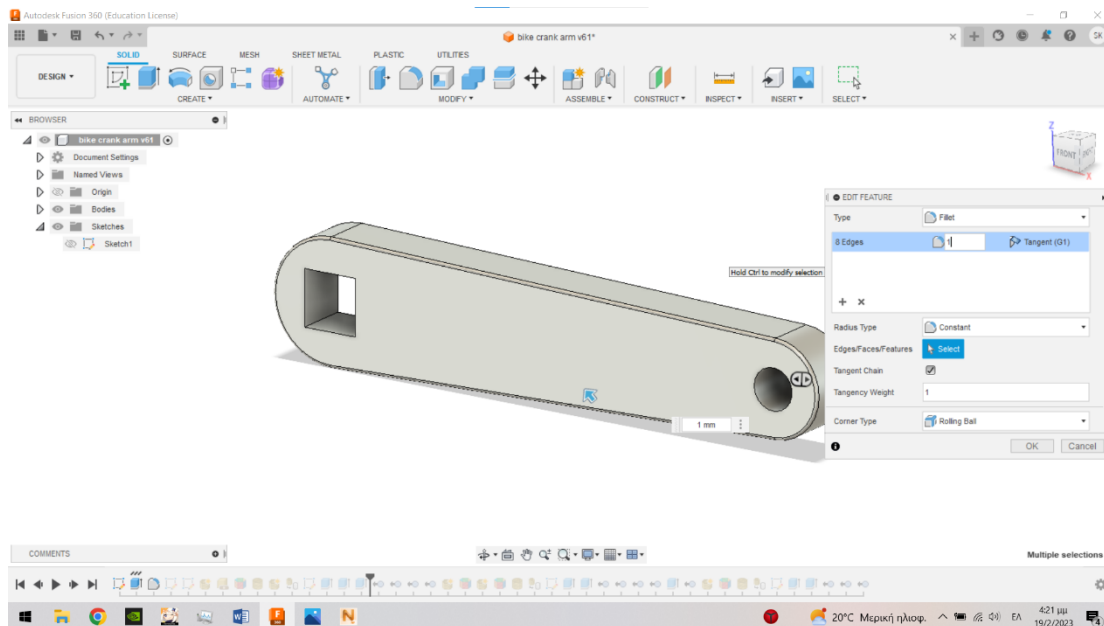


Εικόνα 4.3: Διαδικασία εξώθησης με την εντολή Extrude.



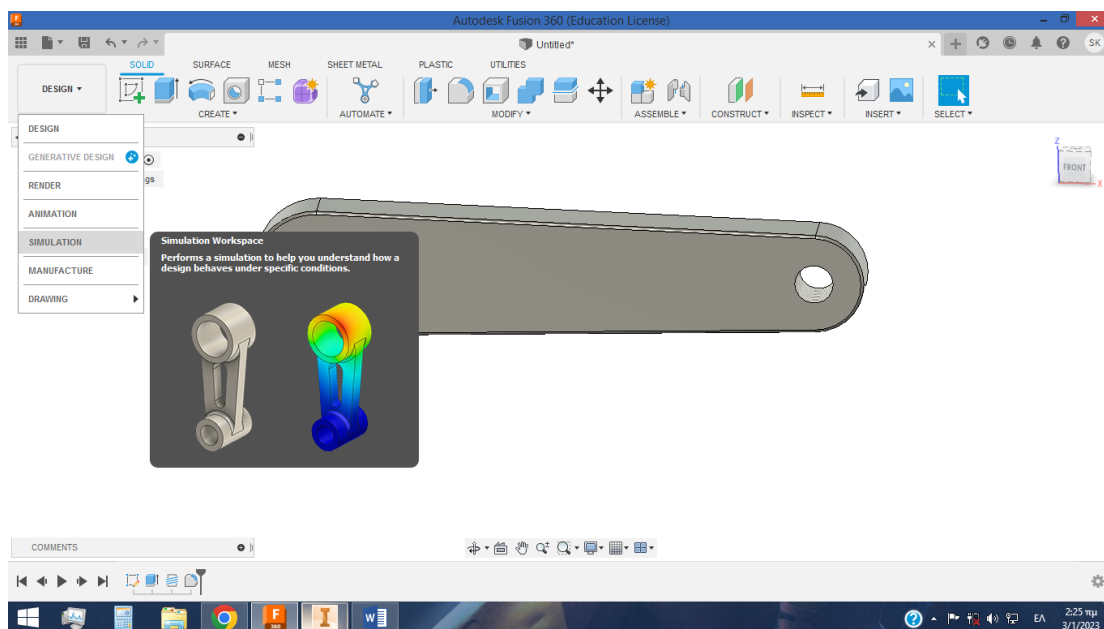
Εικόνα 4.4: Το εξάρτημα μετά τη διαδικασία εξώθησης.

Η δεξιά οπή στην εικόνα 4.4, είναι το σημείο που θα τοποθετηθεί η πεταλιέρα. Αντίθετα, η τετράγωνη οπή που βρίσκεται στο αριστερό τμήμα του βραχίονα είναι το σημείο που θα βιδωθεί στον περιστροφικό άξονα. Η οπή είναι τετράγωνη γιατί ο βραχίονας πρέπει να ακολουθεί τη φορά του περιστροφικού άξονα που βρίσκεται στο κέντρο του ποδηλάτου. Το μέγεθος του βραχίονα αφορά ποδήλατα με τροχούς 24" και άνω.

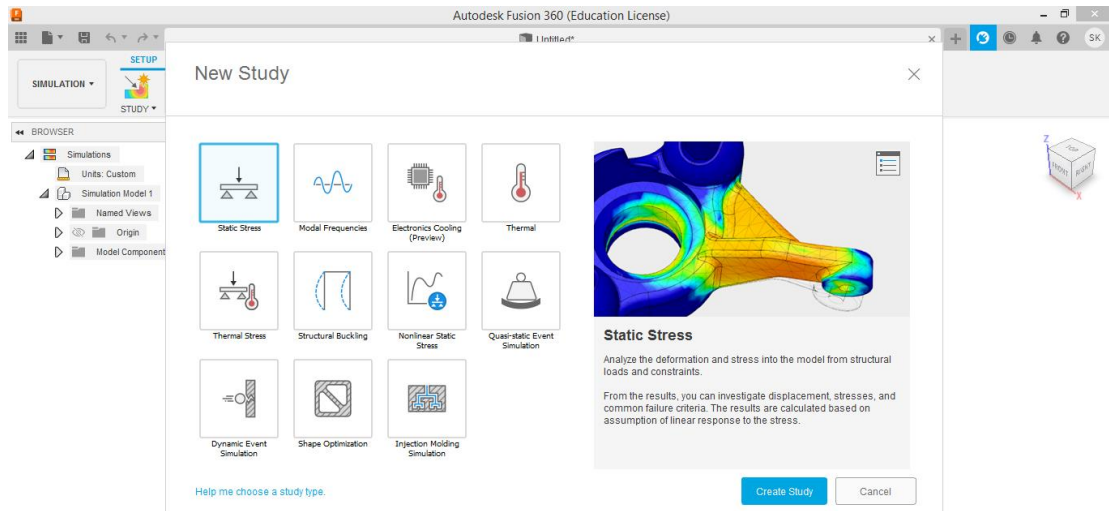


Εικόνα 4.5: Διαδικασία από την μετατροπή των γωνιών του εξαρτήματος σε καμπύλες με την εντολή “Fillet”, στην προκύπτουσα περίπτωση έχει αισθητικό χαρακτήρα .

Το πρόγραμμα Fusion 360 μας προσφέρει επιπλέον εργαλεία πέραν του σχεδιαστικού κομματιού. Ένα από αυτά τα εργαλεία είναι η προσομοίωση “Simulation”. Από τη στιγμή που έχουμε έτοιμο το αρχικό μας εξάρτημα, μπορούμε να περάσουμε στη διαδικασία προσομοίωσης για να ελέγξουμε ότι πληροί της απαιτήσεις που υπάρχουν για τον συγκεκριμένο βραχίονα.

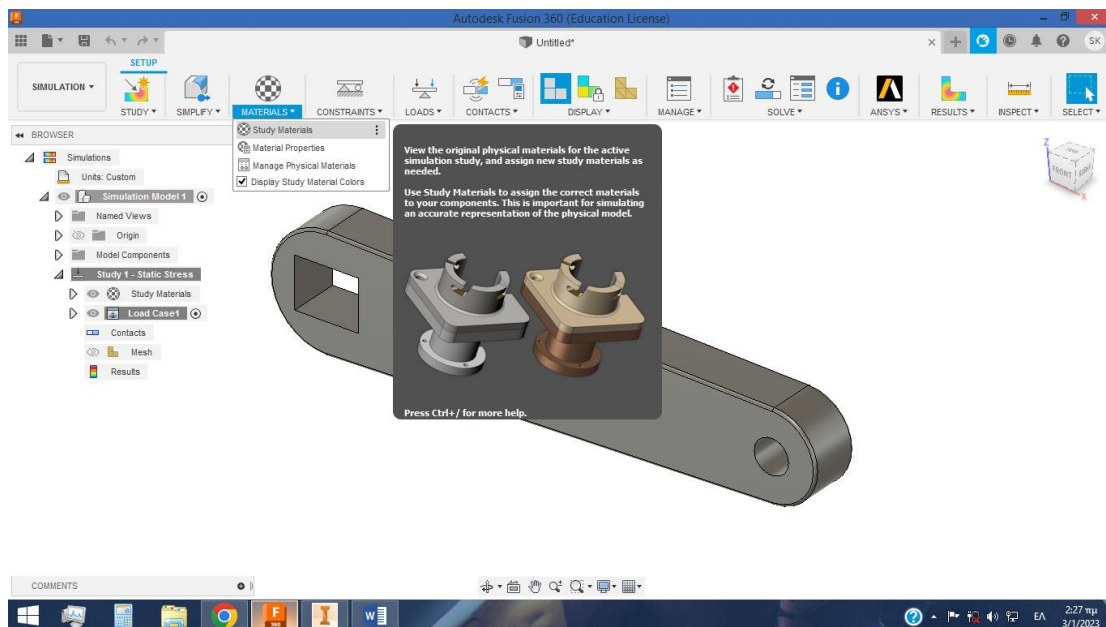


Εικόνα 4.6: Μεταφορά του εξαρτήματος στο περιβάλλον προσομοίωσης του Fusion 360 .

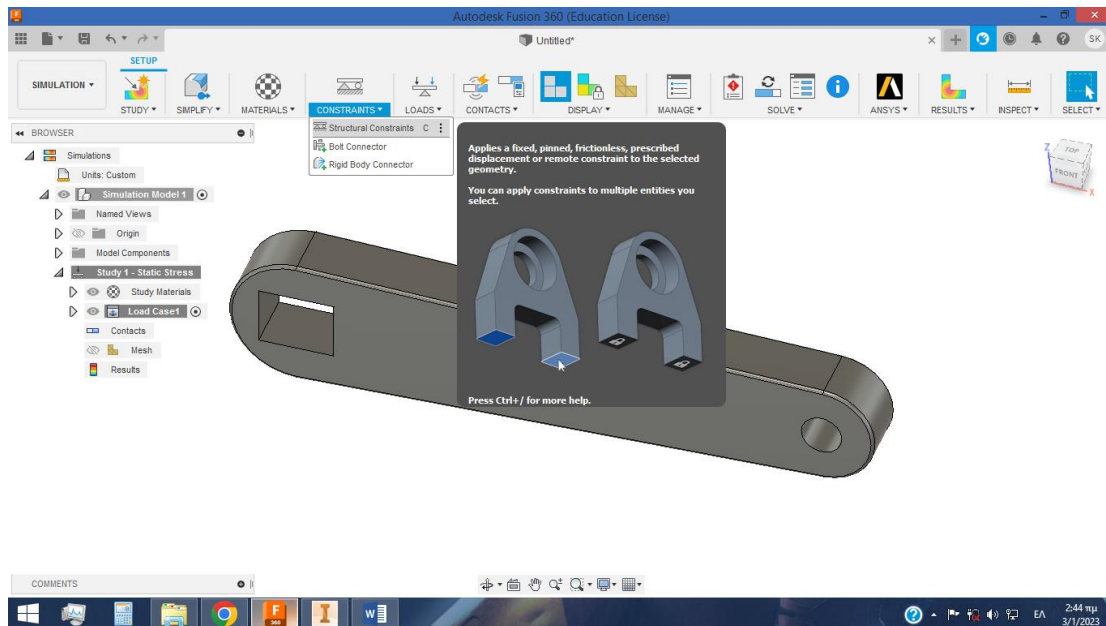


Εικόνα 4.7: Επιλογή της διαδικασίας προσομοίωσης, στην περίπτωση μας επιλέχθηκε η στατική πίεση .

Η προσομοίωση που θα ακολουθηθεί ονομάζεται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Για να προχωρήσουμε στη διαδικασία της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων πρέπει πρώτα να καθοριστούν κάποιες καταστάσεις όπως το υλικό κατασκευής του εξαρτήματος, η έδραση του εξαρτήματος, το σημείο άσκησης δύναμης, ο τύπος της δύναμης και το μέγεθός της (συνήθως σε Newtons). Ακολουθεί η παρουσίαση της συγκεκριμένης διαδικασίας με εικόνες και σχόλια.

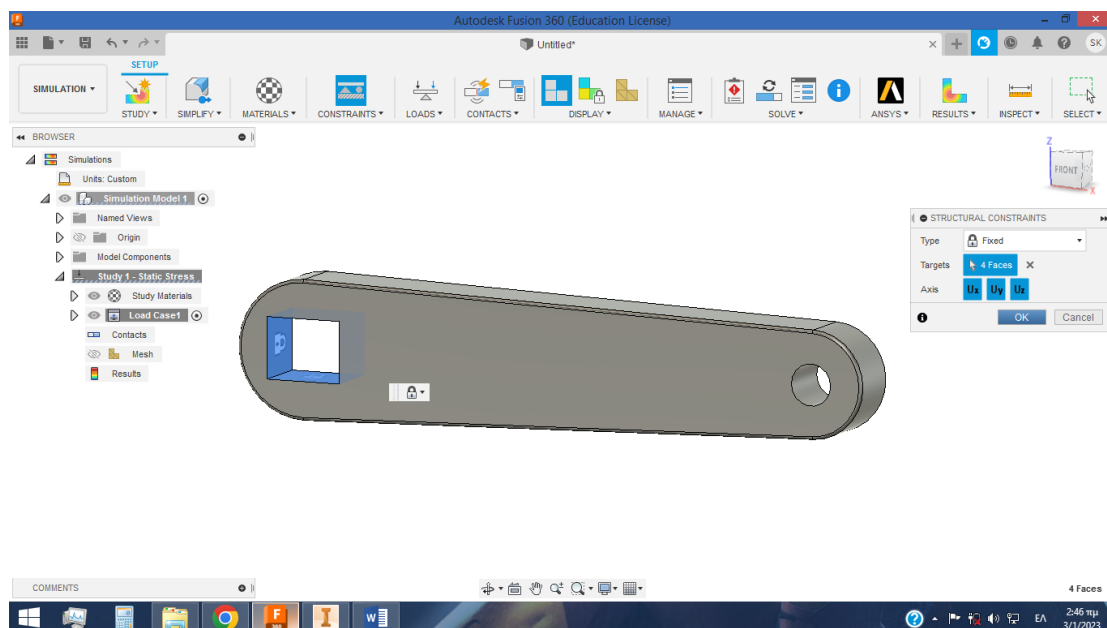


Εικόνα 4.8: Επιλογή υλικού του εξαρτήματος από την επιλογή Study Materials, το υλικό θα είναι αλουμίνιο AISi10mg .



Εικόνα 4.9: Εντολή για τον καθορισμό των βάσεων στήριξης.

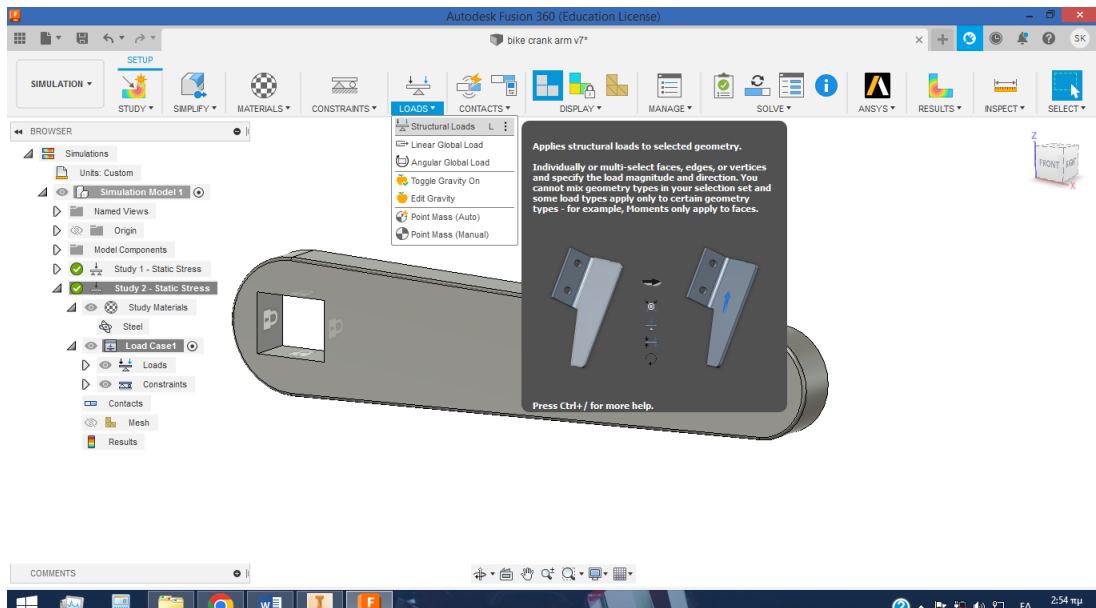
Από την κατηγορία “Constraints” πατώντας στην επιλογή “Structural Constraints” επιλέγουμε την έδραση ή τις εδράσεις του εξαρτήματος, καθώς και τον τύπο (π.χ. σταθερή, άρθρωση κ.τ.λ.).



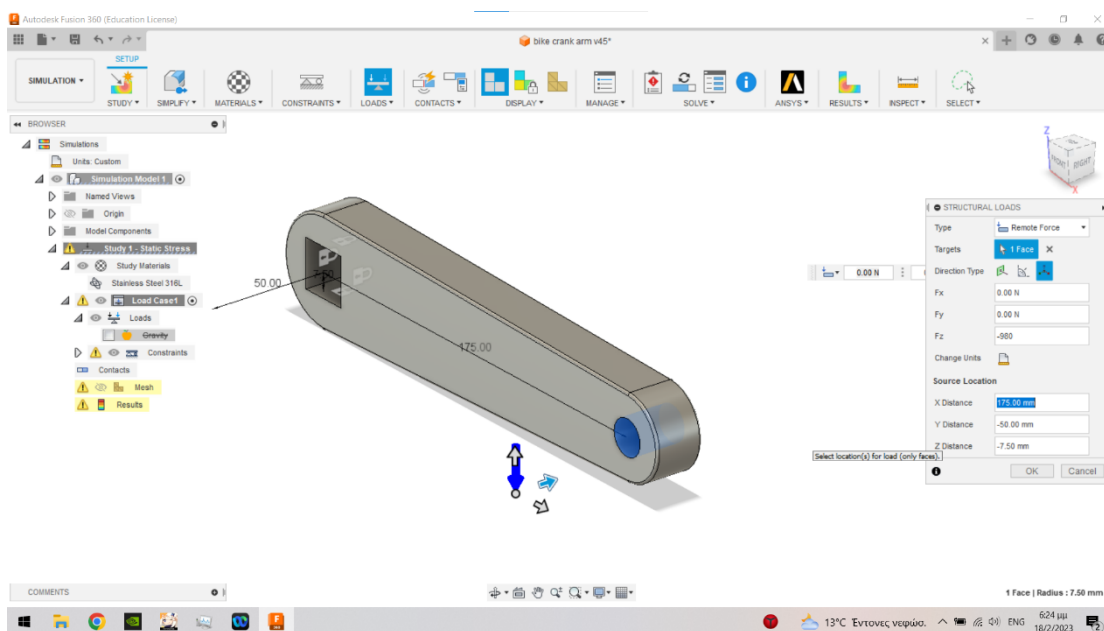
Εικόνα 4.10: Επιλογή των βάσεων στήριξης και καθορισμός του τύπου “fixed”.

Έχει επιλεγθεί ως σταθερή βάση το τμήμα που θα τοποθετηθεί ο βραχίονας από την απέναντι πλευρά των πεταλιών. Παρατηρούμε ότι τα σημεία έχουν γίνει μπλε ενώ εμφανίζεται και το σήμα ενός λουκέτου σε κάθε επιφάνεια που επιλέχθηκε.

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το φορτίο και ο τύπος του εξαρτήματος.



Εικόνα 4.11: Από την κατηγορία “Loads” και την επιλογή “Structural Loads” επιλέγουμε το φορτίο του βραχίονα .

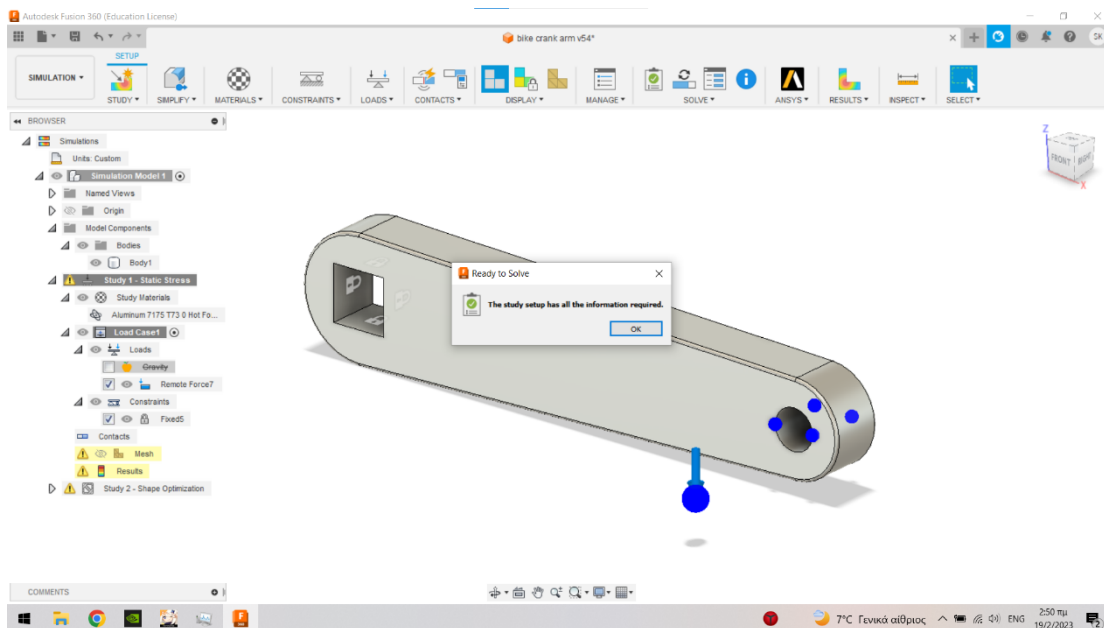


Εικόνα 4.12: Στιγμιότυπο από τη διαδικασία και τον καθαρισμό του φορτίου.

Στην εικόνα 4.12 παρατηρούμε ότι ο βραχίονας είναι σε οριζόντια θέση και η δύναμη που ασκείται είναι κάθετη ως προς τον άξονα X και σε απόσταση 5 εκατοστών από τον βραχίονα. Ο τύπος της δύναμης που επιλέχθηκε είναι η απομακρυσμένη δύναμη “remote force” και έχει επιλεχθεί το μέγεθος 800N. Η τιμή αυτή είναι διπλάσια σε σχέση με την τιμή που ασκείται σε ένα βραχίονα ποδηλάτου [25]. Λόγο της αγωνιστικής κυρίως χρήσης του εξαρτήματος λαμβάνεται υπόψιν η μέγιστη δύναμη που ασκεί ο αγωνιζόμενος για να επιτύχει το μέγιστο μηχανικό πλεονέκτημα κατά τη διάρκεια του αγώνα. Το μέγιστο μηχανικό πλεονέκτημα επιτυγχάνεται όταν η δύναμη ασκείται όσο το δυνατό πιο κάθετα στον οριζόντιο άξονα X. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τη δυσμενέστερη συνθήκη άσκησης δύναμης για τον βραχίονα.

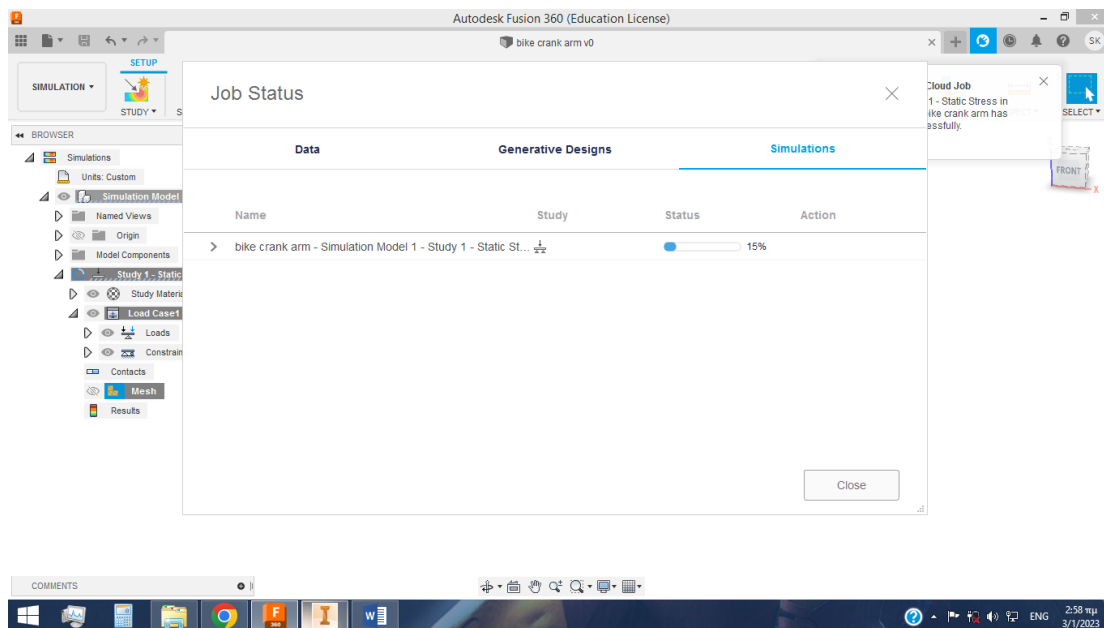
Το πέλμα του αναβάτη ασκεί δύναμη πάνω στην πεταλιέρα που βρίσκεται σε απόσταση από τον βραχίονα. Το μεγαλύτερο μέρος της δύναμης ασκείται στα πρώτα εκατοστά του μετατόριστου του πέλματος του αναβάτη. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η απόσταση 5 εκατοστών.

Μετά την ολοκλήρωση των προηγούμενων σταδίων της διαδικασίας, γίνεται ένας τελικός έλεγχος προκειμένου να διαπιστωθεί ότι πληρούνται όλα τα κριτήρια για το επόμενο στάδιο, αυτό της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Ο τελικός έλεγχος, λοιπόν, εκτελείται με τον εντολή Pre-check (βλ. εικόνα 4.13).

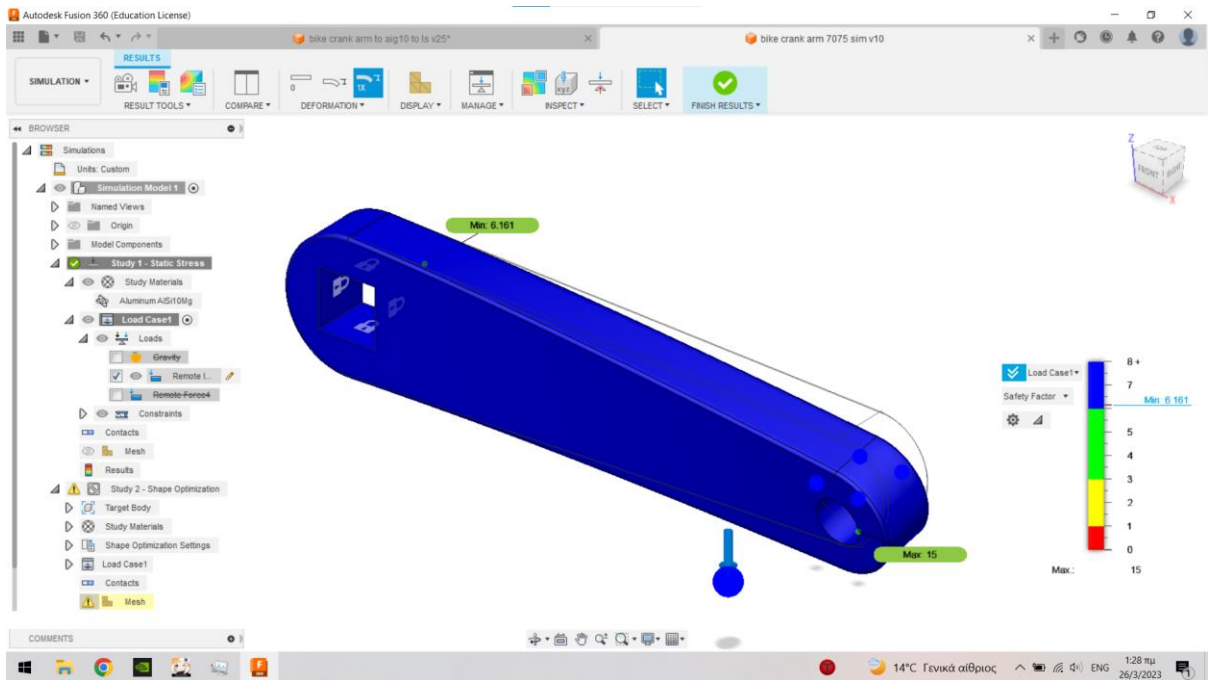


Εικόνα 4.13: Έλεγχος πριν την έναρξη διαδικασίας της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων .

Πατώντας στην εντολή Solve, ξεκινάει η διαδικασία της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων.

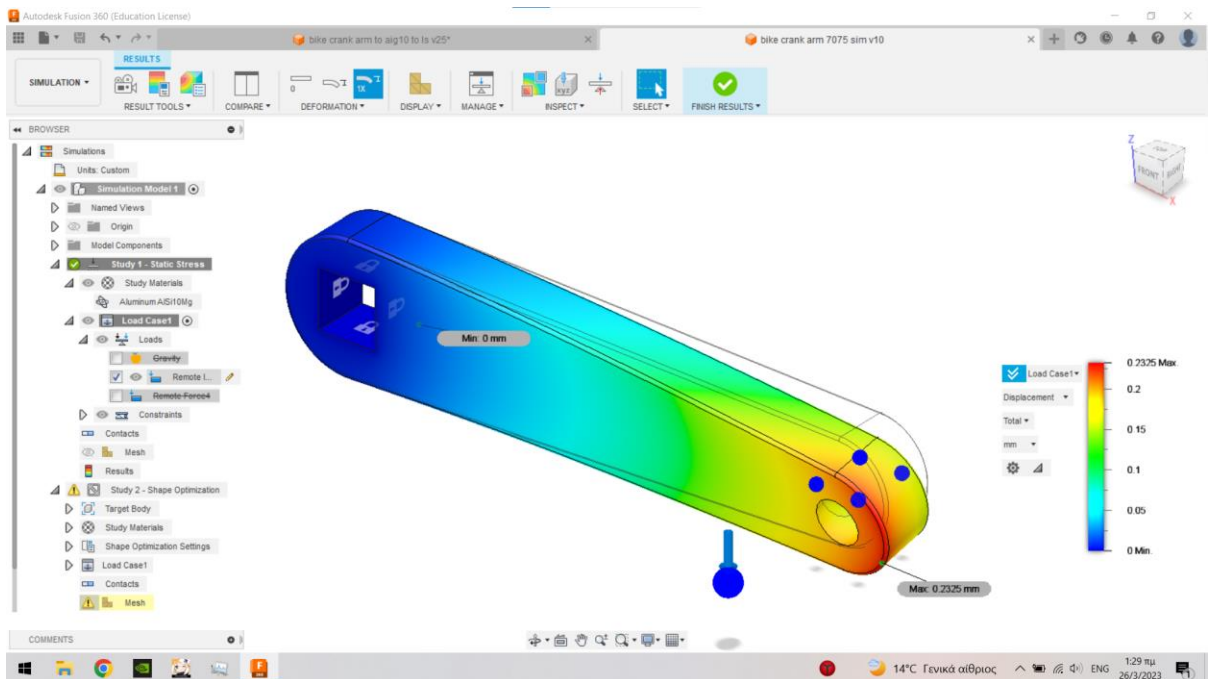


Εικόνα 4.14: Στιγμιότυπο διαδικασίας του υπολογισμού των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.15: Αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, Safety Factor.

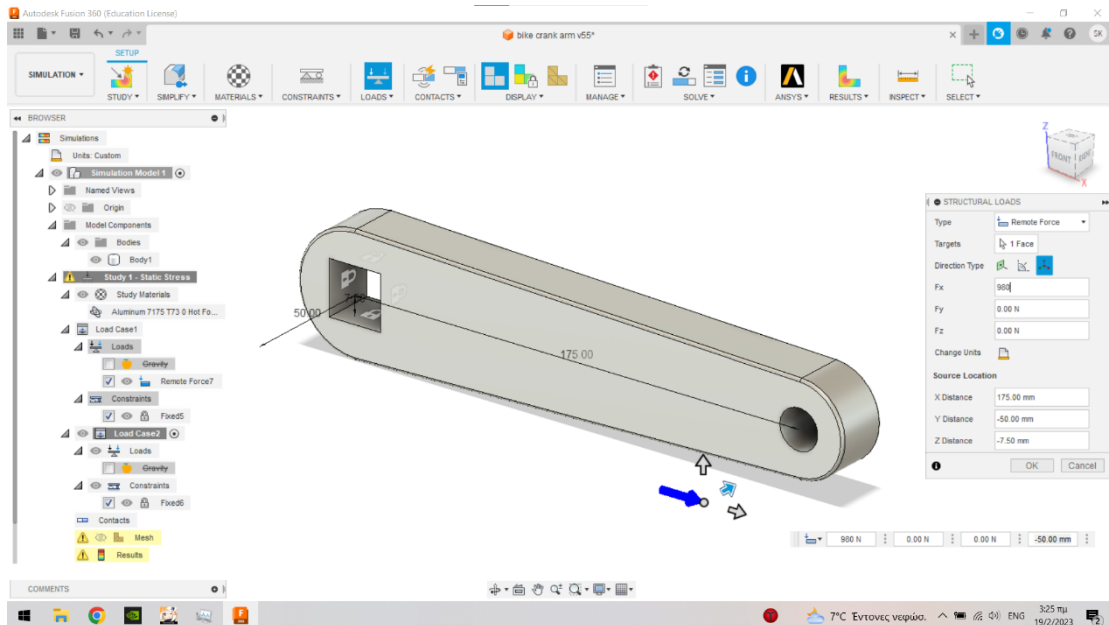
Από τη συγκεκριμένη διαδικασία παρατηρούμε ότι ο βραχίονας που σχεδιάστηκε έχει 6,161 μονάδες στον συντελεστή ασφαλείας "Safety Factor". Στον συγκεκριμένο συντελεστή, όταν έχουμε τιμή πάνω από 3, τα εξαρτήματα είναι απόλυτα ασφαλή και για κρίσιμες εφαρμογές ασφαλείας (π.χ. βάση στερέωσης σε μόνιμη κατασκευή σε περιβάλλον με ανθρώπινη παρουσία κ.α.).



Εικόνα 4.16: Αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, για την μετατόπιση του βραχίονα.

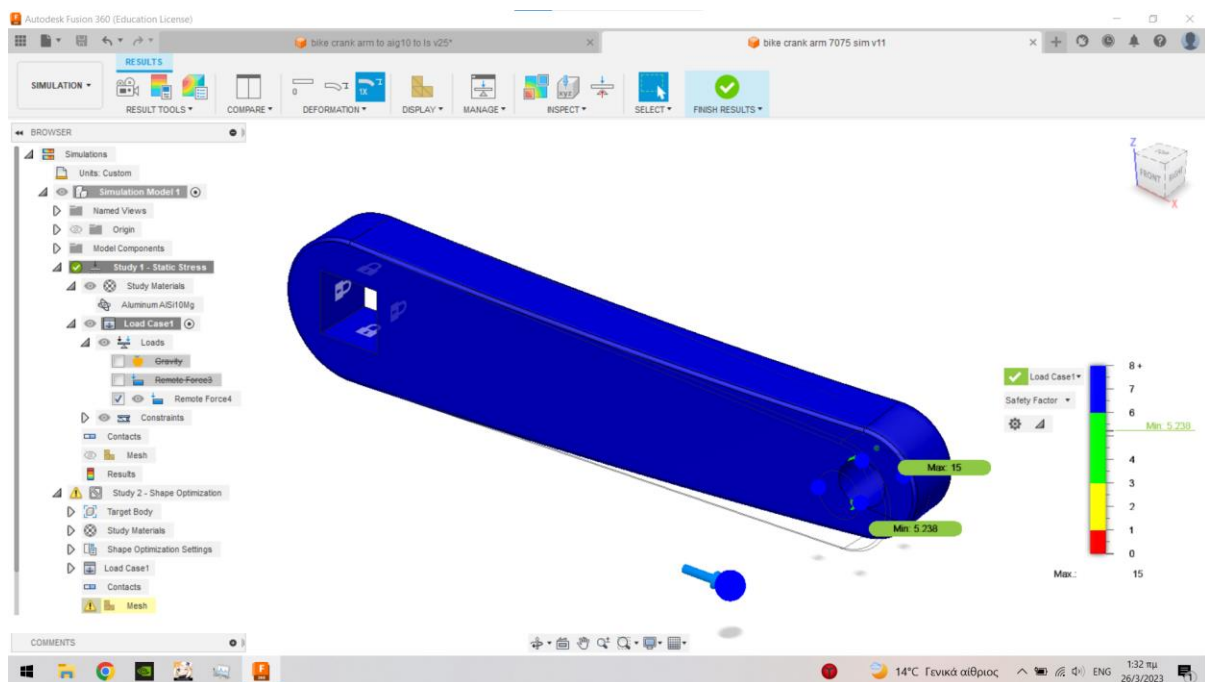
Στην εικόνα 4.16 παρατηρούμε πως η μετατόπιση του βραχίονα είναι μόλις 0,2325mm. Για το μέγεθος δυνάμεων που ασκούνται στην συγκεκριμένη ανάλυση, και με βάση το είδος της εφαρμογής, τιμές μετατόπισης ακόμα και 1,5mm κρίνονται αποδεκτές.

Στον συγκεκριμένο βραχίονα θα εφαρμοστεί και 2^η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με διαφορετικό τύπο φορτίου. Στη 2^η ανάλυση θα εξετάσουμε τον συντελεστή ασφαλείας και την μετατόπιση του βραχίονα στην ίδια τιμή δύναμης αλλά με κατεύθυνση παράλληλα αυτή την φορά στον άξονα X. Είναι η συνθήκη στην οποία θα βρίσκεται ο βραχίονας του ποδηλάτου όταν ο αναβάτης βρίσκεται όρθιος στο ποδήλατο και ο βραχίονας είναι κάθετος ως προς το έδαφος.



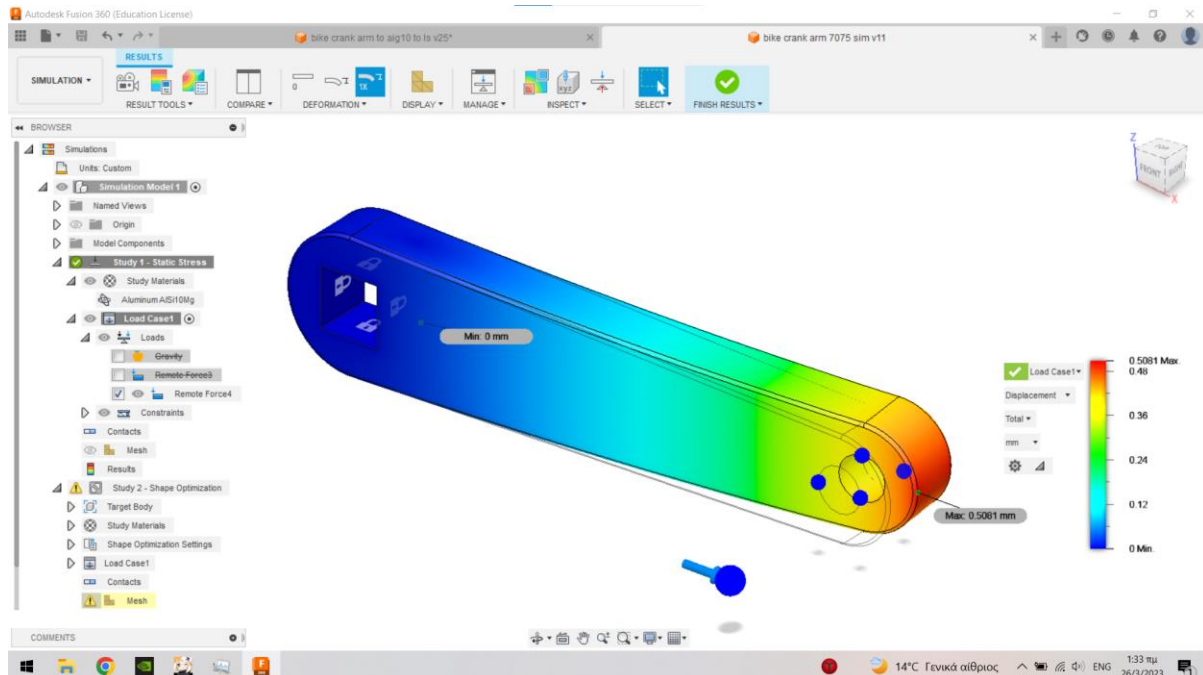
Εικόνα 4.17: Στιγμιότυπο από τη διαδικασία και τον καθαρισμό της δύναμης παράλληλα στον άξονα X.

Στην εικόνα 4.17 εφαρμόζουμε την άσκηση δύναμης πάλι σε απόσταση 5 εκατοστών με την ίδια τιμή 800N. Την δύναμη αυτή την εφαρμόζουμε ξεχωριστά γιατί οι δυο δυνάμεις στον βραχίονα θα ασκούνται ετεροχρονισμένα.



Εικόνα 4.18: Αποτελέσματα από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, Safety Factor, για την δύναμη που ασκείται παράλληλα με τον άξονα X.

Στην εικόνα 4.18 παρατηρούμε ότι ο βαθμός του συντελεστή ασφαλείας είναι 5,238, πολύ περισσότερο ακόμα και από το όριο του 3.



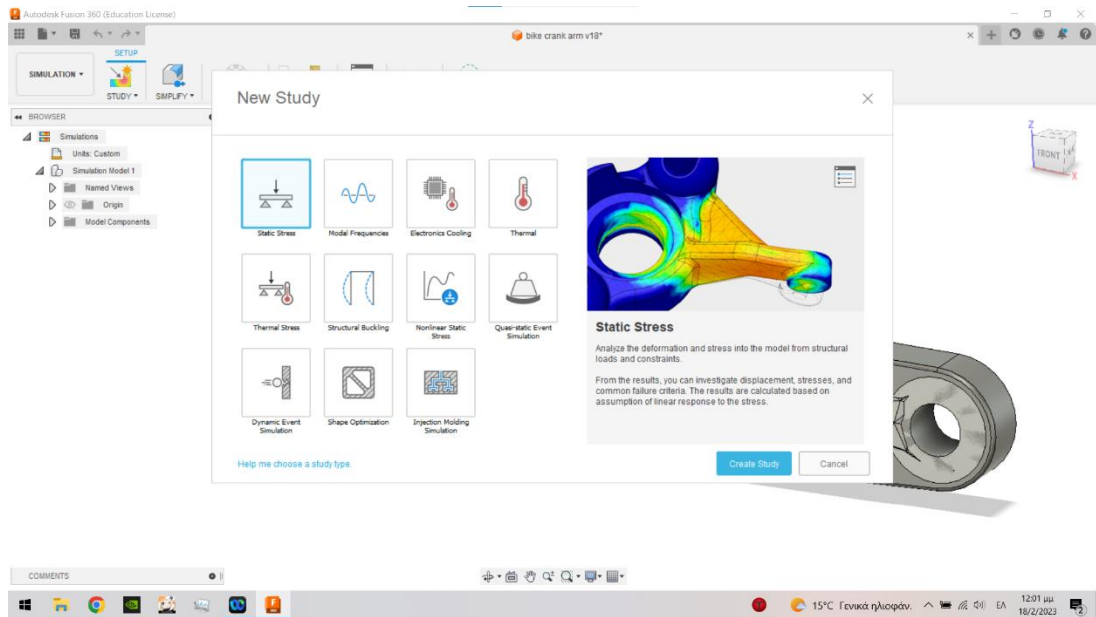
Εικόνα 4.19: Αποτελέσματα από την μετατόπιση του βραχίονα για το φορτίο παράλληλα στον άξονα X.

Στην εικόνα 4.19 το αποτέλεσμα της μετατόπισης είναι 0,5061mm το οποίο είναι αμελητέο. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως ο βραχίονας που σχεδιάστηκε υπερπληρεί τα κριτήρια αντοχής για την εφαρμογή που προορίζεται. Τέλος, το βάρος του συγκεκριμένου εξαρτήματος είναι 410 γραμμάρια.

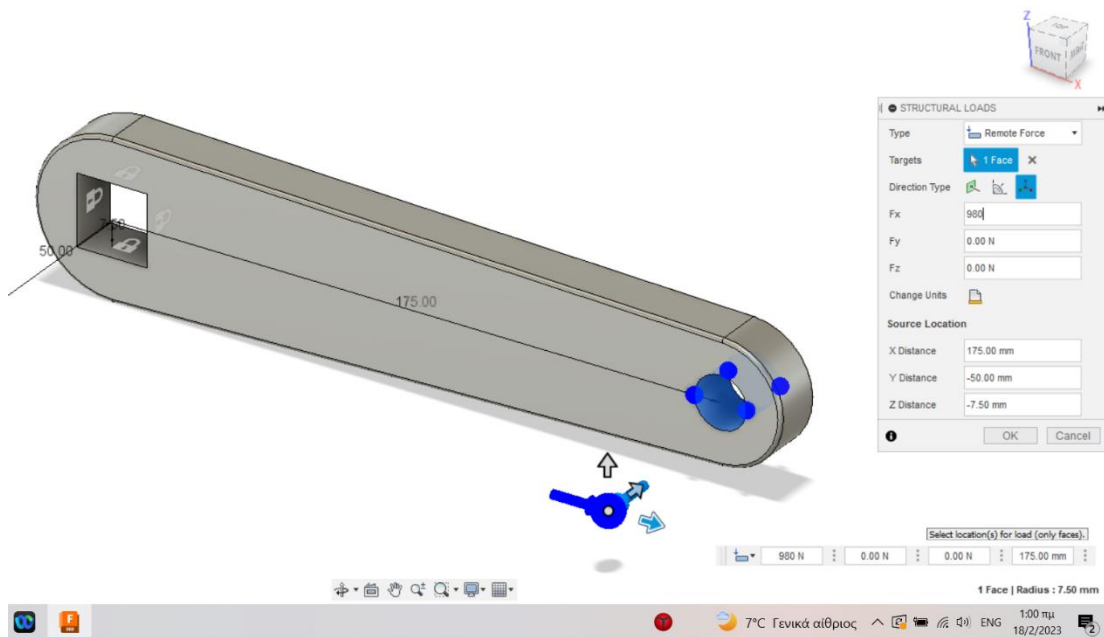
Οποιαδήποτε περαιτέρω αξιολόγηση, ανάλυση και επανασχεδιασμού της γεωμετρίας του βραχίονα, θα υποκείνται στον συντελεστή ασφαλείας και την μέγιστη μετατόπιση, ως κριτήρια και προδιαγραφές που ορίζονται με βάση τα προαναφερόμενα στοιχεία.

Μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων του βραχίονα της πεταλιέρας, εφαρμόζεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης, με σκοπό την ελάφρυνσή της από την περιττή μάζα.

Για τη συγκεκριμένη διαδικασία θα χρησιμοποιήσουμε και πάλι το πρόγραμμα της Autodesk, το Fusion 360. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα η εντολή Shape optimization μας δίνει παρόμοια αποτελέσματα με την εντολή topology optimization άλλων προγραμμάτων.

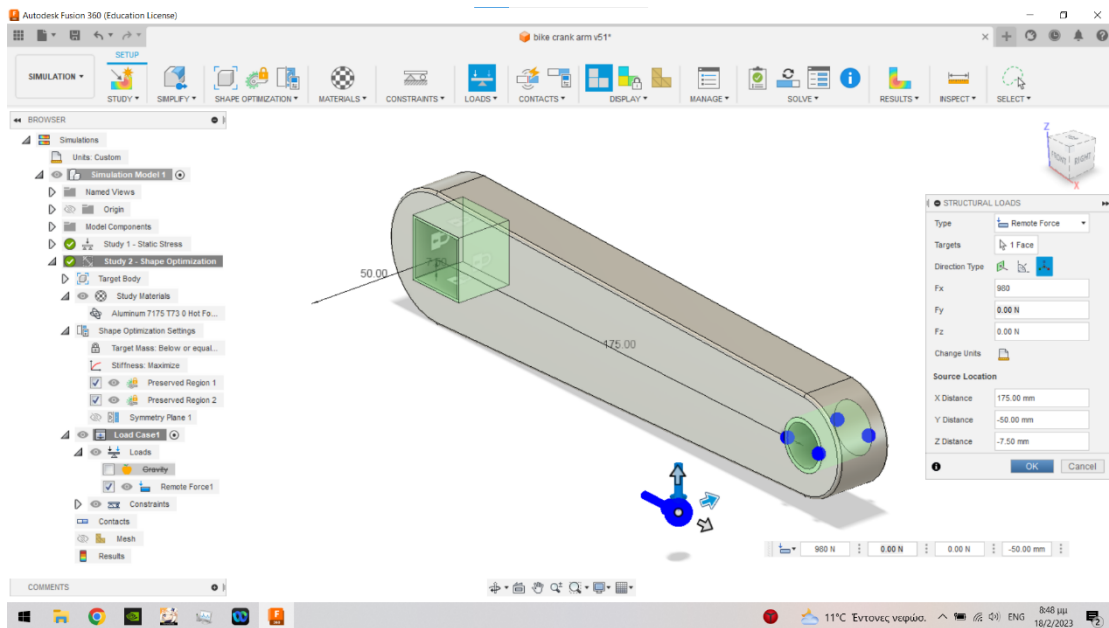


Εικόνα 4.20: Μετάβαση στο περιβάλλον προσομοίωσης για την βελτιστοποίηση.



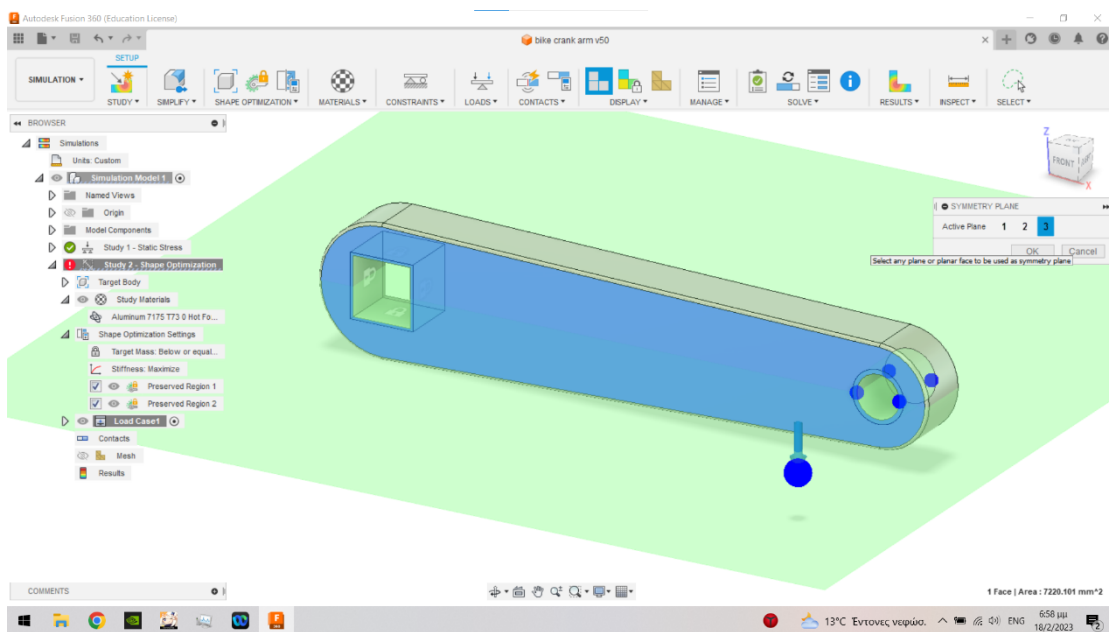
Εικόνα 4.21: Καθορισμός έδρασης και φορτίων στον βραχίονα.

Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, όπως και στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκε νωρίτερα πρέπει να καθορίσουμε την έδραση του βραχίονα καθώς και το φορτίο του. Αυτό γίνεται για να καθοριστεί η μάζα με τη μεγαλύτερη ενεργειακή συμμετοχή. Αυτή την φορά όμως θα εφαρμόσουμε ταυτόχρονα τις δυο δυνάμεις που αναλύσαμε νωρίτερα.



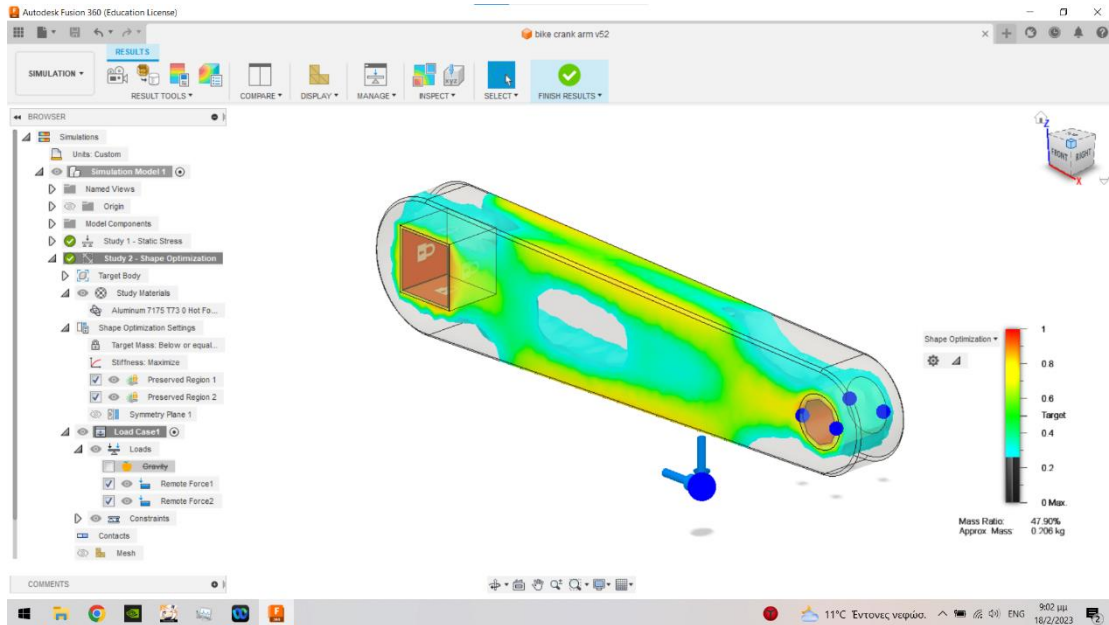
Εικόνα 4.22: Καθορισμός τμημάτων που δεν θα συμμετέχουν στην βελτιστοποίηση.

Με εντολή “Preserved Region 1” καθορίζουμε τα σημεία του εξαρτήματος που δεν θα συμμετέχουν στην βελτιστοποίηση. Αυτά τα σημεία εμφανίζονται με πράσινο χρώμα στην εικόνα 4.22.



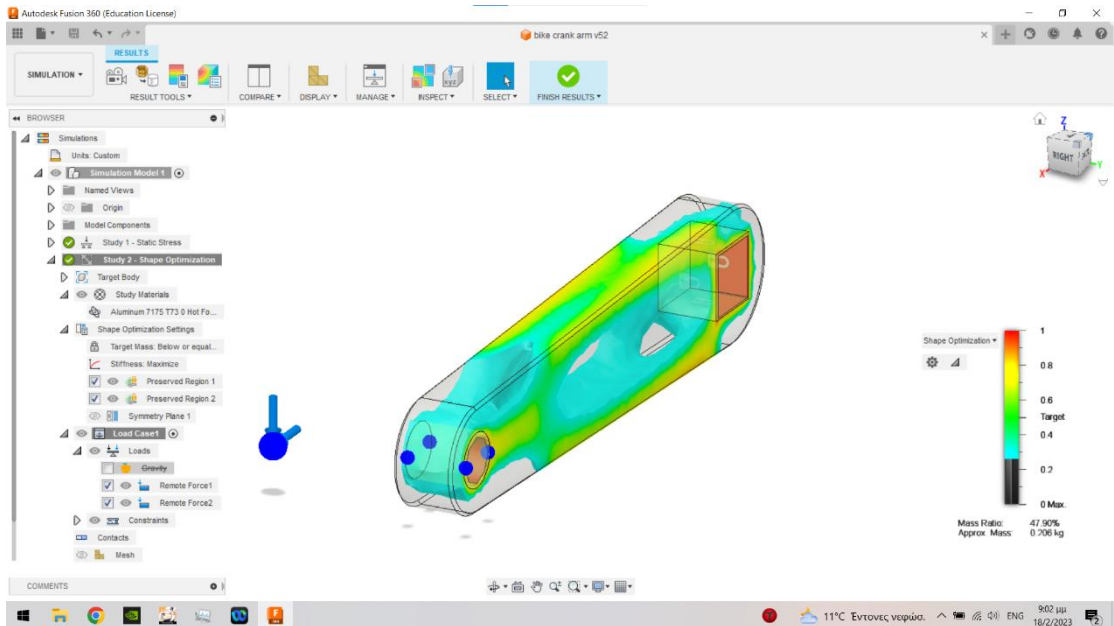
Εικόνα 4.23: Καθορισμός συμμετρικής βελτιστοποίησης ως προς τον άξονα Χ.

Με την εντολή “Symmetry plane” καθορίζουμε την συμμετρία που θέλουμε να έχει το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Μπορούμε να ορίσουμε την συμμετρία ως προς οποιοδήποτε άξονα. Στην εικόνα 4.23 εμφανίζεται με πράσινο χρώμα το επίπεδο που επιλέξαμε να έχουμε συμμετρία.



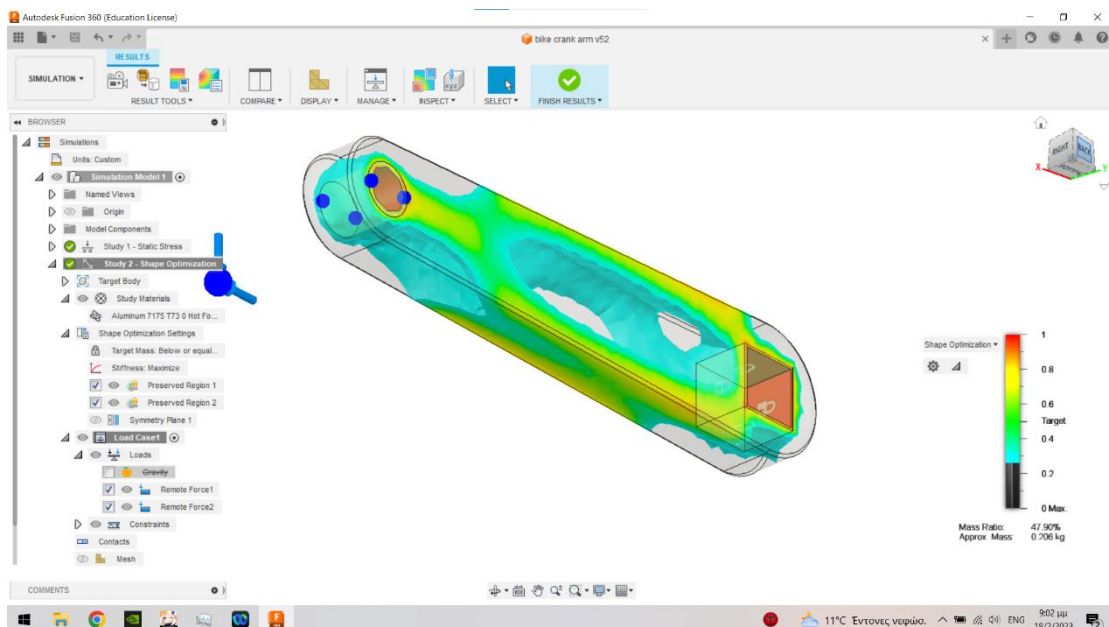
Εικόνα 4.24: Αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης του βραχίονα.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, που πραγματοποιείται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, αναλύει κάθε ένα στοιχείο χωριστά. Στην συνέχεια μπορούμε με τον κέρσορα να καθορίσουμε στην δεξιά στήλη, το ποσοστό ελάφρυνσης που θέλουμε να επιτύχουμε. Αλλάζοντας το ποσοστό αλλάζει σημαντικά και η γεωμετρία του εξαρτήματος. Σκοπός είναι να επιλεγθεί το κατάλληλο ποσοστό ώστε μην αλλοιωθεί η αρχική γεωμετρία του εξαρτήματος, ικανοποιώντας παράλληλα τα κριτήρια που έχουν καθοριστεί για την συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 4.25: Στιγμιότυπο από το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης από την πίσω όψη.

Για να επιτύχουμε το κατάλληλο ποσοστό, πρέπει να γίνει επαλήθευση του βελτιστοποιημένου εξαρτήματος με νέα ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Αν τα αποτελέσματα δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις της εφαρμογής, θα πρέπει να γίνει πάλι η διαδικασία της βελτιστοποίησης μειώνοντας το ποσοστό ελάφρυνσης.

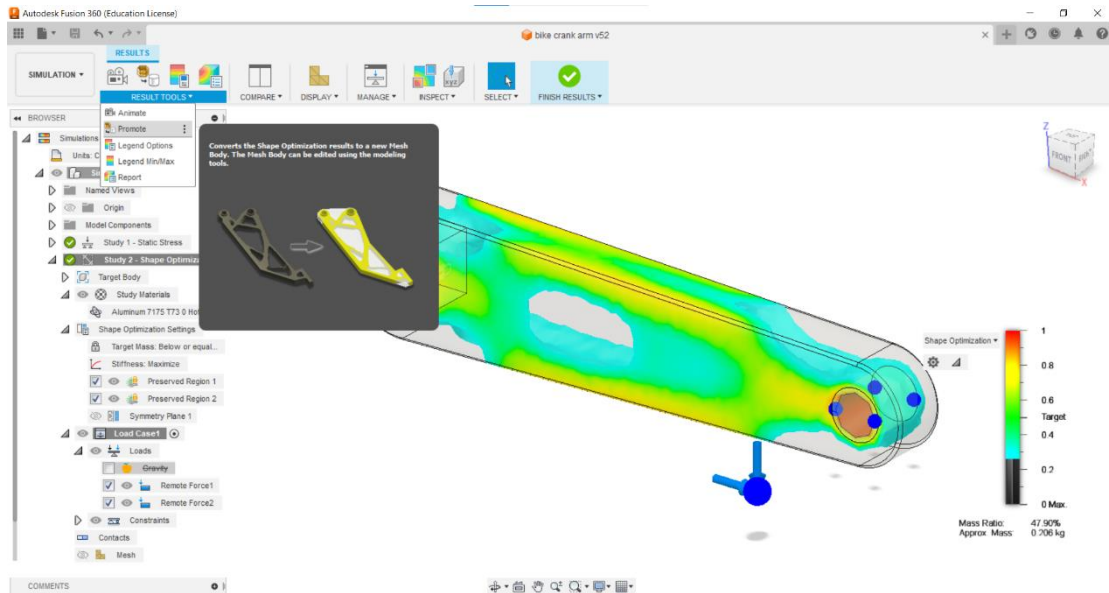


Εικόνα 4.26: Στιγμιότυπο από το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, από διαφορετική οπτική γωνία.

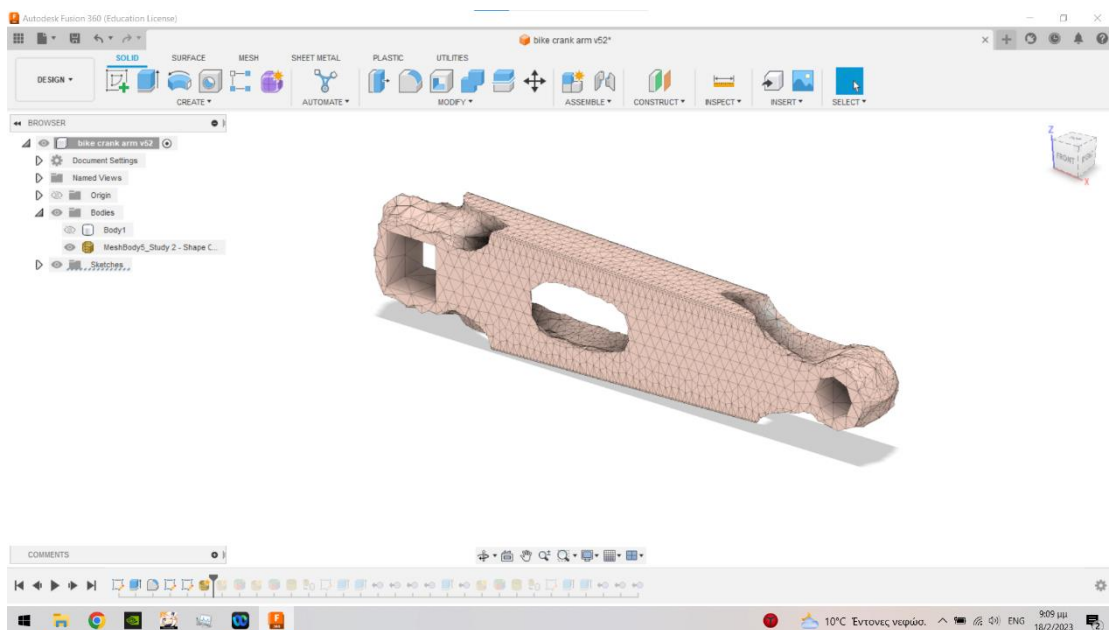
Στην εικόνα 4.26 παρατηρούμε τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Ο χρήστης μπορεί εύκολα να διακρίνει, τη μάζα με τη μεγαλύτερη ενεργειακή συμμετοχή.

Με την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης του βραχίονα στο λογισμικό Fusion 360 της Autodesk, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στην επανασχεδίαση του, αφαιρώντας την περιττή μάζα και διατηρώντας τα τμήματα με τη μεγαλύτερη ενεργειακή συμμετοχή στο εξάρτημα.

Από τη διαδικασία της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων, στην οποία βασίζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, εξάγουμε ένα αρχείο τύπου mesh.



Εικόνα 4.27: Εξαγωγή του βελτιστοποιημένου αποτελέσματος με την εντολή “Promote”.

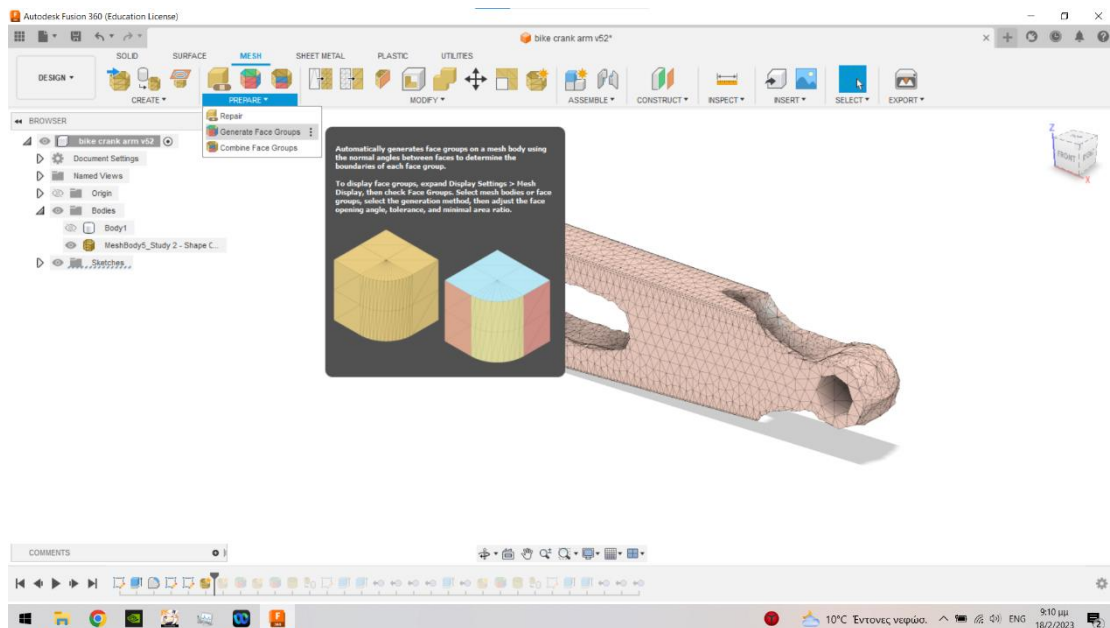


Εικόνα 4.28: Στιγμιότυπο από το βελτιστοποιημένο σχέδιο στο περιβάλλον “Design”.

Στο στάδιο αυτό έχει αφαιρεθεί η μάζα με την μικρότερη ενεργειακή συμμετοχή. Για να προχωρήσουμε στην διαδικασία νέας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για το βελτιστοποιημένο σχέδιο, πρώρα πρέπει να γίνει η μετατροπή του βελτιστοποιημένου σχεδίου τύπου “mesh, σε σχέδιο τύπου ”Solid” .

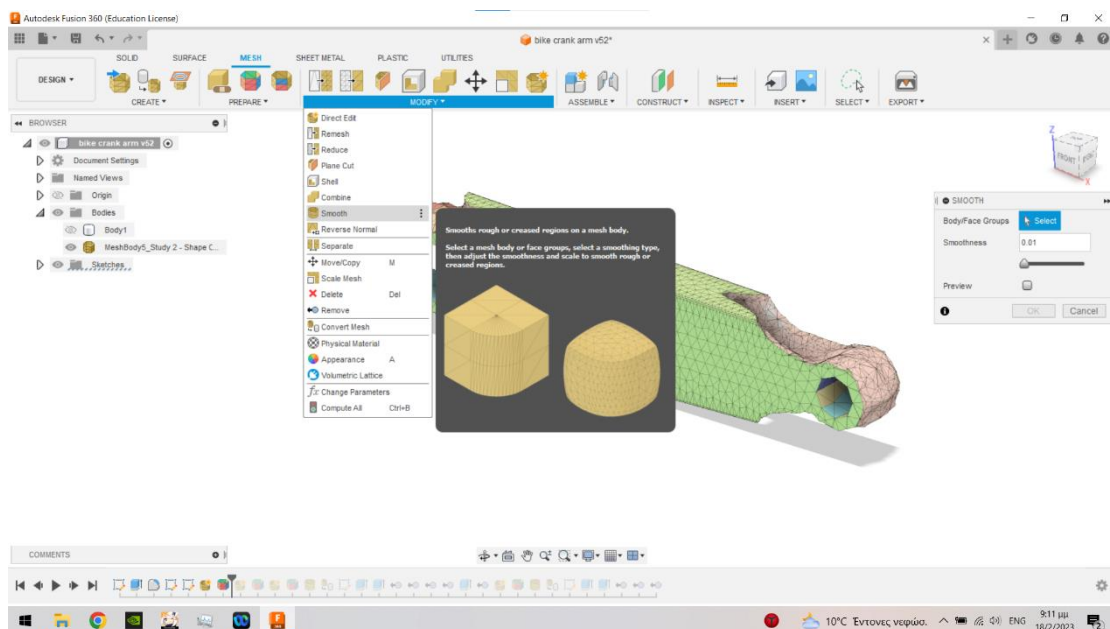
Τα αρχεία τύπου mesh αποτελούνται από τρίγωνα σχεδίασης, αυτό το παρατηρούμε στην προηγούμενη εικόνα 4.28 . Ξεκινάμε με την διαδικασία ομαδοποίησης των τριγώνων ανά

ελάχιστο επιφανειακό στοιχείο (face), χρησιμοποιώντας στην εντολή “Generate face groups” (βλ. εικόνα 4.29).

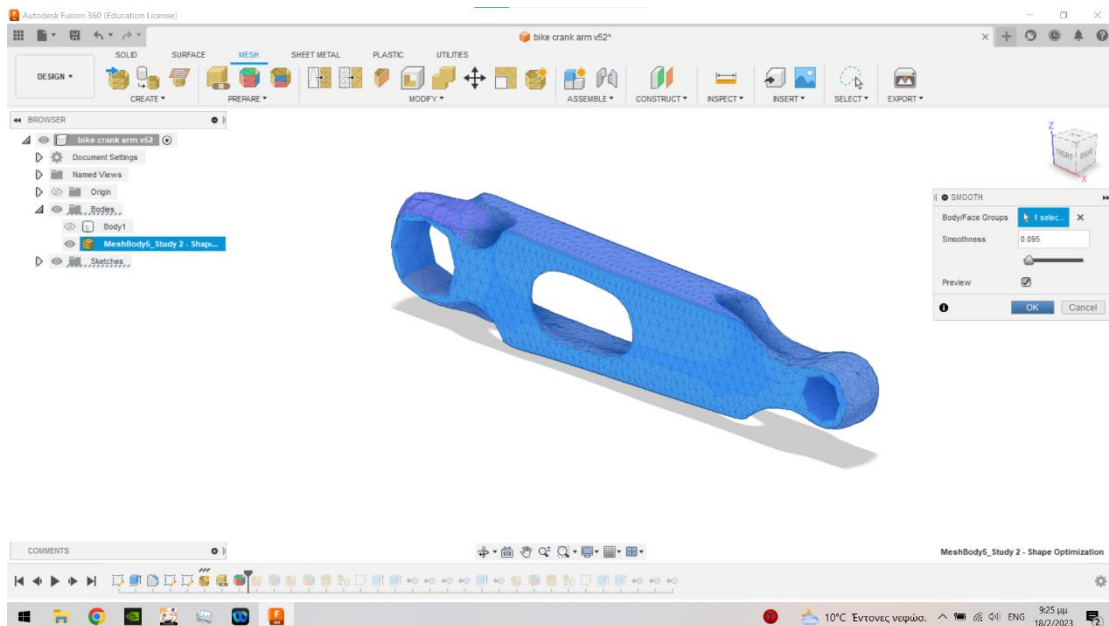


Εικόνα 4.29: Στιγμιότυπο από την διαδικασία της μετατροπής του αρχείου τύπου “Mesh” .

Όπως φαίνεται και στις προηγούμενες εικόνες, η γεωμετρία που έχει προκύψει από το βελτιστοποιημένο σχέδιο, έχει σε πολλά σημεία τραχεία επιφάνεια. Αυτό βελτιώνεται με την εντολή “Smooth”, που μπορεί να επαναφέρει σε μεγάλο βαθμό την λεία επιφάνεια του εξαρτήματος.



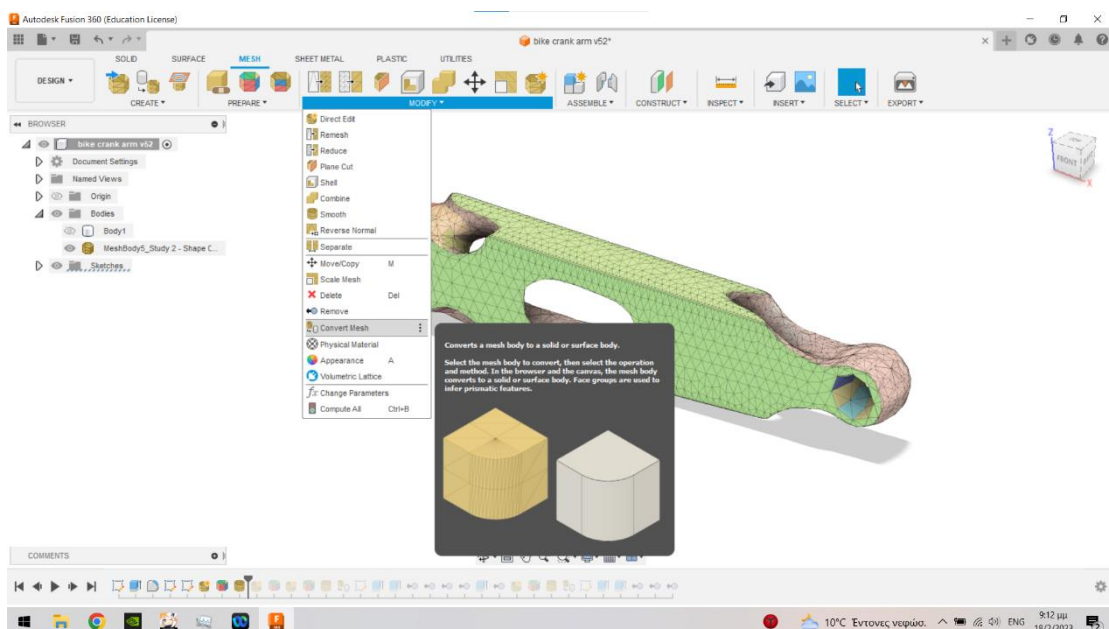
Εικόνα 4.30: Στιγμιότυπο από την διαδικασία επαναφοράς της λείας επιφάνειας του βελτιστοποιημένου εξαρτήματος.



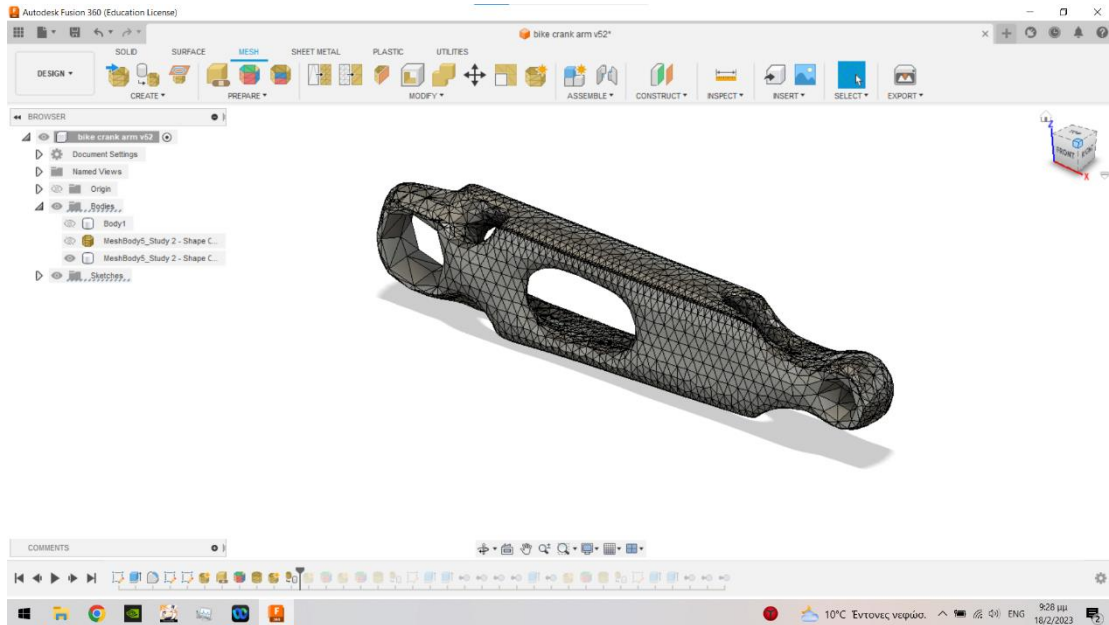
Εικόνα 4.31: Στιγμιότυπο από την επιλογή παραμέτρου, της εντολής “Smooth”.

Η εντολή “Smooth”, μπορεί να πραγματοποιήσει μια «λείανση» του βελτιστοποιημένου εξαρτήματος, αλλά αυτό γίνεται με την ταυτόχρονη αφαίρεση επιπλέον μάζας όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.31. Επιλέγεται μια μικρή τιμή (0,095) για να μην υπάρξει ανεπιθύμητη αφαίρεση μάζας και να αποφευχθεί τυχόν αλλοίωση της γεωμετρίας του σχεδίου.

Αφου ολοκληρωθεί η διαδικασία της λείανσης, προχωράμε στην μετατροπή του αρχείου “mesh” σε αρχείο τύπου “solid”.

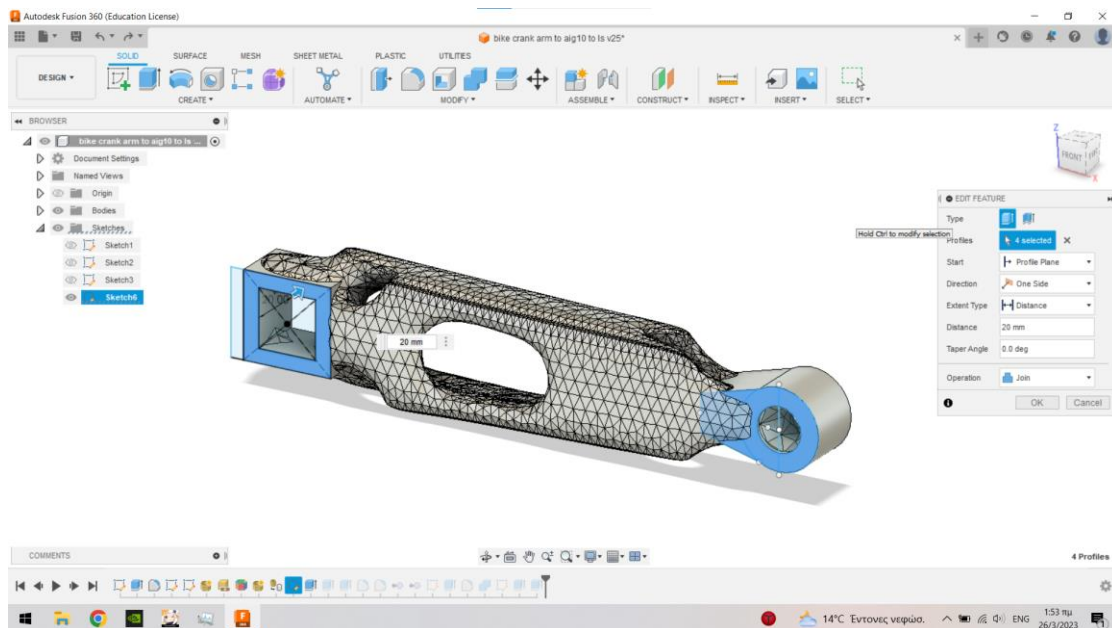


Εικόνα 4.32: Μετατροπή του σχεδίου τύπου mesh σε τύπου “Solid” με την εντολή “Convert mesh” .

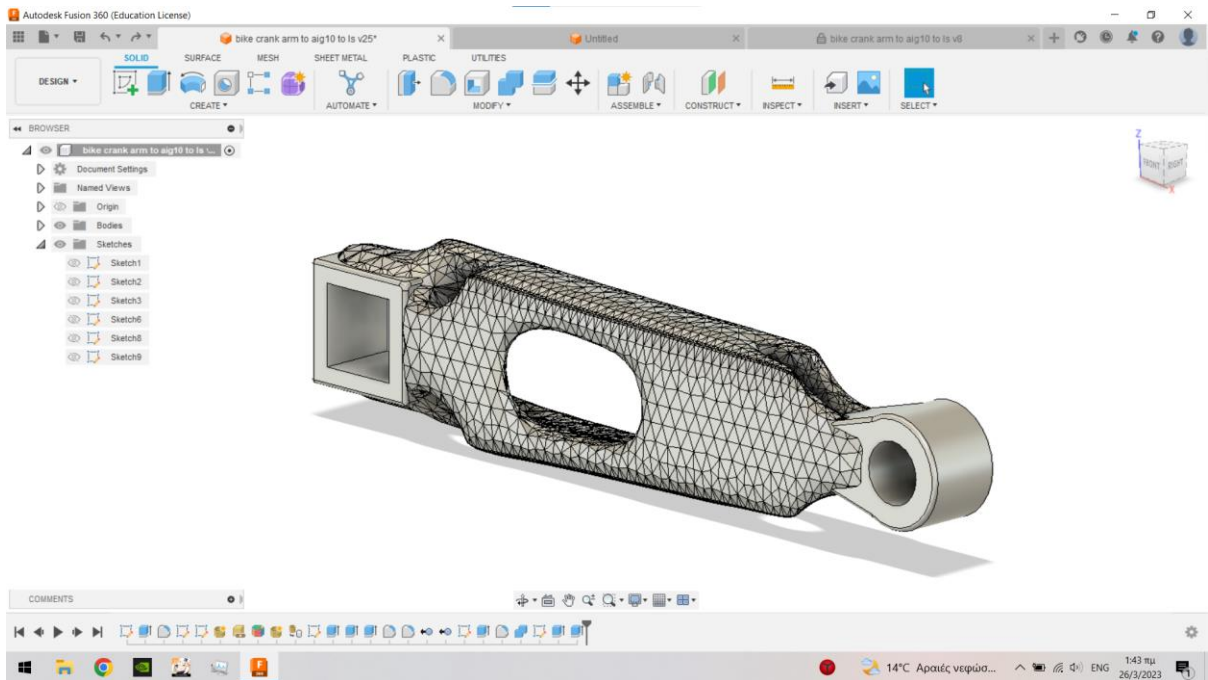


Εικόνα 4.33: Το βελτιστοποιημένο εξάρτημα μετά την μετατροπή του σε αρχείο “Solid”.

Στην εικόνα 4.33 παρατηρούμε πως τα σημεία έδρασης έχουν υποστεί γεωμετρικές αλλοιώσεις από την τελευταία διαδικασία. Για τον λόγο αυτό προχωράμε σε επανασχεδιασμό των συγκεκριμένων βάσεων.

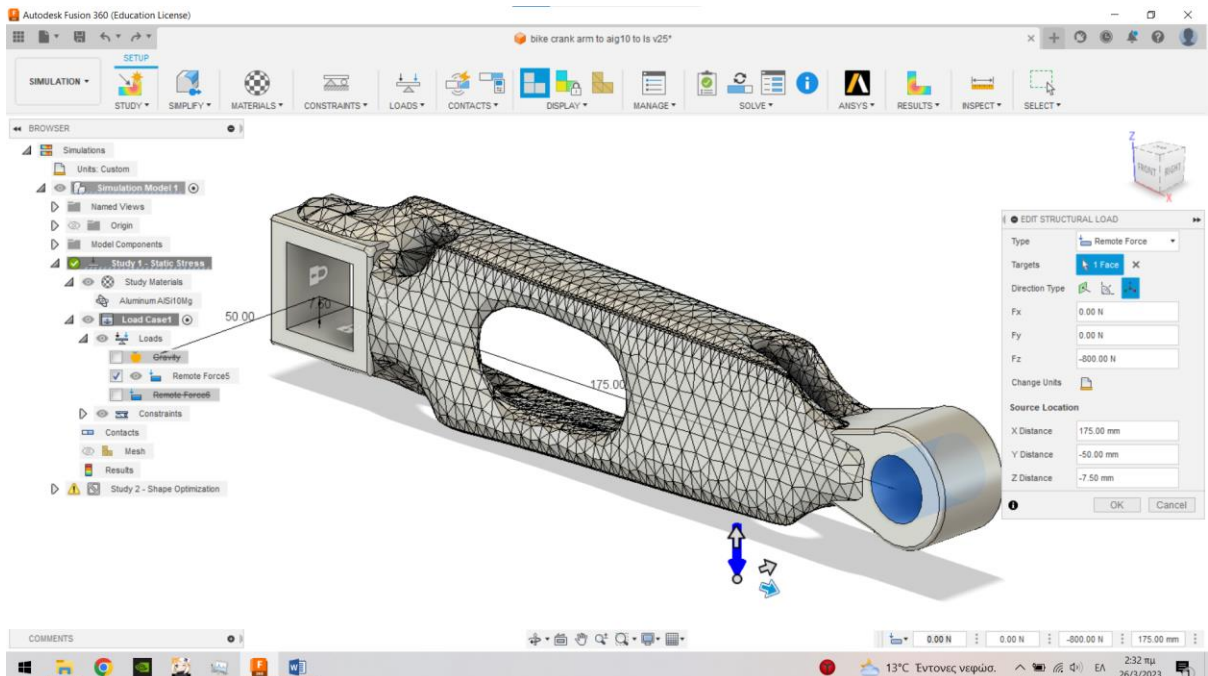


Εικόνα 4.34: Επανασχεδιασμός των βάσεων έδρασης του βραχίονα.

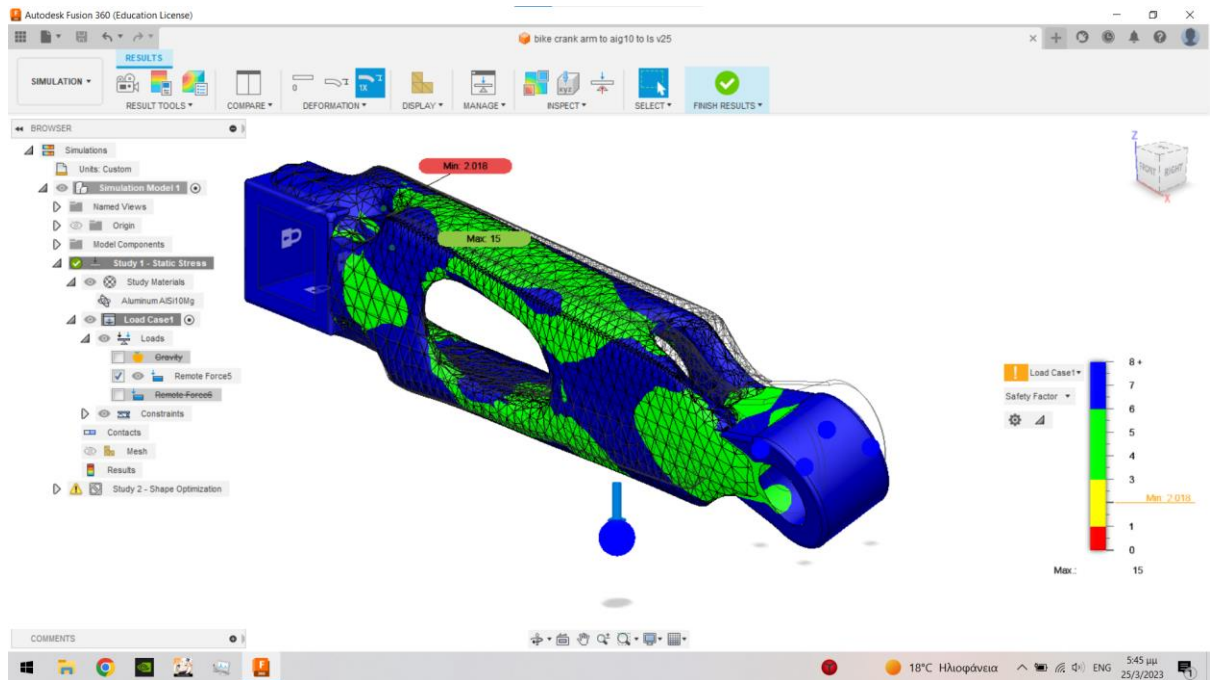


Εικόνα 4.35: Το βελτιστοποιημένο εξάρτημα μετά τον επανασχεδιασμό των βάσεων στήριξης .

Με την ολοκλήρωση του παραπάνω σταδίου, προχωράμε στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων με τρόπο όμοιο με αυτόν που περιγράφηκε νωρίτερα. Θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα για την ίδια άσκηση φορτίου με σκοπό να εξαγάγουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα μετά την ελάφρυνση του βραχίονα. Σε πρώτη φάση εφαρμόζεται δύναμη 800N κάθετα στον άξονα Χ.

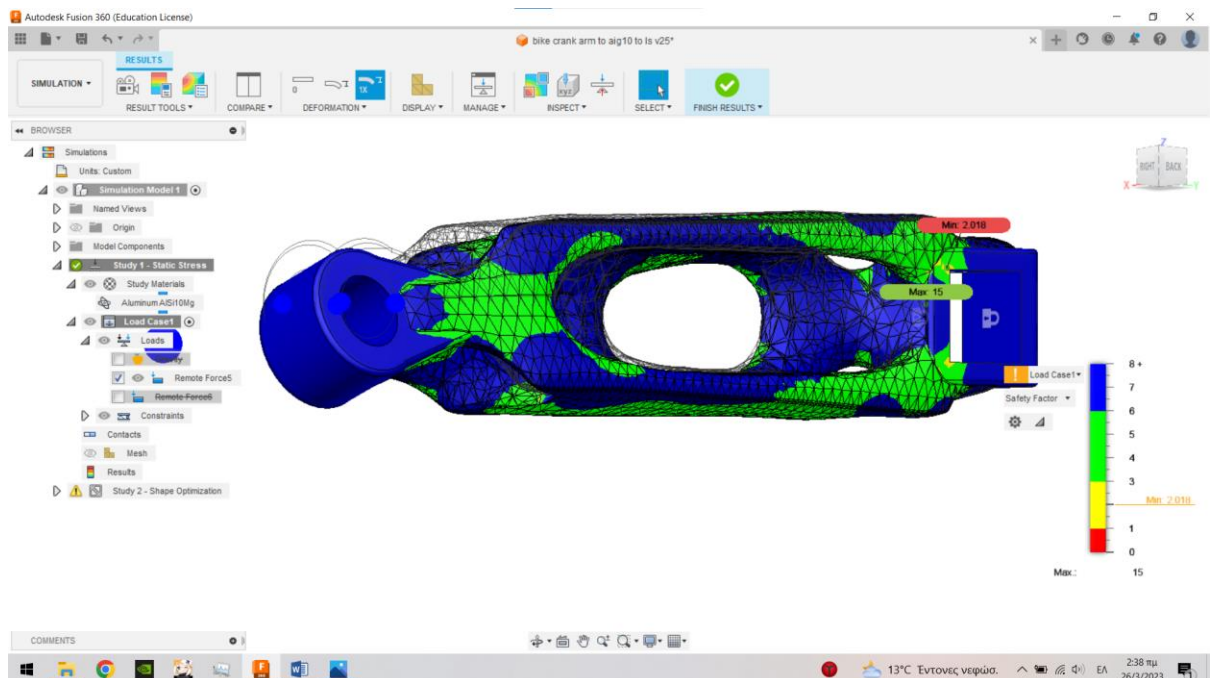


Εικόνα 4.36: Στιγμιότυπο από την διαδικασία της προετοιμασίας για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο βελτιστοποιημένο βραχίονα.

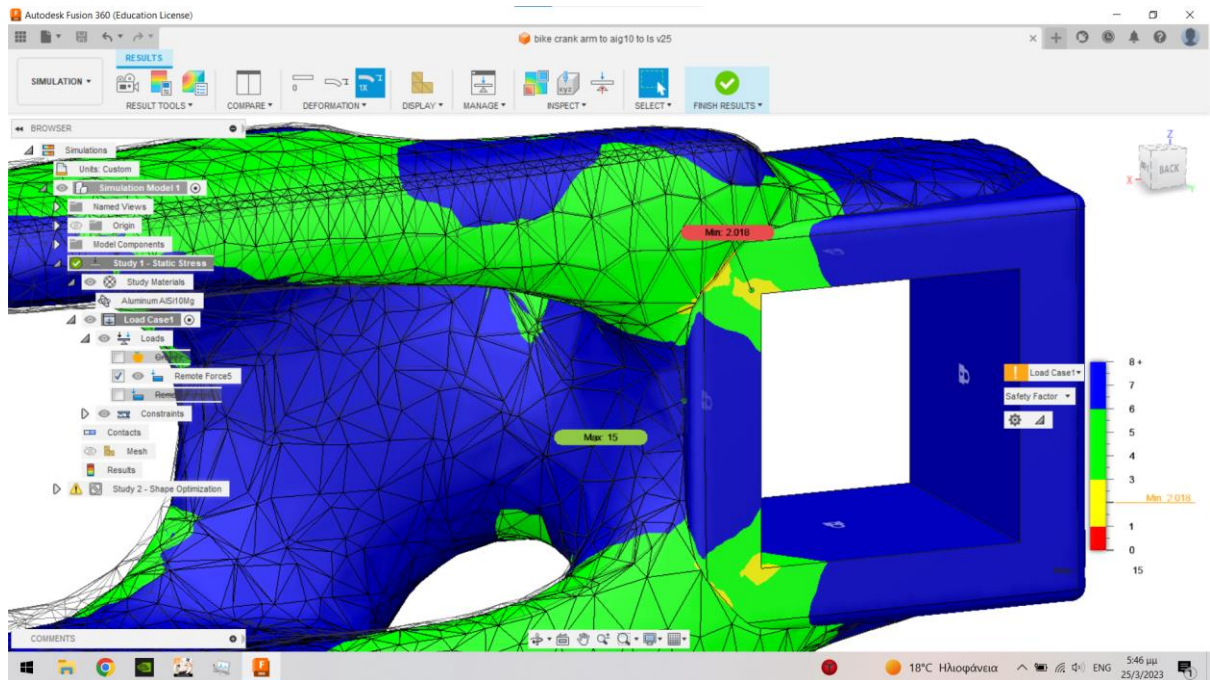


Εικόνα 4.37: Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για του συντελεστή ασφαλείας.

Παρατηρούμε ότι μειώθηκε η ελάχιστη τιμή του συντελεστής ασφαλείας στο 2,018 σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Οι τιμές 1-3 μπορούν να εφαρμοστούν σε εξάρτημα όπου η διεργασία τους δεν είναι κρίσιμη. Για να αυξηθεί η τιμή αυτή, μπορεί να γίνει επανασχεδιασμός του εξαρτήματος προσθέτοντας συμπαγή μάζα στα σημεία όπου ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρός. Στην παρούσα φάση δε θα γίνει αυτό διότι σε δεύτερη φάση το εξάρτημα θα υποστεί επιπλέον επεξεργασία.

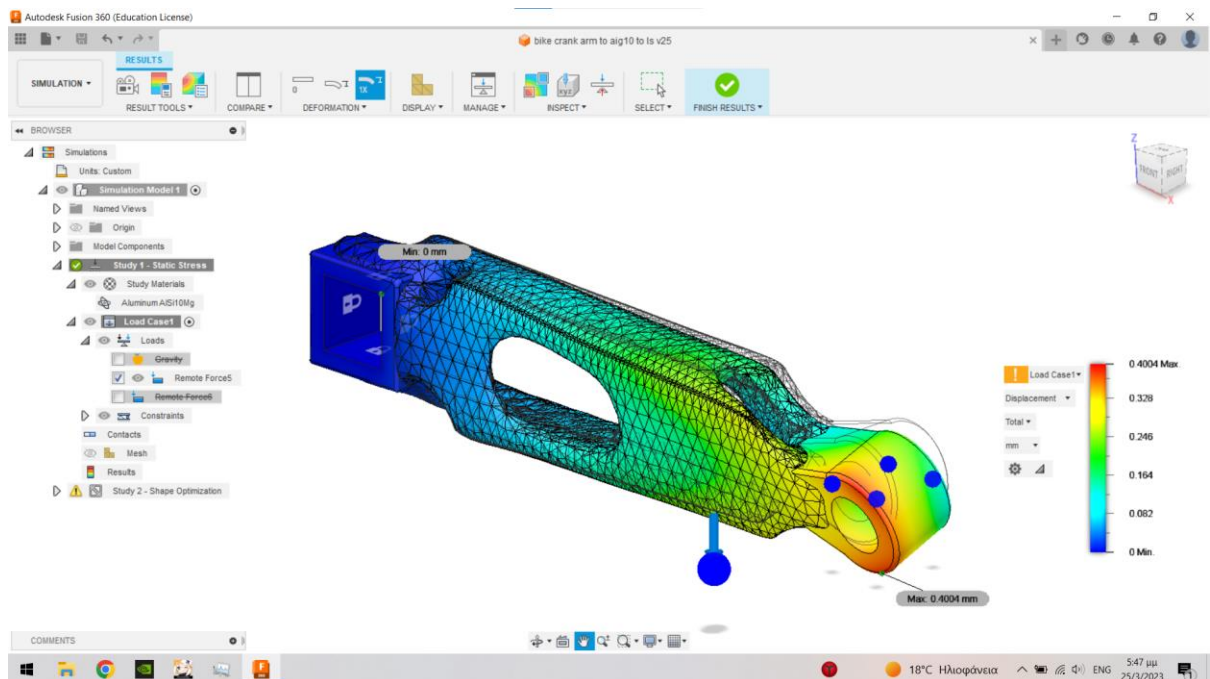


Εικόνα 4.38: Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τον συντελεστή ασφαλείας από διαφορετική γωνία.



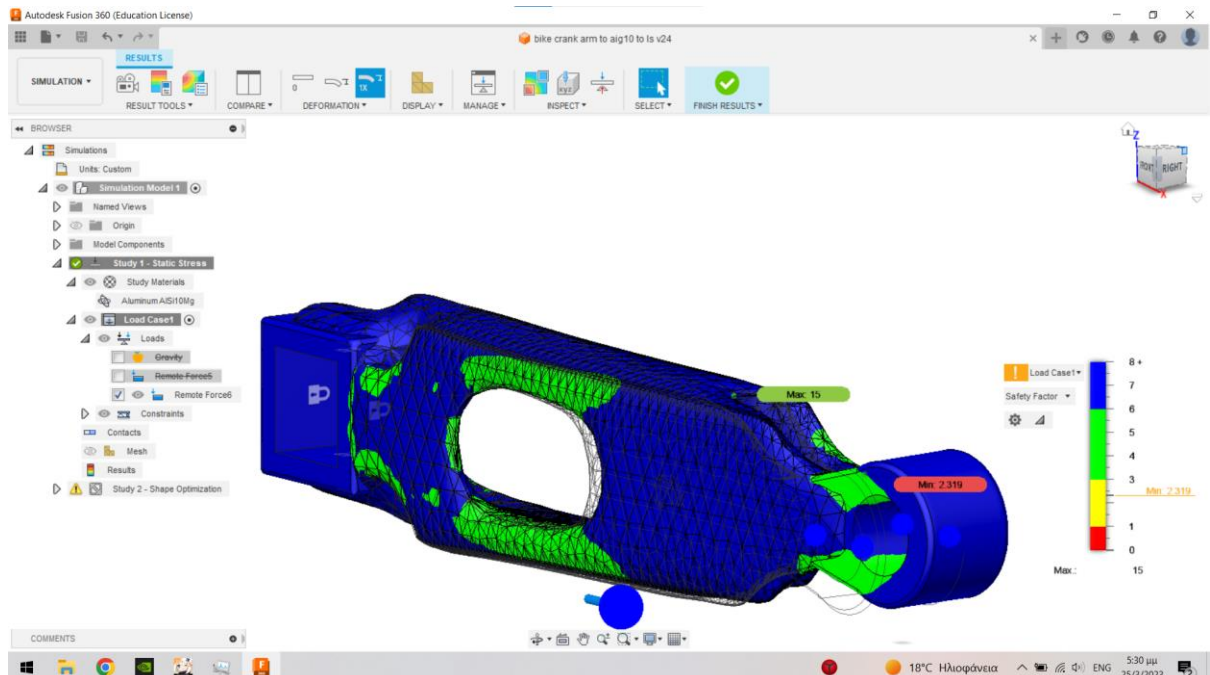
Εικόνα 4.39: Το σημείο όπου παρατηρείτε η τιμή 2,018 του συντελεστή ασφαλείας.

Στην συνέχεια επιλέγουμε να εμφανιστούν τα αποτελέσματα από την μετατόπιση του βραχίονα.



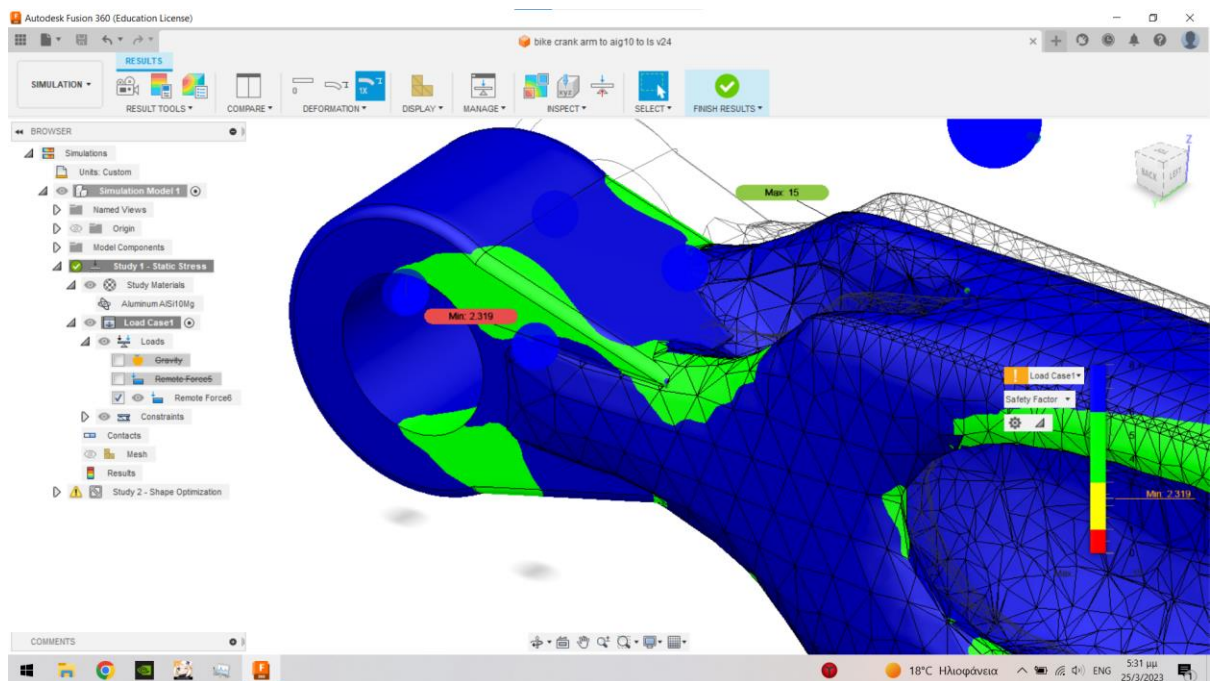
Εικόνα 4.40: Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την μετατόπιση του βελτιστοποιημένου βραχίονα.

Η μέγιστη μετατόπιση των 0,4004 mm παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Στη συνέχεια γίνεται η δεύτερη ανάλυση για την άσκηση δύναμης παράλληλα στον άξονα Χ.



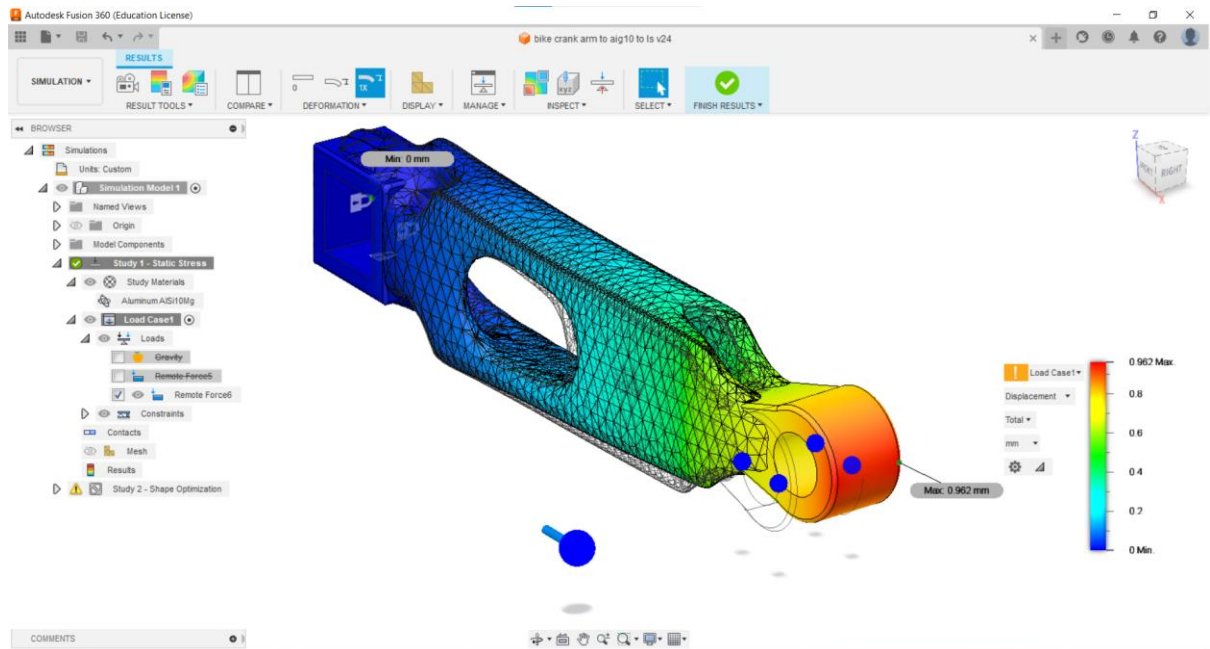
Εικόνα 4.41: Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για δύναμη παράλληλα με τον άξονα X.

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστή ασφαλείας παραμένει σε εξίσου ικανοποιητικά επίπεδα με τιμή 2,319.



Εικόνα 4.42: Το σημείο που παρατηρείται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας 2,319.

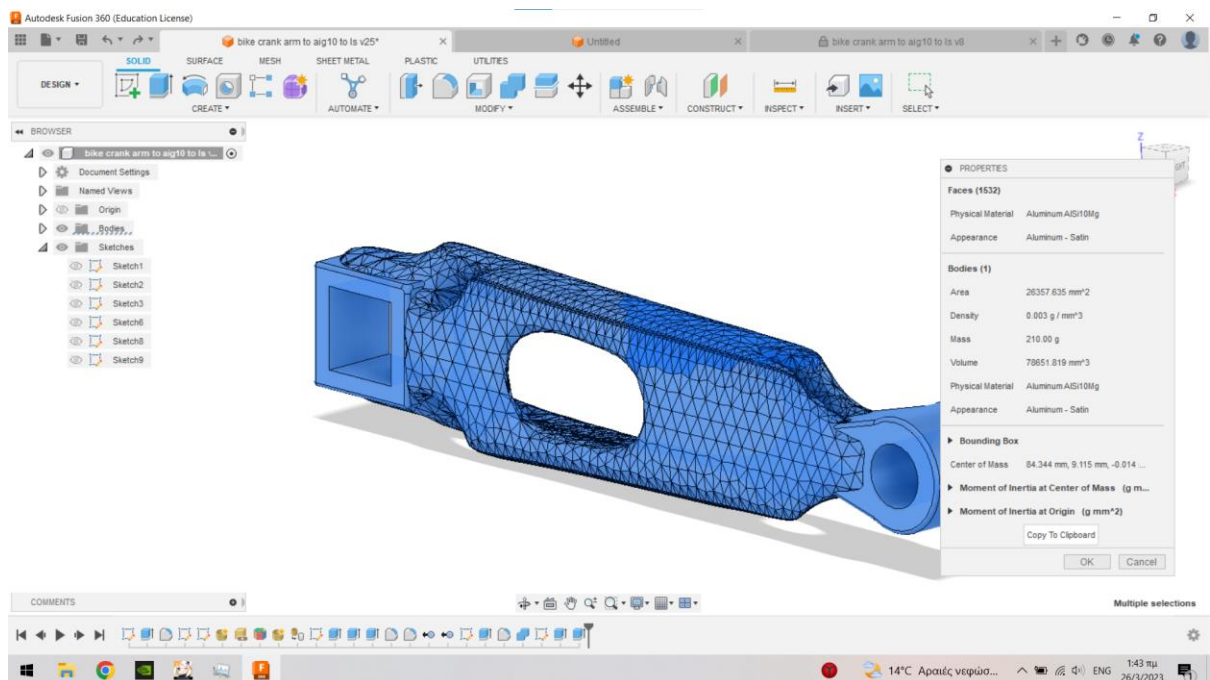
Η διαδικασία συνεχίζεται με την εξέταση της μετατόπισης του βελτιστοποιημένου άξονα για την ίδια δύναμη.



Εικόνα 4.43: Αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την μετατόπιση του βραχίονα, για δύναμη παράλληλα με τον άξονα X.

Παρά την αύξηση της μετατόπισης στα 0,962mm που παρατηρούμε στην εικόνα 3.51, η τιμή της παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα πληρεί τα κριτήρια για την εφαρμογή του ως βραχίονας πεταλιέρας ποδηλάτου.



Εικόνα 4.44: Δομικές πληροφορίες του βελτιστοποιημένου βραχίονα.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.44, το βάρος του εξαρτήματος μετά την εφαρμογή της βελτιστοποίησης είναι στα 210 gr. Αυτό σημαίνει πως η μείωση του βάρους είναι της τάξεως του 48.9%.

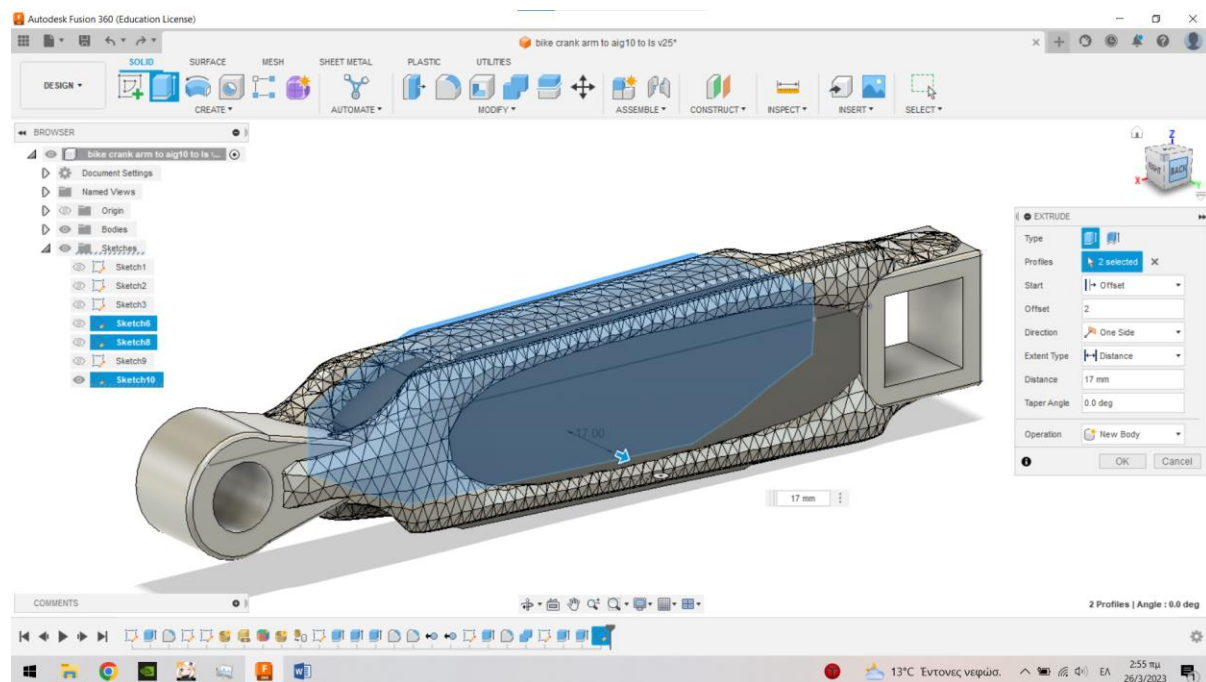
Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων του βραχίονα, είμαστε σε θέση να προχωρήσουμε στην εφαρμογή πλεγματικών δομών με στόχο τον υβριδικό σχεδιασμό του βραχίονα.

Το συγκεκριμένο εξάρτημα εκτός από τις δυνάμεις που δέχεται από τον αναβάτη του ποδηλάτου, μπορεί να δεχτεί και κάποια δύναμη από εξωτερικό παράγοντα (π.χ. χτύπημα πέτρας από τον δρόμο ή πτώση του ποδηλάτου). Τα νεύρα που σχηματίζονται στο εξάρτημα κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, πληρούν τις προϋποθέσεις για τις δυνάμεις που δέχεται ο βραχίονας για την προβλεπόμενη λειτουργία του ποδηλάτου. Όμως, δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις για δυνάμεις από εξωτερικούς παράγοντες. Για να ενισχύσουμε το εξάρτημα και ειδικά τα νεύρα που σχηματίζονται μετά την βελτιστοποίηση, προχωράμε στη λύση του υβριδικού σχεδιασμού με χρήση πλεγματικών δομών. Με τον τρόπο αυτό προσθέτουμε ένα μικρό τμήμα μάζας στο εξάρτημά μας, εκμεταλλευόμενοι τα πλεονεκτήματα των πλεγματικών δομών.

Όπως έχει προαναφερθεί, η μάζα που έχει παραμείνει στον βραχίονα μετά την βελτιστοποίηση είναι το τμήμα του σχεδίου που δε θα συμμετάσχει στην εφαρμογή των πλεγματικών δομών.

Τα τμήματα τα οποία αφαιρέθηκαν από την αρχική μορφή του βραχίονα, είναι τα τμήματα τα οποία θα αντικατασταθούν με τις κατάλληλες πλεγματικές δομές, για να επιτευχθεί ο υβριδικός σχεδιασμός του βραχίονα. Το πρόγραμμα fusion 360 μας δίνει ορισμένες, αλλά σημαντικά περιορισμένες, επιλογές για δημιουργία πλεγματικών δομών ως επιπλέον πρόσθετη εφαρμογή στο λογισμικό.

Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί και υποστηρίζει πληθώρα τύπων πλεγματικών δομών είναι το Netfabb της Autodesk.



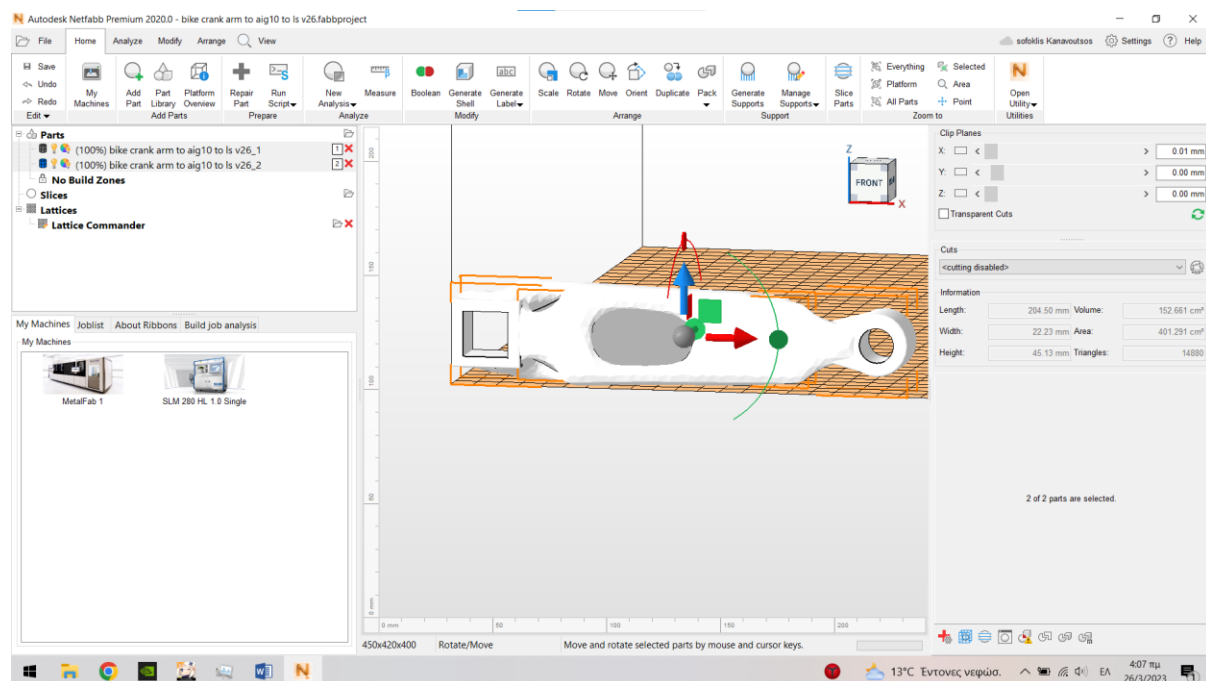
Εικόνα 4.45: Δημιουργία νέου τμήματος του βραχίονα, το οποίο θα αντικατασταθεί με πλεγματικές δομές.

Σε πρώτο στάδιο στο fusion 360, δημιουργούμε με την εντολή “Extrude” και την επιλογή “New body” ένα νέο τμήμα. Το νέο αυτό τμήμα θα αντικατασταθεί με τις κατάλληλες πλεγματικές δομές στο πρόγραμμα Netfabb της Autodesk.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.45 το τμήμα αυτό αφορά τη μάζα που αφαιρέθηκε από το εσωτερικό τμήμα του βραχίονα. Οποιαδήποτε άλλη προσθήκη μάζας στο εξωτερικό τμήμα του βραχίονα δε θα έχει κάποιο θετικό αποτέλεσμα ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες.

Μαρκάροντας όλα το τμήμα του σχεδίου, μπορούμε άμεσα να το μεταφέρουμε στο netfabb μέσα από το Fusion 360 με την εντολή "Make" στην κατηγορία "utilities". Πλέον, το σχέδιο μαζί με το καινούριο τμήμα του, εμφανίζεται στο πρόγραμμα netfabb.

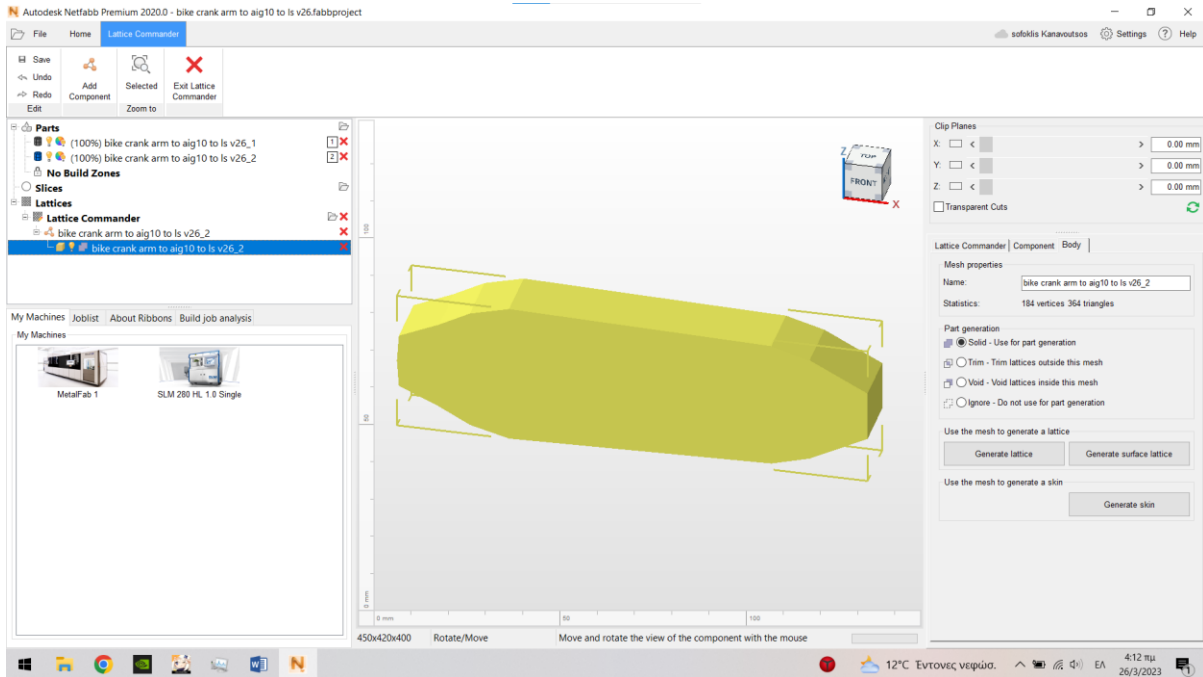
Μια εναλλακτική επιλογή είναι να εξαγάγουμε το σχέδιο σε ένα αρχείο συμβατό με το netfabb και να το ανοίξουμε μέσα από το λογισμικό.



Εικόνα 4.46: Ο βραχίονας μαζί με το νέο τμήμα στο περιβάλλον του netfabb.

Αριστερά παρατηρούμε το τμήμα εντολών και κατάστασης των σχεδίων. Στο κέντρο βρίσκεται το τρισδιάστατο σχέδιο. Δεξιά βρίσκονται οι επιμέρους εντολές και επιπλέον πληροφορίες που προσφέρονται για ρύθμιση, αναλόγως την επεξεργασία που πραγματοποιείται.

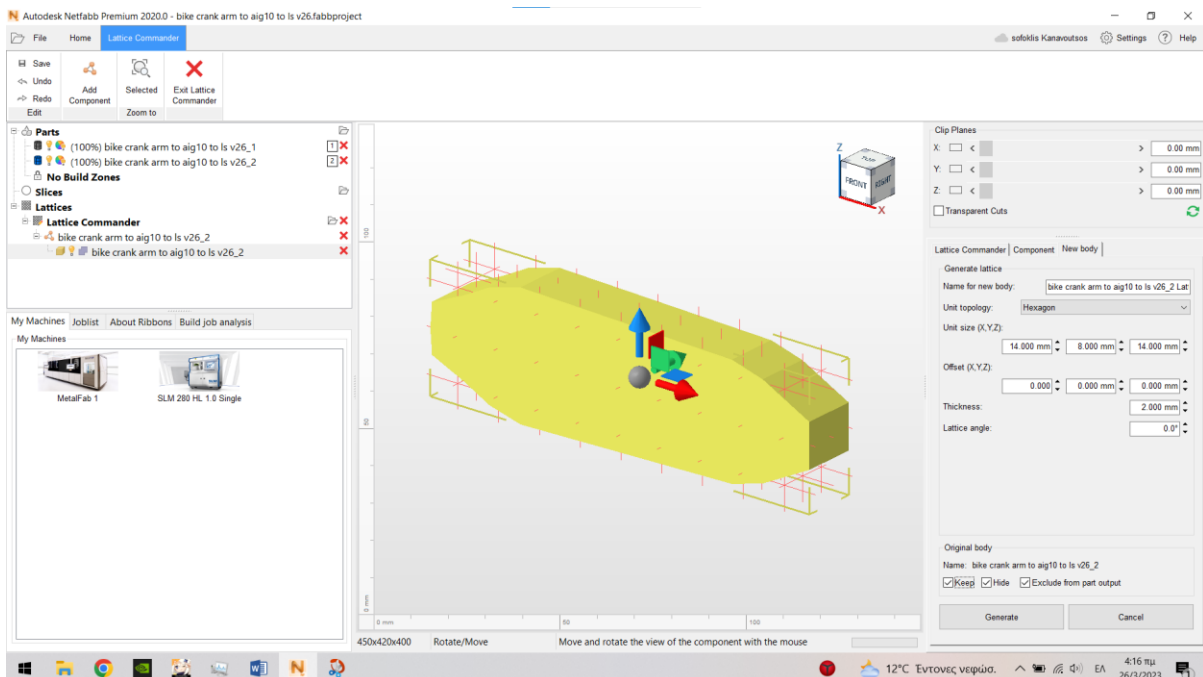
Είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε τη διαδικασία του σχηματισμού των πλεγματικών δομών. Με την εντολή "Lattice Commander" μεταφέρουμε το νέο τμήμα κάτω από την κατηγορία "Lattice" (βλ. εικόνα 4.47).



Εικόνα 4.47:Το νέο τμήμα εισάγεται κάτω από την κατηγορία "Lattices".

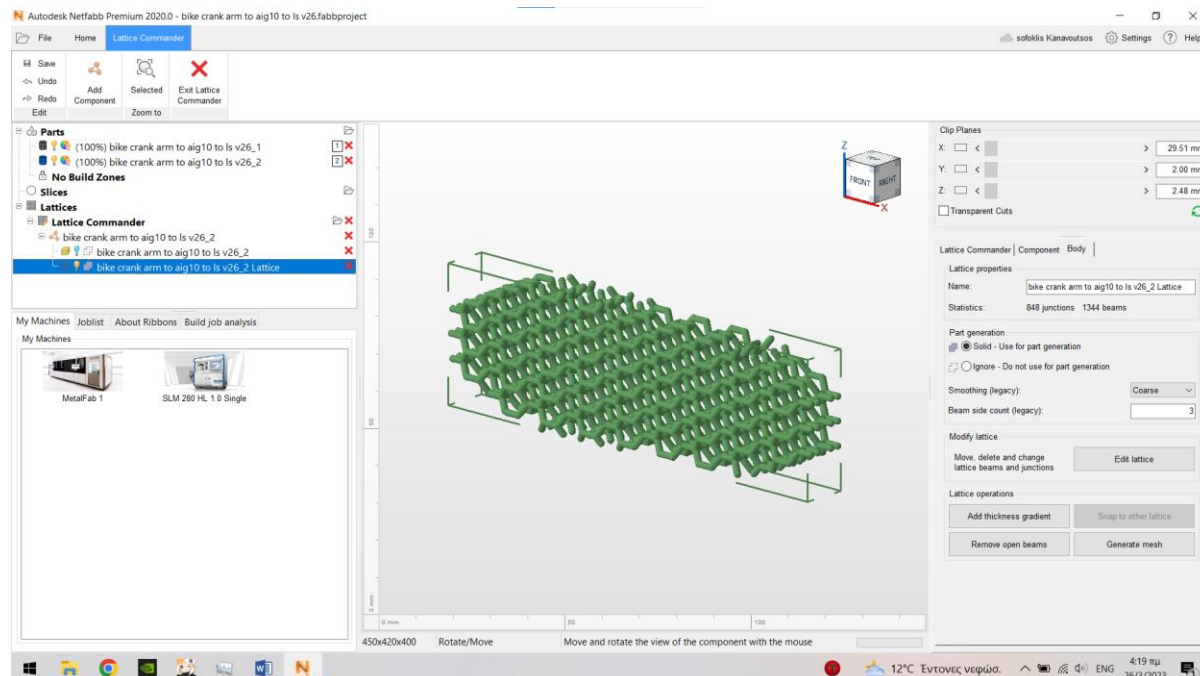
Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων επιλέγουμε να έχουμε ομοιογενείς πλεγματικές δομές στον υβριδικό σχεδιασμό του βραχίονα.

Για την επιλογή του μεγέθους των πλεγμάτων καθώς και του πάχους τους, πρέπει να λάβουμε υπόψιν τους κατασκευαστικούς περιορισμούς που υπάρχουν στην κατασκευή πλεγματικών δομών με τρισδιάστατο εκτυπωτή μετάλλου. Θεωρητικά το όριο είναι στα 0,15mm. Στην πράξη όμως συστήνεται, ανάλογα και την τεχνολογία του εκτυπωτή, να λαμβάνονται ως όριο οι τιμές μεταξύ 0,5mm και 1mm [26].



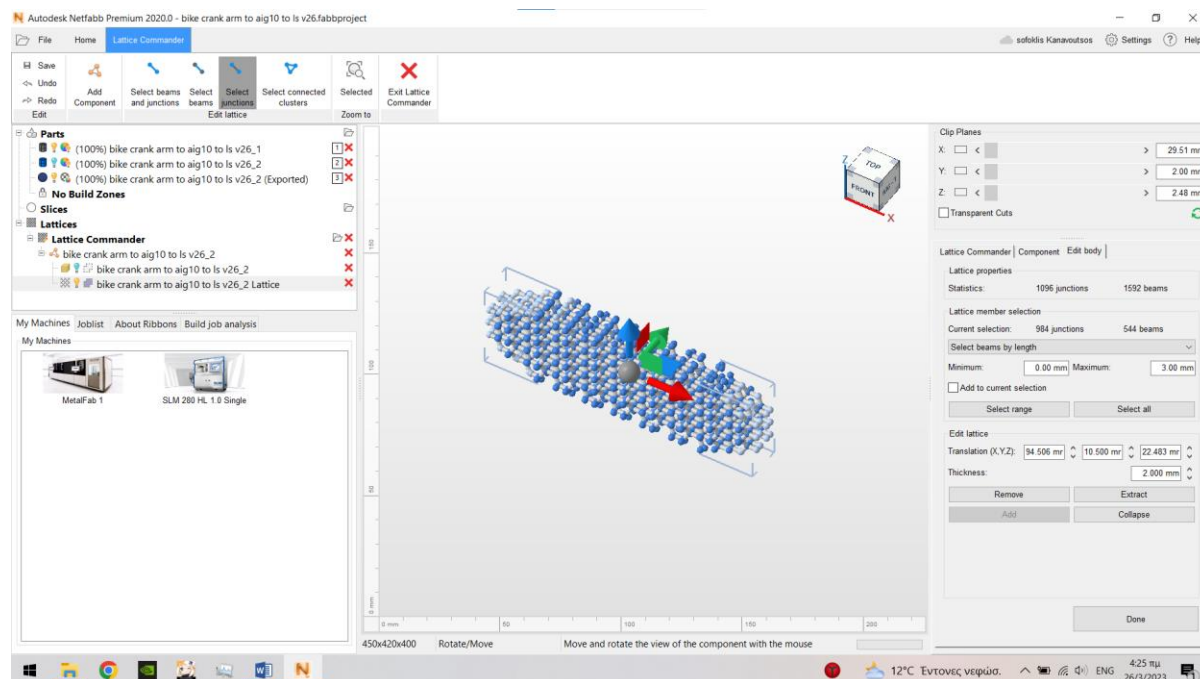
Εικόνα 4.48:Στιγμιότυπο από την έναρξη της διαδικασίας σχεδιασμού των πλεγματικών δομών.

Στο δεξί τμήμα του περιβάλλοντος του netfabb (εικόνα 4.48), μπορούμε να επιλέξουμε το τύπον του πλέγματος, να ρυθμίσουμε το μέγεθος καθώς και το πάχος του. Ως κατηγορία πλέγματος επιλέχθηκε η κατηγορία “Beam”. Η συγκεκριμένη κατηγορία βελτιώνει τόσο την ακαμψία του εξαρτήματος όσο και την ελαστικότητά του. Ο τύπος πλέγματος ή κυψέλης που επιλέχθηκε είναι ο τύπος “Hexagon”.



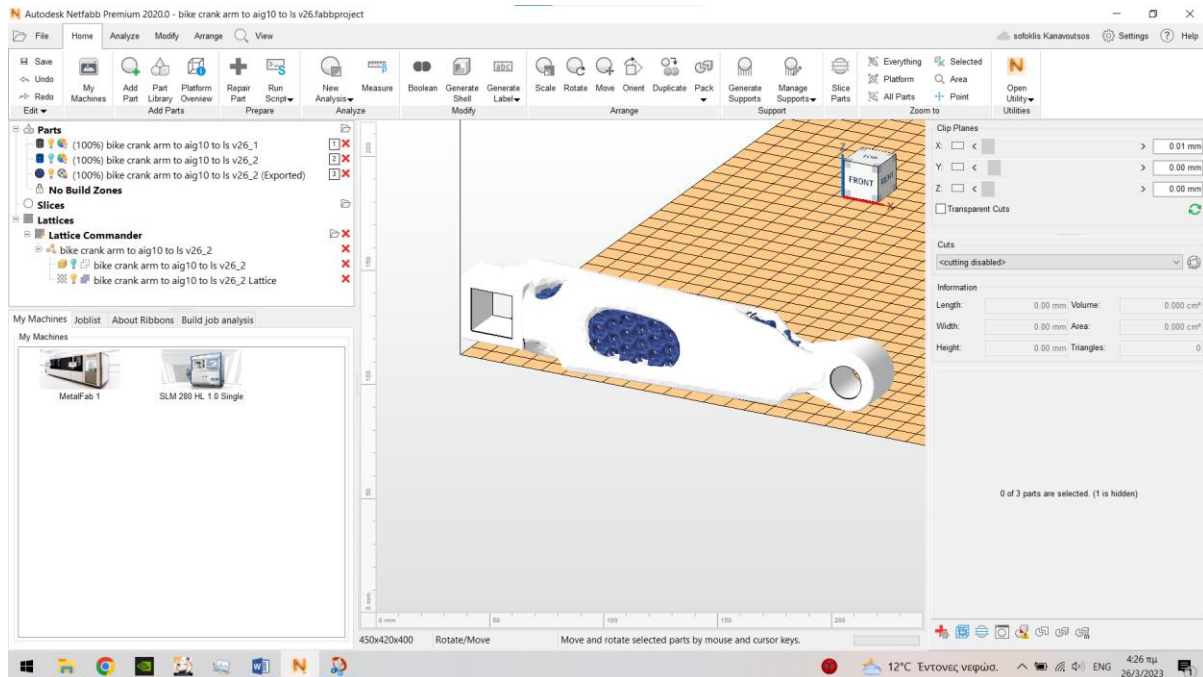
Εικόνα 4.49: Ολοκλήρωση της σχεδίασης των πλεγματικών δομών στο τμήμα του σχεδίου.

Το μέγεθος πλέγματος είναι 14mm x 8mm x 14mm και πάχος ράβδου 2mm. Πατώντας την εντολή “Generate” το νέο τμήμα με τα πλέγματα μεταφέρεται στην ενότητα “Parts”.



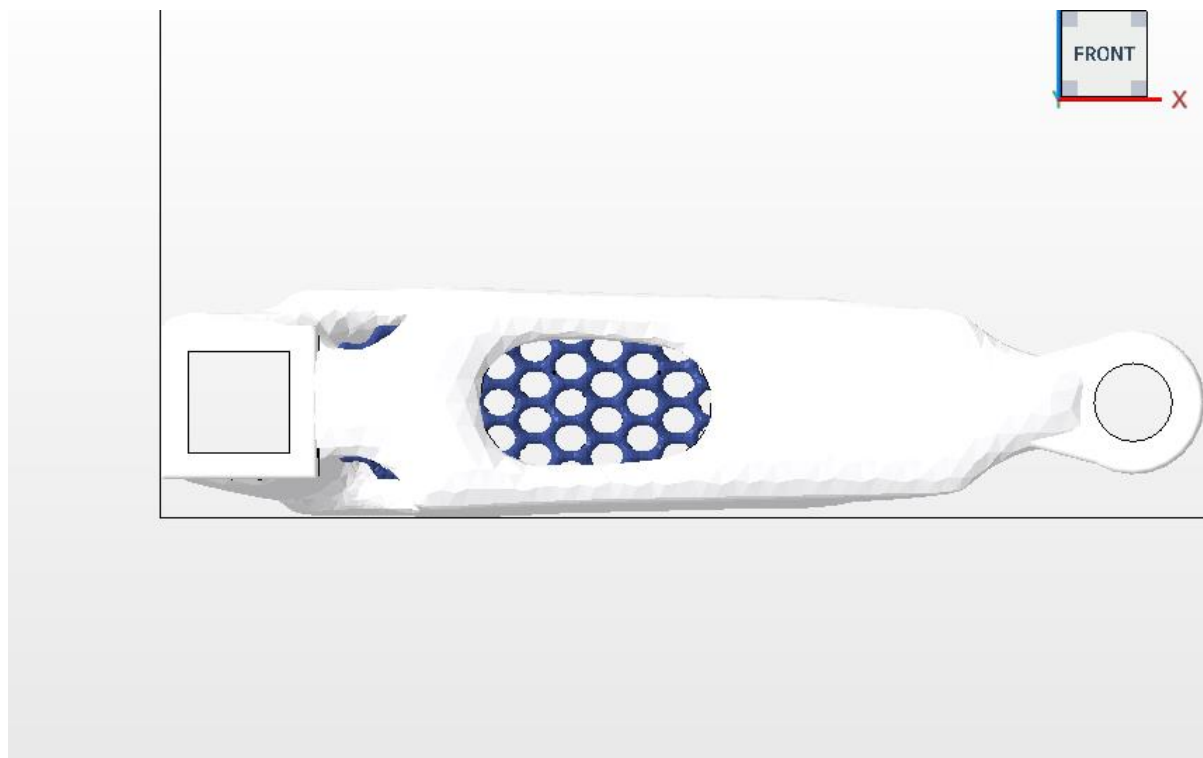
Εικόνα 4.50: Στιγμιότυπο από τις τελικές διορθώσεις των πλεγματικών δομών.

Πλέον είμαστε σε θέση να εμφανίσουμε τα νέα τμήματα των πλεγματικών δομών που έχουν δημιουργηθεί στην ενότητα “Parts” μαζί με το αρχικό τρισδιάστατο τμήμα του σχεδίου, με την εντολή “Generate”.

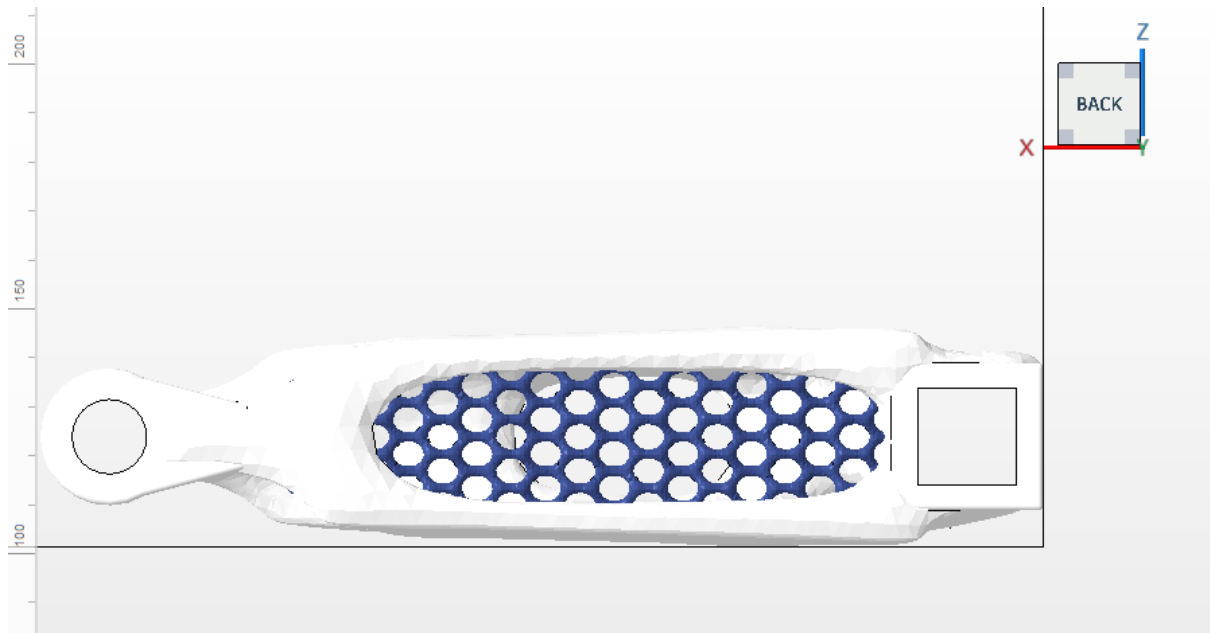


Εικόνα 4.51:Ο βραχίονας μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού.

Στην εικόνα 4.51, έχουμε εμφανίσει το νέο τμήμα με τις πλεγματικές δομές που δημιουργήθηκαν. Εμφανίζοντας και το αρχικό τμήμα του βραχίονα, σχηματίζεται το τελικό σχέδιο στο οποίο έχουμε επιτύχει τον υβριδικό σχεδιασμό.

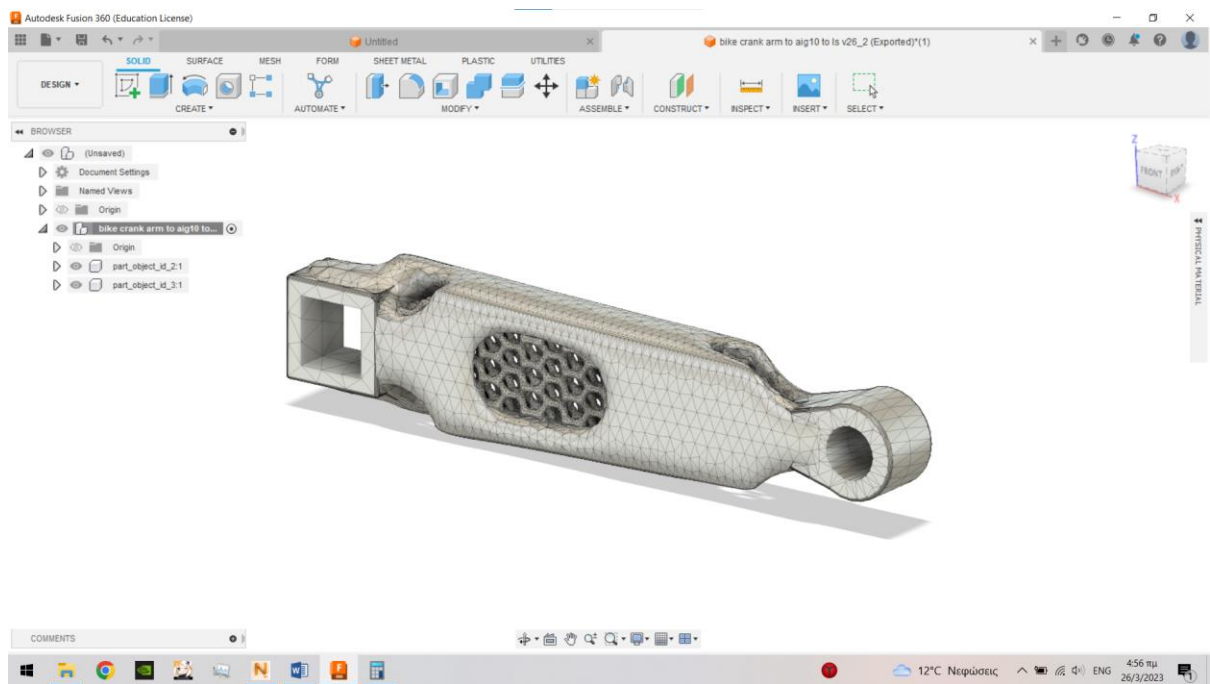


Εικόνα 4.52:Η πρόσοψη του βραχίονα μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού .

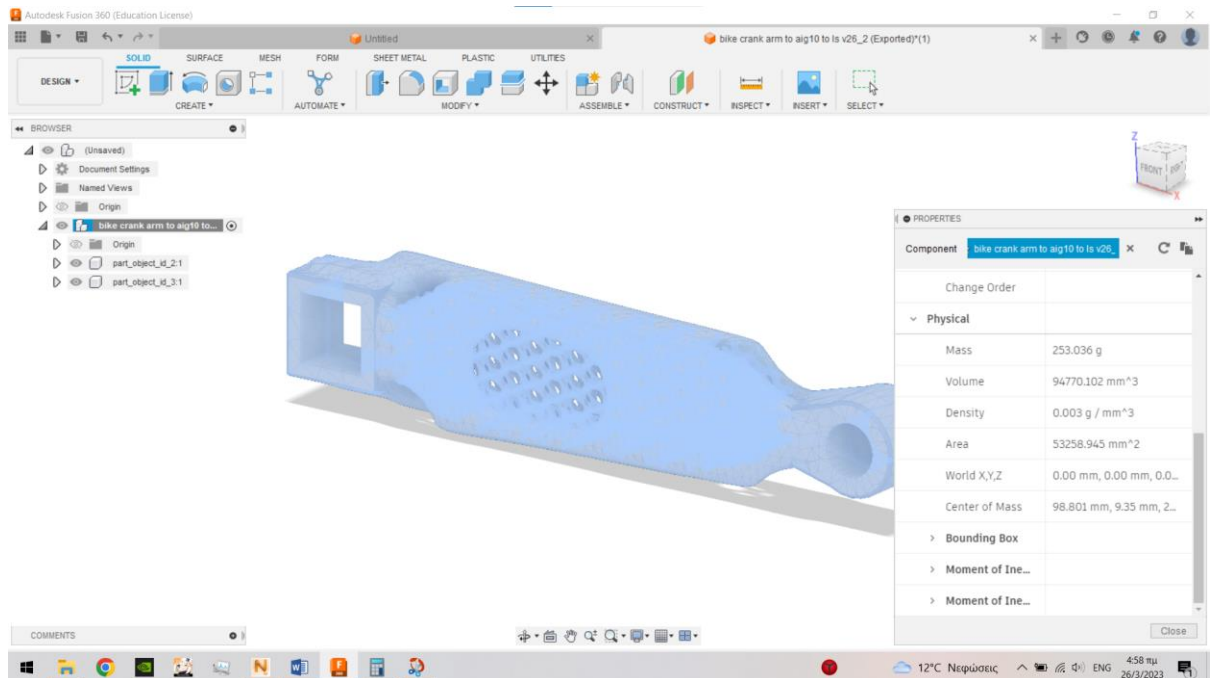


Εικόνα 4.53: Η πίσω όψη του βραχίονα μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού .

Πλέον είμαστε σε θέση κατασκευής του συγκεκριμένου αντικειμένου, κάνοντας εξαγωγή του αντίστοιχου αρχείου τύπου "CAM" (π.χ. STL 3MF κ.α.).



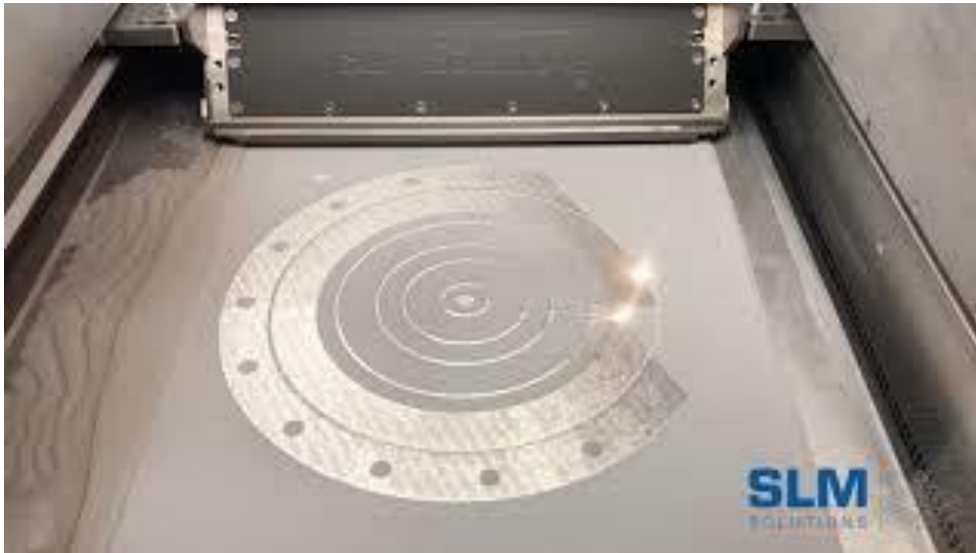
Εικόνα 4.54: Ο βραχίονας μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού στο Fusion 360.



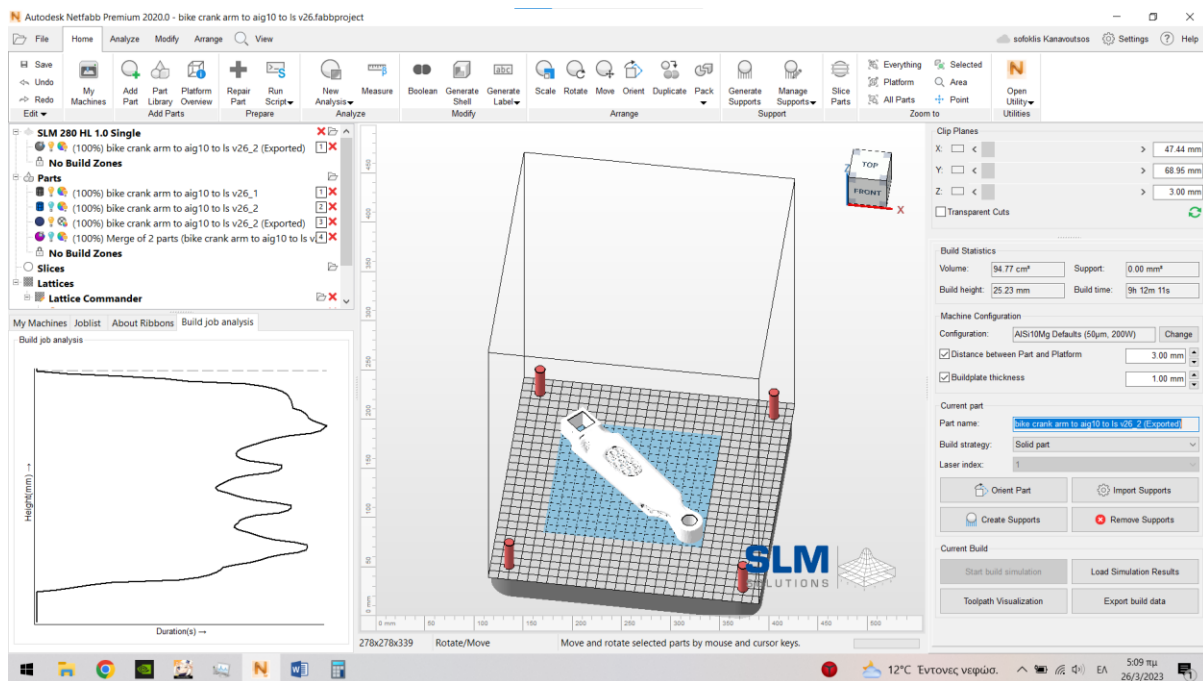
Εικόνα 4.55: Ο βραχίονας μετά την ολοκλήρωση του υβριδικού σχεδιασμού με τις πληροφορίες των δομικών χαρακτηριστικών.

Σύμφωνα με τις πληροφορίες από το Fusion 360 το εξάρτημα επιβαρύνθηκε μόνο κατά 43,128 γραμμάρια από τις πλεγματικές δομές. Αυτό σημαίνει πως ο βραχίονας έχει πια βάρος 253,036 γραμμάρια. Έχουμε μια μείωση βάρους από το αρχικό εξάρτημα της τάξεως του 38,3 %. Σε σχέση με το εξάρτημα, στο στάδιο της τοπολογικής βελτιστοποίησης έχουμε μια μικρή αύξηση του βάρους της τάξεως 19.5%.

Το netfabb μας δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης της διαδικασίας κατασκευής με τρισδιάστατους εκτυπωτές του εμπορίου. Το εξάρτημα στο οποίο εφαρμόστηκε η διαδικασία υβριδικού σχεδιασμού είναι από αλουμίνιο AlSi10mg και η χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή για την διαδικασία της κατασκευής του είναι απαραίτητη. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που επιλέχθηκε είναι της εταιρείας SLM Solutions και το μοντέλο είναι SLM 280 HL 1.0 single. Είναι ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής που χρησιμοποιεί την τεχνολογία “Selective laser melting” .

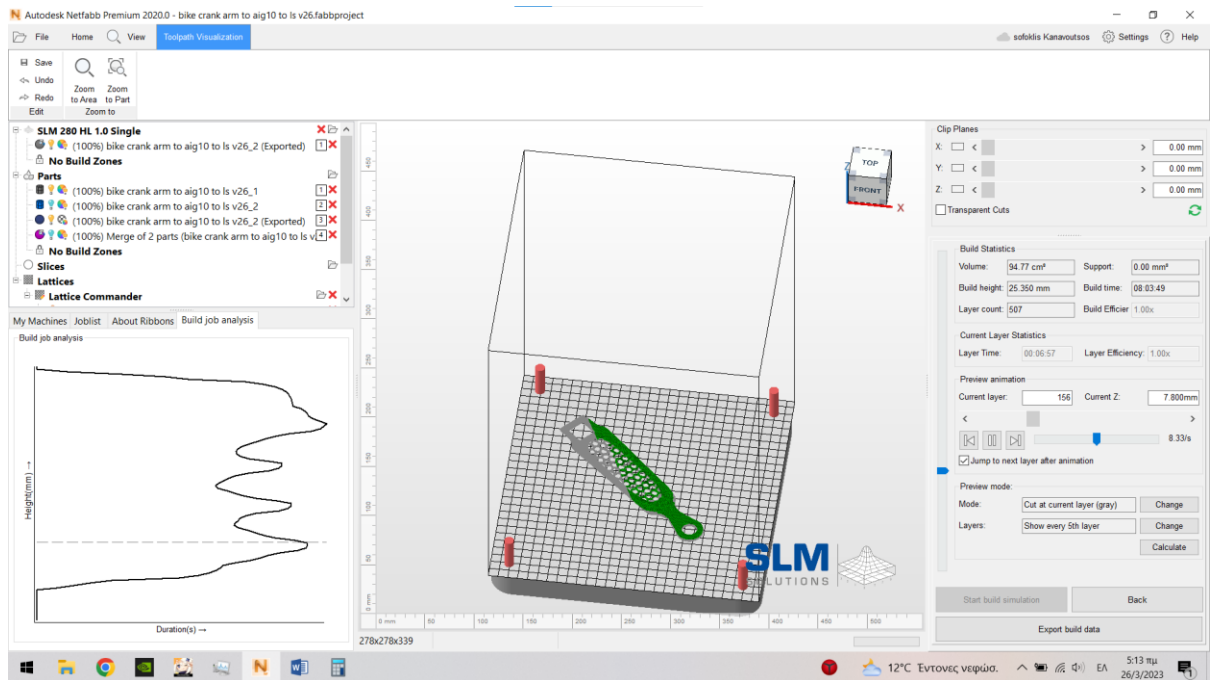


Εικόνα 4.56:Στιγμιότυπο από τη διαδικασία κατασκευής μεταλλικού εξαρτήματος στον εκτυπωτή SLM 280 HL. [27]



Εικόνα 4.57:Διαδικασία επιλογής τρισδιάστατου εκτυπωτή και εισαγωγής του εξαρτήματος προς κατασκευή.

Από την κατηγορία “My machine”, στο επάνω αριστερό τμήμα εντολών, επιλέγουμε την εντολή “add machine” για να επιλέξουμε τον κατάλληλο τρισδιάστατο εκτυπωτή. Στη δεξιά μέρος της οθόνης επιλέγουμε το υλικό κατασκευής και τις απαραίτητες ρυθμίσεις (π.χ. απόσταση από την έδραση, στηρίγματα κ.α.). Το “layersize” έχει οριστεί στα 50µm με 200W ισχύ. Ο χρόνος κατασκευής του εξαρτήματος είναι 8 ώρες και 3 λεπτά. Πλέον είμαστε έτοιμη να προχωρήσουμε στην προσομοίωση της κατασκευής πατώντας την εντολή “Toolpath visualization” και στη συνέχεια την εντολή “generate”.



Εικόνα 4.58: Στιγμιότυπο από την διαδικασία προσομοίωσης της κατασκευής.

Με πράσινο χρώμα στην εικόνα 4.58 παρατηρούμε το layer όπου βρίσκεται στη διαδικασία εκτύπωσης. Στο δεξί τμήμα της οθόνης παρατηρούμε βασικά στοιχεία της διαδικασίας κατασκευής. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, όταν γίνει πράσινο όλο το τμήμα του επιπέδου που βρίσκεται το περίγραμμα, έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία κατασκευής του “Layer” και αμέσως μετά ξεκινάει η κατασκευή του αμέσως επόμενου. Τέλος με την εντολή “Export built data” εξάγουμε το αρχείο τύπου “.slm”, το οποίο μπορούμε να το εισάγουμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή, για την υλοποίηση της κατασκευής.

6 Προσθετική Κατασκευή & Πειραματική Δοκιμή

6.1 Προσθετική Κατασκευή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είχαμε την ευγενική χορηγία της εταιρείας ANiMA για την υλοποίηση της κατασκευής του βραχίονα, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Λόγω προσωρινής κατά την περίοδο της εφαρμογής έλλειψης από πλευράς εταιρίας πρώτης ύλης από Αλουμίνιο, η κατασκευή πραγματοποιήθηκε σε τρισδιάστατο εκτυπωτή με χρήση ανοξείδωτου χάλυβα 316. Για το λόγο αυτό, το αντικείμενο επανασχεδιάστηκε και πάλι, με την ίδια λογική, αλλά με βάση αυτή τη φορά τον ανοξείδωτο χάλυβα 316, με το αποτέλεσμα του υβριδικού σχεδιασμού να είναι μεν σε πολύ μεγάλο βαθμό παρόμοιο με αυτό του αλουμινίου AlSi10mg, αλλά σαφώς διαφοροποιημένο (βλ. εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Το αποτέλεσμα των σχεδίων με AlSi10mg & SS316 αντίστοιχα.

Η υλοποίηση της κατασκευής πραγματοποιήθηκε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή Zrapid iDEN160, τύπου SLM.



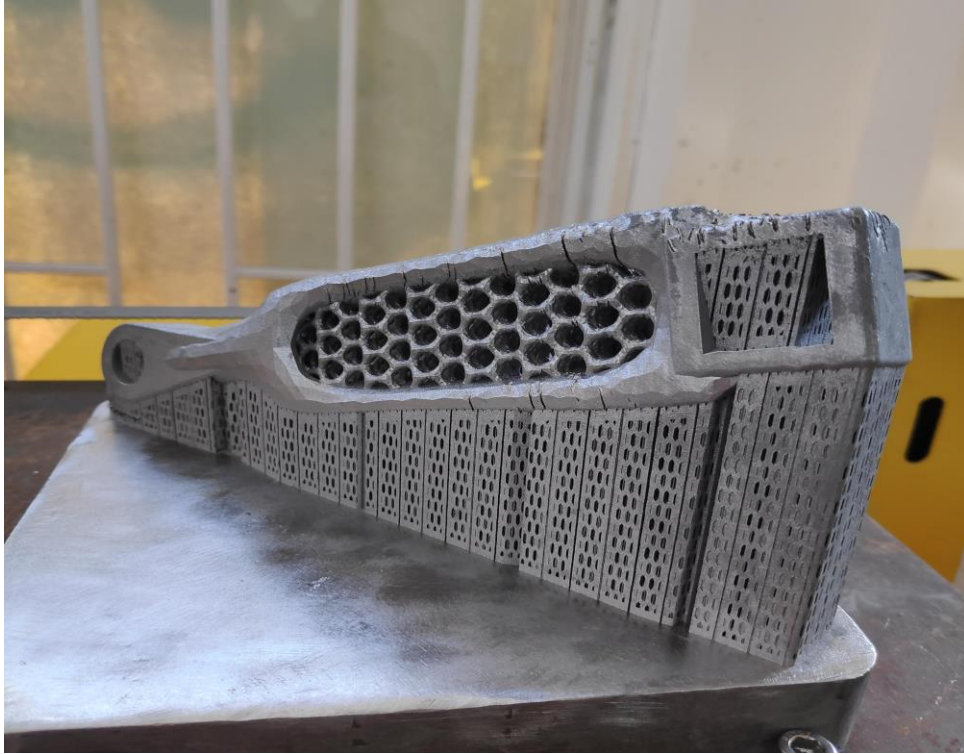
Εικόνα 5.2: Ο εκτυπωτής Zrapid iDEN160.

Ακολουθούν οι παράμετροι της εκτύπωσης:

Support Speed:	1500.000	Support Power:	90
Hatch Speed:	900.000	Hatch Power:	90
Polygon Speed:	400.000	Polygon Power:	65
Z Axis Compensate:	0.000	Laser Power:	1.000

Εικόνα 5.3: Παράμετροι του τρισδιάστατου εκτυπωτή Zrapid iDEN160.

1. Οι παραπάνω ταχύτητες είναι σε mm/s, ενώ η ισχύς του laser είναι το ποσοστό επι τοις εκατό (%) από την μέγιστη ισχύ, που είναι 200W.
2. Η εκτύπωση έγινε με 30μm layer thickness.
3. Ο αριθμός των συνολικών layers ήταν 3215.
4. Το συνολικό ύψος εκτύπωσης ήταν 96.46mm.



Εικόνα 5.4: Το αποτέλεσμα της κατασκευής πριν την αφαίρεση των supports.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε αφαίρεση των supports με κόφτη, υποβίβαση των γρεζιών με χρήση dremel, λείανση σε ταινιολειαντήρα, και αμμοβολή.

Ο χρόνος εκτύπωσης ήταν περίπου 14 ώρες και το κόστος της κατασκευής εκτιμήθηκε στα 370 ευρώ.

Ακολουθούν φωτογραφίες από το αποτέλεσμα της κατασκευής.



Εικόνα 5.5: Το αποτέλεσμα της κατασκευής από ανοξείδωτο χάλυβα 316.



Εικόνα 5.6: Ο βραχίονας στην πίσω όψη του.



Εικόνα 5.7: Στιγμιότυπο του βραχίονα από διαφορετική γωνία.



Εικόνα 5.8: Λεπτομέρεια από το αποτέλεσμα της κατασκευής του βραχίονα.

6.2 Πειραματική Δοκιμή

Μετά την παραλαβή του βραχίονα, ακολούθησε η πειραματική αξιολόγησή του. Η δοκιμαστική αυτή εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε μηχανουργείο και μετρήθηκε η μετατόπιση του βραχίονα από τις διαφορετικές, ως προς την κατεύθυνση, δυνάμεις που ασκούνται σε αυτόν.

Χρησιμοποιήθηκαν:

1. Κοιλοδοκός 20x20mm για την στήριξη του βραχίονα.
2. Ανοξείδωτος κοχλίας για την άσκηση των δυνάμεων σε απόσταση 5cm.
3. Δυναμόμετρο χειρός για την μέτρηση των δυνάμεων.
4. Ωρολογιακό μικρόμετρο (ρολόι γράφτη) ακριβείας 0,01mm, για την μέτρηση της μετατόπισης του βραχίονα κατά την άσκηση των δυνάμεων.

Ακολουθούν φωτογραφίες από την διαδικασία της πιλοτικής εφαρμογής:



Εικόνα 5.9: Στιγμιότυπο από την διαδικασία της πιλοτικής εφαρμογής.



Εικόνα 5.10: Στιγμιότυπο από την τοποθέτηση του ωρολογιακού μικρομέτρου.

Ακολουθεί η διαδικασία εφαρμογής των δυνάμεων. Οι δυνάμεις εφαρμόζονται με χρήση δυναμόμετρου και μέσω του κοχλία, σε απόσταση 5cm από τον βραχίονα. Αρχικά έγινε άσκηση δυνάμεων κάθετα ως προς τον άξονα σχεδίασης X και στην συνέχεια παράλληλα ως προς τον άξονα σχεδίασης X, όπως ασκούνται οι δυνάμεις κατά την διαδικασία της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Δυο μεγέθη δυνάμεων ασκούνται σε κάθε κατεύθυνση. Αρχικά εφαρμόζεται δύναμη 400N, η οποία είναι η μέγιστη δύναμη που ασκεί ένας ποδηλάτης στο πετάλι του βραχίονα και στην συνέχεια εφαρμόζεται δύναμη αυξημένη κατά 25%, στα 500N.



Εικόνα 5.11: Στιγμιότυπο κατά την άσκηση δύναμης κάθετα στον άξονα σχεδίασης X.



Εικόνα 5.12: Στιγμιότυπο λίγο πριν την άσκηση δύναμης παράλληλα στον άξονα σχεδίασης X.

Μετά την ολοκλήρωση της πιλοτικής εφαρμογής, ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που είχαμε για την μετατόπιση του βραχίονα:

	Κάθετη στον άξονα Χ	Παράλληλη στον άξονα Χ
400N	1,04mm	0,5mm
500N	1,22mm	0,65mm

Παρατηρούμε ότι ο βραχίονας έχει ελαφρώς αυξημένη μετατόπιση στις δυνάμεις κάθετα στον άξονα σχεδίασης Χ. Σε κάθε περίπτωση όμως το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό. Ο βραχίονας άντεξε τις μέγιστες, και παραπάνω δυνάμεις, όμοιες με εκείνες που ασκούνται από έναν ποδηλάτη στο πετάλι ενός ποδηλάτου.

7 Συμπεράσματα και επεκτάσεις

Η μέθοδος του σχεδιασμού με υβριδικό συνδυασμό τοπολογικής βελτιστοποίησης και πλεγματικών δομών, εφαρμόστηκε με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Επιβεβαιώθηκε πως η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου σε ένα εξάρτημα, ελαττώνει σημαντικά μάζα και βάρος χωρίς υποβάθμιση των μηχανικές του επιδόσεων. Αυτό είναι το μεγάλο συγκριτικό πλεονέκτημα του υβριδικού σχεδιασμού έναντι των έτερων μεθόδων σχεδιασμού.

Τα σχετικά λογισμικά και μέσα σχεδιασμού εμπλουτίζουν συνεχώς τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητές τους με σχετικές λειτουργίες. Οι σχεδιαστές και το τεχνικό προσωπικό εξοικειώνονται όλο και περισσότερο σταδιακά με αυτές.

Τα αποτελέσματα ενός υβριδικού σχεδιασμού είναι συχνά κατασκευάσιμα μόνο με αξιοποίηση μεθόδων προσθετικής κατασκευής, γεγονός που σήμερα ακόμα εισάγει τα εμπόδια της διαθεσιμότητας, της επαρκούς τεχνικής δεξιότητας και του υψηλού κόστους, ειδικά για τα μεταλλικά εξαρτήματα.

Το κόστος κατασκευής ενός μεταλλικού εξαρτήματος με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής παραμένει όπως αποδείχθηκε ακόμη υψηλό, καθιστώντας τη μια αρκετά δαπανηρή μέθοδο κατασκευής. Όμως, η ευρεία διάδοση των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής στη βιομηχανία και στις κατασκευές, επιφέρει ήδη σήμερα τη συνεχή μείωση του κόστους των τρισδιάστατων εκτυπωτών μετάλλου και ως εκ τούτου τη μείωση του κόστους κατασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων με την συγκεκριμένη μέθοδο.

Στο άμεσο μέλλον, η κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής θα είναι ακόμη πιο προσβάσιμη και οικονομικά προσιτή και θα υπάρχει η δυνατότητα της πλήρους αξιοποίησης των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές για περίπλοκες κατασκευές.

8 Βιβλιογραφία - Πηγές - Αναφορές

- [1] Valeria Antonova, Stanislav Alekseev, Aleksei Tarasov, Natalia Scheglova, Oleg Klyavin and Aleksei Borovkov, "Analysis and use of SIMP method in optimization of a car hood design", *Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 195220 Saint Petersburg, Russia*, pp.2
- [2] Kristian Ejlebjærg Jensen, "Performing Topology Optimization with the Density Method", *comsol.com*
- [3] Ashley Eckhoff, "Additive Manufacturing + Aerospace Industry = Efficiency", *siemens.com*
- [4] M. Kurniawan, "Jet Engine Bracket challenge", *grabcad.com*
- [5] David Greenfield, "Extending CAD for Additive Manufacturing", *automationworld.com*
- [6] Shawn Wasserman, "Free CAE Tool for Topology Optimizations and Structural Simulations", *engineering.com*
- [7] Çağatay Yedekçioğlu, "What is topology optimization?", *en.muhendisgelisim.com*
- [8] Δρόσος Νικόλαος, "Τοπολογική βελτιστοποίηση δομικών στοιχείων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων", *repository.library.teimes*, pp.14
- [9] Aboma Wagari Gebisa Hirpa G. Lemu, "A case study on topology optimized design for additive manufacturing", *researchgate.net*
- [10] Thomas Sanladerer, "Making STRONG shelves with Topology Optimization", *youtube.com*
- [11] Crossberrysolutions, "TOPOLOGY OPTIMIZATION IN METAL 3D PRINTING", *crossberrysolutions.com*
- [12] Sansmachining, "SS45C CNC MACHINING PART", *sansmachining.com*
- [13] Kenji Shimada, "Lattice structures in nature", *researchgate.net*
- [14] Anja Kunic, "Type of of cellular structures found in nature", *researchgate.net*
- [15] Gerard Shields, "3D Printing Lattice Structures – The Ultimate Guide", *all3dp.com*
- [16] Alkaios Bournias Varotsis, "Guide to Lattice Structures in Additive Manufacturing", *ntopology.com*
- [17] Christiane Beyer, Dustin Figueroa, "Design and Analysis of Lattice Structures for Additive Manufacturing", *A.S.M.E.*, pp 8-9
- [18] 3dsculplab, "What are the types of lattice structures and AM created lattice geometries?", *3dsculplab.xyz*
- [19] Materialise, "A 63% Lighter Titanium Aerospace Part", *materialise.com*
- [20] Autodesk Advanced Manufacturing, "Netfabb Lattice Commander", *youtube.com*
- [21] Ntopology, "ELEMENT PRO CASE STUDY: F1 BRAKE PEDAL", *ntopology.com*
- [22] Cat McClintock, "Cat Lattice Structures in Additive Manufacturing: A Beginner's Guide", *ptc.com*
- [23] Dr. Carsten Haack, "Additive Manufacturing - SLM the addition to the established metal cutting processes", *Lucerne University of Applied Science and Arts*
- [24] Guoying Dong, Yunlong Tang, Yaoyao Fiona Zhao, "Design and Optimization of Solid Lattice Hybrid Structures Fabricated by Additive Manufacturing", *researchgate.net*, pp. 2-13

- [25] Chris R Abbiss, Jeremiah J Peiffer, Paul Laursen, “Optimal cadence selection during cycling”, *researchgate.net*, pp. 5
- [26] Olaf Diegel, Axel Nordin, Damien Motte, “A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing”, *Springer*, pp. 137
- [27] SLM solution Group . “SLM 280 in use”, *youtube.com*