



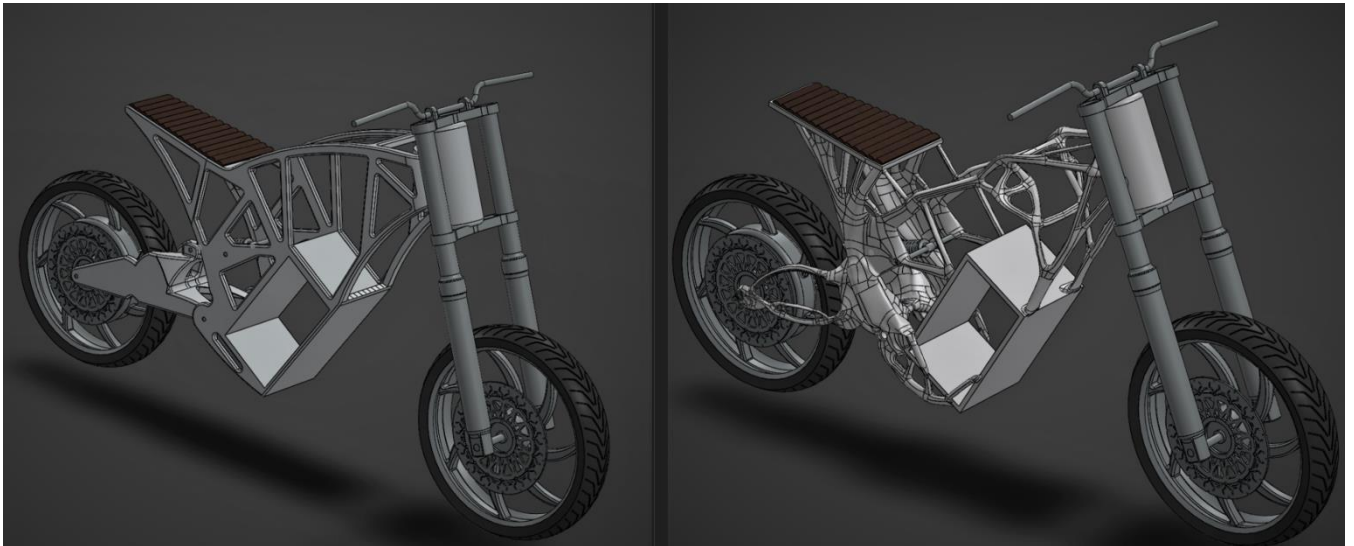
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Βέλτιστος σχεδιασμός μηχανολογικών εξαρτημάτων ή
συνθέσεων για προσθετική κατασκευή.**

Πτυχιακή Εργασία

Καρτσάκης Κωνσταντίνος

Σκουντής Ανδρέας



Επιβλέπων:

Ντιντάκης Ιωάννης, Λέκτορας ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Ηράκλειο



Κατάλογος περιεχομένων

1.	Εισαγωγή	4
1.1	Ιστορική εξέλιξη τοπολογικής βελτιστοποίησης και γενετικού σχεδιασμού	4
1.2	Θεωρία τοπολογικής βελτιστοποίησης	6
1.3	Θεωρία γενετικού σχεδιασμού	9
1.4	Θεωρία προθετικής κατασκευής και των τεχνικών της	12
1.5	Μέθοδοι προσθετικής κατασκευής	13
1.6	Αποτελέσματα έρευνας – Συμπεράσματα	25
2.	Γενετικός σχεδιασμός και προσθετική κατασκευή	26
2.1	Μέθοδος σχεδίασης νέων προϊόντων-κατασκευών με τη χρήση του Γενετικού σχεδιασμού	26
2.2	Γενετικός σχεδιασμός και η αξιοποίηση του κατά τη διάρκεια μιας σχεδιομελέτης	29
2.3	Λογισμικά πακέτα γενετικού σχεδιασμού	30
2.4	Αντίστοιχα παραδείγματα στο αντικείμενο της εργασίας	32
2.5	Η τεχνητή νοημοσύνη στο σχεδιασμό μηχανολογικών εξαρτημάτων	35
3.	Τοπολογική βελτιστοποίηση και προσθετική κατασκευή	38
3.1	Μέθοδος σχεδίασης νέων προϊόντων-κατασκευών με τη χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης	38
3.2	Ο ρόλος της τοπολογικής βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό δομών που πρόκειται να εκτυπωθούν με τη χρήση προσθετικής κατασκευής	40
3.3	Λογισμικά Πακέτα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης	41
3.4	Αντίστοιχα παραδείγματα στο αντικείμενο της εργασίας	42
3.5	Περιορισμοί της προσθετικής κατασκευής	45
4.	Στόχοι της εργασίας	46
5.	Σχεδιασμός	46
5.1	Τοπολογική βελτιστοποίηση	46
5.2	Γενετικός σχεδιασμός	81



6.	Κατασκευή	113
7.	Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις στο αντικείμενο της εργασίας	125
8.	Βιβλιογραφικές αναφορές	127

1. Εισαγωγή

Αυτές τις μέρες ο σχεδιασμός διαφόρων εξαρτημάτων, προϊόντων κ.α. γίνεται μέσω σχεδιαστικών προγραμμάτων τα οποία έχουν σκοπό πέραν του τρισδιάστατου σχεδιασμού, να αναλύουν μέσω πεπερασμένων στοιχείων και διάφορων μεθόδων το εκάστοτε σχεδιασμένο εξάρτημα ανάλογα με όρια που έχουν τεθεί σε βάρος, αντοχή κ.α. και να βγάζει επιλογές τελικής δομής του εξαρτήματος που θα πληρούν αυτά τα όρια. Οι προηγμένοι αυτοί μέθοδοι ανάλυσης είναι:

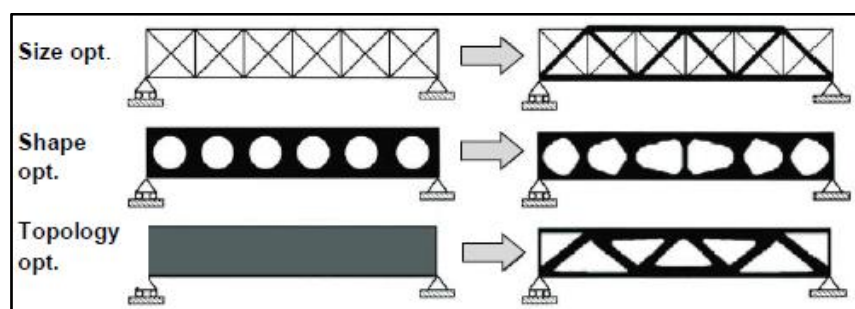
- **Τοπολογική Βελτιστοποίηση** (Topology Optimization)
- **Γενετικός Σχεδιασμός** (Generative Design).

1.1 Ιστορική εξέλιξη τοπολογικής βελτιστοποίησης και γενετικού σχεδιασμού

- **Δομική βελτιστοποίηση:**

Η δομική βελτιστοποίηση έχει χαρακτηριστεί τις τελευταίες δεκαετίες ως σημαντικό εργαλείο στην διαδικασία σχεδιασμού. Συνήθως, γίνεται διάκριση μεταξύ τριών στρατηγικών δομικής βελτιστοποίησης (Βλ. Εικόνα 1.1).

1. **Βελτιστοποίηση μεγέθους**, όπου ο στόχος είναι να βρεθούν οι βέλτιστες διαστάσεις των δομικών στοιχείων.
2. **Βελτιστοποίηση σχήματος**, όπου το σχήμα της κατασκευής παραμετροποιείται και αυτές οι παράμετροι είναι βελτιστοποιημένοι.
3. **Βελτιστοποίηση τοπολογίας**, όπου προσδιορίζεται η βέλτιστη χωρική κατανομή του δομικού υλικού ή των δομικών στοιχείων.



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση των τριών ειδών της βελτιστοποίησης μεγέθους, σχήματος και τοπολογίας.[1]

Ο στόχος της βελτιστοποίησης μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους των τάσεων ή της συμμόρφωσης για μια δεδομένη ποσότητα υλικών και οριακών συνθηκών.



Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό μηχανικών κατασκευών, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή μικροκατασκευών.[2][3]

- **Τοπολογική βελτιστοποίηση:**

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι τοπολογικής βελτιστοποίησης, οι βασικές κατηγορίες αυτών είναι τέσσερις [4]:

- **Homogenization Method (1988)**
- **Density Method (SIMP) (1989)**
- **Discrete Method (ESO) (1993)**
- **Boundary Variation Method (2003)**

Η δομική βελτιστοποίηση (structural optimization) συναντάται στη βιβλιογραφία του 1904, όταν ο Michell [5] επινόησε την αναλυτική λύση για την ελαχιστοποίηση του βάρους σε κατασκευές για δεδομένους περιορισμούς τάσεως σε διάφορα πεδία σχεδιασμού. Το 1985 οι Save και Prager [6] απέδειξαν ότι οι προκύπτουσες δομές (γνωστές ως δομές Michell) είχαν την ελάχιστη ενδοτικότητα για τον αντίστοιχο όγκο σχεδιασμού. Η πρώτη εφαρμογή βελτιστοποίησης με τη μορφή “υλικό ή κενό σημείο” σε ένα σταθερό κάναβο πεπερασμένων στοιχείων διεξήχθη από τους Bendsoe και Kikuchi [7] το 1988. Η σημερινή μορφή της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας, δηλαδή η ποινικοποίηση των ενδιάμεσων τιμών της δυσκαμψίας με σκοπό να επιτευχθεί ένα σχέδιο με μόνο “υλικό η κενό σημείο”, αναπτύχθηκε από τον Bendsoe [8] το 1989.

Στις μεθόδους Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) και Evolutionary Structural Optimization (ESO) η τοπολογία της κατασκευής αποτυπώνεται με την τιμή του υλικού σε κάθε στοιχείο του κάναβου των πεπερασμένων στοιχείων. Όμως υπάρχουν και διαφορετικοί τρόποι αναπαράστασης της τροπολογίας όπως για παράδειγμα, η χρήση των B-splines (NURBS) που απεικονίζει το όριο του υλικού. Τα σημεία ελέγχου των NURBS μπορούν να μετακινηθούν προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη κατασκευή.[9]

- **Γενετικός σχεδιασμός:**

Ο γενετικός σχεδιασμός δεν είναι μια νέα θεωρία. Η προέλευσή του δεν είναι σαφώς τεκμηριωμένη, αλλά χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1970 ως τρόπος προσέγγισης σύνθετων καταστάσεων σχεδιασμού. Η ζήτηση για καινοτόμες λύσεις για το σχεδιασμό προκλήσεων έχει επιταχύνει την υιοθέτησή της στην αρχιτεκτονική και την κατασκευή. Οι βελτιώσεις στην προσιτή τεχνολογία συνέβαλαν επίσης στην ανάπτυξη αυτής της σχεδιαστικής προσέγγισης που μπορεί να διερευνήσει πολλές δυνατότητες σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα.[10]

Το λογισμικό CAD, για περισσότερα από 50 χρόνια, είναι ένα όφελος για τους βιομηχανικούς σχεδιαστές, τους μηχανικούς προϊόντων και τους κατασκευαστές που



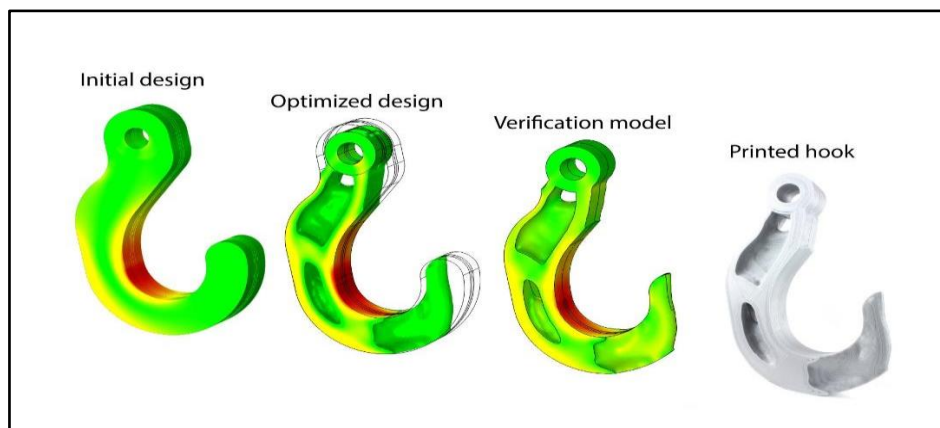
μετατρέπουν τις ιδέες σχεδιασμού σε τελικά αντικείμενα. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι τεχνικές παραγωγής έχουν εξελιχθεί για να περιλαμβάνουν μεταλλική τρισδιάστατη εκτύπωση, ψηφιακή χαρτογράφηση αντικειμένων και υψηλής ταχύτητας, πολυαξονικά μηχανήματα CNC, ενώ τα προγράμματα CAD παρέμειναν σχετικά αμετάβλητα. Τώρα το λογισμικό γενετικού σχεδιασμού επιτρέπει στους μηχανικούς να χρησιμοποιούν την υπολογιστική ισχύ ενός Η/Υ ή σε κάποιες περιπτώσεις και του cloud για να δημιουργήσουν σχεδιαστικές λύσεις που είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν πλήρως τη σειρά των διαδικασιών κατασκευής που έχουν στη διάθεσή τους.[11]

1.2 Θεωρία τοπολογικής βελτιστοποίησης

Ως βελτιστοποίηση τοπολογίας σε προβλήματα κατασκευών, ορίζεται μία μαθηματική προσέγγιση με στόχο την εύρεση του βέλτιστου τρόπου κατανομής υλικού σε μία κατασκευή, για δεδομένη φόρτιση και συντομικές συνθήκες στήριξης, ώστε να ελαχιστοποιείται ένα κριτήριο και συγχρόνως να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού. Ο βέλτιστος σχεδιασμός, είναι η δομή για την οποία η κατασκευή αποκτά τη μέγιστη αντοχή και ακαμψία της, με το ελάχιστο δυνατό υλικό.

Η κατάλληλη κατανομή του υλικού επιτυγχάνεται με τη χρήση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης όπου επιλέγουν από ποια σημεία του σχεδίου θα αφαιρεθεί το υλικό που δεν χρειάζεται (Εικόνα 1.1). Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, ορίζεται αρχικά ο χώρος σχεδιασμού ή αναφοράς (domain reference), ο τύπος υλικού, οι συνθήκες στήριξης και οι φορτίσεις. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η ανάλυση του φορέα ώστε να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης τοπολογίας της κατασκευής. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν υπάρχει σύγκλιση λύσης που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς (Βλ. Εικόνα 1.2).

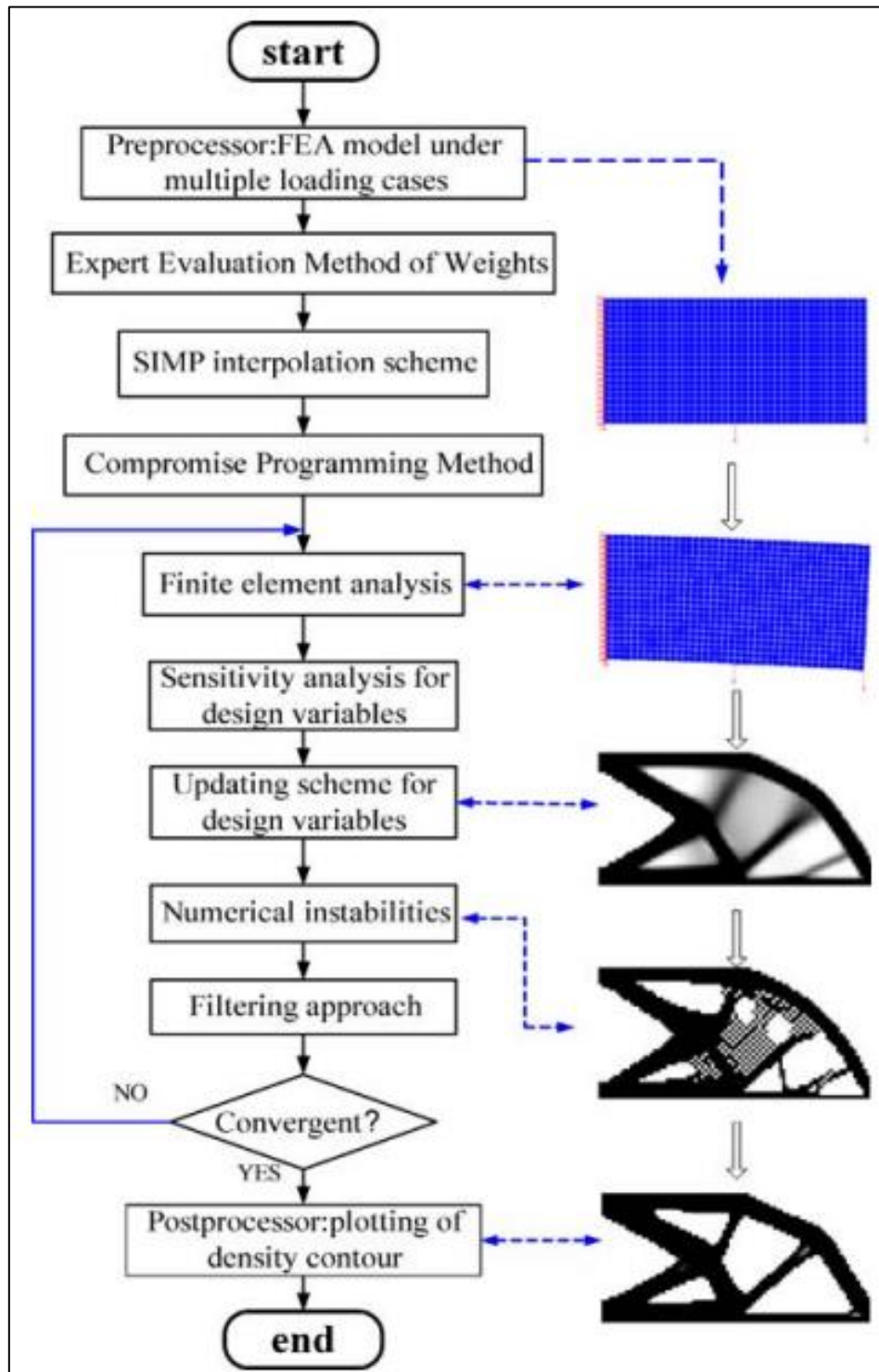
Πλέον τα τελευταία χρόνια με την βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης στον αλγόριθμο τα αποτελέσματα γίνονται όλο και καλύτερα, ταχύτερα και πιο αξιόπιστα διότι η τεχνητή νοημοσύνη θυμάται τα λάθη της και τα διορθώνει καθώς εξελίσσεται.



Εικόνα 1.2: Στάδια βελτιστοποίησης τοπολογίας.[12]



Το διάγραμμα ροής (Βλ. Εικόνα 1.3) απεικονίζει τον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού της τοπολογικής βελτιστοποίησης.



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα ροής τοπολογικής βελτιστοποίησης.[13]



Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 1.3) απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης όπου ξεκινώντας από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων (**Finite Element Analysis**) σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των επιλογών με κριτήριο το βάρος (**Evaluation Method of Weights**), καθώς και αλγόριθμος βελτιστοποίησης (**Solid Isotropic Material with Penalization method**) ο οποίος προβλέπει μια λύση για διασπορά του υλικού σε δεδομένο χώρο σχεδιασμού, για δεδομένο φορτίο, οριακές συνθήκες, κατασκευαστικούς περιορισμούς, και για απαιτούμενες αποδόσεις. Φτάνοντας στη μέθοδο (**Compromise Programming Method**) δημιουργείται μια ιδεατή λύση η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς. Στον επαναληπτικό βρόγχο γίνεται η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (**FEA**), έπειτα ακολουθεί η ανάλυση ευαισθησίας για τις μεταβλητές του σχεδιασμού (**Sensitivity analysis**) και γίνεται ενημέρωση του σχήματος για τις μεταβλητές σχεδιασμού (**Updating scheme**) όπου προκύπτουν αριθμητικές αστάθειες (**Numerical instabilities**) οι οποίες φιλτράρονται (**Filtering approach**) ώστε να ελεγχθεί αν είναι κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέλος, στην περίπτωση που ισχύει ολοκληρώνεται η διαδικασία με την σχεδίαση του περιγράμματος πυκνότητας (**Plotting of density contour**) διαφορετικά επαναλαμβάνεται ο βρόγχος ώσπου να ισχύει.

Τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης συνδυάζουν σχήμα και μέγεθος για να ικανοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση η οποία συνήθως ελαχιστοποιεί τον όγκο. Οπότε λοιπόν η TB έχει τα εξής πλεονεκτήματα στον σχεδιασμό:

- 1) Δημιουργία χαμηλού βάρους κατασκευής.
- 2) Παραγωγή εξαρτήματος έτοιμο για κατασκευή.
- 3) Ελαχιστοποίηση ποσότητας πρώτης ύλης.
- 4) Εξοικονόμηση ενέργειας.
- 5) Λιγότερη ανάγκη για φυσικά πρωτότυπα.
- 6) Μείωση φυσικών δοκιμών.

Το νόημα του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ο συνδυασμός πολλαπλών παραμέτρων. Ο στόχος είναι να βρεθεί η κατάλληλη λύση δομικού σχεδιασμού σε έναν τομέα. Για να επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα πρέπει να καθοριστούν οι παράμετροι όπως οι οριακές συνθήκες, ο αρχικός όγκος καθώς και για μία συγκεκριμένη περιοχή αν θα είναι κενή η θα περιέχει υλικό. Η μαθηματική διατύπωση λοιπόν καθορίζεται ως εξής:



$$\text{Specify } \chi = \begin{Bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \chi_n \end{Bmatrix} \text{ which minimize } f(x)$$
$$\text{where } g_i(x) \leq 0, i=1,2,\dots,m$$
$$h_j(x) = 0, j=1,2,\dots,n$$

[14]

Όπου n είναι μεταβλητή της διακριτοποιημένης περιοχής του συστήματος. X είναι το διάνυσμα των μεταβλητών που πρέπει να πληροί ο σχεδιασμός ώστε να είναι αποδεκτό. Στη συνέχεια υπάρχουν δύο κατηγορίες περιορισμών:

- Περιορισμοί λειτουργίας οι οποίοι αναφέρονται στους περιορισμούς συμπεριφοράς του συστήματος.
- Περιορισμοί γεωμετρίας οι οποίοι αναφέρονται σε φυσικούς περιορισμούς.

Όπου, $f(x)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση κόστους, ουσιαστικά κριτήριο για την σύγκριση αποδεκτών λύσεων για την επιλογή του βέλτιστου σχεδίου, στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση $f(x)$. Οι συναρτήσεις $g_i(x)$ και $h_j(x)$ ονομάζονται περιορισμοί ανισότητας και ισότητας που καθορίζουν τους περιορισμούς του προβλήματος. Τα σημεία στην επιφάνεια περιορισμού με $g_i(x) = 0$ ικανοποιούν οριακά τους περιορισμούς, οπότε η περιοχή σχεδιασμού χωρίζεται σε δύο ξεχωριστούς χώρους. Ο πρώτος χώρος αναφέρεται σε αποδεκτά και οριακά αποδεκτά σημεία όπου $g_i(x) < 0$. Ο δεύτερος χώρος αναφέρεται σε μη αποδεκτά σημεία και εφαρμόζει $g_i(x) > 0$. [14]

1.3 Θεωρία γενετικού σχεδιασμού

Η Γενετική μέθοδος σχεδιασμού μπορεί να έχει παρόμοια αποτελέσματα με την μέθοδο Τοπολογικής βελτιστοποίησης αλλά το επιτυγχάνει με διαφορετικό τρόπο.

Ο τρόπος λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία. Χρησιμοποιεί την ιδέα της εξέλιξης μέσω γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι αρκετά απλοί στην υλοποίησή τους. Οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να κωδικοποιούνται με τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν από μια μεταβλητή που περιέχει σειρά χαρακτήρων ή δυαδικών ψηφίων (0/1). Αυτή η μεταβλητή μιμείται το γενετικό κώδικα που υπάρχει στους ζωντανούς οργανισμούς. Αρχικά, ο Γενετικός Αλγόριθμος παράγει πολλαπλά αντίγραφα της μεταβλητής/γεννητικού κώδικα, συνήθως με τυχαίες τιμές, δημιουργώντας ένα πληθυσμό λύσεων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) δοκιμάζεται για το πόσο κοντά φέρνει την αντίδραση του συστήματος στην επιθυμητή,



μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης και η οποία ονομάζεται συνάρτηση ικανότητας (Σ.Ι).

Οι λύσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην επιθυμητή, σε σχέση με τις άλλες, σύμφωνα με το μέτρο που μας δίνει η Σ.Ι, αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη (Εικόνα 1.2). Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για αρκετές γενιές, οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδίων/λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο/λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την Σ.Ι.

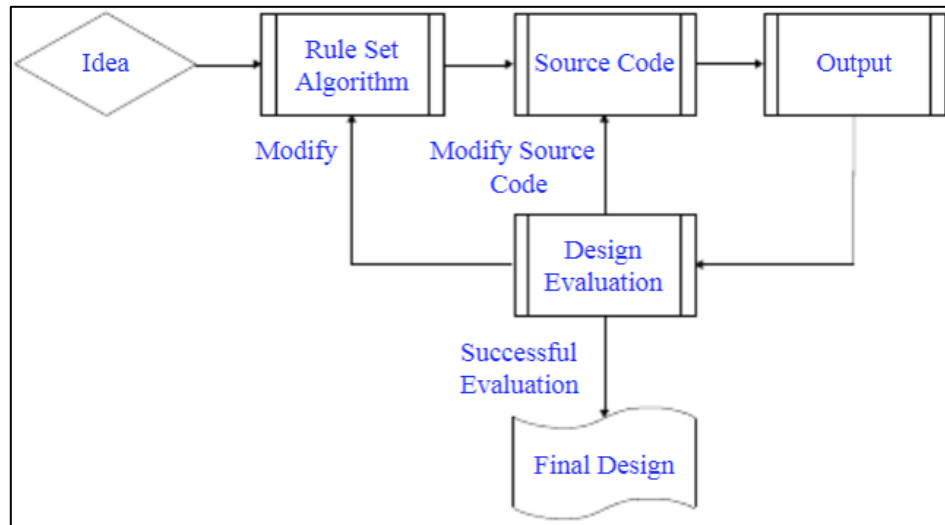
Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μια από τις βάσεις των Προγραμμάτων Τεχνητής Ζωής. Συγκεκριμένα, επιχειρεί να αναπαράγει στους υπολογιστές τους μηχανισμούς της βιολογικής εξέλιξης με τον ίδιο τρόπο που η τεχνητή νοημοσύνη επιχειρεί να αναπαραστήσει και να μιμηθεί τις διαδικασίες της γνώσης.

Τα προγράμματα εξελίσσονται μέχρι να φτάσουν, μέσω μεταλλάξεων, διασταυρώσεων και φυσικής επιλογής, σε μια αποτελεσματική φόρμουλα η οποία θα εκτελεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο μια συγκεκριμένη εργασία (Βλ. Εικόνα 1.4).[15]



Εικόνα 1.4: Σταδιακά αποτελέσματα μέσω τοπολογικής βελτιστοποίησης και γενετικού σχεδιασμού.[16]

Το διάγραμμα ροής (Βλ. Εικόνα 1.5) απεικονίζει τον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού του γενετικού σχεδιασμού.



Εικόνα 1.5: Διάγραμμα ροής γενετικού σχεδιασμού.[17]

Στο παραπάνω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 1.5) απεικονίζονται τα στάδια από τα οποία περνάει η αρχική ιδέα του σχεδιαστή για να καταλήξει στο τελικό αποτέλεσμα. Η λύση ξεκινά με ένα αρχικό σχέδιο ή ιδέα (**Idea**), στη συνέχεια ακολουθεί ο ορισμός κανόνων (**Rule Algorithm**) από τον σχεδιαστή έτσι ώστε να μετατραπεί σε πηγαίο κώδικα (**Source Code**) και να ακολουθήσει η δημιουργία πολλαπλών λύσεων σχεδιασμού (**Output**). Με τα ολοκληρωμένα σχέδια, ο σχεδιαστής μπορεί να αλλάξει τον πηγαίο κώδικα ή το αρχικό σύνολο κανόνων, ανάλογα με τον τρόπο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.[17]

Υπάρχουν διάφορες εκδοχές γενετικού αλγορίθμου από τις οποίες κάποιες περιλαμβάνουν και τη διασταύρωση (ζευγάρωμα) γονιδίων/λύσεων ώστε ο αλγόριθμος να φτάσει στο αποτέλεσμα πιο γρήγορα. Υπάρχει και το στοχαστικό (τυχαίο) συστατικό της μετάλλαξης και ζευγαρώματος, κάθε εκτέλεση του Γ.Α μπορεί να συγκλίνει σε διαφορετική λύση και σε διαφορετικό χρόνο. Η απόδοση του Γ.Α εξαρτάται επί το πλείστον από την Σ.Ι και συγκεκριμένα από το κατά πόσο το μέτρο της περιγράφει την βέλτιστη λύση.

Κάποιες παραλλαγές γενετικών αλγορίθμων είναι :

- Χρωμοσωμική αναπαράσταση

Ο απλούστερος αλγόριθμος αντιπροσωπεύει κάθε χρωμόσωμα ως bit string. Τυπικά, τα αριθμητικά μπορεί να αντιπροσωπεύονται από ακέραιους αριθμούς, και αν είναι δυνατόν μπορεί να χρησιμοποιεί floating point αναπαράσταση. Η αναπαράσταση floating point είναι φυσιολογική στις στρατηγικές εξέλιξης και τον εξελικτικό προγραμματισμό. Ο βασικός αλγόριθμος εκτελεί διασταυρώσεις και μεταλλάξεις σε επίπεδο bit. Άλλες παραλλαγές αντιμετωπίζουν το χρωμόσωμα ως μια λίστα των αριθμών που είναι δείκτες σε έναν πίνακα της διδασκαλίας, οι κόμβοι σε μια συνδεδεμένη



λίστα, αντικείμενα, ή οποιαδήποτε άλλη δομή δεδομένων μπορεί να φανταστεί κανείς. Διασταύρωσης και μετάλλαξης εκτελούνται έτσι ώστε να σέβεται τα όρια στοιχείο δεδομένων.

- Ελιτισμός

Μια πρακτική παραλλαγή της γενικής διαδικασίας της κατασκευής ενός νέου πληθυσμού είναι να επιτρέψει στον καλύτερο οργανισμό-ούς από τη σημερινή γενιά να μεταφερθεί στο επόμενο, αναλλοίωτος. Η στρατηγική αυτή είναι γνωστή ως ελιτιστική επιλογή και εγγυάται ότι η ποιότητα που λαμβάνεται από τον γενετικό αλγόριθμο, δεν θα μειωθεί από τη μια γενιά στην επόμενη.

- Παράλληλες υλοποιήσεις

Παράλληλες υλοποιήσεις των γενετικών αλγορίθμων έρχονται σε δύο γεύσεις. Χονδροειδούς παράλληλοι γενετικών αλγορίθμων προσομοιώνουν πληθυσμούς σε κάθε ένα από τους κόμβους του υπολογιστή και τη μετανάστευση των ατόμων μεταξύ των κόμβων. Λεπτοειδούς παράλληλοι γενετικοί αλγόριθμοι υποθέτουν ότι είναι ένα άτομο σε κάθε κόμβο του επεξεργαστή που αλληλοεπιδρά με τα γειτονικά άτομα για την επιλογή και την αναπαραγωγή.[15]

1.4 Θεωρία προθετικής κατασκευής και των τεχνικών της

Αποτελώντας το νεότερο μέλος στην οικογένεια των κατασκευαστικών τεχνολογιών, η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing) ή τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing), όπως είναι ευρύτερα γνωστή, ενσωματώνει τον χαρακτήρα και τη φιλοσοφία των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών τεχνολογιών με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD/CAM – Computer-Aided Design/Manufacturing), καθώς απαιτεί την ύπαρξη ενός ψηφιακού μοντέλου με βάση το οποίο κατασκευάζεται το τελικό προϊόν.

Το βασικό χαρακτηριστικό της προσθετικής τεχνολογίας είναι ότι ένα μοντέλο που αρχικά δημιουργείται με τη χρήση ενός τρισδιάστατου συστήματος Computer-Aided Design (3D-CAD), μπορεί πια να κατασκευαστεί απευθείας, χωρίς να απαιτείται προηγουμένως ο προγραμματισμός της διαδικασίας παραγωγής του.

Η προσθετική κατασκευή απλοποιεί σε σημαντικό βαθμό τη διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD. Το κάθε κομμάτι δημιουργείται με τη διαδοχική πρόσθεση υλικού σε στρώσεις. Όλες οι σύγχρονες μηχανές προσθετικής κατασκευής που διατίθενται στην αγορά, στηρίζονται σε αυτή τη στρωματική προσέγγιση, ενώ διαφέρουν ως προς το υλικό που μπορούν να χρησιμοποιήσουν, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται και συγκολλούνται μεταξύ τους οι στρώσεις.

Σε κάθε περίπτωση, η νέα τεχνολογία έχει ήδη φέρει επανάσταση στην ανάπτυξη και στην παραγωγή προϊόντων – και το μέλλον είναι δικό της. Κάποιοι αναλυτές εκτιμούν

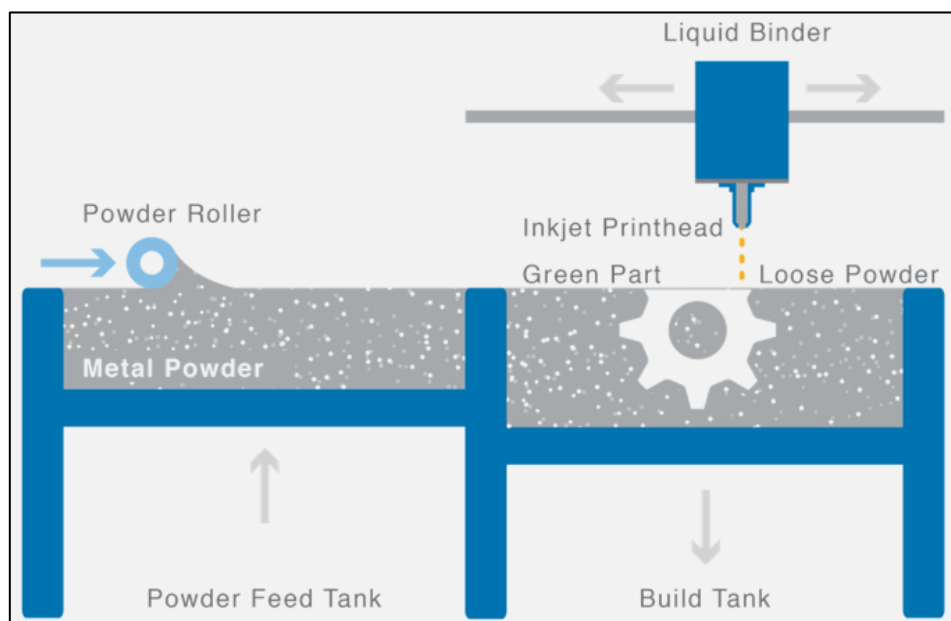


μάλιστα ότι η παραγωγή προϊόντων, όπως είναι γνωστό σήμερα, σταδιακά θα πάψει να υπάρχει και θα αντικατασταθεί από παραλλαγές των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Η νέα βιομηχανική επανάσταση θα επιφέρει αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται τα προϊόντα, αλλά και ιδρύονται επιχειρήσεις.[18]

1.5 Μέθοδοι προσθετικής κατασκευής

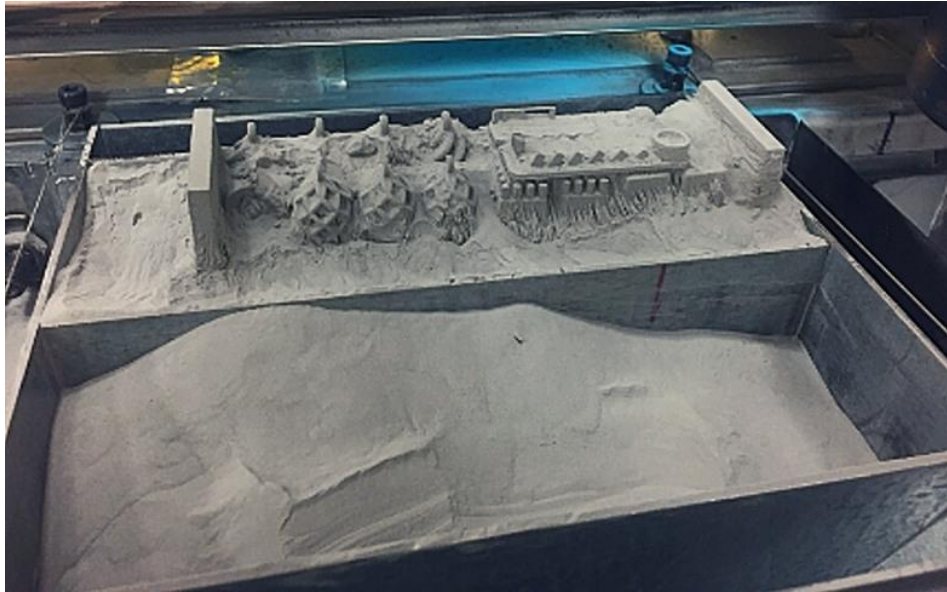
1. Binder Jetting

Η μοναδική μέθοδος που δεν χρησιμοποιεί θερμότητα. Ένα συνδετικό υγρό εναποτίθεται επιλεκτικά μέσω ενός ακροφύσιου πάνω στο υλικό σκόνης δημιουργώντας έτσι το τεμάχιο (Βλ. Εικόνα 1.6) [19].



Εικόνα 1.6: Διαδικασία binder jetting.[20]

Διαδικασία: Το υλικό της σκόνης απλώνεται στην πλατφόρμα καθώς περνάει η κεφαλή εναποτεθέντας το υγρό δημιουργείται μια στρώση του τεμαχίου τότε η πλατφόρμα χαμηλώνει για να συνεχιστεί η κατασκευή του επόμενου επιπέδου του τεμαχίου (Βλ. Εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7: Αποτέλεσμα binder jetting.[21]

Πλεονεκτήματα:

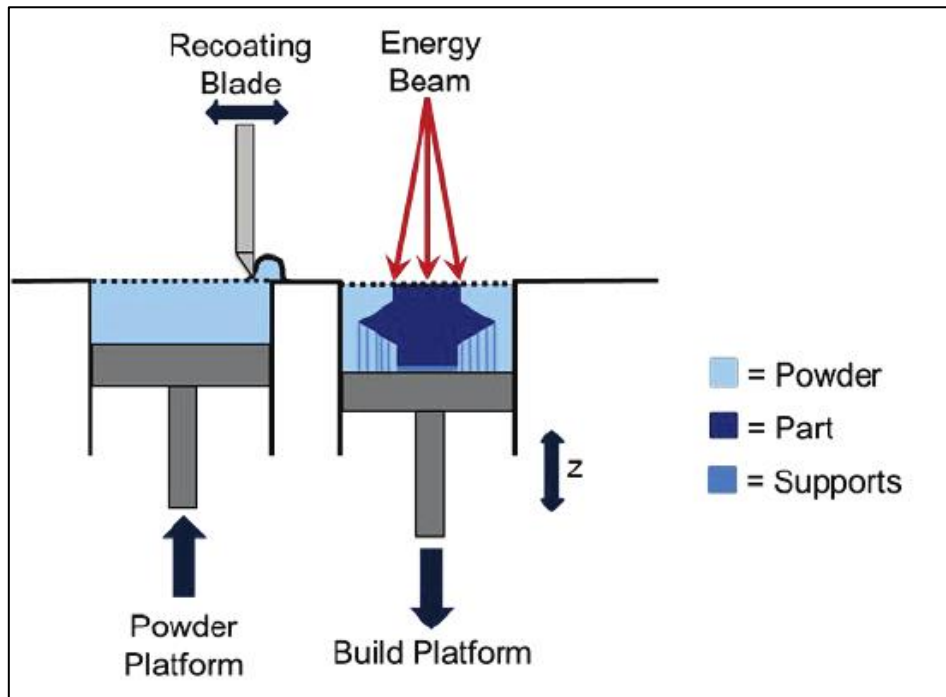
- Μία από τις γρηγορότερες μεθόδους προσθετικής κατασκευής.
- Γίνεται κατασκευή μετάλλου, κεραμικού και πλαστικού.
- Δυνατότητα δημιουργίας διαφορετικών χρωματισμών.

Μειονεκτήματα - Περιορισμοί:

- Έχει χρονοβόρα προετοιμασία.
- Λιγότερο εύστοχο λόγω συρρίκνωσης συγκριτικά με άλλες μεθόδους.
- Κατασκευές χαμηλής αντοχής λόγω πορώδους δομής.

2. Powder Bed Fusion (PBF)

Η διαδικασία χρησιμοποιεί τήξη μέσω λέιζερ, δέσμης ηλεκτρονίων ή θερμικής τήξης. Καθώς η πηγή ενέργειας λιώνει είτε πλαστικά είτε μεταλλικά σωματίδια σκόνης τα οποία συνδέονται ώστε να δημιουργηθεί το τεμάχιο (Βλ. Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Διαδικασία Powder Bed Fusion.[22]

Διαδικασία: Ένας κύλινδρος επικάλυψης απλώνει το υλικό σε μορφή πούδρας μετά επιστρέφοντας με ένα ρολό ξύστρου θα ρυθμιστεί το πάχος του άνω στρώματος να είναι ομοιόμορφο, στην συνέχεια η πηγή ενέργειας λιώνει το υλικό, μετά σκόνη προστίθεται ώστε να καλυφθεί αυτό το επίπεδο και να προστεθεί ένα επιπλέον με τον ίδιο τρόπο ώστε να ολοκληρωθεί το αντικείμενο (Βλ. Εικόνα 1.9).



Εικόνα 1.9: Αποτέλεσμα Powder Bed Fusion.[23]

Πλεονεκτήματα:

- Ελάχιστη έως καθόλου χρήση υποστηρικτικών δομών.
- Δυνατότητα χρήσης πολλαπλών υλικών.
- Το υλικό που δεν χρησιμοποιήθηκε είναι ανακυκλώσιμο.

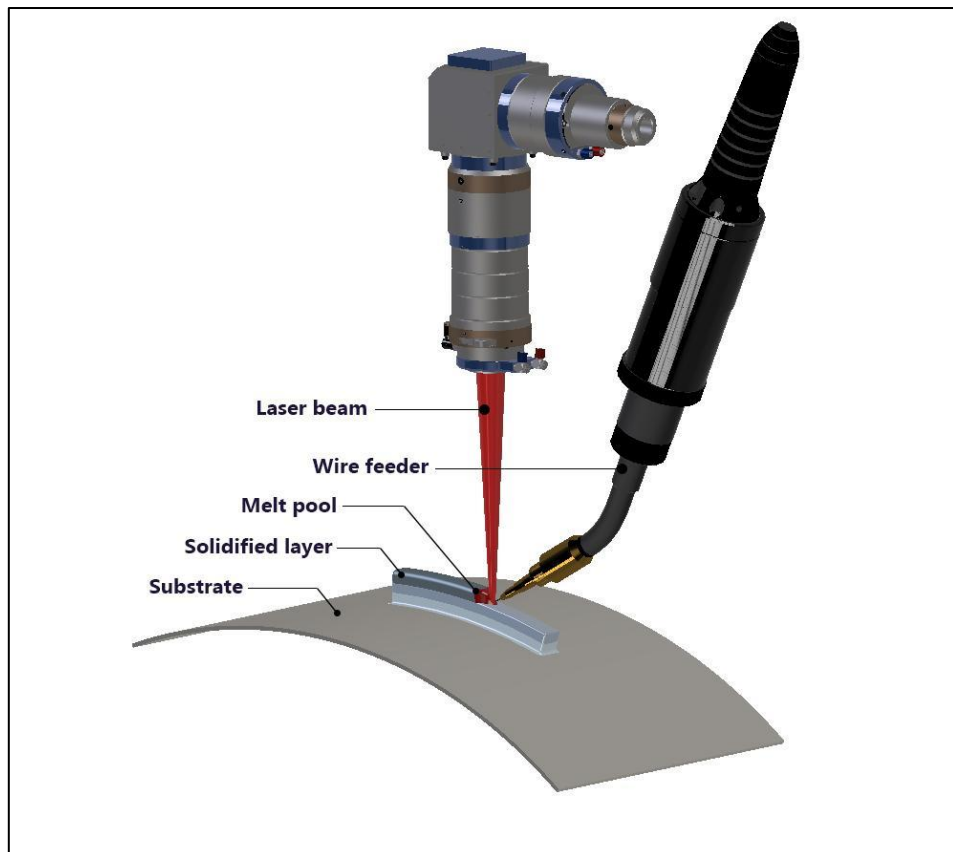
Μειονεκτήματα - Περιορισμοί:

- Χρονοβόρα μέθοδος λόγω προθέρμανσης υλικού (κόκκων), δημιουργία υποπίεσης και ψύξη μετά το τέλος της κατασκευής.
- Θερμική παραμόρφωση κυρίως στα πολυμερή υλικά.
- Υψηλό ενεργειακό κόστος.
- Τραχεία επιφάνεια εξαρτώμενη από το μέγεθος των κόκκων.



3. Directed Energy Deposition (DED)

Η δημιουργία τεμαχίων γίνεται μέσω τήξης και εναπόθεσης των υλικών σε σκόνη ή σε σύρμα μέσα από εστιασμένη πηγή θερμικής ενέργειας (λείζερ, δέσμη ηλεκτρονίων, τόξο πλάσματος) έχει δυνατότητα κατασκευής μεταλλικών, κεραμικών και πλαστικών τεμαχίων αλλά κυρίως χρησιμοποιείται για μεταλλικά μέρη. Βρίσκει χρήση στην επισκευή ανταλλακτικών με την προσθήκη υλικού όπου απαιτείται (Βλ. Εικόνα 1.10).



Εικόνα 1.10: Διαδικασία Directed Energy Deposition.[24]

Πλεονεκτήματα:

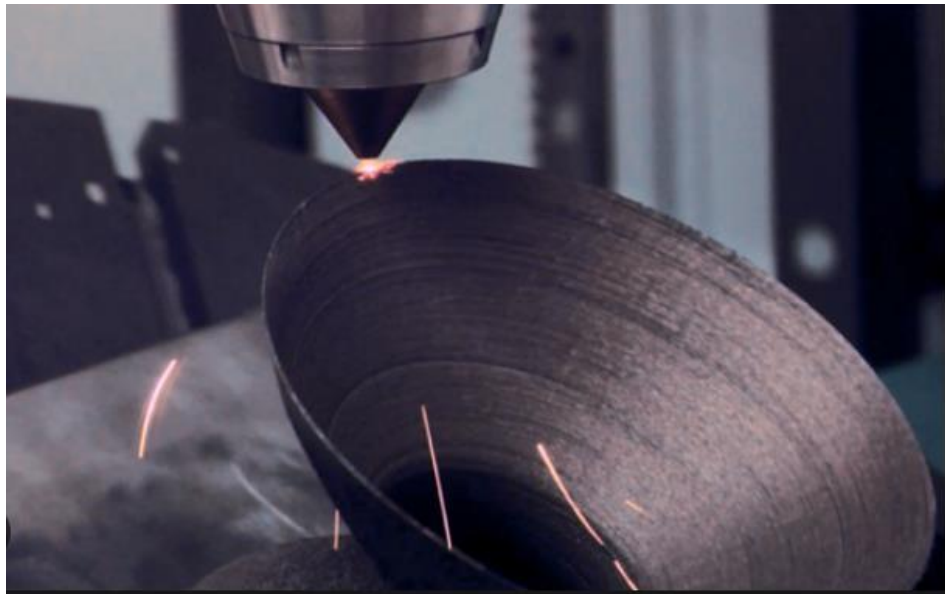
- Η διαδικασία δημιουργεί δυνατά και πυκνά τεμάχια.
- Έχει γρήγορους ρυθμούς κατασκευής.
- Δυνατότητα κατασκευής τεμαχίων μεγάλων διαστάσεων.
- Ποικιλία υλικών όπως μέταλλο, κεραμικά, πολυμερές.
- Ικανότητα κατασκευής από ειδικά κράματα.

Μειονεκτήματα - Περιορισμοί:

- Είναι μέθοδος υψηλού κόστους.
- Έχει σαν αποτέλεσμα παραγόμενα μοντέλα με αρκετή τραχύτητα κάνοντάς τα να χρειάζονται επιπλέον επεξεργασία.



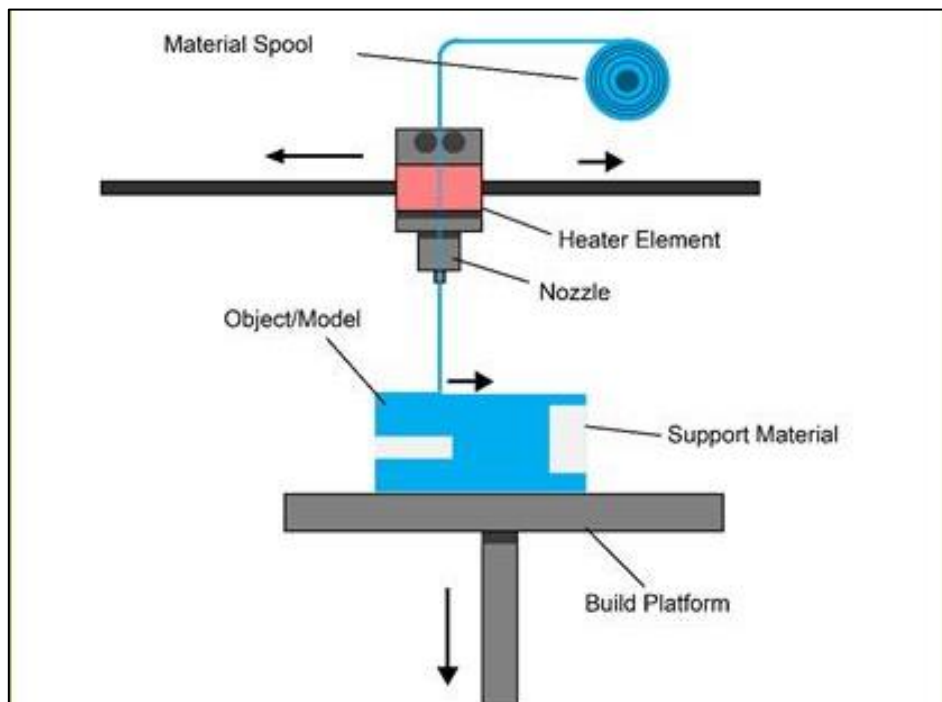
- Αδύνατη κατασκευή βοηθητικών δομών (Supports) λόγω τρόπου λειτουργίας της μεθόδου.



Εικόνα 1.11: Αποτέλεσμα Directed Energy Deposition.[25]

4. Material Extrusion

Είναι η πιο δημοφιλής διαδικασία χρησιμοποιώντας ένα ρολό σύρματος θερμοπλαστικού ή σύνθετου υλικού το οποίο θερμαίνεται και μετά εναποτίθεται στην πλατφόρμα ανά στρώση (Βλ. Εικόνα 1.12).



Εικόνα 1.12: Διαδικασία Material Extrusion.[26]

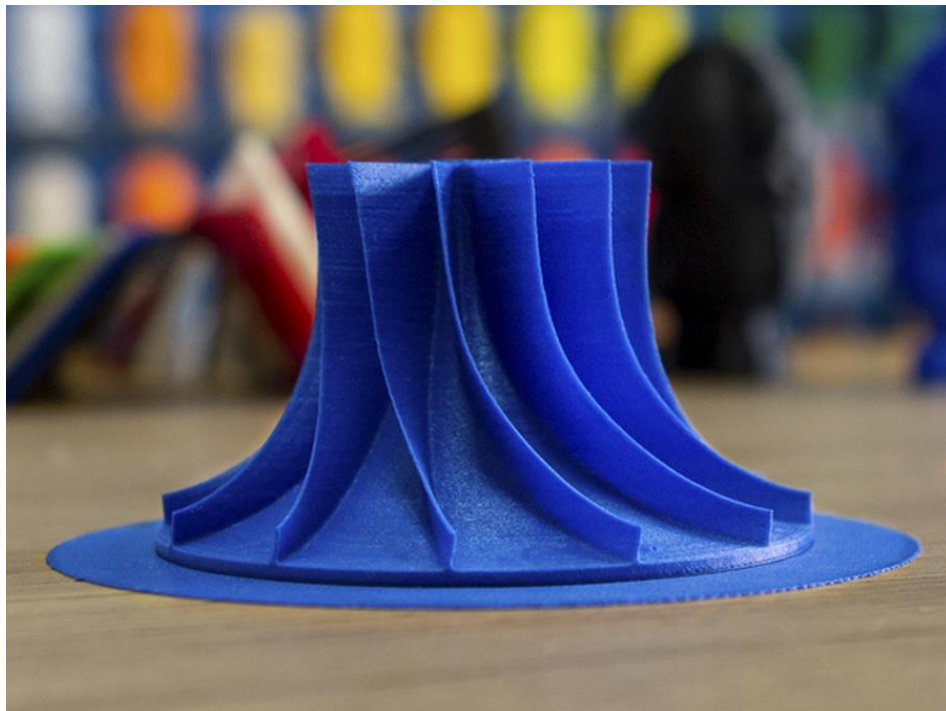


Πλεονεκτήματα:

- Υπάρχουν πολλές επιλογές υλικού.
- Χαμηλό κόστος.
- Γρήγορο αποτέλεσμα.
- Χαμηλή τραχύτητα.

Μειονεκτήματα - Περιορισμοί:

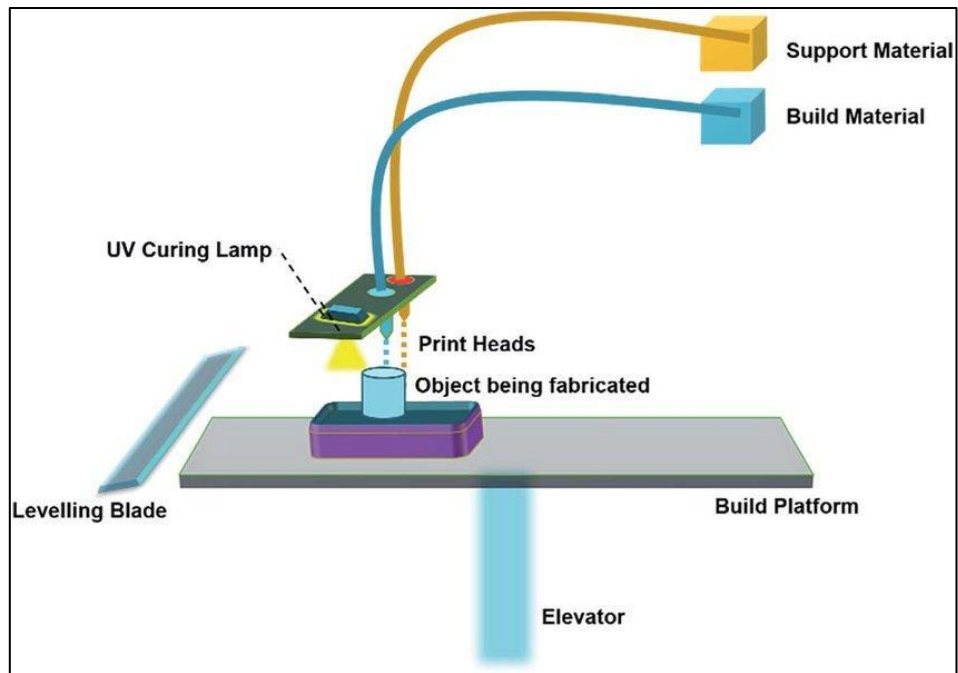
- Η τραχύτητα του είναι ορατή.
- Χαμηλή αντοχή κάθετα ως προς τον άξονα Z.
- Έχει τοξικά υλικά.
- Για μεγάλες γωνίες κρέμασης χρειάζονται υποστηρικτικές γεωμετρίες (supports).



Εικόνα 1.13: Αποτέλεσμα Material Extrusion.[27]

5. Material Jetting

Σε αυτήν την διαδικασία σταγονίδια εναποτίθενται επιλεκτικά πάνω στην πλατφόρμα όπου το υλικό ψύχεται και δημιουργούνται οι στρώσεις ή μια μετά την άλλη. Η ιδιαιτερότητα αυτής της διαδικασίας είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής με πολλαπλά υλικά, χρώματα στο ίδιο αντικείμενο κάτι που το καθιστά πολύ χρήσιμο στην κατασκευή προτύπων (Βλ. Εικόνα 1.14).



Εικόνα 1.14: Διαδικασία material jetting.[28]

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή διαστασιολογική ευστοχία.
- Επιφάνειες με ελάχιστη έως καθόλου τραχύτητα.
- Το αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καλούπι χύτευσης.

Μειονεκτήματα - Περιορισμοί:

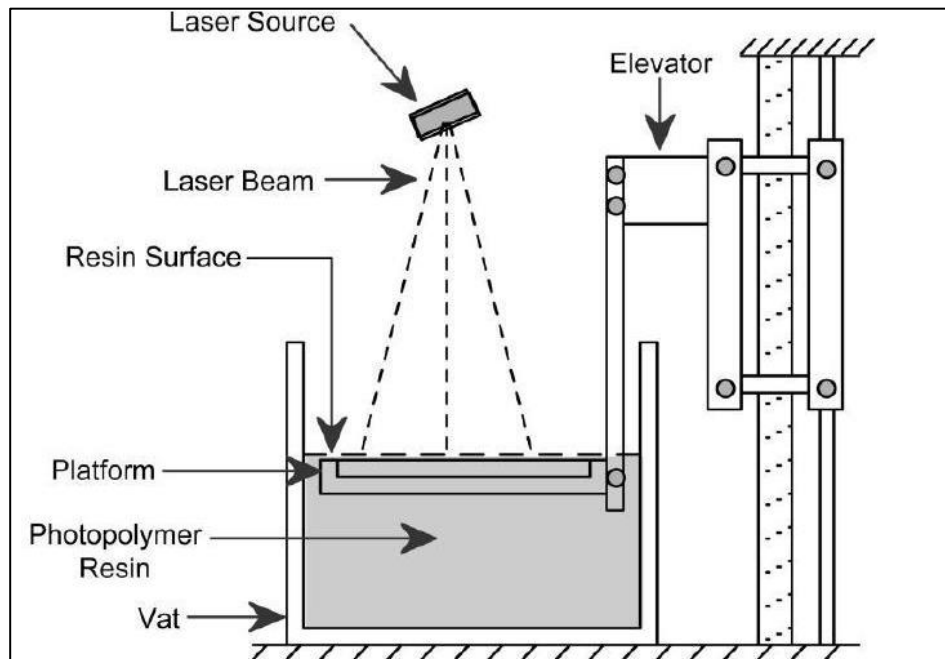
- Περιορισμένα υλικά (wax-like materials).
- Είναι εύθραυστα λόγω υλικού.
- Η κατασκευή είναι χρονοβόρα.



Εικόνα 1.15: Αποτέλεσμα material jetting.[29]

6. Vat Photo Polymerization

Σε αυτήν την διαδικασία μέσω υπεριώδους λέιζερ σε επαφή με υγρή ρητίνη δημιουργείται ένα στρώμα σκληρού πλαστικού και με την κάθετη κίνηση της τράπεζας προστίθενται και άλλα πάνω σε αυτό ώστε να δημιουργηθεί το τελικό αντικείμενο (Βλ. Εικόνα 1.16).



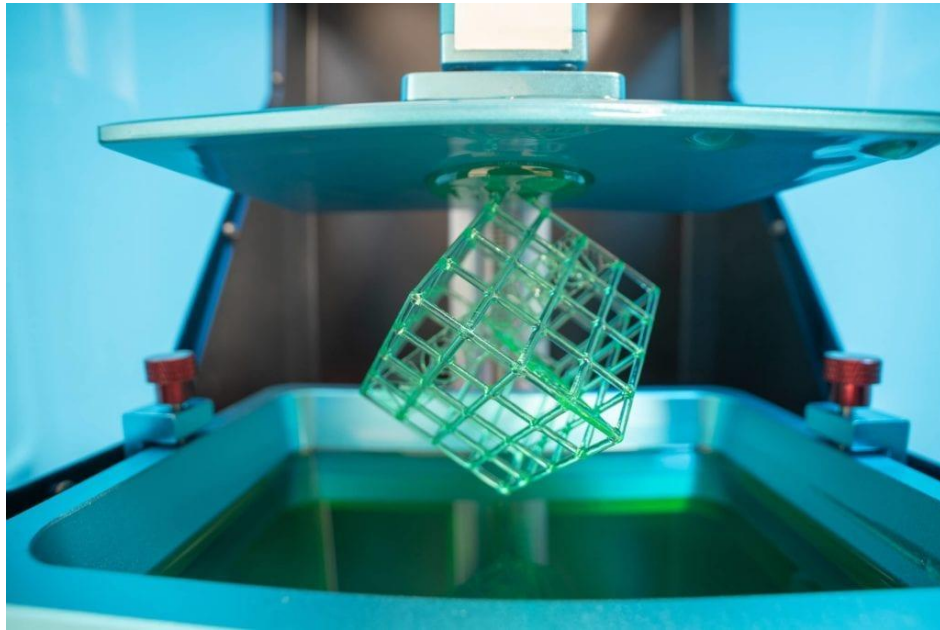
Εικόνα 1.16: Διαδικασία Vat Photo Polymerization.[30]

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή ακρίβεια διαστασιολογικών ανοχών.
- Χαμηλό επίπεδο τραχύτητας.
- Γρήγορη μέθοδος.
- Μεγάλη πλατφόρμα κατασκευής.

Μειονεκτήματα - Περιορισμοί:

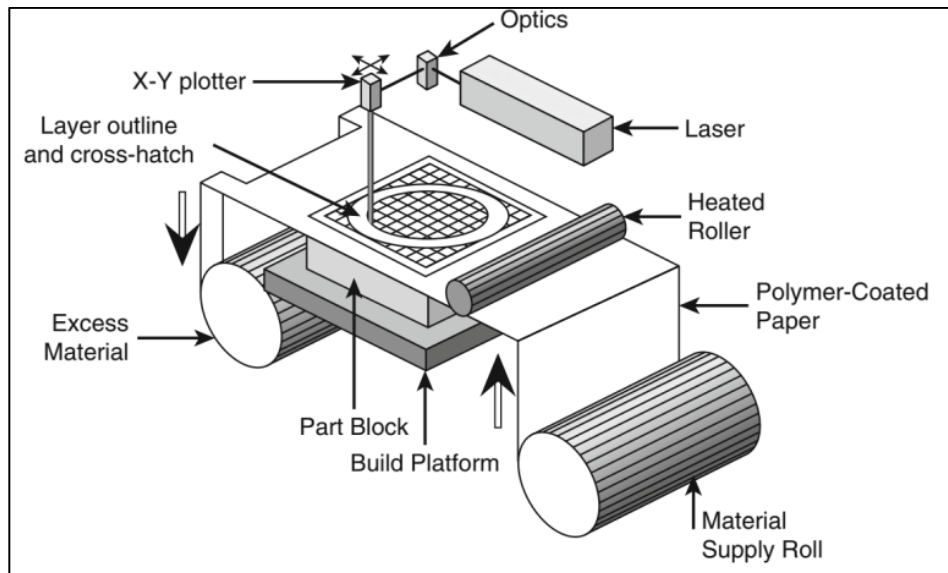
- Υψηλό κόστος συγκριτικά με άλλες μεθόδους.
- Έχει αρκετό χρόνο προετοιμασίας.
- Χρησιμοποιείται φωτορητίνη σαν υλικό με αποτέλεσμα μικρή ποικιλία υλικών.
- Επηρεάζεται από τις υπεριώδεις ακτίνες και μετά την κατασκευή του.



Εικόνα 1.17: Αποτέλεσμα Vat Photo Polymerization.[31]

7. Sheet Lamination

Διαδικασία η οποία δημιουργεί το τρισδιάστατο αντικείμενο μέσω στοιβαγμένων φύλλων του υλικού μέσω συγκόλλησης ή συγκόλλησης μέσω υπερήχων. Μετά από κάθε στρώση υλικού δημιουργείται το τελικό σχήμα μέσω κοπής λέιζερ ή κοπή μέσω κοπτικού και χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή προτύπων (Βλ. Εικόνα 1.18).



Εικόνα 1.18: Διαδικασία Sheet Lamination.[32]



Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό κόστος συγκριτικά με άλλες μεθόδους.
- Έχει μεγάλη περιοχή κατασκευής.
- Πολύχρωμη εκτύπωση.
- Χρήση πολλαπλών υλικών ταυτόχρονα.
- Δεν χρειάζεται υποστηρικτικές δομές.

Μειονεκτήματα - Περιορισμοί:

- Το ύψος του κάθε στρώσης εξαρτάται από το πάχος κάθε φύλλου.
- Περιορισμένη ποικιλία υλικών.
- Παραγωγή μεγάλης ποσότητας μη εκμεταλλεύσιμου υλικού.
- Δυσκολη και χρονοβόρα η αφαίρεση μη εκμεταλλεύσιμου υλικού.



Εικόνα 1.19: Αποτέλεσμα Sheet Lamination.[33]



1.6 Αποτελέσματα έρευνας – Συμπεράσματα

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε παρουσιάστηκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής είναι μέθοδοι που υλοποιούν τέτοιου είδους πολύπλοκες γεωμετρίες όπου προκύπτουν από τις αναλύσεις γενετικού σχεδιασμού ή τοπολογικής βελτιστοποίησης.
- Το μεγάλο εύρος των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσθετική κατασκευή βοηθάει στην κατασκευή προτύπων με χαμηλό κόστος λόγω μεγέθους της κατασκευής και της επιλογής του υλικού.
- Η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι ένας τρόπος ανάλυσης που βασίζεται στην μαθηματική επιστήμη, δηλαδή η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού γίνεται χρησιμοποιώντας τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού σε σχέση με κάποιο ορισμένο κριτήριο.
- Το αποτέλεσμα που προκύπτει από την τοπολογική βελτιστοποίηση είναι ένα ανάλογο με τα όρια που έχουν τεθεί.
- Ο γενετικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί μια επαναληπτική διαδικασία σχεδίασης με τεχνητή νοημοσύνη από όπου προκύπτει ορισμένος αριθμός αποτελεσμάτων που πληρούν συγκεκριμένους περιορισμούς.
- Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι το αποτέλεσμα του γενετικού σχεδιασμού προκύπτει από ανάπτυξη του σχεδίου καθώς μιμείται το οργανικό σύστημα της φύσης, σε αντίθεση με την τοπολογική βελτιστοποίηση που το αποτέλεσμα προκύπτει από την αφαίρεση υλικού από το αρχικό σχέδιο.



2. Γενετικός σχεδιασμός και προσθετική κατασκευή

2.1 Μέθοδος σχεδίασης νέων προϊόντων-κατασκευών με τη χρήση του Γενετικού σχεδιασμού

Οι περισσότερες εργασίες ανάπτυξης προϊόντων είναι πολύπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης. Οι σχεδιαστικές ομάδες τις προσεγγίζουν επαναληπτικά, βελτιώνοντας την αρχική υπόθεση μέσω κύκλων ανάλυσης, ερμηνείας και βελτίωσης της μηχανικής. Αλλά κάθε τέτοια επανάληψη απαιτεί χρόνο και χρήμα και οι ομάδες μπορούν να επιτύχουν μόνο λίγες επαναλήψεις εντός του χρονοδιαγράμματος ανάπτυξης. Επειδή οι ομάδες σπάνια έχουν την ευκαιρία να διερευνήσουν εναλλακτικές λύσεις που αποκλίνουν σημαντικά από τις βασικές παραδοχές τους, πολύ συχνά ο τελικός σχεδιασμός είναι μη βέλτιστος.

Η σημερινή τεχνολογία προσφέρει μια εναλλακτική λύση. Η ψηφιακή προσομοίωση και ανάλυση είναι τώρα τόσο γρήγορα που τα σχέδια μπορούν να αξιολογηθούν σε δευτερόλεπτα ή και λιγότερο. Οι αλγόριθμοι μπορούν να προσαρμόσουν αυτόματα τη γεωμετρία ενός τμήματος μεταξύ προσομοιώσεων, χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη βελτίωση. Χρησιμοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, αυτά τα νέα συστήματα γενετικής σχεδίασης μπορούν να εξερευνήσουν ένα πολύ μεγαλύτερο σύμπαν πιθανών λύσεων, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα χιλιάδων προσομοιώσεων που θα κλείσουν σε ένα σχέδιο που παρέχει τον πιο ευνοϊκό συνδυασμό χαρακτηριστικών.

Για ορισμένους τύπους προβλημάτων μηχανικής, οι γενετικοί αλγόριθμοι ξεπερνούν ήδη τις ομάδες ανθρώπινης μηχανικής. Επιπλέον, μπορούν να παράγουν μη διαισθητικές λύσεις που μπορεί να μην έχουν βρεθεί ποτέ χρησιμοποιώντας παραδοσιακές διαδικασίες.

Η πιο συνηθισμένη χρήση για γενετικούς αλγόριθμους σχεδιασμού είναι η δομική βελτιστοποίηση, δημιουργία εξαρτημάτων που παρέχουν επαρκή αντοχή, ακαμψία και αντοχή στην κόπωση με το ελάχιστο υλικό. Τέτοιες εφαρμογές είναι κοινές όπου το βάρος αποτελεί πρωταρχικό μέλημα, όπως στο σχεδιασμό εσωτερικών δομικών εξαρτημάτων για φορητά εργαλεία (για βελτίωση της εργονομίας), αθλητικό εξοπλισμό (για βελτίωση της απόδοσης), οχήματα και αεροσκάφη (για μείωση της κατανάλωσης καυσίμου ή αύξηση του ωφέλιμου φορτίου), ή οποιοδήποτε προϊόν όπου το επιπλέον βάρος είναι σημαντικός παράγοντας κόστους. Όταν το υλικό είναι πρωταρχικός οδηγός κόστους, η μεγαλύτερη δομική αποδοτικότητα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση τόσο από πλευράς κόστους όσο και από άποψη βιωσιμότητας.



Σε βιομηχανίες που κυμαίνονται από την αυτοκινητοβιομηχανία έως την αεροδιαστημική μέχρι τα αθλητικά είδη, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μείωσαν το κόστος τεμαχίου από 6 έως 20 τοις εκατό, το βάρος του τεμαχίου κατά 10 έως 50 τοις εκατό και τον χρόνο ανάπτυξης κατά 30 έως 50 τοις εκατό. Ένας κατασκευαστής ηλεκτρικών εργαλείων, για παράδειγμα, μείωσε το βάρος του εξαρτήματος στήριξης χύτευσης κατά 26 τοις εκατό και το κόστος του κατά 8 τοις εκατό (Βλ. Εικόνα 2.1), χωρίς να επηρεάσει τη διεπαφή μεταξύ του εξαρτήματος και του μεγαλύτερου συγκροτήματος. Για ένα μεγάλο, μη επεξεργασμένο συστατικό, η γενετική βελτιστοποίηση απέδωσε μείωση βάρους περίπου 40% αφαιρώντας ένα πλήρες κιλό από το τελικό προϊόν.[34]

	Tool head	Bracket	Piston
1 Original part			
2 Generated design			
3 Engineered output			
Description	Large, forged-steel hand-tool component. High material cost and difficult to operate due to weight.	Aluminum die-cast support bracket. Desire to reduce cost and weight, but preserve original profile.	Die-cast pump piston. Target to reduce piston weight, counter-balance weight, and load on motor.
Effort & time	1 design engineer for 3 days	1 design engineer for 2 days	1 design engineer for 1.5 days
Impact	Weight: 38% savings Cost: 15% reduction	Weight: 26% savings Cost: 8% reduction	Weight: 23% savings Cost: 12% reduction

Εικόνα 2.1: Βελτιστοποιημένα εξαρτήματα.[34]

Οι τεχνολογίες γενετικού σχεδιασμού και προσθετικής κατασκευής (ΠΚ) θεωρούνται συχνά ως φυσικοί συνεργάτες, καθώς οι μηχανές ΠΚ αντιμετωπίζουν καλά τις περίπλοκες, οργανικές γεωμετρίες που προκύπτουν συχνά από τέτοιους αλγόριθμους. Ωστόσο, τα πιο πρόσφατα συστήματα παραγωγής μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς στις διαδικασίες κατασκευής. Αυτή η ευελιξία επεκτείνει το εύρος των εξαρτημάτων που μπορεί να στοχεύσει ο γενετικός σχεδιασμός, ενώ διευκολύνει τις ομάδες σχεδιασμού να αξιολογήσουν εναλλακτικές τεχνικές κατασκευής.

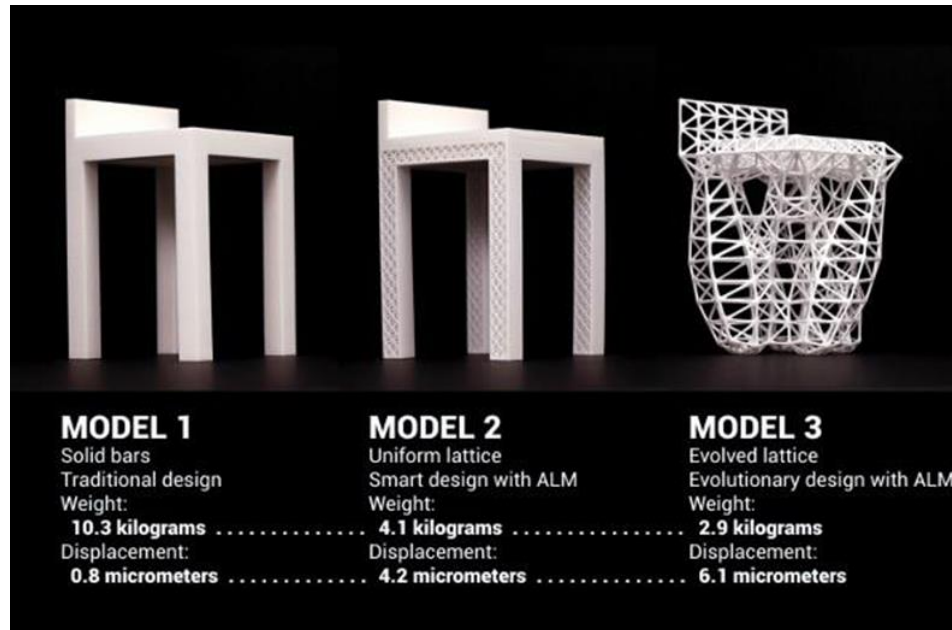
Επιπλέον, οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν περιορίζονται σε εργασίες δομικού σχεδιασμού. Η προσέγγιση εφαρμόζεται ήδη σε άλλους τομείς μηχανικής, όπως ηλεκτρικός και θερμικός σχεδιασμός, βελτιστοποίηση ροής ρευστού, οπτική και ακουστική. Αρχιτέκτονες και πολεοδόμοι υιοθετούν ακόμη και γενετικές τεχνικές για τη βελτιστοποίηση της διάταξης των κτιρίων και των χώρων της πόλης. Παρόμοιοι αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης που προκύπτουν εντελώς εκτός του χώρου σχεδιασμού προϊόντων.[34]



Εικόνα 2.2: Γενετική βελτιστοποίηση σκελετού Drone.[35]

Οι εταιρείες θα πρέπει να διασφαλίσουν ότι εφαρμόζουν προσεγγίσεις γενετικού σχεδιασμού σε ολόκληρη τη διαδικασία εμπορίας. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να προσφέρουν αξία σε πολλά σημεία στο ταξίδι ενός προϊόντος από την ιδέα στην αγορά:

- **Αρχική ιδέα.** Δοκιμάζοντας νέα σχήματα και γεωμετρίες, μεταφράζοντας καινοτόμες ιδέες από το μυαλό του σχεδιαστή σε ένα απλό προϊόν.
- **Λεπτομερής σχεδιασμός και μηχανική.** Επίτευξη νέων επιπέδων απόδοσης προϊόντος ελαχιστοποιώντας το κόστος.
- **Βιομηχανοποίηση.** Αξιολόγηση των υποψήφιων γεωμετριών για την ικανότητα κατασκευής και, κατά περίπτωση, ενεργοποίηση και επιτάχυνση της χρήσης της προσθετικής κατασκευής.
- **Βελτίωση προϊόντων.** Υποστήριξη σχεδιασμού ως προς κόστος, αξίας και βάρους, ξεκλειδώνοντας πρόσθετη αξία και βελτίωση.
- **Προμήθεια.** Δόμηση σύνθετων διαδικασιών υποβολής προσφορών για τη βελτίωση των ανταλλαγών μεταξύ των τιμών, των τεχνικών δυνατοτήτων, της ιχνηλασιμότητας, του κινδύνου, της βιωσιμότητας και άλλων παραγόντων.



Εικόνα 2.3: Καρέκλα από γενετικό σχεδιασμό.[36]

2.2 Γενετικός σχεδιασμός και η αξιοποίηση του κατά τη διάρκεια μιας σχεδιομελέτης

Μία σχεδιομελέτη για να έρθει εις πέρας περνάει από πολλά στάδια όπου στα οποία μέσα βρίσκεται και ο σχεδιασμός του εκάστοτε αντικειμένου. Ο σχεδιασμός λοιπόν αυτός δεν είναι αν μη τι άλλο στη θεωρία, προκειμένου λοιπόν το αντικείμενο αυτό να περάσει από κάποιους ελέγχους πριν την τελειοποίηση του θα χρειαστούν και τα ανάλογα λογισμικά τα οποία ειδικά τα τελευταία χρόνια έχουν μεγάλη εξέλιξη. Αρκετά από τα λογισμικά σχεδιασμού περιέχουν και τις αναλύσεις Γενετικού σχεδιασμού, οπότε όταν δημιουργηθεί το εκάστοτε σχέδιο αναλύεται με την βοήθεια του γενετικού σχεδιασμού εάν το θελήσει ο χρήστης.

Καθώς λοιπόν το επιλέξει ο χρήστης ξεκινά ο γενετικός αλγόριθμος και αναλύει το αρχικό σχήμα και κάνοντας τους κατάλληλους υπολογισμούς φτάνει στα ανάλογα αποτελέσματα (Βλ. Εικόνα 2.4). Αφού λοιπόν έχει τερματίσει ο αλγόριθμος εμφανίζει τα εξής αποτελέσματα από τα οποία ο χρήστης επιλέγει το καταλληλότερο ανάλογα τις καταπονήσεις και τις υπόλοιπες παραμέτρους που έχει θέσει. Το κύριο προτέρημα του γενετικού αλγόριθμου είναι να μειώσει το βάρος όσο το δυνατόν περισσότερο και να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες του εκάστοτε αντικειμένου σύμφωνα με τις παραμέτρους που του έχουν δοθεί.

Οπότε λοιπόν ο γενετικός σχεδιασμός κατά την διάρκεια μιας σχεδιομελέτης είναι αναγκαίος για την βελτιστοποίηση ακόμη και την τελειοποίηση ενός σχεδιασμένου



αντικειμένου. Είναι ένα εργαλείο το οποίο είναι το δεξί χέρι ενός σχεδιαστή αλλά ακόμη και ερασιτέχνη σχεδιαστή.



Εικόνα 2.4: Βήματα γενετικού σχεδιασμού.[37]

2.3 Λογισμικά πακέτα γενετικού σχεδιασμού

Οι χρήστες που έχουν εμπειρία στο CAD μπορούν εύκολα να κάνουν το άλμα στο λογισμικό γενετικού σχεδιασμού. Το λογισμικό γενετικού σχεδιασμού προσφέρει περισσότερα από τον παραδοσιακό τρόπο σχεδιασμού σε κοινές πλατφόρμες CAD. Πλέον υπάρχουν διάφορα λογισμικά πακέτα γενετικού σχεδιασμού σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε προϊόντος καθώς και κάθε σχεδιαστή. Τα ακόλουθα είναι τα πιο δημοφιλή προγράμματα λογισμικού που προσφέρουν τις δυνατότητες του γενετικού σχεδιασμού:

- 1) Fusion 360 της Autodesk:** Το Fusion 360 προσφέρει στους χρήστες ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων μοντελοποίησης, όπως σκίτσο, άμεση μοντελοποίηση, μοντελοποίηση επιφάνειας, παραμετρική μοντελοποίηση, μοντελοποίηση πλέγματος, απόδοση και πολλά άλλα. Οι δυνατότητες δημιουργικής σχεδίασης επιτρέπουν στους χρήστες να προσδιορίσουν τις απαιτήσεις σχεδιασμού, τους περιορισμούς, τα υλικά και τις επιλογές κατασκευής για τη δημιουργία σχεδίων έτοιμων για κατασκευή, επιτρέποντας στους χρήστες να αξιοποιήσουν τη δύναμη της μηχανικής μάθησης και την τεχνητή νοημοσύνη ώστε να αναθεωρήσουν τα αποτελέσματα σχεδιασμού που δημιουργούνται από το cloud με βάση τις οπτικές ομοιότητες, γραφήματα και φίλτρα.
- 2) Creo Generative Design της PTC:** Αξιοποιώντας το cloud, αυτό το λογισμικό επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν βελτιστοποιημένες έννοιες σχεδιασμού και ταυτόχρονα να εξερευνούν και να δοκιμάζουν γρήγορα πολλές επαναλήψεις σχεδιασμού. Επισημαίνει τις επαναλήψεις



που ταιριάζουν καλύτερα στους στόχους ενός χρήστη με βάση τις παραμέτρους σχεδιασμού που ορίζει ο χρήστης. Στο περιβάλλον σχεδιασμού Creo, αυτό το λογισμικό υπόσχεται να δημιουργήσει σχέδια υψηλής ποιότητας, χαμηλού κόστους και κατασκευής, όλα σε λιγότερο χρόνο από τους κορυφαίους ανταγωνιστές.

- 3) **nTop Platform της nTopology:** Το λογισμικό nTop Platform υπόσχεται στους χρήστες πλήρη έλεγχο σε κάθε πτυχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης και των εξόδων της. Αξιοποιώντας προηγμένα δημιουργικά εργαλεία, οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν επαναχρησιμοποιήσιμες ροές εργασίας προσαρμοσμένες στις μοναδικές απαιτήσεις μιας εφαρμογής. Οι επιλεγμένες δυνατότητες αυτού του προγράμματος περιλαμβάνουν λειτουργίες μοντελοποίησης και δικτύωσης, βελτιστοποίηση τοπολογίας, ροές εργασίας επαναχρησιμοποιήσιμων σχεδίων, σχεδιασμό με βάση το πεδίο και προσομοιώσεις ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων μηχανικής-θερμικής.
- 4) **NX της Siemens:** Πέρα από τον γενετικό σχεδιασμό, το κύριο χαρακτηριστικό που προσφέρει η NX είναι η ψηφιακή διπλή τεχνολογία, η οποία υπόσχεται στους χρήστες μια ευέλικτη, ισχυρή και ολοκληρωμένη λύση που θα τους βοηθήσει να βελτιστοποιήσουν το σχεδιασμό και την παράδοση καλύτερων προϊόντων. Το NX συνδυάζει διαλειτουργικότητα σχεδίασης, επικύρωση, ορισμό βάσει μοντέλου και πολλά άλλα για να βοηθήσει τους χρήστες να μεταφέρουν τα προϊόντα μέσω της έρευνας και της ανάπτυξης γρηγορότερα και με χαμηλότερο κόστος, βελτιώνοντας παράλληλα την ποιότητα των προϊόντων.
- 5) **MSC Apex Generative Design της MSC Software:** Αυτό το πρόγραμμα υπόσχεται στους χρήστες μια ολοκληρωμένη λύση για την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας πιο γρήγορα και με λιγότερη ανθρώπινη παρέμβαση από τους ανταγωνιστές του. Το MSC Software αναφέρει ότι οι χρήστες αντιμετωπίζουν μειώσεις στον αρχικό σχεδιασμό και χρόνο εγκατάστασης έως και 80 τοις εκατό. Με μια ματιά, το λογισμικό συνδυάζει την απλότητα, τον αυτοματοποιημένο σχεδιασμό, την εισαγωγή και την επικύρωση και την άμεση παραγωγή σε μία διαδικασία.

Αυτά είναι τα κύρια λογισμικά πακέτα γενετικού σχεδιασμού από τα οποία το καθένα ξεχωριστά προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες χωρίς μεγάλες διαφορές όμως μεταξύ τους. Ανάλογα τις απαιτήσεις του εκάστοτε σχεδιαστή και τις απαιτήσεις του σχεδιαζόμενου τεμαχίου επιλέγεται και το εκάστοτε λογισμικό.[38]

2.4 Αντίστοιχα παραδείγματα στο αντικείμενο της εργασίας

Ο γενετικός σχεδιασμός έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις καθώς χρησιμοποιείται από διάφορων ειδών βιομηχανίες, μία από αυτές είναι η γνωστή Extreme Tuners της οποίας ο ιδρυτής είναι ο Σπύρος Πανόπουλος. Εκεί παράγονται βέλτιστης ποιότητας και αγωνιστικής χρήσης ανταλλακτικά κινητήρων εσωτερικής καύσης όπου υπόσχονται αρκετά μεγαλύτερες επιδόσεις.

Ο Σπύρος Πανόπουλος αποκάλυψε το project στο οποίο δουλεύει τον τελευταίο καιρό το οποίο είναι η κατασκευή ενός hypercar όπου έχει χρησιμοποιηθεί το λογισμικό του γενετικού σχεδιασμού έτσι ώστε να κατασκευαστούν διάφορα εξαρτήματα όπως μπιέλες, έμβολα κ.ά. καθώς και να παραχθούν με την βοήθεια της προσθετικής κατασκευής (Βλ. Εικόνα 2.5, Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.5: Εξαρτήματα γενετικού σχεδιασμού και προσθετικής κατασκευής.[39]



Εικόνα 2.6: Μπιέλα μέσω γενετικού σχεδιασμού.[39]

Ο λόγος για τον οποίο γίνονται οι προσπάθειες να αντικατασταθούν τα “Κλασσικά” εξαρτήματα με τα μοντέρνα του γενετικού σχεδιασμού είναι για να αυξηθεί η αντοχή τους καθώς και για να μειωθεί σημαντικά το βάρος τους καθώς σε ένα hypercar το βάρος παίζει τόσο σημαντικό ρόλο όσο και σε ένα αεροσκάφος. Κάθε κιλό που γλιτώνει το κερδίζει σε επιτάχυνση, όπως και ένα αεροσκάφος σε οικονομία. Αν μη τι άλλο την ίδια λογική ακολουθεί και στις ζάντες του αυτοκινήτου καθώς και στα φρένα του (Βλ. Εικόνα 2.7, Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.7: Φρένα hypercar μέσω γενετικού σχεδιασμού.[39]



Εικόνα 2.8: Ζάντα μέσω γενετικού σχεδιασμού.[39]

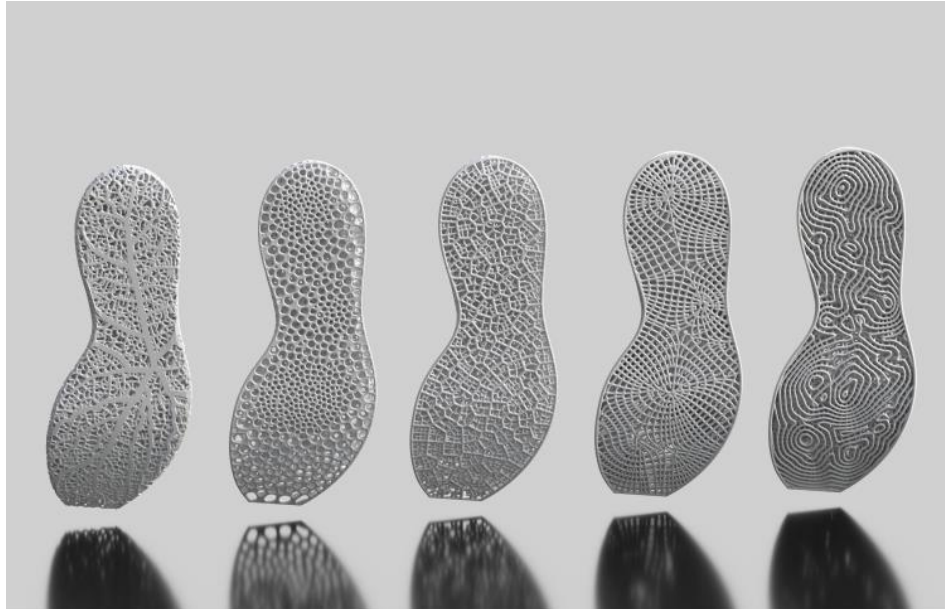
Άλλο ένα project το οποίο έλαβε χώρα το 2016 είναι της βιομηχανίας APWORKS η οποία ειδικεύεται στην προσθετική κατασκευή στα πεδία της αεροδιαστημικής, της άμυνας, του διαστήματος και του μηχανοκίνητου αθλητισμού. Η βιομηχανία λοιπόν αυτή κατάφερε να σχεδιάσει σε τρισδιάστατο λογισμικό ένα ηλεκτροκίνητο δίκυκλο το οποίο στη συνέχεια το πέρασε στο λογισμικό γενετικού σχεδιασμού και στο τέλος το κατασκεύασε με την βοήθεια της προσθετικής κατασκευής το οποίο ζυγίζει μόλις 35 κιλά και κοστίζει 50.000€ (Βλ. Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Δίκυκλο μέσω γενετικού σχεδιασμού και προσθετικής κατασκευής.[40]



Καθώς η τεχνολογία προχωρά και ολοένα και περισσότερες βιομηχανίες χρησιμοποιούν τις νέες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής (3D Printing) καθώς και του γενετικού σχεδιασμού, έτσι και η βιομηχανία υποδημάτων New Balance κατασκεύασε ένα αθλητικό παπούτσι όπου η σόλα του είναι σχεδιασμένη μέσω γενετικού σχεδιασμού καθώς και κατασκευασμένη μέσω της προσθετικής κατασκευής (Βλ. Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.10: Αθλητικές σόλες παπουτσιών μέσω γενετικού σχεδιασμού.[41]

2.5 Η τεχνητή νοημοσύνη στο σχεδιασμό μηχανολογικών εξαρτημάτων

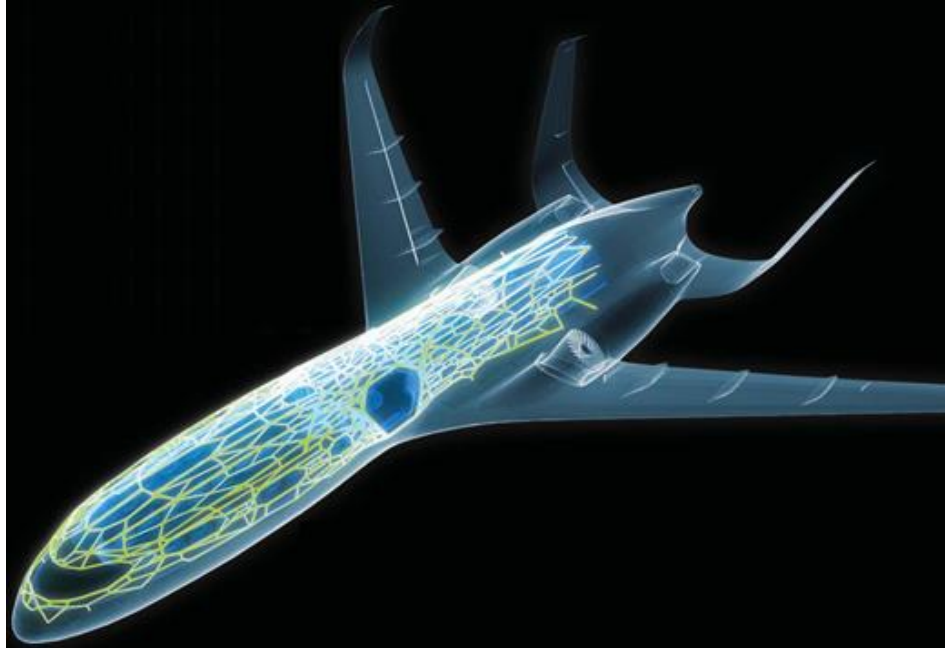
Η μηχανική ήταν ένα επάγγελμα που διεξήχθη με μολύβια και χαρτί. Οι υπολογισμοί γίνονταν με το χέρι και τα σχέδια γινόντουσαν σε μεγάλα φύλλα. Από τα πραγματικά σχέδια, θα κατασκευάζονταν φυσικά μοντέλα για να κατανοήσουν πώς πρέπει να φαίνεται και να κατασκευάζεται το τελικό προϊόν.

Σήμερα, φυσικά, η μηχανική είναι ένας κλάδος που ασχολείται έντονα με υπολογιστικά και λογισμικά εργαλεία. Ο σχεδιασμός με τη βοήθεια υπολογιστή, η δυναμική των υπολογιστικών ρευστών και οι εφαρμογές ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι μερικά από τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί κατά τη δημιουργία νέων σχεδίων προϊόντων. Όταν πρέπει να δοκιμαστούν φυσικά μοντέλα, τα πρωτότυπα μπορούν να εκτυπωθούν απευθείας από τα αρχεία του υπολογιστή.

Αν και αυτά τα εργαλεία έχουν ενισχύσει τις δυνάμεις των μηχανικών, ο μηχανικός εξακολουθεί να ελέγχει σαφώς τη διαδικασία σχεδιασμού. Αλλά αυτός ο έλεγχος τίθεται τώρα υπό αμφισβήτηση. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση νέας τεχνητής νοημοσύνης και άλλων τεχνολογιών για την επίτευξη υψηλότερων επιπέδων



αυτοματοποίησης προϊόντων και επιτάχυνσης της καινοτομίας νέων προϊόντων. Η πρόοδος στην τεχνητή νοημοσύνη, σε συνδυασμό συνεργιστικά με άλλες τεχνολογίες, όπως η γνωστική υπολογιστική, το Διαδίκτυο των πραγμάτων, η τρισδιάστατη (ή και η τετραδιάστατη) εκτύπωση, η προηγμένη ρομποτική, η εικονική και η μικτή πραγματικότητα και οι διεπαφές ανθρώπινων μηχανών, μεταμορφώνουν τι, πού και πώς τα προϊόντα σχεδιάζονται, κατασκευάζονται, συναρμολογούνται, διανέμονται, εξυπηρετούνται και αναβαθμίζονται.



Εικόνα 2.11: Αεροσκάφος εξ ολοκλήρου σχεδιασμένο με τεχνητή νοημοσύνη.[42]

Αυτή η επανάσταση θα επιτρέψει έναν νέο τύπο διαδικασίας σχεδιασμού, όπου τα προγράμματα με δυνατότητα τεχνητής νοημοσύνης επαναλαμβάνονται και βελτιστοποιούνται με λίγη ανθρώπινη παρέμβαση. Τα σχέδια που προκύπτουν φαίνονται απίστευτα περίπλοκα, αλλά χάρη στην προηγμένη τεχνολογία κατασκευής, δεν είναι πιο δύσκολο να εκτυπωθούν από τα συμβατικά σχέδια. Ήδη, τα μέρη που είναι το αποτέλεσμα αυτής της παραγωγικής διαδικασίας σχεδιασμού ετοιμάζονται για χρήση σε εμπορικά αεροσκάφη και άλλα κρίσιμα συστήματα.

Η μετάβαση από πίνακες σύνταξης σε CAD ήταν αναστατωτική για τη μηχανική. Ο επόμενος μετασχηματισμός σε γενετικό σχεδιασμό αναμένεται να είναι πιο ενοχλητικός.

Η τεχνητή νοημοσύνη είναι μια έννοια που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών και ορισμένοι τύποι τεχνητής νοημοσύνης έχουν εφαρμοστεί σε μηχανικά συστήματα εδώ και αρκετό καιρό. Τα συστήματα που βασίζονται στη γνώση και τα συστήματα εμπειρογνομόνων που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1980 για να αυτοματοποιήσουν πολλές από τις καθημερινές



εργασίες για τους μηχανικούς. Το πρότυπο του ευφυούς πράκτορα εισήχθη τη δεκαετία του 1990 και παρείχε μια κοινή γλώσσα για να περιγράψουμε τα προβλήματα και να μοιραστούμε τις λύσεις τους. Αυτές οι εφαρμογές θεωρούνται «αδύναμη» τεχνητή νοημοσύνη.

Αντίθετα, η "ισχυρή" τεχνητή νοημοσύνη θα συμπεριφερόταν περισσότερο σαν γενική ευφυΐα και θα ήταν ικανή να ανιχνεύει, να αντιλαμβάνεται, να μαθαίνει και να ανταποκρίνεται στο περιβάλλον και τους χρήστες. Το ισχυρό AI, γνωστό και ως τεχνητή γενική νοημοσύνη (AGI), αναφέρεται στη μηχανική νοημοσύνη και τη βαθιά μάθηση, συστήματα που παρουσιάζουν πολύπλοκη συμπεριφορά παρόμοια με ζωντανά συστήματα όπως σμήνη, αποικίες μυρμηγκιών και νευρικά συστήματα. Αυτά τα συστήματα θα έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στις περισσότερες καταστάσεις.

Η τεχνητή νοημοσύνη προχωρά με αλματώδη βήματα (πράγματι, μερικοί ερευνητές μιλούν τώρα για ανάπτυξη τεχνητής υπερ-νοημοσύνης - ASI) και μεγάλο μέρος του ενθουσιασμού για την τεχνητή νοημοσύνη κατευθύνεται σε εφαρμογές όπου τα συστήματα υπολογιστών θα λειτουργούν με μεγάλη αυτονομία. Το αυτοκινούμενο αυτοκίνητο είναι η αφίσα για την τεχνητή νοημοσύνη, αλλά υπάρχουν πολλές ενδιαφέρουσες εφαρμογές από ρομποτικούς κλινικούς ιατρούς που θα μπορούν να διαγνώσουν ασθένειες με μεγαλύτερη ακρίβεια από οποιονδήποτε άνθρωπο γιατρό έως εταιρείες που κατευθύνονται από την τεχνητή νοημοσύνη που μπορούν να ενορχηστρώσουν τις δραστηριότητες της εταιρείας χωρίς σάρκα, και διαχείριση αίματος.



Εικόνα 2.12: Πλαίσιο του La Bandita Speedster μέσω γενετικού σχεδιασμού.[43]



Η διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων έχει ήδη επηρεαστεί από την υπάρχουσα τεχνητή νοημοσύνη και η τεχνητή νοημοσύνη θα αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο ενσωματώνονται συνδεδεμένοι αισθητήρες και χρησιμοποιούνται ακουστικά μικτής ή επαυξημένης πραγματικότητας. Με βάση την τρέχουσα τροχιά, είναι πιθανό ότι ο σχεδιασμός του προϊόντος ενδέχεται να επηρεάσει την τεχνητή νοημοσύνη και τη δημιουργία μηχανικών συστημάτων σε τρία διαφορετικά στάδια την επόμενη δεκαετία.

Πρώτον, τα τεχνητά ευφυή συστήματα θα διευκολύνουν τις επίπονες εργασίες που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές, όπως η συνεχής αναζήτηση κατάλληλου περιεχομένου, η διόρθωση σφαλμάτων, ο καθορισμός βέλτιστων λύσεων, η επικοινωνία αλλαγών και η παρακολούθηση για αποτυχία σχεδιασμού. Η μηχανική μάθηση θα είναι σε θέση να αναλάβει αυτές τις δουλειές και να τις κάνει πολύ, πολύ γρηγορότερα.

Στη συνέχεια, η AI θα είναι σε θέση να βοηθήσει στη δημιουργία εξελιγμένων σχεδίων. Ευφυή συστήματα θα λειτουργήσουν στον αγκώνα του σχεδιαστή, προτείνοντας εναλλακτικές λύσεις, ενσωματώνοντας δεδομένα που βασίζονται σε αισθητήρες, δημιουργώντας πρόδρομους σχεδιασμού, βελτιστοποιώντας τις διαδικασίες της αλυσίδας εφοδιασμού και στη συνέχεια παραδίδοντας τα σχέδια σε έξυπνες εγκαταστάσεις παραγωγής.[42]

3. Τοπολογική βελτιστοποίηση και προσθετική κατασκευή

3.1 Μέθοδος σχεδίασης νέων προϊόντων-κατασκευών με τη χρήση της τοπολογικής βελτιστοποίησης

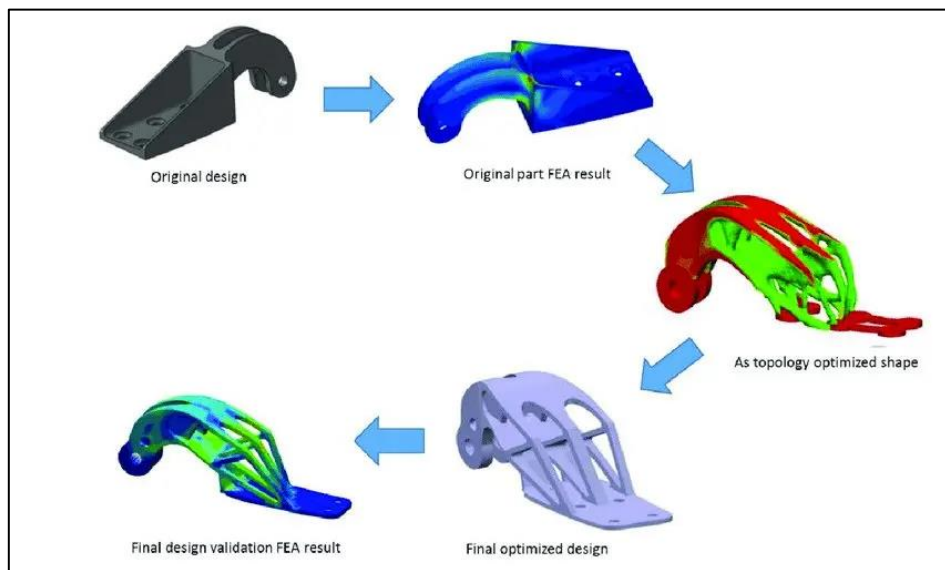
Η τοπολογική βελτιστοποίηση (TB) είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης γεωμετρίας που χρησιμοποιεί αλγοριθμικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση της διάταξης υλικού εντός ενός χώρου καθορισμένου από τον χρήστη για ένα δεδομένο σύνολο φορτίων, συνθηκών και περιορισμών. Η TB μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα του σχεδιασμού αφαιρώντας περιττό υλικό από περιοχές που δεν χρειάζεται να μεταφέρουν σημαντικά φορτία για να μειωθεί το βάρος ή να επιλυθούν προκλήσεις σχεδιασμού, όπως μείωση θερμικής καταπόνησης.

Τα σχέδια που παράγονται με βελτιστοποίηση τοπολογίας περιλαμβάνουν συχνά μορφές και περίπλοκες γεωμετρίες που είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Ωστόσο, τα σχέδια TB ταιριάζουν τέλεια με διαδικασίες προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing) που έχουν πιο επιεικείς κανόνες σχεδιασμού και μπορούν εύκολα να αναπαράγουν πολύπλοκα σχήματα χωρίς επιπλέον κόστος.



Η τοπολογική βελτιστοποίηση πραγματοποιείται συνήθως προς το τέλος της διαδικασίας σχεδιασμού, όταν το επιθυμητό τεμάχιο πρέπει να έχει μικρότερο βάρος ή να χρησιμοποιεί λιγότερα υλικά. Στη συνέχεια, ο σχεδιαστής εργάζεται για να ανακαλύψει ορισμένες προκαθορισμένες παραμέτρους, όπως εφαρμοζόμενα φορτία, τύπο υλικού, περιορισμούς και διάταξη.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση καθορίζει πρώτα τον ελάχιστο επιτρεπόμενο χώρο σχεδιασμού που απαιτείται για τη βελτιστοποίηση σχήματος του προϊόντος. Στη συνέχεια, το λογισμικό βελτιστοποίησης τοπολογίας ασκεί πίεση στο σχέδιο από διαφορετικές γωνίες, δοκιμάζει τη δομική του ακεραιότητα και εντοπίζει περιττό υλικό.[40]



Εικόνα 3.1: Ροή λειτουργίας λογισμικού τοπολογικής βελτιστοποίησης.[40]

Η πιο κοινή και πρακτική τεχνική για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method). Πρώτον, το FEM λαμβάνει υπόψη τον γεωμετρικό σχεδιασμό για τον ελάχιστο επιτρεπόμενο χώρο, μαζί με άλλους παράγοντες, και χωρίζει το σχέδιο σε κομμάτια. Στη συνέχεια δοκιμάζει κάθε πεπερασμένο στοιχείο για ακαμψία, συμμόρφωση και περιττό υλικό. Τέλος, το FEM ενώνει τα κομμάτια μαζί για να οριστικοποιήσει το πλήρες σχέδιο.

Η επικύρωση του σχεδιασμού περιλαμβάνει τον καθορισμό ενός ορίου για το πεδίο πυκνότητας στοιχείων μεταξύ μιας τιμής 0 και 1. Μια τιμή 0 για κενό σημείο σε μια καθορισμένη περιοχή της δομής, ενώ μια τιμή 1 ορίζει την καθορισμένη περιοχή ως στερεό υλικό. Ο σχεδιαστής μπορεί στη συνέχεια να αφαιρέσει από το μοντέλο περιττό υλικό και να ολοκληρώσει το βήμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης του σχεδίου.

Πριν από την προσθετική κατασκευή, απορρίφθηκαν από τους σχεδιαστές πολλά από τα πολύπλοκα σχήματα που δημιουργήθηκαν από τη τοπολογική βελτιστοποίηση καθώς



δεν ήταν εφικτό να κατασκευαστούν και οι δυνατότητές τους παρέμειναν μη πραγματοποιημένες.[40]

3.2 Ο ρόλος της τοπολογικής βελτιστοποίησης στο σχεδιασμό δομών που πρόκειται να εκτυπωθούν με τη χρήση προσθετικής κατασκευής

Ο ρόλος της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε ένα σχέδιο προτού εκτυπωθεί είναι πολύ σημαντικός καθώς θα προσφέρει διαφορετικό 'οπτικά' αποτέλεσμα αλλά με προτερήματα τα οποία δεν είχε πριν. Σίγουρα θα είναι ελαφρύτερο καθώς είναι ο πιο σημαντικός κανόνας του λογισμικού αυτού, έπειτα ανάλογα το εξάρτημα, την δουλειά που προορίζεται να κάνει, της συνθήκες εργασίας, τις καταπονήσεις κ.ά. προκύπτει και το κατάλληλο αποτέλεσμα όπου σε πολλές περιπτώσεις εκτός από ελαφρύτερο είναι και οπτικά διαφορετικό αλλά και "σκληρότερο" από την άποψη ότι θα είναι ικανό να υποστεί περισσότερες καταπονήσεις από το σχέδιο δίχως του λογισμικού της TB. Τώρα, στο κομμάτι της κατασκευής του σχεδίου αυτού η προσθετική κατασκευή είναι αυτή που λύνει το πρόβλημα των μηχανικών διότι με ελάχιστες διαφοροποιήσεις του αποτελέσματος της TB μπορεί να κατασκευαστεί.

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2 φαίνονται όλα τα βήματα που ακολουθούνται σε ένα προϊόν από το σχέδιο πριν την TB μέχρι και το αποτέλεσμα της TB. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι το προϊόν που πρόκειται να κατασκευαστεί έχει εντελώς διαφορετική εμφάνιση καθώς φαίνεται πιο φυσικό και σίγουρα ελαφρύτερο. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι με την πολύτιμη βοήθεια της προσθετικής κατασκευής είναι εφικτό να κατασκευαστεί ένα τόσο πολύπλοκο σχήμα.



Εικόνα 3.2: Σχέδια τοπολογικής βελτιστοποίησης.[12]



3.3 Λογισμικά Πακέτα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Οι σχεδιαστές αναγνωρίζουν όλο και περισσότερο την ευελιξία, την ταχύτητα και τις ισχυρές δυνατότητες αξιοποίησης της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Οι εταιρίες λογισμικού λοιπόν ανταποκρίνονται παρέχοντας τα κατάλληλα εργαλεία. Τα πιο δημοφιλή λογισμικά πακέτα είναι:

- 1) **nTopology:** Προσφέρει ένα «μοναδικό σύνολο εργαλείων γενετικού σχεδιασμού και αυτοματοποίησης», επιταχύνοντας τη διαδικασία σχεδιασμού συνδυάζοντας προηγμένη γεωμετρία, προσομοιώσεις και πειραματικά δεδομένα. Ο γεωμετρικός κινητήρας του εφαρμόζεται σε μια ποικιλία εφαρμογών, από την αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία έως το σχεδιασμό κρανίων ποδοσφαίρου έως συσκευές για τον ασθενή στον ιατρικό τομέα.
- 2) **SOLIDWORKS Simulation Solutions:** Διαθέτει βελτιστοποίηση τοπολογίας μεταξύ των εργαλείων δομικής ανάλυσης και προσφέρει πολλαπλές μεθόδους για να επανέλθουν τα βελτιστοποιημένα σχέδια σε περιβάλλον CAD.
- 3) **Autodesk's Fusion 360:** Η πλατφόρμα CAD που βασίζεται στο cloud προσφέρει βελτιστοποίηση σχήματος και προηγμένες δυνατότητες για την υποστήριξη της επαλήθευσης σχεδιασμού για κατασκευή τόσο σε παραδοσιακά όσο και σε ψηφιακά εργαλεία κατασκευής, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση.
- 4) **Creo 7.0:** Το λογισμικό γενετικού σχεδιασμού περιλαμβάνει την επέκταση Generative Topology Optimization, επιτρέποντας στους χρήστες να λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις των προϊόντων και να εξερευνούν γρήγορα τις καινοτόμες επιλογές σχεδιασμού για να μειώσουν το χρόνο και το κόστος ανάπτυξης.
- 5) **Altair OptiStruct:** Το λογισμικό αυτό ενσωματώνει τη δομική βελτιστοποίηση και ανάλυση. Εξειδικευμένο στην ελαφριά και δομική απόδοση, διαθέτει μια διαφορετική μέθοδο βελτιστοποίησης τοπολογίας στο σχεδιασμό δομών πλέγματος. Το ενσωματωμένο πολυφυσικό περιβάλλον του συμπεριλαμβανομένης της μεταφοράς θερμότητας, των κραδασμών και της ακουστικής, της δυναμικής του ρότορα και της ακαμψίας και της σταθερότητας βοηθά το σχεδιασμό σε τομείς όπως ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, αερομοντελοποίηση και ιατρικές τεχνολογίες.



- 6) **Tosca Structure:** Λειτουργεί στο λογισμικό FEA (Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων) και διαθέτει ρεαλιστικά μοντέλα προσομοίωσης με δυνατότητα αλλαγής γεωμετρίας γρήγορα και αξιόπιστα. Η ικανότητά του για μορφοποίηση επιτρέπει τη βελτιστοποίηση σχήματος στο υπάρχον πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, παρακάμπτοντας τα ενδιάμεσα βήματα.[40]

3.4 Αντίστοιχα παραδείγματα στο αντικείμενο της εργασίας

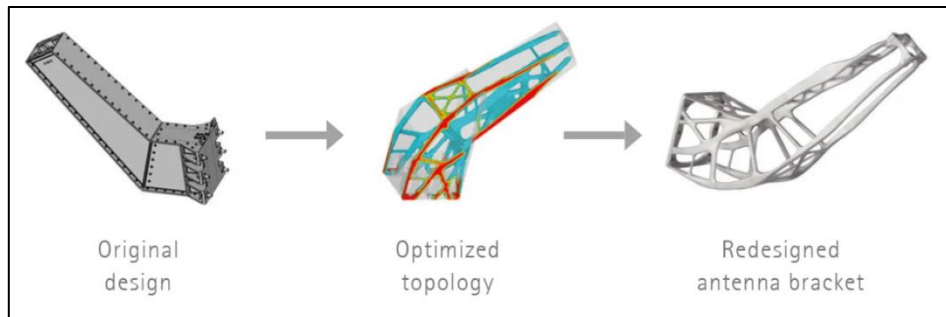
Ένα πολύ σημαντικό παράδειγμα και μεγάλο βήμα της προσθετικής κατασκευής είναι η δημιουργία ιατρικών εμφυτευμάτων, καθώς δίνει τη δυνατότητα στους γιατρούς να δημιουργούν σχήματα και επιφάνειες ελεύθερης μορφής και πορώδεις δομές. Χάρη στη TB, τα σχέδια μπορούν να διαθέτουν δομές πλέγματος που είναι πιο ελαφριές, παρέχουν βελτιωμένη οστεοενσωμάτωση και διαρκούν περισσότερο από άλλα εμφυτεύματα. Τα εργαλεία TB μπορούν επίσης να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια βιοδιασπώμενων ικριωμάτων για μηχανική ιστών, πορώδη εμφυτεύματα και ελαφριά ορθοπεδικά. Οι εφαρμογές νανοτεχνολογίας όπως χειρισμός κυττάρων, χειρουργική επέμβαση, μικρορευστά και οπτικά συστήματα χρησιμοποιούν επίσης TB (Βλ. Εικόνα 3.3).[40]



Εικόνα 3.3: Εμφύτευμα κρανίου μέσω προσθετικής κατασκευής και TB.[40]



Άλλο ένα παράδειγμα είναι ο επανασχεδιασμός του βραχίονα Sentinel 1 Upper S-Band Antenna που αναπτύχθηκε από ειδικούς της RUAG Additive Manufacturing σε στενή συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) και τον αντίστοιχο πελάτη. Αυτά τα πρωτοπόρα έργα επέτρεψαν στη RUAG να πραγματοποιήσει πολλά έργα για τη θεσμική και εμπορική αγορά του διαστήματος καθώς και για μη διαστημικές εφαρμογές. (Εικόνα 3.4)



Εικόνα 3.4: Βραχίονας δορυφόρου μέσω τοπολογικής βελτιστοποίησης.[44]

Η χρήση της προσθετικής κατασκευής στην αυτοκινητοβιομηχανία ή σε οποιοδήποτε άλλο περιβάλλον υψηλής παραγωγής ήταν χαμηλή και χρησιμοποιούταν σχεδόν αποκλειστικά στην δημιουργία πρωτοτύπων. Ο μόνος λόγος που περιορίζει την εξάπλωση της χρήσης της ΠΚ είναι το κόστος λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος για τον αργό ρυθμό παραγωγής του. Ωστόσο αυτή την στιγμή υπάρχει η ευκαιρία για την παραγωγή των εργαλείων που χρειάζεται η αυτοκινητοβιομηχανία όπως κατασκευή διάφορων τύπων καλουπιών με πολύ γρήγορους ρυθμούς και λιγότερο κόστος λόγω μικρότερου αριθμού κατεργασιών.

Λόγω της μεγάλης μείωσης βάρους που υπάρχει όταν χρησιμοποιείται η τοπολογική βελτιστοποίηση στον σχεδιασμό έχουν συζητηθεί πολλά παραδείγματα όπως ο σκελετός αυτοκινήτου (σασί) , ψαλίδια, πόρτες, βάσεις κινητήρα και άλλα.

Ένα παράδειγμα από τα παρακάτω είναι η κατασκευή ενός πρωτότυπου σκελετού αυτοκινήτου, του Χιρήσιας όπου η προσπάθεια έγινε από φοιτητές του πανεπιστημίου Λεχάι στην Πενσυλβάνια, ένας σκελετός κατασκευασμένος από κράμα τιτανίου του οποίου το τελικό του βάρος είναι λιγότερο από τριακόσια πενήντα επτά κιλά (Βλ. Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Σκελετός concept car χιρσίας με την χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης.[45]



Εικόνα 3.6: Τοπολογική βελτιστοποίηση για ψαλίδια αυτοκινήτου.[46]



3.5 Περιορισμοί της προσθετικής κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή βρίσκεται σε μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια καθώς ο λόγος που εφευρέθηκε είναι για να δώσει λύση στα περίπλοκα αποτελέσματα που καταλήγουν οι προηγμένες μέθοδοι σχεδιασμού, όπως ο γενετικός σχεδιασμός και η τοπολογική βελτιστοποίηση. Από την άλλη όμως υπάρχουν και πολλοί περιορισμοί, που καθώς αναπτύσσεται αυτή η μέθοδος, υπάρχει και η προσπάθεια εξάλειψής τους. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- **Κόστος αγοράς εξοπλισμού**

Με την προσθετική κατασκευή το κόστος του εξοπλισμού παραμένει πολύ υψηλό για κάποιους οργανισμούς, πιο συγκεκριμένα μικρότερες επιχειρήσεις. Ωστόσο, πολλοί κατασκευαστές έχουν ήδη επενδύσει αρκετά στους παραδοσιακούς τρόπους κατασκευής οπότε η μετάβαση δεν είναι εύκολη αλλά ούτε και οικονομική.

- **Κόστος παραγωγής**

Η πρώτη ύλη για την προσθετική κατασκευή χρειάζεται να είναι εξαιρετικής ποιότητας που αυτό αυξάνει το κόστος ολόκληρου του έργου. Επιπλέον η τραχύτητα της επιφάνειας χρειάζεται επιπρόσθετη επεξεργασία έτσι ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις όπου φυσικά προκαλεί και αύξηση του κόστους.

- **Ποικιλία υλικών**

Επί του παρόντος, υπάρχει περιορισμός στον τύπο των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσθετική κατασκευή. Οι μηχανικές ιδιότητες ενός τελικού προϊόντος εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης (μορφή σκόνης) όπου χρησιμοποιείται στην διαδικασία κατασκευής. Τα υλικά που χρειάζονται για το προϊόν πρέπει να ενταχθούν νωρίς στο μείγμα επομένως είναι αδύνατον η προσθήκη επιπλέον υλικών και ιδιοτήτων αργότερα.

- **Ταχύτητα παραγωγής**

Η προσθετική κατασκευή αν και δεν είναι νέα μέθοδος κατασκευής εξακολουθεί να έχει πολύ αργούς ρυθμούς παραγωγής, με αποτέλεσμα να είναι ένας μη αποδοτικός τρόπος για παραγωγή μεγάλου όγκου τεμαχίων. Ανάλογα το τελικό προϊόν η προσθετική κατασκευή μπορεί να διαρκέσει έως και 3 ώρες για να δημιουργήσει ένα σχήμα που ένας παραδοσιακός τρόπος θα έκανε σε δευτερόλεπτα.

- **Τραχύτητα επιφάνειας**

Μέσω της προσθετικής κατασκευής δημιουργούνται 2 προβλήματα όσο έχει να κάνει με την τραχύτητα επιφάνειας. Παραδείγματος χάρη, στην τρισδιάστατη εκτύπωση το υλικό που χρησιμοποιείται είναι πολύ τραχύ σε σύγκριση με τα υλικά μετάλλων σε σκόνη. Όπως επίσης υπάρχει και το πρόβλημα του φαινομένου της στρωματοποίησης όπου προκύπτει από τον όγκο του υλικού που εξωθείται από το ακροφύσιο.



Πως η τοπολογική βελτιστοποίηση δίνει λύσεις στους περιορισμούς της προσθετικής κατασκευής.

Μία μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι η μέθοδος SIMP η οποία έχει αναφερθεί παραπάνω, όπου ορίζοντας τους περιορισμούς της προσθετικής κατασκευής προβλέπει μία λύση η οποία πληροί τους περιορισμούς.

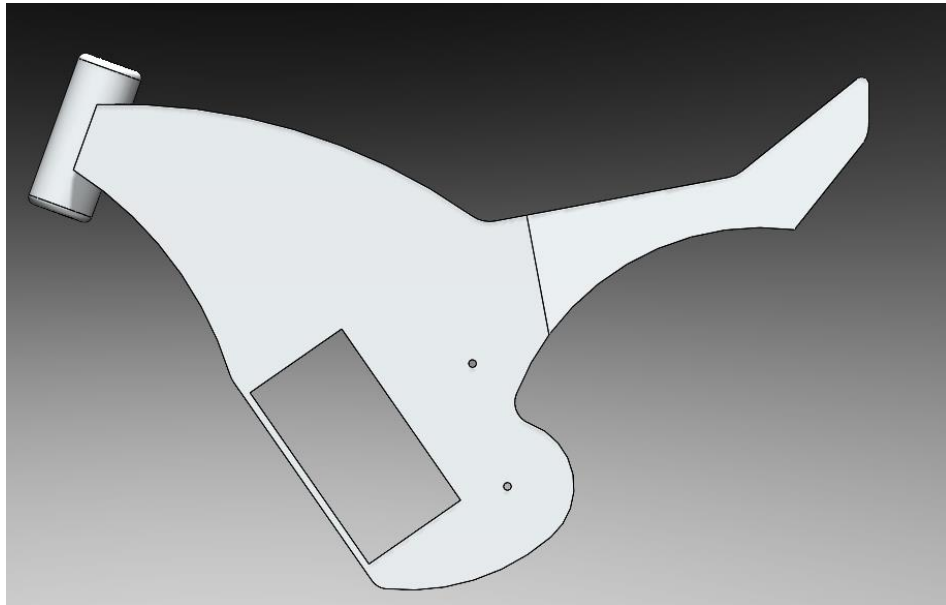
4. Στόχοι της εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση δύο διαφορετικών σχεδιαστικών αλγορίθμων οι οποίοι έχουν πανομοιότυπα αποτελέσματα ακολουθώντας διαφορετική λογική ο καθένας. Οι αλγόριθμοι γενετικής και τοπολογικής βελτιστοποίησης προσφέρουν πολλά οφέλη σε διάφορες μεθόδους αλλά πιο πολύ στην προσθετική κατασκευή. Για τον λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η δομή ενός σκελετού μοτοσυκλέτας καθώς και το ψαλίδι αυτής. Το πλαίσιο θα βελτιστοποιηθεί και με τους δύο αλγόριθμους και στη συνέχεια θα συγκριθούν μεταξύ τους τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου, ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, τα αποτελέσματα καθώς και την πολυπλοκότητα κατασκευής τους. Τέλος, θα γίνουν προσπάθειες να εκτυπωθούν τα αντικείμενα σε μικρότερη κλίμακα μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης (Material Extrusion).

5. Σχεδιασμός

5.1. Τοπολογική βελτιστοποίηση

Αρχικά, η επιλογή του λογισμικού για τον σχεδιασμό και την ανάλυση τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι το SolidWorks στο οποίο έγινε μια σχεδιαστική προσέγγιση ενός πλαισίου σκελετού μοτοσυκλέτας (Βλ. Εικόνα 5.1).



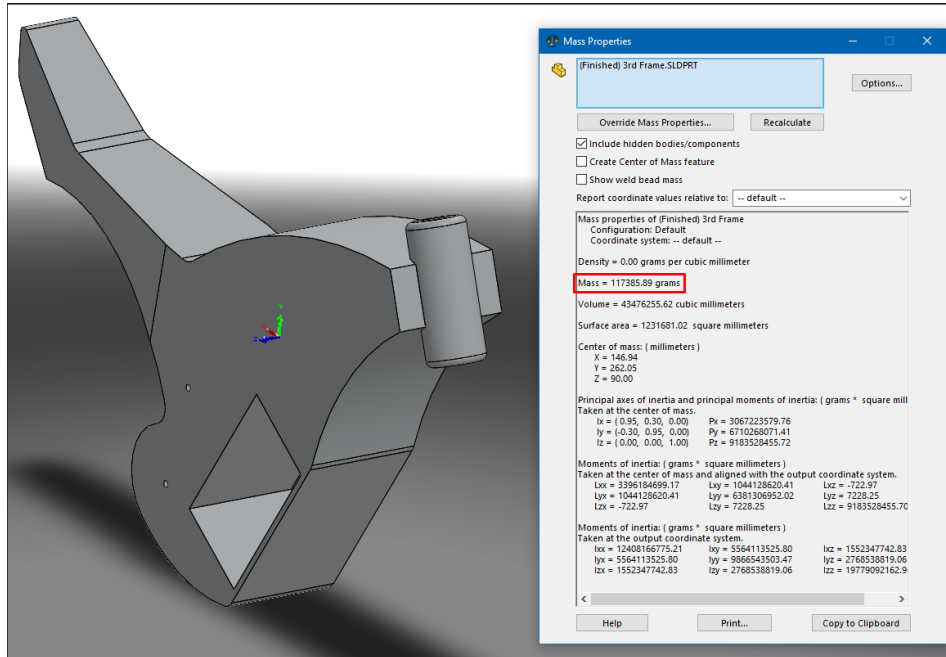
Εικόνα 5.1: Αρχικό σχέδιο πλαισίου μοτοσυκλέτας.

Καθώς ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός το επόμενο βήμα είναι να γίνει η ανάλυση τοπολογικής βελτιστοποίησης. Πρώτα θα πρέπει να οριστεί το υλικό κατασκευής το οποίο είναι αλουμίνιο τύπου 6061-T6 (Aluminium 6061-T6) όπου παρακάτω αναγράφονται οι μηχανικές του ιδιότητες (Βλ. Εικόνα 5.2).

Mechanical Properties		
The mechanical properties of Aluminium / Aluminum 6061 alloy are tabulated below.		
Properties	Metric	Imperial
Tensile strength	310 MPa	45000 psi
Yield strength	276 MPa	40000 psi
Shear strength	207 MPa	30000 psi
Fatigue strength	96.5 MPa	14000 psi
Elastic modulus	68.9 GPa	10000 ksi
Poisson's ratio	0.33	0.33
Elongation	12-17%	12-17%
Hardness, Brinell	95	95

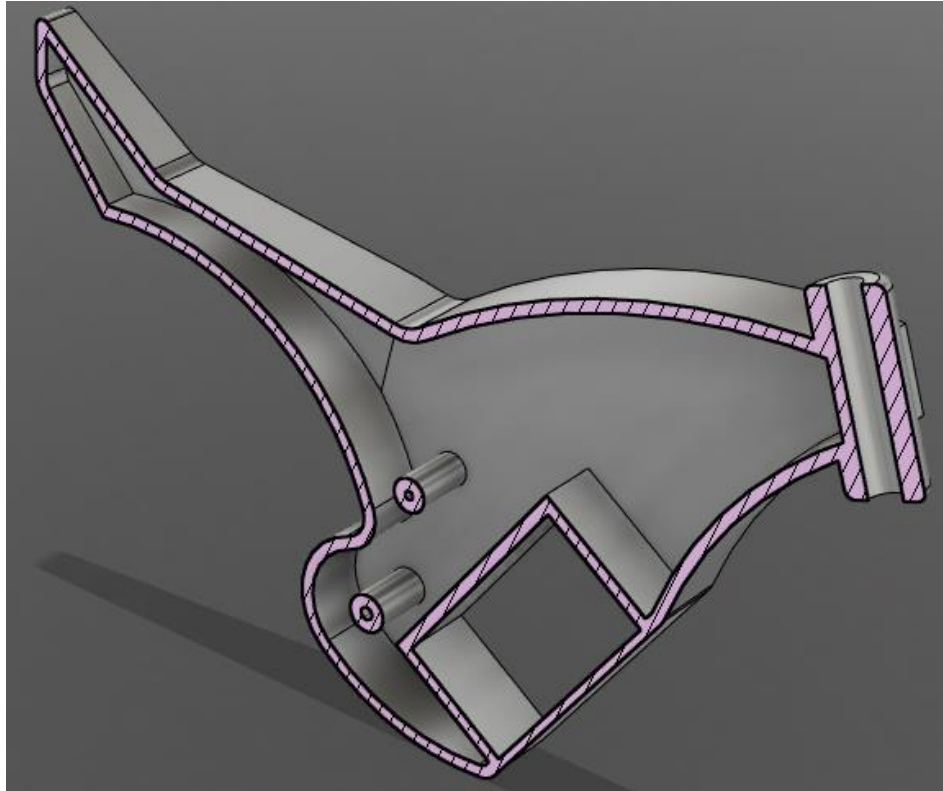
Εικόνα 5.2: Μηχανικές ιδιότητες αλουμίνιο τύπου 6061-T6.[47]

Το αλουμίνιο 6061-T6 είναι το πιο διαδεδομένο για την κατασκευή σκελετών ποδηλάτων καθώς και το υπάρχον σχέδιο θεωρείται μοτοποδήλατο με ηλεκτρικό κινητήρα και συσσωρευτή ενέργειας.



Εικόνα 5.3: Αρχικό σχέδιο σκελετού.

Αφού σχεδιάστηκε ο σκελετός και χρησιμοποιώντας την εντολή shell με τιμή 15mm το οποίο προκύπτει προσεγγιστικά από το πάχος των σωληνώσεων ενός κοινού σκελετού μοτοσυκλέτας το βάρος ανέρχεται στα 41.8 [Kg] όπου αντιπροσωπεύει το βάρος ενός κοινού σκελετού μοτοσυκλέτας (Βλ. Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4: Σκελετός shell σε τομή.

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο μοντέλο.

Για την δύναμη καθίσματος ορίστηκε μια δύναμη:

$$120 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 1177 \text{ [N]}.$$

Για την μπαταρία η δύναμη είναι:

$$14 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 137 \text{ [N]}.$$

Και η δύναμη που ασκείται στον σκελετό λόγω βαρύτητας είναι:

$$41.8 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 410 \text{ [N]}.$$

Με αυτές τις δυνάμεις υπολογίζονται οι παρακάτω αντιδράσεις στις στηρίξεις (τροχούς) (Βλ. Εικόνα 5.5).

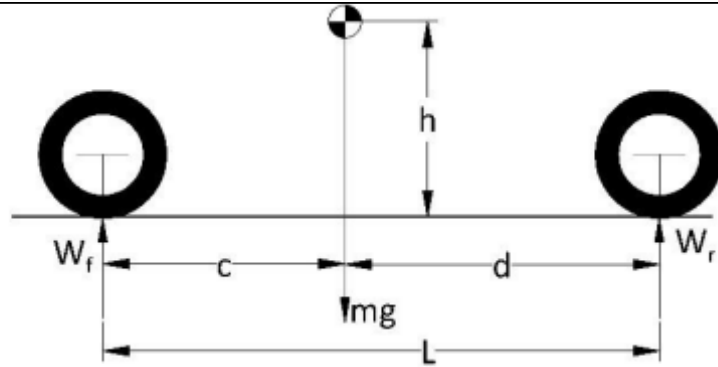


Figure 1: Side-view model of a motorcycle.

Analyzing the motorcycle and rider system in a lateral plane, as represented in Fig. 1, the sum of moments about the front and rear wheels must be zero.

$$\sum M_f = 0 = W_r(c + d) - mgc \quad (1)$$

$$\sum M_r = 0 = mgd - W_f(c + d) \quad (2)$$

Thus,

$$W_f = \frac{mg \times d}{(c+d)} = \frac{W \times d}{L} \quad (3)$$

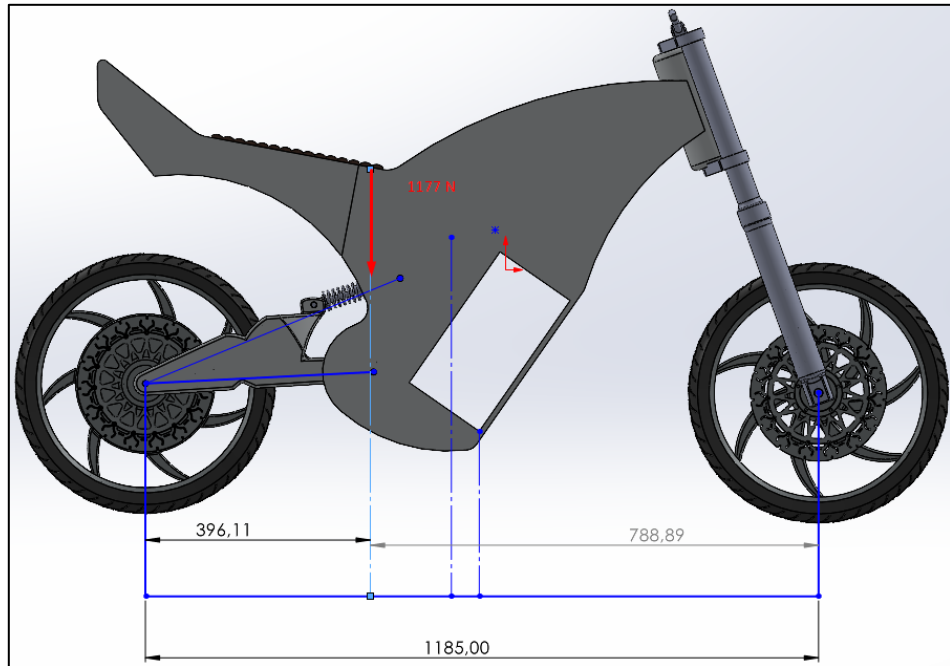
$$W_r = \frac{mg \times c}{(c+d)} = \frac{W \times c}{L} \quad (4)$$

Εικόνα 5.5: Τύπος υπολογισμού αντιδράσεων στους τροχούς.[48]

Για την δύναμη λόγω αναβάτη υπολογίζονται οι αντιδράσεις (Βλ. Εικόνα 5.6):

$$W_f = (W \times c) / L \Rightarrow (1177 \text{ [N]} \times 396 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 393 \text{ [N]}$$

$$W_r = (W \times d) / L \Rightarrow (1177 \text{ [N]} \times 789 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 783.7 \text{ [N]}$$

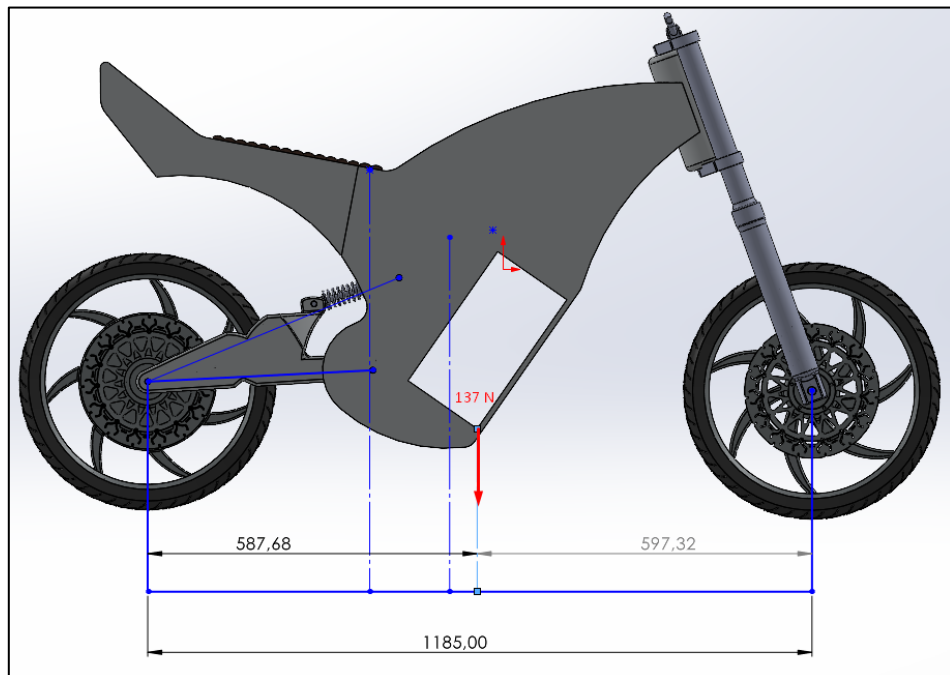


Εικόνα 5.6: Αποστάσεις τροχών από την δύναμη λόγω αναβάτη.

Για την δύναμη λόγω μπαταρίας υπολογίζονται οι αντιδράσεις (Βλ. Εικόνα 5.7):

$$W_f = (W \cdot c) / L \Rightarrow (137 \text{ [N]} \cdot 588 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 68 \text{ [N]}$$

$$W_r = (W \cdot d) / L \Rightarrow (137 \text{ [N]} \cdot 597 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 69 \text{ [N]}$$

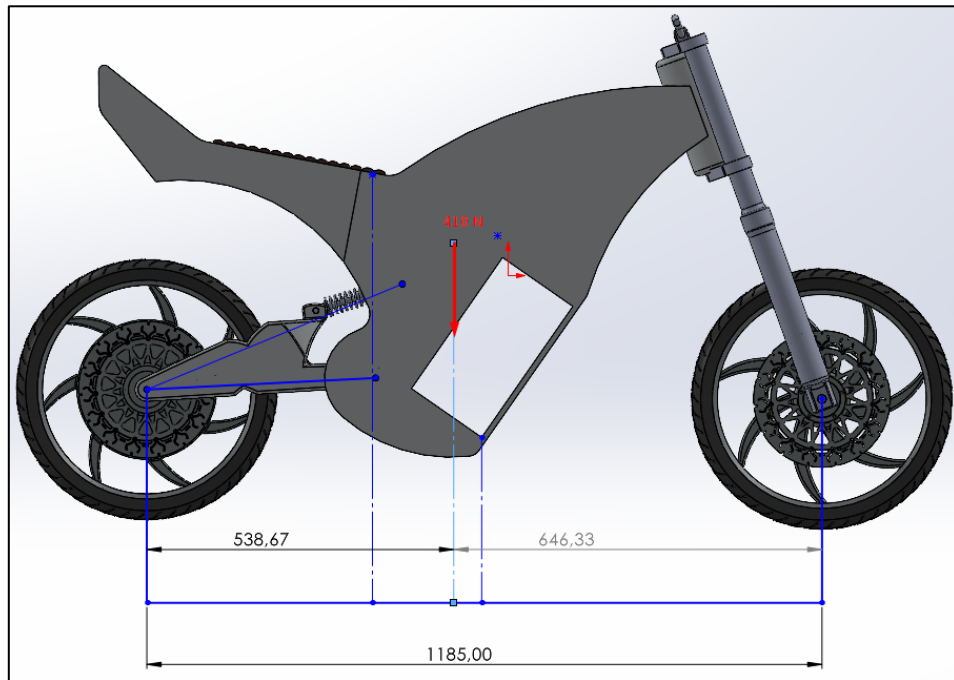


Εικόνα 5.7: Αποστάσεις τροχών από την δύναμη λόγω μπαταρίας.

Για την δύναμη λόγω βαρύτητας υπολογίζονται οι αντιδράσεις (Βλ. Εικόνα 5.8):

$$W_f = (W \cdot c) / L \Rightarrow (410 \text{ [N]} \cdot 539 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 186.5 \text{ [N]}$$

$$W_r = (W \cdot d) / L \Rightarrow (410 \text{ [N]} \cdot 646 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 223.5 \text{ [N]}$$



Εικόνα 5.8: Αποστάσεις τροχών από την δύναμη λόγω βαρύτητας.

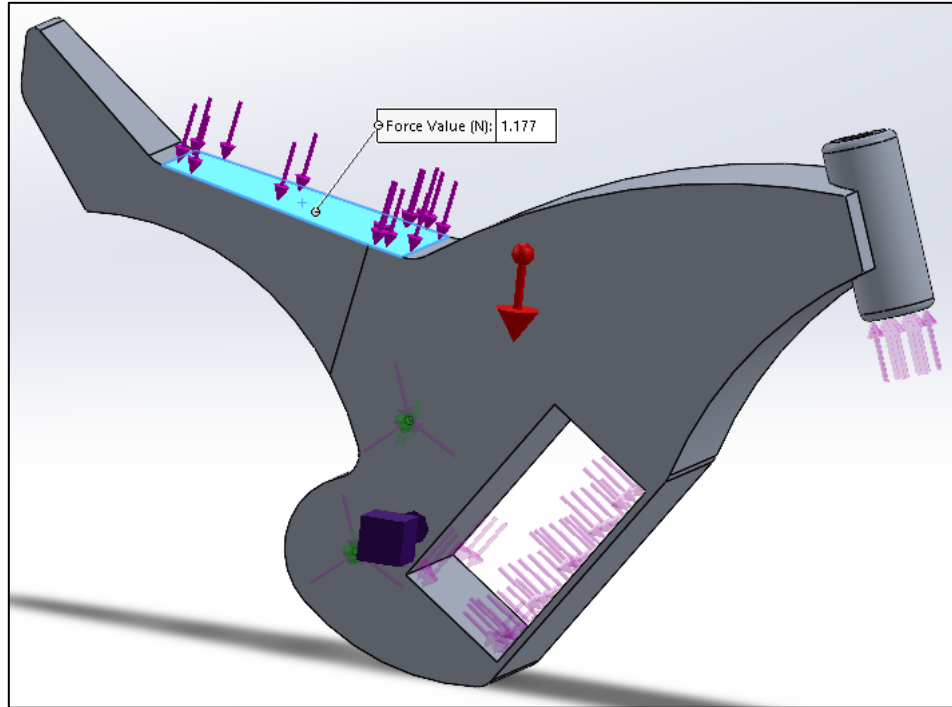
Άρα από τα παραπάνω προκύπτουν οι συνολικές:

$$W_{f_{\Sigma uv}} = 393 \text{ [N]} + 68 \text{ [N]} + 186.5 \text{ [N]} = 647.5 \text{ [N]}$$

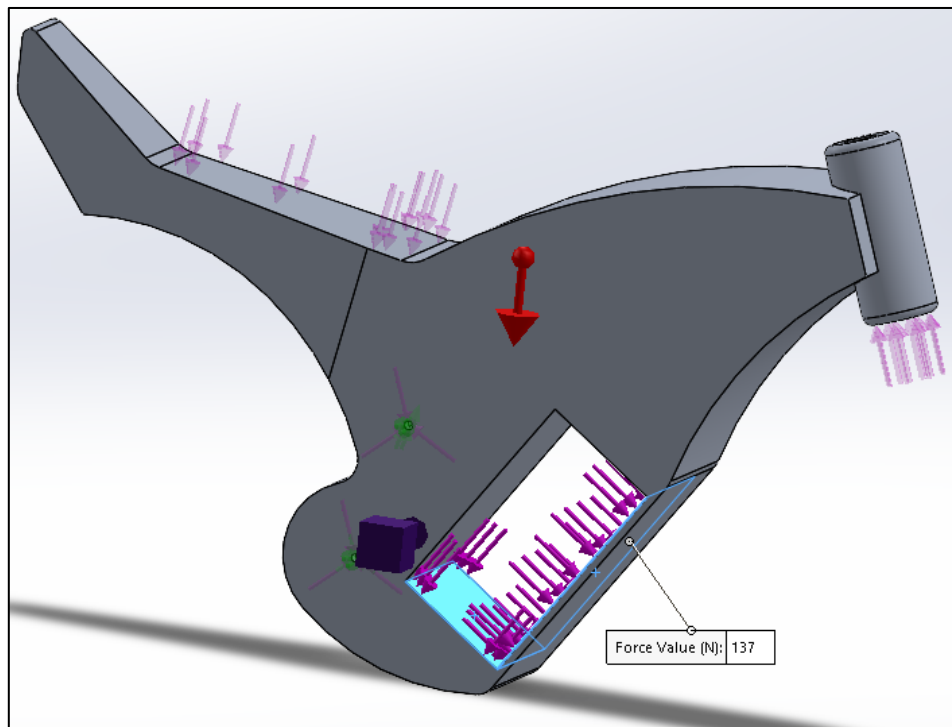
$$W_{r_{\Sigma uv}} = 783.7 \text{ [N]} + 69 \text{ [N]} + 223.5 \text{ [N]} = 1076.2 \text{ [N]}$$

Στην συνέχεια ορίζονται αυτές οι δυνάμεις και οι στηρίξεις για να ακολουθήσει η ανάλυση τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Στο κάθισμα ορίστηκε μια δύναμη 1177 [N] δηλαδή ενός ανθρώπου στα 120 κιλά, δεδομένου ότι μέχρι αυτό το βάρος αναβάτη είναι συνήθως οι οδηγοί μοτοσυκλετών (Βλ. Εικόνα 5.9).



Εικόνα 5.9: Δύναμη καθίσματος 1177 [N].



Εικόνα 5.10: Δύναμη μπαταρίας 137 [N].

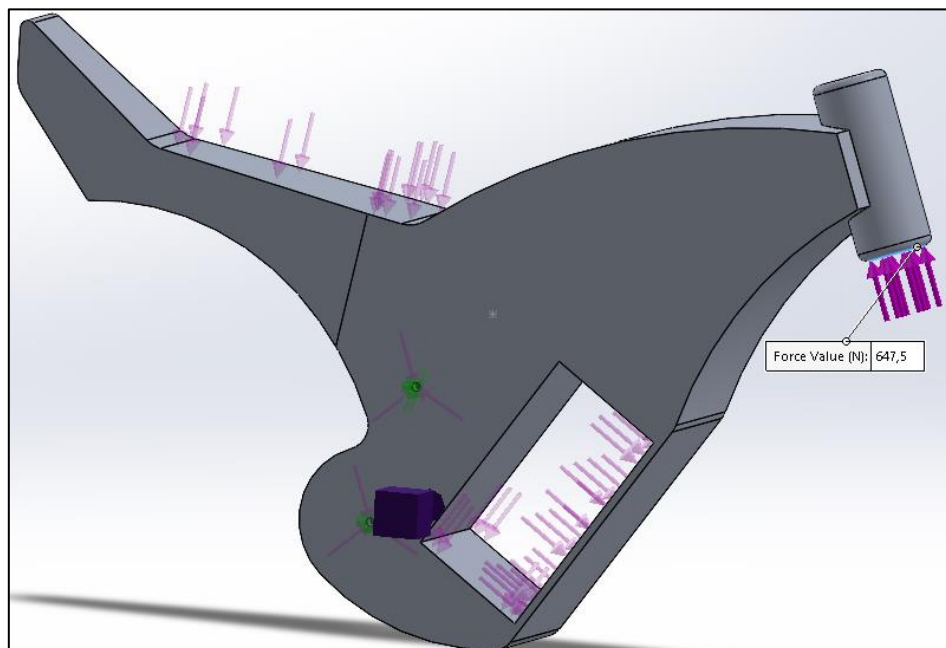


Στην θέση που θα τοποθετηθεί η μπαταρία ορίστηκε δύναμη 137 [N] (Βλ. Εικόνα 5.10) για μία μπαταρία των 14 [Kg] όπως είναι η παρακάτω (Βλ. Εικόνα 5.11).

Battery Model	72v 40ah
Nominal Voltage (V)	72v
Nominal Capacity (AH)	40ah
Source Resistance (mΩ)	about 40
Cell Specification	3.7V 2500mah 18650mah
Cell Combination	16-parallel 20-series
Cell Size	3.7v 2500mah 18650
Cell Quantity (parallel*series)	160pcs
Discharge Cutoff Voltage (V)	60+/- 1V
Charge Cutoff Voltage (V)	84v
Rated Discharge Current (A)	70A
instantaneous Maximum Discharge Current (A)	210A
Maximum Continuous Discharge Current (A)	70A
Maximum Continuous Charge Current (A)	10A
Charge Mode	CC-CV
Standard Charge Current (A)	5A
Charge Time under Standard Charge Current	20hours
Fast Charge Current (A)	10A
Charge Time under Fast Charge Current	8hours
Charge Temperature Range	-20-55°C
Cell Size (L*W*T)	320*205*140mm(+/-5mm)
Battery Weight	About 14KG
Battery Power	2000W 3000W 3500W 4000W

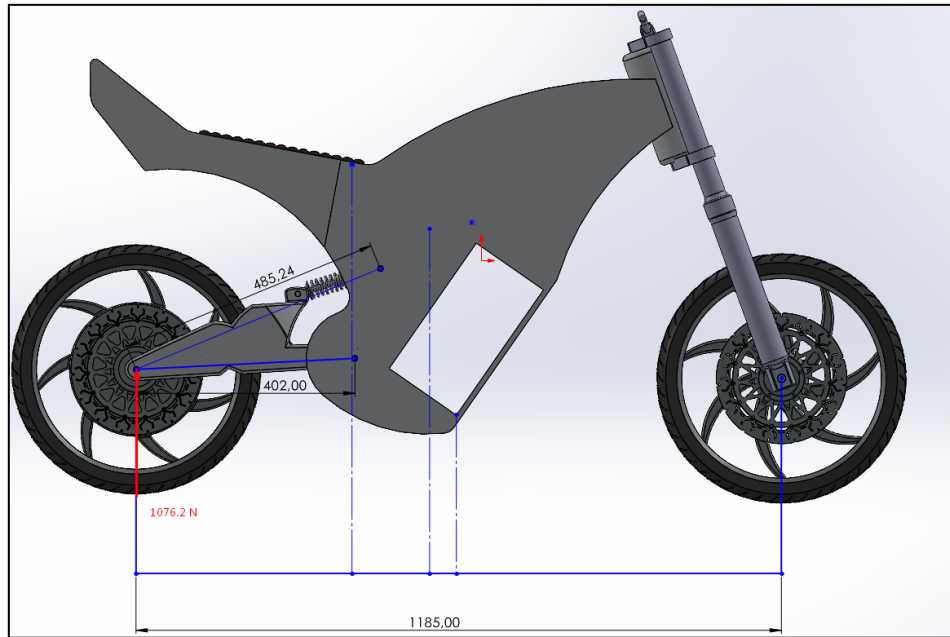
Εικόνα 5.11: Χαρακτηριστικά μπαταρίας.[49]

Η παρακάτω δύναμη 647.5 [N] είναι η δύναμη $Wf_{\Sigma UV}$ η οποία έχει μεταφερθεί από τον εμπρόσθιο τροχό στον σκελετό (Βλ. Εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.12: Δύναμη εμπρόσθιου τροχού 647.5 [N].

Η δύναμη του πίσω τροχού μέσω του ψαλιδιού μετατρέπεται σε δύο ροπές στα σημεία επαφής με τον σκελετό, οι ροπές αυτές είναι (Βλ. Εικόνα 5.13):

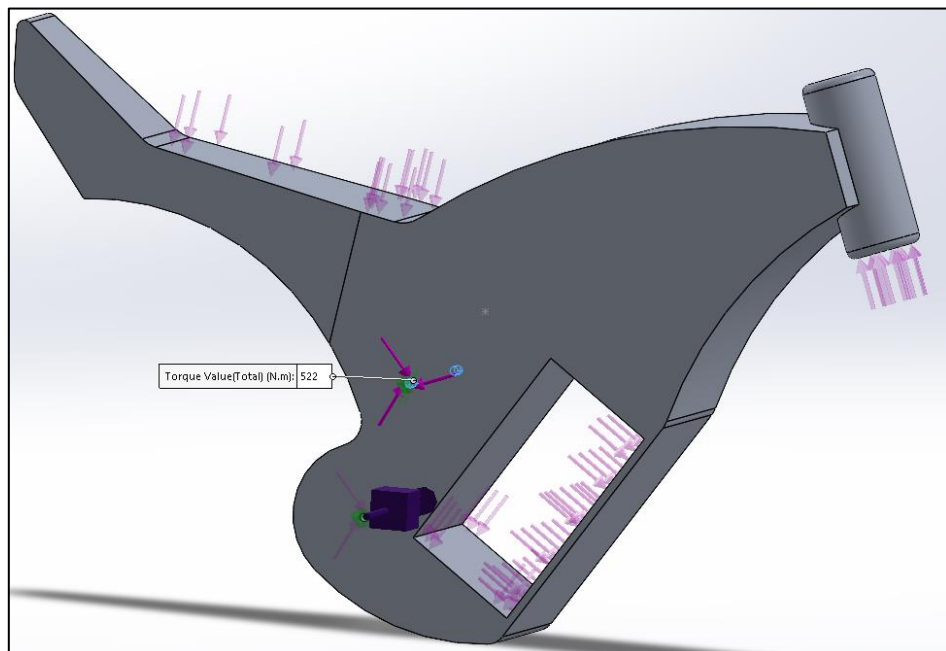


Εικόνα 5.13: Δύναμη πίσω τροχού $W_{r_{\Sigma UV}}$ και οι αποστάσεις των δύο σημείων επαφής.

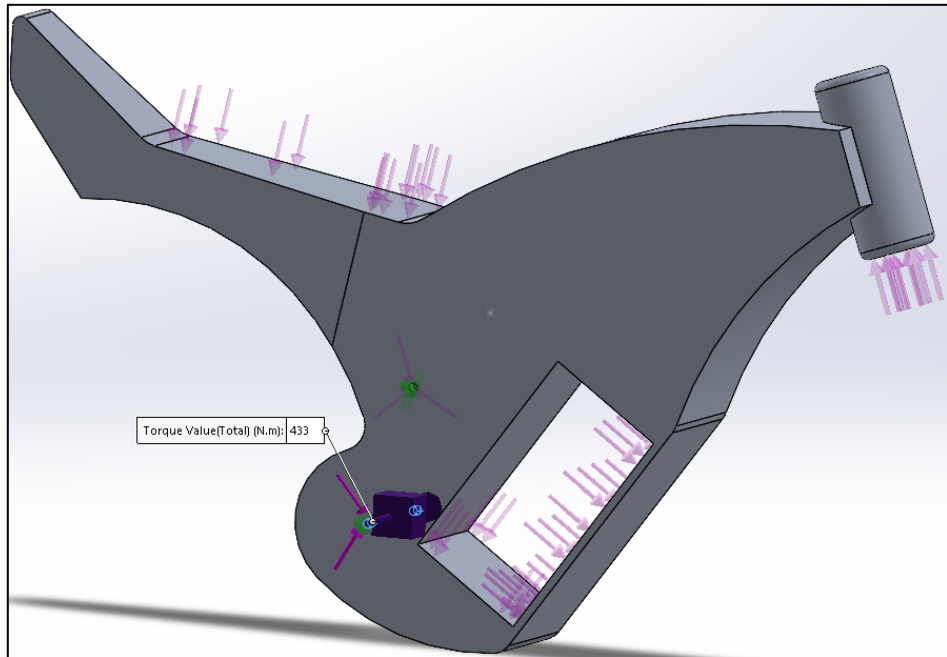
Με την δύναμη του πίσω τροχού προκύπτουν οι παρακάτω ροπές:

Ροπή ανάρτησης: $1076.2 \text{ [N]} * 0.485 \text{ [m]} = 522 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.14).

Ροπή ψαλιδιού: $1076.2 \text{ [N]} * 0.402 \text{ [m]} = 433 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.15).

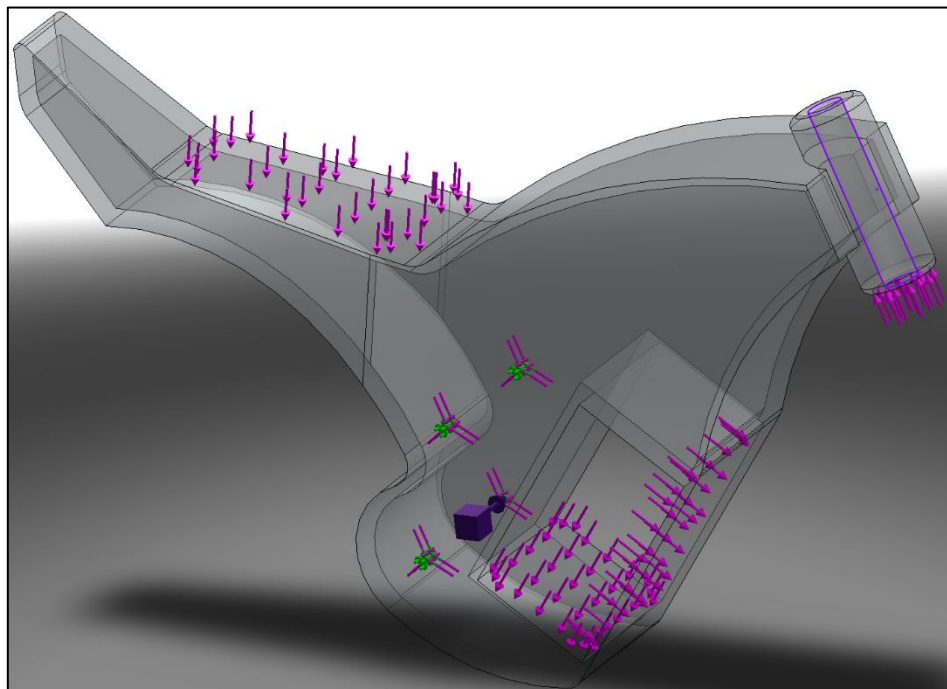


Εικόνα 5.14: Ροπή ανάρτησης 522 [Nm].



Εικόνα 5.15: Ροπή ψαλιδιού 433 [Nm].

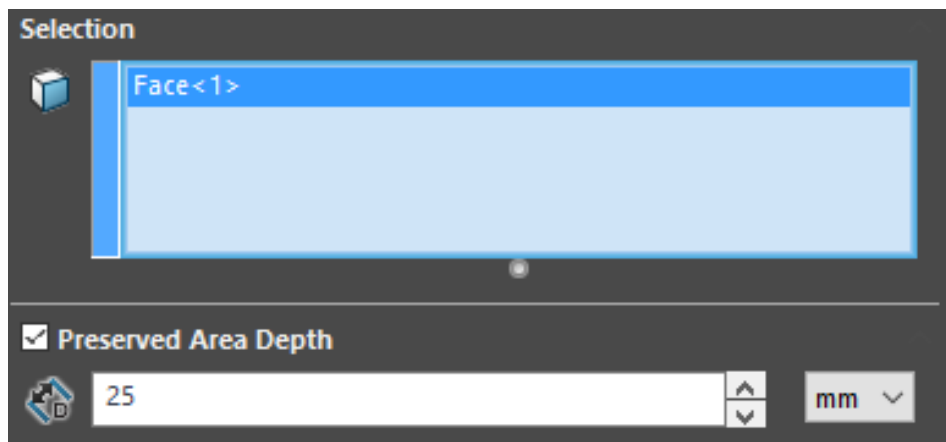
Μετά τις δυνάμεις ακολουθούν οι περιορισμοί στην κίνηση του μοντέλου και κάποιες γεωμετρίες οι οποίες θα παραμείνουν ως έχουν με ένα ορισμένο πάχος όπως αναλύεται παρακάτω (Βλ. Εικόνα 5.16).



Εικόνα 5.16: Διατήρηση γεωμετρίας τιμονιού.



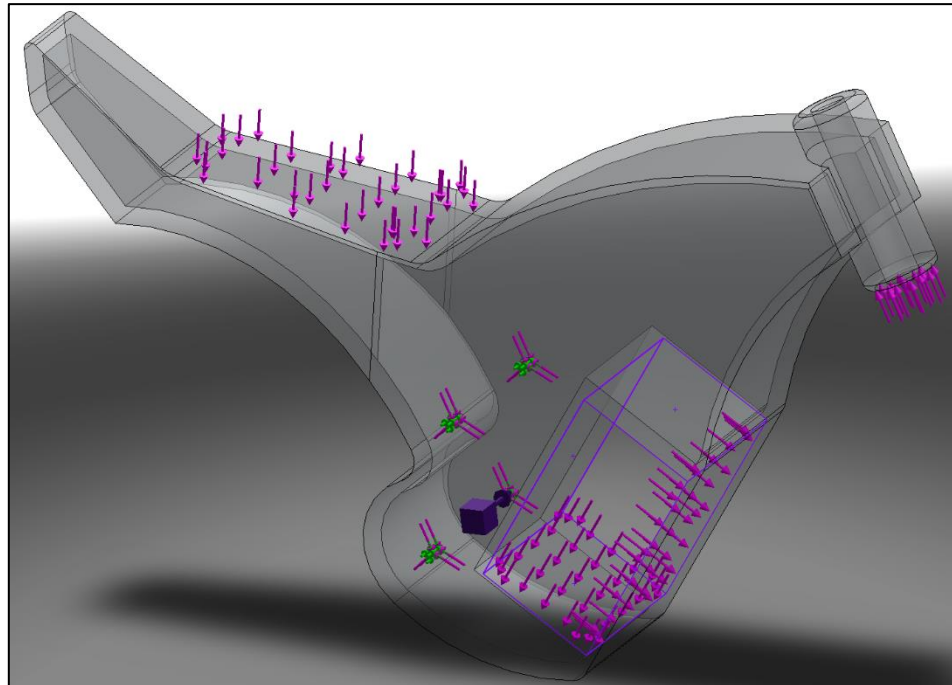
Το τιμόνι θα διατηρηθεί όπως είναι από την εσωτερική του διάμετρο και για συγκεκριμένο πάχος όπου φαίνεται παρακάτω (Βλ. Εικόνα 5.17).



Εικόνα 5.17: Διατήρηση γεωμετρίας τιμονιού.

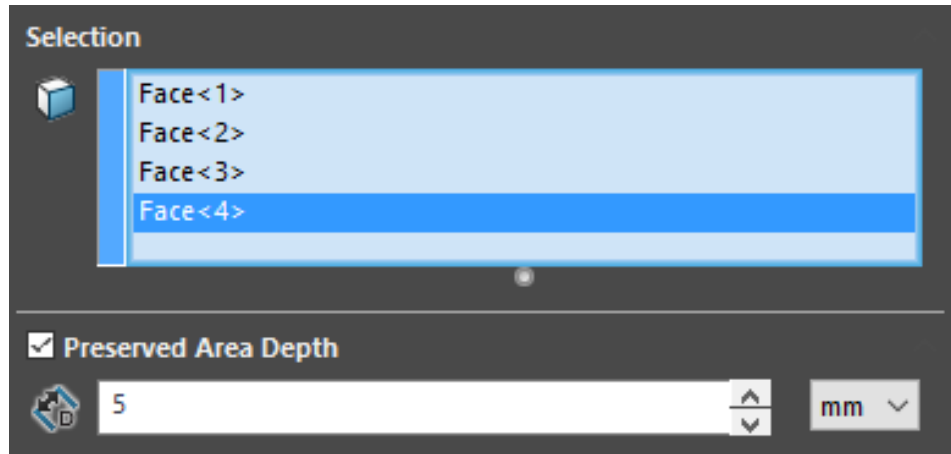
Το πάχος ακτινικά στον κύλινδρο συγκράτησης του τιμονιού το οποίο θα διατηρηθεί είναι 25 [mm].

Το πάχος που θα διατηρηθεί για την υποδοχή μπαταρίας είναι οι τέσσερις επιφάνειες χρωματισμένες με μωβ χρώμα (Βλ. Εικόνα 5.18).



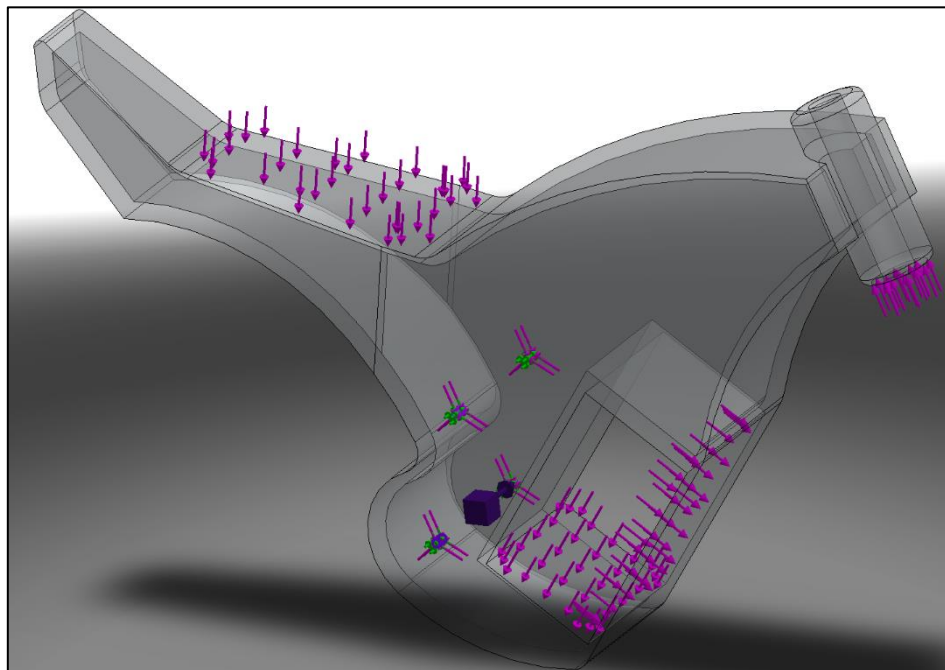
Εικόνα 5.18: Διατήρηση γεωμετρίας υποδοχής μπαταρίας.

Το ελάχιστο πάχος το οποίο θα διατηρηθεί για την υποδοχή της μπαταρίας είναι 5 [mm] (Βλ. Εικόνα 5.19).



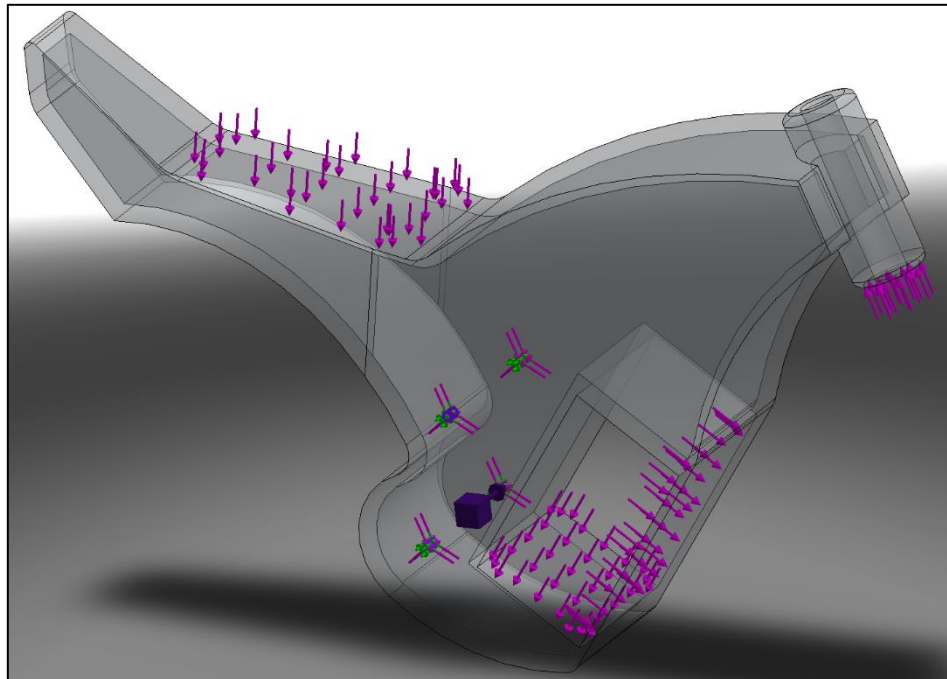
Εικόνα 5.19: Διατήρηση γεωμετρίας υποδοχής μπαταρίας.

Η εσωτερική διάμετρο του πείρου θα διατηρηθεί σε ολόκληρο το μήκος του μοντέλου (Βλ. Εικόνα 5.20).



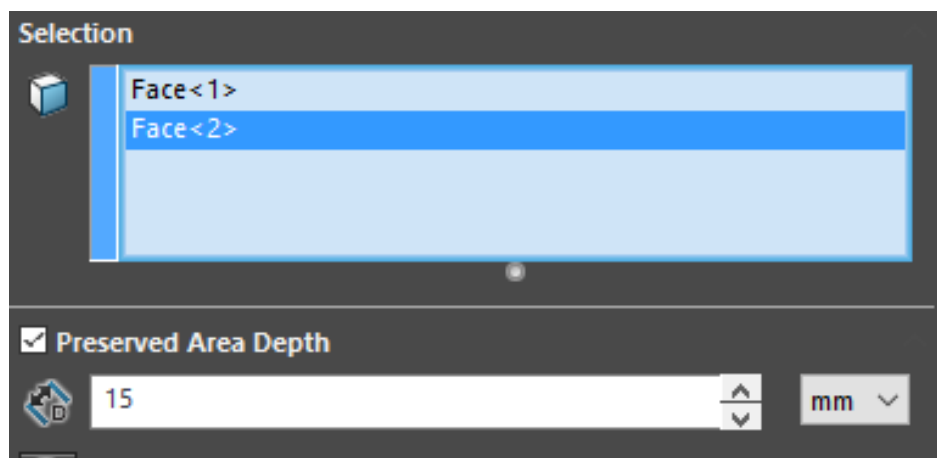
Εικόνα 5.20: Διατήρηση γεωμετρίας για τον πείρο του ψαλιδιού.

Για αυτόν τον πείρο ισχύει το ίδιο όπως και στον παραπάνω (Βλ. Εικόνα 5.21).



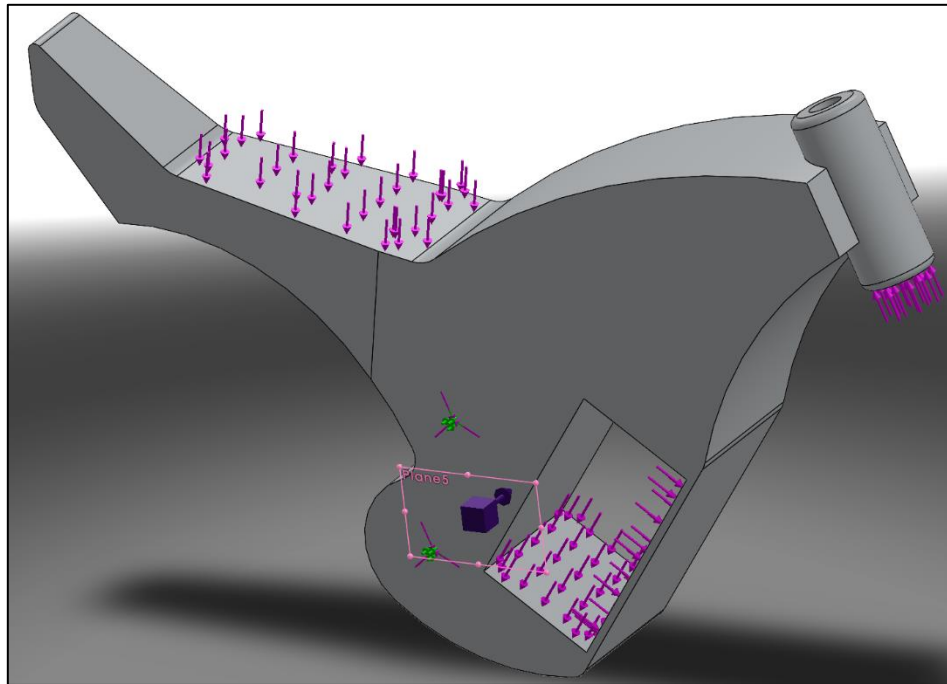
Εικόνα 5.21: Διατήρηση γεωμετρίας για τον πείρο της ανάρτησης.

Το πάχος το οποίο θα διατηρηθεί είναι 15 [mm] (Βλ. Εικόνα 5.22).



Εικόνα 5.22: Διατήρηση γεωμετρίας για τον πείρο του ψαλιδιού και της ανάρτησης.

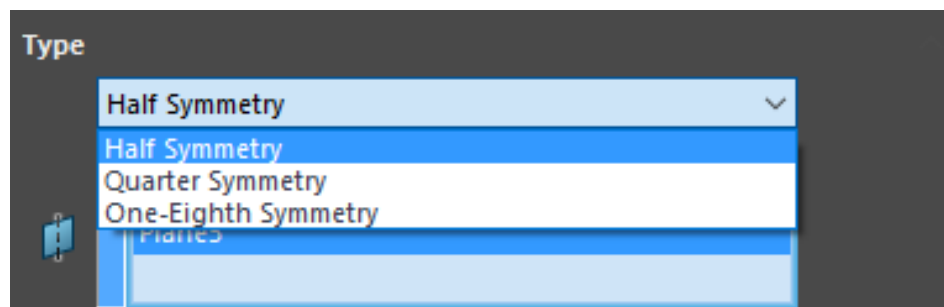
Επόμενο όρισμα είναι το επίπεδο συμμετρίας (Βλ. Εικόνα 5.23).



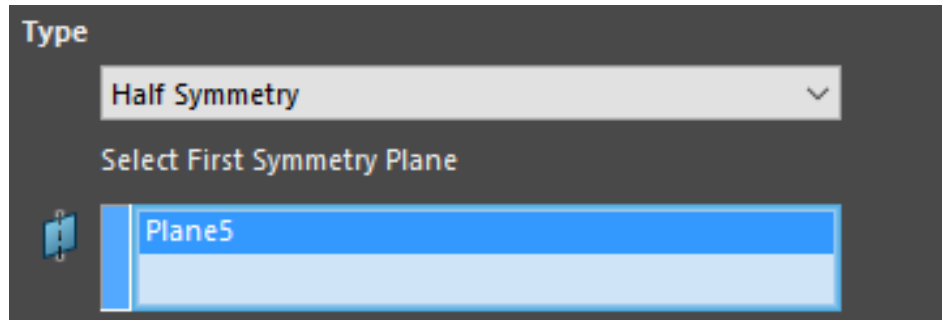
Εικόνα 5.23: Επίπεδο συμμετρίας (symmetry plane 5).

Το επίπεδο συμμετρίας ορίζει ότι το μοντέλο θα είναι συμμετρικό ως προς τα δεξιά και αριστερά από το επίπεδο που ορίστηκε και τον τύπο συμμετρίας.

Αυτές είναι οι επιλογές ως προς τον τύπο συμμετρίας, όπου και επιλέχθηκε το Half Symmetry (Βλ. Εικόνα 5.24).

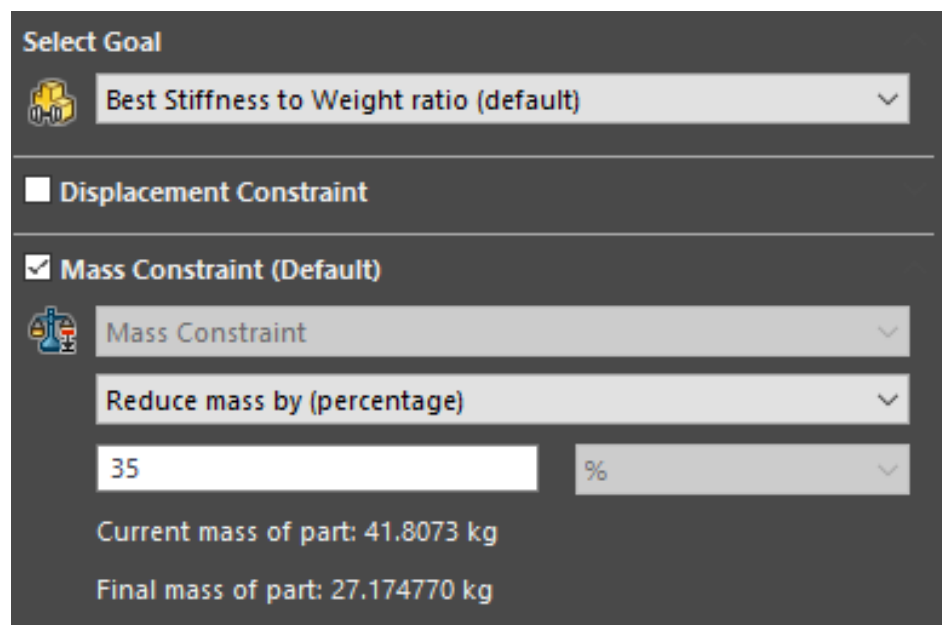


Εικόνα 5.24: Τύποι συμμετρίας.



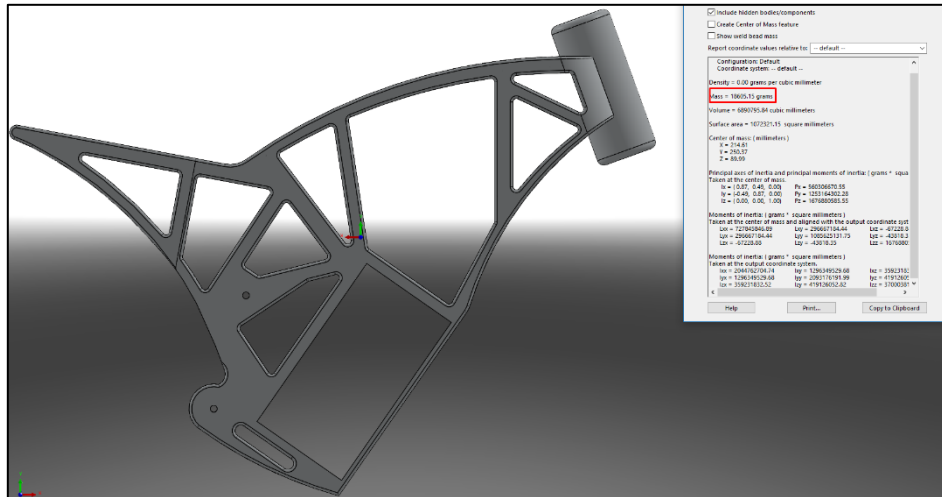
Εικόνα 5.25: Επιλογή τύπου συμμετρίας.

Τέλος ορίζεται ο επιθυμητός στόχος της ανάλυσης (Βλ. Εικόνα 5.26).



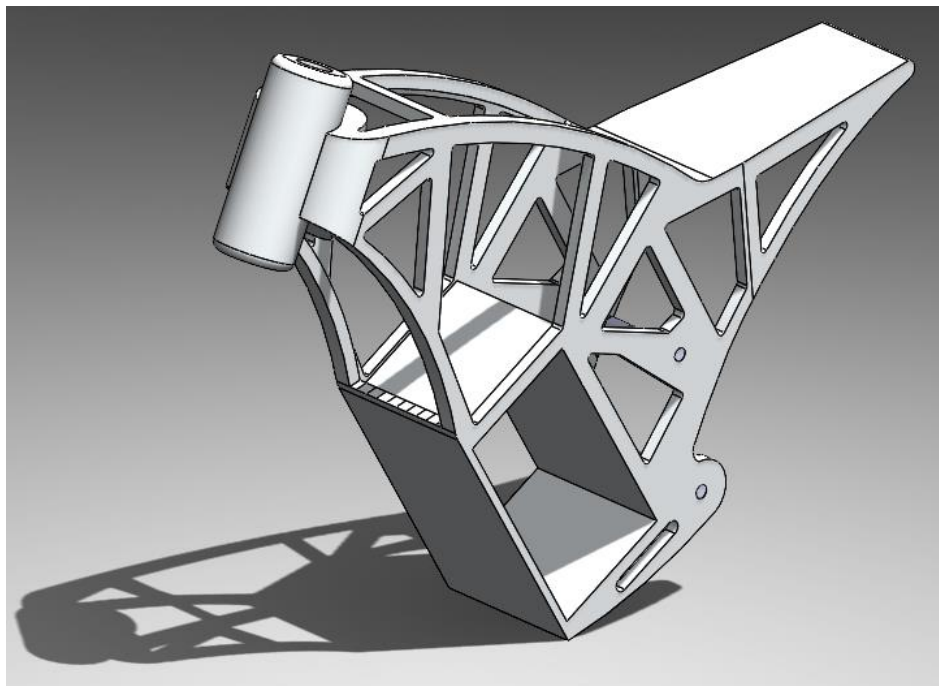
Εικόνα 5.26: Επιλογή στόχου.

Εδώ έχει οριστεί ως επιθυμητός στόχος ο καλύτερος δυνατός λόγος σκληρότητας/βάρους με ορισμένη μείωση μάζας κατά 35% το ελάχιστο. Μετά και από τον ορισμό του στόχου η ανάλυση είναι έτοιμη να ξεκινήσει. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα (Βλ. Εικόνα 5.27).

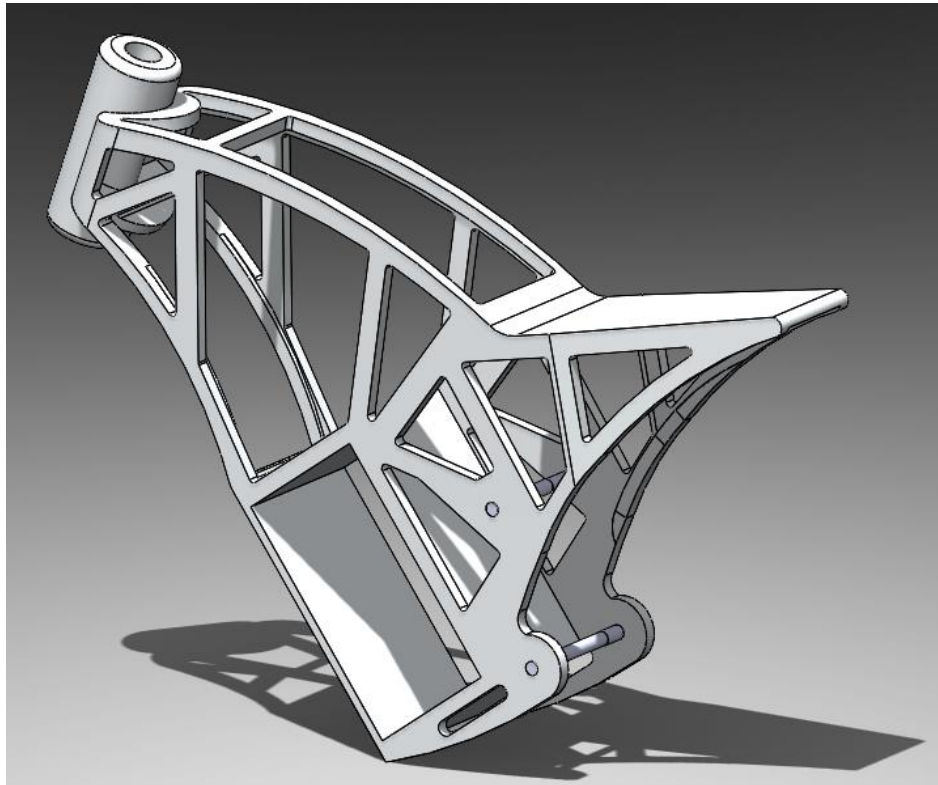


Εικόνα 5.27: Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Όπως αποδεικνύεται παραπάνω η ανάλυση φαίνεται ικανοποιητική τόσο οπτικά όσο και στις τιμές των αποτελεσμάτων. Το πιο σημαντικό είναι ότι ζυγίζει μόλις 18.6 [Kg], 55.5% λιγότερο από την αρχική μορφή των 41.8 [Kg]. Όπως αποδείχτηκε η ελάχιστη τιμή του 35% που ορίστηκε καλύπτεται ικανοποιητικά.



Εικόνα 5.28: Τοπολογική βελτιστοποίηση.



Εικόνα 5.29: Τοπολογική βελτιστοποίηση.

Για να επιβεβαιωθεί θεωρητικά ότι αντέχει η παραπάνω ανάλυση ακολουθεί και η στατική ανάλυση.

Ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται στον σκελετό έχει προηγηθεί και προκύπτουν οι εξής δυνάμεις:

Δύναμη λόγω αναβάτη: 1177 [N]

Δύναμη λόγω μπαταρίας: 137 [N]

Και η δύναμη λόγω βαρύτητας είναι η μόνη που αλλάζει γιατί πλέον το βάρος του σκελετού ζυγίζει 18.6 [Kg] οπότε και η δύναμη είναι: $18.6 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 182.5 \text{ [N]}$.

Με αυτές τις δυνάμεις υπολογίζονται οι αντιδράσεις στους τροχούς.

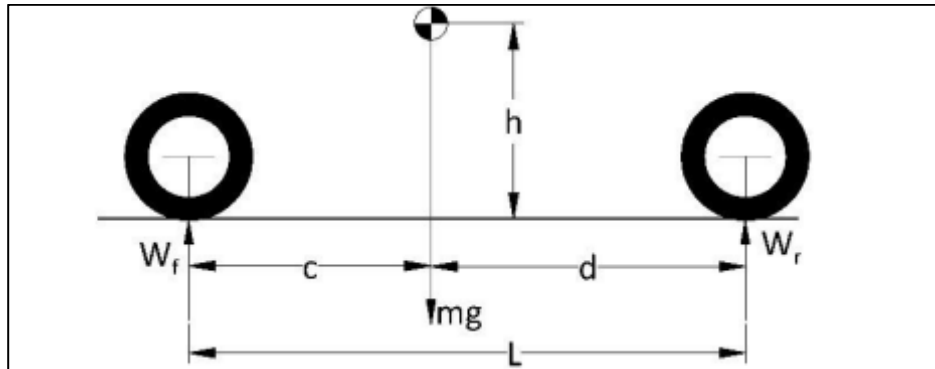


Figure 1: Side-view model of a motorcycle.

Analyzing the motorcycle and rider system in a lateral plane, as represented in Fig. 1, the sum of moments about the front and rear wheels must be zero.

$$\sum M_f = 0 = W_r(c + d) - mgc \quad (1)$$

$$\sum M_r = 0 = mgd - W_f(c + d) \quad (2)$$

Thus,

$$W_f = \frac{mg \times d}{(c+d)} = \frac{W \times d}{L} \quad (3)$$

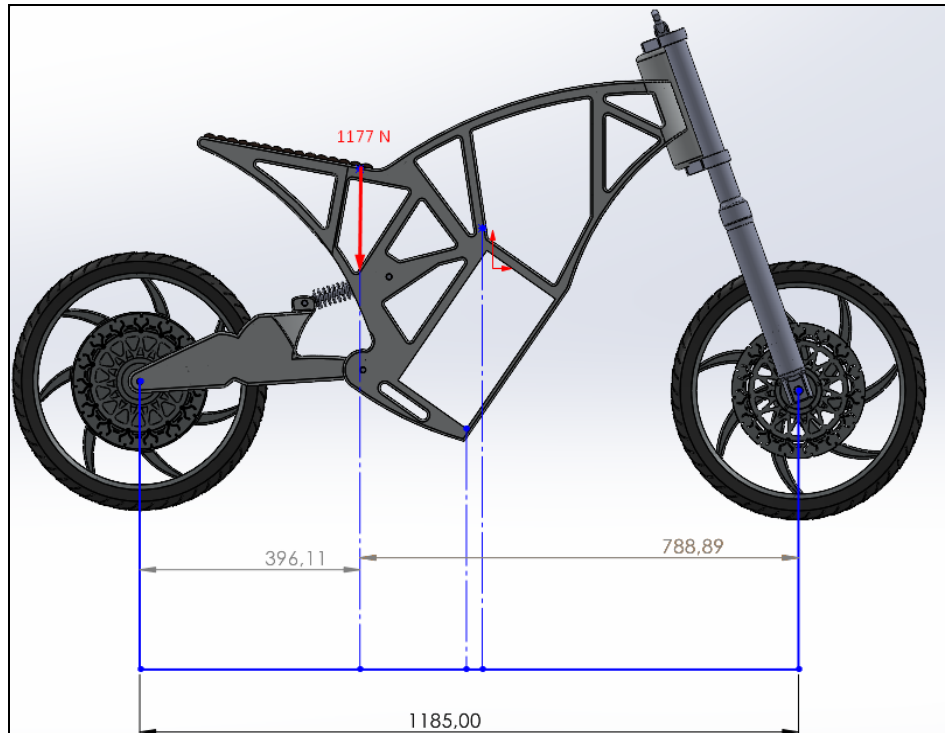
$$W_r = \frac{mg \times c}{(c+d)} = \frac{W \times c}{L} \quad (4)$$

Εικόνα 5.30: Τύπος υπολογισμού αντιδράσεων στους τροχούς.[48]

Για την δύναμη λόγω αναβάτη υπολογίζονται οι αντιδράσεις (Βλ. Εικόνα 5.31):

$$W_f = (W \times c) / L \Rightarrow (1177 \text{ [N]} \times 396 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 393 \text{ [N]}$$

$$W_r = (W \times d) / L \Rightarrow (1177 \text{ [N]} \times 789 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 783.7 \text{ [N]}$$

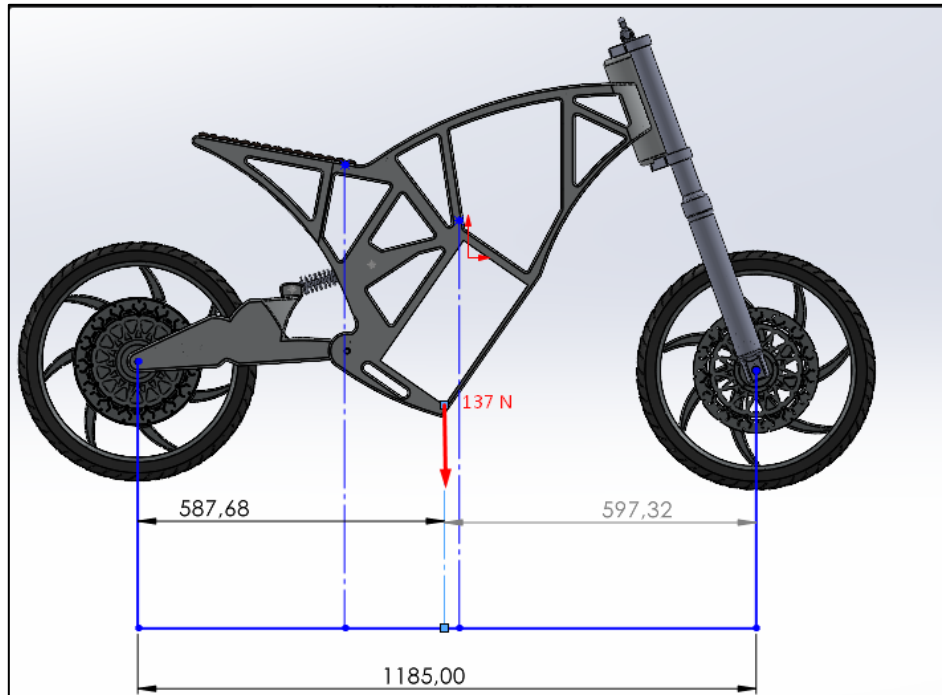


Εικόνα 5.31: Αποστάσεις τροχών από την δύναμη λόγω αναβάτη.

Για την δύναμη λόγω μπαταρίας υπολογίζονται οι αντιδράσεις (Βλ. Εικόνα 5.32):

$$W_f = (W \cdot c) / L \Rightarrow (137 \text{ [N]} \cdot 588 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 68 \text{ [N]}$$

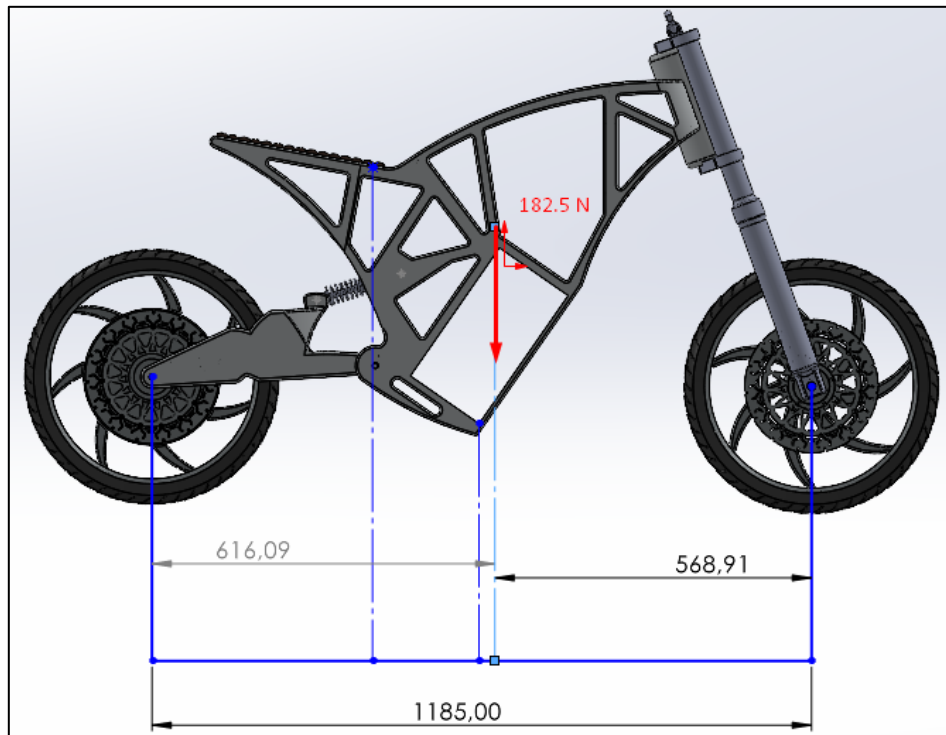
$$W_r = (W \cdot d) / L \Rightarrow (137 \text{ [N]} \cdot 597 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 69 \text{ [N]}$$



Εικόνα 5.32: Αποστάσεις τροχών από την δύναμη λόγω μπαταρίας.

Για την δύναμη λόγω βαρύτητας υπολογίζονται οι αντιδράσεις (Βλ. Εικόνα 5.33):
 $W_f = (W \cdot c) / L \Rightarrow (182.5 \text{ [N]} \cdot 616 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 95 \text{ [N]}$

$W_r = (W \cdot d) / L \Rightarrow (182.5 \text{ [N]} \cdot 567 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 87.5 \text{ [N]}$



Εικόνα 5.33: Αποστάσεις τροχών από την δύναμη λόγω βαρύτητας.

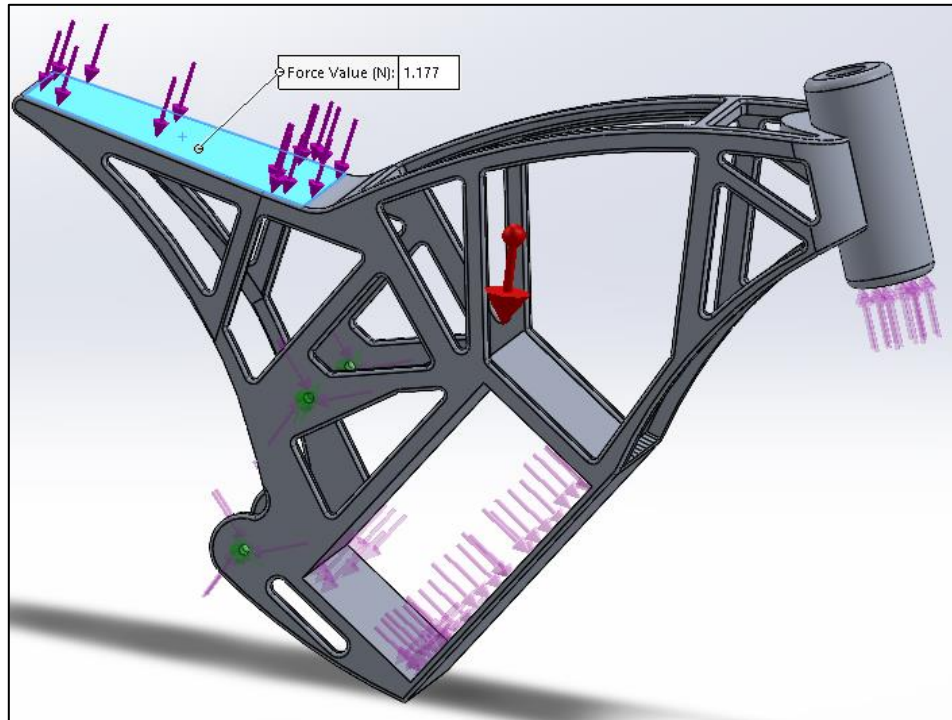
Άρα από τα παραπάνω προκύπτουν οι συνολικές:

$$W_{f_{\Sigma uv}} = 393 \text{ [N]} + 68 \text{ [N]} + 95 \text{ [N]} = 556 \text{ [N]}$$

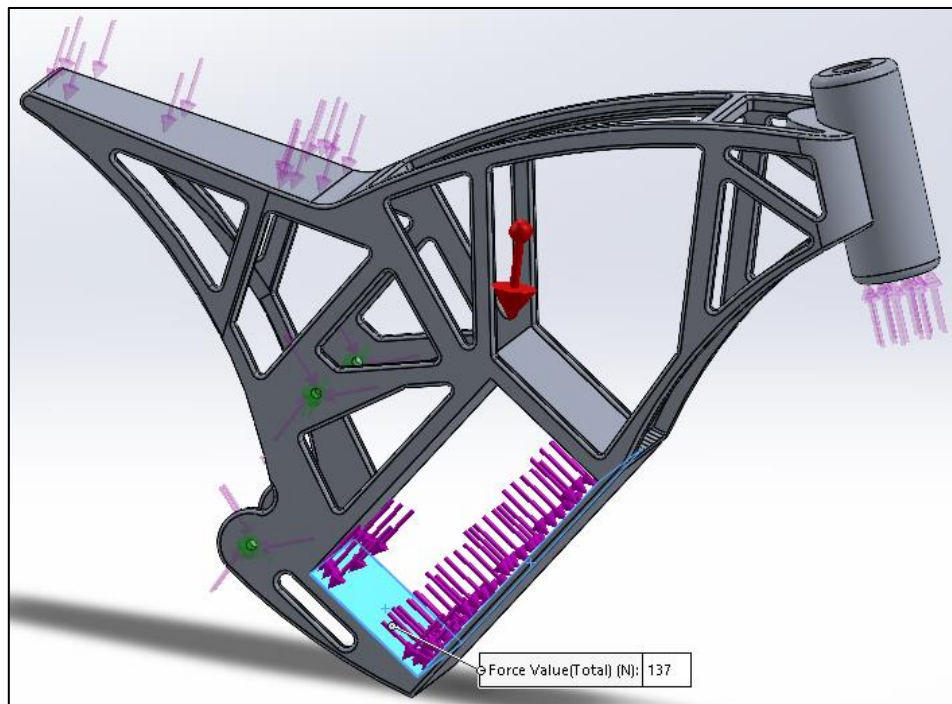
$$W_{r_{\Sigma uv}} = 783.7 \text{ [N]} + 69 \text{ [N]} + 87.5 \text{ [N]} = 940.2 \text{ [N]}$$

Στην συνέχεια ορίζονται αυτές οι δυνάμεις και οι στηρίξεις για να ακολουθήσει η στατική ανάλυση.

Στο κάθισμα ορίστηκε μια δύναμη 1177 [N] όπως υπολογίστηκε (Βλ. Εικόνα 5.34).



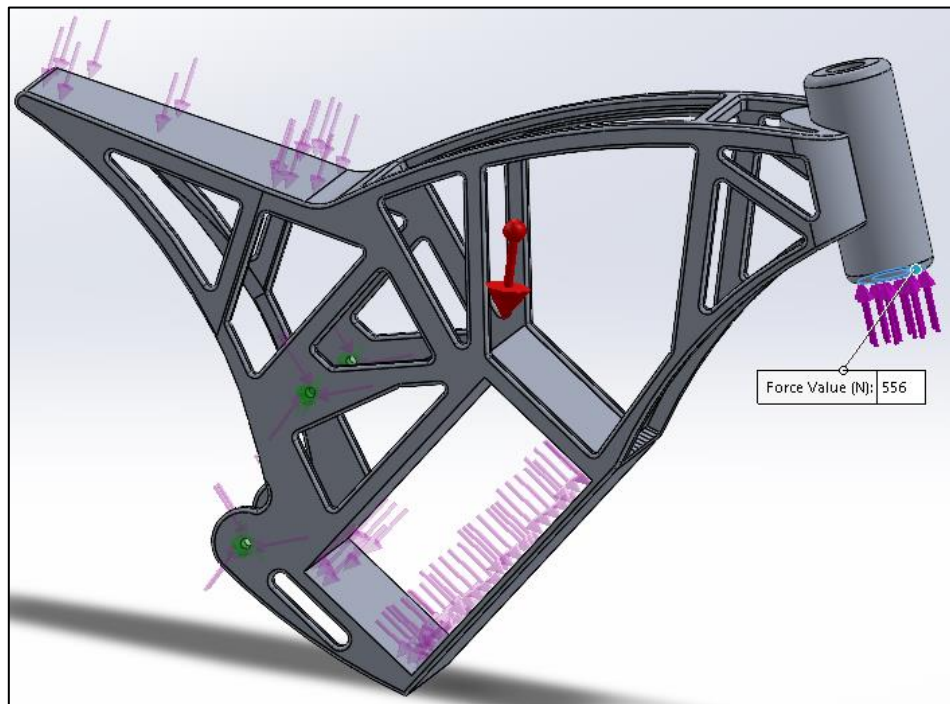
Εικόνα 5.34: Δύναμη καθίσματος 1177 [N].



Εικόνα 5.35: Δύναμη μπαταρίας 137 [N].

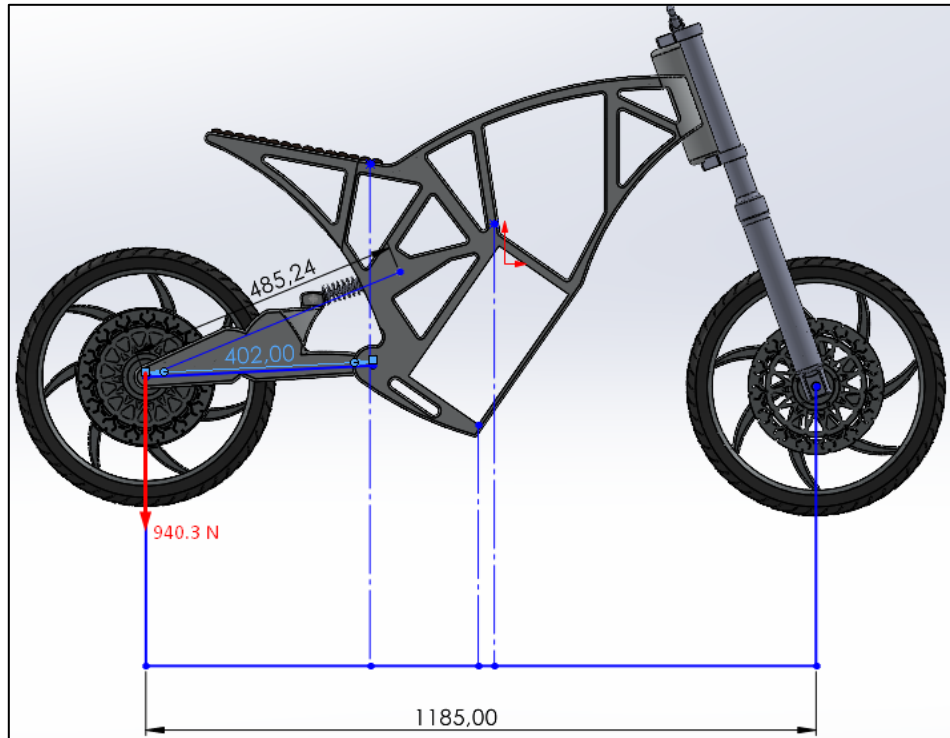


Η παρακάτω δύναμη 556 [N] είναι η δύναμη $Wf_{\Sigma uv}$ η οποία έχει μεταφερθεί από τον εμπρόσθιο τροχό στον σκελετό (Βλ. Εικόνα 5.36).



Εικόνα 5.36: Δύναμη εμπρόσθιου τροχού 556 [N].

Η δύναμη του πίσω τροχού μέσω του ψαλιδιού μετατρέπεται σε δύο ροπές στα σημεία επαφής με τον σκελετό, οι ροπές αυτές είναι (Βλ. Εικόνα 5.37):

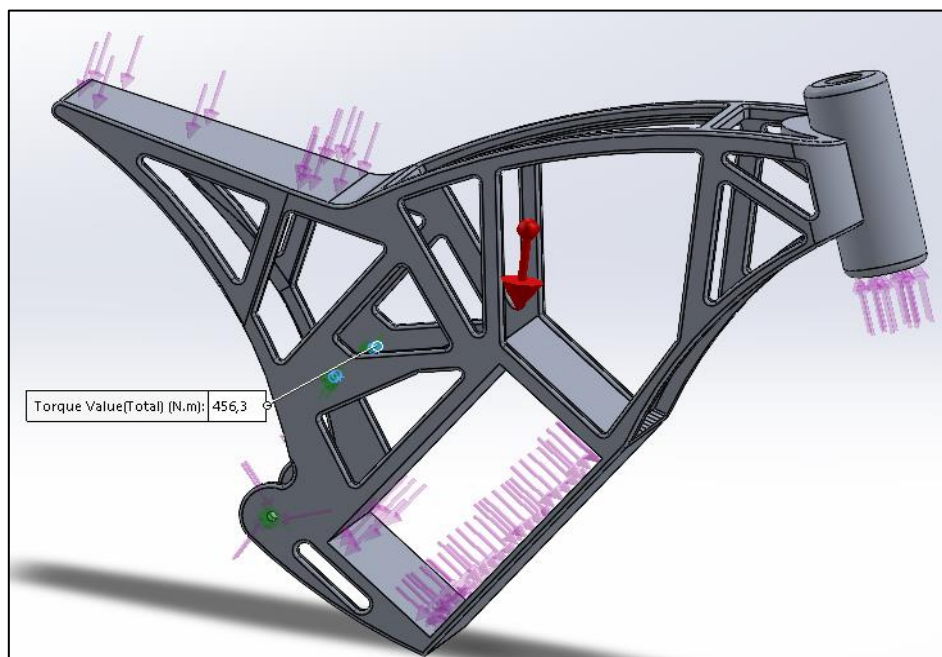


Εικόνα 5.37: Δύναμη πίσω τροχού $W_{r_{\Sigma UV}}$ και οι αποστάσεις των δύο σημείων επαφής.

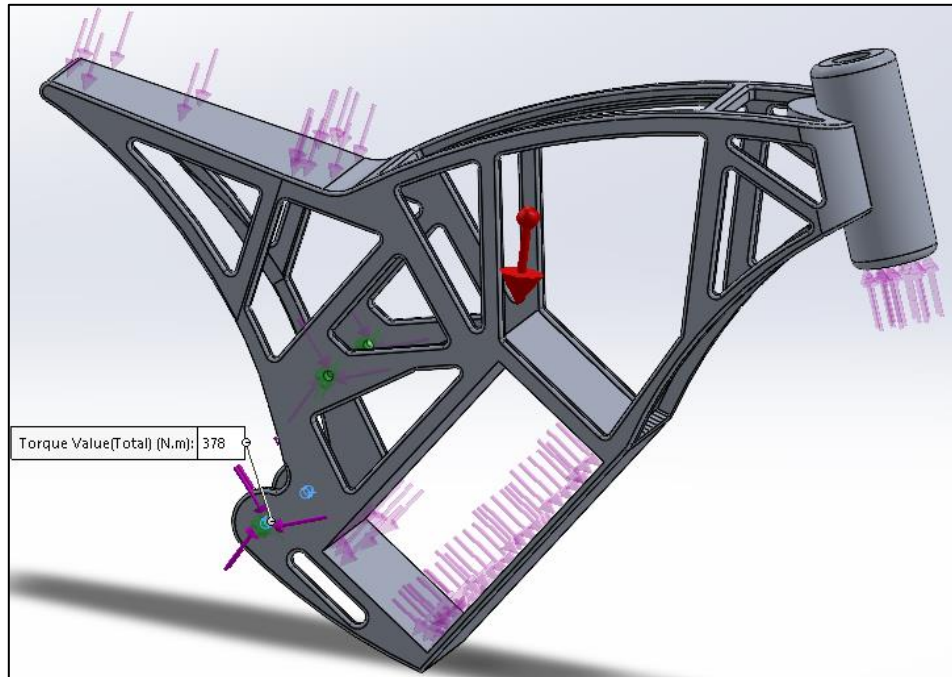
Με την δύναμη του πίσω τροχού προκύπτουν οι παρακάτω ροπές:

Ροπή ανάρτησης: $940.2 \text{ [N]} * 0.485 \text{ [m]} = 456 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.38).

Ροπή ψαλιδιού: $940.2 \text{ [N]} * 0.402 \text{ [m]} = 378 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.39).



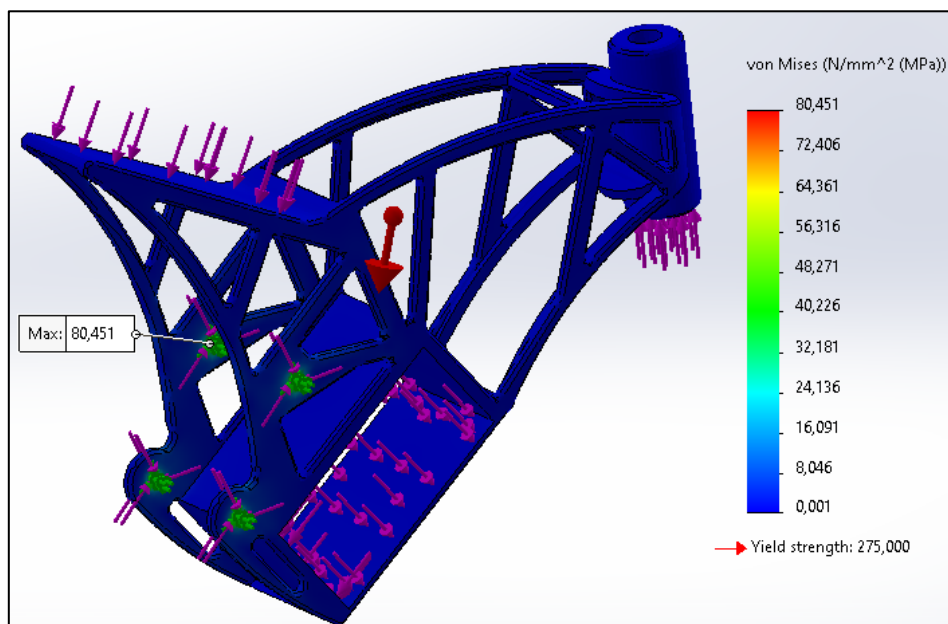
Εικόνα 5.38: Ροπή ανάρτησης 456.3 [Nm] .



Εικόνα 5.39: Ροπή ψαλιδιού 378 [Nm].

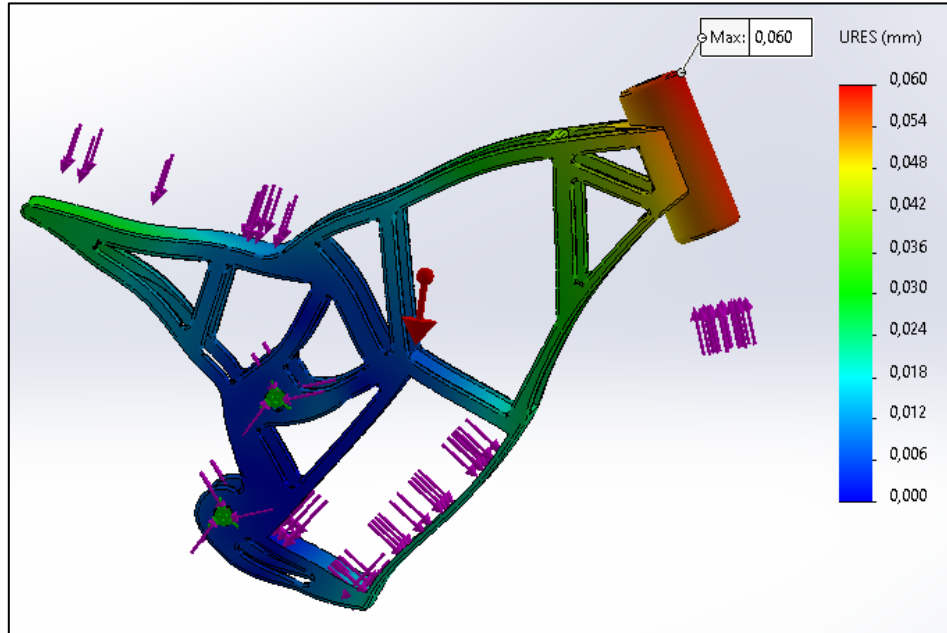
Με τις παραπάνω συνθήκες έγιναν επιπλέον στατικές αναλύσεις στον σκελετό και ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι 3.42.

Αφού ολοκληρώθηκε η ανάλυση του πλαισίου προκύπτει ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται είναι 80 [Μρα] έναντι των 275 [Μρα] όπου είναι το σημείο διαρροής του υλικού (Βλ. Εικόνα 5.40).



Εικόνα 5.40: Τελική ανάλυση αντοχής.

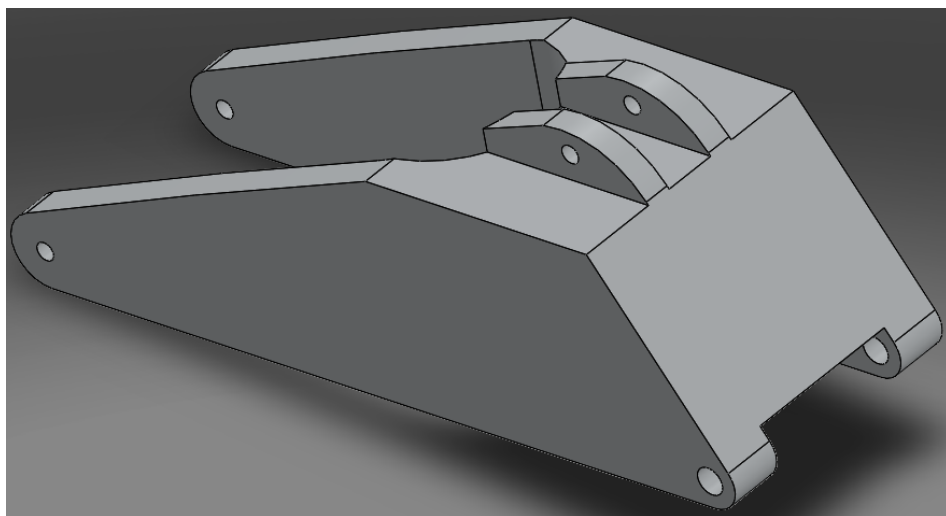
Παρακάτω απεικονίζεται η μέγιστη παραμόρφωση που υφίσταται ο σκελετός η οποία είναι 0.060[mm] (Βλ. Εικόνα 5.41).



Εικόνα 5.41: Ανάλυση παραμόρφωσης.

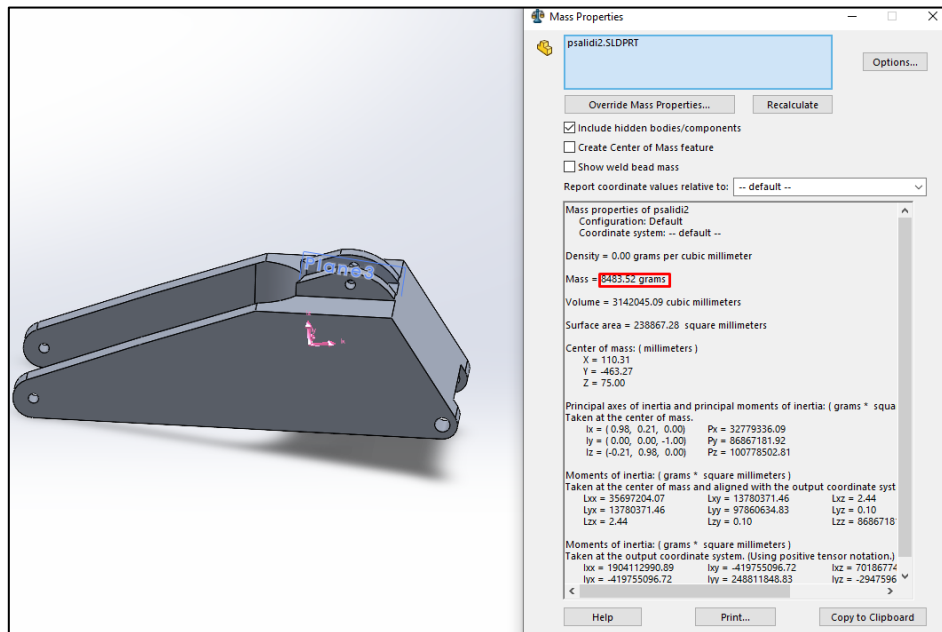
Το επόμενο βήμα είναι με τον ίδιο τρόπο να σχεδιαστεί και ο πίσω βραχίονας (ψαλίδι) καθώς να περάσει και από τις ίδιες αναλύσεις.

Παρακάτω είναι το αρχικό σχέδιο προτού γίνει η ανάλυση της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Βλ. Εικόνα 5.42).



Εικόνα 5.42: Αρχικό σχέδιο ψαλιδιού.

Καθώς ορίστηκε το ίδιο υλικό κατασκευής όπως και στον σκελετό (Aluminium 6061-T6) η μάζα του ψαλιδιού προκύπτει 8.5 [Kg] όπως φαίνεται παρακάτω (Βλ. Εικόνα 5.43).



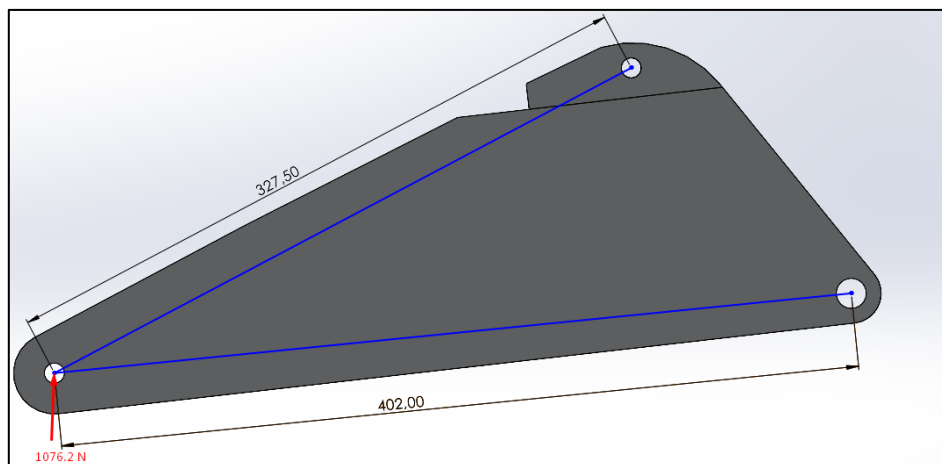
Εικόνα 5.43: Μάζα αρχικού ψαλιδιού.

Στη συνέχεια αναφέρονται οι δυνάμεις που θα ασκούνται σε αυτό, οι οποίες έχουν υπολογιστεί παραπάνω για τον σκελετό οπότε εδώ λαμβάνονται υπόψιν οι δυνάμεις και οι αντιδράσεις πριν την ανάλυση τοπολογικής βελτιστοποίησης.

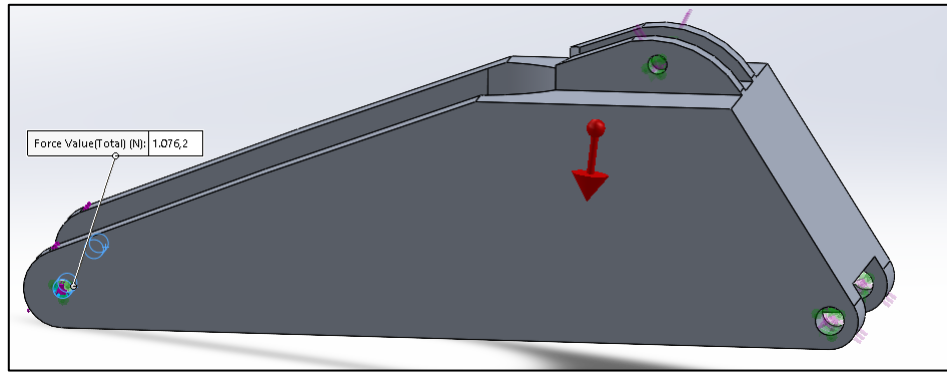
Δύναμη λόγω βαρύτητας: $8.5 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 83.4 \text{ [N]}$

Αντίδραση πίσω τροχού: 1076.2 [N] (Βλ. Εικόνα 5.45)

Αυτή η δύναμη προκαλεί δύο ροπές:

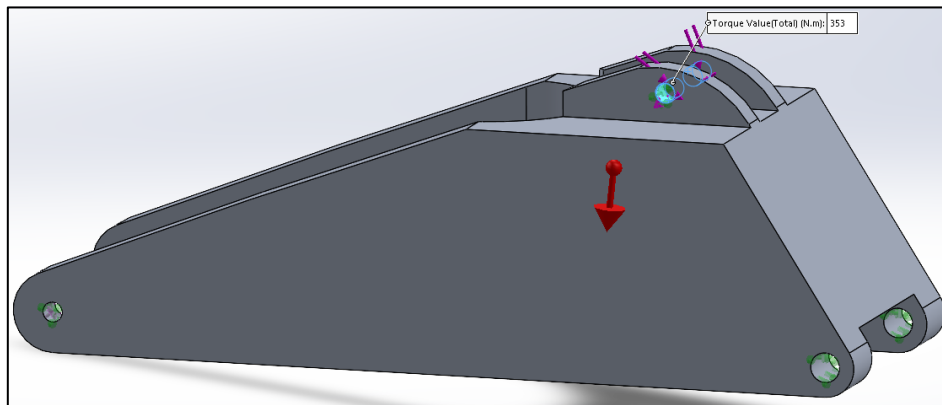


Εικόνα 5.44: Αποστάσεις τροχού από τα σημεία επαφής σκελετού και ανάρτησης.

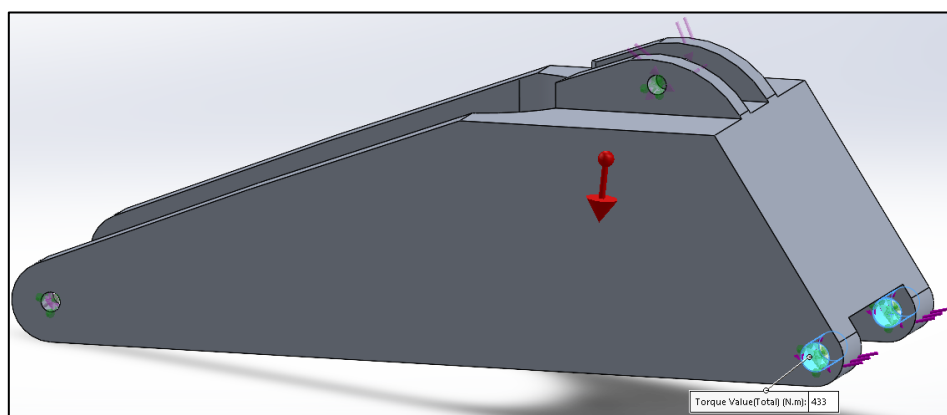


Εικόνα 5.45: Δύναμη πίσω τροχού 1076.2 [N].

Ροπή ανάρτησης: $1076.2 \text{ [N]} * 0.328 \text{ [m]} = 353 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.46).
Ροπή ψαλιδιού: $1076.2 \text{ [N]} * 0.402 \text{ [m]} = 433 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.47).



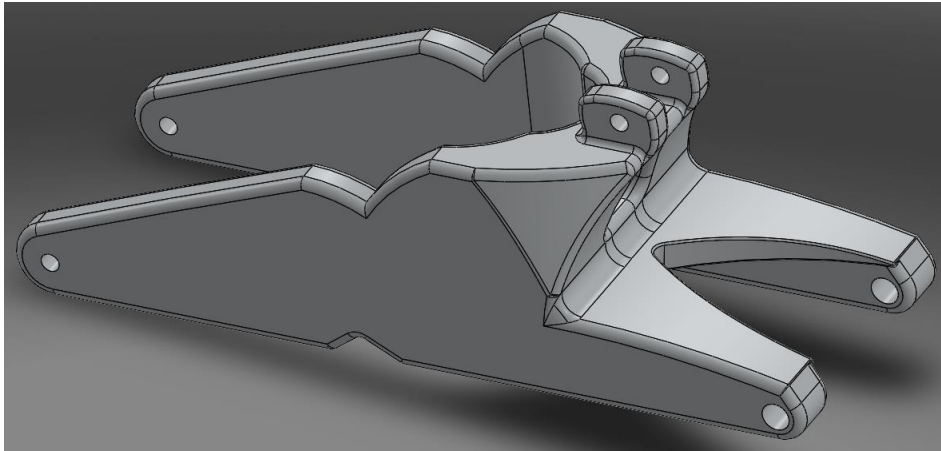
Εικόνα 5.46: Ροπή ανάρτησης 353 [Nm].



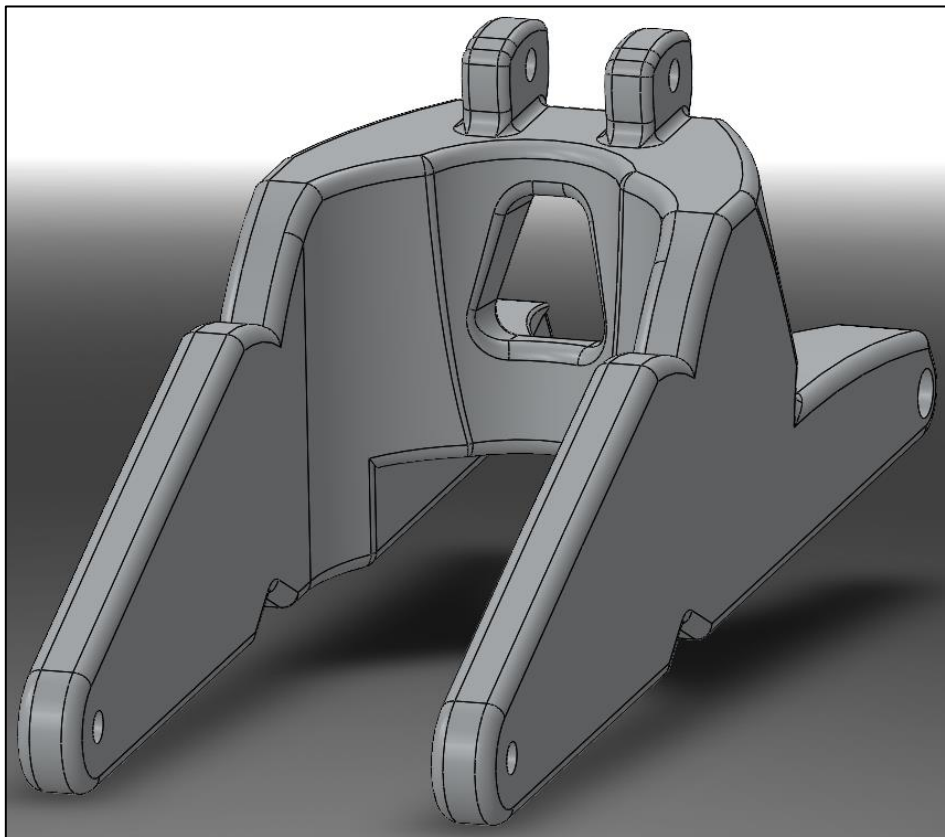
Εικόνα 5.47: Ροπή ψαλιδιού 433 [Nm].



Μετά την ολοκλήρωση του ορισμού των συνθηκών η ανάλυση ολοκληρώθηκε με τα παρακάτω αποτελέσματα (Βλ. Εικόνα 5.48).

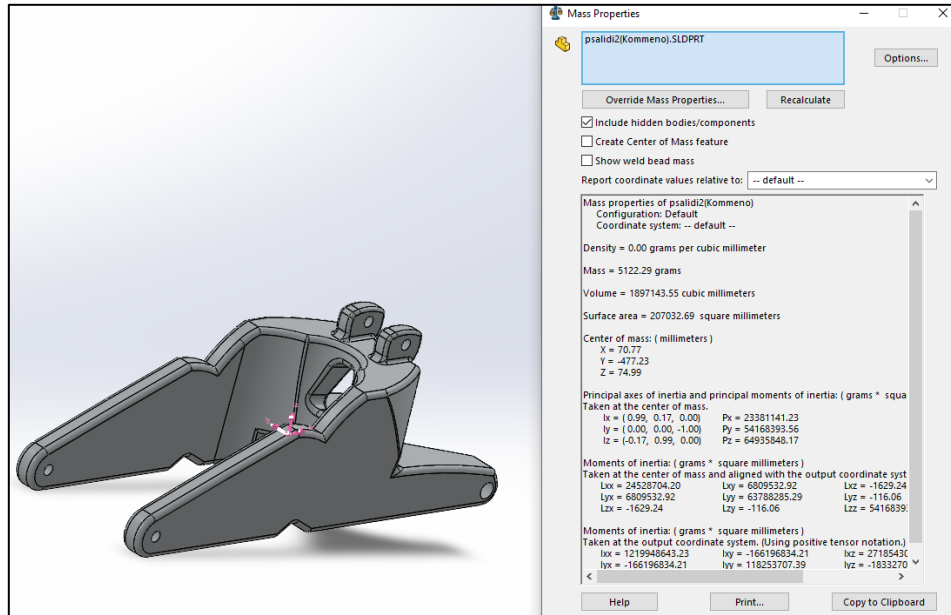


Εικόνα 5.48: Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης.



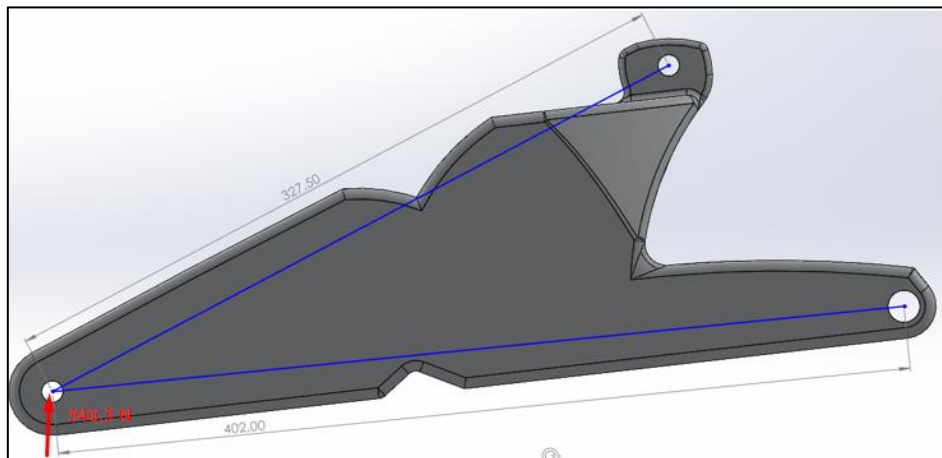
Εικόνα 5.49: Τοπολογική βελτιστοποίηση.

Η μάζα του ψαλιδιού μειώθηκε κατά 40% από 8.5 [Kg] στα 5.1 [Kg] (Βλ. Εικόνα 5.50).



Εικόνα 5.50: Μάζα ψαλιδιού 5.1[Kg].

Για την επιβεβαίωση ότι η κατασκευή αντέχει θα γίνει επιπλέον στατική ανάλυση όπου οι δυνάμεις τώρα θα ληφθούν υπόψιν από την ανάλυση μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση του σκελετού επιπλέον αλλάζει και η δύναμη της βαρύτητας λόγω αλλαγή μάζας.

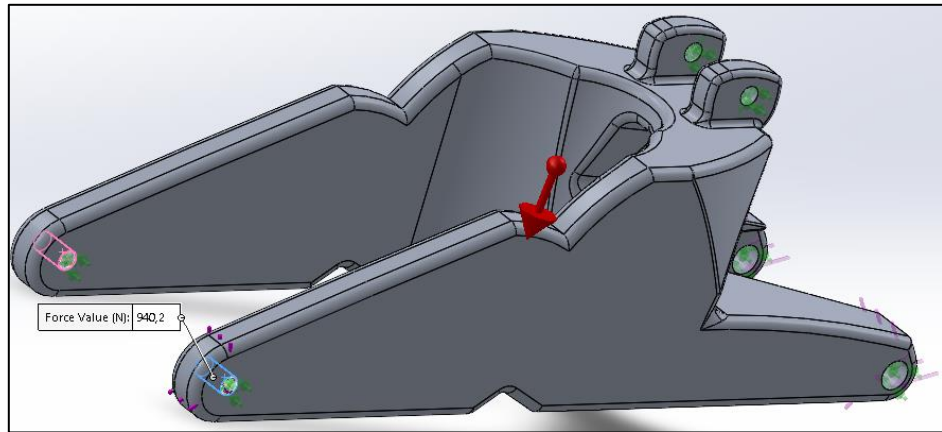


Εικόνα 5.51: Αποστάσεις τροχού από τα σημεία επαφής σκελετού και ανάρτησης.

Δύναμη λόγω βαρύτητας: $5.1 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 50 \text{ [N]}$

Αντίδραση πίσω τροχού: 940.2 [N] (Βλ. Εικόνα 5.52)

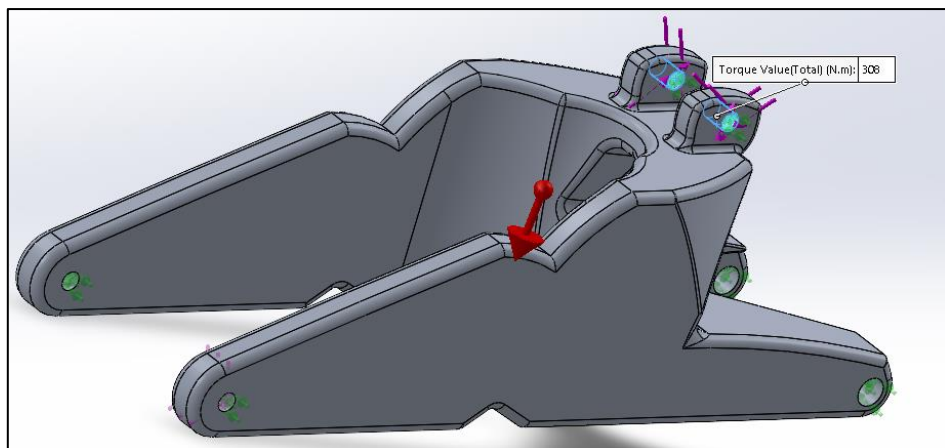
Από αυτήν την δύναμη υπολογίζονται οι δυο ροπές που προκαλούνται στα σημεία επαφής με τον σκελετό και την ανάρτηση.



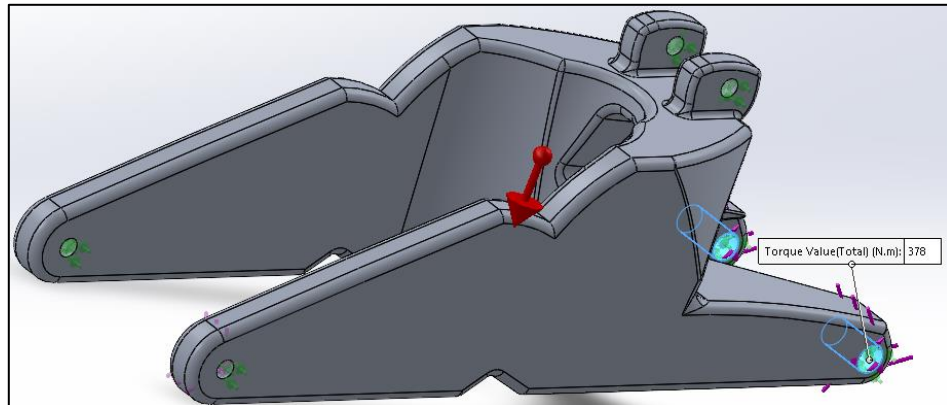
Εικόνα 5.52: Δύναμη πίσω τροχού 940.2 [N].

Ροπή ανάρτησης: $940.2 \text{ [N]} * 0.328 \text{ [m]} = 308 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.53).
Ροπή ψαλιδιού: $940.2 \text{ [N]} * 0.402 \text{ [m]} = 378 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.54).

Αυτές οι δυνάμεις και οι ροπές ορίζονται πάνω στο ψαλίδι.

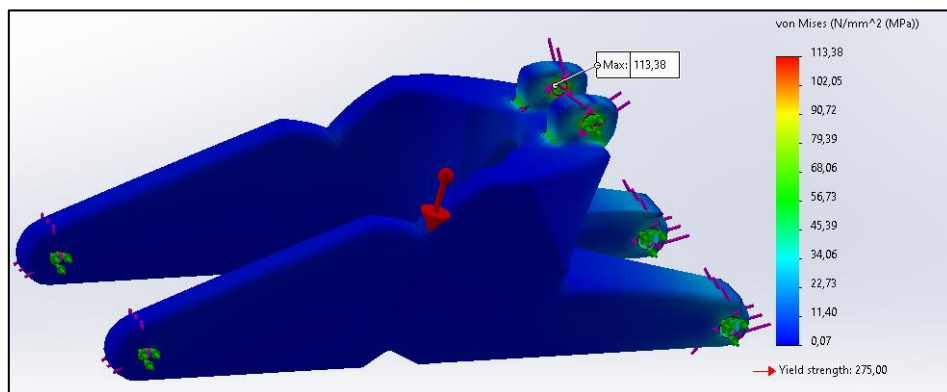


Εικόνα 5.53: Ροπή ανάρτησης 308 [Nm].



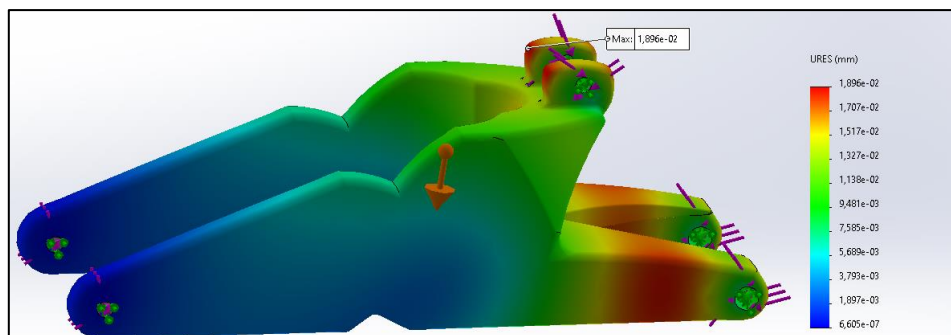
Εικόνα 5.54: Ροπή φαλιδιού 378 [Nm].

Με τις παραπάνω συνθήκες προκύπτει από την στατική ανάλυση ότι η μέγιστη τάση είναι 113.38 [MPa] σε σχέση με το όριο διαρροής 275 [MPa] υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 2.43.



Εικόνα 5.55: Σχήμα τάσης μετά από στατική ανάλυση.

Όπως φαίνεται παρακάτω η μέγιστη παραμόρφωση του φαλιδιού είναι 0.018 [mm] πράγμα που σημαίνει ότι είναι μηδαμινή η παραμόρφωση του φαλιδιού (Βλ. Εικόνα 5.56).

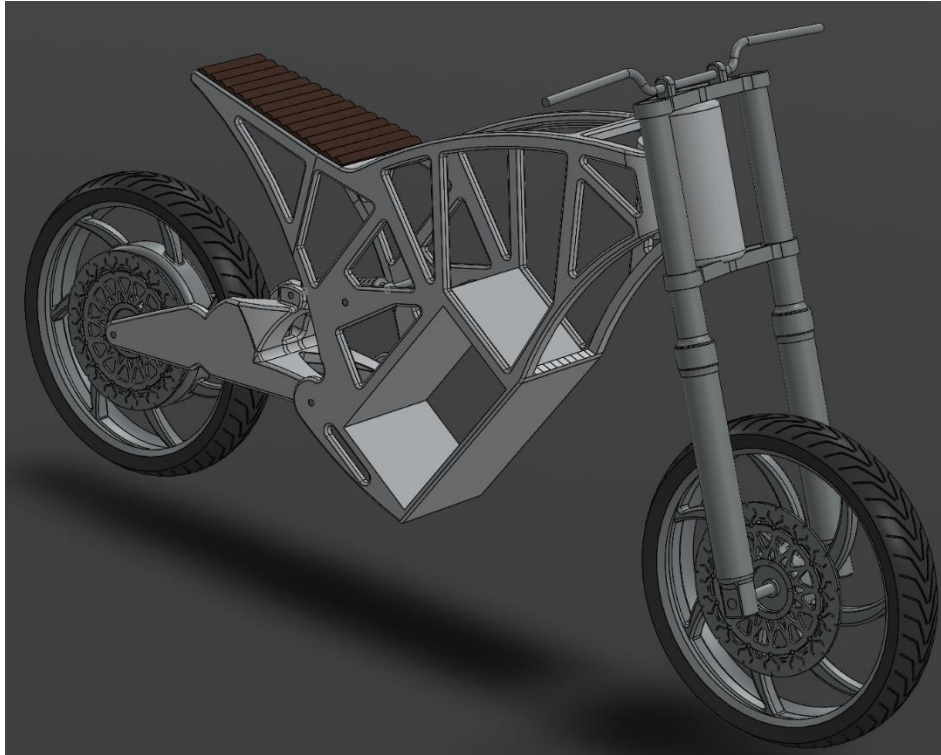


Εικόνα 5.56: Ανάλυση παραμόρφωσης.



Επιπλέον για να υπάρξει μία ολοκληρωμένη κατασκευή σχεδιάστηκαν οι ζάντες, τα λάστιχα, δισκόφρενα, αμορτισέρ και το μπροστινό σύστημα τιμονιού με αμορτισέρ.

Τέλος έγινε συναρμολόγηση των στοιχείων και παρακάτω απεικονίζεται το αποτέλεσμα (Βλ. Εικόνα 5.57).



Εικόνα 5.57: Συναρμολόγηση.

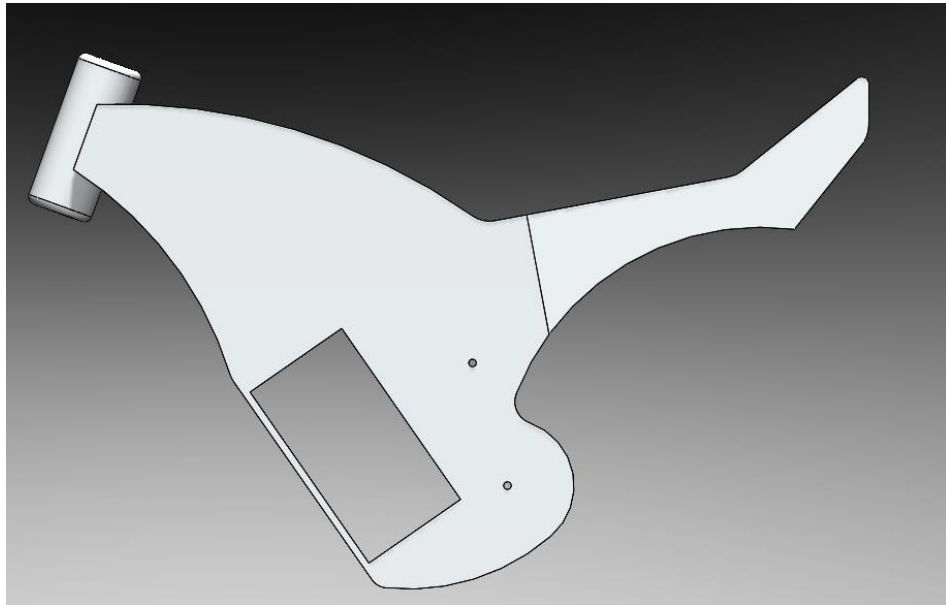


Εικόνα 5.58: Συναρμολόγηση.



5.2. Γενετικός σχεδιασμός

Για την ανάλυση του γενετικού σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του fusion 360 στο οποίο εισάχθηκε το ίδιο αρχικό σχέδιο του πλαισίου μοτοσυκλέτας καθώς θα πρέπει να αναλυθεί με τις ίδιες δυνάμεις, με τα ίδια ορίσματα και ίδιο υλικό κατασκευής (Aluminum 6061-T6).



Εικόνα 5.59: Αρχικό σχέδιο πλαισίου μοτοσυκλέτας.

Με το υλικό κατασκευής προκύπτει όπως παραπάνω ότι ο σκελετός ζυγίζει 41.8 [Kg]. Στην συνέχεια θα πρέπει να οριστούν οι δυνάμεις που ασκούνται στο μοντέλο, καθώς και οι στηρίξεις με τους περιορισμούς.

Στην συνέχεια αναφέρονται οι δυνάμεις που έχουν υπολογιστεί από την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης

Για την δύναμη καθίσματος:

$$120 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 1177 \text{ [N]} \text{ (Βλ. Εικόνα 5.60).}$$

Για την μπαταρία η δύναμη είναι:

$$14 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 137 \text{ [N]} \text{ (Βλ. Εικόνα 5.61).}$$

Και η δύναμη που ασκείται στον σκελετό λόγω βαρύτητας είναι:

$$41.8 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 410 \text{ [N]}.$$

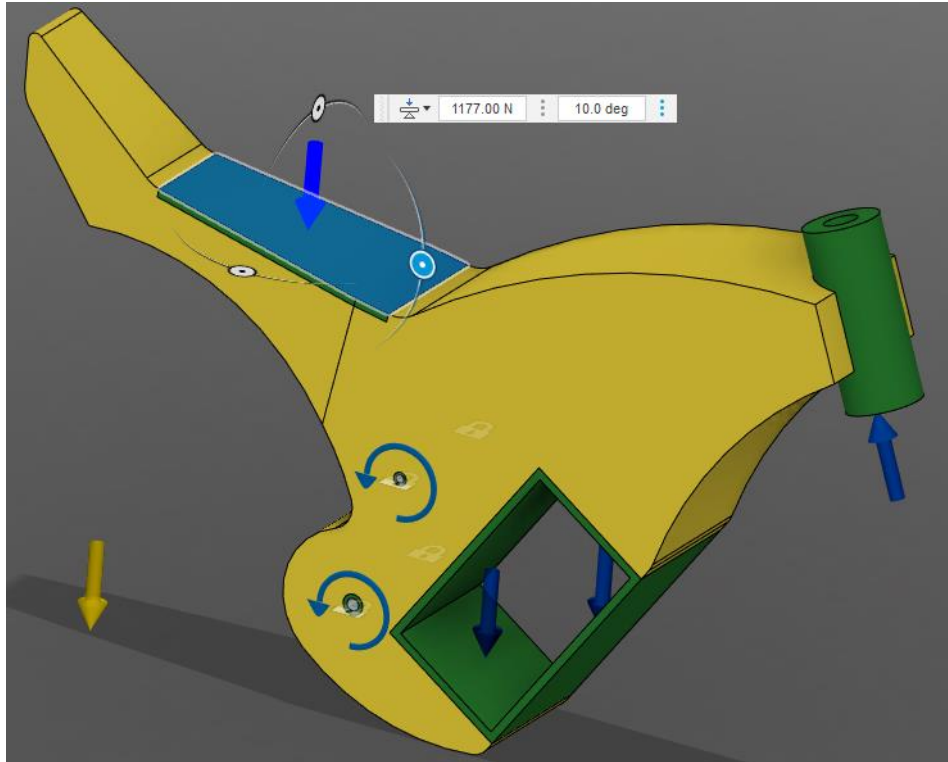
Και οι αντιδράσεις που δημιουργούνται είναι:

$$Wf_{\Sigma uv} = 393 \text{ [N]} + 68 \text{ [N]} + 213 \text{ [N]} = 674 \text{ [N]} \text{ (Δύναμη μπροστινού τροχού)}$$

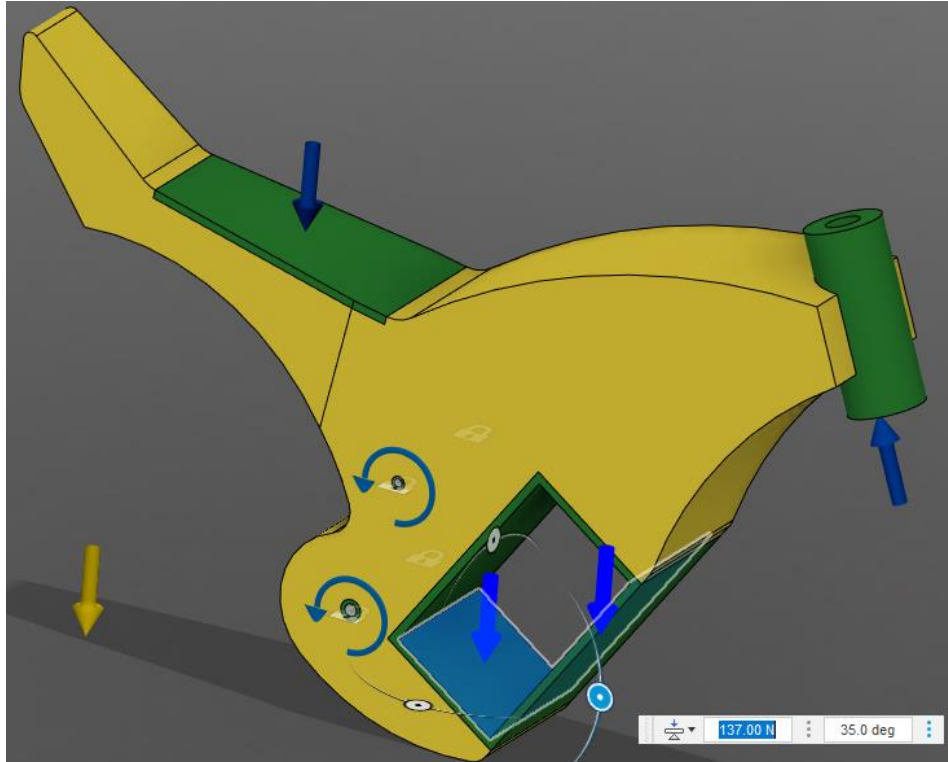
$$Wr_{\Sigma uv} = 783.7 \text{ [N]} + 69 \text{ [N]} + 197 \text{ [N]} = 1049.7 \text{ [N]} \text{ (Δύναμη πισινού τροχού).}$$



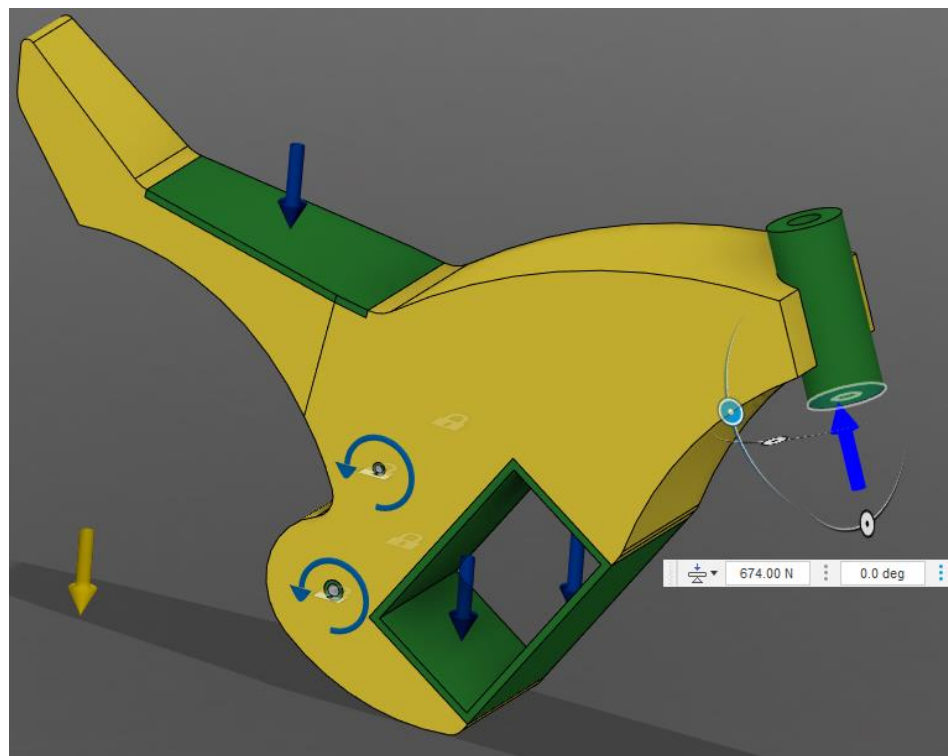
Με αυτές τις δυνάμεις θα γίνει η ανάλυση γενετικού σχεδιασμού.



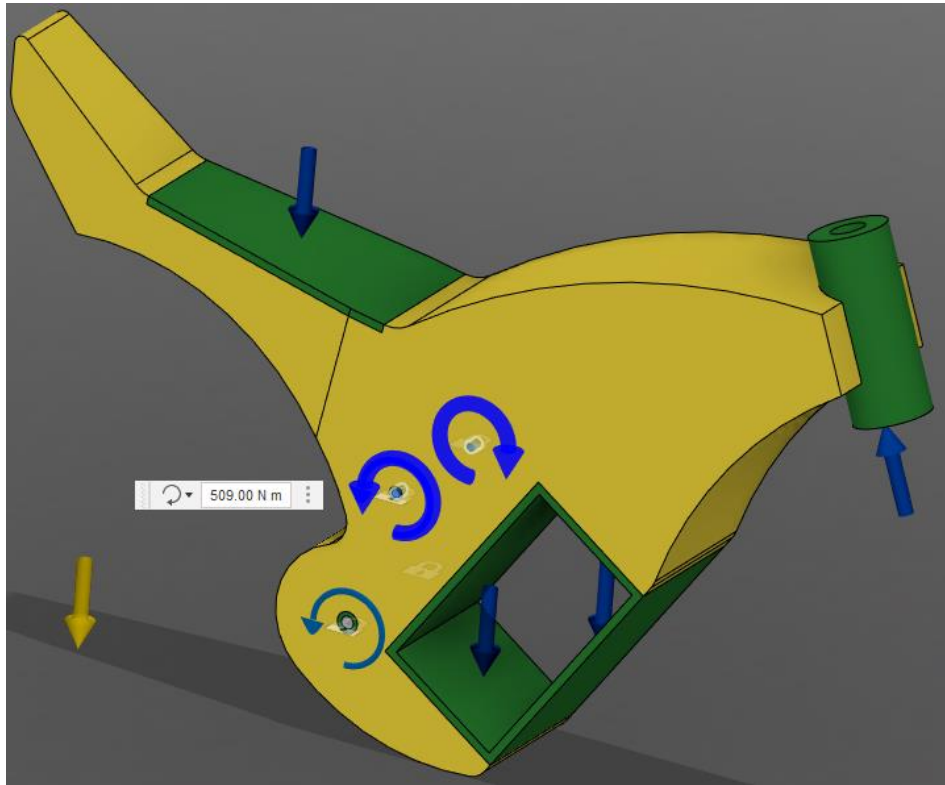
Εικόνα 5.60: Δύναμη καθίσματος 1177 [N].



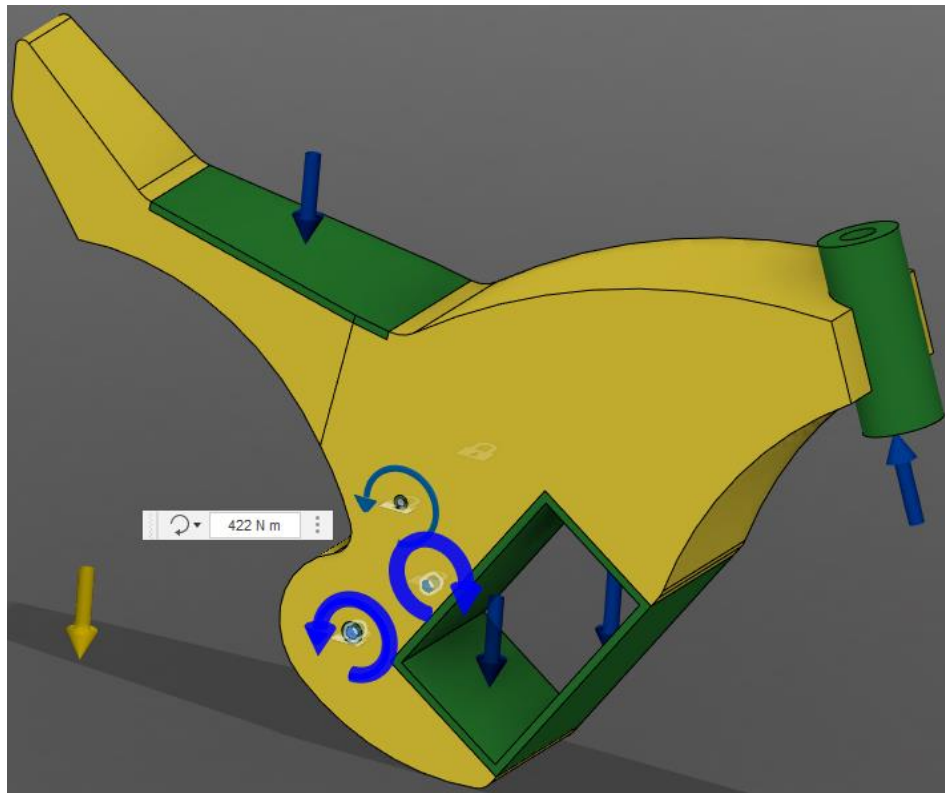
Εικόνα 5.61: Δύναμη μπαταρίας 137 [N].



Εικόνα 5.62: Δύναμη τιμονιού 674 [N].



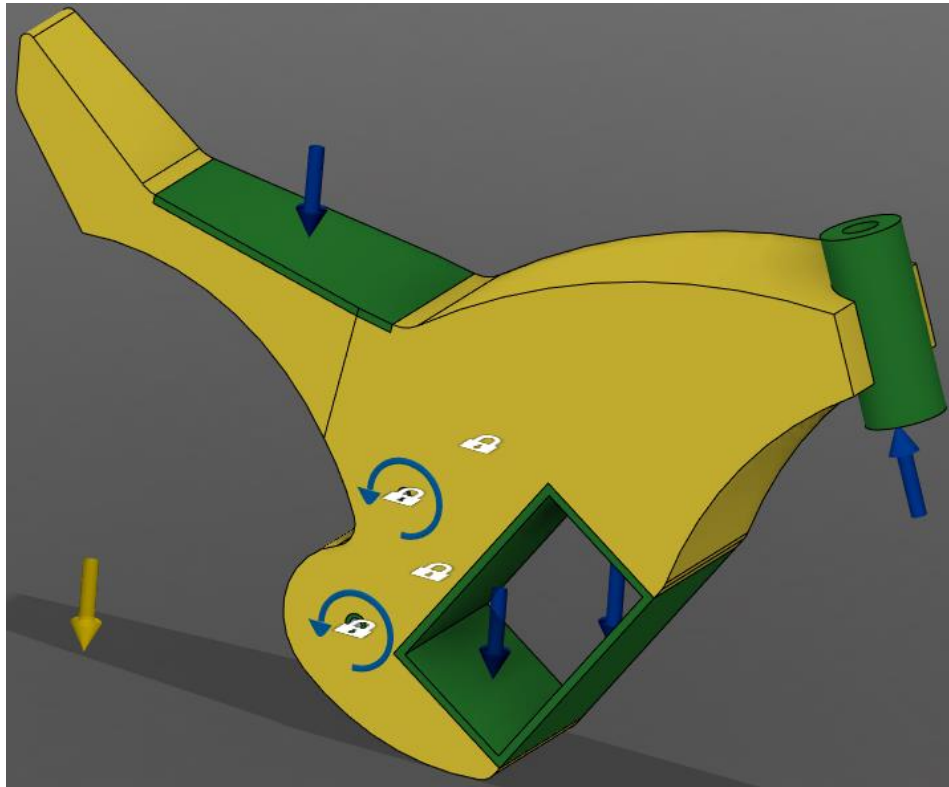
Εικόνα 5.63: Ροπή ανάρτησης 509 [Nm].



Εικόνα 5.64: Ροπή ψαλιδιού 422 [Nm].



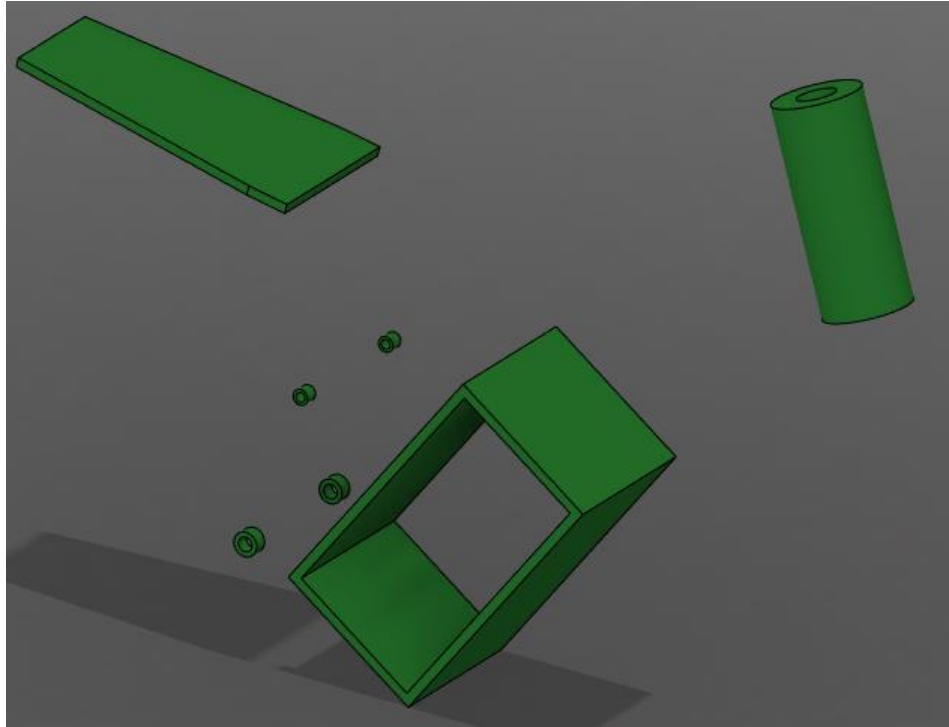
Παρακάτω δηλώνονται οι στηρίξεις (Βλ. Εικόνα 5.65).



Εικόνα 5.65: Πακτώσεις σκελετού.

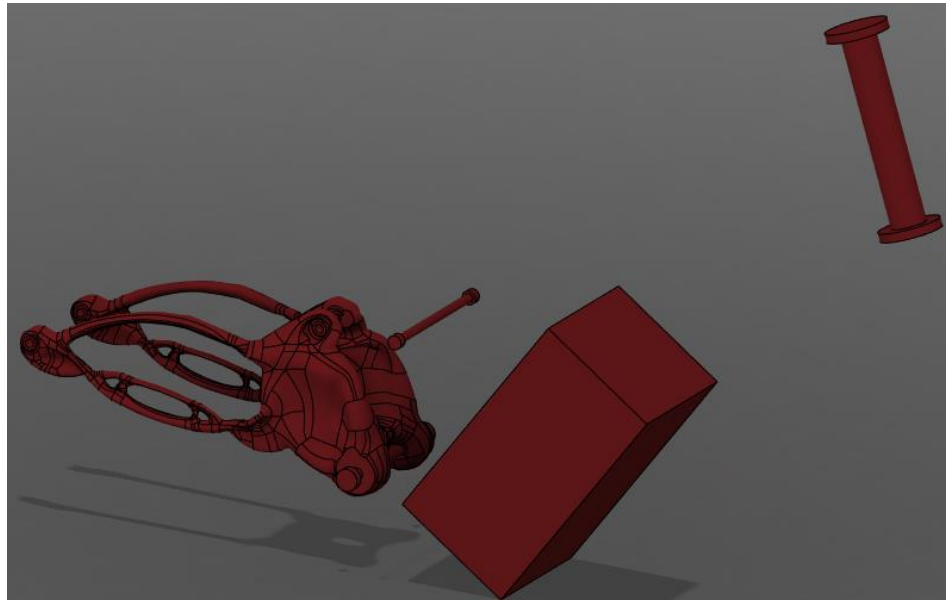
Σε αυτήν την εικόνα απεικονίζονται τα σημεία που είναι πακτωμένος ο σκελετός τα οποία είναι οι οπές του ψαλιδιού και της ανάρτησης.

Οι παρακάτω γεωμετρίες είναι αυτές που θα διατηρηθούν, το κάθισμα, η υποδοχή μπαταρίας, η στήριξη τιμονιού και οι στηρίξεις του ψαλιδιού και της ανάρτησης (Βλ. Εικόνα 5.66).

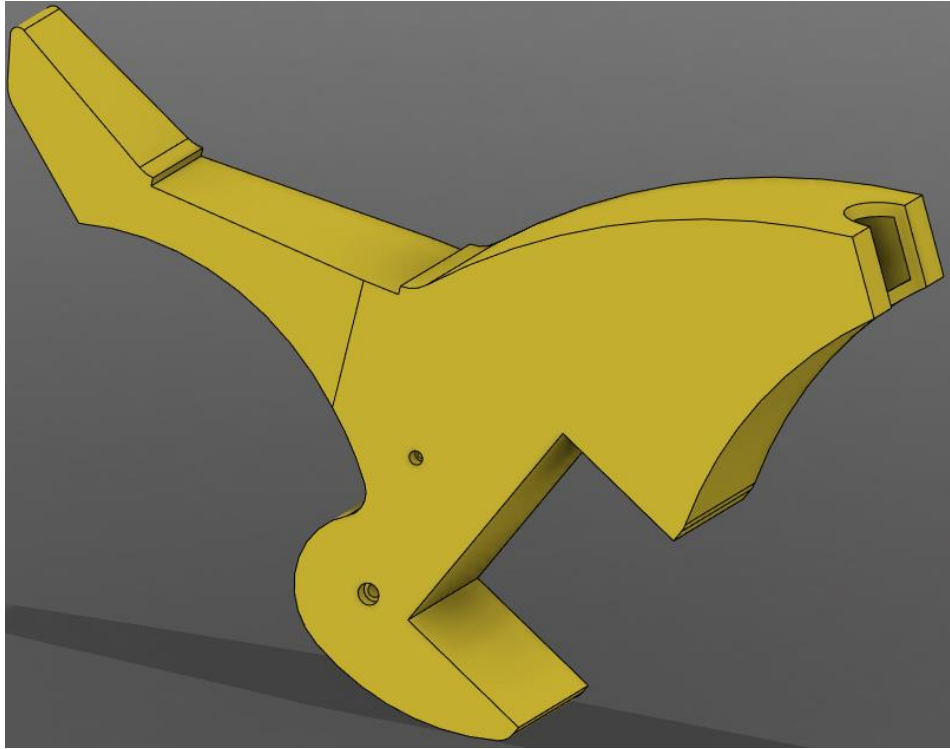


Εικόνα 5.66: Διατηρήσιμες γεωμετρίες.

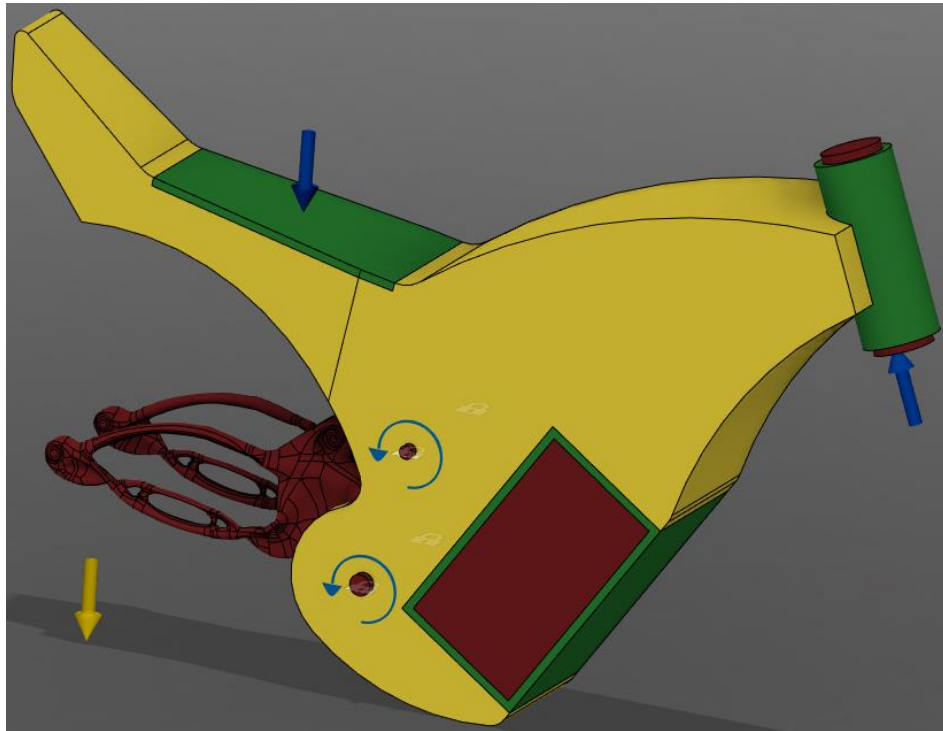
Οι γεωμετρίες- εμπόδια είναι γεωμετρίες οι οποίες περιορίζουν την ανάλυση από το να περάσει μέσα από αυτές ο σκελετός. Αυτές είναι το ψαλίδι, η μπαταρία, ο πείρος του τιμονιού, ο πείρος της ανάρτησης και ο πείρος του ψαλιδιού (Βλ. Εικόνα 5.67).



Εικόνα 5.67: Γεωμετρίες-εμπόδια (obstacle geometries).



Εικόνα 5.68: Αρχική γεωμετρία.



Εικόνα 5.69: Συνολική γεωμετρία μοντέλου.

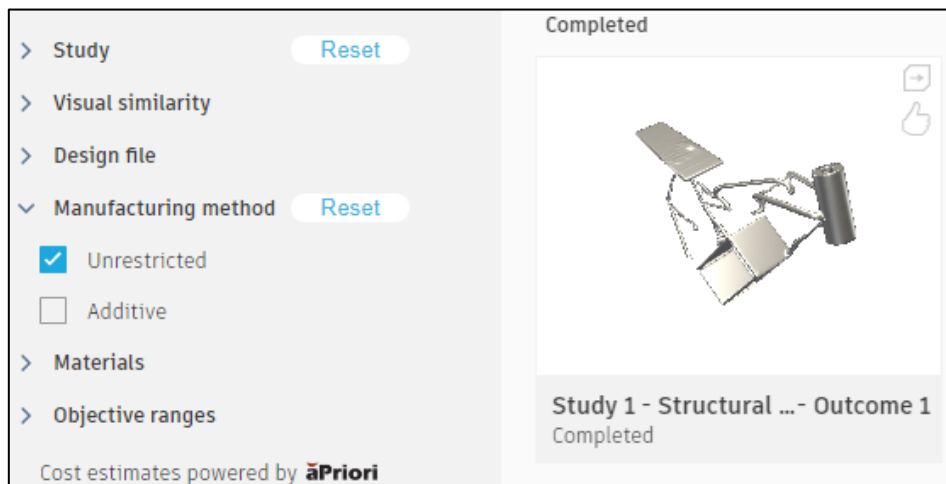
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν είναι ικανοποιητικά καθώς τα outcome 2 και outcome 7 δεν πληρούν τις προϋποθέσεις μείωσης βάρους (Βλ. Εικόνα 5.70). Τα υπόλοιπα (outcome 3,4,5,6) έχουν ελάχιστα σημεία σύνδεσης των βασικών γεωμετριών της κατασκευής (τιμόνι, κάθισμα, θέση μπαταρίας) με αποτέλεσμα οι τάσεις να είναι αυξημένες συγκριτικά με τα υπόλοιπα. Για την επιλογή του τελικού αποτελέσματος έγινε μία προεπισκόπηση σε όλα. Τα τελικά αποτελέσματα δεν είναι η καλύτερη επιλογή, καθώς το λογισμικό κάνει επαναλήψεις για να βελτιώνει το τελικό αποτέλεσμα, αυτές οι επαναλήψεις αποθηκεύονται στο ιστορικό της ανάλυσης και μπορούν να επιλεγθούν μεμονωμένα.



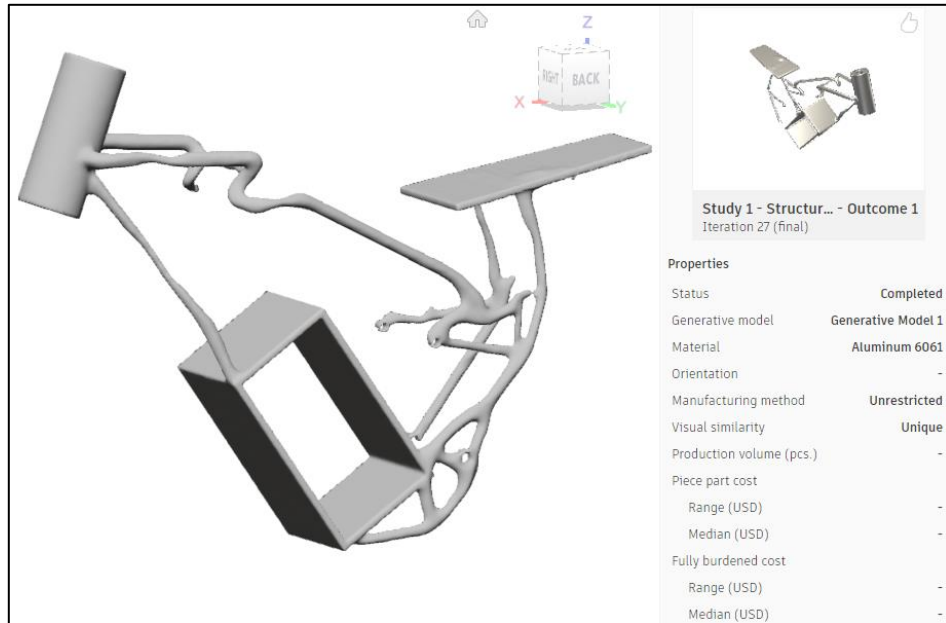
Εικόνα 5.70: Αποτελέσματα ανάλυσης generative design με την μέθοδο προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing).



Έτσι από όλα τα παραπάνω προέκυψε σαν βέλτιστη επιλογή το outcome 1 το οποίο βάσει λογισμικού έχει απροσδιόριστη μέθοδο κατασκευής (Βλ. Εικόνα 5.71).

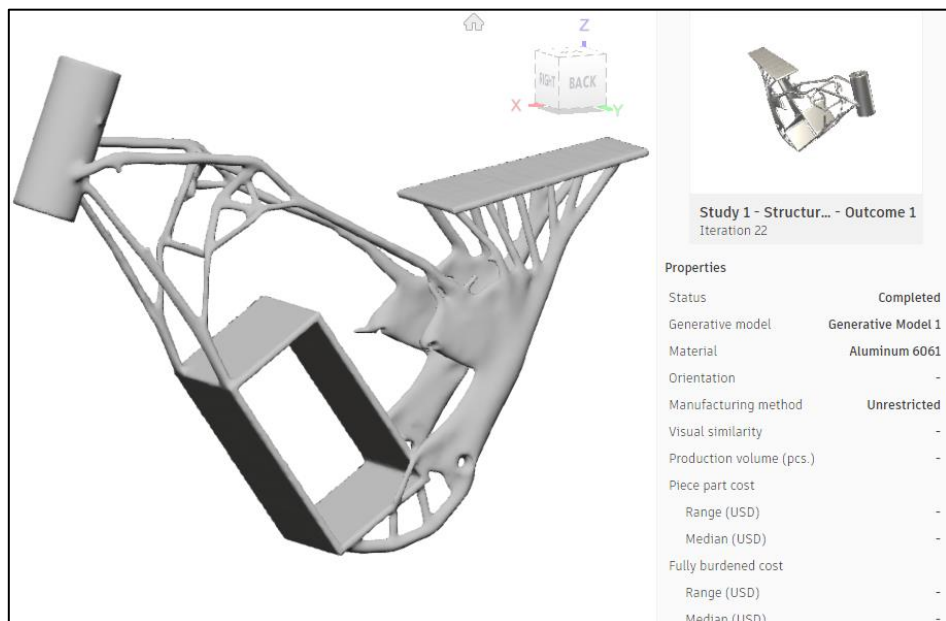


Εικόνα 5.71: Αποτέλεσμα ανάλυσης generative design με απροσδιόριστη (unrestricted) μέθοδο.



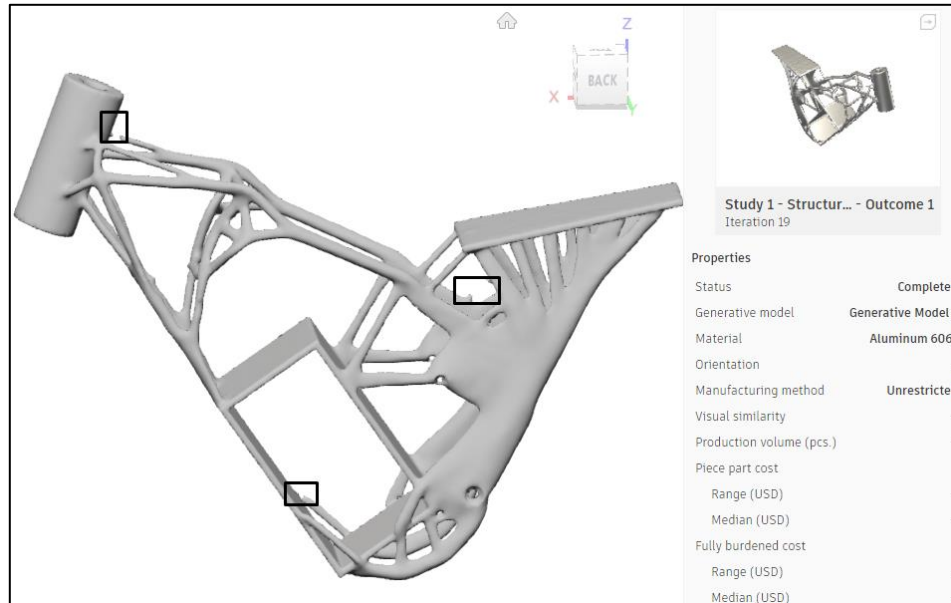
Εικόνα 5.72: Τελική μορφή πρώτου αποτελέσματος μετά από 27 επαναλήψεις.

Παρατηρείται ότι όσο πιο λίγες επαναλήψεις τόσο καλύτερη σύνδεση υπάρχει μεταξύ των βασικών γεωμετριών (Βλ. Εικόνα 5.73).



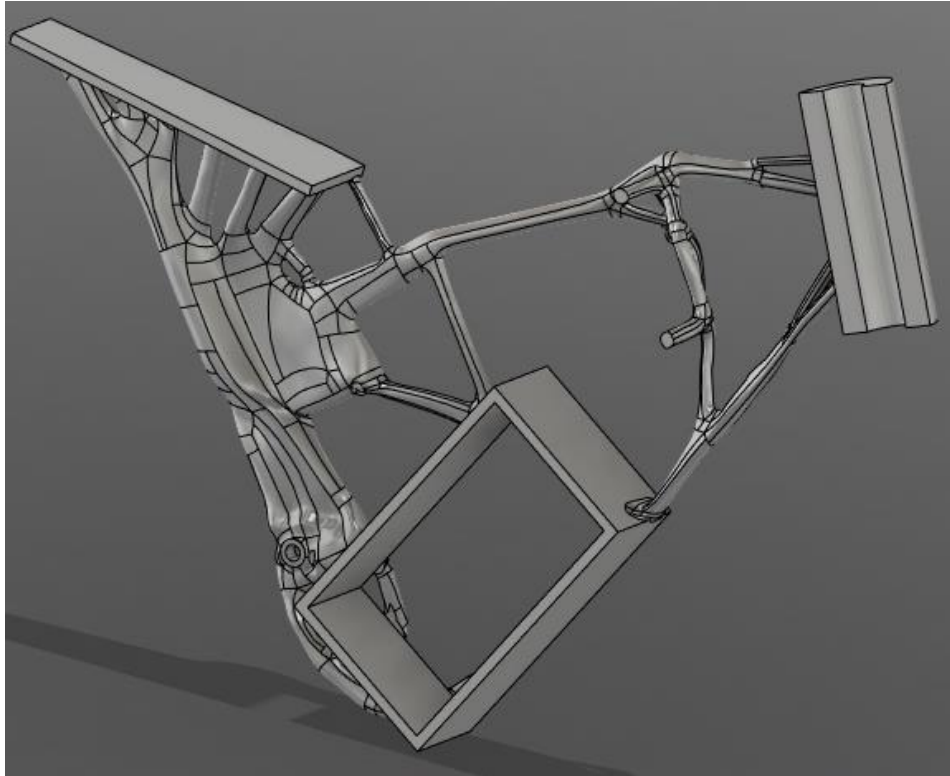
Εικόνα 5.73: Μορφή πρώτου αποτελέσματος μετά από 22 επαναλήψεις.

Σε αυτό το σημείο της ανάλυσης η κατασκευή είναι σε πολύ καλό σημείο καθώς οι μορφές με λιγότερες επαναλήψεις έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλες αυξήσεις στην μάζα οπότε δεν είναι βέλτιστες (Βλ. Εικόνα 5.74).

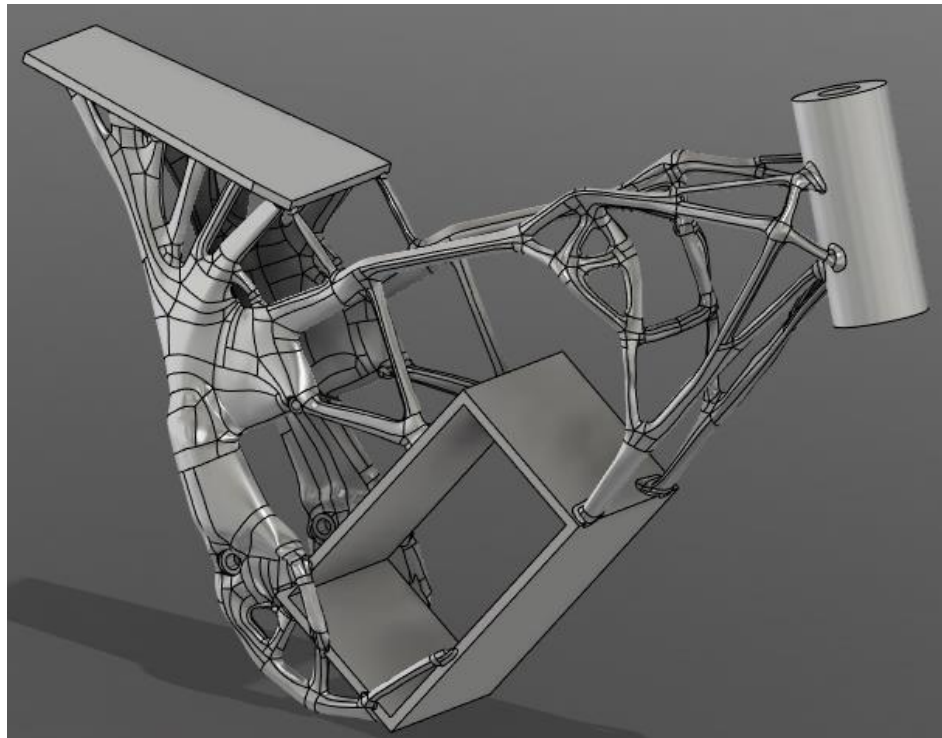


Εικόνα 5.74: Μορφή πρώτου αποτελέσματος μετά από 19 επαναλήψεις.

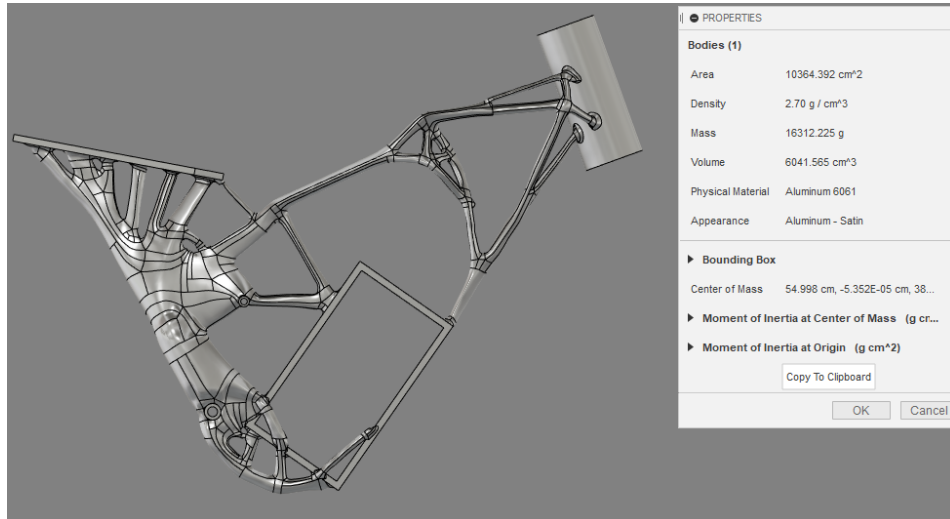
Στα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρήθηκε επίσης η ασυμμετρία ως προς το δεξιό και αριστερό τμήμα της κατασκευής όπου φαίνονται παραπάνω (Βλ. Εικόνα 5.74) μαρκαρισμένες κάποιες από της διαφορές τους. Αυτό συνέβη γιατί προς το παρόν το fusion δεν προσφέρει την δυνατότητα τα αποτελέσματα να έχουν συμμετρία ως προς κάποιον άξονα για αυτόν τον λόγο προηγήθηκε μια επεξεργασία στο τελικό αποτέλεσμα και έπειτα ο κατοπτρισμός του (mirroring) ώστε να είναι απόλυτα συμμετρική η κατασκευή.



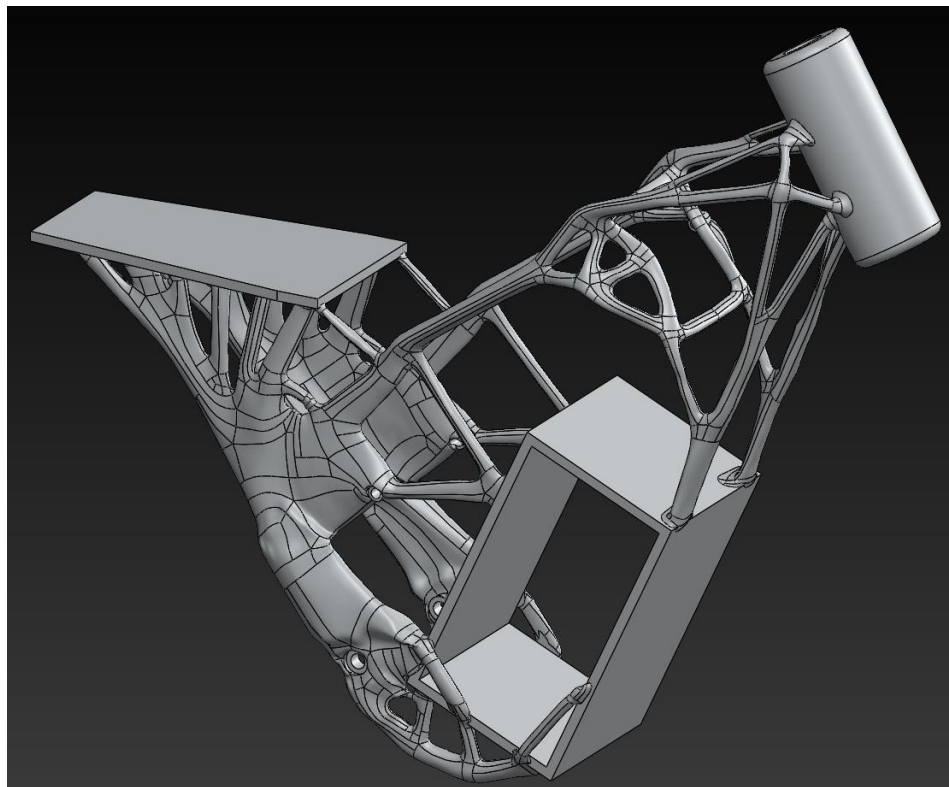
Εικόνα 5.75: Σκελετός πριν τον κατοπτρισμό.



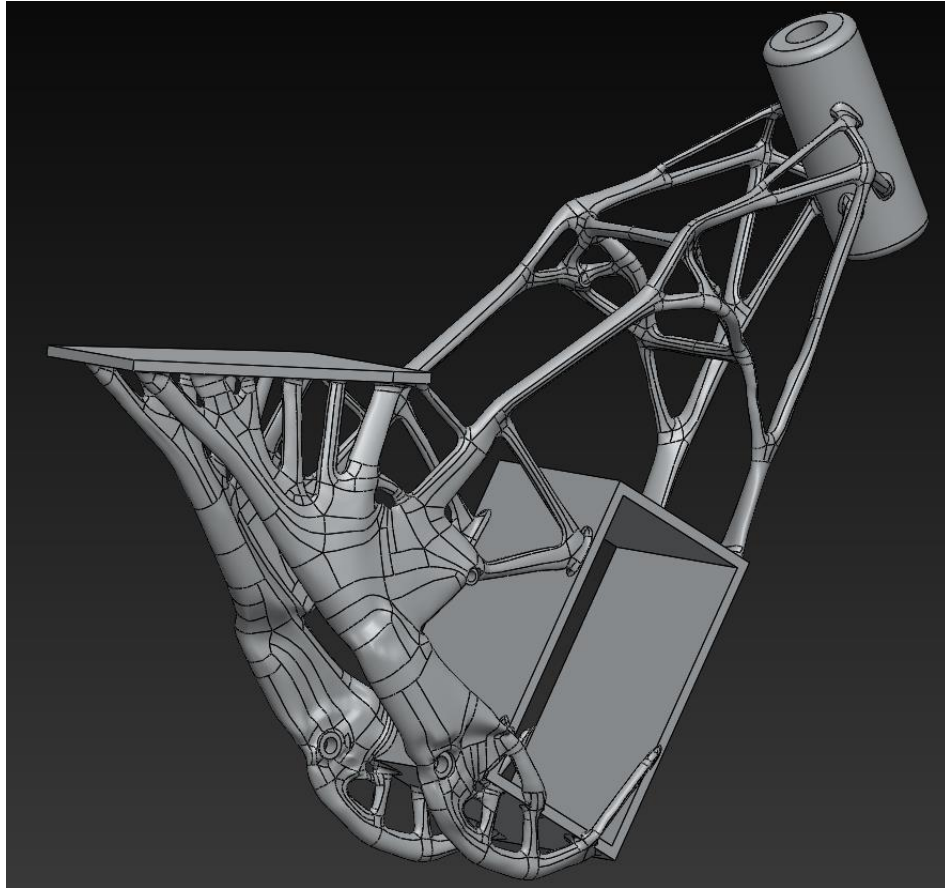
Εικόνα 5.76: Σκελετός μετά τον κατοπτρισμό.



Εικόνα 5.77: Αποτέλεσμα Γενετικού σχεδιασμού με μάζα 16.3 [Kg].



Εικόνα 5.78: Γενετικός σχεδιασμός.



Εικόνα 5.79: Γενετικός σχεδιασμός.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.78 το αποτέλεσμα του γενετικού σχεδιασμού μιμείται τη φύση ικανοποιητικά και ζυγίζει 16.3 [Kg].

Στο παραπάνω αποτέλεσμα για να επιβεβαιωθεί η αντοχή του έγινε στατική ανάλυση. Ο υπολογισμός για τις δυνάμεις έχει ήδη ολοκληρωθεί οπότε τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι:

Δύναμη λόγω αναβάτη: 1177 [N]

Δύναμη λόγω μπαταρίας: 137 [N]

Και η δύναμη λόγω βαρύτητας είναι η μόνη που αλλάζει γιατί πλέον το βάρος του σκελετού ζυγίζει 16.3 [Kg] οπότε και η δύναμη είναι: $16.3 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 159.9 \text{ [N]}$.

Με αυτές τις δυνάμεις υπολογίζονται οι αντιδράσεις στους τροχούς.

Για την δύναμη λόγω αναβάτη έχουν υπολογιστεί οι αντιδράσεις στην ανάλυση για την τοπολογική βελτιστοποίηση:

$$W_f = (W * c) / L \Rightarrow (1177 \text{ [N]} * 396 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 393 \text{ [N]}$$

$$W_r = (W * d) / L \Rightarrow (1177 \text{ [N]} * 789 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 783.7 \text{ [N]}$$



Για την δύναμη λόγω μπαταρίας έχουν υπολογιστεί οι αντιδράσεις στην ανάλυση για την τοπολογική βελτιστοποίηση:

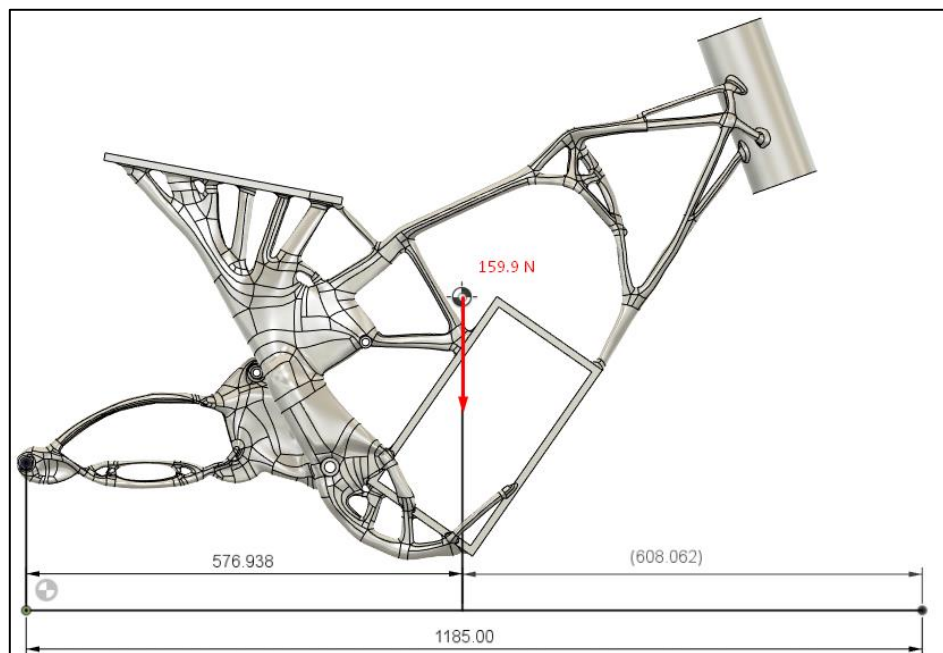
$$W_f = (W \cdot c) / L \Rightarrow (137 \text{ [N]} \cdot 588 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 68 \text{ [N]}$$

$$W_r = (W \cdot d) / L \Rightarrow (137 \text{ [N]} \cdot 597 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 69 \text{ [N]}$$

Το μόνο που διαφέρει είναι η δύναμη λόγω βαρύτητας όπου υπολογίζονται οι αντιδράσεις (Βλ. Εικόνα 5.80):

$$W_f = (W \cdot c) / L \Rightarrow (159.9 \text{ [N]} \cdot 608 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 82 \text{ [N]}$$

$$W_r = (W \cdot d) / L \Rightarrow (159.9 \text{ [N]} \cdot 577 \text{ [mm]}) / 1185 \text{ [mm]} = 78 \text{ [N]}$$



Εικόνα 5.80: Αποστάσεις τροχών από την δύναμη λόγω βαρύτητας.

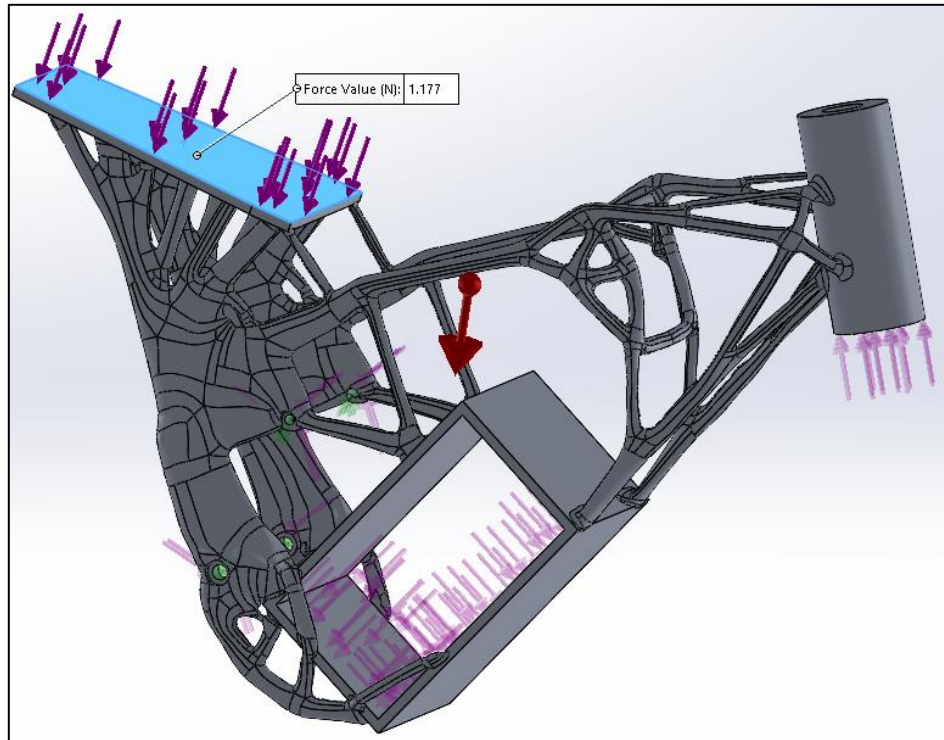
Άρα από τα παραπάνω προκύπτουν οι συνολικές:

$$W_{f_{\Sigma uv}} = 393 \text{ [N]} + 68 \text{ [N]} + 82 \text{ [N]} = 543 \text{ [N]}$$

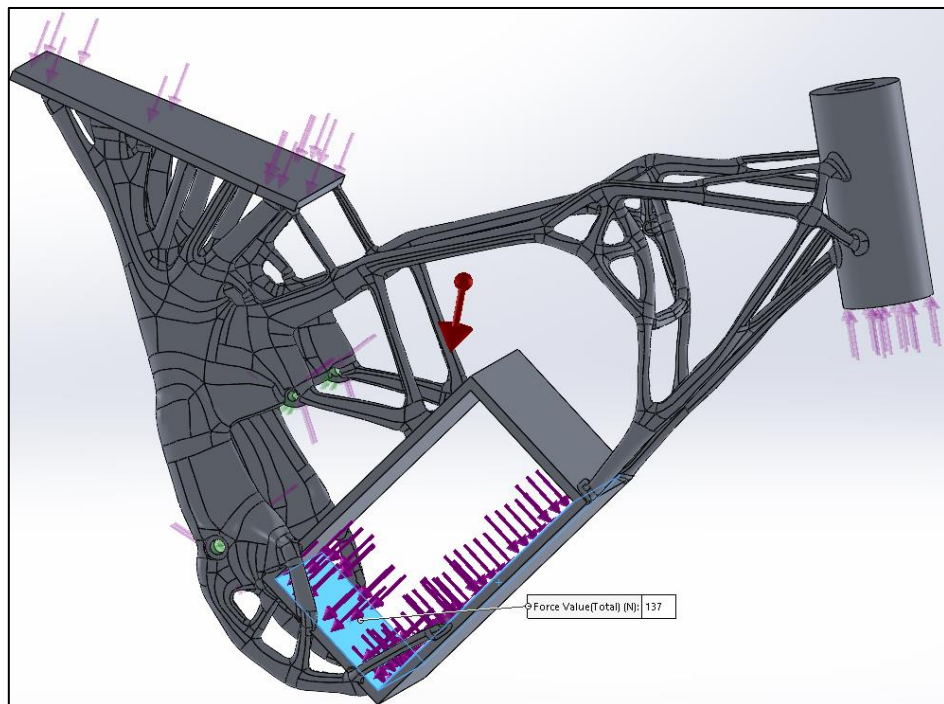
$$W_{r_{\Sigma uv}} = 783.7 \text{ [N]} + 69 \text{ [N]} + 78 \text{ [N]} = 930.7 \text{ [N]}$$

Στην συνέχεια ορίζονται αυτές οι δυνάμεις και οι στηρίξεις για να ακολουθήσει η στατική ανάλυση

Στο κάθισμα ορίστηκε μια δύναμη 1177 [N] όπως υπολογίστηκε (Βλ. Εικόνα 5.81).

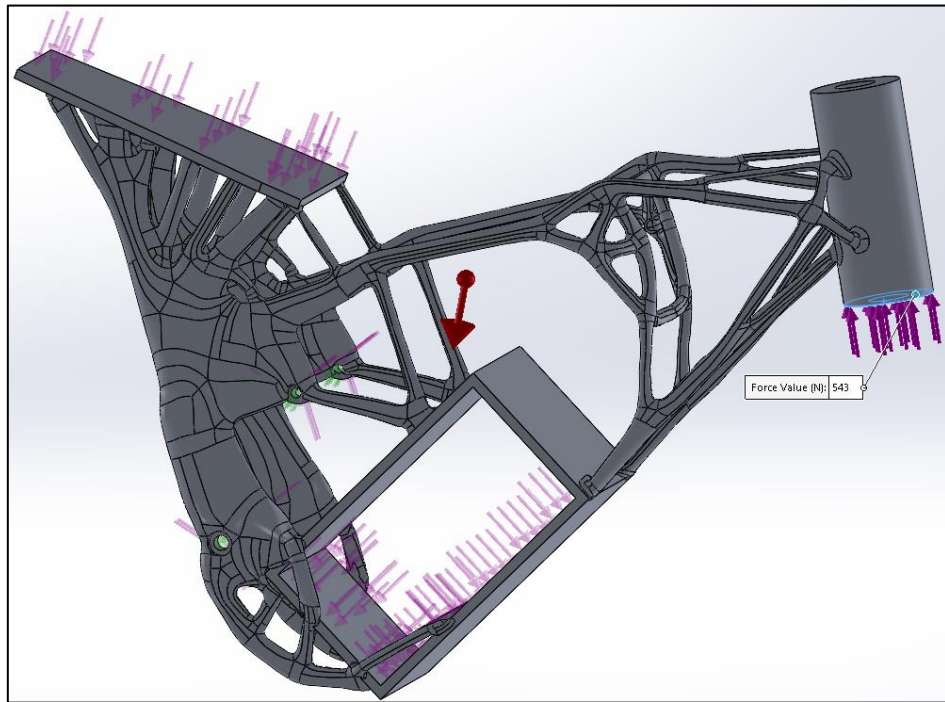


Εικόνα 5.81: Δύναμη καθίσματος 1177 [N].



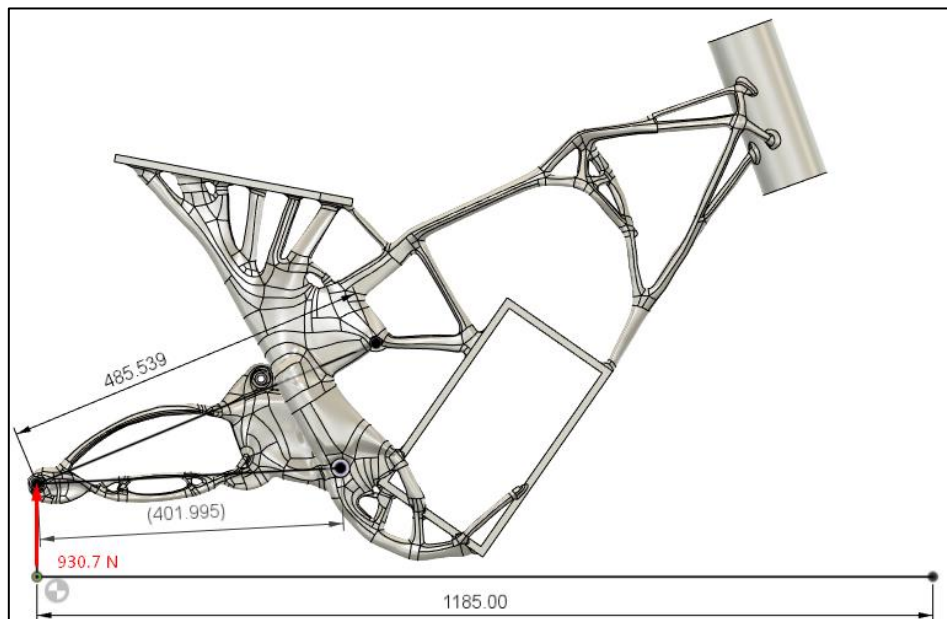
Εικόνα 5.82: Δύναμη μπαταρίας 137 [N].

Η παρακάτω δύναμη 543 [N] είναι η δύναμη $Wf_{\Sigma UV}$ η οποία έχει μεταφερθεί από τον εμπρόσθιο τροχό στον σκελετό (Βλ. Εικόνα 5.83).



Εικόνα 5.83: Δύναμη εμπρόσθιου τροχού 543 [N].

Η δύναμη του πίσω τροχού μέσω του ψαλιδιού μετατρέπεται σε δύο ροπές στα σημεία επαφής με τον σκελετό, οι ροπές αυτές είναι (Βλ. Εικόνα 5.84):

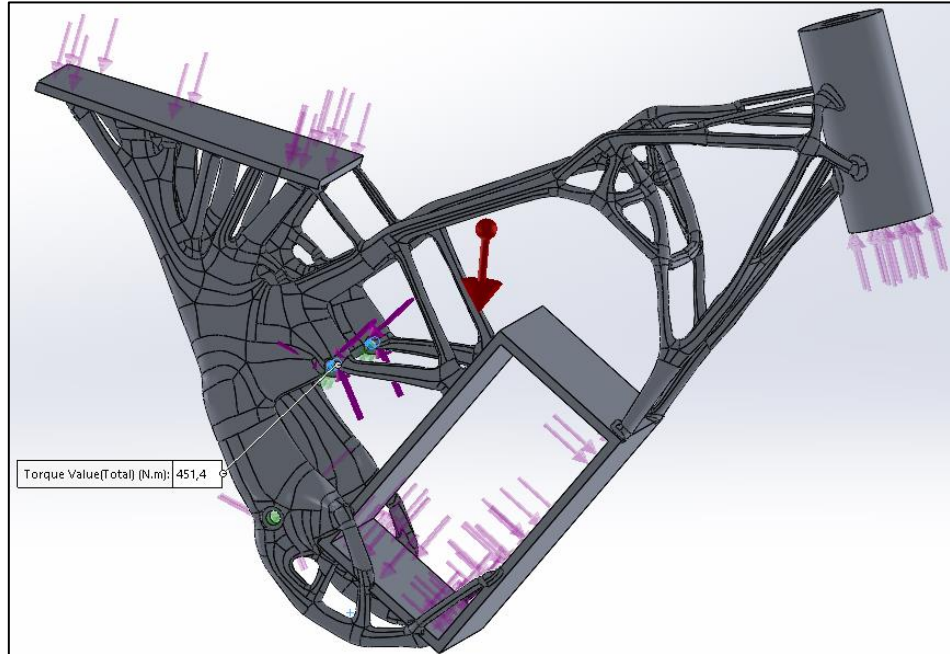


Εικόνα 5.84: Δύναμη πίσω τροχού $Wf_{\Sigma UV}$ και οι αποστάσεις των δύο σημείων επαφής.

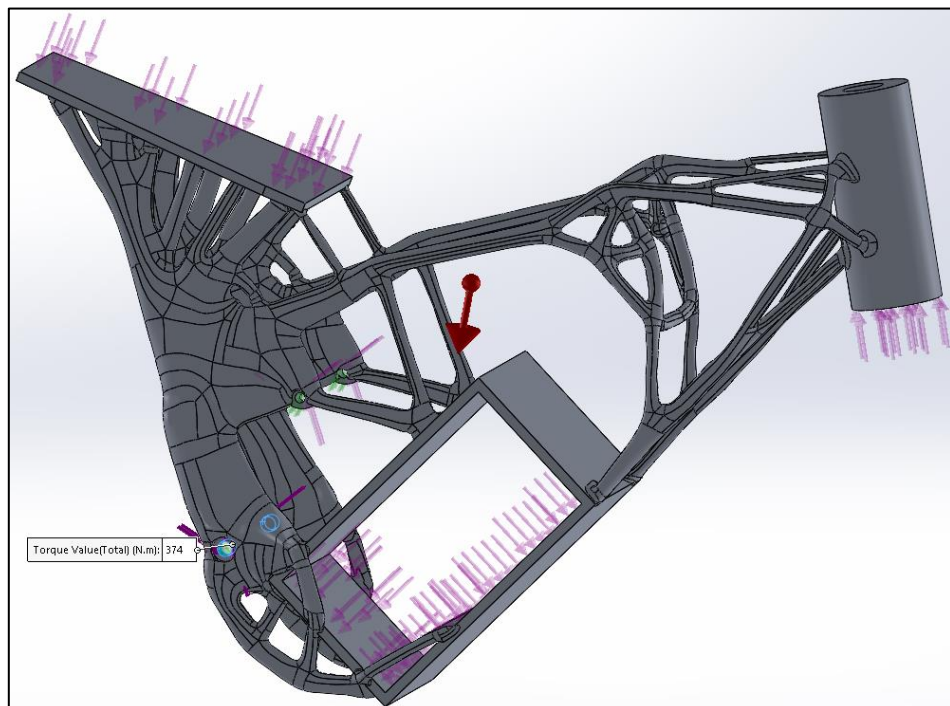
Με την δύναμη του πίσω τροχού προκύπτουν οι παρακάτω ροπές:

Ροπή ανάρτησης: $930.7 \text{ [N]} * 0.485 \text{ [m]} = 451.4 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.85).

Ροπή ψαλιδιού: $930.7 \text{ [N]} * 0.402 \text{ [m]} = 374 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.86).

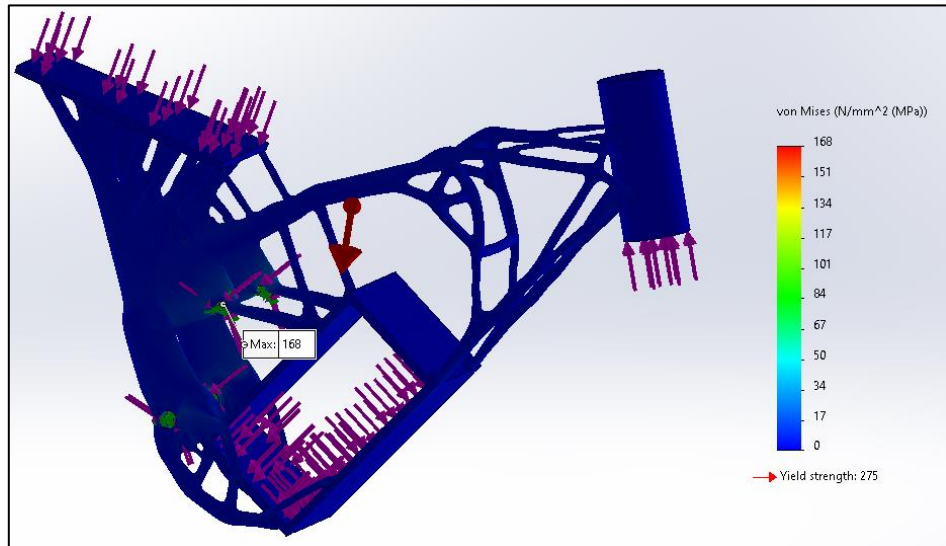


Εικόνα 5.85: Ροπή ανάρτησης 451.4 [Nm].



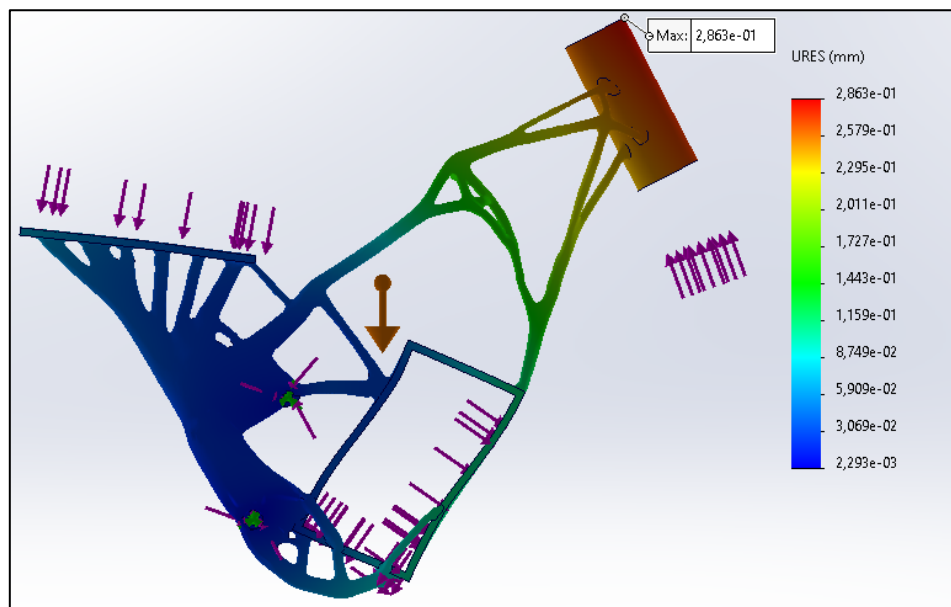
Εικόνα 5.86: Ροπή ψαλιδιού 374 [Nm].

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης δείχνει ότι η κατασκευή αντέχει με συντελεστή ασφαλείας 1.55, καθώς η μέγιστη τάση είναι 168 [MPa] έναντι των 275 [MPa] όπου είναι το σημείο διαρροής του υλικού (Βλ. Εικόνα 5.87).



Εικόνα 5.87: Τελική ανάλυση αντοχής.

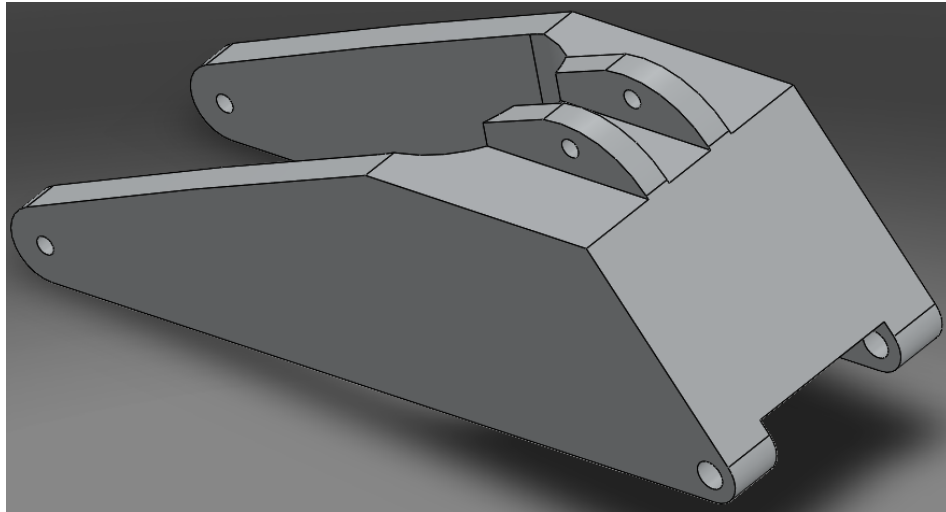
Παρακάτω απεικονίζεται η μέγιστη παραμόρφωση που υφίσταται ο σκελετός η οποία είναι 0.28[mm] (Βλ. Εικόνα 5.88).



Εικόνα 5.88: Ανάλυση παραμόρφωσης.

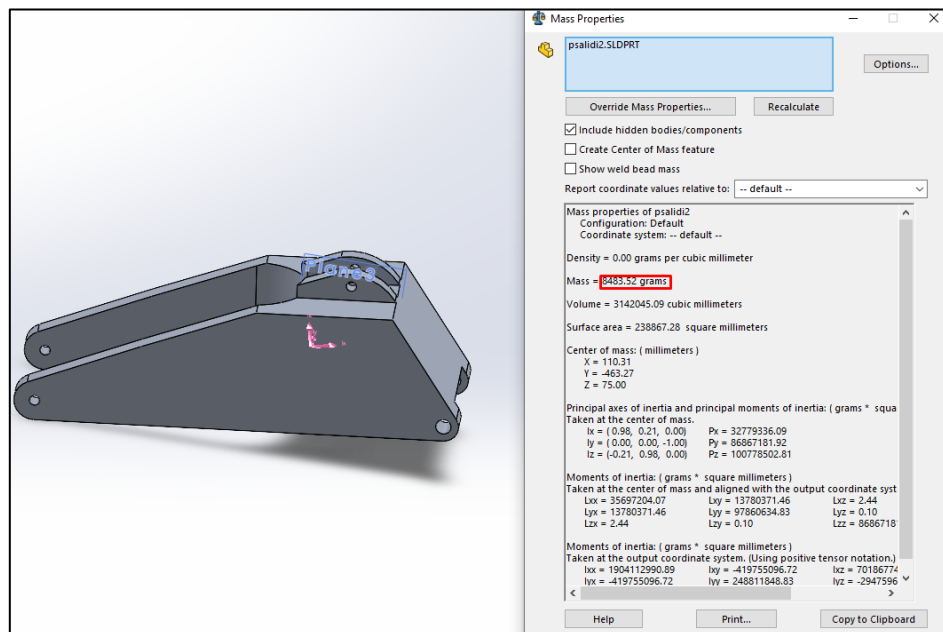


Αφού τελείωσε η ανάλυση του γενετικού σχεδιασμού του σκελετού σειρά έχει το ψαλίδι το οποίο φαίνεται παρακάτω όπου το αρχικό σχήμα είναι το ίδιο με αυτό της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Βλ. Εικόνα 5.89).



Εικόνα 5.89: Αρχικό σχέδιο ψαλιδιού.

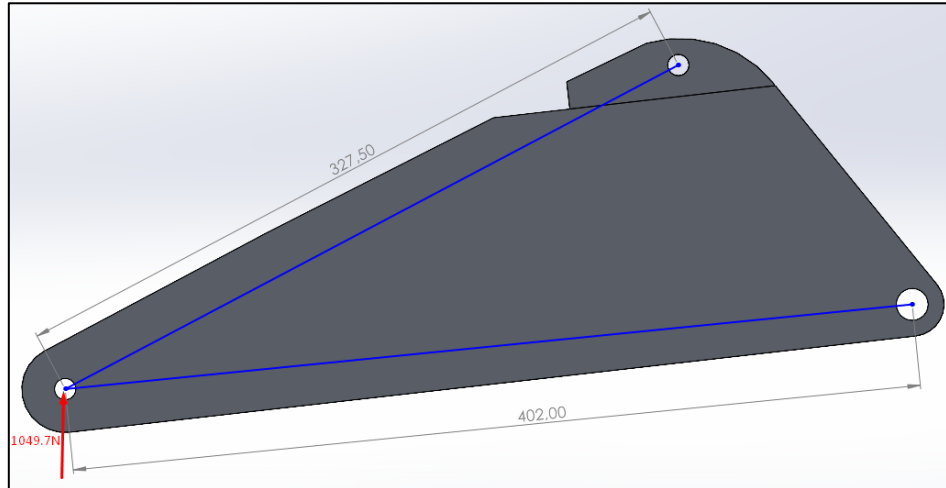
Καθώς ορίστηκε το ίδιο υλικό κατασκευής όπως και στον σκελετό (Aluminium 6061-T6) η μάζα του ψαλιδιού προκύπτει 8.5 [Kg] όπως φαίνεται παρακάτω (Βλ. Εικόνα 5.90).



Εικόνα 5.90: Μάζα αρχικού ψαλιδιού.



Στη συνέχεια αναφέρονται οι δυνάμεις που θα ασκούνται σε αυτό, οι οποίες έχουν υπολογιστεί παραπάνω για τον σκελετό οπότε εδώ λαμβάνονται υπόψιν οι δυνάμεις και οι αντιδράσεις πριν την ανάλυση γενετικού σχεδιασμού.

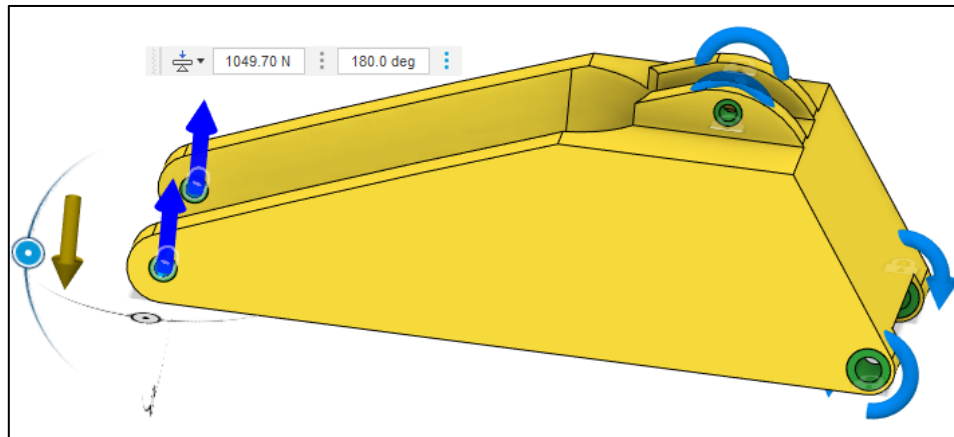


Εικόνα 5.91: Αποστάσεις τροχού από τα σημεία επαφής σκελετού και ανάρτησης.

Δύναμη λόγω βαρύτητας: $8.5 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 83.4 \text{ [N]}$

Αντίδραση πίσω τροχού: 1049.7 [N] (Βλ. Εικόνα 5.92)

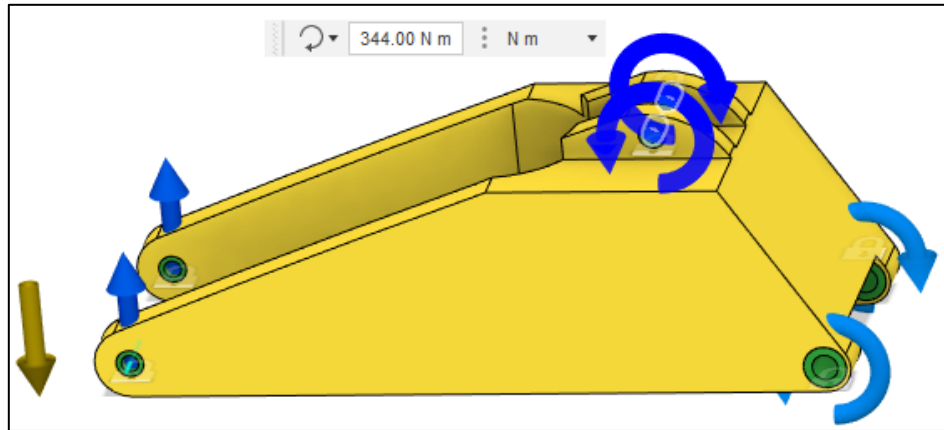
Αυτή η δύναμη προκαλεί δύο ροπές:



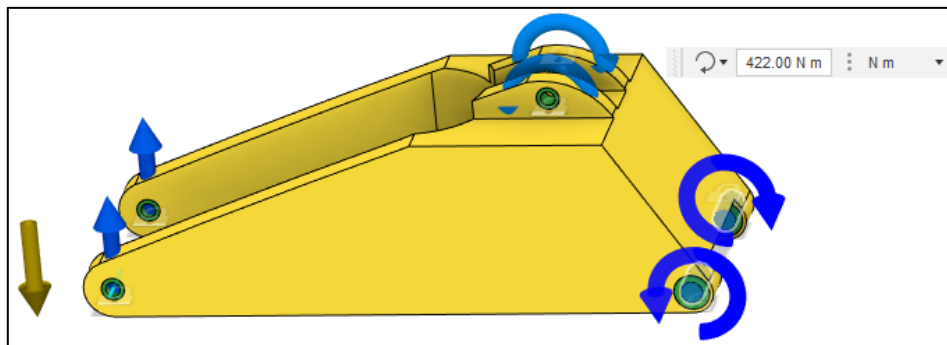
Εικόνα 5.92: Δύναμη πίσω τροχού 1049.7 [N] .

Ροπή ανάρτησης: $1049.7 \text{ [N]} * 0.328 \text{ [m]} = 344 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.93).

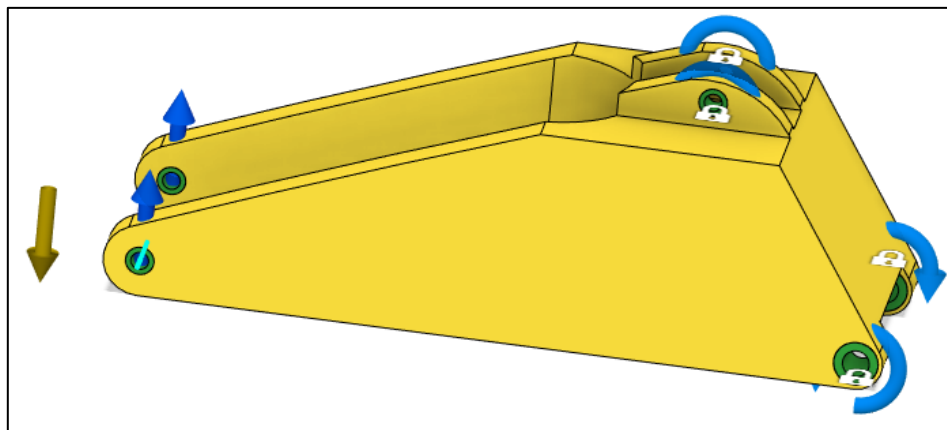
Ροπή φαλιδιού: $1049.7 \text{ [N]} * 0.402 \text{ [m]} = 422 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.94).



Εικόνα 5.93: Ροπή ανάρτησης 344 [Nm].



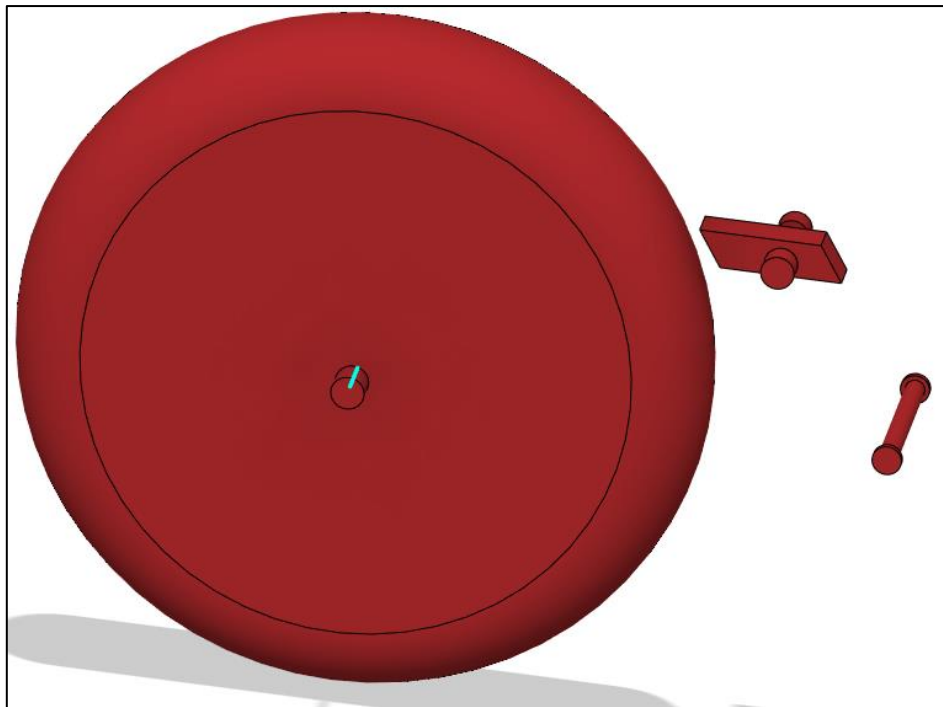
Εικόνα 5.94: Ροπή φαλιδιού 422[Nm].



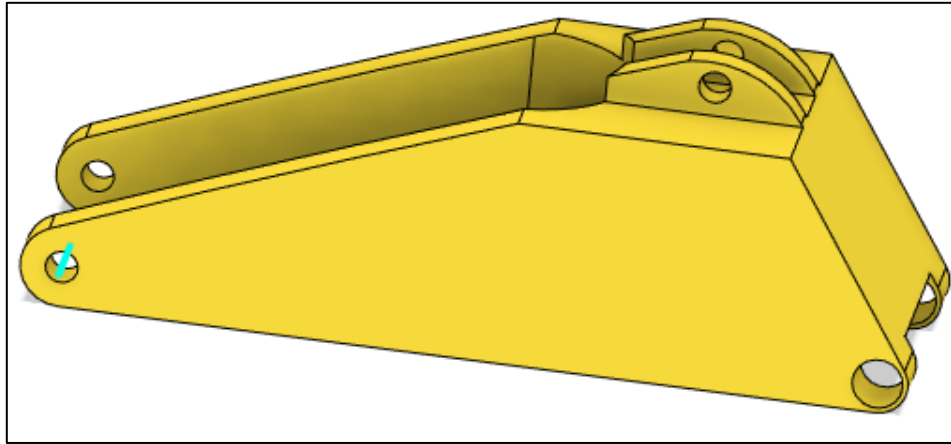
Εικόνα 5.95: Πακτώσεις φαλιδιού.



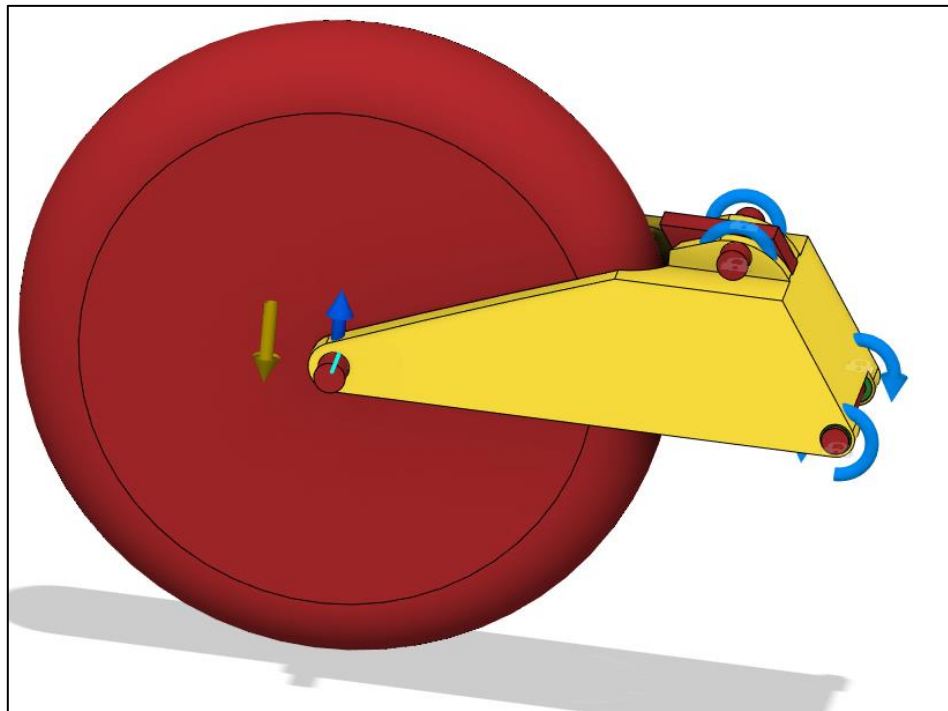
Εικόνα 5.96: Διατηρήσιμες γεωμετρίες ψαλιδιού.



Εικόνα 5.97: Γεωμετρίες-εμπόδια για το ψαλιδί (obstacle geometries).

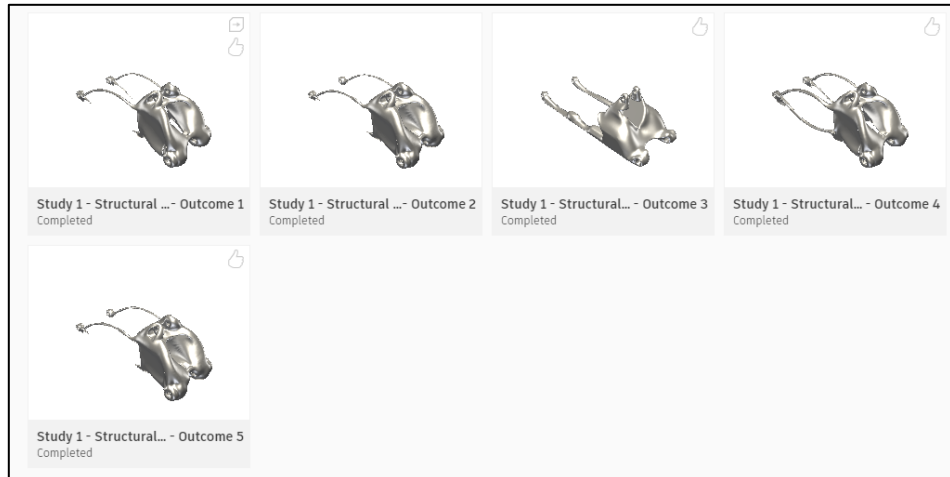


Εικόνα 5.98: Αρχική γεωμετρία ψαλιδιού.



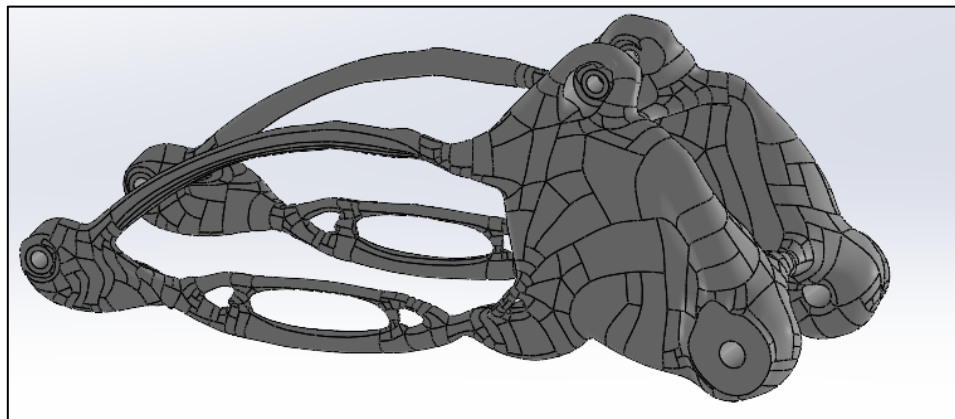
Εικόνα 5.99: Συνολική γεωμετρία μοντέλου.

Μετά την ολοκλήρωση του ορισμού των συνθηκών η ανάλυση ολοκληρώθηκε με τα παρακάτω αποτελέσματα (Βλ. Εικόνα 5.100).

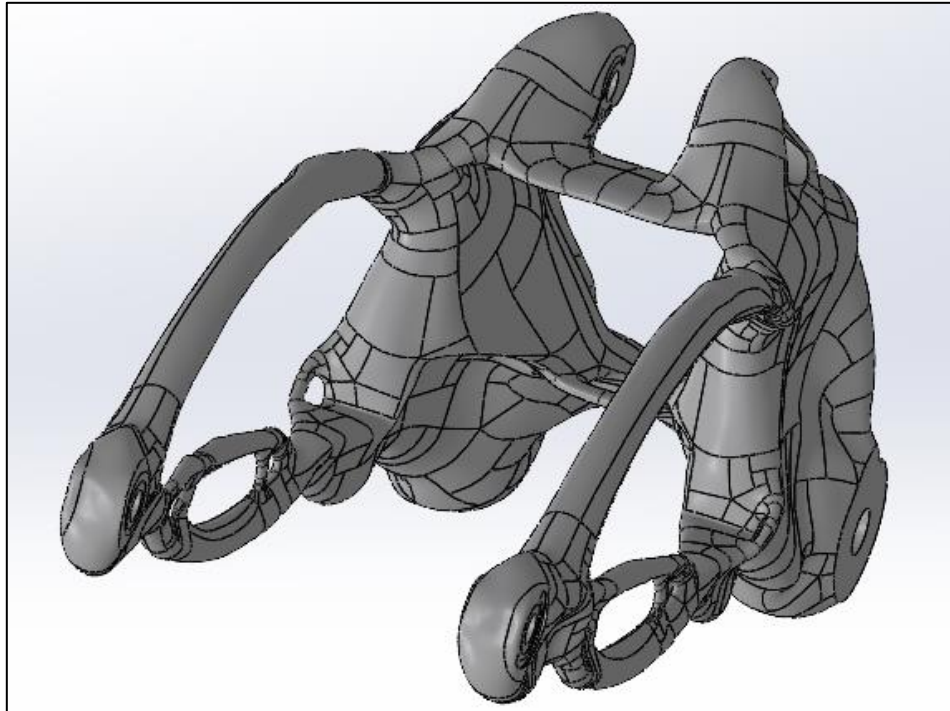


Εικόνα 5.100: Αποτέλεσμα φαλιδιού από γενετικό σχεδιασμό.

Με την ίδια διαδικασία όπως έγινε και στον σκελετό προκύπτει το παρακάτω αποτέλεσμα (Βλ. Εικόνα 5.101).

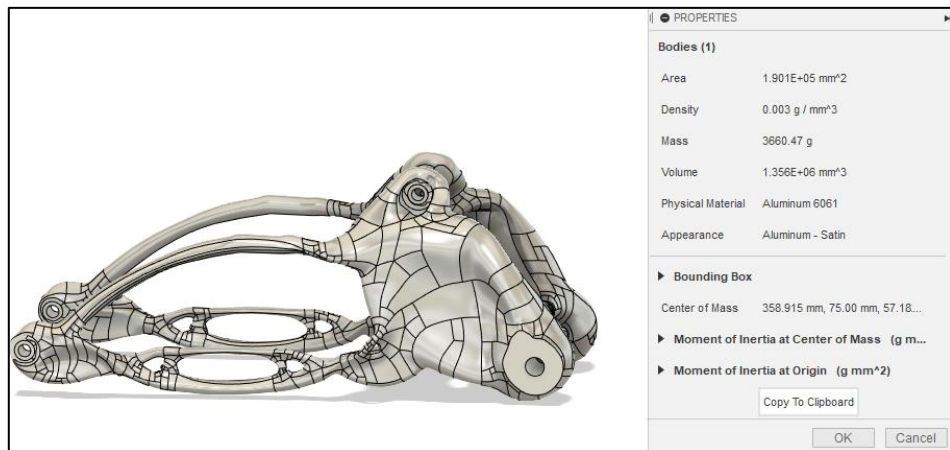


Εικόνα 5.101: Αποτέλεσμα γενετικού σχεδιασμού.



Εικόνα 5.102: Αποτέλεσμα γενετικού σχεδιασμού.

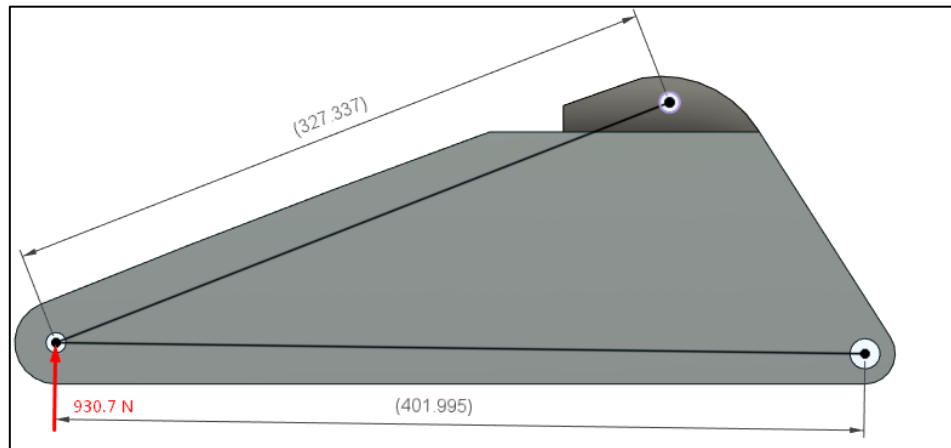
Η μάζα του ψαλιδιού μειώθηκε κατά 57% από 8.5 [Kg] στα 3.6 [Kg] (Βλ. Εικόνα 5.103).



Εικόνα 5.103: Μάζα ψαλιδιού 3.6[Kg].

Για την επιβεβαίωση ότι η κατασκευή αντέχει θα γίνει επιπλέον στατική ανάλυση όπου οι δυνάμεις τώρα θα ληφθούν υπόψιν από την ανάλυση μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση του σκελετού επιπλέον αλλάζει και η δύναμη της βαρύτητας λόγω αλλαγή μάζας.

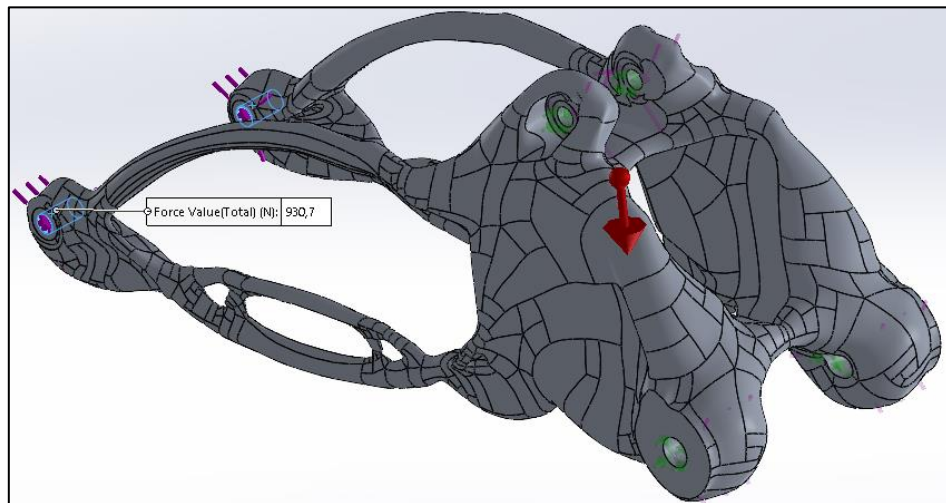
$$\text{Δύναμη λόγω βαρύτητας: } 3.6 \text{ [Kg]} * 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} = 35 \text{ [N]}$$



Εικόνα 5.104: Αποστάσεις τροχού από τα σημεία επαφής σκελετού και ανάρτησης.

Αντίδραση πίσω τροχού: 930.7 [N] (Βλ. Εικόνα 5.105)

Από αυτήν την δύναμη υπολογίζονται οι δυο ροπές που προκαλούνται στα σημεία επαφής με τον σκελετό και την ανάρτηση.

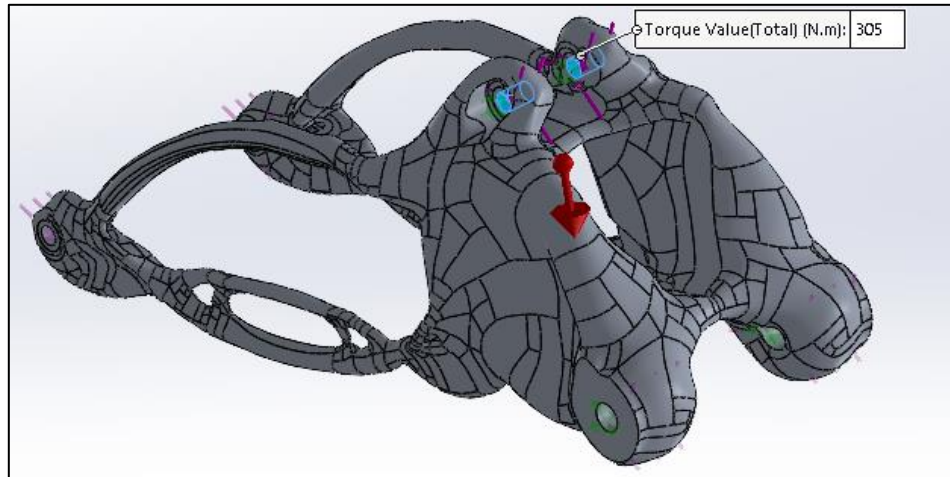


Εικόνα 5.105: Δύναμη πίσω τροχού 930.7 [N].

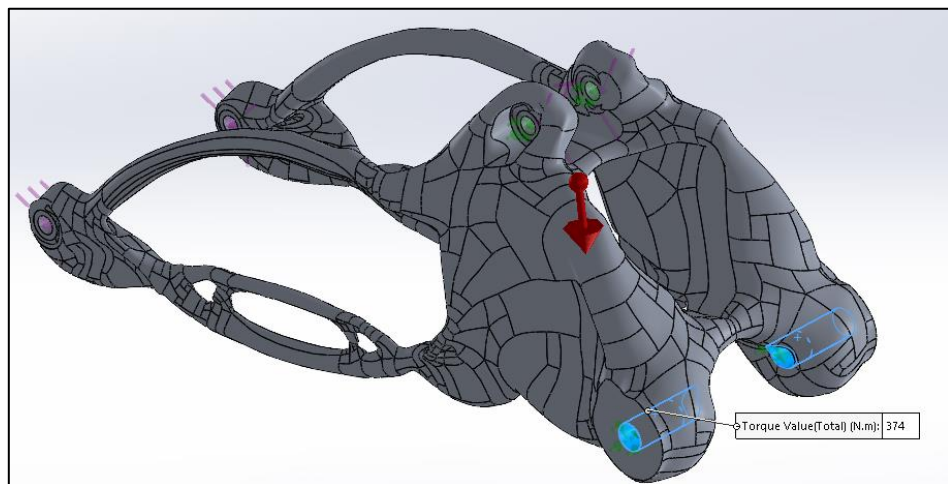
Ροπή ανάρτησης: $930.7 \text{ [N]} * 0.328 \text{ [m]} = 305 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.106).

Ροπή ψαλιδιού: $930.7 \text{ [N]} * 0.402 \text{ [m]} = 374 \text{ [Nm]}$ (Βλ. Εικόνα 5.107).

Αυτές οι δυνάμεις και οι ροπές ορίζονται πάνω στο ψαλίδι.

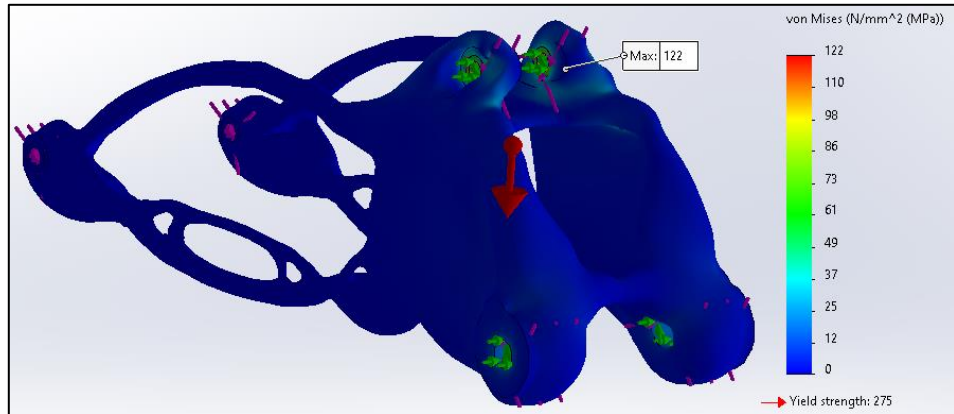


Εικόνα 5.106: Ροπή ανάρτησης 305 [Nm].



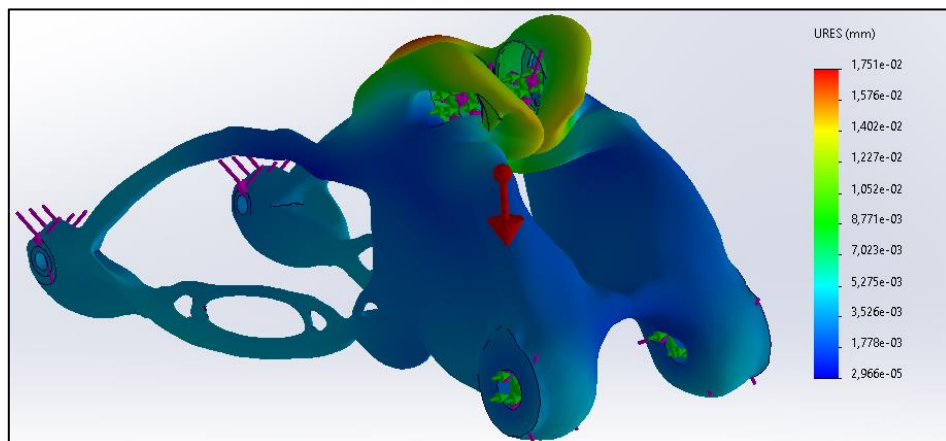
Εικόνα 5.107: Ροπή ψαλιδιού 374 [Nm].

Με τις παραπάνω συνθήκες προκύπτει από την στατική ανάλυση ότι η μέγιστη τάση είναι 122 [MPa] σε σχέση με το όριο διαρροής 275 [MPa] υπολογίζεται συντελεστής ασφαλείας 2.25 (βλ. Εικόνα 5.108).

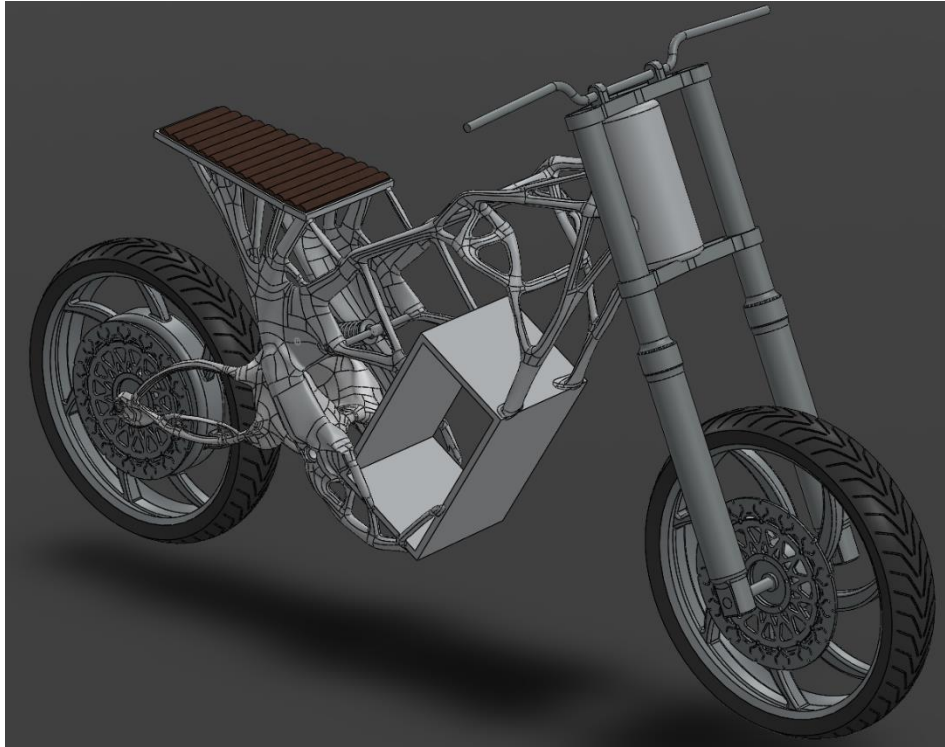


Εικόνα 5.108: Σχήμα τάσης μετά από στατική ανάλυση.

Όπως φαίνεται παρακάτω η μέγιστη παραμόρφωση του ψαλιδιού είναι 0.018 [mm] πράγμα που σημαίνει ότι είναι μηδαμινή η παραμόρφωση του ψαλιδιού (Βλ. Εικόνα 5.109).



Εικόνα 5.109: Ανάλυση παραμόρφωσης.





Εικόνα 5.110: Συναρμολόγηση.





Εικόνα 5.111: Συναρμολόγηση.



Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται οι διαφορές βάρους, τάσεων, παραμόρφωσης, συντελεστή ασφαλείας των δύο διαφορετικών αναλύσεων σκελετού καθώς και πίσω βραχίονα.

Μεταβλητές	Τοπολογική Βελτιστοποίηση 	Γενετικός Σχεδιασμός 
Βάρος πριν την ανάλυση [Kg]	41.8	41.8
Βάρος μετά την ανάλυση [Kg]	18.6	16.3
Μέγιστη τάση [Mpa]	80	168
Συντελεστής ασφαλείας	3.42	1.55
Μέγιστη παραμόρφωση [mm]	0.060	0.28

Μεταβλητές	Τοπολογική Βελτιστοποίηση 	Γενετικός Σχεδιασμός 
Βάρος πριν την ανάλυση [Kg]	8.5	8.5
Βάρος μετά την ανάλυση [Kg]	5.1	3.6
Μέγιστη τάση [Mpa]	113.38	122
Συντελεστής ασφαλείας	2.43	2.25
Μέγιστη παραμόρφωση [mm]	0.018	0.018

6. Κατασκευή

Καθώς ολοκληρώθηκε η μελέτη και ο σχεδιασμός ακολουθεί η κατασκευή η οποία θα γίνει χρησιμοποιώντας την προσθετική κατασκευή (Material extrusion) με την χρήση 3D Printer. Ο εκτυπωτής που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο Ender 5 pro της εταιρίας Creality. Φυσικά για να πραγματοποιηθεί αυτό θα χρειαστεί ένα λογισμικό το οποίο μετατρέπει το τρισδιάστατο αντικείμενο σε στρώσεις (Layers). Ο τύπος του λογισμικού αυτού ονομάζεται Slicer (Λογισμικό τεμαχισμού).

Για λογισμικό τεμαχισμού χρησιμοποιήθηκε το Ultimaker Cura, αυτά τα λογισμικά δίνουν στο χρήστη τη δυνατότητα να ορίσει όλες τις προδιαγραφές της τρισδιάστατης εκτύπωσης.



Οι προδιαγραφές αυτές είναι (Βλ. Εικόνα 6.1):

- Quality: Ποιότητα εκτύπωσης, ύψος στρώσης, πάχος κεφαλής κ.α.
- Walls: Τοιχώματα, πάχος τοιχώματος κ.α.
- Top/Bottom: Αρχή/Τέλος, πάχος πρώτων και τελευταίων στρώσεων κ.α.
- Infill: Γέμισμα, πυκνότητα και τύπος γεμίσματος κ.α.
- Material: Υλικό, θερμοκρασία εκτύπωσης κεφαλής και τραπέζιου κ.α.
- Speed: Ταχύτητα, ταχύτητα εκτύπωσης κ.α.
- Travel: Μετακίνηση, ενεργοποίηση αποφυγής εκτυπωμένου κομματιού κ.α.
- Cooling: Ψύξη, ενεργοποίηση ανεμιστήρα, ταχύτητα ανεμιστήρα κ.α.
- Support: Βοηθήματα, κατασκευή βοηθημάτων, τύπος βοηθημάτων κ.α.
- Build plate adhesion: Προσκόλληση, τύπος προσκόλλησης κ.α.
- Dual extrusion: Διπλή έγχυση, Αυτό χρησιμοποιείτε σε εκτυπωτές που υποστηρίζουν δεύτερη κεφαλή εκτύπωσης.

Αφού οριστούν οι προδιαγραφές της εκτύπωσης ακολουθεί η εισαγωγή του σχεδίου τύπου .stl (στερεολιθογραφία) όπως και άλλου τύπου αρχεία.

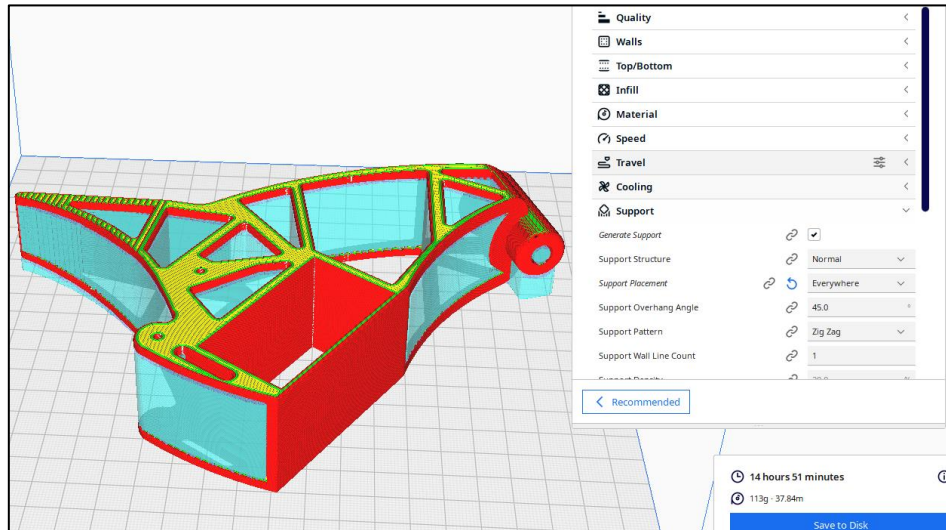
Επίσης ο χρήστης μπορεί να τοποθετήσει το αντικείμενο οπουδήποτε επιθυμεί επάνω στο τραπέζι εκτύπωσης, να το περιστρέψει, να αλλάξει κλίμακα καθώς και να το καθρεπτίσει αν αυτό χρειάζεται.



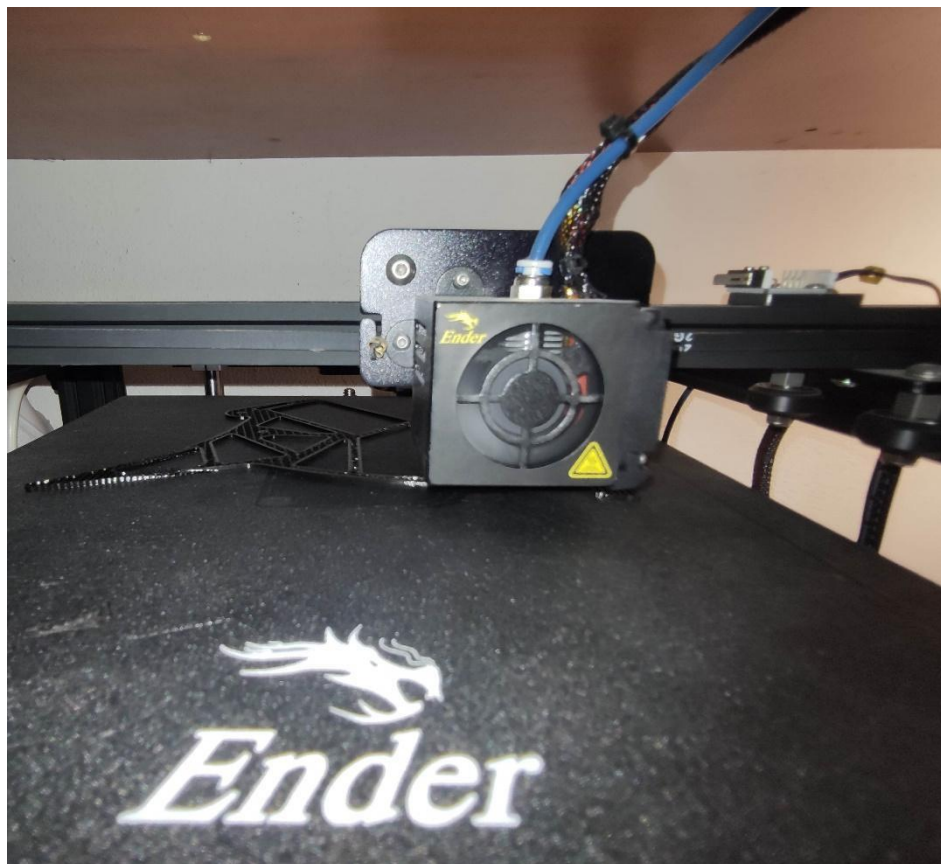
Εικόνα 6.1: Προδιαγραφές εκτύπωσης.



Σε αυτό το σημείο έχει εισαχθεί το σχέδιο στο λογισμικό τεμαχισμού, έχουν οριστεί οι προδιαγραφές εκτύπωσης για τον σκελετό της τοπολογικής βελτιστοποίησης και είναι έτοιμο για την εκτύπωση που θα διαρκέσει 14 ώρες και 51 λεπτά (Βλ. Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2: Απεικόνιση αποτελέσματος.



Εικόνα 6.3: Αρχικό στάδιο εκτύπωσης σκελετού.



Παρακάτω απεικονίζονται οι πρώτες στρώσεις της εκτύπωσης όπου φαίνεται και το μοτίβο που έχει επιλεγεί για το εσωτερικό γέμισμα του σκελετού (Βλ. Εικόνα 6.3) και μετά στο τελικό αποτέλεσμα φαίνεται ο σκελετός μαζί με τις βοηθητικές γεωμετρίες (support) οι οποίες θα χρειαστεί να αφαιρεθούν (Βλ. Εικόνα 6.4).



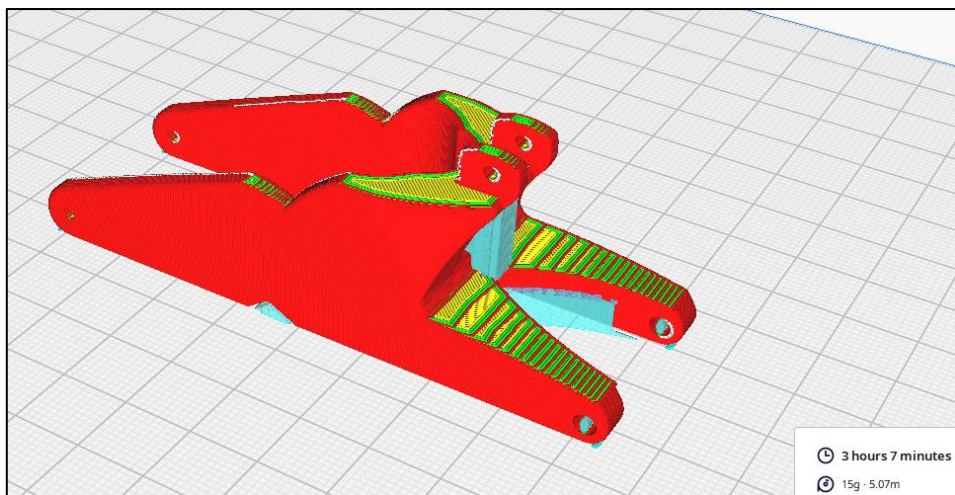
Εικόνα 6.4: Τελικό στάδιο εκτύπωσης σκελετού.

Τέλος το αποτέλεσμα μετά την αφαίρεση των βοηθητικών γεωμετριών (support) (Βλ. Εικόνα 6.5).



Εικόνα 6.5: Τελική όψη εκτυπωμένου σκελετού.

Τα ίδια βήματα θα επαναληφθούν για το ψαλίδι της τοπολογικής βελτιστοποίησης του οποίου η εκτύπωση θα διαρκέσει 3 ώρες και 7 λεπτά (Βλ. Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Αποτέλεσμα (Slicer).

Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης πραγματοποιήθηκε καθαρισμός του ψαλιδιού (αφαίρεση βοηθητικών γεωμετριών) και είναι έτοιμο για συναρμολόγηση με τα υπόλοιπα κομμάτια (Βλ. Εικόνα 6.7).



Εικόνα 6.7: Πλαϊνή όψη ψαλιδιού.

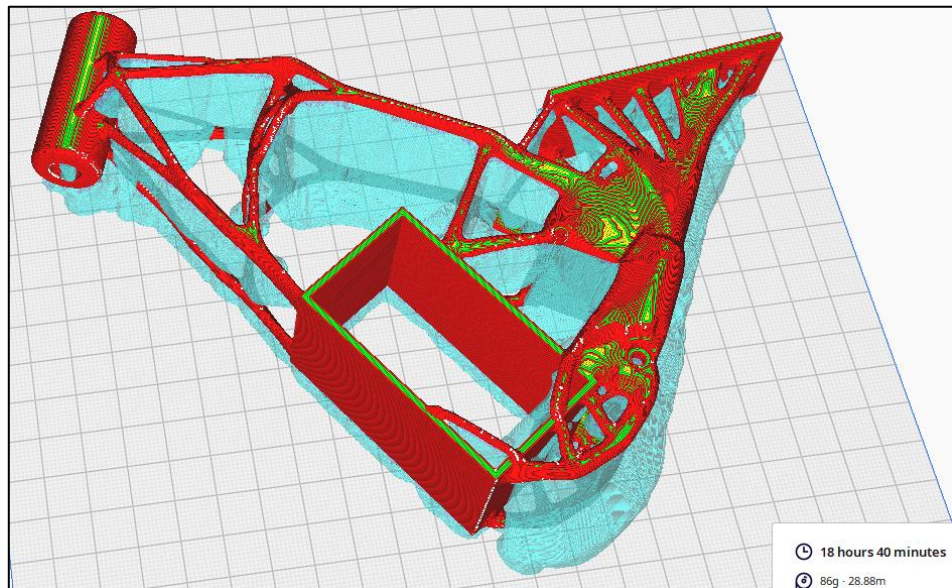


Εικόνα 6.8: Τελική όψη εκτυπωμένου ψαλιδιού.

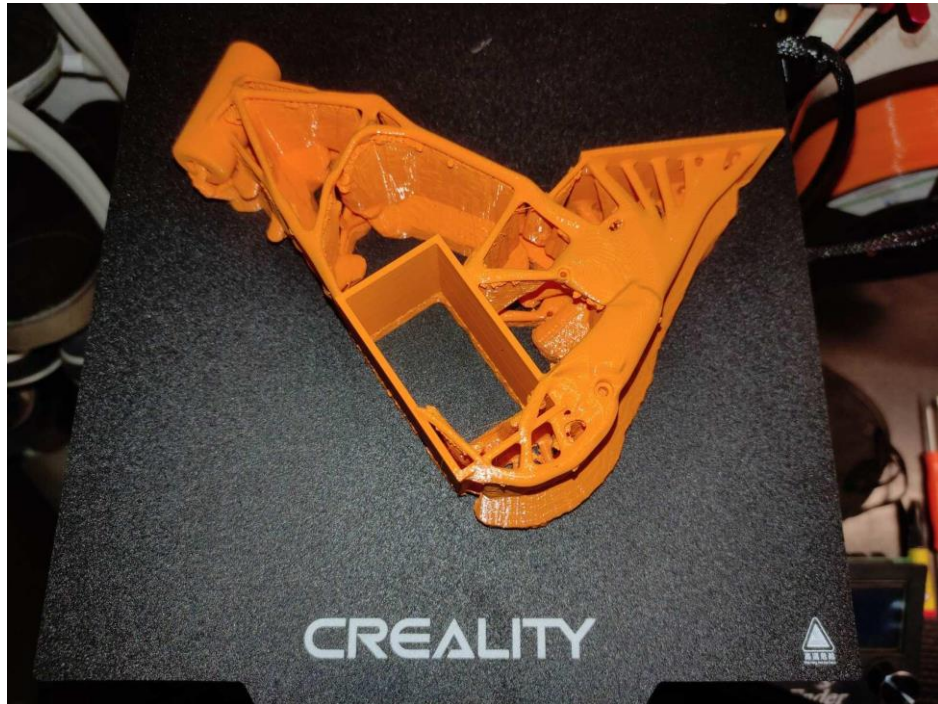


Εικόνα 6.9: Συναρμολογημένη μοτοσυκλέτα.

Στον σκελετό του γενετικού σχεδιασμού η εκτύπωση χρειάστηκε 18 ώρες και 40 λεπτά (Βλ. Εικόνα 6.10).

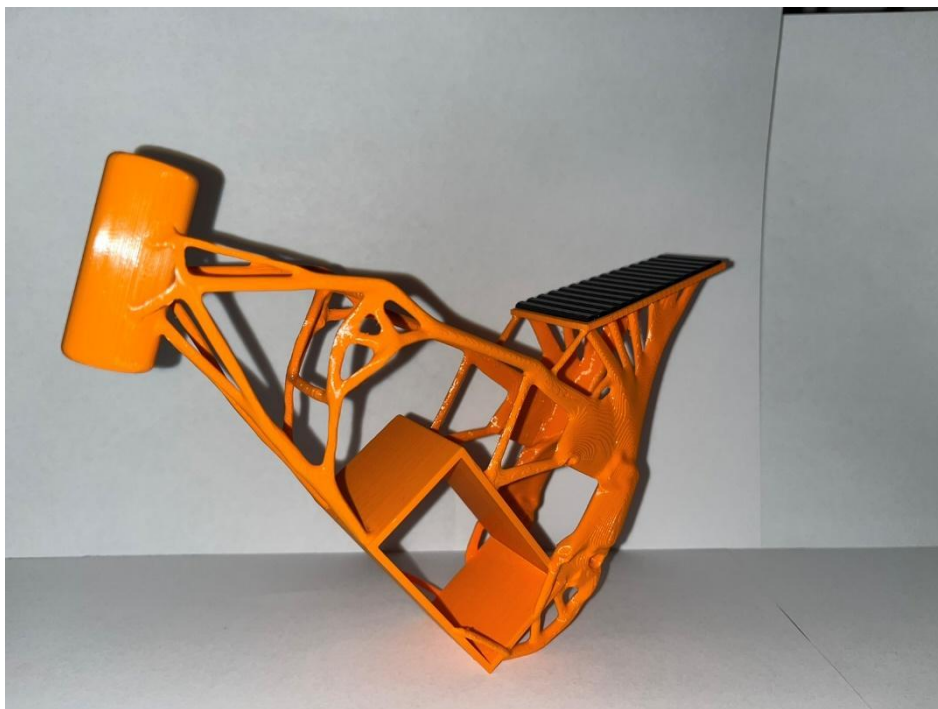


Εικόνα 6.10: Αποτέλεσμα (Slicer).



Εικόνα 6.11: Τελικό στάδιο εκτύπωσης σκελετού.

Το αποτέλεσμα της εκτύπωσης του σκελετού μετά τον καθαρισμό του απο τις βοηθητικές γεωμετρίες απεικονίζεται παρακάτω (Βλ. Εικόνα 6.12).

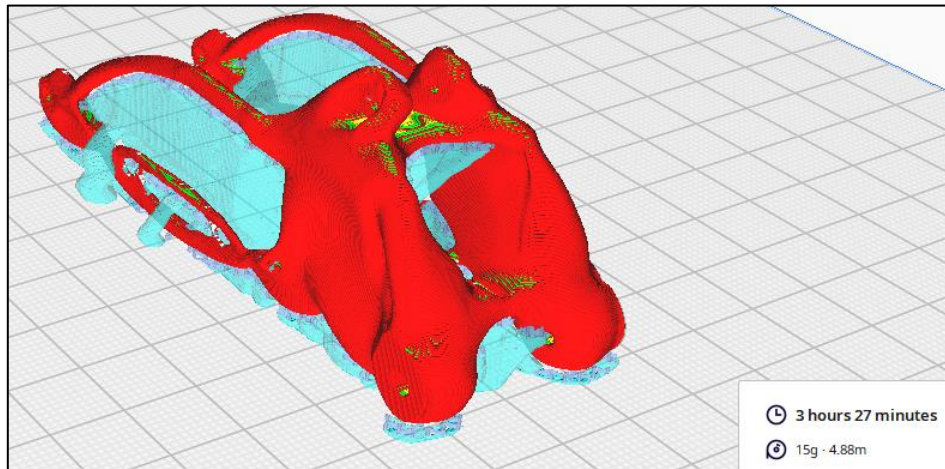


Εικόνα 6.12: Τελική όψη εκτυπωμένου σκελετού.



Ακολουθεί και η εκτύπωση του ψαλιδιού του γενετικού σχεδιασμού.

Η εκτύπωση του ψαλιδιού θα κρατήσει 3 ώρες και 27 λεπτά (Βλ. Εικόνα 6.13).



Εικόνα 6.13: Αποτέλεσμα (Slicer).



Εικόνα 6.14: Πλαινή όψη ψαλιδιού.



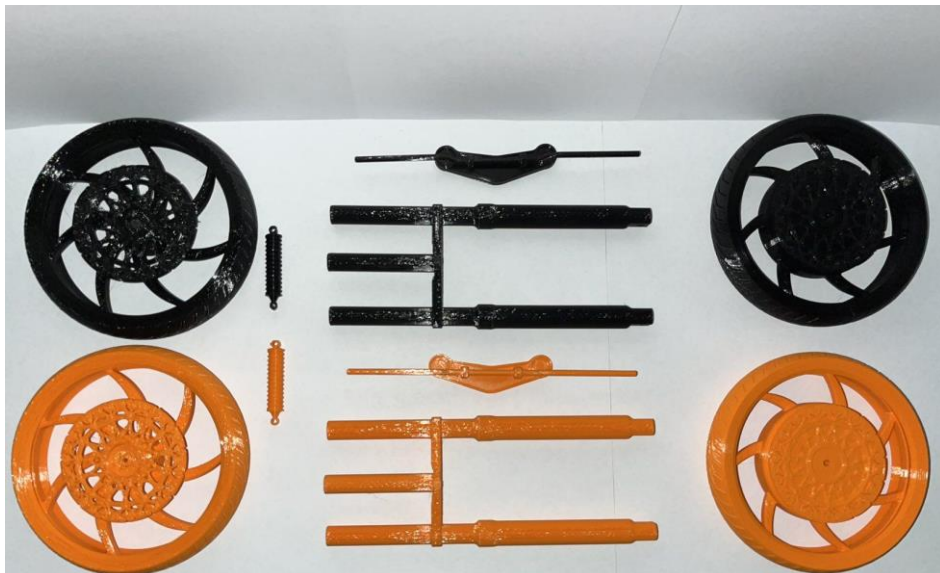
Εικόνα 6.15: Τελική όψη εκτυπωμένου ψαλιδιού.

Τέλος μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης και του ψαλιδιού γίνεται η συναρμολόγηση και του δεύτερου σκελετού (Βλ. Εικόνα 6.16).



Εικόνα 6.16: Συναρμολογημένη μοτοσυκλέτα.

Εδώ παρουσιάζονται όλα τα επιμέρους κομμάτια που χρειάστηκαν για την συναρμολόγηση κάθε σκελετού και παρακάτω φαίνονται και οι δύο σκελετοι (τοπολογικής βελτιστοποίησης και γενετικού σχεδιασμού) μαζί (Βλ. Εικόνα 6.17).



Εικόνα 6.17: Όλα τα κομμάτια της μοτοσυκλέτας πριν την συναρμολόγηση.



Εικόνα 6.18: Συναρμολογημένες μοτοσυκλέτες και με τους δύο τρόπους ανάλυσης.



7. Συμπεράσματα και μελλοντικές εξελίξεις στο αντικείμενο της εργασίας

Στη παρούσα πτυχιακή αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης σχεδιασμού με την βοήθεια των λογισμικών SolidWorks (Τοπολογική Βελτιστοποίηση) και Fusion360 (Γενετικό Σχεδιασμό), με σκοπό την ανάδειξη των πλεονεκτημάτων όπως και των μειονεκτημάτων αυτών.

Η διαδικασία ανάπτυξης ενός πλαισίου αποδείχθηκε απαιτητική για τα λογισμικά βελτιστοποίησης αφού για να λειτουργήσουν σωστά και το αποτέλεσμα να είναι αποδεκτό χρειάζονται πολλά και λεπτομερή ορίσματα.

Ξεκινώντας από την τοπολογική βελτιστοποίηση:

- Απλή δήλωση στηρίξεων, δυνάμεων και γεωμετριών που δεν θα αλλάξουν.
- Αρκετά χρονοβόρα ανάλυση και χρειάζεται ισχυρό Η/Υ (Περίπου 7ώρες).
- Κάθε ανάλυση παράγει ένα αποτέλεσμα.
- Αποτέλεσμα με μη αποδεκτές επιφάνειες λόγω τραχύτητας οπότε χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία.
- Οπτικά στιβαρό και ανθεκτικό αποτέλεσμα. (Προκύπτει από την τρισδιάστατη εκτύπωση του)
- Ίσως η κατασκευή του σε κάποιες περιπτώσεις να είναι εφικτή με αφαιρετική μέθοδο (CNC Εργαλειομηχανές).

Όσο για τον γενετικό σχεδιασμό:

- Πολύπλοκη δήλωση στηρίξεων, χρειάζεται η δημιουργία επιπλέον γεωμετριών ώστε να τοποθετηθούν οι δυνάμεις και να οριστούν οι στηρίξεις και οι γεωμετρίες που δεν θα αλλάξουν.
- Γρήγορη ανάλυση καθώς τρέχει στο cloud οπότε ο Η/Υ είναι αχρείαστος αφού ξεκινήσει και δεν χρειάζεται να είναι τόσο ισχυρός (Περίπου 2 ώρες).
- Κάθε ανάλυση παράγει πληθώρα αποτελεσμάτων με ποικιλία σε γεωμετρίες, μάζες και συντελεστές ασφαλείας.
- Αποτέλεσμα με άρτιες επιφάνειες χωρίς να χρειάζεται καμία περαιτέρω επεξεργασία.
- Οπτικά όχι και τόσο στιβαρό αποτέλεσμα. (Προκύπτει μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης)
- Η κατασκευή του βασίζεται κυρίως στην προσθετική κατασκευή.



Οι μελλοντικές εξελίξεις στο κομμάτι της μοτοσυκλέτας είναι λίγες καθώς τα περισσότερα έχουν γίνει.

Μία από αυτές θα ήταν οι μέθοδοι αυτοί να δοκιμαστούν και σε άλλα λογισμικά πακέτα έτσι ώστε να αποδειχθεί τελικά ποιο είναι πιο ικανό να φέρει εις πέρας την ανάλυση πιο γρήγορα αλλά και με ακόμη περισσότερες παραμέτρους που σημαίνει ακόμη πιο βέλτιστο αποτέλεσμα.

Άλλη μία εξέλιξη θα ήταν αφού βρεθεί το πιο βέλτιστο αποτέλεσμα να προωθηθεί σε μια εταιρία όπου θα μπορεί να το τυπώσει σε 1:1 κλίμακα σε αλουμίνιο έτσι ώστε να μπορεί να κυκλοφορήσει.

Ωστόσο υπάρχει πληθώρα εξελίξεων στις μεθόδους προσθετικής κατασκευής η οποία ολοένα και περισσότερο χρησιμοποιείται σε κάθε είδους εφαρμογές όπως:

- Κατασκευή σπιτιών μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή πολύ μεγάλων διαστάσεων και προδιαγραφών καθώς ήδη έχουν ξεκινήσει οι δοκιμές.
- Γίνονται στην Κίνα δοκιμές εκτύπωσης ακόμη και φαγητού όπως κρέατος.
- Κατασκευή επίπλων σπιτιών, ξενοδοχείων κ.α. όπου είναι οπτικά εντυπωσιακά καθώς και κατασκευαστικά ευκολότερα εφόσον κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή.



8. Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] https://www.researchgate.net/figure/Difference-between-different-types-of-Structural-Optimization-where-a-is-Size_fig3_335841812
- [2] <https://www.frontiersin.org/research-topics/10265/structural-design-optimization>
- [3] <https://www.solid.lth.se/research/structural-optimization/>
- [4] Osman Yu. An overview on topology optimization methods employed in structural engineering, 2019.
https://www.researchgate.net/publication/338264424_AN_OVERVIEW_ON_TOPOLOGY_OPTIMIZATION_METHODS_EMPLOYED_IN_STRUCTURAL_ENGINEERING
- [5] A.G.M. Michell. LVIII. The limits of economy of material in frame-structures. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1904.
- [6] M. Save, W. Prager, G. Sacchi, and W.H. Warner. Structural Optimization: Optimality criteria. Mathematical Concepts and methods in science and engineering, 1988.
- [7] M.P. Bendsoe and N. Kikuchi, Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1988.
- [8] Martin P. Bendsoe. Optimal shape design as a material distribution problem. Structural optimization, 1989.
- [9] J. Herskovits, G. Dias, G. Santos, and C.M Mota Soares. Shape structural optimization with an interior point nonlinear programming algorithm. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2000.
- [10] Generative Design, 2021.
https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Generative_design/
- [11] Chris Williams. Computer Aided Design.
<https://www.starrapid.com/blog/the-evolution-of-generative-design-software/>
- [12] Topology optimization for 3D printing, 2020.
<https://www.3dnatives.com/en/topology-optimisation140820184/>
- [13] https://www.researchgate.net/figure/Flowchart-for-multi-objective-topology-optimization_fig1_225543730
- [14] Ioannis Ntintakis and George E. Stavroulakis. Progress and recent trends in generative design, 2020.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202031801006>
- [15] Βικιπαίδεια. Γενετικοί Αλγόριθμοι, 2021.
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%AF_%CE%91%CE%BB%CE%B3%CF%8C%CF%81%CE%B9%CE%B8%CE%BC%CE%BF%CE%B9
- [16] <https://convercon.com/topology-optimization/>
- [17] Azam Khan. An Investigation of Generative Design for Heating, Ventilation, and Air-Conditioning, 2017.



- https://www.researchgate.net/publication/319442312_An_Investigation_of_Generative_Design_for_Heating_Ventilation_and_Air-Conditioning
- [18] ΑΠΕ – ΜΠΕ. Φέρνει επανάσταση η προσθετική κατασκευή. 2018
«Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής: Τρισδιάστατη εκτύπωση, ταχεία πρωτοτυποποίηση και άμεση ψηφιακή κατασκευή» των Ian Gibson, David Rosen και Brent Stucker
<https://www.in.gr/2018/02/24/b-science/fernei-epanastasi-i-prosthetiki-kataskeyi/>
- [19] Suzi Mein. Understanding the Seven Types of Additive Manufacturing, 2020.
<https://www.firetrace.com/fire-protection-blog/additive-manufacturing>
- [20] <https://acam.rwth-campus.com/binder-jetting/>
- [21] <https://news.pminnovationblog.com/blog/optimizing-the-binder-am-value-chain-for-series-production>
- [22] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-powder-bed-fusion-process_fig1_261017818
- [23] <https://www.digitalengineering247.com/article/editors-pick-fast-preparation-of-solidworks-files-for-powder-bed-fusion-3d-printing>
- [24] <https://www.procada.se/technology.html>
- [25] <https://www.metal-am.com/beam-and-empa-to-focus-on-high-precision-directed-energy-deposition-technologies/>
- [26] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-FFF-and-FDM-processes-36_fig11_342539019
- [27] <https://www.matterhackers.com/store/l/matterhackers-pro-series-3d-printing-filament-starter-pack-300mm/sk/MSLQDVG3>
- [28] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-material-jetting-process_fig3_325876280
- [29] <https://www.3dspectratech.com/key-aspects-of-polyjet-3d-printing/>
- [30] <https://www.anima.gr/sla-3dprinting-technology>
- [31] <https://www.fastradius.com/resources/prototyping-sla-fdm/>
- [32] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-sheet-lamination-process-Gibson-et-al-2015_fig4_334169112
- [33] <https://www.3dnatives.com/en/impossible-objects-owens-corning-260520215/>
- [34] Mickael Brossard, Giacomo Gatto, Alessandro Gentile, Tom Merle, and Chris Wlezien. How generative design could reshape the future of product development, 2020.
<https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/how-generative-design-could-reshape-the-future-of-product-development>
- [35] <https://fractory.com/generative-design/>
- [36] https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/breakfast-bytes/posts/superhuman-photonic-design
- [37] <https://renumics.com/blog/what-is-ai-assisted-design>
- [38] Generative Design 101.
<https://formlabs.com/blog/generative-design/>
- [39] <https://www.google.com/search?q=generative+design+spyros+panopoulos>.
- [40] Topology Optimization 101: How to Use Algorithmic Models to Create Lightweight Design.



- <https://formlabs.com/blog/topology-optimization/>
- [41] <https://www.arch2o.com/data-customized-midsoles-new-balance/>
- [42] Ahmed K. Noor, AI and the Future of the Machine Design, 2017.
<https://doi.org/10.1115/1.2017-Oct-2>
- [43] <http://plm-erpnews.se/filmproducenten-som-satsar-pa-sportbilar-hela-chassit-3d-printas/>
- [44] https://www.researchgate.net/figure/Topology-optimization-for-a-Sentinel-satellite-antenna-bracket-from-the-original-left_fig17_327189197
- [45] <https://www.coroflot.com/suhdesign/Xiphias-Supercar-Project>
- [46] Topology Optimization for AM - work case - Vehicle front suspension, 2020.
https://www.youtube.com/watch?v=qzBOcU_lubY
- [47] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6636>
- [48] <https://www.ijstr.org/final-print/july2019/Performance-Gains-Of-Load-Sensing-Brake-Force-Distribution-In-Motorcycles.pdf?fbclid=IwAR0TNTMksg9v8djZlAfA8qmJ5i5FMt20xLZYRjiAxtAdPZsVFTwzPtaOWY>
- [49] https://www.aliexpress.com/item/4001029160957.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.16e12f2f9h4LdL&algo_pvid=6f77f64a-aa0d-432d-8559-a53d3396bcd9&algo_expid=6f77f64a-aa0d-432d-8559-a53d3396bcd9-0&btsid=0bb0624016193631557168202e19c5&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_