ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Βελτιστοποίηση σχεδιασμού εξαρτημάτων με την αξιοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων και της προσθετικής κατασκευής

Διπλωματική Εργασία

ΟΝΟΜΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ
Λουγιάκης Ευάγγελος
Προπτυχιακός φοιτητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ
Ιωάννης Ντιντάκης Επίκουρος Καθηγητής

Ηράκλειο
Μάρτιος 2025

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων....2
Ευχαριστίες....5
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων....6
Abstract....7
Πρόλογος....8
Εισαγωγή....9
Κεφάλαιο 1: Προσθετική κατασκευή....12
1.1. Ιστορική αναδρομή προσθετικής κατασκευής....12
1.2. Τι είναι η προσθετική κατασκευή....13
1.3. Ποια είναι η χρήση των αντικειμένων προσθετικής κατασκευής....14
1.4. Πληροφορίες για τις διεργασίες της προσθετικής κατασκευής....15
1.5. Πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής....16
1.6. Οι μοναδικές ιδιότητες της προσθετικής κατασκευής....17
1.7. Βήματα προσθετικής κατασκευής....17
Κεφάλαιο 2: Μηχανήματα προσθετικής κατασκευής....21
2.1. Συστήματα εξώθησης υλικού – Fused Deposition Modelling (FDM)....21
2.1.1. Τροφοδότηση υλικού....22
2.1.2. Ρευστοποίηση....23
2.1.3. Εξώθηση....23
2.1.4. Στερεοποίηση....23
2.1.5. Συγκόλληση....23
2.1.6. Δημιουργία στηριγμάτων....23
2.1.7. Σχεδιογράφηση....24
2.1.8. Υλικά για FDM....24
2.1.9. Συστήματα εξώθησης υλικού FDM κεραμικών....25
2.2. Φωτοπολυμερισμός σε κάδο - Vat Photopolymerization (VP), (SL)....25
2.2.1. Ιστορική αναδρομή φωτοπολυμερισμού σε κάδο....26
2.2.2. Φωτοπολυμερές υλικά....26
2.3. Διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη - Powder Bed Fusion (PBF)....27
2.3.1. Υλικά για διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη....28
2.3.2. Μέταλλα και σύνθετα....29
2.3.3. Κεραμικά και σύνθετα κεραμικά....29
2.4. Διεργασίες εναπόθεσης υλικού με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη - Direct Energy Deposition (DED)....29
2.5. Αντίστροφη μηχανική....30

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή 32
3.1. Σχεδιασμός για παραγωγή και συναρμολόγηση DFMA 32
3.2. Τι είναι ο ΄΄Σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή΄΄ και ποιοι είναι οι σκοποί του 32
3.3. Πολύπλοκη γεωμετρική μορφή και προσθετική κατασκευή 33
3.4. Ενσωματωμένα συναρμολογημένα σύνολα λόγω προσθετικής κατασκευής 34
3.5. Εξατομικευμένη γεωμετρική μορφή 35
3.6. Πολυλειτουργικές σχεδιαστικές λύσεις 36
3.7. Κατάργηση των περιορισμών του σχεδιασμού για παραγωγή και συναρμολόγηση DFMA 37
3.8. Ενοποίηση και ανασχεδιασμός κομματιών 37
3.9. Προκλήσεις λογισμικών τρισδιάστατης σχεδίασης 38
3.10. Συστήματα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD στερεάς μοντελοποίησης 38
Κεφάλαιο 4: Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και τοπολογική βελτιστοποίηση 40
4.1. Ιστορική αναδρομή βέλτιστου σχεδιασμού 40
4.2. Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία CAD/CAE και Finite Element Modeling (FEM) 40
4.3. Μέθοδος κατασκευής FEM σε συνδυασμό με Topology Optimization 41
4.4. Μέθοδοι βελτιστοποίησης 42
4.5. Μέθοδοι τοπολογικής βελτιστοποίησης 43
4.6. Τοπολογική βελτιστοποίηση 44
4.7. Μέθοδοι με πλέγμα (Lattice) 45
4.8. Μέθοδοι ογκομετρικής πυκνότητας 46
4.9. Λογική, σχεδιασμός, στόχοι και προετοιμασία του προβλήματος τοπολογικής βελτιστοποίησης 46
4.10. Πλεονεκτήματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης 48
Κεφάλαιο 5: Εργαλεία εκτέλεσης πειραματικού μέρους 49
5.1. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής 49
5.2. Λογισμικό Solidworks 49
5.2.1. Περιβάλλον λογισμικού Solidworks 49
5.2.2. Εντολές σχεδίασης 51
5.2.3. Solidworks Topology Study 51
5.3. Λογισμικό nTop 53
5.3.1. Βασικά Χαρακτηριστικά: 53
5.3.2. Γιατί το nTopology Ξεχωρίζει: 53
5.3.3. Βασικά Στοιχεία του Περιβάλλοντος: 53
5.3.4. Βασικές εντολές και γενικότερα δυνατότητες του nTop: 56
5.4. Λογισμικό HWMonitor 58
5.5. 3D Scanner 59
Κεφάλαιο 6: Πειραματικό μέρος 60

6.1. Σκανάρισμα του πρωτοτύπου και προετοιμασία του ψηφιακού αρχείου 60
6.2. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω SolidWorks 66
6.3. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω nTop 76
6.3.1 Γενική συζήτηση για το nTopology 82
6.4 Συμπεράσματα 86
Παράρτημα: Παράθεση Blocks 87
Βιβλιογραφία/Αναφορές 90

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επίκουρο καθηγητή κ.Ντιντάκη Ιωάννη, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την πολύτιμη βοήθειά του και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Μυλωνάκη Αντώνιο (BMW Service) τόσο για την δωρεά της βάσης του κινητήρα που μελετήθηκε όσο και για τις πολύτιμες πληροφορίες που έδωσε ώστε να πραγματοποιηθεί το πείραμα της εργασίας αυτής.

Τέλος, έχω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όσα μου προσέφερε και συνεχίζει να κάνει για μένα.

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

AM	Additive Manufacturing
DFMA	Design For Manufacturing & Assembling
DFAM	Design For Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
RP	Rapid Prototyping
GD	Generative Design
FDM	Fused Deposition Modelling
VP	Vat Photopolymerization
SLA/SL	Stereolithography
PBF	Powder Bed Fusion
DED	Directed Energy Deposition
DO	Design Optimization
CNC	Computer Numerical Control
FEM	Finite Element Modeling
SLS	Selective Laser Sintering
Ntop	Ntopology
TO	Topology Optimization

Abstract

This content of this thesis is the design optimization of mechanical parts using finite element analysis and their production through additive manufacturing methods. Beyond the measurement results and theoretical analysis, this thesis has an additional target: to help the reader understand the logic of CAD-based design process, the fundamental concepts of the additive manufacturing, and the process of design optimization. All of the above will enable the reader to conduct more targeted and effective research if they need to explore any of these topics further. The first chapter presents the chronology of additive manufacturing and its description. Additionally, it discusses the uses of products created by additive manufacturing machines. This chapter also covers the advantages of additive manufacturing, its unique properties, general information, and the basic steps of 3D printing. The second chapter analyzes the four most commonly used additive manufacturing methods, explaining how they work, their production speed, the materials that can be used and their various applications. Finally, in this chapter, there is some general information about what reverse engineering is, how it can be used for production and the design optimization of the resulting products. The third chapter explores the concept of Design for Manufacturing and Assembly (DFMA), the evolution of DFMA into Design for Additive Manufacturing (DFAM), and an explanation of DFAM itself. Additionally, it defines key terms such as “complicated geometrical form", “intergraded / integrated assemblies”, “personalized geometrical form” while also presenting some multifunctional solutions. In the end of this chapter there is the removal of restrictions of DFMA, the meaning of “reformation with consolidation of parts”, some new requirements in CAD systems, and a conclusion with a short introduction about CAD systems. The fourth chapter is about the design optimization (DO). First of all, there is the chronology of DO, followed by analysis and comparison of various DO methods and their advantages and applications. The fifth and final chapter provides a more detailed overview of the thesis targets. Then it describes the software used, followed by the application of design optimization in selected mechanical parts. Next, the results of the optimization process are recorded and compared. Finally, the conclusions made by all of the above present the important findings of this thesis.

Πρόλογος

Θα ήθελα να σας ευχαριστήσω για τον χρόνο σας να διαβάσετε την παρούσα διπλωματική εργασία για τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού εξαρτημάτων, με την αξιοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων και της προσθετικής κατασκευής.

Το πρώτο κεφάλαιο αφορά την προσθετική κατασκευή. Αναφέρεται η ιστορική αναδρομή της, καθώς και το τί είναι η προσθετική κατασκευή. Έπειτα, αναλύονται το ποιες είναι οι χρήσεις, τόσο της ίδιας όσο και των παραγόμενων αντικειμένων της. Αφού αναφερθούν κάποιες γενικές πληροφορίες όσον αφορά τις διεργασίες της προσθετικής κατασκευής, αλλά και οι μοναδικές ιδιότητες που διαθέτουν, καταγράφονται τα βασικά βήματα για την χρήση της.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στα μηχανήματα της προσθετικής κατασκευής, όπου αναλύεται η λειτουργία κάθε είδους μηχανήματος. Επίσης, καταγράφονται τα υλικά και οι δυνατότητες που έχει το κάθε μηχάνημα ανά είδος. Τα μηχανήματα που αναλύονται είναι τα Συστήματα εξώθησης υλικού, Φωτοπολυμερισμού σε κάδο, Διεργασίας σύντηξης πούδρας σε κλίνη και Διεργασίας εναπόθεσης υλικού με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη. Τέλος, γίνεται μία αναφορά στην Αντίστροφη μηχανική.

Το τρίτο κεφάλαιο, αφορά κυρίως τον σχεδιασμό εξαρτημάτων για προσθετική κατασκευή. Περιέχει την εξέλιξη του σχεδιασμού για παραγωγή και συναρμολόγηση και το πως αυτός εξελίχθηκε στον σχεδιασμό εξαρτημάτων για προσθετική κατασκευή. Έτσι, στο σημείο αυτό, παρουσιάζονται οι καινούριες ιδιότητες που κατακτήθηκαν με αυτήν την αναβάθμιση, όπως είναι οι πολυλειτουργικές σχεδιαστικές λύσεις, η ενοποίηση κομματιών και η πολύπλοκη γεωμετρική μορφή. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια συστήματα CAD στερεάς μοντελοποίησης και οι δυνατότητες τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται η μέθοδος κατασκευής με τον συνδυασμό CAD στερεάς μοντελοποίησης και των πεπερασμένων στοιχείων και το πως από αυτόν τον συνδυασμό, έφτασε στην τοπολογική βελτιστοποίηση. Έπειτα, αναλύονται οι τρόποι, οι μέθοδοι, η λογική και τα πλεονεκτήματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης, εφόσον πιο πρώτα έχει αναφερθεί αναλυτικά το τι σημαίνει ΄΄Τοπολογική Βελτιστοποίηση΄΄.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, δίνεται ένα πρακτικό παράδειγμα εφαρμογής της τοπολογικής βελτιστοποίησης με την χρήση δύο διαφορετικών λογισμικών. Αρχικά, εξηγείται ο σκοπός του πειράματος που λαμβάνει χώρα στην παρούσα εργασία και έπειτα αναφέρονται τα εργαλεία (και τα ψηφιακά, π.χ. λογισμικά, και τα φυσικά, π.χ. μηχανήματα) που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά, βήμα βήμα η πορεία της μελέτης καταλήγοντας στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την τοπολογική βελτιστοποίηση συνδυασμένη με την αντίστροφη μηχανική.

Εισαγωγή

Στην σημερινή εποχή, το επίπεδο ποιότητας παραγωγής αντικειμένων και ειδικότερα μηχανικών εξαρτημάτων στην βιομηχανία, βρίσκεται σε πολύ αναβαθμισμένο επίπεδο σε σύγκριση με παλαιότερα χρόνια όπου υπήρχαν μόνο οι συμβατικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού (π.χ. συμβατικός τόρνος, συμβατική φρέζα, κ.λπ.). Εφόσον όμως η τεχνολογία εξελίσσεται ραγδαία και υπάρχουν πια τα κατάλληλα υπολογιστικά και σχεδιαστικά εργαλεία, οι απαιτήσεις αυξάνονται. Πλέον υπάρχουν κάποιες ανάγκες για τις οποίες υπάρχουν οι προοπτικές έτσι ώστε να ικανοποιηθούν, όσον αφορά την σχεδιομελέτη μηχανικών εξαρτημάτων. Όταν μία σωστή σχεδιομελέτη λάβει χώρα συνοδευόμενη από τα κατάλληλα εργαλεία, τα οποία αν εκμεταλλευτεί ο χρήστης σωστά, πάντα επιτυγχάνει την ικανοποίηση πολλών βασικών αναγκών της βιομηχανίας. Για παράδειγμα με την εκπόνηση μίας σχεδιομελέτης με την λογική του "Design for Additive Manufacturing" ικανοποιούνται ανάγκες όπως είναι η οικονομικότερη παραγωγή μηχανικών κομματιών εφόσον υπάρχουν πλέον κάποιοι γνωστοί κανόνες σχεδιασμού, οι οποίοι βοηθούν στον καλύτερο τρόπο σχεδίασης, σε συνδυασμό με ένα μελετημένο χρονοδιάγραμμα για την παραγωγή του εκάστοτε κομματιού. Αυτό σημαίνει επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις, την ταχύτερη παραγωγή όλων των κομματιών παραγωγής εφόσον αυτή βασίζεται σε 3D PRINTING ή αλλιώς σε προσθετική κατασκευή AM (Additive Manufacturing). Η οικονομικότερη και ταχύτερη παραγωγή οφείλεται στο ότι κάθε κομμάτι που παράγεται θα έχει συνήθως μικρότερη μάζα και μικρότερο όγκο αλλά και ένα καλά μελετημένο πλάνο διεργασίας σε σύγκριση με την παραγωγή του, όταν είχε μελετηθεί με παλαιότερο "παραδοσιακό τρόπο" (όπως π.χ. με DFMA – Design for Manufacturing & Assembly) [1].

Ένα από τα μειονεκτήματα που μπορεί να σημειωθεί είναι όταν το ''Design for Additive Manufacturing'' (DFAM) συνδυάζεται με κάποιο είδος βελτιστοποίησης κατασκευής, θεωρείται πως κατά τον σχεδιασμό των εξαρτημάτων προκύπτουν πιο πολύπλοκες επιφάνειες και γεωμετρίες, όμως πλέον, η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας είναι λιγότερο σημαντική στην προσθετική κατασκευή AM (Additive Manufacturing) από άλλες μεθόδους παραγωγής διότι σήμερα με τη βοήθεια που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία πρακτικά δεν υπάρχει κάποια γεωμετρία η οποία δεν μπορεί να κατασκευαστεί, όπως θα αναλυθεί διεξοδικά σε παρακάτω κεφάλαια. Ο κύριος στόχος του Design for Additive Manufacturing είναι ο σχεδιασμός εξαρτημάτων έτσι ώστε κατά την παραγωγή του να χρησιμοποιηθεί μικρότερη ποσότητα υλικού έχοντας τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες σαν συνολική κατασκευή ενώ παράλληλα να είναι σχεδιασμένο το κομμάτι έτσι ώστε η μηχανή AM που το παράγει να κάνει τις λιγότερες δυνατές κινήσεις και χτισίματα (π.χ. Supports τα οποία θα εξηγηθούν σε επόμενα κεφάλαια) [1].

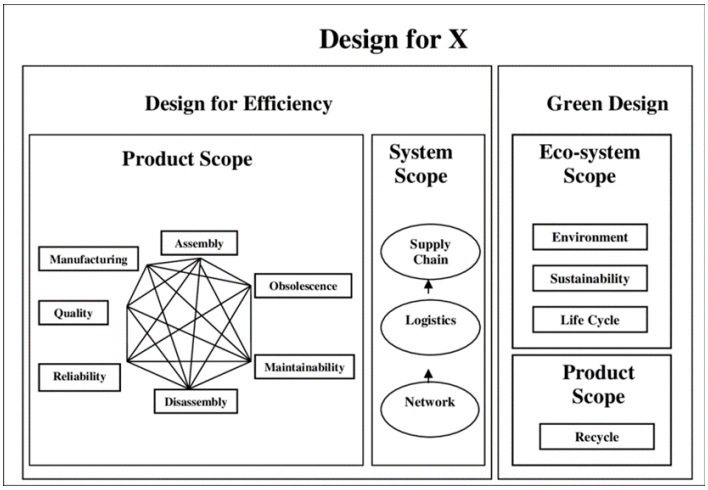
Η τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής για να πραγματοποιηθεί, πρέπει πρώτα να υπάρξει ο σχεδιασμός του εξαρτήματος προς παραγωγή σε κάποιο από τα εξειδικευμένα προγράμματα CAD (Computer Aided Design), για την δημιουργία του εικονικού μοντέλου. Εφόσον δημιουργηθεί το κατάλληλο εικονικό 3D μοντέλο αποθηκευμένο στην κατάλληλη μορφή, τοποθετείται για τον υπολογισμό των δυνάμεων και για τον έλεγχο αντοχής της γεωμετρίας στις καταπονήσεις που προορίζεται να δεχτεί στην ίδια πλατφόρμα, εάν και εφόσον το πρόγραμμα αυτό όπου σχεδιάστηκε το κομμάτι, έχει τη δυνατότητα υπολογισμών και ανάλυση δυνάμεων με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων. Στην σημερινή εποχή είναι πολύ σπάνιο κάποιο CAD σχεδιαστικό λογισμικό να μην παρέχει την δυνατότητα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, ώστε να επιτευχθεί η ανάλυση και η κατανομή δυνάμεων. Με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, επιτυγχάνεται η εύκολη και γρήγορη διόρθωση του κομματιού στα κατάλληλα σημεία όπου μπορεί να υπάρχει καταπόνηση, πριν προχωρήσει στην παραγωγή [1].

Γενικότερα η παραγωγή εξαρτημάτων με την τεχνολογία ΑΜ έχει φτάσει στην σημερινή εποχή να έχει διαστασιολογική ακρίβεια σχεδόν όμοια με την ακρίβεια του σχεδίου όσον αφορά την γεωμετρία των κομματιών. Η ακρίβεια φτάνει έως και 30μm χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση ή η ακρίβεια της μηχανής ΑΜ από το πόσα κομμάτια θα παραχθούν αλλά μόνο από τα χαρακτηριστικά εκτύπωσης που θα επιλέξει ο χρήστης όπως, για παράδειγμα, ταχύτητα παραγωγής, ευκρίνεια παραγωγής, υλικό παραγωγής, κ.λπ.. Επίσης ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της ΑΜ είναι ότι το εκάστοτε παραγόμενο κομμάτι δημιουργείται σε πολλές περιπτώσεις στην τελική μορφή του και δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία όπως τη διαδικασία του φινιρίσματος για να χρησιμοποιηθεί ή να οδηγηθεί στο εμπόριο [1].

Λόγω των πολύπλοκων γεωμετριών στα μηχανικά εξαρτήματα, για την ανάλυση τους χρησιμοποιούνται συστήματα λογισμικού, τα οποία στηρίζονται σε αριθμητικές μεθόδους επειδή οι αναλύσεις αυτές δεν είναι εφικτό να γίνουν με τον παραδοσιακό τρόπο δηλαδή με αναλυτικές χειρόγραφες λύσεις. [1] Η πιο διαδεδομένη αριθμητική μέθοδος επίλυσης για τα περισσότερα τεχνικά προβλήματα, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι δυνατή η επίλυση προβλημάτων πολλών εκατομμυρίων αγνώστων (βαθμών ελευθερίας) σε πολύ περιορισμένο χρόνο. Ο χρόνος είναι ανάλογος με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και των δεδομένων, ήτοι η διαδικασία υπολογισμού μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα ενώ δεν ξεπερνά συνήθως κάποιες ώρες (πολύ μεγάλο ρόλο στον χρόνο έχουν και οι επιδόσεις του υπολογιστή στον οποίο γίνεται η μελέτη). Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος πρέπει πρώτα να διακριτοποιηθεί η κατασκευή σε πεπερασμένα στοιχεία ενώ πρέπει να γίνει ο ορισμός των φορτίων και των οριακών συνθηκών. Αυτό όμως, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αποτελεί κάτι περίπλοκο και χρονοβόρο ώστε να ολοκληρωθεί όλη αυτή η προετοιμασία. Στην διαδικασία αυτήν, υπάρχουν τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η διαδικασία της προετοιμασίας και ονομάζεται προ-επεξεργασία για την επίλυση που ακολουθεί (διαδικασία μοντελοποίησης). Το δεύτερο στάδιο ονομάζεται Επίλυση. Το τρίτο στάδιο είναι η μετά-επεξεργασία, όπου είναι το στάδιο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της επίλυσης και συνήθως είναι επαναλαμβανόμενο μέχρι την επίτευξη του τελικού σκοπού της βελτιστοποίησης του εξαρτήματος. Με αυτά τα τρία στάδια ολοκληρώνεται η διαδικασία της ανάλυσης μίας κατασκευής. Διεθνώς τα προαναφερθέντα στάδια είναι γνωστά ως CAE (Computer Aided Engineering) επειδή ολοκληρώνονται με την βοήθεια λογισμικών συστημάτων, είτε αυτόματα είτε σε επικοινωνία με τον χρήστη [1].

Ο σχεδιασμός για κατασκευή και συναρμολόγηση Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) είναι η μεθοδολογία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης ενός προϊόντος ενώ παράλληλα μειώνει το συνολικό χρόνο και το συνολικό κόστος παραγωγής του. Επίσης με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αποτελεσματικότητα, η ποιότητα και η κερδοφορία. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τους σχεδιαστικούς στόχους και τους περιορισμούς παραγωγής. Για παράδειγμα, κάποιοι γνώμονες είναι οι ανάγκες του χρήστη και του εμπορίου, τα υλικά, οι διαδικασίες και οι μέθοδοι συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης, απαιτήσεις συντήρησης και τα λοιπά. Η DFMA μπορεί να προβληθεί από τρία επίπεδα αφαίρεσης. Στο πρώτο επίπεδο η διαδικασία προσφέρει κάποια εργαλεία, τεχνικές και οδηγίες για να προσαρμοστεί ένα δεδομένο σύνολο μελλοντικών περιορισμών. Αυτές οι οδηγίες είναι συνήθως για ειδικές διαδικασίες, για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, για παράδειγμα πώς το μέγεθος, το βάρος και η συμμετρία του ανταλλακτικού επηρεάζουν τον χρόνο εισαγωγής/ συναρμολόγησής του ή για συγκεκριμένη δραστηριότητα όπως πώς να υπολογιστεί ο θεωρητικός ελάχιστος χρόνος συναρμολόγησης του προϊόντος. Στο επόμενο επίπεδο αφαίρεσης, η διαδικασία DFMA φροντίζει για την κατανόηση και ποσοτικοποίηση της επίδρασης της διαδικασίας σχεδιασμού στην βιομηχανοποίηση και αντίστροφα. Αυτό είναι πράγμα απαραίτητο για να βελτιωθεί η επίδοση του βιομηχανικού συστήματος, τα χαρακτηριστικά εκτέλεσης του προϊόντος όπως το κόστος, η λειτουργικότητα, η ικανοποίηση του πελάτη, τα χαρακτηριστικά της εξέλιξης του προϊόντος όπως η ασφάλεια, η αξιοπιστία, το κόστος συντήρησης και επισκευής και οι μακροπρόθεσμες

δυνατότητες για την επιχειρηματική εξέλιξη όπως την ικανότητα να ανταπεξέλθει το βιομηχανικό σύστημα σε ένα απρόοπτο κύμα ζήτησης του προϊόντος. Σε αυτό το πλαίσιο, η διαδικασία DFMA είναι ένα υποσύνολο από σχεδιασμό X (Design for "X") όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην Εικόνα 1.1. Στο τελευταίο επίπεδο, η συγκεκριμένη μεθοδολογία εξερευνά την σχέση μεταξύ του σχεδιασμού και της βιομηχανοποίησης καθώς και την επίδραση στον σχεδιαστή, στην διαδικασία σχεδιασμού αλλά και στην εξάσκησή του. Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματεύεται θέματα όπως η επιλογή υλικού και διαδικασίας, ταυτόχρονης μηχανικής καθώς και το πώς να εξελιχθεί το CAD ώστε να υποστηρίξει το DFMA [2].



Εικόνα 1.1. *Δέντρο επεξήγησης για Design For X.*

Ο ορισμός της διαδικασίας σχεδίασης παραγωγής και συναρμολόγησης (DFMA) που δόθηκε παραπάνω, ισχύει για όλες τις διαδικασίες και τις αλυσίδες διαδικασιών που περιλαμβάνουν προσθετική κατασκευή AM (Additive Manufacturing). Παρόλα αυτά, στην πράξη η γνώση σχεδιασμού, τα εργαλεία, η διαδικασία και οι μεθοδολογίες και στα τρία επίπεδα αφαίρεσης θα διαφέρουν ουσιαστικά για τα Design for additive manufacturing (DFAM) από τα παραδοσιακά DFMA. Για παράδειγμα, ο AM μπορεί να δημιουργήσει διαφορετικούς τύπους χαρακτηριστικών και να επιβάλλει διαφορετικούς τύπους περιορισμών από τις άλλες βιομηχανικές διαδικασίες. Επομένως, απαιτούνται διαφορετικές διαδικασίες, σχεδιαστικοί κανόνες και εργαλεία. Την ίδια στιγμή οι ελευθερίες της AM μειώνουν την ανάγκη, επομένως και την σημαντικότητα του σχεδιασμού δραστηριοτήτων όπως η συναρμολόγηση. Οι διαδικασίες της AM έχουν διαφορετικά μεγέθη παρτίδας, χρόνους παραγωγής και οδηγούς κόστους σε σχέση με τις παραδοσιακές διαδικασίες και απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις στην μετρολογία και τον έλεγχο ποιότητας (αναλόγως την μέθοδο AM). Επομένως, απαιτείται ένα νέο σύνολο γνώσεων για να υποστηρίξει την διαδικασία DFAM. Τελικά, τα μοναδικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών AM επιτρέπουν και απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις στην σχεδιαστική διαδικασία και στην πρακτική σχεδιασμού. Αυτό περιλαμβάνει νέες προσεγγίσεις για να εξερευνηθούν μεγάλα και περίπλοκα πεδία σχεδιασμού, για να ενσωματωθούν υλικά, μεσόδομές και πολλαπλής κλίμακας συλλογισμοί και για να ξεπεραστούν τα γνωστικά εμπόδια και οι συμβατικές τεχνικές κατασκευής που επιβλήθηκαν από προηγούμενη εμπειρία (δηλ. τον DFMA). Η ανάπτυξη του γνωστικού πεδίου, των εργαλείων, των κανόνων, των διαδικασιών και των μεθοδολογιών για την διαδικασία DFAM έχει αναφερθεί σαν μία από τις βασικές προκλήσεις του AM. Η ανεπαρκής κατανόηση και εφαρμογή της DFAM, λέγεται ότι περιορίζει την ολική διείσδυση της AM στην βιομηχανία, κρατώντας πίσω την χρήση της AM μόνο στην παραγωγή κομματιών τελικής χρήσης. Η κατάσταση που επικρατεί εμποδίζει τους σχεδιαστές να επωφεληθούν πλήρως από την AM διαδικασία καθώς και την ίδια την διαδικασία από το να αναπτύξει πλήρως τις δυνατότητές της γενικότερα. Άπαξ και η διαδικασία του DFAM γίνει κατανοητή, η γνώση αυτή πρέπει να διαδοθεί στα τωρινά και μελλοντικά μέλη της βιομηχανίας. Έτσι, η εκπαίδευση πάνω στον ειδικό σχεδιασμό AM και τα σχεδιαστικά του πρότυπα είναι επίσης απαραίτητη [2].

Κεφάλαιο 1: Προσθετική κατασκευή

1.1. Ιστορική αναδρομή προσθετικής κατασκευής

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση RP (Rapid Prototyping) συνίσταται από μια ομάδα τεχνολογιών, που καθιστούν εύκολη και γρήγορη την κατασκευή μοντέλων ή συναρμολογήσεων στρώμα σε στρώμα (layer by layer) και μείωσε το χρόνο κατασκευής μοντέλων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Με τη βοήθεια της RP υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν γρήγορα φυσικά αντικείμενα, απευθείας από κάποιο CAD (Computer Aided Design) μοντέλο, μέσω της συνεχόμενης πρόσθεσης υλικού σε μορφή στρώσεων της μίας πάνω στην άλλη. Η ανάπτυξη και η επιτυχής εμπορευματοποίηση αυτής της καινοτόμου οικογένειας κατασκευαστικών τεχνικών ξεκίνησε στα τέλη του 1980 και από τότε έχει παρουσιάσει μεγάλη και ραγδαία πρόοδο. Το αρχικό κίνητρο για την εισαγωγή των μεθόδων RP σε διάφορες βιομηχανίες, ήταν να υποστηρίξει τη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων σε ταχείς ρυθμούς και με χαμηλό κόστος [2,3].

Είναι πολύ ενδιαφέρον το γεγονός ότι αιτήσεις για ανάλογες πατέντες υποβλήθηκαν συγχρόνως το 1984 στην Ιαπωνία (Murutani), τη Γαλλία (Andre et al.) και τις ΗΠΑ (Maters τον Ιούλιο και Hull τον Αύγουστο). Όλες αυτές οι πατέντες περιέγραφαν μια παρόμοια ιδέα για την κατασκευή ενός 3D αντικειμένου μέσω της επιλεκτικής πρόσθεσης διαδοχικών στρωμάτων υλικού του ενός επάνω στο άλλο. Ωστόσο, η πρώτη εμπορική διαδικασία παρουσιάστηκε στην Έκθεση Autofact στο Detroit, το Νοέμβριο του 1987, από τον Charles W. Hull, με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας SL/SLA (stereolithography), κατά την οποία λεπτά στρώματα φωτοευαίσθητου (UV light-sensitive) πολυμερούς υγρού στερεοποιούνταν με τη χρήση δέσμης λέιζερ. Ο ίδιος στη συνέχεια ίδρυσε και την εταιρεία 3D Systems Inc, που είναι πλέον από τις κύριες εταιρείες του κλάδου [2,3].

Σήμερα υπάρχουν περισσότερες από τριάντα διαδικασίες, μερικές από τις οποίες είναι εμπορικές, ενώ άλλες βρίσκονται υπό εξέλιξη σε εργαστήρια έρευνας και άλλες βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Η ακρίβεια των μεθόδων ταχείας πρωτοτυποποίησης RP έχει βελτιωθεί σημαντικά και βελτιώνεται συνεχώς. Οι επιλογές των υλικών είναι σχετικά πολλές και συνεχώς αυξάνονται. Το εύρος των εφαρμογών συνεχώς διευρύνεται και η χρήση της τεχνολογίας επεκτείνεται σε νέους τομείς. Τα μοντέλα που παράγονται από τις μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίηση χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά για λειτουργικές δοκιμές, για την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων σε μικρές ποσότητες και για την παραγωγή εργαλείων παραγωγής τελικών αντικειμένων. Η ταχεία πρωτοτυποποίηση RP είχε καθιερωθεί για να περιγράφει τις νέες τεχνολογίες που κατασκευάζουν μοντέλα προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας. Στην πορεία χρησιμοποιήθηκε και ο όρος ταχεία εργαλεία RT (Rapid Tooling) με τον οποίο περιγράφονται οι τεχνολογίες που υιοθέτησαν τις γρήγορες τεχνικές διαμόρφωσης ενός πρωτοτύπου στην κατασκευή τόσο εργαλείων όσο και καλουπιών [2,3].

Σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως ο όρος Προσθετική Κατασκευή AM (Additive Manufacturing), που ορίζεται από τον παγκόσμιο οργανισμό τυποποίησης American Society for Testing and Material (ASTM F42) ως η διαδικασία συνένωσης υλικών, συνήθως στρώμα πάνω σε στρώμα, για την δημιουργία αντικειμένων από τρισδιάστατα μοντέλα δεδομένων. Σε αντίθεση με τις αφαιρετικές κατασκευαστικές τεχνολογίες όπως οι συμβατικές μηχανικές κατεργασίες. Οι τεχνολογίες που περιγράφονται με τον όρο προσθετική κατασκευή δεν μπορούν να χαρακτηριστούν νέες καθώς αναπτύσσονται τα τελευταία τριάντα χρόνια. Αρχικός στόχος των τεχνολογιών αυτών αποτελούσε η γρήγορη κατασκευή πρωτοτύπων όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Γι' αυτό το λόγο η πρώτη ονομασία που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τις τεχνολογίες αυτές ήταν ταχεία πρωτοτυποποίηση. Ο όρος AM υιοθετήθηκε για να σηματοδοτήσει τη δυνατότητα που παρέχουν πλέον οι τεχνολογίες για

απευθείας κατασκευή τελικών προϊόντων έτοιμων προς χρήση [2,3].

Προσθετική κατασκευή AM (Additive Manufacturing) είναι ο καθιερωμένος πλέον όρος αυτού που τα προηγούμενα χρόνια αποκαλούσαμε «ταχεία πρωτοτυποποίηση» RP (Rapid Prototyping) και σήμερα είναι γνωστός στο ευρύ κοινό ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing). Ο όρος της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης (3D printing) υιοθετήθηκε από τα κύρια μέσα μαζικής ενημέρωσης. Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση πούδρας και κεφαλές έγχυσης (powder bed and inkjet head 3d printing) αναπτύχθηκε το 1989 από το MIT και το 1995 η εταιρεία Z Corp πήρε τα αποκλειστικά δικαιώματα. Σήμερα, η Z Corp είναι εταιρεία της 3D Systems. Η προσθετική κατασκευή είναι ο ευρύτερος και πιο ολοκληρωμένος όρος. Στην πορεία, ωστόσο, των χρόνων καθιερώθηκε ο όρος της 3D εκτύπωσης να χρησιμοποιείται ως συνώνυμος αυτού της Προσθετικής Κατασκευής. Στην πραγματικότητα ο όρος της 3D εκτύπωσης περιγράφει μόνο μία από τις διαδικασίες της προσθετικής κατασκευής σύμφωνα με την επιτροπή ASTM F42 [2,3].

1.2. Τι είναι η προσθετική κατασκευή

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής είναι εκείνη που χρησιμοποιεί προσθετική διεργασία, συνδέοντας υλικό στρώση με στρώση. Ενώ η προσθετική κατασκευή φαίνεται νέα σε πολλούς, στην πραγματικότητα υπάρχει εδώ και αρκετές δεκαετίες. Είναι μια ακόμη τεχνολογική πρόοδος που έγινε δυνατή με τη μετάβαση από τις αναλογικές στις ψηφιακές διαδικασίες. Στη σημερινή εποχή, μπορεί να φέρει ψηφιακή ευελιξία και αποτελεσματικότητα στις κατασκευαστικές λειτουργίες, καθώς είναι μία τεχνολογία που προσφέρει βελτιωμένη απόδοση, πολύπλοκες γεωμετρίες και απλοποιημένη κατασκευή [11].

Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιώντας λογισμικό δεδομένων σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή CAD (Computer Aided Design) ή τρισδιάστατο σαρωτή αντικειμένων (3D scanner). Κατά τη διαδικασία της εκτέλεσης, το τεμάχιο δημιουργείται από διαδοχικές στρώσεις υλικού (layers) σε ακριβή γεωμετρικά σχήματα [11].

Όπως υποδηλώνει το όνομα της τεχνολογίας αυτής, προσθέτει υλικό για τη δημιουργία ενός αντικειμένου. Η σημαντική διαφοροποίηση της διαδικασίας με τις συμβατικές μεθόδους, όπως οι κατεργασίες κοπής και πιο γενικά αφαίρεσης υλικού (κοπή, τόρνευση ή φρεζάρισμα), εμφανίζεται στην απλούστευση της όλης διαδικασίας με σκοπό τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων απευθείας από το ψηφιακό αρχείο [11].

Με άλλα λόγια, η έμφαση δίνεται στην επιτάχυνση της διαδικασίας δημιουργίας του πρωτοτύπου ή του βασικού μοντέλου από το οποίο στη συνέχεια θα προκύψουν βελτιωμένα μοντέλα, καθώς και το τελικό προϊόν. Οι σύμβουλοι επιχειρήσεων και οι μηχανικοί λογισμικού χρησιμοποιούν επίσης τον όρο ταχεία πρωτοτυποποίηση RP (Rapid Prototyping), για να περιγράψουν μια διαδικασία ανάπτυξης μιας επιχείρησης ή ενός λογισμικού που είναι τμηματικά διαρθρωμένη και η οποία δίνει την ευκαιρία στους πελάτες και τους άλλους ενδιαφερόμενους να εξετάσουν, να σχολιάσουν και να κρίνουν διάφορες ιδέες και λύσεις που προτείνονται ταυτόχρονα όσο διαρκεί η διαδικασία ανάπτυξης [11].

Στην περιοχή της ανάπτυξης προϊόντων, ο όρος Rapid Prototyping έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να δηλώσει τεχνολογίες που δίνουν τη δυνατότητα δημιουργίας φυσικών πρωτοτύπων με τη χρησιμοποίηση απευθείας ψηφιακών δεδομένων. Οι χρήστες της τεχνολογίας RP αντελήφθησαν ότι αυτός ο όρος είναι ανεπαρκής, κυρίως διότι δεν μπορεί να περιγράψει τις πλέον σύγχρονες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας. Η ποιότητα των κατασκευαζόμενων αντικειμένων από τις μηχανές αυτής της

τεχνολογίας έχει βελτιωθεί σε τέτοιο σημείο, ώστε πλέον τα αντικείμενα αυτά να προσομοιάζουν στα τελικά προϊόντα σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό [11].

Σήμερα, πολλά τελικά προϊόντα παράγονται απευθείας από τέτοιες μηχανές, συνεπώς δεν είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν ως «πρωτότυπα». Επίσης, ο όρος RP (Rapid Prototyping) δεν υποδηλώνει την προσθετικού χαρακτήρα κατασκευαστική αρχή αυτών των τεχνολογιών. Μετά από απόφαση της ASTM international, η συγκεκριμένη τεχνολογία ονοματίστηκε Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing). Η συντομογραφία της τεχνολογίας αυτής είναι γνωστή ως AM και η βασική αρχή αυτής είναι το ότι ένα μοντέλο, που αρχικά δημιουργείται με την χρησιμοποίηση ενός τρισδιάστατου συστήματος 3D CAD (Computer Aided Design), μπορεί να κατασκευαστεί άμεσα χωρίς να απαιτείται προηγουμένως ο προγραμματισμός της διαδικασίας παραγωγής του [11].

Παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα δεν είναι τόσο απλό όσο καταρχάς θα νόμιζε κάποιος , η AM απλοποιεί σε σημαντικό βαθμό την διαδικασία κατασκευής 3D αντικειμένων απευθείας από ψηφιακά δεδομένα CAD. Άλλες κατασκευαστικές διεργασίες απαιτούν προσεκτική και λεπτομερή ανάλυση της γεωμετρικής μορφής του κομματιού ώστε να καθοριστεί για παράδειγμα η σειρά κατασκευής των διαφορετικών μορφολογικών χαρακτηριστικών του, το ποια εργαλεία και ποιες κατασκευαστικές διεργασίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν, καθώς και τι είδους διατάξεις συγκράτησης του κομματιού θα απαιτηθούν επιπροσθέτως για την ολοκλήρωση του. Αντίθετα, με την AM απαιτούνται μόνο μερικές βασικές διαστασιακές λεπτομέρειες και κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της μηχανής AM και του χρησιμοποιούμενου υλικού κατασκευής του κομματιού [11].

Το κλειδί για την σωστή κατανόηση λειτουργίας της AM είναι ότι το κομμάτι δημιουργείται με τη διαδοχική πρόσθεση υλικού σε στρώσεις (layers). Η κάθε στρώση αντιστοιχεί σε μία λεπτή διατομή (Cross Section) του κομματιού που προκύπτει από τα αρχικά δεδομένα CAD. Η κάθε στρώση έχει συγκεκριμένο πάχος, οπότε το δημιουργούμενο κομμάτι θα αποτελεί προσέγγιση των αρχικών δεδομένων. Όσο λεπτότερη είναι η κάθε στρώση τόσο πλησιέστερα προς το αρχικό θα είναι το τελικά δημιουργούμενο κομμάτι. Η λειτουργία όλων των σύγχρονων εμπορικά διαθέσιμων μηχανών AM στηρίζεται στη στρωματική προσέγγιση, ενώ τα κύρια σημεία διαφοροποίησής τους είναι το υλικό που μπορούν να χρησιμοποιήσουν καθώς και ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται και συγκολλούνται μεταξύ τους οι στρώσεις. Οι παραπάνω διαφορές καθορίζουν στοιχεία του τελικού κομματιού όπως τη γεωμετρική ακρίβειά του (accuracy) και τις υλικές και μηχανικές ιδιότητές του. Καθορίζουν επίσης παράγοντες όπως τον χρόνο κατασκευής, την έκταση της απαιτούμενης μετεπεξεργασίας (post processing), το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης μηχανής AM και το συνολικό κόστος της μηχανής και της όλης κατασκευαστικής διαδικασίας [11].

1.3. Ποια είναι η χρήση των αντικειμένων προσθετικής κατασκευής

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής AM χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία μοντέλων προϊόντων, με σκοπό την αναπαράσταση της γεωμετρικής μορφής τους κατά την διαδικασία της ανάπτυξης τους. Γενικότερα τα φυσικά μοντέλα βοηθούν στην πλήρη αντίληψη των προθέσεων του σχεδιαστή κατά τη φάση της ανάπτυξης της βασικής σχεδιαστικής ιδέας ενός προϊόντος (Conceptual Design), σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από ότι τα απλά σχέδια στο χαρτί ή τα παραστατικότερα ψηφιακά μοντέλα. Ενώ τα σχέδια δημιουργούνται με μεγαλύτερη ευκολία και πολύ γρήγορα, τις περισσότερες φορές απαιτείται η κατασκευή φυσικού μοντέλου προκειμένου να γίνει πλήρης αξιολόγηση μιας σχεδιαστικής λύσης ή πρότασης [8].

Καθώς τα χρησιμοποιούμενα υλικά, η γεωμετρική ακρίβεια και γενικότερα η όλη ποιότητα του κατασκευαστικού αποτελέσματος της AM βελτιώνονται και η τεχνολογία εξελίσσεται, η AM δεν αποτελεί απλά και μόνο ένα εργαλείο κατασκευής μοντέλων. Με όλο και αυξανόμενο ρυθμό, τα

φυσικά μοντέλα άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την παροχή πολύτιμων πληροφοριών αναφορικά με αυτό που είναι γνωστό ως τα «3 Fs» (Form, Fit, Function), δηλαδή μορφή, συναρμογή, λειτουργία. Αρχικά, τα μοντέλα χρησιμοποιούνταν προκειμένου να κατανοηθεί η μορφή και ο γενικότερος σχεδιασμός ενός προϊόντος. Η βελτίωση της ακρίβειας των διεργασιών ΑΜ επέτρεψε την κατασκευή μοντέλων με γεωμετρικές ανοχές τέτοιες ώστε να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε δοκιμές συναρμολόγησης. Η βελτίωση των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών κατασκευής, έδωσε την δυνατότητα σε συνδυασμό με τον κατάλληλο χειρισμό, να μπορεί να αξιολογηθεί ένα αντικείμενο αναφορικά με το πως τελικά θα λειτουργήσει [8].

Ο ισχυρισμός ότι η ΑΜ είναι χρήσιμη μόνο για την κατασκευή πρωτοτύπων, δεν είναι ακριβής και σίγουρα υποτιμά τις δυνατότητες της τεχνολογίας αυτής. Η ΑΜ συνδυαζόμενη διαδοχικά με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει σημαντικά τους χρόνους και τα κόστη ανάπτυξης ενός προϊόντος. Κάποιες από τις τεχνολογίες αυτές έχουν εξελιχθεί τόσο πολύ που το κατασκευαστικό τους αποτέλεσμα είναι κατάλληλο για τελική χρήση, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην Εικόνα 1.2 Αυτό εξηγεί για ποιο λόγο η ορολογία από «Ταχεία Πρωτοτυποποίηση» μετονομάστηκε σε «Προσθετική Κατασκευή» [22].



Εικόνα 1.2. *Πλαίσιο μηχανής που δεν χρειάστηκε φινίρισμα, εκτός από ένα καθάρισμα μετά το πέρας της διαδικασίας παρασκευής του.[22]*

1.4. Πληροφορίες για τις διεργασίες της προσθετικής κατασκευής

Από την εικονική αναπαράσταση των συστημάτων CAD (Computer Aided Design) μέχρι το τελικό φυσικό αποτέλεσμα της προσθετικής κατασκευής μεσολαβούν αρκετά βήματα. Διαφορετικά προϊόντα εμπλέκουν την ΑΜ με διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό βαθμό. Στα μικρά σε μέγεθος και σχετικά απλά προϊόντα η ΑΜ χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή μοντέλων απεικόνισης της μορφής τους, ενώ στα μεγάλα σε μέγεθος και περισσότερο πολύπλοκα προϊόντα η ΑΜ εμπλέκεται σε πολλές διαφορετικές φάσεις της επαναληπτικής διαδικασίας σχεδιασμού και ανάπτυξης τους [11].

Στις αρχικές φάσεις της διαδικασίας ανάπτυξης ενός προϊόντος, κατά τη διάρκεια των οποίων απαιτούνται μόνο φυσικά μοντέλα, η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται μόνο λόγω της κατασκευαστικής ταχύτητας της. Σε επόμενες φάσεις της διαδικασίας τα απαιτούμενα κομμάτια πιθανόν να χρειάζονται προσεκτικό καθαρισμό και μετεπεξεργασία προτού να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν. Στην περίπτωση αυτή η προσθετική κατασκευή είναι χρήσιμη διότι μπορεί να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε μορφολογική πολυπλοκότητα χωρίς την χρήση ειδικών εργαλείων [11].

Το πρώτο στάδιο σε κάθε κατασκευαστική διαδικασία αφορά την σύλληψη της ιδέας για την εκάστοτε κατασκευή που πρόκειται να δημιουργηθεί. Μελετάται η λειτουργικότητά της, η εμφάνισή της και ουσιαστικά δημιουργείται ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο με βάση την ιδέα που προϋπάρχει. Με τη χρήση λογισμικών συστημάτων τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD ή τρισδιάστατου σαρωτή (3D scanner), πραγματοποιείται ακριβής απεικόνιση του μοντέλου. Τα περισσότερα σύγχρονα εργαλεία CAD μοντελοποίησης μπορούν να αποδώσουν ξεκάθαρες γεωμετρικές αναπαραστάσεις ενός τμήματος [11].

Στην συνέχεια, η δημιουργία STL αρχείου όπως θα επεξηγηθεί στην υποενότητα 1.7, πραγματοποιείται από το αρχείο CAD. Σχεδόν όλες οι μηχανές προσθετικής κατασκευής δέχονται αρχεία αυτής της μορφής. Έπειτα τα αποκωδικοποιούν με βάση το λειτουργικό σύστημά τους για να πραγματοποιηθεί το τρισδιάστατο εικονικό μοντέλο. Ενώ παράλληλα να σημειωθεί ότι σχεδόν όλα τα συστήματα CAD μπορούν να εξάγουν αυτά τα αρχεία. Η κρισιμότητα αυτού του αρχείου έγκειται στην ικανότητα περιγραφής της κλειστής εξωτερικής επιφάνειας του πρωτότυπου μοντέλου CAD και στην δημιουργία της βάσης για το σχηματισμό των τομών [11].

Οι παράμετροι που λαμβάνονται στο στάδιο της ρύθμισης της μηχανής διαφοροποιούνται ανάλογα τη μηχανή που χρησιμοποιείται και το προϊόν που πρόκειται να κατασκευαστεί. Ελέγχεται το πάχος κάθε στρώσης, οι κατασκευαστικοί παράμετροι ανάλογα με το υλικό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, καθώς και ο χρόνος κατασκευής, ο οποίος επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων. Λανθασμένες ρυθμίσεις μπορούν να επιφέρουν κακό ποιοτικό αποτέλεσμα [11].

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής αναδεικνύεται για τον αυτοματοποιημένο χαρακτήρα της, διότι η φάση της κατασκευής εξαρτάται ολοκληρωτικά από τον υπολογιστή. Εφόσον ληφθούν οι παράμετροι, γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις στην μηχανή, έχει ελεγχθεί ο μηχανισμός εναπόθεσης της πρώτης ύλης, το ύψος της βάσης τοποθέτησης και κατασκευής του μέρους, καθώς και η κεφαλή του εργαλείου που θα προκαλέσει την απόθεση, τέλος πραγματοποιείται η κατασκευή. Όσο δεν εμφανίζονται σφάλματα, η κατασκευή θα συνεχίζει να εκτυλίσσεται μέχρι την ολοκλήρωση της [11].

1.5. Πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής

Έχει διαπιστωθεί ότι η προσθετική κατασκευή παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται η καλύτερη απεικόνιση των ιδεών, ο ευκολότερος εντοπισμός σχεδιαστικών ατελειών, ο μειωμένος χρόνος πρωτοτυποποίησης και η σημαντικότατη μείωση του κόστους, που συνδέεται με τη δυνατότητα ανάπτυξης ορθών σχεδιαστικών λύσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα [2,3,11].

Το πλεονέκτημα της ταχύτητας δεν αναφέρεται μόνο στον χρόνο που δαπανάται για την κατασκευή ενός κομματιού. Η επιτάχυνση της ανάπτυξης ενός προϊόντος οφείλεται κυρίως στο ότι χρησιμοποιούνται υπολογιστές από την αρχή μέχρι το τέλος κατά τη διαδικασία παραγωγής. Ως σημείο εκκίνησης χρησιμοποιείται το 3D CAD σύστημα και η μεταφορά των δεδομένων στην μηχανή AM είναι απρόσκοπτη, υπάρχει δηλαδή μικρότερος προβληματισμός αναφορικά με την μετατροπή των δεδομένων ή την ερμηνεία του σχεδιαστικού στόχου [2,3,11].

Ασχέτως με την πολυπλοκότητα του κομματιού που πρόκειται να κατασκευαστεί, η κατασκευή στη μηχανή AM πραγματοποιείται σε ένα και μόνο βήμα. Οι περισσότερες από τις υπόλοιπες κατασκευαστικές διεργασίες θα απαιτούσαν την εκτέλεση πολλαπλών και επαναληπτικών βημάτων. Καθώς εντάσσονται περισσότερα χαρακτηριστικά στην προτεινόμενη σχεδιαστική λύση, ο αριθμός των βημάτων αυτών μπορεί να αυξηθεί δραματικά. Ακόμα και μια μικρή σχεδιαστική αλλαγή μπορεί να επιφέρει σημαντική αύξηση στον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής με συμβατικές μεθόδους. Συνεπώς η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί αποτελεσματικό τρόπο υπολογισμού του χρόνου κατασκευής ενός μοντέλου, ανεξάρτητα από το ποιες αλλαγές θα γίνουν κατά τις αρχικές διαμορφωτικές φάσεις της ανάπτυξης ενός προϊόντος [2,3,11].

Επιπλέον, ο αριθμός των απαιτούμενων διαδικασιών και πόρων μπορεί να μειωθεί σημαντικά με την AM. Εάν ένας επιδέξιος τεχνίτης αναλάμβανε τη κατασκευή ενός πρωτοτύπου με βάση μια

σειρά σχεδίων CAD, θα ανακάλυπτε ότι για την ολοκλήρωση της κατασκευής του θα έπρεπε να ακολουθήσει μια σειρά από πολύ συγκεκριμένα βήματα. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος ότι πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα πλήθος από μεθόδους και τεχνικές που ξεκινούν από την κατεργασία με το χέρι και μέσω τεχνικών χύτευσης και διαμόρφωσης καταλήγουν σε CNC κατεργασία. Η κατεργασία με το χέρι και άλλες ανάλογες τεχνικές είναι ανιαρές, επίπονες και συνοδεύονται από πιθανά λάθη. Η τεχνική της χύτευσης είναι δύσκολη και μπορεί να δημιουργεί πολλά απορρίμματα, ενώ επιπλέον απαιτεί την κατασκευή ενός ή περισσοτέρων καλουπιών. Η κατεργασία με εργαλειομηχανές CNC απαιτεί λεπτομερή και προσεκτικό προγραμματισμό, καθώς και μια προσέγγιση διαδοχικών σταδίων, που είναι πολύ πιθανόν να απαιτεί με τη σειρά της, τη κατασκευή ιδιοσκευών συγκράτησης. Προϋπόθεση για όλα τα παραπάνω είναι αφενός μεν ότι οι προαναφερθείσες κατασκευαστικές μεθοδολογίες είναι άμεσα διαθέσιμες, αφετέρου δε ότι οι τεχνίτες είναι γνώστες αυτών και είναι σε θέση να τις εκτελέσουν με επιτυχία [2,3,11].

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να αποφευχθούν πολλές από εκείνες τις διαδικασίες οι οποίες αποτελούνται από πολλές φάσεις. Η AM συνοδευόμενη από άλλες τεχνικές όπως η χύτευση πλαστικών με εύκαμπτα καλούπια σιλικόνης, η διάτρηση, η στίλβωση, η λείανση, κ.λπ., είναι σε θέση να παράγει μεγάλη ποικιλία κομματιών με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά. Μηχανουργεία που έχουν υιοθετήσει τις τεχνολογίες AM είναι σαφέστατα καθαρότερα, έχουν βελτιώσει τη ροή της εργασίας τους και είναι σε θέση να αναλάβουν τη διεκπεραίωση μεγαλύτερης ποικιλίας εργασιών από οτιδήποτε στο παρελθόν. Η τεχνολογία αυτή έχει φέρει επανάσταση στην ανάπτυξη και την παραγωγή προϊόντων. Ο χαρακτήρας της τεχνολογίας αυτής έχει προκαλέσει αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται τα προϊόντα και συμβάλει στην ίδρυση νέων επιχειρήσεων [2,3,11].

1.6. Οι μοναδικές ιδιότητες της προσθετικής κατασκευής

Ο στρωματικός προσθετικός χαρακτήρας της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής AM οδηγεί σε μοναδικές δυνατότητες, σε σύγκριση με τις περισσότερες από τις άλλες κατασκευαστικές διεργασίες. Οι μοναδικές δυνατότητες που παρέχονται από την AM είναι οι εξής [11]:

- Η μορφολογική πολυπλοκότητα (Shape Complexity), όπου στην πράξη είναι δυνατόν να κατασκευαστεί οποιασδήποτε γεωμετρικής μορφής κομμάτι.
- Η ιεραρχικά διαβαθμισμένη πολυπλοκότητα (Hierarchical Complexity), το οποίο σημαίνει πως τα χαρακτηριστικά μπορούν να σχεδιαστούν εμφανίζοντας μορφολογική πολυπλοκότητα σε πολλαπλές κλίμακες μεγεθών.
- Η λειτουργική πολυπλοκότητα (Functional Complexity), το ότι μπορούν δηλαδή να κατασκευαστούν λειτουργικές διατάξεις και όχι μονάχα μεμονωμένα κομμάτια, σε μία μόνο κατασκευαστική διεργασία.
- Η πολυπλοκότητα του υλικού (Material Complexity). Κάθε χρονική στιγμή, είναι εφικτό να ο χειριστής να έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί το υλικό ως προς ένα σημείο μόνο ή και ως προς ολόκληρη συγχρόνως την στρώση, είτε ως μοναδικό υλικό είτε ως συνδυασμό πολλών υλικών.

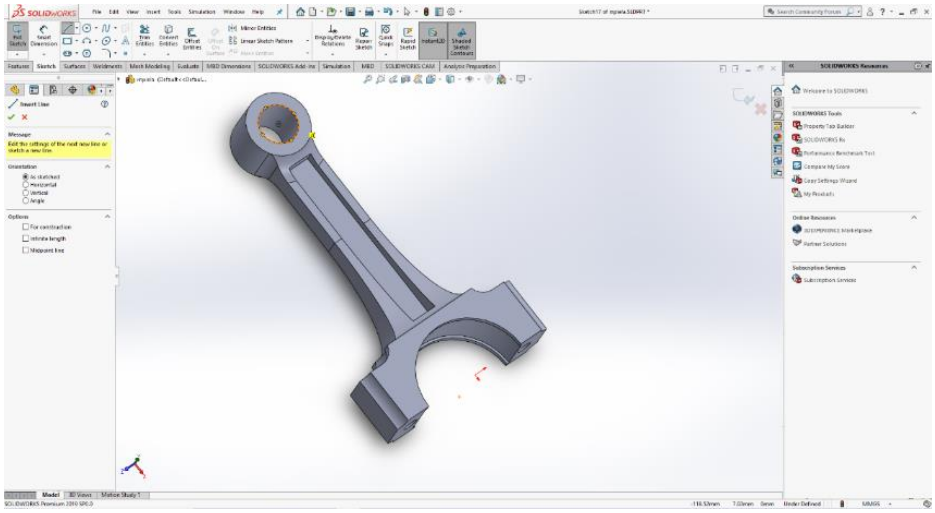
1.7. Βήματα προσθετικής κατασκευής

Η διεργασία κατασκευής, δηλαδή τα βήματα που θα ακολουθηθούν για να κατασκευαστεί ένα οποιοδήποτε προϊόν με τη βοήθεια της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής, περιέχει κάποιες ενέργειες που πρέπει να προηγηθούν πριν ξεκινήσει η κατασκευή του τεμαχίου σε οποιαδήποτε μηχανή. Τα βήματα είναι ίδια για όλες τις τεχνολογίες, όμως οι ενέργειες που απαιτούνται σε κάθε στάδιο μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την τεχνολογία και την μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί κατά

την κατασκευή. Οι διαφορετικές τεχνολογίες της ΑΜ χειρίζονται αυτή την αλληλουχία των βημάτων με εντελώς διαφορετικό τρόπο. Παρακάτω θα αναλυθούν τα οκτώ κύρια διαδοχικά βήματα της διαδικασίας.

Βήμα 1ο: Computer Aided Design.

Όλα τα κομμάτια που κατασκευάζονται με ΑΜ αρχίζουν από ένα ψηφιακό μοντέλο με το οποίο περιγράφεται η εξωτερική γεωμετρία τους. Προς τούτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν οποιοδήποτε επαγγελματικό λογισμικό CAD στερεάς μοντελοποίησης, το αποτέλεσμα όμως, του οποίου πρέπει οπωσδήποτε να είναι μια 3D στερεά ή επιφανειακή αναπαράσταση όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην Εικόνα 1.3. Συσκευές αντίστροφης μηχανικής Reverse Engineering (π.χ. 3D laser και οπτικής σάρωσης) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αυτής της αναπαράστασης.



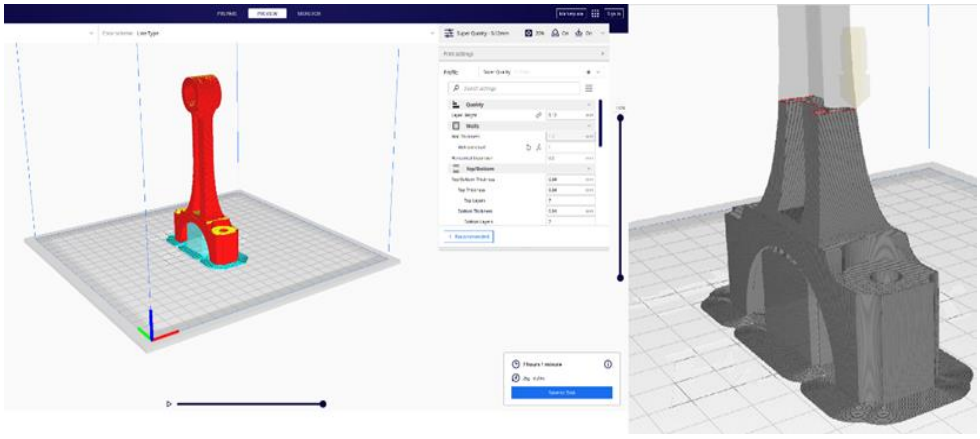
Εικόνα 1.3. *Το σχεδιαστικό περιβάλλον στο CAD λογισμικό SOLIDWORKS 2019 κατά την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου ενός διωστήρα.*

Βήμα 2ο: Μετατροπή σε αρχείο STL.

Σχεδόν όλες οι μηχανές ΑΜ δέχονται ως δεδομένα αρχεία της μορφής STL, το οποίο αποτελεί ένα απλό τρόπο περιγραφής ενός μοντέλου CAD, όσον αφορά τη γεωμετρική του μορφή. Όλα σχεδόν τα συστήματα CAD σήμερα μπορούν να εξάγουν δεδομένα σε μορφή αρχείου STL. Το αρχείο αυτό περιγράφει την κλειστή εξωτερική επιφάνεια του αρχικού μοντέλου CAD και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό των στρώσεων.

Βήμα 3ο: Μεταφορά στη μηχανή ΑΜ και επεξεργασία του αρχείου STL.

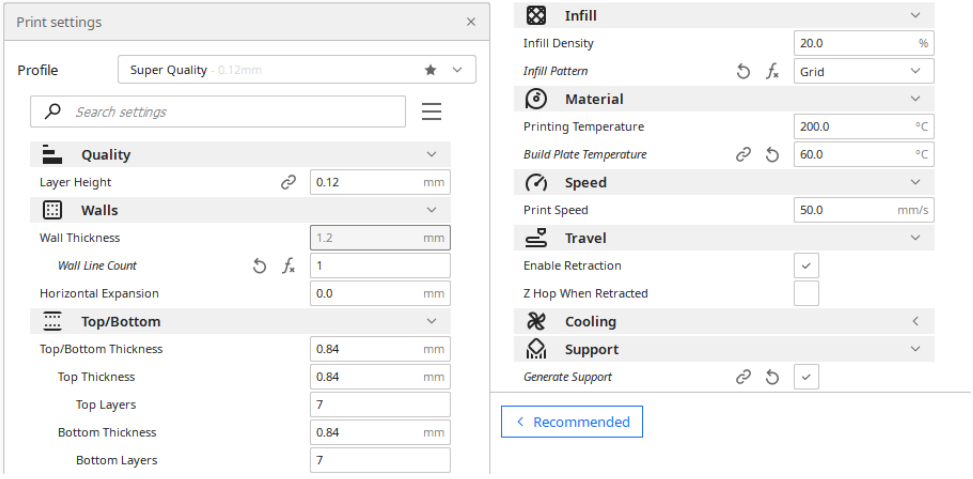
Το αρχείο STL που περιγράφει το κομμάτι πρέπει να μεταφερθεί στη μηχανή ΑΜ. Εδώ, θα πρέπει το αρχείο να υποστεί μια σχετική επεξεργασία όπως περιγράφεται στην Εικόνα 1.4, ώστε το κομμάτι να έχει το κατάλληλο μέγεθος για την κατασκευή του, θέση και προσανατολισμό. Για παράδειγμα ένα λογισμικό για αυτή τη χρήση είναι το CURA το οποίο στο τέλος παράγει βάσει όλων των παραμέτρων, τον κατάλληλο G-Code για την παρασκευή του κομματιού. Ο G-Code (κώδικας G) ο οποίος έχει πολλές παραλλαγές, είναι η συνήθης ονομασία για την πιο διαδεδομένη γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου NC (Numerical Control). Χρησιμοποιείται κυρίως για την καθοδήγηση αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών, στην κατασκευή προϊόντων με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή CAM (Computer Aided Manufacturing) [4].



Εικόνα 1.4. *Το σχεδιαστικό περιβάλλον στο λογισμικό CURA για την δημιουργία του κατάλληλου κώδικα (G-Code) για την ΑΜ μηχανή καθώς και για την προεπισκόπηση ενός διωστήρα προς παρασκευή. [4]*

Βήμα 4ο: Προετοιμασία της μηχανής.

Η μηχανή ΑΜ πρέπει να προετοιμαστεί κατάλληλα, προτού αρχίσει η διαδικασία κατασκευής. Η προετοιμασία αυτή αναφέρεται σε κατασκευαστικές παραμέτρους όπως είναι οι περιορισμοί που εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής, η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας, το πάχος της στρώσης, οι διάφορες επιλογές χρονισμού κ.λπ. όπως παρατηρείται στην παρακάτω Εικόνα 1.5.



Εικόνα 1.5. *Κατασκευαστικοί παράμετροι στο CURA [4].*

Βήμα 5ο: Κατασκευή.

Η κατασκευή του κομματιού είναι κυρίως μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που εκτελείται χωρίς ουσιαστική επιτήρηση. Απαιτείται στοιχειώδης μόνο παρακολούθηση της μηχανής, ώστε να αποφευχθεί ο παράγοντας λάθους, όπως για παράδειγμα, να έχει εξαντληθεί το υλικό κατασκευής ή να υπάρχει κάποιο σφάλμα στην ηλεκτρική τροφοδοσία της μηχανής και το λογισμικό κ.λπ..

Βήμα 6ο: Απομάκρυνση.

Όταν η μηχανή ΑΜ ολοκληρώσει την κατασκευή, το κομμάτι πρέπει να απομακρυνθεί από τη μηχανή όπως στην Εικόνα 1.6. Τούτο απαιτεί κατά κάποιο τρόπο, αλληλεπίδραση με τη μηχανή η

οποία μπορεί να διαθέτει ασφαλιστικές δικλείδες/ μηχανισμούς που να εξασφαλίζουν για παράδειγμα, ότι η θερμοκρασία της, είναι αρκούντως χαμηλή ή ότι δεν βρίσκονται σε κίνηση κάποια μέρη της.



Εικόνα 1.6. *Απομάκρυνση του παρασκευασμένου κομματιού από το τραπέζι εκτύπωσης.*

Βήμα 7ο: Μετεπεξεργασία.

Τα κομμάτια αφού απομακρυνθούν από τη μηχανή μπορεί να μην είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν αμέσως και να χρειάζονται κάποιο επιπλέον καθαρισμός. Τα κομμάτια ενδέχεται κατά το στάδιο αυτό να μη διαθέτουν την απαιτούμενη μηχανική αντοχή ή να έχουν ακόμη τα στηρίγματα (supports) τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν. Τούτο πολλές φορές απαιτεί χρόνο, καθώς και προσεκτική χειρωνακτική εργασία από έμπειρο προσωπικό.

Βήμα 8ο: Εφαρμογή.

Στο στάδιο αυτό τα κομμάτια μπορεί να είναι έτοιμα για χρήση. Εντούτοις, είναι δυνατόν να μην έχουν την αποδεκτή ποιότητα για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα και να απαιτείται περαιτέρω μικροεπεξεργασία. Για παράδειγμα, μπορεί να απαιτείται αστάρωμα ή βαφή, ώστε να έχουν μια αποδεκτή επιφανειακή υφή και φινίρισμα. Εάν το απαιτούμενο φινίρισμα είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, τότε οι επεξεργασίες αυτές μπορεί να είναι περίπλοκες και χρονοβόρες όπως με το δοκίμιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.7. Μπορεί, επίσης, τα κομμάτια να πρέπει να συναρμολογηθούν μαζί με άλλα μηχανικά ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα και κομμάτια, προκειμένου να σχηματίσουν το τελικό μοντέλο ή προϊόν.



Εικόνα 1.7. *Φινίρισμα παρασκευασμένου κομματιού από διαδικασία PBF (Powder Bed Fusion).*

Κεφάλαιο 2: Μηχανήματα προσθετικής κατασκευής

Τα διάφορα ΑΜ συστήματα εστιάζουν σε διαφορετικές αγορές. Για παράδειγμα υπάρχουν μεγάλες δαπανηρές μηχανές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία υλικών για την κατασκευή κομματιών, και οι οποίες παρουσιάζουν υψηλή κατασκευαστική ακρίβεια, αντοχή υλικού και ευελιξία στη χρήση τους. Το σημαντικότερο είναι ότι μπορούν να ρυθμιστούν κατάλληλα, προκειμένου να ανταποκριθούν σε ειδικές απαιτήσεις και ανάγκες. Επίσης υπάρχουν μηχανές πιο οικονομικές, όπου έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν με την ελάχιστη προετοιμασία και να παράγουν κομμάτια που διαθέτουν αποδεκτή ποιότητα με αξιόπιστο τρόπο.

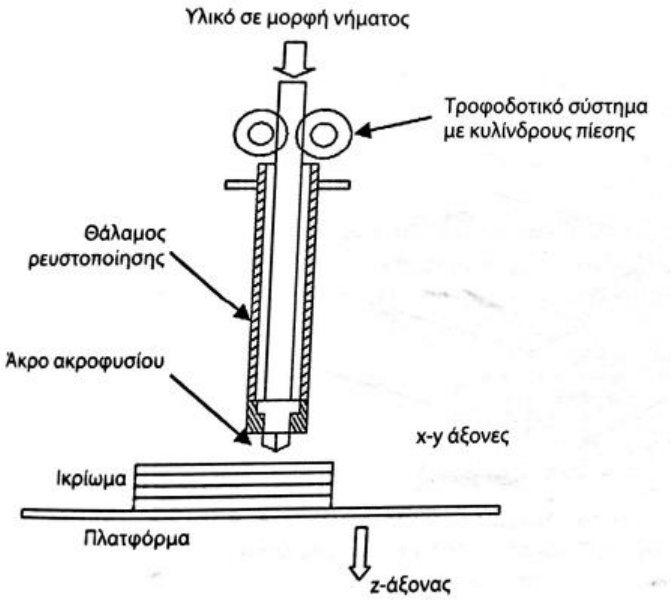
Στο παρόν κεφάλαιο θα αναδειχθούν οι κατηγορίες της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής, οι οποίες έχουν αλλάξει τον κόσμο και έχουν συμβάλει στην ταχεία πρωτοτυποποίηση αλλά και παραγωγή στην βιομηχανία. Τα είδη εκείνα της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής, δίνουν τη δυνατότητα να κατασκευαστούν πολύπλοκες ή εξατομικευμένες γεωμετρίες σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο και με χαμηλότερο κόστος παραγωγής.

Με την εκμετάλλευση αυτών των μηχανών είναι δυνατό στην σημερινή εποχή να αξιοποιηθεί στο μέγιστο ο βέλτιστος σχεδιασμός που προσφέρεται από τα λογισμικά CAD (Computer Aided Design) και CAE (Computer Aided Engineering). Αναλόγως της μεθόδου προσθετικής κατασκευής διαφέρουν τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του παραγόμενου αντικειμένου, οι μηχανικές ιδιότητες και ο χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή του, καθώς ανάλογα με την μέθοδο επίσης εξαρτάται εάν θα είναι μαζική η παραγωγή ή όχι. Τα κύρια είδη μεθόδων προσθετικής κατασκευής στην βιομηχανία είναι τα εξής:

- Συστήματα εξώθησης υλικού FDM (Fused Deposition Modelling)
- Φωτοπολυμερισμός σε κάδο VP (Vat Photopolymerization), SL (Stereolithography)
- Διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη PBF (Powder Bed Fusion)
- Διεργασίες εναπόθεσης υλικού με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη DED (Directed Energy Deposition)

2.1. Συστήματα εξώθησης υλικού – Fused Deposition Modelling (FDM)

Το υλικό εξωθείται μέσω του εξωθητήρα (extruder) με την άσκηση της πίεσης έξω από το δοχείο (hot end) διαμέσου ενός ακροφυσίου (nozzle). Εάν η ασκούμενη πίεση παραμένει σταθερή, τότε το εξωθούμενο υλικό θα ρέει με σταθερή ταχύτητα και θα έχει σταθερή διάμετρο διατομής. Η διάμετρος αυτή θα παραμένει σταθερή εάν η ταχύτητα κίνησης του ακροφυσίου κατά μήκος της επιφάνειας απόθεσης μένει σταθερή ανάλογα με την ταχύτητα ροής του υλικού. Το εξωθούμενο υλικό θα πρέπει να είναι σε ημιστερεά κατάσταση κατά την έξοδο του από το ακροφύσιο, ενώ εφόσον εναποτεθεί πρέπει να σταθεροποιείται πλήρως, διατηρώντας όμως το σχήμα του. Επιπλέον θα πρέπει να συγκολλείται στο υλικό που έχει ήδη εναποτεθεί στην προηγούμενη στρώση προκειμένου να δημιουργηθεί ένα συμπαγές αντικείμενο.



Εικόνα 2.1. *Σχηματική αναπαράσταση συστήματος εξώθησης υλικού.* *[11]*

Η μηχανή ΑΜ θα πρέπει να είναι σε θέση να πραγματοποιεί σάρωση στο οριζόντιο επίπεδο, καθώς επίσης να ξεκινάει και να σταματάει τη ροή του υλικού κατά την διαδικασία της σάρωσης. Μετά την συμπλήρωση της μίας στρώσης, θα πρέπει να κινηθεί είτε το ακροφύσιο προς τα πάνω είτε το κρεβάτι (bed) που γίνεται η εκτύπωση επάνω του, προς τα κάτω, ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί η επόμενη στρώση (Εικόνα 2.1).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των διεργασιών FDM είναι τα εξής [16]:

- Τροφοδότηση με υλικό (loading)
- Ρευστοποίηση υλικού (liquefaction)
- Εφαρμογή πίεσης για την κίνηση του υλικού διαμέσου του ακροφυσίου
- Εξώθηση (extrusion)
- Σχεδιογράφηση (plotting) σύμφωνα με προκαθορισμένη διαδρομή (path) και με ελεγχόμενο τρόπο
- Συγκόλληση (bonding) του υλικού στον εαυτό του ή σε δευτερεύοντα υλικά, προκειμένου να σχηματίσει μία συνεκτική στερεά δομή (structure)
- Ενσωμάτωση (inclusion) δομών στηριγμάτων (support structures) ώστε να είναι δυνατή η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

2.1.1. Τροφοδότηση υλικού

Οι συνηθέστερες μορφές υλικών είναι σφαιρίδια (pellet), πούδρα και συνεχές νήμα (filament). Ο θάλαμος που υπάρχει χρησιμεύει ως ένας χώρος όπου στον οποίο πραγματοποιείται η ρευστοποίηση του υλικού. Η τροφοδότηση του θαλάμου αυτού γίνεται είτε με την βαρύτητα είτε μέσω εξωθητικών μηχανισμών (extruder), όπως για παράδειγμα, με γρανάζια ή με έναν κοχλία. Το συνηθέστερο είναι ο μηχανισμός εξώθησης να δημιουργεί την απαραίτητη πίεση για να πραγματοποιηθεί η εξώθηση από το ακροφύσιο [16].

2.1.2. Ρευστοποίηση

Το υλικό που βρίσκεται μέσα στον θάλαμο θα ρευστοποιηθεί ώστε να μπορέσει με την πίεση της εξώθησης να βγει από το ακροφύσιο. Έπειτα στερεοποιείται ταχύτατα μετά την εξώθηση του. Η θερμοκρασία του θαλάμου επιτυγχάνεται είτε με πηνία γύρω από τον θάλαμο, είτε με μια ή παραπάνω αντιστάσεις. Το υλικό στο εσωτερικό του θαλάμου παραμένει σε κατάσταση τήξης, ενώ γίνεται πάντα προσπάθεια από τον χειριστή να ορίζεται η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία ώστε να αποφευχθούν προβλήματα όπως η υποβάθμιση του υλικού ή ακόμη και η ανάφλεξή του αφήνοντας υπολείμματα στον θάλαμο ρυπαίνοντας το τήγμα. Μια υψηλή θερμοκρασία εντός του θαλάμου απαιτεί ισχυρότερη τήξη κατά την εξώθηση [16].

2.1.3. Εξώθηση

Το ακροφύσιο καθορίζει την μορφή και το μέγεθος του εξωθούμενου νήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του ακροφυσίου, τόσο πιο μεγάλη είναι η ροή του τάγματος αλλά τόσο πιο μεγάλη θα είναι η απόκλιση της ακρίβειας που θα υπάρχει σε σχέση με το αρχικό CAD σχέδιο. Για την επίτευξη της μεγαλύτερης ακρίβειας δεν θα πρέπει κανένα γεωμετρικό χαρακτηριστικό να ξεπερνά την διάμετρο του ακροφυσίου, ώστε να αναπαραχθεί πιστά και να διαθέτει ικανοποιητική μηχανική αντοχή. Ουσιαστικά οι διεργασίες εξώθησης FDM είναι καταλληλότερες για σχετικά μεγαλύτερα κομμάτια τα οποία έχουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά διπλάσια από την διάμετρο του ακροφυσίου [16].

2.1.4. Στερεοποίηση

Ιδανικά, εφόσον εξωθηθεί και εναποτεθεί το υλικό, πρέπει να διατηρεί το ίδιο σχήμα και μέγεθος. Η βαρύτητα και η επιφανειακή τάση μπορούν να επηρεάσουν το σχήμα και το μέγεθος. Επίσης το μέγεθος ενδέχεται να μεταβληθεί σύμφωνα με φαινόμενα που διέπουν την ψύξη και πήξη του. Η ψύξη μπορεί να αποτελεί μία μη γραμμική διεργασία και εάν η μη γραμμικότητα είναι μεγάλη, τότε το πιθανότερο είναι πως το δημιουργούμενο κομμάτι θα παραμορφωθεί κατά την διάρκεια της ψύξης. Αυτό ελαχιστοποιείται εξασφαλίζοντας τη διατήρηση μίας ελάχιστης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θαλάμου και της ατμόσφαιρας περιβάλλοντος (όπως π.χ. με έναν περιβαλλοντικά ελεγχόμενο θάλαμο) [16].

2.1.5. Συγκόλληση

Για τα συστήματα που χρησιμοποιούν θερμότητα πρέπει να υπάρχει αρκετή παραμένουσα θερμική ενέργεια για να ενεργοποιήσει τις επιφάνειες των γειτονικών περιοχών, προκαλώντας την συγκόλληση. Από την στιγμή που το υλικό θα εξωθηθεί, πρέπει να στερεοποιηθεί και να συγκολληθεί στο γειτονικό υλικό, ώστε το παραγόμενο αντικείμενο να αποτελεί ένα συμπαγές σώμα [16].

2.1.6. Δημιουργία στηριγμάτων

Όλα τα ΑΜ συστήματα πρέπει να διαθέτουν κάποιο τρόπο για να στηρίζουν τα ελευθέρα και ασύνδετα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά και για να διατηρούν όλα τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου κομματιού στην θέση τους κατά την διάρκεια της παραγωγής. Στα συστήματα εξώθησης τέτοιου είδους χαρακτηριστικά διατηρούνται στην θέση τους μέσω επιπρόσθετης κατασκευής στηριγμάτων. Τα στηρίγματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [16]:

- Στηρίγματα από παρόμοιο υλικό
- Στηρίγματα από δευτερεύον υλικό

Ένα σύστημα εξώθησης FDM που είναι δομημένο με τον απλούστερο τρόπο διαθέτει μόνο έναν θάλαμο εξώθησης, αυτό σημαίνει πως τα στηρίγματα θα είναι από το ίδιο υλικό παραγωγής όπως το παραγόμενο κομμάτι. Αυτό απαιτεί τα αντικείμενα και τα στηρίγματα να έχουν σχεδιαστεί και τοποθετηθεί το ένα σε σχέση με το άλλο ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεση τους σε μεταγενέστερο χρόνο. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος αφαίρεσης των στηριγμάτων είναι να είναι φτιαγμένα από διαφορετικό υλικό. Για παράδειγμα εάν το υλικό των στηριγμάτων είναι υδατοδιάλυτο, τότε απλά αρκεί να βυθιστεί σε νερό το παραχθέν κομμάτι, έχοντας ως αποτέλεσμα να αφαιρεθούν τα στηρίγματα με την μικρότερη δυνατή καταπόνηση του κομματιού αυτού [16].

2.1.7. Σχεδιογράφηση

Σχεδόν σε όλα τα συστήματα AM, οι μηχανές εξώθησης υλικού δέχονται δεδομένα από CAD συστήματα μέσω του προτύπου του STL αρχείου. Αυτή η μορφή αρχείου επιτρέπει τον εύκολο υπολογισμό του προφίλ της κατασκευαζόμενης διατομής (slice profile), παρέχοντας το περίγραμμα κάθε στρώσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το λογισμικό ελέγχου πρέπει να καθορίσει τον τύπο συστήματος, λόγω του ότι οι κεφαλές πραγματοποιούν φυσική εναπόθεση υλικού που συμπληρώνει περιοχές οι οποίες προηγουμένως αποτελούσαν κενό χώρο. Η διαστασιολογική ακρίβεια επιτυγχάνεται ξεκινώντας πρώτα με τη σχεδιογράφηση του υλικού του περιγράμματος της διατομής , το οποίο μετά λειτουργεί ως μια περιοχή συγκράτησης, για το υλικό συμπλήρωσης του εσωτερικού. Το περίγραμμα σχεδιογραφείται με χαμηλή ταχύτητα για να εξασφαλίζεται η σταθερή ροή του υλικού. Το περίγραμμα καθορίζεται μέσω της εξαγωγής των τομών του κομματιού και των τριγώνων του STL αρχείου. Ο καθορισμός του μοτίβου συμπλήρωσης για το εσωτερικό, πρέπει να ικανοποιεί κάποιες απαιτήσεις. Πρώτα από όλα, πρέπει να υπάρχει μία αντιστάθμιση προς το εσωτερικό του περιγράμματος (offset) και να τοποθετηθεί το ακροφύσιο στο εσωτερικό αυτού παρουσιάζοντας ελάχιστη επικάλυψη. Το μοτίβο μπορεί να μην είναι μία συνεχής αδιάλειπτη τροχιά για κάποιο συγκεκριμένο σχήμα, είναι προτιμότερο να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερες μεμονωμένες διαδρομές [16].

2.1.8. Υλικά για FDM

Διατίθεται μία μεγάλη ποικιλία υλικών που χρησιμοποιείται από την FDM τεχνολογία, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στον πίνακα 2.1.

PLA – PLA+	PVA
PETG – PETG+	PC
ABS – ABS+	Metal
TPU	T-Glase
Wood	PCL
PA (Nylon)	TPE
Flex	PEI Ultem
PP	HIPS
ASA	Durabio
PEEK	Ultrat
TPC	ESD
BVOH	PMMA
PPSU	

Πίνακας 2.1. *Υλικά για FDM.*

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία FDM (Fused Deposition Modelling) λειτουργεί καλύτερα με πολυμερή υλικά, τα οποία εμφανίζουν έναν άμορφο χαρακτήρα σε σύγκριση με τα πολυμερή, τα οποία που παρουσιάζουν υψηλή κρυσταλλικότητα και ενδείκνυνται για τις PBF (Powder

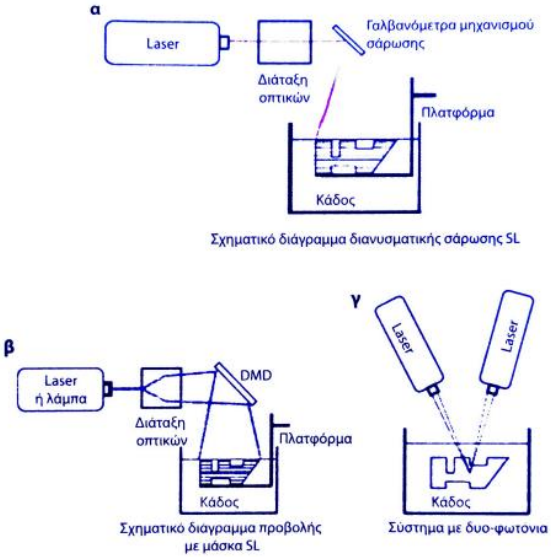
Bed Fusion) διεργασίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι τα πολυμερή που λειτουργούν καλύτερα είναι εκείνα των οποίων η εξώθηση πραγματοποιείται σε μορφή παχύρευστης πάστας και όχι σε κάποια άλλη μορφή χαμηλότερης συνεκτικότητας. Ως άμορφα πολυμερή τα υλικά αυτά δεν έχουν αυστηρά καθορισμένο σημείο τήξης. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, το υλικό ολοένα και μαλακώνει, ενώ η συνεκτικότητα μειώνεται συνεχώς. Η τιμή της συνεκτικότητας στην οποία τα άμορφα πολυμερή μπορούν να εξωθηθούν με την βοήθεια πίεσης, είναι αρκετά υψηλή ώστε το σχήμα τους να διατηρείται σε μεγάλο βαθμό αναλλοίωτο και μετά την εξώθηση, επιτρέποντας έτσι την ταχύτητα και εύκολη στερεοποίησή τους. Επίσης, όταν προστίθεται υλικό σαν μία νέα στρώση, το προηγουμένως εξωθημένο και εναποθετημένο υλικό συγκολλείται εύκολα με αυτό. Αυτό επίσης διαφέρει και από την τεχνολογία SLS, η οποία βασίζεται στην υψηλή κρυσταλλικότητα του υλικού της πούδρας, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι θα υπάρξει μία σαφέστατη αλλαγή του υλικού από την κατάσταση της πούδρας σε μια ρευστή ή υγρή κατάσταση σε ένα σαφώς καθορισμένο θερμοκρασιακό εύρος [16].

2.1.9. Συστήματα εξώθησης υλικού FDM κεραμικών

Η FDM διεργασία, μπορεί να εφαρμοστεί για την εξώθηση πάστας κεραμικού υλικού, η οποία παρουσιάζει ταχεία στερεοποίηση. Τα δημιουργούμενα κομμάτια μπορούν να υποστούν θερμική επεξεργασία σε κλίβανο υψηλών θερμοκρασιών, προκειμένου να συντηχθούν τα σωματίδια του κεραμικού υλικού και ταυτόχρονα να αυξήσουν την πυκνότητα τους. Τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα παρουσιάζουν πολύ καλές ιδιότητες, ενώ διαθέτουν τα χαρακτηριστικά της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των διεργασιών AM. Επίσης η FDM είναι δυνατόν να εφαρμοστεί για σύνθετα κεραμικά υλικά [16].

2.2. Φωτοπολυμερισμός σε κάδο - Vat Photopolymerization (VP), (SL)

Οι διεργασίες φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιούν ως πρωταρχικά υλικά υγρά, ρητίνες που στερεοποιούνται όταν ακτινοβοληθούν ή και φωτοπολυμερή. Τα περισσότερα φωτοπολυμερή αντιδρούν σε ακτινοβολία μήκους κύματος εντός της υπεριώδους περιοχής UV. Επίσης χρησιμοποιούνται και ορισμένα συστήματα ορατού φωτός. Υπό την επίδραση της ακτινοβολίας, τα υλικά αυτά αντιδρούν χημικά και στερεοποιούνται. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται φωτοπολυμερισμός.



Εικόνα 2.2. *Σχηματικά διαγράμματα των τριών προσεγγίσεων της διεργασίας φωτοπολυμερισμού. [11]*

Η διαδικασία της διεργασίας ακολουθεί την παρακάτω αλληλουχία:

Υπάρχει το laser πολυμερισμού, η διάταξη οπτικών, ο μηχανισμός σάρωσης, ο κάδος και η πλατφόρμα. Η πλατφόρμα βρίσκεται εντός του κάδου και κινείται συνήθως ως προς τον κατακόρυφο άξονα Z, ενώ εντός του κάδου, βρίσκεται και η ρητίνη. Το laser περνά από την διάταξη των οπτικών για την σωστή κατανομή του στον μηχανισμό σάρωσης και από εκεί διανέμεται στα κατάλληλα σημεία προς την πλατφόρμα ώστε να πολυμεριστεί η ρητίνη. Εφόσον εκτελεστεί μια σάρωση, η πλατφόρμα κινείται ένα βήμα (step) ώστε να επιτευχθεί η επόμενη στρώση. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση του βήματος που έχει οριστεί, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ακρίβεια αντιγραφής του δημιουργούμενου κομματιού σε σχέση με τις διαστάσεις και την ανάλυση που έχει το αρχικό σχέδιο. Υπάρχουν πιο σπάνια διατάξεις όπου υπάρχουν δύο laser τα οποία κινούνται αυτούσια και "χτυπάν" απευθείας στον κάδο χωρίς την παρεμβολή οπτικών μέσων (Εικόνα 2.2) [11].

2.2.1. Ιστορική αναδρομή φωτοπολυμερισμού σε κάδο

Τα φωτοπολυμερή αναπτυχθήκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1960 και αμέσως βρήκαν ευρεία χρήση για εμπορικούς σκοπούς σε πολλές περιοχές, με χαρακτηριστικότερες τις περιπτώσεις της βιομηχανίας παραγωγής υλικών επιστρώσεων και τυπογραφίας. Οι περισσότερες γυαλιστερές επιφάνειες σε χαρτί ή χαρτόνι είναι φωτοπολυμερή. Στην οδοντιατρική χρησιμοποιούνται επίσης πολυμεριζόμενες ρητίνες για σφράγισμα άνω επιφάνειας δοντιών και την συμπλήρωση οδοντικών αυλακώσεων. Στις εφαρμογές αυτές, οι επιστρώσεις στερεοποιούνται με ακτινοβολία, ενώ αυτό άλλαξε με την εμφάνιση της στερεολιθογραφίας [11].

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο Charles Hull, πειραματιζόταν με UV υλικά, τα οποία εξέθετε σε μια δέσμη laser που εκτελούσε σάρωση παρόμοια με το σύστημα των εκτυπωτών laser. Ανακάλυψε ότι έτσι ήταν εφικτό να δημιουργηθεί ένα μοτίβο στερεοποιημένου πολυμερούς. Με την στερεοποίηση της μίας στρώσης υλικού επάνω από μία άλλη που είχε ήδη στερεοποιηθεί, μπορούσε να δημιουργήσει ένα στερεό 3D αντικείμενο. Αυτό αποτέλεσαι την αρχή της τεχνολογίας στερεολιθογραφίας SL (Stereolithography). Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η εταιρεία 3D Systems, προκειμένου να εμπορευτεί τις SL μηχανές. Η χρήση των μηχανών αυτών γινόταν για ταχεία πρωτοτυποποίηση (rapid prototyping) στον τομέα ανάπτυξης προϊόντων. Από τότε έχει εμφανιστεί πληθώρα εφαρμογών αλλά και τεχνολογικών συγγενών της SL. Ο όρος φωτοπολυμερισμός σε κάδο (Vat Polymerization - VP) συμπεριλαμβάνει την SL. Ο όρος SL πλέον χρησιμοποιείται για να δήλωση τον φωτοπολυμερισμό σε κάδο με σάρωση δέσμης laser σε σχετικά μεγάλη κλίμακα, αλλιώς χρησιμοποιείται ο όρος VP [11].

2.2.2. Φωτοπολυμερές υλικά

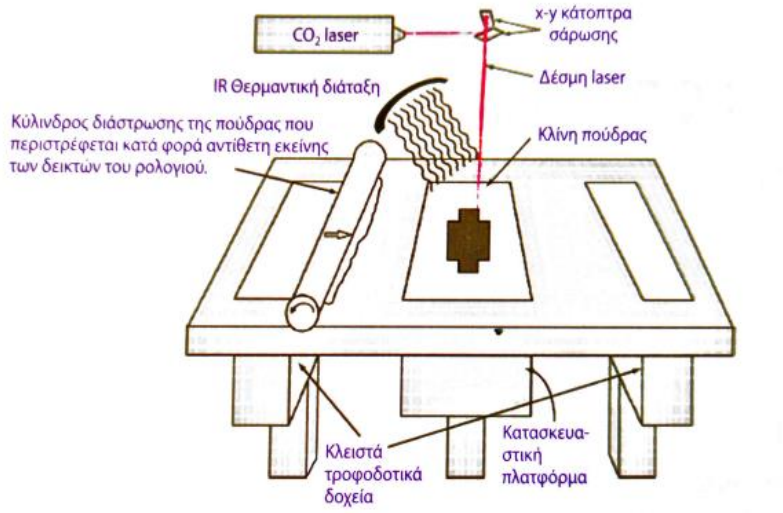
Αρχικά για τον πολυμερισμό των υλικών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα είδη ακτινοβολιών. Για παράδειγμα ακτίνες Γ, ακτίνες Χ, δέσμες ηλεκτρονίων, η UV ακτινοβολία, ακόμη και το ορατό φως σε ορισμένες περιπτώσεις. Η συνηθέστερη χρησιμοποιούμενη ακτινοβολία είναι η UV. Οι κύριοι τύποι ρητινών που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Standard Resin
- Clear Resin
- Tough Resin
- Flexible Resin
- Water-Washable Resin
- Dental Resin

- Ceramic-Filled Resin

2.3. Διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη - Powder Bed Fusion (PBF)

Όλες οι PBF διεργασίες διαθέτουν ένα κοινό σύνολο βασικών χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες πηγές θερμότητας για να προκαλούν την σύντηξη των σωματιδίων της πούδρας, μία μέθοδο ελέγχου της σύντηξης της πούδρας σε συγκεκριμένη περιοχή της κάθε στρώσης, καθώς και μηχανισμούς για την πρόσθεση και εξομάλυνση των στρώσεων της πούδρας. Η πιο συνηθισμένη πηγή θερμότητας στην PBF είναι τα lasers. Οι PBF διεργασίες οι οποίες χρησιμοποιούν laser ονομάζονται «μηχανές συσσωμάτωσης με laser» LS (Laser Sintering). Υπάρχουν οι μηχανές συσσωμάτωσης πολυμερών PLS (Polymer Laser Sintering) και μηχανές συσσωμάτωσης μετάλλων MLS (Metal Laser Sintering) οι οποίες διαφέρουν σημαντικά η μία από την άλλη [11].



Εικόνα 2.3. *Σχηματική αναπαράσταση διεργασιών σύντηξη πούδρας. [11]*

Οι LS διεργασίες αναπτύχθηκαν για την παραγωγή πλαστικών πρωτοτύπων με την χρήση σημειακής σάρωσης laser. Η προσέγγιση αυτή επεκτάθηκε στη συνέχεια σε πούδρες μεταλλικών και κεραμικών υλικών. Πλέον χρησιμοποιούνται πρόσθετες πηγές θερμότητας, υπάρχουν διάφοροι τύποι υλικών σε ένα ευρύ φάσμα και έτσι χρησιμοποιούνται οι PBF όλο και περισσότερο για την παραγωγή τελικών προϊόντων [11].

Στην PLS τήκονται λεπτά στρώματα πούδρας (με πάχος 0.075-0.1mm), που έχουν διαστρωθεί σε όλη την κατασκευαστική επιφάνεια με έναν κύλινδρο διάστρωσης της πούδρας, ο οποίος περιστρέφεται με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Η κατασκευή του κομματιού πραγματοποιείται εντός ενός κλειστού θαλάμου. Ο θάλαμος είναι γεμάτος με άζωτο (αδρανές αέριο), ώστε να ελαχιστοποιούνται η οξείδωση και η αποδόμηση του υλικού της πούδρας. Η πούδρα στην κατασκευαστική πλατφόρμα διατηρείται σε υψηλή θερμοκρασία, μόλις κάτω από το σημείο τήξης ή την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού της πούδρας. Θερμαντικές διατάξεις υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι τοποθετημένες πάνω από την κατασκευαστική πλατφόρμα για να διατηρούν τη θερμοκρασία γύρω από το κατασκευαζόμενο κομμάτι σε υψηλά επίπεδα, καθώς επίσης και πάνω από τα κλειστά τροφοδοτικά δοχεία (feed cartridges), ώστε να προθερμαίνεται η πούρα προτού διαστρωθεί στην κατασκευαστική επιφάνεια (Εικόνα 2.3) [11].

Πολλές φορές θερμαίνεται και η κατασκευαστική πλατφόρμα με κατάλληλες θερμαντικές διατάξεις. Η προθέρμανση της πούδρας και η διατήρηση υψηλής ομοιόμορφης θερμοκρασίας εντός

της κατασκευαστικής πλατφόρμας, είναι απαραίτητες για να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτήσεις της διεργασίας όσον αφορά την ισχύ του laser. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την προθέρμανση απαιτείται λιγότερη ενέργεια από το laser για σύντηξη. Πλεονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί ότι μπορεί να αποφευχθεί η στρέβλωση του κομματιού κατά τη διάρκεια της κατασκευής, διότι εξαιτίας της ανομοιόμορφης θερμικής διαστολής και συστολής μπορεί να οδηγηθεί η εκάστοτε κατασκευή σε κύρτωση [11].

Αφού σχηματιστεί και προθερμανθεί η κατάλληλη στρώση πούδρας, μία εστιασμένη δέσμη CO2 Laser, που στοχεύει πάνω στην πούδρα κλίνης, κινείται με τη βοήθεια γαλβανομέτρων κατά τρόπο τέτοιο, που να προκαλεί τη θερμική σύντηξη του υλικού, προκειμένου να σχηματιστεί η διατομή της αντίστοιχης στρώσης. Οι κόκκοι της πούδρας που περιβάλλει την κατασκευή, παραμένουν μεταξύ τους ασύνδετοι και χρησιμεύουν ως στήριγμα για τις επόμενες στρώσεις, καταργώντας έτσι την ανάγκη ύπαρξης της δευτερεύουσας δομής στηριγμάτων, που είναι αναγκαία στις διεργασίες φωτοπολυμερισμού σε κάδο [11].

Μόλις ολοκληρωθεί ο σχηματισμός μίας στρώσης, η κατασκευαστική πλατφόρμα υποβιβάζεται τόσο όσο το πάχος μίας στρώσης και ένα νέο στρώμα πούδρας διαστρώνεται και εξομαλύνεται με τον κύλινδρο διάστρωσης. Η δέσμη laser σαρώνει την στρώση που αντιστοιχεί στην επόμενη διατομή του κομματιού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί η ολοκλήρωση της δημιουργίας του κομματιού. Για την κατασκευή του κομματιού απαιτείται ένα χρονικό διάστημα που μέσα στο οποίο γίνεται η σταδιακή ψύξη του κομματιού με στόχο να αποκτήσει ομογενής χαμηλή θερμοκρασία η οποία θα επιτρέπει την διαχείρισή του και την έκθεσή του στην εξωτερική θερμοκρασία και ατμόσφαιρα [11].

Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι, εάν τα κομμάτια ή η κλίνη εκτεθούν πρόωρα στην εξωτερική θερμοκρασία και ατμόσφαιρα, οι πούδρες μπορεί να υποδομηθούν με την παρουσία του οξυγόνου και τα κομμάτια μπορεί να στρεβλωθούν λόγω της ακανόνιστης θερμικής συστολής. Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας, τα κομμάτια απομακρύνονται από την κλίνη πούδρας, καθαρίζονται από υπολείμματα της ασύνδετης πούδρας που τα περιβάλλει και αν είναι αναγκαίο πραγματοποιούνται επιπλέον κατεργασίες φινιρίσματος [11].

2.3.1. Υλικά για διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη

Όλα τα υλικά που μπορούν να υποστούν τήξη και επαναστερεοποίηση δύναται να χρησιμοποιηθούν σε PBF διεργασίες:

- Πολυμερή και σύνθετα : Θερμοπλαστικά
- Πολυαμίδια (νάιλον) : πολυαμίδιο 11, 12
- Υλικά με βάση πολυστερένιο
- Ελαστομερή θερμοπλαστικό πολυμερή
- PEEK πολυμερή με φλογοεπιβραδυντικό
- PAEK πολυαμίδιο και αιθερική κετόνη του πολυαρυλένιου
- Πολυκαπρολακτόνη PCL (polycaprolactone)
- Πολυγαλακτικό οξύ PLA (polylactide)
- Πολύ-L-γαλακτικό οξύ PLLA (poly-L-lactide)
- PCL + κεραμικά σωματίδια συμπεριλαμβανομένων του υδροξυαπατίτη και του πυριτικού ασβεστίου
- Πολυμερή με πρόσθετα (π.χ. σωματίδια γυαλιού, αλουμινίου αλλά και ίνες άνθρακα)

2.3.2. Μέταλλα και σύνθετα

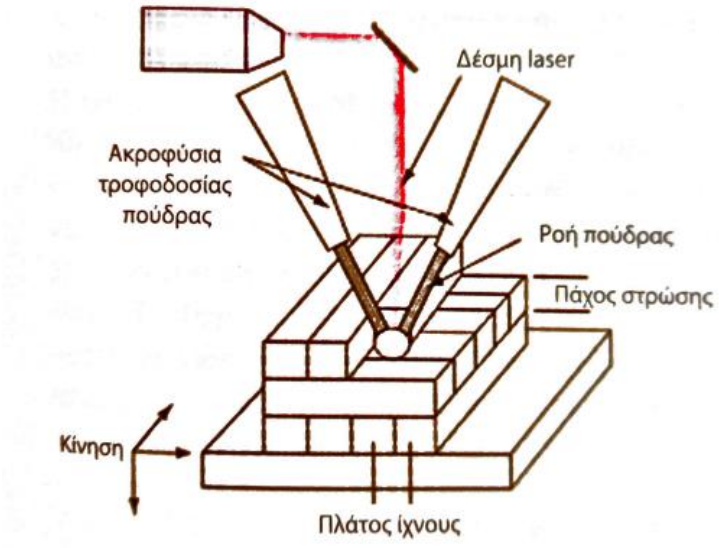
- Πούδρα 1080 χάλυβα (60% χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα) και χαλκό (40% CU)
- Rapid Steel 20 (πούδρα 316 ανοξείδωτου χάλυβα ST – 100 (με 50% μπρούτζο))
- πούδρα H13 (χάλυβες εργαλείων)
- πούδρα A6 (χάλυβες εργαλείων)
- πούδρα με βάση το νικέλιο
- πούδρα με βάση το χαλκό
- Γενικά: κράματα χάλυβα, νικελίου, τιτανίου, COCrMo κ.α.

2.3.3. Κεραμικά και σύνθετα κεραμικά

Κεραμικά υλικά χαρακτηρίζονται γενικά ενώσεις που αποτελούνται από μεταλλικά οξείδια από καρβίδια και από νιτρίδια, αλλά και από τους συνδυασμούς τους. Στο εμπόριο διατίθενται ακόμη και οξείδιο του αλουμινίου και οξείδιο του τιτανίου. Υπάρχουν ακόμη και τα λεγόμενα βιοσυμβατά υλικά όπως ο υδροξυαπατίτης ασβεστίου που είναι ένα υλικό το οποίο προσομοιάζει με τα ανθρώπινα οστά και χρησιμοποιείται σε ιατρικές εφαρμογές [11].

2.4. Διεργασίες εναπόθεσης υλικού με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη - Direct Energy Deposition (DED)

Οι διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη DED (Directed Energy Deposition) επιτρέπουν τη δημιουργία κομματιών με τήξη υλικού καθώς αυτό εναποτίθεται. Παρότι η βασική αυτή προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί σε πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, εφαρμόζεται κυρίως σε μεταλλικές πούδρες. Έτσι, η τεχνολογία αυτή αναφέρεται συχνά ως τεχνολογία “εναπόθεσης μετάλλου” (metal deposition) [17].



Εικόνα 2.4. *Σχηματική αναπαράσταση διεργασιών εναπόθεσης υλικού με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη [11].*

Στις DED διεργασίες, η ενέργεια αποδίδεται απευθείας σε μια περιορισμένη, εστιασμένη περιοχή, έτσι ώστε να θερμανθεί το υπόστρωμα, το οποίο τήκεται διαμορφώνοντας μια περιοχή

τηγμένου υλικού (melt pool) μέσα στην οποία εναποτίθεται και τήκεται ταυτόχρονα το βασικό υλικό [17].

Οι διεργασίες DED χρησιμοποιούν μία εστιασμένη πηγή θερμότητας (συνήθως laser ή δέσμη ηλεκτρονίων) για να τήξουν το τροφοδοτούμενο υλικό και να σχηματίσουν τρισδιάστατα αντικείμενα με τρόπο παρόμοιο με αυτόν των FDM. Κάθε πέρασμα DED κεφαλής δημιουργεί ένα ίχνος στερεοποιημένου υλικού, το οποίο σε συνδυασμό με τις γειτονικές γραμμές υλικού σχηματίζει στρώσεις. Πολύπλοκες τρισδιάστατες γεωμετρίες απαιτούν στηρίγματα ή πολυαξονικές κεφαλές εναπόθεσης (Εικόνα 2.4) [17].

Υπάρχουν πολλές DED μηχανές που χρησιμοποιούν laser και ειδικές τροφοδοτικές διατάξεις πούδρας. Οι μηχανές αυτές αναφέρονται με τις εμπορικές ονομασίες:

- Μορφοποίηση σε τελική μορφή με laser LENS (Laser Engineered Net Shaping)
- Κατασκευή με κατευθυνόμενη οπτική δέσμη DLF (Directed Light Fabrication)
- Άμεση εναπόθεση μετάλλου DMD (Direct Metal Deposition)
- 3D επίστρωση με laser (3D Laser Cladding)
- Δημιουργία με laser (Laser Generation)
- Εναπόθεση μετάλλου με laser LBMD (Laser Based Metal Deposition)
- Κατασκευή ελεύθερων μορφών με laser LFF (Laser Freeform Fabrication)
- Άμεση χύτευση με laser (Laser Direct Casting - Lasercast)
- Συγχώνευση με laser (Laser Consolidation - Lasform)

Κατά κύριο λόγο, η γενική προσέγγιση είναι ίδια στις DED μηχανές, οι διαφοροποιήσεις που έχουν είναι όσον αφορά την ισχύ του laser, το μέγεθος του σημείου εστίασής του, τον τύπο του, τη μέθοδο παροχής της πούδρας, τη μέθοδο παροχής του αδρανούς αερίου, τον τύπο ελέγχου ανάδρασης και τον τύπο ελέγχου κίνησης που χρησιμοποιείται. Λόγω του ότι τα παραγόμενα κομμάτια δημιουργούνται από εναπόθεση, τήξη και στερεοποίηση υλικών σε μορφή πούδρας μέσω μίας κινούμενης περιοχής τηγμένου υλικού, έχουν υψηλή πυκνότητα κατά την διαδικασία παρασκευής. Βέβαια μπορεί να υπάρχει διαφορά στην πυκνότητα από στρώση σε στρώση ακόμη και εντός της ίδιας στρώσης [11,17].

2.5. Αντίστροφη μηχανική

Αντίστροφη μηχανική RE (Reverse Engineering) ονομάζεται η δημιουργία μοντέλων από γεωμετρικά δεδομένα που προέρχονται από όργανα 3D απεικόνισης και λογισμικά RE. Δηλαδή η αντίστροφη μηχανική είναι η διαδικασία εξαγωγής των γεωμετρικών δεδομένων που περιγράφουν ένα αντικείμενο από το ίδιο αντικείμενο. Τα δεδομένα αυτά είναι αρχικά διαθέσιμα σε μια μορφή που ονομάζεται “Νέφος Σημείων” (Point Cloud), κάτι που εννοεί ότι υπάρχει ένα σύνολο σημείων τα οποία δεν συνδέονται μεταξύ τους και παριστάνουν τις επιφάνειες οι οποίες ορίζουν το αντικείμενο. Το νέφος σημείων είναι για παράδειγμα το εξαγωγικό αποτέλεσμα από έναν 3D Scanner. Τα σημεία πρέπει να συνδυαστούν μεταξύ τους με λογισμικό αντίστροφης μηχανικής, όπως είναι για παράδειγμα το Geomagic, το οποίο παρεμπιπτόντως μπορεί επίσης να συνδυάσει νέφη σημείων που προέρχονται από διαφορετικές σαρώσεις, αλλά και να εκτελέσει λειτουργίες, όπως η αφαίρεση οπών από τα δεδομένα (hole-filling) και την εξομάλυνση τους [7].

Σε αρκετές περιπτώσεις τα δεδομένα δεν είναι πλήρη. Αρκετά συχνά, χρειάζεται να συγκρατούνται τα αντικείμενα κατά την διάρκεια της σάρωσης με κάποια μέσα συγκράτησης, συνεπώς δεν θα έχουν σαρωθεί κανονικά όλες οι επιφάνειες όσον αφορά τις περιοχές συγκράτησης.

Επιπλέον συχνά, μερικές επιφάνειες ίσως να καλύπτουν κάποιες άλλες, όπως σε περιπτώσεις στις οποίες υπάρχουν βαθιές σχισμές και χαρακτηριστικά που βρίσκονται στο εσωτερικό των αντικειμένων, με συνέπεια, η συγκεκριμένη αναπαράσταση να μην αποδίδει ακριβώς το πραγματικό γεωμετρικό σχήμα. Στην σημερινή εποχή, είναι πλέον δυνατό με ένα κατάλληλα διαμορφωμένο κινητό τηλέφωνο να εκτελεστεί σάρωση 3D με την ενσωματωμένη του κάμερα, με κόστος μόλις κάποιες εκατοντάδες ευρώ, ενώ πριν λίγα χρόνια το απαιτούμενο σύστημα σάρωσης laser είχε κόστος μέχρι και κάποιες εκατοντάδες χιλιάδες ευρώ [7].

Τα τεχνολογικά αντικείμενα σαρώνονται συνήθως με την χρήση τεχνολογιών που στηρίζονται στη σάρωση με δέσμη laser ή σε αισθητήρες αφής (touch probe). Για αντικείμενα που έχουν πολύπλοκα εσωτερικά μορφολογικά χαρακτηριστικά ή ανατομικά μοντέλα, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η αξονική τομογραφία CT (Computerised Tomography), η οποία αρχικά αναπτύχθηκε για ιατρικές απεικονίσεις αλλά χρησιμοποιείται και για την σάρωση βιομηχανικών προϊόντων. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής είναι σχετικά παρόμοια με εκείνη της AM. Σαρώνει στρώση προς στρώση το αντικείμενο, χρησιμοποιεί στη συνέχεια ειδικό λογισμικό για να ενώσει τις στρώσεις αυτές και έτσι καθορίζει τις οριακές επιφάνειες του αντικειμένου. Τα όρια γειτονικών στρώσεων συνδέονται μεταξύ τους ώστε να διαμορφώσουν επιφάνειες. Το πλεονέκτημα της CT είναι ότι έχει την δυνατότητα να αναπαραστήσει χαρακτηριστικά που βρίσκονται στο εσωτερικό των αντικειμένων. Για την δημιουργία σε βιομηχανικό επίπεδο υψηλής ανάλυσης απεικονίσεων της τάξης του 1μm, χρησιμοποιούνται ακτίνες X υψηλής ενέργειας [7].

Μία άλλη μέθοδος η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την γεωμετρική ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου είναι εκείνη που στηρίζεται η τεχνολογία Capture Geometry Inside, η οποία λειτουργεί με τρόπο αντίστροφο από εκείνον της AM, χρησιμοποιώντας 2D απεικόνιση για να αποτυπώσει την γεωμετρία των διατομών, καθώς το αντικείμενο μεταφορικά και κυριολεκτικά τεμαχίζεται στρώση προς στρώση. Πρόκειται για μια καταστροφική τεχνική αποτύπωσης της γεωμετρίας και για αυτό το λόγο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε τύπο προϊόντος [7].

Η AM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαράγει τα αντικείμενα που έχουν σαρωθεί με τον απλό τρόπο λειτουργώντας ως μία διαδικασία αποστολής 3D Fax. Συνήθως όμως τα δεδομένα τροποποιούνται και συνδυάζονται με άλλα ώστε να δημιουργηθούν πιο σύνθετα αντικείμενα ελεύθερης μορφής, τα οποία μπορούν να αξιοποιήσουν το χαρακτηριστικό της ΄΄πολυπλοκότητας χωρίς κόστος΄΄ που παρέχει η τεχνολογία αυτή. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί, η περίπτωση όπου τα προσωπικά χαρακτηριστικά ενός ασθενούς συνδυάζονται με τις μεθοδολογίες μηχανικού σχεδιασμού, με στόχο να κατασκευαστεί ένα εξατομικευμένο ιατρικό εμφύτευμα. Επιπλέον, όσον αφορά την παραγωγή εξαρτημάτων στην βιομηχανία, μπορεί να σαρωθεί ένα μηχανικό εξάρτημα και σε συνδυασμό με λογισμικά προγραμμάτων CAE (Computer Aided Engineering) και πεπερασμένων στοιχείων γενικότερα, να διαμορφωθεί και να παραχθεί το ίδιο αντικείμενο σε μια βελτιστοποιημένη μορφή του (Κεφάλαιο 4) [7].

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή

3.1. Σχεδιασμός για παραγωγή και συναρμολόγηση DFMA

Ο σχεδιασμός για παραγωγή και συναρμολόγηση DFMA σημαίνει, ότι οι σχεδιαστές πρέπει να προσαρμόσουν τις σχεδιαστικές λύσεις που προτείνουν έτσι ώστε να μην δημιουργούνται δυσκολίες κατά την κατασκευή, την συναρμολόγηση και τις λειτουργίες logistics (επιμέλεια – ποιοτικός έλεγχος). Οι δυνατότητες που διαθέτουν οι τεχνολογίες ΑΜ όμως δίνουν την ευκαιρία επαναθεώρησης της DFMA, έτσι ώστε να αξιοποιηθούν οι μοναδικές ιδιότητες και δυνατότητες αυτών των τεχνολογιών [8].

Ο DFAM μπορεί να οριστεί ως η πρακτική σχεδίασης προϊόντων με στόχο την μείωση των δυσκολιών και του κόστους κατασκευής και συναρμολόγησής τους. Ο DFAM όμως προϋποθέτει εκτενή γνώση των διαδικασιών παραγωγής και συναρμολόγησης, των δυνατοτήτων των προμηθευτών, της συμπεριφοράς των υλικών κ.λπ.. Ενώ ακούγεται αρκετά απλό, η εφαρμογή του είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Προκειμένου να επιτύχουν του στόχους του DFAM, ερευνητές και εταιρείες έχουν αναπτύξει μεγάλο αριθμό μεθόδων, εργαλείων και πρακτικών. Οι κύριες προσπάθειες όσον αφορά τον DFAM ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες [8]:

- Βιομηχανικές πρακτικές, συμπεριλαμβανομένης της αναδιοργάνωσης της διαδικασίας της ανάπτυξης προϊόντων χρησιμοποιώντας ενοποιημένες ομάδες προϊόντος (integrated product teams), παράλληλη μηχανική (concurrent engineering) κ.λπ..
- Σύνολο DFMA κανόνων και πρακτικών.
- Πανεπιστημιακή έρευνα σε DFMA μεθόδους, εργαλεία και περιβάλλοντα.

3.2. Τι είναι ο ΄΄Σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή΄΄ και ποιοι είναι οι σκοποί του

Λόγω των μοναδικών δυνατοτήτων που παρέχουν οι ΑΜ τεχνολογίες, αντίθετα με τον DFMA, ο αντικειμενικός σκοπός του DFAM είναι η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας ενός προϊόντος μέσω μιας διαδικασίας σύνθεσης που συνδυάζει διάφορες γεωμετρικές μορφές, διαφορετικά μεγέθη, ιεραρχικά διαρθρωμένες δομές και συνθέσεις υλικών, υπό τους περιορισμούς των δυνατοτήτων των ΑΜ τεχνολογιών. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, οι σχεδιαστές οφείλουν να ακολουθούν διάφορες οδηγίες και κατευθυντήριες γραμμές, κατά τον σχεδιασμό των προϊόντων, έτσι ώστε [8]:

- Να επιτευχθούν οι σχεδιαστικοί στόχοι, η ΑΜ επιτρέπει τη χρησιμοποίηση πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι θα αυξηθεί το κόστος και ο χρόνος κατασκευής του κομματιού σε σύγκριση με τις απλές γεωμετρίες.
- Ως συνέπεια της πρώτης οδηγίας, είναι συχνά δυνατόν να ενοποιηθούν κάποια κομμάτια, να ενσωματωθούν μορφολογικά χαρακτηριστικά σχηματίζοντας πολυπλοκότερα κομμάτια, καθώς και να απαλειφθούν τυχόν προβλήματα τα οποία σχετίζονται με την συναρμολόγηση.
- Η ΑΜ επιτρέπει την χρήση εξατομικευμένων γεωμετρικών μορφών και κομματιών που είναι δυνατόν να παραχθούν απευθείας από 3D δεδομένα.
- Με την εμφάνιση εμπορικών ΑΜ μηχανών οι οποίες διαθέτουν δυνατότητες χρησιμοποίησης πολλαπλών υλικών, οι σχεδιαστές οφείλουν να διερευνήσουν τη σχεδίαση πολυλειτουργικών κομματιών που συνδυάζουν τις δυνατότητες που παρέχουν η γεωμετρική πολυπλοκότητα και η πολυπλοκότητα του υλικού.

- Η τεχνολογία ΑΜ επιτρέπει στους σχεδιαστές να αγνοήσουν όλους τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι συμβατικές κατασκευαστικές διεργασίες, ενώ παράλληλα μπορεί να υπάρχουν άλλοι περιορισμοί που σχετίζονται ειδικά με τις ΑΜ διεργασίες.

3.3. Πολύπλοκη γεωμετρική μορφή και προσθετική κατασκευή

Η ΑΜ παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής κομματιών με πολύπλοκη γεωμετρική μορφή όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην εικόνα 3.1. Η στρώση προς στρώση κατασκευαστική προσέγγιση σημαίνει ότι τα σχήματα των διατομών του κομματιού μπορούν να έχουν αυθαίρετα πολύπλοκη μορφή, με μοναδικό περιορισμό τις δυνατότητες ανάλυσης της συγκεκριμένης ΑΜ διεργασίας κατασκευής. Για παράδειγμα, με τις VP (photopolymerization) και PBF (Powder Bed Fusion) διεργασίες μπορούν να κατασκευαστούν πολύ λεπτά χαρακτηριστικά, τόσο όσο είναι περίπου το μέγεθος των αντίστοιχων δίσκων εστίασης των laser τους. Στις διεργασίες εναπόθεσης DED (Directed Energy Deposition), τα διάφορα χαρακτηριστικά στην κατασκευαστική στρώση είναι δυνατόν να έχουν το μέγεθος μερικών σταγονιδίων ή κόκκων όταν πρόκειται για πούδρα, εκτυπωνόμενου υλικού. Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση Z, η οποία είναι αυτή που αποτελεί και τη διεύθυνση ως προς την οποία δομείται το κομμάτι, το θέμα της πολυπλοκότητας των χαρακτηριστικών εμφανίζεται αρκετά πιο σύνθετο [8].



Εικόνα 3.1. *Πολύπλοκη γεωμετρική μορφή κομματιού που παράχθηκε με ΑΜ διαδικασία (δαγκάνα φρένου της BUGATTI). [23]*

Θεωρητικά τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι τόσο λεπτά όσο το πάχος της κατασκευαστικής στρώσης, όμως στην πράξη το πραγματικό πάχος που έχουν τα χαρακτηριστικά είναι ίσο με το συνολικό άθροισμα των στρώσεων. Κάποιες τάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της κατασκευής του κομματιού, όπως αυτές που δημιουργούνται κατά την επίστρωση του υλικού στη VP διεργασία, περιορίζουν την ανάλυση κατά την Z διεύθυνση. Επίσης, τα φαινόμενα του υπερπολυμερισμού (Overcure) ή του Bonus Z, που εμφανίζονται στις ΑΜ διεργασίες με laser, έχουν την τάση να δημιουργούν περιοχές που είναι παχύτερες από το πάχος της μίας στρώσης. Η ανάγκη για την αφαίρεση της δομής των στηριγμάτων (Supporters) που απαιτούνται σε ορισμένες ΑΜ διεργασίες μπορεί επίσης να θέσει εμμέσως περιορισμούς ως προς την γεωμετρική πολυπλοκότητα και το μέγεθος των μορφολογικών χαρακτηριστικών που μπορούν να υλοποιηθούν. Κάθε ΑΜ διεργασία εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία απαιτούν κάποιο σχετικό χρόνο εξοικείωσης του χρήστη. Γενικότερα, η γεωμετρική πολυπλοκότητα που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν οι ΑΜ διεργασίες, ξεπερνά κατά πολύ την αντίστοιχη πολυπλοκότητα που είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν οι συμβατικές διεργασίες [8].

3.4. Ενσωματωμένα συναρμολογημένα σύνολα λόγω προσθετικής κατασκευής

Η ικανότητα αντιμετώπισης της γεωμετρικής πολυπλοκότητας προσφέρει την δυνατότητα άσκησης άλλων πρακτικών. Επί παραδείγματι, σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατόν να αντικατασταθεί ένα συναρμολογούμενο σύνολο κομματιών, με ένα μοναδικό και τις περισσότερες φορές πολυπλοκότερο συμπαγές κομμάτι όπως παρατηρείται στην εικόνα 3.2. Ακόμη και όταν δύο ή περισσότερα εξαρτήματα πρέπει να μπορούν να κινηθούν το ένα σε σχέση με το άλλο, οι ΑΜ είναι σε θέση να κατασκευάσουν αυτά τα εξαρτήματα απευθείας ως ένα πλήρως συναρμολογημένο σύνολο, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3. Οι δυνατότητες αυτές επιτρέπουν την ενσωμάτωση μορφολογικών χαρακτηριστικών από πολλαπλά κομμάτια, παρέχοντας πιθανόν υψηλότερη αποτελεσματικότητα. Επιπροσθέτως, η μείωση του αριθμού των απαιτούμενων κινήσεων για συναρμολόγηση, επιδρά αισθητά στο κόστος αλλά και τις δυσκολίες παραγωγής προϊόντων [11,18].



Εικόνα 3.2. *Ψυκτικός αεραγωγός ηλεκτρονικής διάταξης αεροπλάνου. [11]*

Όπως γίνεται φανερό από τις πρακτικές του DFMA (Design For Manufacture and Assembly), σχεδιαστικές αλλαγές που έχουν στόχο τη διευκόλυνση ή και την μείωση, κάποιες φορές και την κατάργηση, των κινήσεων συναρμολόγησης ενός κομματιού, οδηγούν σε πολύ πιο αισθητές μειώσεις κόστους παραγωγής, από ότι αντίστοιχες αλλαγές που στοχεύουν στη διευκόλυνση αυτής καθ΄ αυτής της κατασκευής του. Τούτο οφείλεται στην κατάργηση των εργαλείων που τυχόν να απαιτούνταν για τη συναρμολόγηση. Παρόλο που οι οδηγίες του απλού συμβατικού DFMA για την κατασκευή του κομματιού δεν έχουν καμία άμεση σχέση με την ΑΜ, οι αντίστοιχες οδηγίες του σχεδιασμού για συναρμολόγηση εξακολουθούν να έχουν πολύ μεγάλη σημασία στην περίπτωση της ΑΜ. Επιπλέον πλεονεκτήματα παρουσιάζονται από την συγχώνευση κομματιών. Για παράδειγμα, η μείωση του αριθμού των κομματιών που απαρτίζουν ένα προϊόν, μειώνει την πολυπλοκότητα την οποία παρουσιάζει το προϊόν από την άποψη της διαχείρισής του αλλά και της παραγωγής του, εφόσον θα χρειαστεί να ιχνηλατηθούν και να επιθεωρηθούν λιγότερα κομμάτια. Έτσι περιορίζεται επίσης, η ανάγκη για εφεδρικά ή και ανταλλακτικά κομμάτια, ενώ παράλληλα αναιρείται η ανάγκη διατήρησης σε κατάλληλες αποθήκες των εργαλείων που απαιτούνται για την παραγωγή των κομματιών. Εν σύνοψη, η συγχώνευση των κομματιών οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση πόρων σε ολόκληρη την παραγωγική επιχείρηση [11,18].



Εικόνα 3.3. *Πλαστικό ρουλεμάν εκτυπωμένο από μηχανή ΑΜ, αποτελούμενο από υλικό PLA, πλήρως λειτουργικό με μία εκτύπωση χωρίς κάποια συναρμολόγηση.*

3.5. Εξατομικευμένη γεωμετρική μορφή

Η σχεδίαση του τρισδιάστατου αρχείου είναι μία διαδικασία, που περιλαμβάνει όλα εκείνα τα στάδια από την σύλληψη της ιδέας μέχρι τη τελική μορφή του αρχείου, στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του υπολογιστή. Το αρχείο μπορεί να δημιουργηθεί από την αρχή από τον σχεδιαστή σε κάποιο λογισμικό σχεδίασης, μπορεί επίσης να είναι προϊόν αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering) από τρισδιάστατη σάρωση, ή να χρησιμοποιηθεί ένα ήδη υπάρχον αρχείο από ψηφιακές βιβλιοθήκες, όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο [11,18].

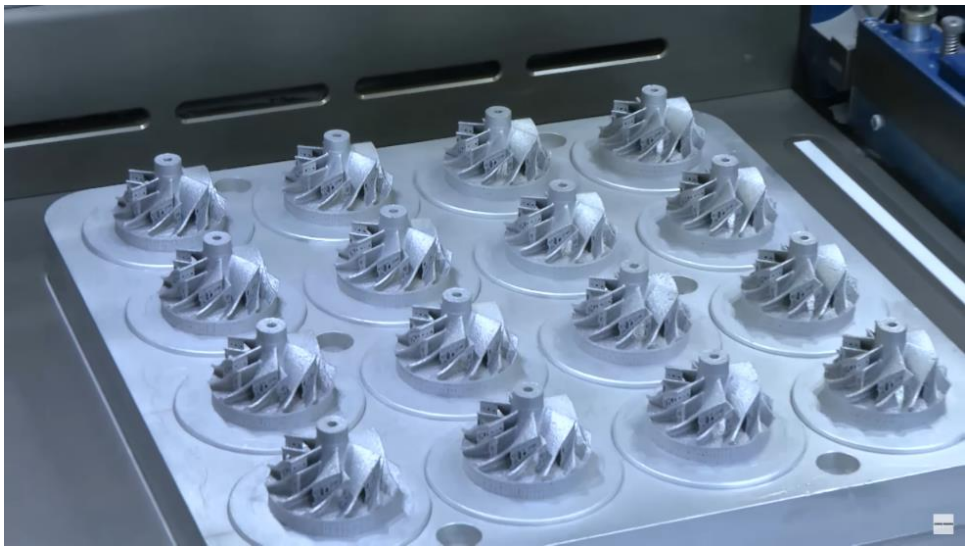
Η δημιουργία των τεχνολογιών της προσθετικής κατασκευής, βασίζεται κατά κύριο λόγο στην ανάπτυξη των τρισδιάστατων ψηφιακών αρχείων CAD (Computer Aided Design). Εξαιτίας των λογισμικών CAD, παρέχεται η δυνατότητα για αναπαράσταση οποιουδήποτε στερεού αντικειμένου σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα, ώστε με την βοήθεια των ΑΜ τεχνολογιών να δημιουργούνται φυσικά αντικείμενα, οποιασδήποτε γεωμετρικής πολυπλοκότητας [11,18].

Όταν ένα αντικείμενο δημιουργείται από την αρχή, η διαδικασία σχεδίασης είναι πολύ σημαντική. Στα οφέλη της προσθετικής κατασκευής συγκαταλέγονται η μείωση των ενώσεων, η παραγωγή ενιαίων κομματιών αποφεύγοντας τη διαδικασία της συναρμολόγησης και η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων εξατομικευμένων γεωμετριών [11,18].

Η επεξεργασία και η μετατροπή του αρχείου CAD μπορεί να διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων ώστε να γίνεται σύμφωνα με τις εξατομικευμένες ανάγκες του κάθε προϊόντος. Είναι αρκετά σημαντικό ότι κατά τη διάρκεια της σχεδίασης μπορεί και ο πελάτης να συμμετάσχει στη διαδικασία διαμορφώνοντας έτσι το προϊόν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του [11,18].

Η τρισδιάστατη σάρωση είναι ο πιο απλός τρόπος αποτύπωσης ψηφιακού σχεδίου, ειδικά για αντικείμενα που παρουσιάζουν εξατομικευμένη γεωμετρική μορφή. Οι σαρωτές, με τη χρήση λέιζερ ή κάμερας, προσπαθούν να συλλέξουν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες από τα σημεία επιφάνειας του αντικειμένου και να τα επεξεργαστούν κατάλληλα ώστε να το μετατρέψουν σε ψηφιακό αρχείο [11,18].

Για να επιτευχθεί η αντιμετώπιση της πολύπλοκης γεωμετρίας, οι AM διεργασίες παρέχουν την δυνατότητα κατασκευής εξατομικευμένων γεωμετριών. Στις VP και PBF μηχανές είναι δυνατόν να κατασκευαστούν συγχρόνως σε μια μηχανή, στο πλαίσιο μίας συγκεκριμένης κατασκευαστικής διεργασίας εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες κομμάτια που το κάθε ένα έχει διαφορετική γεωμετρική μορφή. Γενικά, είναι πολύ εύκολο να πραγματοποιηθεί η μαζική εξατομίκευση έναντι της μαζικής παραγωγής όπως στην Εικόνα 3.4. Σημαντικό περιοριστικό παράγοντα στη θεώρηση των AM διεργασιών για μαζική εξατομίκευση αποτελεί η έλλειψη αντίστοιχων γενικών εργαλείων λογισμικού και όχι οι περιορισμοί του μηχανολογικού εξοπλισμού που διατίθενται [11].



Εικόνα 3.4. *Δεκαέξι κομμάτια που παράχθηκαν ταυτόχρονα από μία μηχανή PBF.*

3.6. Πολυλειτουργικές σχεδιαστικές λύσεις

Πολυλειτουργικότητα είναι απλά η επίτευξη πολλαπλών λειτουργιών ή στόχων με ένα και μοναδικό κομμάτι. Συχνά αυτό επιτυγχάνεται, όταν ένα σύνθετο κομμάτι δηλαδή, ένα κομμάτι ή μία κατασκευή που αποτελείται από πολλά διαφορετικά επιμέρους κομμάτια, ενοποιηθεί. Όμως οι δυνατότητες που παρέχει η πολυπλοκότητα του υλικού δίνουν την ευκαιρία για πιο προχωρημένες σχεδιαστικές εφαρμογές και λύσεις [18].

Για παράδειγμα, ένα κομμάτι που πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτο σε μία περιοχή του, αλλά αρκετά εύκαμπτο σε μια άλλη, πως μπορεί να επιτευχθεί; Μια τέτοιου είδους συμπεριφορά, μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διάφορες AM διεργασίες, απλά και μόνο μεταβάλλοντας την σύνθεση του υλικού κατασκευής του συγκεκριμένου κομματιού. Ένα άλλο παράδειγμα μπορεί να είναι ένας απλός εναλλάκτης θερμότητας που πρέπει να εμφανίζει ανάλογη μηχανική σταθερότητα και αντοχή. Αυτός θα μπορούσε να κατασκευαστεί με κατάλληλη διαβάθμιση κραμάτων χάλυβα και χαλκού. Εφόσον συνδυαστεί η γεωμετρική πολυπλοκότητα με την πολυπλοκότητα του υλικού, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν κατασκευές που εμφανίζουν πολύ υψηλές επιδόσεις και χαρακτηριστικά. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται οι σχεδιαστές να αναπτύξουν νέες ιδέες και θεωρήσεις, τις οποίες θα πρέπει να ερευνήσουν διεξοδικά, λόγω του ότι σε πολλούς τομείς εφαρμογών δεν υπάρχει ιστορικό επιτυχημένων σχεδιαστικών προτάσεων και παραδειγμάτων στα οποία θα μπορούσαν να στηριχθούν [18].

3.7. Κατάργηση των περιορισμών του σχεδιασμού για παραγωγή και συναρμολόγηση DFMA

Από την δεκαετία του 1980, ήδη ο μηχανολογικός σχεδιασμός έχει αλλάξει σε σημαντικό βαθμό, λόγω της επίδρασης του DFMA, της παράλληλης μηχανικής και των εφαρμοζόμενων πρακτικών των ενοποιημένων ομάδων ανάπτυξης προϊόντων. Έχουν δαπανηθεί πολύς χρόνος και χρήμα με σκοπό να κατανοηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί που τίθενται από τα άλλα τμήματα των κατασκευαστικών επιχειρήσεων. Σαφώς, οι ΑΜ διεργασίες διαθέτουν την απαραίτητη δυναμική που απαιτείται για να μειωθεί η πίεση που ασκείται στις βιομηχανικές επιχειρήσεις για ενοποιημένες ομάδες ανάπτυξης προϊόντων, οι οποίες δαπανούν σημαντικό χρόνο στη διευθέτηση ζητημάτων που προκύπτουν από διάφορους περιορισμούς και διαφωνίες [18].

Με την ΑΜ, η πληροφόρηση που πρέπει να αποκτήσουν οι σχεδιαστές αναφορικά με τους διάφορους κατασκευαστικούς περιορισμούς είναι αισθητά μειωμένη. Η αποδοχή των αρχών του DFMA έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση μιας σχεδιαστικής κουλτούρας, στην οποία ο χώρος των δυνατών σχεδιαστικών λύσεων περιορίζεται από τα πρώτα στάδια σύλληψης της σχεδιαστικής ιδέας μόνο στις σχεδιαστικές λύσεις που μπορούν να υλοποιηθούν με συμβατικές τεχνικές. Με τις διεργασίες ΑΜ, παύουν πλέον να ισχύουν αυτοί οι περιορισμοί, οπότε έχει αυξηθεί κατά πολύ η ελευθερία που έχουν στην διάθεση τους οι σχεδιαστές [18].

Ο DFAM αντίθετα από τον DFMA, σχετίζεται περισσότερο με την δυσκολία της διερεύνησης λύσεων που ανήκουν σε νέους σχεδιαστικούς χώρους για την δημιουργία νέων δομών των προϊόντων, αλλά και της θεώρησης προϊόντων με μη συμβατικούς τρόπους. Τα προαναφερθέντα γεγονότα δεν αποτελούν υποχρεωτικά δυσκολίες, αλλά στην πράξη θεωρούνται ως ευκαιρίες. Οι κύριες απαιτήσεις από του μηχανικούς της σημερινής εποχής είναι το ότι πρέπει να είναι ανοιχτοί στις νέες δυνατότητες που διαμορφώνονται, καθώς και να εκπαιδεύονται κατάλληλα, έτσι ώστε να μπορούν να εκφράσουν ορθά και συλλογικά την δημιουργικότητα τους [18].

3.8. Ενοποίηση και ανασχεδιασμός κομματιών

Συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά της γεωμετρικής πολυπλοκότητας και την καταλληλόλητα για την παραγωγή μικρών παρτίδων, αποκτώνται ορισμένα πλεονεκτήματα για την ενοποίηση σύνθετων κατασκευών σε αντίστοιχες κατασκευές, οι οποίες απαρτίζονται από μικρότερο αριθμό επιμέρους κομματιών και είναι εφικτό να κατασκευαστούν με μία ΑΜ διεργασία. Αυτό υπερτερεί σε πολλά σημεία σε σχέση με λύσεις οι οποίες περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό επιμέρους κομματιών. Για παράδειγμα [11,18]:

- Δεν απαιτούνται εξειδικευμένα ειδικά εργαλεία παραγωγής για την κατασκευή των επιμέρους κομματιών.
- Αποφεύγονται οι όποιες δυσκολίες είναι δυνατόν να εμφανιστούν κατά την συναρμολόγηση των σύνθετων κατασκευών.
- Δεν χρειάζονται εργαλεία για την συναρμολόγηση, όπως οι ιδιοκατασκευές συγκράτησης.
- Σε πολλές περιπτώσεις, καταργείται η χρήση συνδέσμων συγκράτησης.
- Σε πολλές περιπτώσεις, οι ενοποιημένες κατασκευές είναι δυνατόν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να παρουσιάζουν βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά σε σχέση με αντίστοιχες κατασκευές που αποτελούνται από πολλά επιμέρους συναρμολογούμενα κομμάτια.

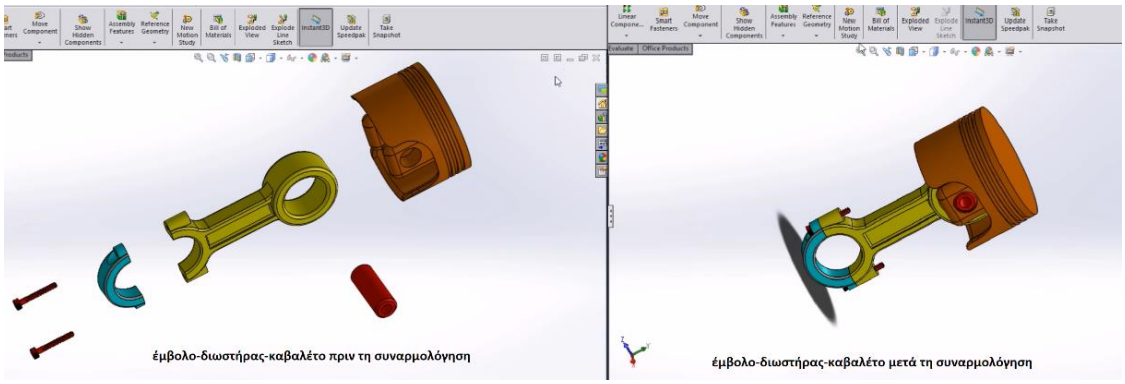
3.9. Προκλήσεις λογισμικών τρισδιάστατης σχεδίασης

Γενικά, στην σημερινή εποχή, ακόμη και τα σύγχρονα CAD συστήματα με βάση τη στερεά μοντελοποίηση παρουσιάζουν διάφορους περιορισμούς. Αυτοί οι περιορισμοί εμποδίζουν την αξιοποίηση των μοναδικών ιδιοτήτων των AM μηχανών, οι οποίες έχουν προαναφερθεί. Σε ορισμένες εφαρμογές, το CAD σύστημα αποτελεί παράγοντα ο οποίος μπορεί να προξενήσει καθυστερήσεις, όσον αφορά την δημιουργία πρωτότυπων γεωμετρικών μορφών και κατασκευών, την περιγραφή ιδιοτήτων του κομματιού και τον καθορισμό σύνθεσης υλικού κατασκευής του κομματιού. Αυτά τα προβλήματα αναπαράστασης, είναι προβλήματα στον προγραμματισμό του ελέγχου και της καθοδήγησης της κατασκευαστικής διεργασίας, καθώς και άλλων αναλυτικών λειτουργικών ενεργειών. Προφανώς, τα ζητήματα που προαναφέρθηκαν θα επιβραδύνουν τη διαδικασία υιοθέτησης και εισαγωγής των AM τεχνολογιών στη βιομηχανική παραγωγή κομματιών. Ειδικότερα, οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουν τα CAD συστήματα είναι οι εξής:

- Η γεωμετρική πολυπλοκότητα. Δηλαδή, πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστούν μοντέλα με εκατοντάδες χιλιάδες διαφορετικά μορφολογικά στοιχεία.
- Η αναπαράσταση του υλικού με βάση τους φυσικούς νόμους. Δηλαδή, πρέπει να μπορούν αναπαραστήσουν τις συνθέσεις και κατανομές του υλικού στο μοντέλο, οι οποίες πρέπει να έχουν φυσική σημασία.
- Η αναπαράσταση των ιδιοτήτων με βάση τους φυσικούς νόμους. Δηλαδή, πρέπει να μπορούν να αναπαραστήσουν τις επιθυμητές κατανομές των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων, οι οποίες πρέπει να ελεγχθούν ως προς την φυσική υπόστασή τους.

3.10. Συστήματα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD στερεάς μοντελοποίησης

Τα παραμετρικά CAD συστήματα στερεάς μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται στα περισσότερα μέρη του κόσμου στη μηχανολογική μελέτη και την ανάπτυξη προϊόντων, αλλά και την πανεπιστημιακή εκπαίδευση και έρευνα. Συστήματα όπως το ProEngineer, το Unigraphics, το SolidEdge, το CATIA και το SolidWorks είναι κατάλληλα για την αναπαράσταση της γεωμετρικής μορφής των περισσοτέρων μηχανολογικών κομματιών και εξαρτημάτων. Οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης που βασίζονται στα μορφολογικά χαρακτηριστικά, επιτρέπουν την ταχύτατη σχεδίαση κομματιών, τα οποία διαθέτουν πολλά τυπικά μορφολογικά στοιχεία. Οι δυνατότητες μοντελοποίησης της συναρμολόγησης τις οποίες διαθέτουν, επιτρέπουν επίσης την αυτόματη τοποθέτηση των επιμέρους κομματιών στο συναρμολογημένο σύνολο, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 3.5, καθώς και τη διαμόρφωση των κατάλληλων σχέσεων μεταξύ των συναρμολογούμενων κομματιών, ώστε να επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη συναρμολόγηση τους στις περιπτώσεις που οι διαστάσεις των κομματιών έχουν μεταβληθεί [11].



Εικόνα 3.5. *Συναρμολόγηση κομματιού στο Solidworks.*

Τα εμπορικά CAD συστήματα, χρησιμοποιούν συνήθως υβριδικό CSG-BRep (CSG είναι η κατασκευαστική στερεά μοντελοποίηση και BRep είναι η επιφανειακή αναπαράσταση) τρόπο εσωτερικής αναπαράστασης της γεωμετρίας του κομματιού αλλά και της τοπολογίας του. Με την CSG αναπαράσταση, το ιστορικό σχηματισμού του κομματιού διατηρείται εντός του συστήματος, ως μία αλληλουχία διεργασιών, δημιουργίας μορφολογικών χαρακτηριστικών, εκτελέσεις πράξεων του Boole μεταξύ βασικών στερεών σχημάτων και κατάλληλων μετασχηματισμών και τροποποιήσεων. Με την BRep αναπαράσταση του κομματιού γίνεται άμεση και ακριβής αναπαράσταση των οριακών επιφανειών που προσδιορίζουν το κομμάτι, ενώ καταχωρίζονται οι σχέσεις γειτονίας μεταξύ σημείων, καμπυλών (ακμών), επιφανειών και στερεών. Στο CAD σύστημα είναι καταχωρισμένη ιδιαίτερα μεγάλη ποσότητα πληροφορίας, μέσω της οποίας επιτυγχάνονται διάφορες σχεδιαστικές αλληλεπίδρασης, ταχύτατες γραφικές απεικονίσεις, υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των βασικών ιδιοτήτων του κομματιού, καθώς και η ανταλλαγή δεδομένων και η επικοινωνία με άλλα CAD/CAM/CAE εργαλεία [11,15,31,32,33,34].

Για τα κομμάτια που σχηματίζονται από δεκάδες ή εκατοντάδες επιφάνειες, τα εμπορικά λογισμικά που είναι εγκατεστημένα σε τυπικούς προσωπικούς υπολογιστές, εκτελούν τους περισσότερους τύπους σχεδιαστικών λειτουργιών με ταχύτητες οι οποίες εξασφαλίζουν την άμεση επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα. Όταν όμως μοντελοποιούνται περισσότερες από χίλιες επιφάνειες ή μεμονωμένα κομμάτια, τότε η ταχύτητα εκτέλεσης των διαφόρων λειτουργιών των CAD συστημάτων μειώνεται, ενώ η μνήμη που χρησιμοποιείται αυξάνεται σε εκατοντάδες MB ή και σε αρκετά GB. Συνοψίζοντας, δύο είναι οι κύριες δυνατότητες όσον αφορά τη γεωμετρική μορφή, τις οποίες πρέπει να διαθέτουν τα CAD συστήματα, προκειμένου να είναι σε θέση να υποστηρίξουν επαρκώς πολλές από τις νεότερα εμφανισμένες σχεδιαστικές εφαρμογές, ειδικότερα όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν οι AM κατασκευαστικές διεργασίες, οι οποίες δυνατότητες είναι οι εξής:

- Αναπαράσταση εκατοντάδων χιλιάδων μορφολογικών χαρακτηριστικών, επιφανειών και μεμονωμένων κομματιών.
- Διαχείριση χαρακτηριστικών, υλικών, επιφανειών και κομματιών σε ένα εύρος 4-6 τάξεων μεγέθους.

Κεφάλαιο 4: Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και τοπολογική βελτιστοποίηση

4.1. Ιστορική αναδρομή βέλτιστου σχεδιασμού

Η πρωτοποριακή εργασία του AGM Michell περίπου στις αρχές του 1900, επανήλθε στην επιφάνεια πριν από αρκετά χρόνια από διάφορους ερευνητές. Ο Anthony George Maldon (AGM) Michell, ήταν Αυστραλός μηχανικός, ο οποίος διατύπωσε τις μαθηματικές συνθήκες υπό τις οποίες το βάρος μίας κατασκευής ελαχιστοποιείται. Ο Michell απέδειξε ότι υπάρχει ελάχιστο, για το βάρος μίας κατασκευής, υπό την προϋπόθεση ότι τα δομικά στοιχεία που την αποτελούν, υποβάλλονται μόνο σε καθαρό εφελκυσμό ή καθαρή θλίψη. Ο Michell έδωσε μάλιστα και τους κανόνες σχηματισμού του δικτυώματος με το ελάχιστο βάρος [19].

Γενικά είναι δύσκολο να υπολογιστούν οι βέλτιστοι κατά Michell δικτυωτοί σχηματισμοί, εκτός από τις περιπτώσεις, οι οποίες είναι απλούστερες και είναι 2D. Ορισμένοι ερευνητές, έχουν αναπτύξει αριθμητικές μεθοδολογίες για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων. Τουλάχιστον μια ερευνητική ομάδα έχει επιχειρήσει την κατασκευή Michell δικτυωμάτων χρησιμοποιώντας AM διεργασίες, ενώ έχει διερευνήσει και περιπτώσεις επίλυσης με πολλαπλά υλικά. Τα Michell δικτυώματα αποτελούν υποδειγματικές βασικές λύσεις, ως προς τις οποίες μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα διαφόρων αλγορίθμων σύνθεσης, που προτείνονται για την επίλυση μεγάλων και πολύπλοκων προβλημάτων [19].

Η αξιοποίηση εξειδικευμένης μεθοδολογίας και τεχνολογικών εργαλείων σε συνδυασμό με την απαίτηση για ελαχιστοποίηση της άσκοπης κατανάλωσης πόρων, έχει επιτευχθεί από την ανάγκη της σύγχρονης κατασκευαστικής βιομηχανίας, για σύντομους και αποδοτικούς κύκλους ανάπτυξης νέων προϊόντων. Στην σημερινή εποχή, ο αυξημένος ανταγωνισμός, ωθεί τους κατασκευαστές να επιτύχουν προϊόντα υψηλών επιδόσεων και αυξημένης δομικής απόδοσης, με αποτέλεσμα το ενδιαφέρον της βιομηχανίας να έχει στραφεί σε διαδικασίες βελτιστοποίησης των κατασκευών και ειδικότερα στο στάδιο του σχεδιασμού, πριν από οποιαδήποτε διαδικασία παραγωγής πρωτοτύπων [19].

Στόχος των διαδικασιών βελτιστοποίησης, είναι η παραγωγή προϊόντων, που θα έχουν την ελάχιστη δυνατή μάζα, τη μέγιστη δυνατή στιβαρότητα και θα αποτελούν εφικτές, λειτουργικές και ασφαλείς λύσεις. Μια από τις μεθόδους βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται στις περισσότερες των περιπτώσεων και αναγνωρίζεται για την ποιότητα των αποτελεσμάτων της, είναι αυτή της τοπολογικής βελτιστοποίησης, η οποία θα επεξηγηθεί στο παρόν κεφάλαιο [19].

4.2. Μέθοδος κατασκευής με τη τεχνολογία CAD/CAE και Finite Element Modeling (FEM)

Σήμερα με όλα τα τεχνολογικά επιτεύγματα που κυριαρχούν, όταν πρόκειται να κατασκευαστεί ένα προϊόν, είναι αρχικά απαραίτητη η κατασκευή μοντέλου του προϊόντος, το οποίο υποβάλλεται σε διάφορες δοκιμασίες που αποτελούν προσομοιώσεις των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας και μελετώντας της συμπεριφορά του, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη χρήση του. Οι προσεγγιστικές μέθοδοι και σε αυτή τη τεχνολογία όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ευδοκίμησαν όταν οι Η/Υ απέκτησαν σημαντική υπολογιστική ισχύ, έτσι αναπτύχθηκε ο κλάδος της μηχανικής των συστημάτων ανάλυσης και προσομοίωσης CAE (Computer Aided Engineering). Από τις προσεγγιστικές μεθόδους ξεχώρισε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element

Modeling), κατά την οποία, στο κύκλο ανάλυσης χρησιμοποιούνται εργαλεία για ανάλυση συμπεριφοράς σε συνθήκες λειτουργίας [12].

Λόγω της εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, υπάρχει η δυνατότητα της κατασκευής εικονικών μοντέλων αλλά και η προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας τους, με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Όταν τα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Modeling) χρησιμοποιούνται στη διαδικασία σχεδιασμού, μειώνουν τη λήψη τυχαίων αποφάσεων και αυξάνουν την αποτελεσματικότητα του εξαρτήματος [28,29].

4.3. Μέθοδος κατασκευής FEM σε συνδυασμό με Topology Optimization

Η Δομική Βελτιστοποίηση (Structural Optimization) αντικατέστησε την εμπειρική και επαναληπτική βελτίωση του σχεδιασμού με το χέρι, με μία συστηματική διαδικασία, που βασίζεται στη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Η φιλοσοφία των μεθόδων βελτιστοποίησης επιδιώκει τη βέλτιστη σχεδιαστική λύση για τη δημιουργία ελαφρύτερων κατασκευών, ικανοποιώντας παράλληλα κριτήρια όπως η αντοχή και η λειτουργικότητα. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης, χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης σχετικά με τον σχεδιασμό, βελτιστοποίηση μεγέθους (Size Optimization), σχήματος (Shape Optimization) και τοπολογίας (Topology Optimization) [13,14,30,36,37,38].

Η τοπολογική βελτιστοποίηση, (Topology Optimization) είναι ο πιο κοινός τύπος δομικής βελτιστοποίησης (Structural Optimization), χρησιμοποιείται στην αρχική φάση του σχεδιασμού για την πρόβλεψη της βέλτιστης κατανομής υλικού μιας κατασκευής και λαμβάνει υπόψη τις λειτουργικές προδιαγραφές και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς. Ωστόσο, στη πιο δημοφιλή μέθοδο τοπολογικής βελτιστοποίησης, συγκαταλέγεται η μέθοδος SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), μεταφράζεται ως μέθοδος Στερεού Ισοτροπικού Υλικού με Ποινικοποίηση για ενδιάμεσες πυκνότητες υλικού και αναπτύχθηκε από τους Bendsoe and Kikuchi (1988) και Rozvany and Zhou (1992) [13,14,30].

Η βασική ιδέα, είναι να προβλεφθεί η βέλτιστη κατανομή υλικού εντός ενός δεδομένου σχεδιαστικού χώρου, για δεδομένες περιπτώσεις φορτίου, οριακές συνθήκες, περιορισμούς κατασκευής και απαιτήσεις απόδοσης. Η παραδοσιακή προσέγγιση στη τοπολογική βελτιστοποίηση είναι η διακριτοποίηση (mesh) ενός τομέα σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζονται ισότροπες στερεές μικροδομές. Κάθε στοιχείο, είτε είναι γεμάτο με υλικό για περιοχές που απαιτούν υλικό, είτε αδειάζει από υλικό για περιοχές όπου μπορεί να αφαιρεθεί υλικό, δηλαδή αντιπροσωπεύει κενά. Η κατανομή πυκνότητας του υλικού εντός ενός τομέα σχεδίασης, συμβολίζεται με ρ, είναι διακριτή και σε κάθε στοιχείο εκχωρείται μια δυαδική τιμή, $\rho = 1$ όπου απαιτείται υλικό (μαύρο) και $\rho = 0$ όπου αφαιρείται το υλικό (λευκό) [13,14,30].

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization), είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης σχήματος, που χρησιμοποιεί αλγοριθμικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση της διάταξης του υλικού εντός ενός χώρου που ορίζεται από τον χρήστη, για ένα δεδομένο σύνολο φορτίων, συνθηκών και περιορισμών. Η τοπολογική βελτιστοποίηση μεγιστοποιεί την απόδοση και την αποδοτικότητα του σχεδιασμού, αφαιρώντας το περιττό υλικό από περιοχές που δεν χρειάζεται να φέρουν σημαντικά φορτία για τη μείωση του βάρους ή την επίλυση προκλήσεων σχεδιασμού, όπως η μείωση του συντονισμού ή της θερμικής καταπόνησης. Τα σχέδια που παράγονται με τοπολογική βελτιστοποίηση, συχνά περιλαμβάνουν ελεύθερες μορφές και περίπλοκα σχήματα που είναι πολύπλοκα ή αδύνατο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Ωστόσο, τα σχέδια της τοπολογικής βελτιστοποίησης ταιριάζουν απόλυτα με διαδικασίες προσθετικής κατασκευής AM (Additive

Manufacturing) που έχουν πιο επιεικείς κανόνες σχεδιασμού και μπορούν εύκολα να αναπαράγουν πολύπλοκα σχήματα, χωρίς πρόσθετο κόστος, όπως αναλύθηκε στο πρώτο κεφάλαιο [30,14].

Με τη βοήθεια της μεθόδου FEM, ένα μοντέλο προσομοίωσης, δείχνει τις τρισδιάστατες παραμορφώσεις και αξιολογεί τις θέσεις άσκησης πίεσης στο εξάρτημα. Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, σε συνδυασμό με τοπολογική βελτιστοποίηση, επιτυγχάνει τον επανασχεδιασμό του εξαρτήματος αφαιρώντας τη περιττή κατανομή υλικού [30,14].

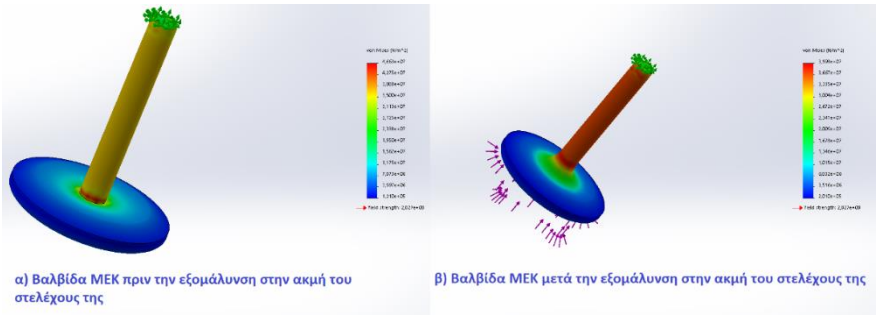
4.4. Μέθοδοι βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης προσπαθούν να βελτιώσουν τον σχεδιασμό ενός αντικειμένου με κατάλληλη ρύθμιση των τιμών των σχεδιαστικών παραμέτρων, ώστε να επιτυγχάνονται οι επιθυμητοί στόχοι, χωρίς συγχρόνως να παραβιάζονται οι περιορισμοί που έχουν τεθεί. Κατά κανόνα, οι στόχοι αυτοί σχετίζονται με τη μηχανική συμπεριφορά ή το βάρος του κομματιού. Έχουν προταθεί πολλά είδη μορφοποιήσεων για προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της βελτιστοποίησης και τους στόχους του προβλήματος. Οι τρεις κύριοι τύποι προβλημάτων βελτιστοποίησης που έχουν διερευνηθεί αναφορικά με τον σχεδιασμό για ΑΜ, περιλαμβάνουν με σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας και στόχους τα εξής:

- Βελτιστοποίηση μεγέθους. Σε αυτό το είδος βελτιστοποίησης προσδιορίζονται οι τιμές διαφόρων παραμέτρων και διαστάσεων του κομματιού.
- Βελτιστοποίηση μορφής. Σε αυτό το είδος βελτιστοποίησης τροποποιείται η μορφή των επιφανειών των κομματιών.
- Τοπολογική βελτιστοποίηση ΤΟ (Topology Optimization). Σε αυτό το είδος βελτιστοποίησης διερευνάται η κατανομή υλικού εντός του κομματιού.

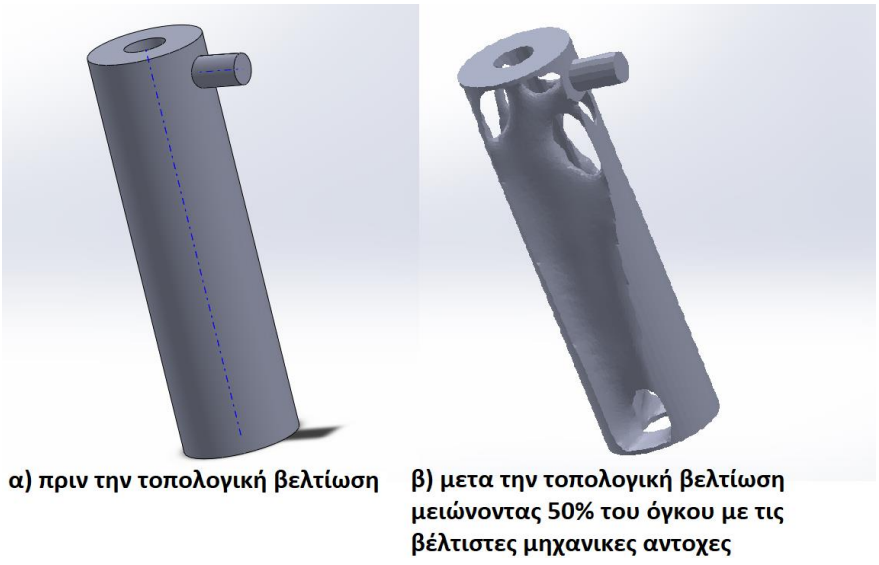
Στην βελτιστοποίηση μεγέθους, προσδιορίζονται οι τιμές επιλεγμένων παραμέτρων (π.χ. οι διαστάσεις κ.λπ.) με τις οποίες επιτυγχάνονται καλύτερα οι στόχοι, όπως χαμηλότερο κόστος παραγωγής, μικρότερο βάρος, ταχύτερη παραγωγή, κ.λπ., ενώ συγχρόνως ικανοποιούνται οι περιορισμοί που υπήρχαν ενίοτε στο κομμάτι που είναι υπό σχεδίαση και παραγωγή. Στις τυπικές εφαρμογές δομικής βελτιστοποίησης, έναν από τους βασικούς στόχους μπορεί να αποτελεί η ελαχιστοποίηση της μέγιστης εμφανιζόμενης τάσης, της ενέργειας παραμόρφωσης, του βέλους κάμψης ή του όγκου και του βάρους του κομματιού. Ένα ή περισσότερα από τα μεγέθη αυτά, μπορεί να μοντελοποιηθούν ως περιορισμός. Σε πολλά μηχανολογικά τεμάχια, η βελτιστοποίηση μεγέθους αναφέρεται σε έναν μικρό αριθμό σχεδιαστικών παραμέτρων, όμως σε κομμάτια, τα οποία έχουν κυψελωτή δομή, όπως είναι τα πλεγματικά υλικά, ο αριθμός των σχεδιαστικών παραμέτρων που εμπλέκονται στη βελτιστοποίηση, μπορεί να φτάσει τις εκατοντάδες χιλιάδες [20,36,37,38].

Η βελτιστοποίηση μορφής, αποτελεί μία γενίκευση της βελτιστοποίησης μεγέθους. Στην βελτιστοποίηση μορφής, βελτιστοποιείται συνήθως η μορφή των καμπυλών ή των επιφανειών που περιβάλλουν ένα κομμάτι, έτσι ώστε, να επιτυγχάνονται κατά κύριο λόγο οι ίδιοι σκοποί και να ικανοποιούνται οι αντίστοιχοι περιορισμοί, όπως αυτούς στην βελτιστοποίηση μεγέθους, που προαναφέρθηκαν. Με αυτό τον τρόπο, οι θέσεις των κορυφών, οι οποίες αποτελούν σημεία ελέγχου και καθορίζουν την μορφή των καμπυλών και των επιφανειών, χρησιμοποιούνται συνήθως ως σχεδιαστικές παράμετροι προς βελτιστοποίηση όπως στην εικόνα 4.1. Η βελτιστοποίηση μορφής, μπορεί να συνδυάζεται με την βελτιστοποίηση τιμής, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ταυτόχρονα, τόσο το γεωμετρικό σχήμα των κομματιών που έχουν ελεύθερη μορφή αλλά και κομματιών με τυπική μορφή (π.χ. κύλινδροι), όσο και οι τιμές διαφόρων παραμέτρων τους [20,36,37,38].



Εικόνα 4.1. *Παραδειγματική εικόνα βελτιστοποίησης μορφής.*

Με την τοπολογική βελτιστοποίηση, προσδιορίζονται η συνολική γεωμετρική μορφή του κομματιού, η διάταξη των μορφολογικών στοιχείων του και η διασύνδεση του σχεδιαστικού πεδίου. Ο όγκος ή η ευκαμψία του κομματιού, ελαχιστοποιείται υπό διαφορετικούς περιορισμούς, όπως για παράδειγμα, περιορισμοί που μπορεί να υπάρχουν στον όγκο, στην ευκαμψία, στην τάση, στην ενέργεια παραμόρφωσης, και σε πολλούς άλλους παράγοντες. Οι κύριες διαφορές ανάμεσα στην τοπολογική βελτιστοποίηση και την βελτιστοποίηση μορφής, αλλά και τιμής, είναι στην γεωμετρική διαμόρφωση και στην επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων. Αυτές οι διαφορές μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ σημαντικές βελτιώσεις στη μηχανική συμπεριφορά του σχεδιαζόμενου κομματιού όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην εικόνα 4.2 [20,39].



Εικόνα 4.2. *Παραδειγματική εικόνα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης.*

4.5. Μέθοδοι τοπολογικής βελτιστοποίησης

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα προβλήματα βελτιστοποίησης μεγέθους και σχήματος, έχουν να διαχειριστούν παραμέτρους όσον αφορά το μέγεθος και το σχήμα των συστατικών μίας δομής. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να έχουν μια τιμή μεταξύ κάποιων ορισμένων σημείων, χωρίς όμως να αλλάξει ο αριθμός αυτών των στοιχείων που αποτελούν την δομή αυτή. Τα δύο κύρια γνωρίσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης, είναι το ότι οι ελαστικές ιδιότητες των υλικών, μπορεί να ποικίλουν κατά μήκος της περιοχής σχεδίασης, ως συνάρτησης της πυκνότητας τους και το ότι το υλικό μπορεί να αφαιρεθεί μόνιμα από την περιοχή σχεδίασης. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι βελτιστοποίησης της

τοπολογίας και ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες, οι μέθοδοι κριτηρίων βελτιστοποίησης OCM (Optimality Criteria Methods) και οι ευρετικές μέθοδοι HM (Heurestic Methods) [25].

Οι μέθοδοι κριτηρίων βελτιστοποίησης κατατάσσονται στις έμμεσες μεθόδους και χαρακτηριστικό τους είναι ότι ικανοποιούν ένα σύνολο κριτηρίων, που σχετίζεται με τη συμπεριφορά της δομής. Πολλές φορές, αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην συνθήκη βελτιστοποίησης Kuhn-Tucker, το οποίο σημαίνει πως είναι ιδιαίτερα αυστηρές, ενώ η χρήση τους είναι για περιπτώσεις με μεγάλο αριθμό μεταβλητών, αλλά με όχι πολλούς περιορισμούς. Οι μέθοδοι κριτηρίων κατηγοριοποιούνται ως εξής [25,38,39]:

- Homogenization
- Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)
- Level Set Method
- Growth Method for Truss Structures

Οι ευρετικές μέθοδοι είναι εκείνες, οι οποίες, μπορεί να βασίζονται στη διαίσθηση σε συνδυασμό με την εμπειρία, στις παρατηρήσεις των διαδικασιών μηχανικής ή ακόμα και σε παρατηρήσεις βιολογικών συστημάτων, ενώ δεν υπάρχει κάποια εγγύηση πως πάντα θα βρίσκουν την βέλτιστη λύση. Παρόλα αυτά, μπορούν να παρέχουν βιώσιμες και ικανοποιητικά αποτελεσματικές λύσεις. Κάποιες από τις ευρετικές μεθόδους είναι οι εξής [25]:

- Fully Stressed Design (FSD)
- Computer-Aided Optimization (CAO)
- Soft Kill Option (SKO)
- Evolutionary Structural Optimization (ESO)
- Bidirectional ESO (BESO)
- Sequential Element Rejection and Admission (SERA)
- Isolines/Isosurfaces Topology Design (ITD)

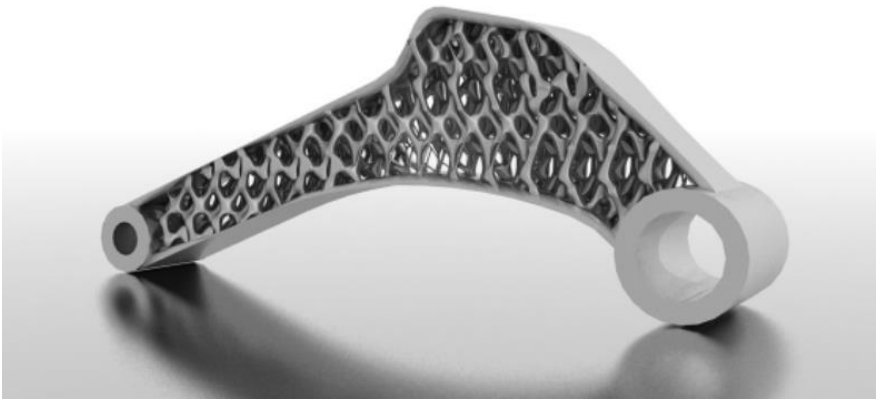
4.6. Τοπολογική βελτιστοποίηση

Οι μέθοδοι της τοπολογικής βελτιστοποίησης ΤΟ (Topology Optimization), καθορίζουν τη συνολική διάταξη των μορφολογικών στοιχείων, σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού. Πολύ συχνά, τα ΤΟ αποτελέσματα, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου επόμενων σταδίων βελτιστοποίησης μορφής ή τιμής. Λόγω του ότι αυτές οι βελτιστοποιήσεις αναφέρονται σε προβλήματα και σχεδιασμό, μηχανικής συμπεριφοράς, πρέπει να εκτελούνται συνεχής αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων στα ενδιάμεσα βήματα της επαναληπτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης, το οποίο σημαίνει ότι η ΤΟ έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος. Οι λύσεις της ΤΟ που προσδιορίζονται με βάση τις συνθήκες εξωτερικής φόρτισης πρέπει να έχουν ως αποτέλεσμα, κομμάτια πλήρως φορτισμένα, με σκοπό να πλησιάζονται τα όρια αντοχής κάθε στοιχείου τους ή να έχουν σταθερά κατανεμημένη ενέργεια παραμόρφωσης σε όλη την έκτασή τους. Τελικώς, έχουν αναπτυχθεί δύο κύριες προσεγγίσεις για την επίλυση των ΤΟ προβλημάτων, οι οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες υποενότητες και είναι οι εξής, [11,36,37,38,39]:

- Μέθοδος με δικτύωμα. Είναι μία μέθοδος που βασίζεται σε διαμόρφωση δικτυώματος.
- Μέθοδος με βάση την ογκομετρική πυκνότητα.

4.7. Μέθοδοι με πλέγμα (Lattice)

Στην μέθοδο με δικτύωμα, η λογική που επικρατεί είναι η εξής: στον χώρο προς βελτίωση, ορίζεται από τον χρήστη, ένα πλέγμα από ράβδους, οι οποίες συνδέουν μεταξύ τους ένα σύνολο κόμβων. Κάποιες φορές, μπορεί το πλέγμα των ράβδων, να σχηματίζει με τους κόμβους ένα πλήρες γράφημα. Σε άλλες περιπτώσεις, το γράφημα μπορεί να απαρτίζεται από μοναδιαίες κυψελίδες. Κατά τη διαδικασία επίλυσης, η τοπολογική βελτιστοποίηση, αποσκοπεί στο να εντοπίσει τις ράβδους εκείνες που είναι περισσότερο σημαντικές για το πρόβλημα που μελετάται, να προσδιορίσει το μέγεθός τους, όπως για παράδειγμα τη διάμετρο και να αφαιρέσει τις πολύ λεπτές. Συχνά η ποιότητα των αποτελεσμάτων, εξαρτάται από το πλέγμα των ράβδων, που έχει θεωρήσει ο χρήστης στην αρχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα προσομοιάζουν τις πλεγματικές δομές, (lattice structures) με εμφανείς διαφοροποιήσεις στις διαμέτρους των ράβδων, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3 [11,21].



Εικόνα 4.3. *Παραδειγματική εικόνα βελτιστοποίησης με δικτύωμα. [24]*

Στην πρώτη από τις διάφορες παραλλαγές της μεθόδου που βασίζεται σε δικτύωμα, ορίζεται ένα πλήρες γράφημα σε ένα πλέγμα κόμβων, όπου ο κάθε κόμβος συνδέεται με κάθε ένα από τους υπόλοιπους του πλέγματος με μία ράβδο, που αποτελεί το δομικό στοιχείο, του προς εξέταση δικτυώματος. Η διάμετρος της κάθε ράβδου (δομικού στοιχείου), αποτελεί τη σχεδιαστική παράμετρο που βελτιστοποιείται. Καθώς η διαδικασία της βελτιστοποίησης εξελίσσεται, όλα εκείνα τα στοιχεία των οποίων η διάμετρος γίνεται πολύ μικρή, καταργούνται από το σχέδιο. Ενώ αυτές οι μέθοδοι ήταν αποτελεσματικές, θεωρούνται ότι έχουν πολύ υψηλό υπολογιστικό κόστος. Τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα λαμβάνονται όταν θεωρηθούν ως παράμετροι βελτιστοποίησης, τόσο το μέγεθος των στοιχείων του δικτυώματος όσο και η θέση τους. Υπάρχουν επίσης παραλλαγές αυτών των προσεγγίσεων, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε προβλήματα βελτιστοποίησης, με αντικειμενικές συναρτήσεις, που περιέχουν το στοιχείο του κινδύνου ή της αξιοπιστίας [11,21].

Υπάρχουν και άλλες μεθοδολογίες - συνθέσεις, όπως για παράδειγμα η μέθοδος προσαρμογής και διαβάθμισης μεγέθους, SMS (Size Matching and Scaling), η οποία ξεκινάει με μία σύμμορφη πλεγματική δομή και χρησιμοποιεί για τη βελτιστοποίηση της κατασκευής, δύο μόνο σχεδιαστικές μεταβλητές, την ελάχιστη και τη μέγιστη διάμετρο ράβδου. Στην αρχή, η μέθοδος θεωρεί ότι το κομμάτι που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί είναι συμπαγές, στέρεο και επιλύει το αντίστοιχο πρόβλημα μηχανικής συμπεριφοράς χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEA (Finite Element Method). Στη συνέχεια δημιουργείται μία σύμμορφη πλεγματική δομή, η οποία εφαρμόζεται στο εσωτερικό του στερεού σώματος. Οι χωρικές κατανομές των παραμορφώσεων ή των τάσεων που δίνονται από τα υπολογιστικά αποτελέσματα της FEA, χρησιμοποιούνται για να διαβαθμίσουν το μέγεθος των ράβδων της σύμμορφης πλεγματικής δομής, δημιουργώντας έτσι ένα σύνολο σχετικών τιμών του μεγέθους των ράβδων. Έπειτα, ακολουθεί βελτιστοποίηση τιμής στην

σύμμορφη πλεγματική δομή, ώστε να προσδιοριστούν η ελάχιστη και μέγιστη τιμή διαμέτρου ράβδου, χρησιμοποιώντας στοιχεία πλαισίου, για τη μοντελοποίηση της πλεγματικής δομής [11,21].

4.8. Μέθοδοι ογκομετρικής πυκνότητας

Η μέθοδος ογκομετρικής πυκνότητας, στηρίζεται στον προσδιορισμό της κατάλληλης πυκνότητας υλικού ενός συνόλου σημείων (voxels), τα οποία απαρτίζουν τη συγκεκριμένη περιοχή του τρισδιάστατου χώρου, που επιδιώκεται να βελτιωθεί. Η ΤΟ μέθοδος με βάση την ογκομετρική πυκνότητα, η οποία είναι πιο συνηθισμένη και χρησιμοποιείται στα περισσότερα προγράμματα, είναι γνωστή ως SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization Method), δηλαδή μέθοδος βελτιστοποίησης ποινής με ισότροπα υλικά. Η γεωμετρία εκκίνησης της διαδικασίας, είναι ένα απλό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, που απαρτίζεται από ένα σύνολο σημείων. Κάθε σημείο έχει μια τιμή ογκομετρικής πυκνότητας, η οποία παριστάνει τη σχεδιαστική παράμετρο προς βελτιστοποίηση. Όταν η πυκνότητα έχει την τιμή 1, σημαίνει ότι το υλικό είναι πλήρως πυκνό, ενώ όταν έχει την τιμή 0 δηλώνει απουσία υλικού. Οι ενδιάμεσες τιμές στο 1 και το 0, σημαίνουν ότι το υλικό δεν χρειάζεται να είναι πλήρως συμπαγές για να μπορέσει να ανταποκριθεί στην τοπική κατάσταση που επικρατεί στο συγκεκριμένο σημείο. Οι προτιμότερες λύσεις, είναι αυτές που έχουν σημεία, τα οποία είναι πλήρως συμπαγή ή ειδάλλως να έχουν πυκνότητα κοντά στο 0. Οι τιμές πυκνότητας, χρησιμοποιούνται για τη διαβάθμιση της τιμής της δυσκαμψίας των σημείων στο FEA μοντέλο που χρησιμοποιείται στην ΤΟ διαδικασία. Το τυπικό πρόβλημα στην τοπολογική βελτιστοποίηση μορφοποιείται ως εξής:

$$\min_x L(u) = \int_\Omega \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx + \int_\Gamma \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} ds \qquad (1.1)$$

Ώστε

$$\alpha(\mathrm{u}, \mathrm{v}) = L(\mathrm{v}), \gamma\iota\alpha\ \acute{o}\lambda\alpha\ \tau\alpha\ \mathrm{v} \in \mathrm{u} \qquad (1.2)$$

Όπου

$$\alpha(\mathrm{u}, \mathrm{v}) = \int_\Omega E_{ijkl}\varepsilon_{kl}(u)\varepsilon_{ij}(\mathrm{v})dx \qquad (1.3)$$

Το x παριστάνει σημεία στην περιοχή του χώρου προς βελτιστοποίηση, το U παριστάνει τις επιτρεπόμενες τιμές των πεδίων των μετατοπίσεων, το f παριστάνει τις μαζικές δυνάμεις του πεδίου βαρύτητας, το t παριστάνει τις δυνάμεις της επιφανειακής τριβής. Η εξίσωση (1.3) είναι γνωστή ως ενέργεια διγραμμικής μορφής. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης σε αυτή τη μορφοποίηση, είναι οι τανυστές ελαστικότητας E_{ijkl}. Στη SIMP μέθοδο, οι τανυστές ελαστικότητας είναι συναρτήσεις της πυκνότητας και σε ορισμένες περιπτώσεις του προσανατολισμού. Οι τανυστές (tensors) είναι γεωμετρικά αντικείμενα, που μπορούν να θεωρηθούν ως γενικευμένα διανύσματα. Περιγράφουν γραμμικές σχέσεις ανάμεσα σε διανύσματα, βαθμωτά μεγέθη και άλλους τανυστές. Βασικά παραδείγματα τέτοιων σχέσεων, περιλαμβάνουν, το εσωτερικό γινόμενο, το εξωτερικό γινόμενο και γραμμικούς μετασχηματισμούς. Τα διανύσματα και τα βαθμωτά μεγέθη είναι επίσης τανυστές. Οι τανυστές χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν αντιστοιχίες ανάμεσα σε σύνολα γεωμετρικών διανυσμάτων [11,21].

4.9. Λογική, σχεδιασμός, στόχοι και προετοιμασία του προβλήματος τοπολογικής βελτιστοποίησης

Όπως είναι λογικό, πριν την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης, προηγείται ο σχηματισμός του προβλήματος. Σε αυτό το στάδιο, απαιτείται μεγάλη προσοχή, διότι πρέπει το πρόβλημα να είναι σωστά ορισμένο, έτσι ώστε η επίλυση του ορισμένου αυτού προβλήματος, να δώσει το βέλτιστο

δυνατό αποτέλεσμα. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν κατά τον σχεδιασμό ενός τέτοιου προβλήματος, κατηγοριοποιούνται σε πέντε διαδοχικά βήματα, που θα αναφερθούν παρακάτω [25]:

- Καθορισμός του στόχου του προβλήματος, δηλαδή τι πρέπει να επιτευχθεί με την βελτιστοποίηση και υπό ποια κριτήρια.
- Συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και πληροφοριών.
- Καθορισμός των μεταβλητών σχεδίασης, δηλαδή, αναγνώριση και καθορισμός των μεταβλητών σχεδίασης που περιγράφουν το πρόβλημα. Το πλήθος αυτό επηρεάζει άμεσα το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας.
- Προσδιορισμός του κριτηρίου προς βελτιστοποίηση, δηλαδή πρέπει να αποσαφηνιστεί το κριτήριο αξιολόγησης και τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Αυτό το κριτήριο είναι η αντικειμενική συνάρτηση, η οποία πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος.
- Προσδιορισμός των περιορισμών, σε αυτό το στάδιο γίνεται ο εντοπισμός των περιορισμών του προβλήματος.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση συσχετίζεται με την τροποποίηση της τοπολογίας μιας δεδομένης ποσότητας υλικού, με τρόπο τέτοιο, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του συστήματος. Στην ουσία, γίνεται αναζήτηση μιας πιο δύσκαμπτης τοπολογίας σε συνδυασμό με ελαχιστοποίηση του υλικού. Επομένως, ο στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας (compliance), διότι όσο χαμηλότερη είναι η ενδοτικότητα τόσο υψηλότερη είναι η δυσκαμψία. Με τον όρο ενδοτικότητα, εννοούμε το εξωτερικό έργο που δρα στο αντικείμενο και είναι ίσο με το άθροισμα όλων των μετατοπίσεων στα σημεία εφαρμογής των φορτίσεων, σταθμισμένα με το μέγεθος της φόρτισης. Δηλαδή, ελαχιστοποιώντας την ενδοτικότητα, μειώνεται η παραμόρφωση λόγω φορτίσεων στο αντικειμένου που μελετάται και τελικά μεγιστοποιείται η συνολική δυσκαμψία. Ο στόχος σχεδίασης βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας C, υπό τον περιορισμό του όγκου. Οι συναρτήσεις που περιγράφουν την ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας είναι οι εξής:

$$\mathrm{M}inimize\ C = F\ Tu, Ku = \mathrm{F}$$

$$V(pe) = \sum_{e=1}^{N} \left(\mathrm{pe} \frac{Ve}{Vtot} \leq Vlim \right)$$

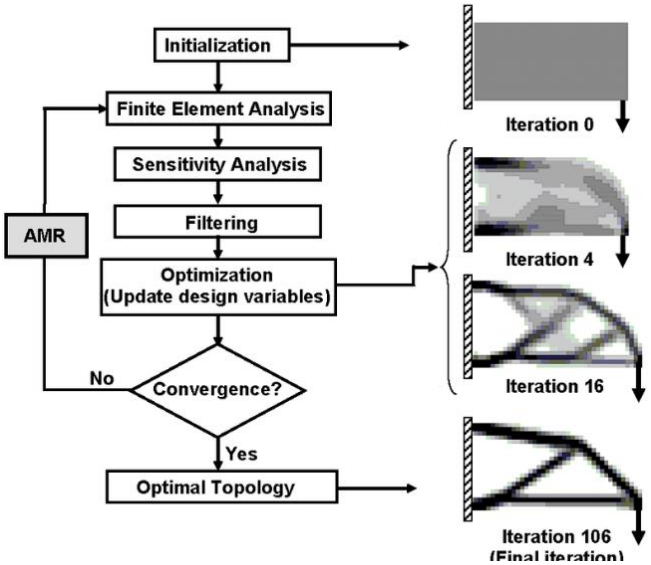
$$e \quad = 1, \dots, N$$

$$pe = \{pmin, 1\}$$

Όπου, K συμβολίζεται η μήτρα δυσκαμψίας της δομής, F είναι το διάνυσμα δύναμης ανά κόμβο και u, το πεδίο μετατόπισης. Ακόμη, ρe είναι η "εικονική" πυκνότητα, Ve είναι ο όγκος του e-οστού πεπερασμένου στοιχείου, N είναι το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων, VTot συμβολίζεται ο συνολικός όγκος του μέγιστου χωρίου που μπορεί να καταλάβει η δομή, ενώ VLim είναι ο επιθυμητός όγκος που καθορίζεται από το χρήστη [25,39].

Η διαδικασία "προετοιμασίας" του μοντέλου, ώστε να εφαρμοστεί η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι συγκεκριμένη. Αρχικά θα πρέπει να οριστούν, η περιοχή σχεδίασης, δηλαδή η περιοχή στην οποία θα επιτρέπεται η αλλαγή της τοπολογίας, αλλά και η περιοχή η οποία θα παραμείνει σταθερή κατά την βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει εφαρμογή των φορτίσεων αλλά και των οριακών συνθηκών. Για την επίλυση του προβλήματος, χρησιμοποιείται μια αριθμητική μέθοδος ανάλυσης, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). Με αυτό τον τρόπο γίνεται διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία και ορίζεται μια

πυκνότητα υλικού. Συνήθως, η βελτιστοποίηση τοπολογίας στοχεύει στην βέλτιστη κατανομή του υλικού, ώστε να μειωθεί η μάζα (Εικόνα 4.4) [25, 39].



Εικόνα 4.4. *Αλγόριθμος τοπολογικής βελτιστοποίησης [5]*

4.10. Πλεονεκτήματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Η τοπολογική βελτιστοποίηση, έχει τεράστια δυνητικά οφέλη στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας, ειδικότερα, προσδιορίζει το συνολικό σχήμα, τη διάταξη των στοιχείων, αλλά και τον τρόπο σύνδεσής τους στην περιοχή σχεδίασης.

Η μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης προσφέρει ολοκληρωμένα αποτελέσματα, συνυπολογίζοντας όλες τις παραμέτρους που περιγράφουν τη γεωμετρία και τις ιδιότητες ενός σώματος, καθώς και τις συνθήκες καταπόνησης του. Μέσα από την τοπολογική βελτιστοποίηση προτείνονται πιθανές μορφές ενός σώματος, που ικανοποιούν τις απαραίτητες και αναγκαίες συνθήκες, ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα και η αυξημένη απόδοση. Οι μορφές αυτές μπορούν να είναι από απλές, μέχρι σύνθετες οργανικές και πλεγματικές δομές. Μέσω των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, εξασφαλίζεται η μεθοδική και άμεση εύρεση βελτιωμένων επιλογών, ικανοποιώντας την απαίτηση της σύγχρονης βιομηχανίας, για σύντομους κύκλους ανάπτυξης προϊόντων και μεγιστοποίηση της απόδοσης των κατασκευών.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση όπως εφαρμόζεται σε ένα εμπορικό λογισμικό, επιγραμματικά, έχει τα ακόλουθα οφέλη στη διαδικασία σχεδιασμού [25]:

- Δημιουργία ελαφρών δομών
- Δημιουργία έτοιμου προς κατασκευή σχεδίου
- Εξοικονόμηση τεράστιας ποσότητας υλικού
- Εξοικονόμηση ενέργειας επεξεργασίας
- Μείωση της κατασκευής φυσικών πρωτοτύπων
- Μείωση των φυσικών δοκιμών
- Μείωση του χρόνου εισόδου στην αγορά
- Αύξηση (σε πολλές περιπτώσεις) ή τουλάχιστον διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων
- Αύξηση εύρους γκάμας των χρησιμοποιούμενων υλικών
- Άψογη συνεργασία σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες ΑΜ

Κεφάλαιο 5: Εργαλεία εκτέλεσης πειραματικού μέρους

5.1. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής

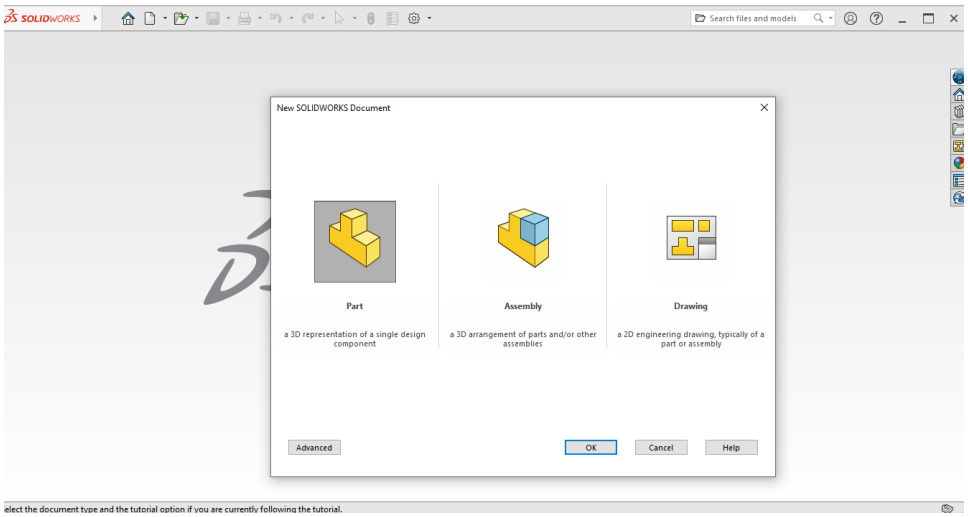
Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, είναι η απόδειξη της απόδοσης και των βελτιστοποιημένων αποτελεσμάτων, τα οποία προέρχονται από την τοπολογική βελτιστοποίηση. Στην μελέτη αυτή, θα πραγματοποιηθούν κάποια πειράματα. Τα πειράματα αυτά θα αφορούν μία βάση στήριξης κινητήρα ενός I.X οχήματος και πιο συγκεκριμένα ενός BMW E46. Πρώτα από όλα θα πραγματοποιηθεί 3d scanning, στο πραγματικό και ήδη υπάρχων κομμάτι. Έπειτα, θα γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις του αρχείου και θα πραγματοποιηθεί ανάλυση δυνάμεων με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Το πείραμα πλέον θα λάβει χώρα δύο φορές με δύο διαφορετικά λογισμικά με την βοήθεια των οποίων, εφόσον πραγματοποιηθεί η ανάλυση δυνάμεων, θα πραγματοποιηθούν κάποια είδη τοπολογικής βελτιστοποίησης με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, για ακόμη μία φορά. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την τοπολογική βελτιστοποίηση, θα αναλυθούν και θα συγκριθούν με το πρωτότυπο κλασσικό σχεδιασμό, αλλά θα υπάρξει επιπλέον σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών αποτελεσμάτων από τα δύο αυτά λογισμικά. Μετά το πέρας της ανάλυσης και της σύγκρισης, θα προκύψουν και θα καταγραφούν κάποια συμπεράσματα, από τα οποία αποσκοπείται να αποδειχθεί η ποιότητα, η χρηστικότητα, η εργονομία και η αποτελεσματικότητα της τοπολογικής βελτιστοποίησης, όταν λαμβάνει χώρα γενικά στους χώρους της παραγωγής εξαρτημάτων και ένα ακόμη παραπάνω σε μεγάλες βιομηχανίες με μαζικές παραγωγές.

5.2. Λογισμικό Solidworks

Η χρήση των λογισμικών πακέτων, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάπτυξη προϊόντων. Τα προγράμματα CAD/CAE/CAM που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία, συντελούν στις μεθόδους σχεδίασης, υπολογισμού και κατασκευής. Ένα λογισμικό πακέτο όπως είναι το Solidworks της Dassault Systems, παρέχει τη δυνατότητα για σχεδίαση, κατασκευή και έλεγχο του προϊόντος. Πραγματοποιεί τη μετάβαση από τα εικονικά μοντέλα στα φυσικά προϊόντα, απλοποιώντας και ελέγχοντας τις διαδικασίες πριν την παραγωγή τελικών προϊόντων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την επιτυχή κυκλοφορία του εκάστοτε προϊόντος, εφόσον μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά του προϊόντος προτού να κατασκευαστεί. Η τεχνολογία αυτή, συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας και την αύξηση της ποιότητας, εισάγοντας τεχνικές επισκόπησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Οι δυνατότητες που προσφέρουν τέτοια λογισμικά πακέτα έχουν ξεπεράσει τις προσδοκίες για τις οποίες αρχικά σχεδιάστηκαν. Άλλα δημοφιλή λογισμικά είναι το CREO της PTC, το NX της Siemens, το Inventor και το Fusion 360 της Autodesk, το CATIA επίσης της Dassault Systemes κ.α. Το Solidworks αποτελεί το πιο ευρέως διαδεδομένο λογισμικό CAD [15].

5.2.1. Περιβάλλον λογισμικού Solidworks

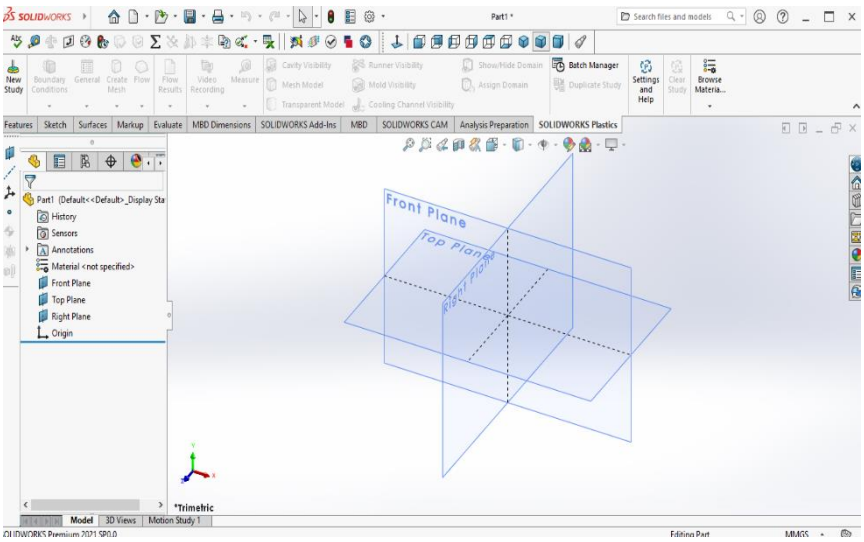
Κατά την έναρξη του λογισμικού Solidworks, με τη βοήθεια της εντολής «**New»,** εμφανίζεται στην οθόνη το παράθυρο «**New SOLIDWORKS Document»,** ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο αρχείο. Στη συνέχεια, επιλέγεται το εικονίδιο «**Part**» για να σχεδιαστεί το αντικείμενο.



Εικόνα 5.1. *Solidworks 2021.*

Με την επιλογή της εντολής «**Part**», όπως φαίνεται στην επόμενη Εικόνα 5.1, εμφανίζεται στην οθόνη το περιβάλλον σχεδίασης του λογισμικού, το βασικό menu και η γραμμή εντολών, καθώς επίσης και οι τρεις όψεις στις οποίες πραγματοποιείται η σχεδίαση, το Front Plane, το Top Plane και το Right Plane δηλαδή η πρόσοψη, η κάτοψη και η δεξιά πλάγια όψη.

Οι βασικές περιοχές του λογισμικού που βοηθούν για τη σχεδίαση οποιουδήποτε αντικειμένου:



Εικόνα 5.2. *Solidworks 2021.*

- **Main Menu** περιέχει τη λίστα εντολών File, Edit, View, Insert, Tools, Windows, Help.
- **Command Manager** περιέχει τις καρτέλες εντολών Features, Sketch, Surfaces, Markup, Evaluate, MBD Dimensions, Solidworks Add-Ins, MBD, Solidworks CAM, Analysis Preparation, Solidworks Plastics.
- **Feature Manager** βρίσκεται στο αριστερό μέρος της επιφάνειας εργασιών του λογισμικού και περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα βήματα σχεδίασης του αντικειμένου.
- **Περιοχή σχεδίασης** στο επάνω μέρος της περιοχής σχεδίασης, βρίσκεται η καρτέλα Heads-up, ενώ κάτω αριστερά το σύστημα συντεταγμένων.

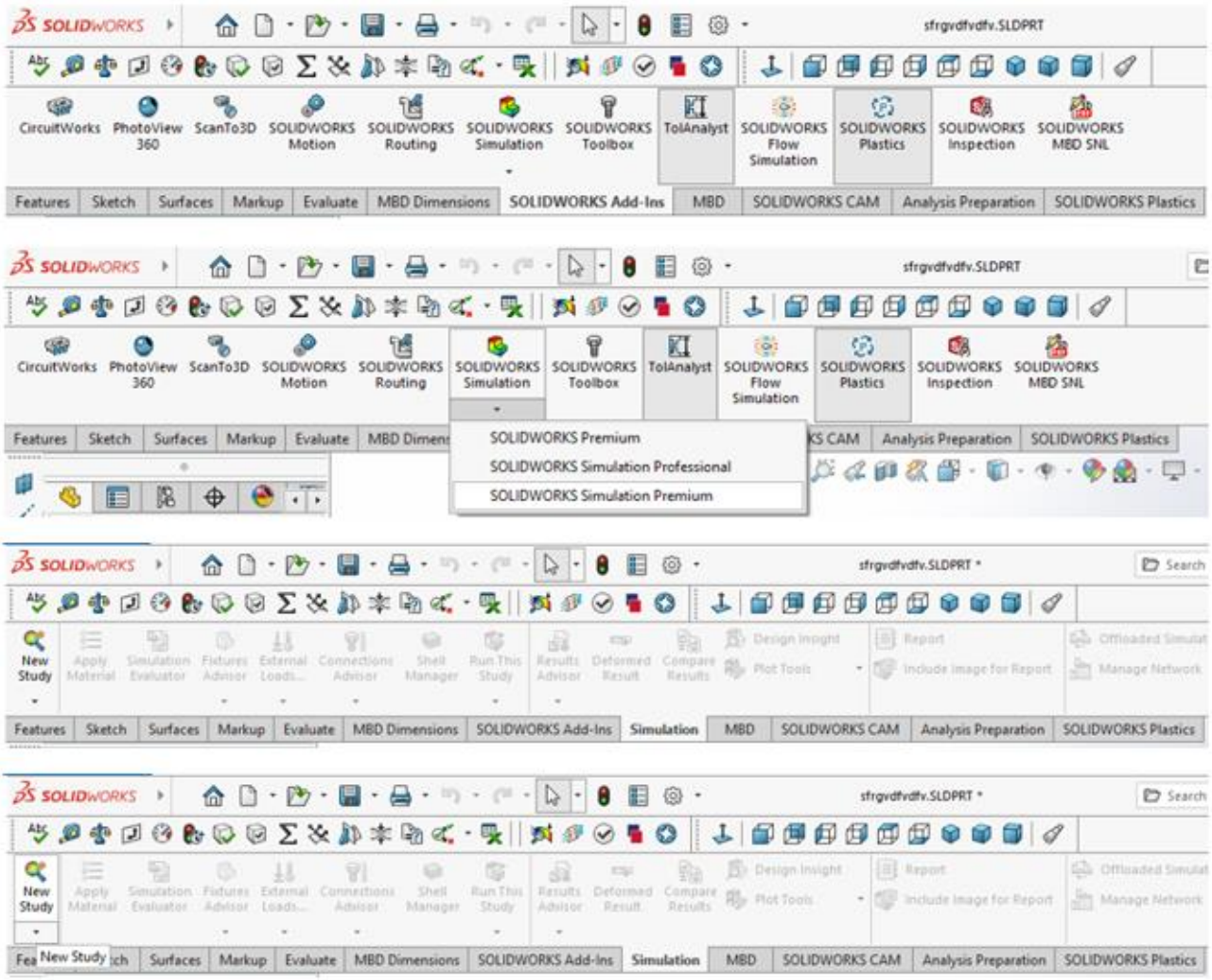
5.2.2. Εντολές σχεδίασης

Αρχικά, το πρώτα βήμα, είναι η επιλογή του επιπέδου σχεδιασμού Front, Top ή Right Plane, στη συνέχεια επιλέγεται από την περιοχή Command Manager η εντολή **«sketch»**. Με την εντολή sketch εμφανίζονται όλα τα εργαλεία που δίνουν την δυνατότητα για τον 2D σχεδιασμό, γραμμές οποιασδήποτε γεωμετρίας, όπως ευθείες, καμπύλες, κύκλους, ελλείψεις και ημικύκλια. Βασικό εργαλείο για το σχεδιασμό οποιουδήποτε αντικειμένου, είναι η εντολή **«Smart Dimension»,** με την οποία γίνεται η εισαγωγή των επιθυμητών διαστάσεων. Άλλες δυνατότητες που περιλαμβάνει η εντολή sketch είναι η εντολή **«Offset entities»,** η οποία δημιουργεί ακριβές αντίγραφο μιας γεωμετρίας. Η εντολή **«Convert entities»,** χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί μία οντότητα της γεωμετρίας του σκίτσου η οποία ταιριάζει με άλλη γεωμετρία του μοντέλου. Η εντολή **«Mirror entities»** δημιουργεί αντίγραφο ενός σχήματος σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς και η εντολή **«Trim entities»** χρησιμοποιείται για να γίνει αφαίρεση ανεπιθύμητων τμημάτων από το σχέδιο, τα οποία συμπίπτουν με άλλο τμήμα του σχεδίου.

Έπειτα από την περιοχή Command Manager επιλέγεται η εντολή **«Features»**, με τη βοήθεια της καρτέλας features προσεγγίζεται η μετατροπή από τη δισδιάστατη (2D) στην τρισδιάστατη (3D) σχεδίαση, οποιαδήποτε γεωμετρία έχει σχεδιαστεί με την εντολή sketch μπορεί να μετατραπεί σε 3D μορφή. Από τις πιο βασικές εντολές της καρτέλας features είναι η **«Extruded Boss/Base»** όπου χρησιμοποιείται για την επέκταση της τρίτης διάστασης ενός 2D σχεδίου. Η εντολή **«Revolved Boss/Base»** χρησιμοποιείται για την δημιουργία 3D αντικειμένων γύρω από έναν άξονα συμμετρίας. Η εντολή **«Extruded Cut»** χρησιμοποιείται για την αφαίρεση υλικού από το εκάστοτε αντικείμενο. Η εντολή **«Lofted Boss/Base»** χρησιμοποιείται για την επέκταση του δισδιάστατου σχεδίου σε τρισδιάστατο, οποιασδήποτε γεωμετρικής οντότητας του σχήματος συμπεριλαμβανομένων καμπυλών. Η εντολή **«Fillet»,** μετατρέπει γωνίες σε καμπυλοειδή επιφάνεια και η εντολή **«Chamfer»** χρησιμοποιείται για τη μετατροπή γωνιών σε επίπεδη επιφάνεια. Η εντολή **«Reference Geometry»** δίνει τη δυνατότητα να εισαχθεί επιπλέον Plane για σχεδίαση. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι υπάρχουν αρκετές ακόμα εντολές του λογισμικού, στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφονται αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την διόρθωση σχεδιασμού της βάσης του κινητήρα.

5.2.3. Solidworks Topology Study

Το λογισμικό Solidworks, παρέχει τη δυνατότητα για μελέτη τοπολογικής βελτιστοποίησης. Η ύπαρξη του “Topology Study” είναι ένα από τα βασικά βήματα για κάθε σχεδιαστή που χρησιμοποιεί το λογισμικό solidworks και προστέθηκε πρώτη φορά το 2018. Με αυτό το εργαλείο, μπορεί να βρεθεί αυτόματα η βέλτιστη σχεδιαστική λύση, δηλαδή το σχέδιο που είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ και ταυτόχρονα εξίσου αρκετά ισχυρό όσον αναφορά την αντοχή σε κάμψη, στρέψη ή εφελκυσμό. Στην περιοχή Command Manager, από τις καρτέλες εντολών, επιλέγεται το **«Solidworks Add – Ins»** και όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3 επιλέγεται το **«Solidworks Simulation Premium»**. Στη συνέχεια εμφανίζεται μία νέα καρτέλα **«Simulation»,** ώστε από την περιοχή **«New Study»** να υλοποιηθεί η νέα μελέτη.



Εικόνα 5.3. *Solidworks Simulation Premium.*

Για να διεξαχθεί η μελέτης της τοπολογικής βελτιστοποίησης, από τη περιοχή New Study, επιλέγεται το «**Topology Study**» όπου ανοίγει το παράθυρο επεξεργασιών, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3. Μέσω του εργαλείου Topology Study, δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί μη παραμετρική βελτιστοποίηση, με βάση τις παραμέτρους που καθορίζονται από το χρήστη. Το λογισμικό αυτόματα δείχνει που μπορεί να αφαιρεθεί υλικό για να ελαχιστοποιηθεί η μάζα. Η μελέτη της Τοπολογικής Βελτιστοποίησης, ξεκινώντας με ένα μέγιστο χώρο σχεδίασης (που αντιπροσωπεύει το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος για ένα εξάρτημα) και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα εφαρμοζόμενα φορτία, τα εξαρτήματα και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς, αναζητά μια νέα διάταξη υλικού, εντός των ορίων της μέγιστης επιτρεπόμενης γεωμετρίας, ανακατανέμοντας το υλικό. Το βελτιστοποιημένο εξάρτημα επιβάλλεται να ικανοποιεί όλες τις απαιτούμενες μηχανικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις.

5.3. Λογισμικό nTop

Το nTop ή καλύτερα nTopology, είναι μια προηγμένη πλατφόρμα ανάπτυξης προϊόντων, ειδικά σχεδιασμένη για μηχανικούς και βιομηχανικούς σχεδιαστές, που επιδιώκουν να δημιουργήσουν σύνθετες, καινοτόμες και υψηλής απόδοσης γεωμετρίες. Ξεχωρίζει για την ευελιξία του στον σχεδιασμό προηγμένων δομών, όπως ελαφριές πλέξεις (lattice structures), οργανικά σχήματα και γεωμετρίες που είναι δύσκολο έως αδύνατο να επιτευχθούν με παραδοσιακές CAD λύσεις. Σαν λογισμικό περικλείει τον σχεδιαστικό τομέα, αλλά δεν είναι αυτή η προκαθορισμένη χρήση του, καθώς παρέχει ένα τυπικό σχεδιαστικό περιβάλλον, για τυχόν άμεσες μικρές απαραίτητες διορθώσεις. Είναι ένα εργαλείο, το οποίο μπορεί να παρέχει εκτεταμένες προσομοιώσεις διαφόρων ειδών, όπως κατανομής δυνάμεων, ροής ρευστών κ.λπ. [41].

5.3.1. Βασικά Χαρακτηριστικά:

- **Παραμετρική Μοντελοποίηση:** Το nTopology επιτρέπει την πλήρη παραμετροποίηση κάθε σχεδίου, διευκολύνοντας την εύκολη προσαρμογή και τη γρήγορη αλλαγή παραμέτρων [41].
- **Σχεδιασμός βάσει δεδομένων:** Ενσωματώνει προσομοιώσεις και ανάλυση δεδομένων απευθείας στη διαδικασία σχεδίασης, οδηγώντας σε πιο αποδοτικά προϊόντα [41].
- **Δυναμική Επεξεργασία Πλεγμάτων:** Επιτρέπει τον εύκολο σχεδιασμό και βελτιστοποίηση πλεγμάτων, εξασφαλίζοντας ανθεκτικότητα με ελαφριά υλικά [41].
- **Ενσωμάτωση Προσθετικής Κατασκευής (3D Printing):** Είναι ιδανικό για προηγμένες εφαρμογές παραγωγής, όπως η βιομηχανική και αεροδιαστημική κατασκευή [41].

5.3.2. Γιατί το nTopology Ξεχωρίζει:

Το περιβάλλον του είναι πιο ανοιχτό και ισχυρό από τα παραδοσιακά εργαλεία CAD, δίνοντας στους μηχανικούς τη δυνατότητα να απελευθερώσουν τη δημιουργικότητά τους και να εξερευνήσουν νέες δυνατότητες σχεδίασης, δίνοντας έμφαση σε μη παραδοσιακά μέσα. Χάρη στον συνδυασμό παραμετρικής σχεδίασης και βελτιστοποίησης υλικών, το nTopology ενισχύει την παραγωγικότητα και την καινοτομία.

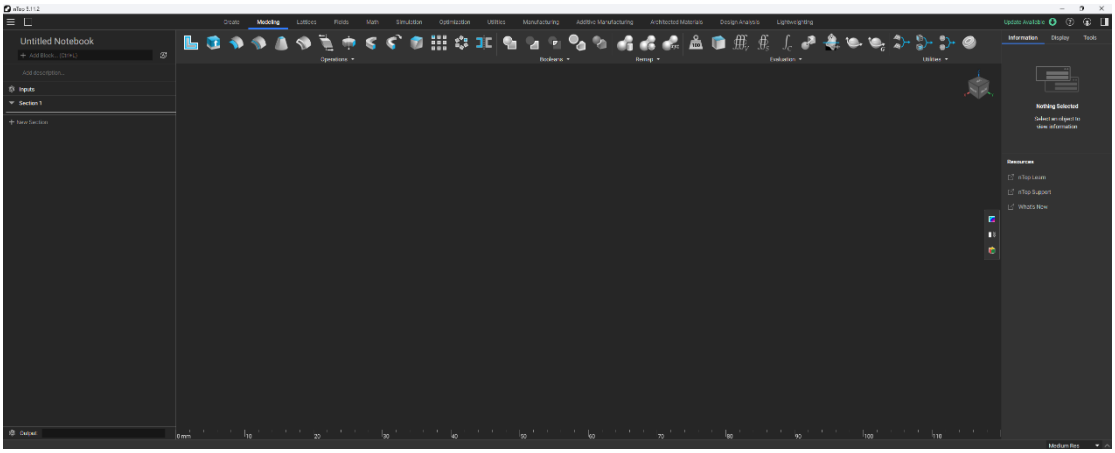
Είναι ιδανικό για όσους αναζητούν μια νέα προσέγγιση στον σχεδιασμό και την προτυποποίηση, όπου η απόδοση και η λειτουργικότητα δεν είναι απλώς προτεραιότητες, αλλά ενσωματωμένες στον πυρήνα του σχεδίου.

Το nTopology διαθέτει ένα σύγχρονο, ευέλικτο και δυναμικό περιβάλλον εργασίας, σχεδιασμένο για να υποστηρίζει τις απαιτήσεις παραμετρικού σχεδιασμού και προηγμένων προσομοιώσεων σε βιομηχανικές εφαρμογές [41].

5.3.3. Βασικά Στοιχεία του Περιβάλλοντος:

1. **Κεντρικός χώρος εργασίας (3D Viewport)**

Ο κεντρικός χώρος εργασίας, προσφέρει μια διαδραστική 3D οθόνη, όπου οι χρήστες μπορούν να περιστρέφουν, να μεγεθύνουν και να επεξεργάζονται γεωμετρίες, σε πραγματικό χρόνο. Η ικανότητα απεικόνισης γεωμετρίας με λεπτομέρεια και δυναμική ανάλυση, ενισχύεται με επιλογές για την προβολή πλεγμάτων, πεδίων δεδομένων και καμπυλοτήτων [40].

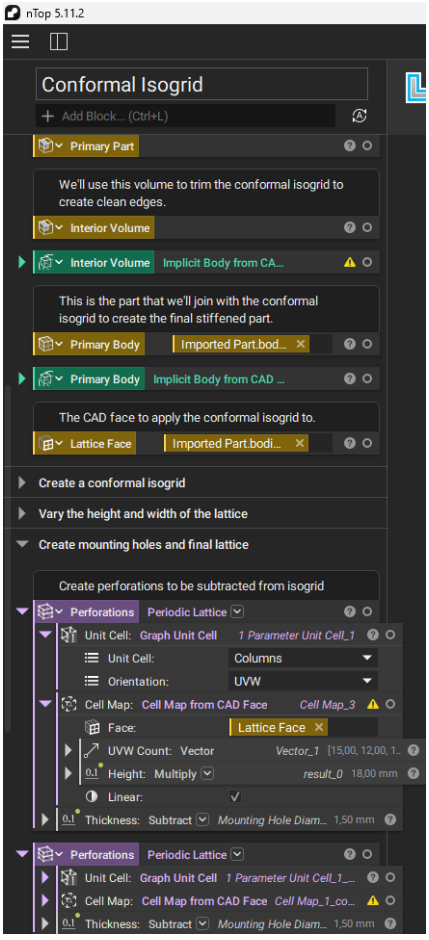


Εικόνα 5.4. *Κεντρικός χώρος εργασίας nTopology.*

2. Block Panel (Δομικό Περιβάλλον)

Αντί για τη συμβατική προσέγγιση ιστορικού, το nTopology λειτουργεί με blocks, τα οποία είναι τα δομικά στοιχεία που επιτρέπουν την παραμετρική μοντελοποίηση και την εύκολη επαναχρησιμοποίηση των διαδικασιών σχεδιασμού [40].

- Παραμετρικά blocks που προσαρμόζονται εύκολα.
- Ιεραρχική προβολή για τον έλεγχο της ροής εργασίας.

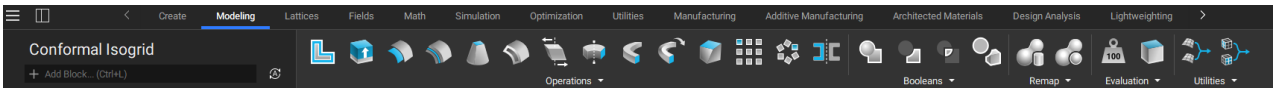


Εικόνα 5.5. *Δομικό περιβάλλον nTopology.*

3. Toolbars και προσαρμόσιμα εργαλεία

Πάνω και αριστερά από το χώρο εργασίας βρίσκονται εργαλεία για βασικές λειτουργίες, όπως:

- Προβολή γεωμετρίας (orthographic, perspective).
- Διαχείριση επιπέδων και οπτικοποίησης πλεγμάτων.
- Εργαλεία Boolean, μετασχηματισμών και lattice generation.



Εικόνα 5.6. Toolbar nTopology.

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι ο όρος Boolean προέρχεται από τη λογική του George Boole, ενός μαθηματικού του 19ου αιώνα και αναφέρεται σε λογικές πράξεις που λειτουργούν με δύο πιθανές καταστάσεις: αληθείς (True) ή ψευδείς (False). Τα Boolean Operations στο πεδίο του 3D σχεδιασμού (όπως στο nTopology), αναφέρονται σε γεωμετρικές πράξεις, που εφαρμόζονται σε τρισδιάστατες γεωμετρίες, για να δημιουργήσουν νέες σύνθετες μορφές. Παρακάτω θα ειπωθούν κάποιες από τις εντολές αυτού του τύπου [40].

4. Visualization controls

Οι χρήστες μπορούν να προσαρμόζουν την απεικόνιση των δεδομένων τους με επιλογές για χρωματικούς χάρτες, ανάλυση πεδίων και προσαρμοσμένες οπτικοποιήσεις, που βασίζονται σε φυσικά φαινόμενα, όπως τάσεις και θερμοκρασίες [40].

5. Simulation tools

Το περιβάλλον ενσωματώνει πλήρως εργαλεία ανάλυσης προσομοιώσεων, καθιστώντας εύκολη τη μετάβαση από τη γεωμετρική σχεδίαση, στην ανάλυση φόρτισης, βελτιστοποίησης τοπολογίας και προσομοιώσεων κατασκευής [40].

6. Εργονομική πλοήγηση και παραμετροποίηση

- Υποστήριξη drag-and-drop για blocks.
- Άμεση ενημέρωση των γεωμετριών σε κάθε αλλαγή παραμέτρου.
- Προσαρμογή του χώρου εργασίας ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιαστή.

5.3.4. Βασικές εντολές και γενικότερα δυνατότητες του nTop:

- **Import geometry:** Εισάγει γεωμετρικά αρχεία CAD (STL, STEP, κ.ά.).
- **Export part:** Εξαγωγή του τελικού σχεδίου σε διάφορες μορφές για 3D εκτύπωση ή περαιτέρω επεξεργασία.
- **Boolean union:** Ενώνει δύο ή περισσότερα γεωμετρικά σώματα σε ένα ενιαίο.
- **Boolean subtract:** Αφαιρεί ένα γεωμετρικό σώμα από ένα άλλο.
- **Boolean intersection:** Διατηρεί το κοινό μέρος δύο ή περισσότερων γεωμετριών.
- **Lattice generation:** Δημιουργεί πλέγματα (lattices) στο εσωτερικό ή εξωτερικό ενός αντικειμένου.
- **Gyroid structure:** Δημιουργεί εσωτερικές δομές τύπου gyroid για ελαφριά αλλά ανθεκτικά σχέδια.
- **Shell:** Δημιουργεί ένα λεπτό περίβλημα γύρω από μια γεωμετρία.
- **Offset body:** Μετακινεί ή επεκτείνει την επιφάνεια ενός αντικειμένου κατά συγκεκριμένη απόσταση.
- **Remesh surface:** Επανακαθορίζει το πλέγμα μιας επιφάνειας για καλύτερη απόδοση.
- **Thicken body:** Δίνει πάχος σε μια επιφάνεια.
- **Field driven design:** Επιτρέπει τη διαμόρφωση γεωμετριών βάσει πεδίων δεδομένων (π.χ., τάσεις ή θερμοκρασίες).
- **Voronoi Structure:** Δημιουργεί σύνθετες δομές Voronoi για ελαφριά σχεδίαση.
- **Smoothen body**: Εξομαλύνει τις επιφάνειες ενός μοντέλου.
- **Trim body:** Κόβει μια γεωμετρία με βάση μια επιφάνεια ή ένα επίπεδο.
- **Patterning (Linear, circular, etc.):** Δημιουργεί επαναλαμβανόμενα μοτίβα γεωμετριών.
- **Variable lattice density:** Προσαρμόζει την πυκνότητα του πλέγματος με βάση παραμέτρους.
- **Setting boundary conditions:** Ορίζει συνθήκες ορίου για ανάλυση προσομοιώσεων.
- **Stress analysis:** Εκτελεί ανάλυση τάσεων σε γεωμετρίες.
- **Thermal analysis:** Προσομοιώνει τη θερμική συμπεριφορά των αντικειμένων.
- **Topology optimization:** Βελτιστοποιεί τη μορφή ενός αντικειμένου για ελάχιστο βάρος και μέγιστη αντοχή.
- **Flow control analysis:** Προσομοιώνει τη ροή ρευστών γύρω από ένα αντικείμενο.
- **Adaptive meshing:** Αυτοματοποιεί τη βελτιστοποίηση του πλέγματος για ακριβέστερη ανάλυση.
- **Parametric control:** Δημιουργεί παραμετρικές σχέσεις που επιτρέπουν δυναμικές αλλαγές στο μοντέλο.
- **Notebook blocks:** Εργαλείο για καταγραφή και επεξήγηση βημάτων στον σχεδιασμό και την προσομοίωση.
- **Implicit body creation**: Δημιουργία γεωμετριών βάσει μαθηματικών συναρτήσεων.
- **Create plane:** Δημιουργία επιπέδου αναφοράς για σχεδίαση και κοπή γεωμετριών.
- **Extrude:** Εξώθηση προφίλ για δημιουργία τρισδιάστατων σχημάτων.
- **Revolve:** Περιστροφή καμπύλης γύρω από άξονα για δημιουργία συμμετρικών γεωμετριών.
- **Loft:** Σύνδεση πολλαπλών προφίλ για τη δημιουργία πολύπλοκων επιφανειών.
- **Sweep:** Παρακολούθηση μιας καμπύλης με προφίλ για τρισδιάστατα μοντέλα.
- **Blend surfaces:** Σύνδεση και ομαλή μετάβαση μεταξύ δύο επιφανειών.
- **Create cylinder:** Δημιουργία κυλινδρικής γεωμετρίας.
- **Create sphere**: Δημιουργία σφαίρας με ορισμένη ακτίνα.
- **Create box:** Δημιουργία πρίσματος με ορθογώνια βάση.
- **Import image data:** Εισαγωγή δεδομένων εικόνας για δημιουργία γεωμετριών από bitmap.

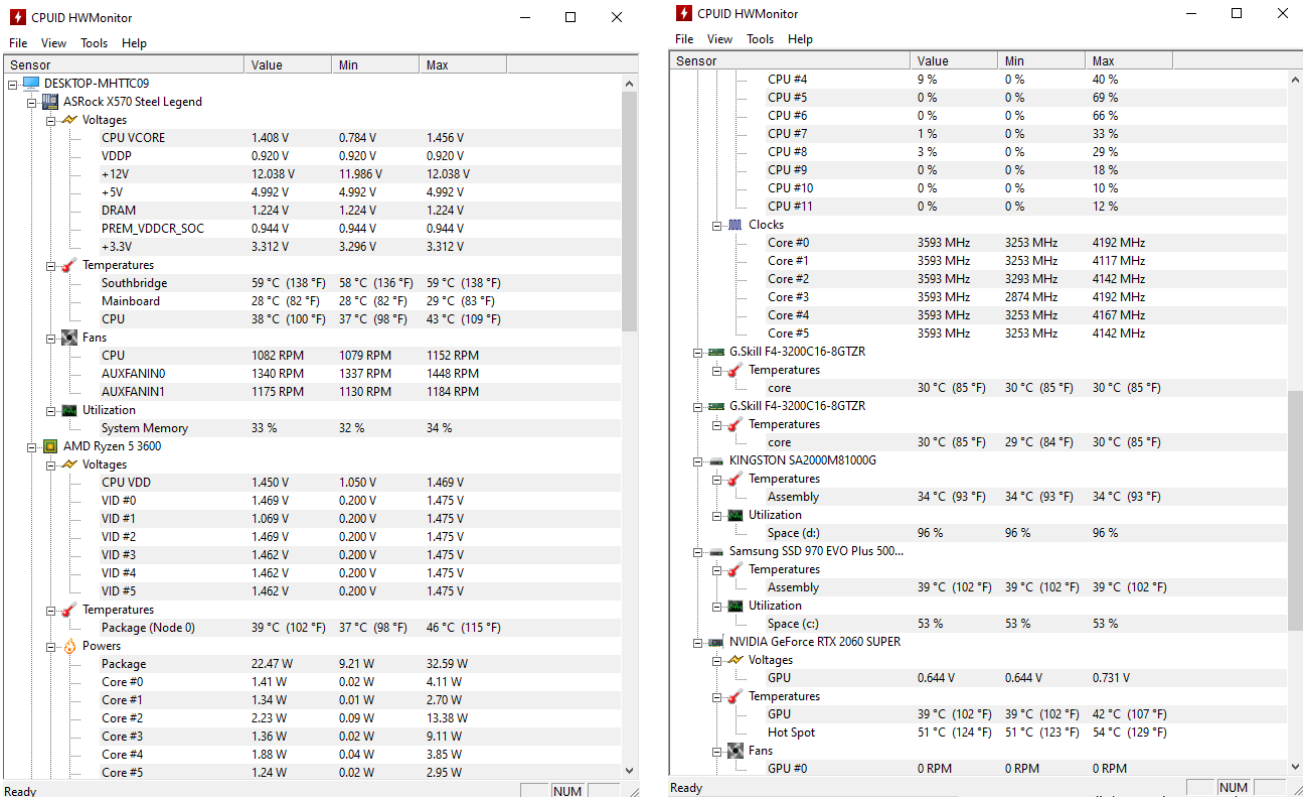
- **Distance field operations:** Ορισμός γεωμετριών με βάση τις αποστάσεις από επιφάνειες.
- **Thickness field:** Διαφοροποίηση πάχους μιας γεωμετρίας με βάση πεδία.
- **Infill operations:** Δημιουργία εσωτερικών γεωμετριών με μοτίβα για ελαφριά δομή.
- **Boundary mesh creation:** Δημιουργία πλέγματος γύρω από μια γεωμετρία.
- **Cut with plane:** Κοπή γεωμετρίας με βάση επίπεδο.
- **Split body:** Διαχωρισμός γεωμετρίας σε πολλαπλά μέρη.
- **Deform geometry:** Παραμόρφωση γεωμετρίας με ελεγχόμενους μετασχηματισμούς.
- **Morphing structures:** Μετασχηματισμός πλεγμάτων και δομών με βάση κανόνες παραμόρφωσης.
- **Create mesh from surface:** Μετατροπή επιφάνειας σε πλέγμα (mesh) για ανάλυση ή κατασκευή.
- **Remesh adaptive:** Βελτιστοποίηση του μεγέθους των τριγώνων σε ένα πλέγμα.
- **Mesh refinement:** Αύξηση της ανάλυσης ενός πλέγματος για καλύτερη απόδοση προσομοίωσης.
- **Mesh decimation:** Μείωση της πολυπλοκότητας ενός πλέγματος για βελτιωμένη απόδοση.
- **Convert implicit to mesh:** Μετατροπή γεωμετρίας από μορφή implicit σε πλέγμα.
- **Mesh smoothing:** Εξομάλυνση ενός πλέγματος για καλύτερη εμφάνιση ή ακρίβεια.
- **Mesh offset:** Μετατόπιση του πλέγματος προς τα έξω ή προς τα μέσα.
- **Surface mesh extraction:** Δημιουργία πλέγματος μόνο για εξωτερικές επιφάνειες.
- **Mesh analysis (Quality check):** Αξιολόγηση της ποιότητας του πλέγματος (π.χ. για μη κλειστά πλέγματα).
- **Mesh to surface:** Μετατροπή πλέγματος σε επιφάνεια.
- **Thicken mesh:** Δημιουργία γεωμετρίας με βάση το πάχος ενός πλέγματος.
- **Mesh intersection detection:** Εντοπισμός σημείων τομής μεταξύ πλεγμάτων.
- **Mesh coloring by field:** Εφαρμογή χρωμάτων σε πλέγματα με βάση πεδία δεδομένων.
- **Define design space:** Καθορισμός του χώρου σχεδιασμού για βελτιστοποίηση.
- **Setting load constraints:** Ορισμός φορτίων για τη γεωμετρία.
- **Setting fix constraints:** Επιλογή σταθερών περιορισμών σε γεωμετρίες.
- **Apply manufacturing constraints:** Προσθήκη περιορισμών κατασκευής, όπως ελάχιστο πάχος.
- **Symmetry constraints:** Επιβολή συμμετρίας στο μοντέλο.
- **Smoothen body:** Εξομάλυνση του αποτελέσματος της βελτιστοποίησης [40].

5.4. Λογισμικό HWMonitor

Το λογισμικό HWMonitor είναι της εταιρείας CPUID και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που βοηθάει στο να έχει ο χρήστης του ηλεκτρονικού υπολογιστή άμεση εικόνα για διάφορα στοιχεία όπως (Εικόνα 5.7) [26]:

- Διάφορες θερμοκρασίες (π.χ. Ram, επεξεργαστή, κάρτας γραφικών, σκληρών δίσκων, κ.λπ.)
- Κατανάλωση ισχύος (π.χ. Ram, επεξεργαστή, κάρτας γραφικών, σκληρών δίσκων, κ.λπ.)
- Τάση των προαναφερθέντων εξαρτημάτων
- Λειτουργία ανεμιστήρων

Επιπλέον, το λογισμικό δείχνει την ελάχιστη και την μέγιστη μέτρηση που έχει κρατήσει από κάθε μία τιμή, καθώς δείχνει και ζωντανά τις ισχύουσες τιμές των μετρήσεων. Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε η βασική έκδοση του λογισμικού αυτού, η οποία παρέχεται δωρεάν και μπορεί κάποιος να την εγκαταστήσει από το επίσημο site της CPUID [26].



Εικόνα 5.7. *Περιβάλλον του λογισμικού HWMonitor*

5.5. 3D Scanner

Για την αξιοποίηση της αντίστροφης μηχανικής χρησιμοποιήθηκε ένα 3d scanner της “Scan in a box” (Εικόνα 5.9). Το κόστος του συγκεκριμένου τρισδιάστατου σαρωτή, κυμαίνεται περίπου στα 5.000 ευρώ μαζί με την περιστρεφόμενη βάση, την πλάκα καλιμπραρίσματος και το τρίποδο. Είναι ένα τυπικό scanner δομημένου φωτός. Διαθέτει δύο κάμερες και η ταχύτητα του φτάνει τις 4 ίντσες ανά λήψη [6].



Εικόνα 5.8. *3d scanner της ‘’scan in a box’’ κατά την διάρκεια του καλιμπραρίσματος*



Εικόνα 5.9. *3d scanner της ‘’scan in a box’’ [6]*

Κεφάλαιο 6: Πειραματικό μέρος

6.1. Σκανάρισμα του πρωτοτύπου και προετοιμασία του ψηφιακού αρχείου

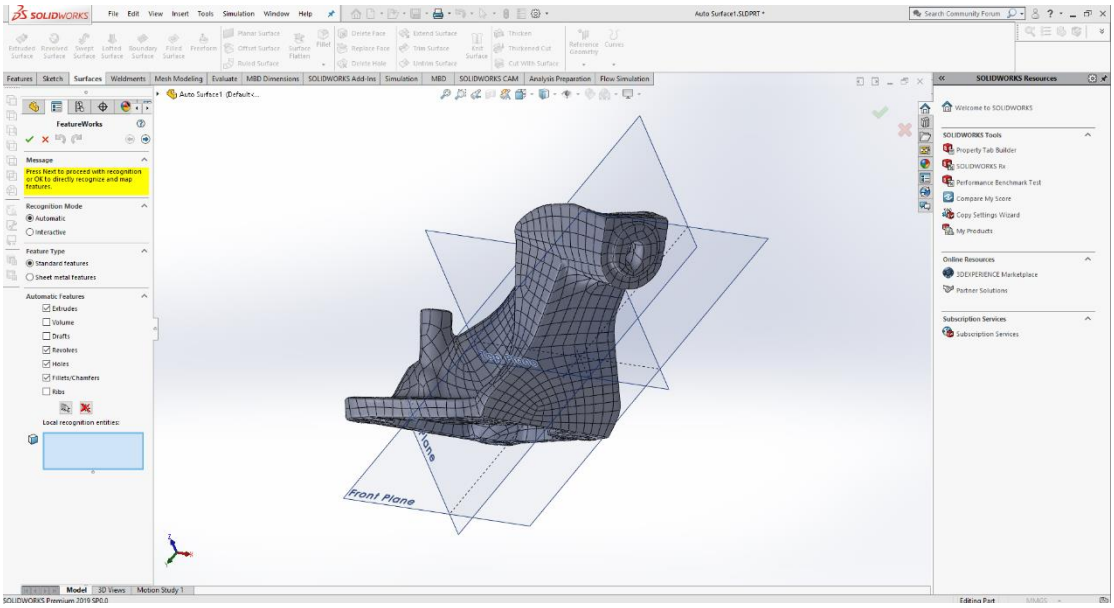
Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας, περιέχει κάποια βήματα ταξινομημένα με πολύ συγκεκριμένη κατάταξη.

1ο Βήμα: Σκανάρισμα του εξαρτήματος, το οποίο στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μία **βάση στήριξης κινητήρα** από ένα επιβατικό Ι.Χ. αυτοκίνητο μάρκας BMW και μοντέλου E46. Αρχικώς, για να επιτευχθεί σωστά το σκανάρισμα της βάσης, πρέπει να γίνει η σωστή προετοιμασία του δοκιμίου. Σε πρώτη φάση λοιπόν, καθαρίζεται σωστά το αντικείμενο έτσι ώστε να απομακρυνθεί κάθε ξένο σώμα και να υπάρχει η σωστή διακριτότητα ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο να έχει κάποιου είδους λιπαρότητα στην επιφάνεια του. Σε δεύτερη φάση πραγματοποιείται η επικάλυψη με ειδικό σπρέι. Το σπρέι που χρησιμοποιείται συνήθως στο 3D scanning είναι ένα υλικό που βελτιώνει την πρόσφυση της επιφάνειας (την κάνει πιο σαγρέ) ενός αντικειμένου και διευκολύνει την ακρίβεια του 3D scanning. Αυτό είναι συνήθως κάποιο σπρέι, με βάση το ταλκ ή το γραφίτη και ψεκάζεται στην επιφάνεια του αντικειμένου που θα σαρωθεί. Στο επόμενο στάδιο προετοιμάζεται (καλιμπράρισμα) το scanner (Εικόνα 5.9) και τοποθετείται το δοκίμιο στην ειδική περιστρεφόμενη βάση (Εικόνα 6.1). Εκτελώντας το σκανάρισμα παίρνουμε το εικονικό αρχείο σε μορφή νέφους. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρχει η επιθυμητή όψη του αντικειμένου, αλλά στην πραγματικότητα είναι πολλά σημεία, τα οποία όμως δεν είναι ενωμένα μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη εταιρεία, παρέχει στο λογισμικό της την επιλογή διεξαγωγής αρχείου σε OBJ, STL, PLY, OFF. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έγινε δοκιμή διεξαγωγής σε STL και OBJ, όμως λόγω καλύτερης συμβατότητας με τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στο επόμενο βήμα, επικράτησε η μορφή STL. Σε αυτήν την φάση όμως έχει τελειώσει η διαδικασία του 3d Scanning.



Εικόνα 6.1. *Η βάση του κινητήρα τοποθετημένη επάνω στην περιστρεφόμενη βάση για την τρισδιάστατη σάρωση.*

2ο Βήμα: Ακολουθεί η επεξεργασία του αρχείου. Όπως έχει ξανά αναφερθεί την δεδομένη χρονική στιγμή, το αρχείο είναι μορφής STL αλλά είναι σε μορφή σημείων. Αυτό σημαίνει πως μπορεί να πραγματοποιηθεί με αυτό 3d Printing (πιθανόν με μικροσφάλματα), αλλά δεν μπορεί να επεξεργαστεί σε κάποιο κοινό λογισμικό, όπως είναι το SolidWorks. Κατά ορισμό το πρόβλημα είναι ότι το αρχείο δεν έχει **Mesh** (συνοχή δομής). Για να γίνει η δημιουργία Mesh χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της **Geomagic**, το οποίο ονομάζεται **Design X**. Έγινε η εισαγωγή του αρχείου από το 3d scanning και με την εντολή **AutoSurface,** επιτεύχθηκε η ενοποίηση της δομής. Εφόσον το αρχείο είναι πλέον Meshed και μπορεί να υποστεί επεξεργασία, γίνεται η εξαγωγή του πάλι σε STL (Εικόνα 6.2) [35].

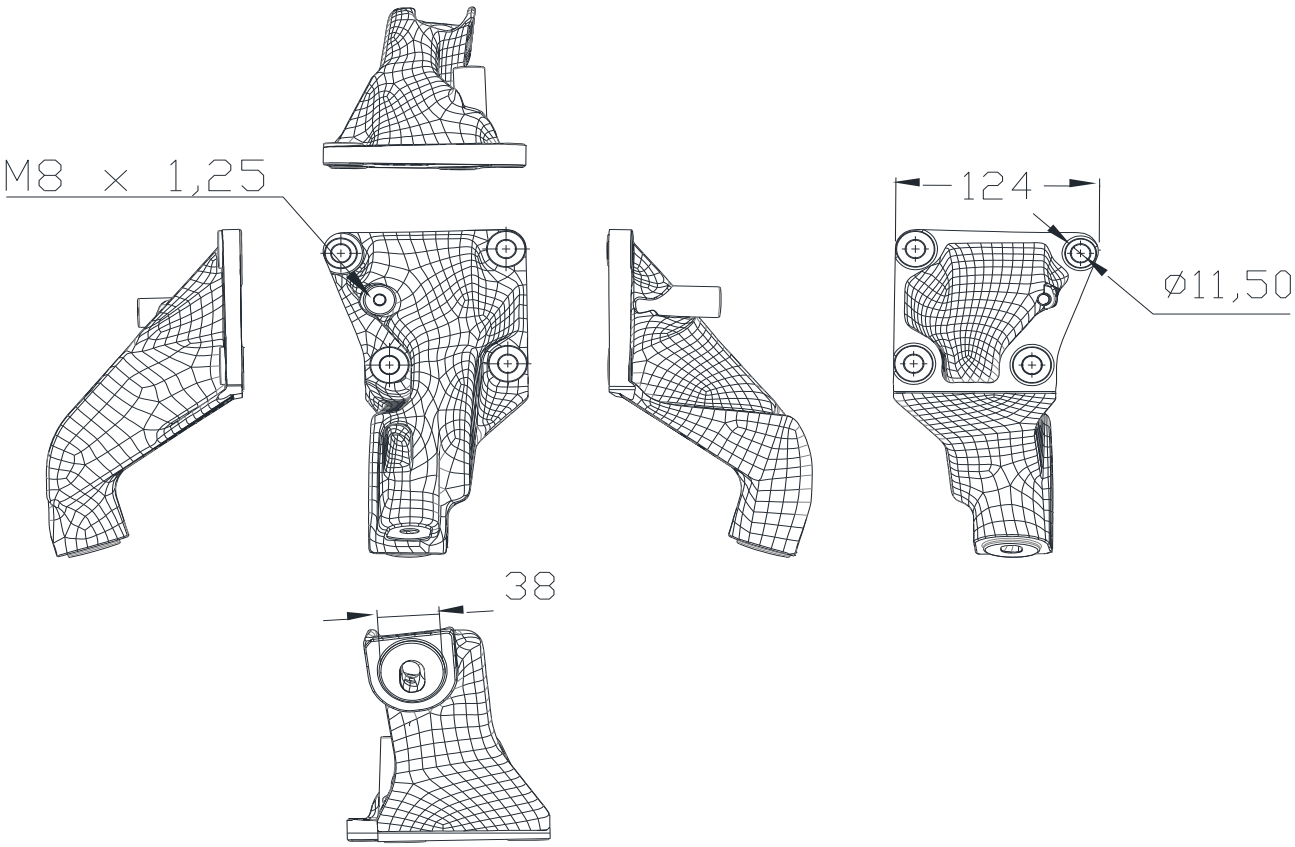


Εικόνα 6.2. *Η τρισδιάστατη μορφή του αρχείου μετά από την διαδικασία του meshing.*

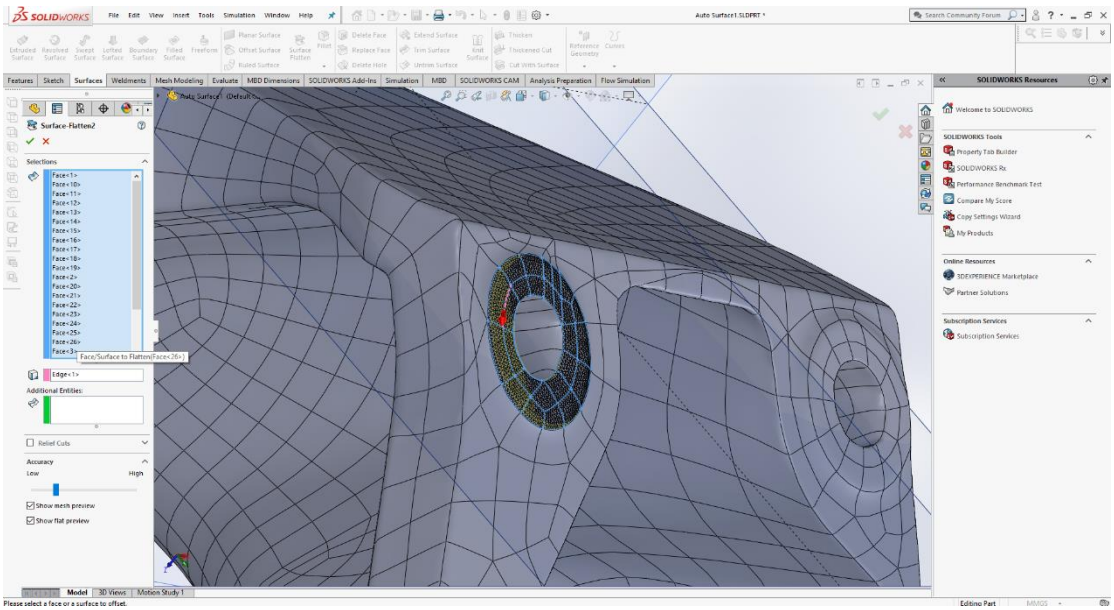
Στην συνέχεια, αφού άνοιξε το αρχείο στο SolidWorks, παρατηρούνται κάποιες ατέλειες από το σκανάρισμα. Αυτές οι ατέλειες είναι:

- Οι τέσσερις πατούρες των βιδών της βάσης δεν είναι ομοιόμορφες.
- Η πατούρα στήριξης του κινητήρα δεν είναι ομοιόμορφη.
- Το σπείρωμα που υπάρχει για να βιδώσει το καλώδιο της γείωσης του κινητήρα δεν υπάρχει.

Αυτές οι ατέλειες για να διορθωθούν πρέπει να γίνει χειροκίνητη επέμβαση με το σχεδιαστικό λογισμικό, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Σε πρώτη φάση, επειδή όπως φαίνεται, το κομμάτι δεν έχει καμία ομοιόμορφη επιφάνεια (face) ώστε να υπάρχει τρόπος σχεδίασης επάνω σε αυτή, πρέπει να δημιουργηθούν. Για την δημιουργία επιφανειών, με την βοήθεια της εντολής “surface flatten” επιλέγονται, όπως στην εικόνα, τα μέρη της επιφάνειας που επιθυμούμε να ενωθούν και στην συνέχεια πατάμε το πράσινο “τικ” (Εικόνα 6.4).

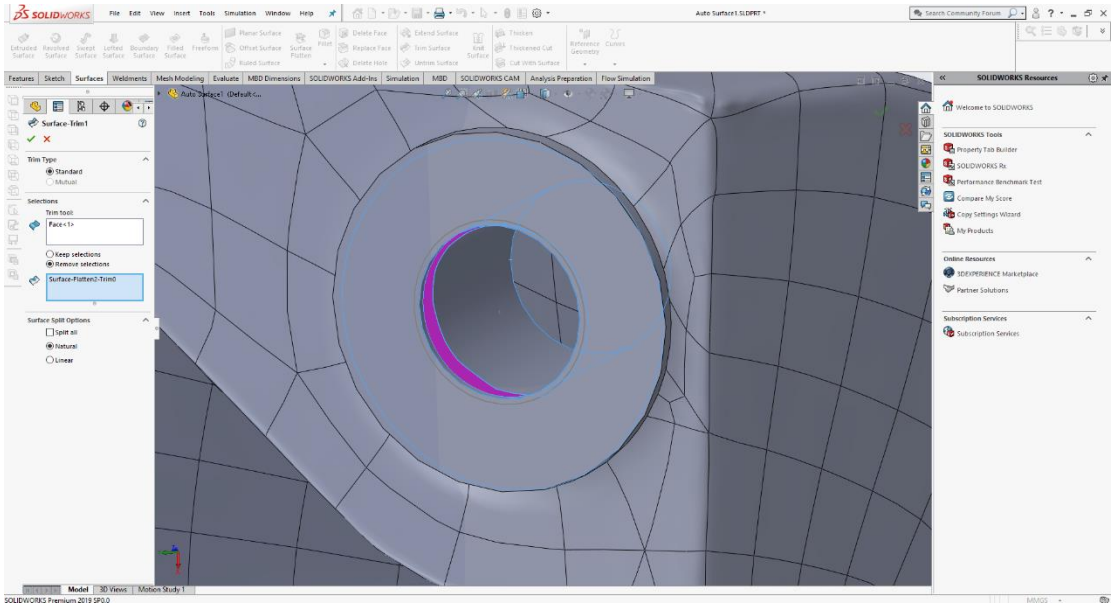


Εικόνα 6.3. *Μηχανολογικό σχέδιο του πρωτότυπου εξαρτήματος (όψεις) στο Autocad 2020 [27]*



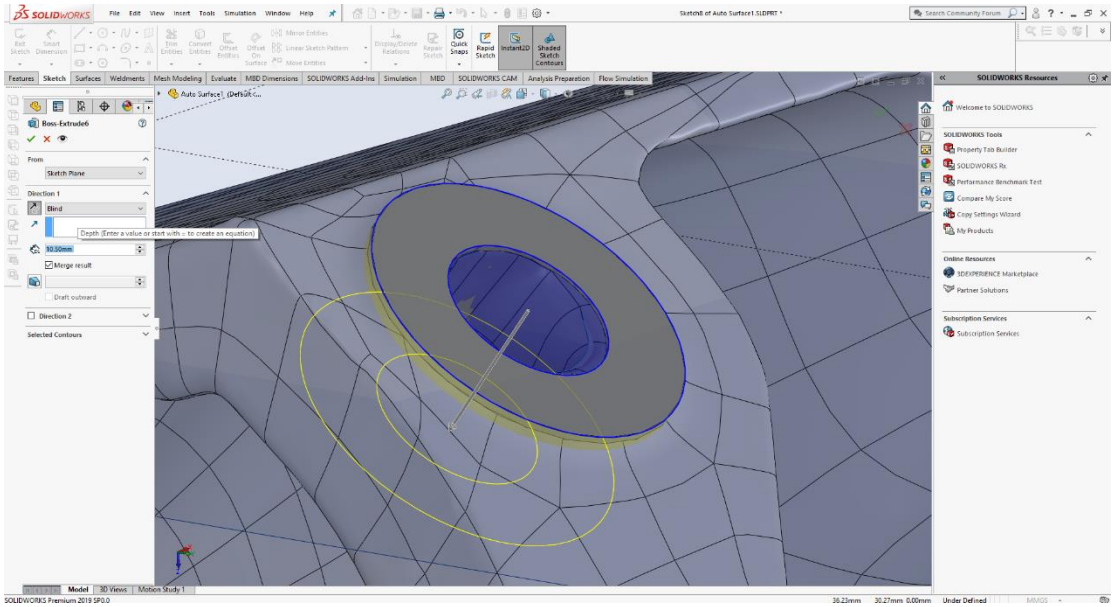
Εικόνα 6.4. *Η χρήση της εντολής flattern για την δημιουργία προσώπων ΄΄faces΄΄ για την μετέπειτα επεξεργασία επιφανειών.*

Στην συνέχεια, όπως φαίνεται στην εικόνα, δημιουργείται μία ομοιόμορφη επιφάνεια, η οποία είναι έτοιμη προς επεξεργασία. (Εικόνα 6.5)

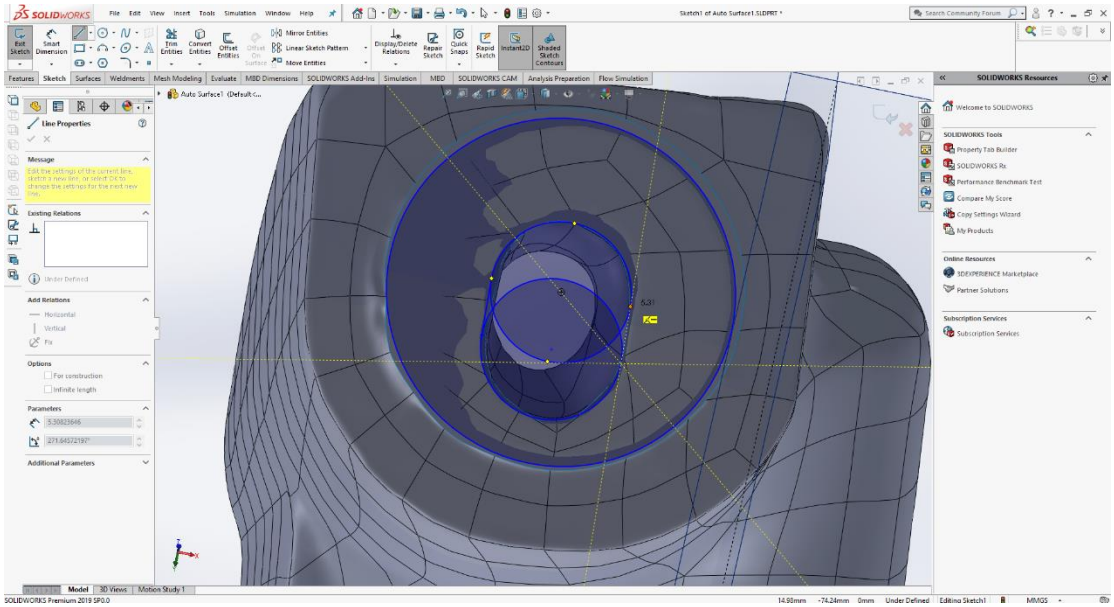


Εικόνα 6.5. *Η χρήση της εντολής Surface trim για την δημιουργία ομοιόμορφων επιφανειών.*

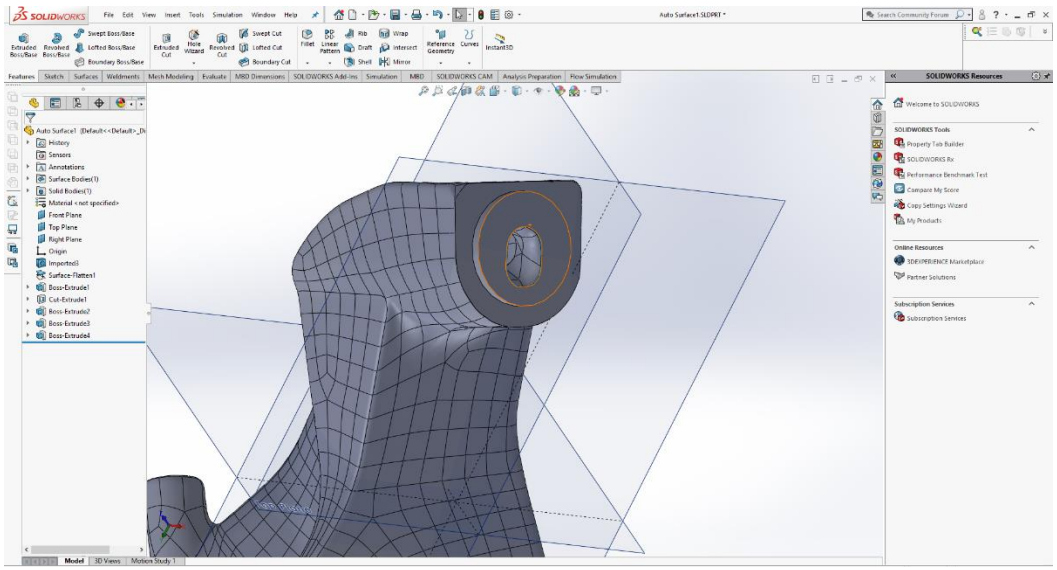
Μετά που θα επισκευαστούν καταλλήλως όλες οι επιφάνειες, επεμβαίνουμε σχεδιαστικά όπως περιγράφουν παρακάτω εικόνες, ώστε να μετατρέψουμε το εικονικό μοντέλο όσο το δυνατόν πιο όμοιο με το φυσικό μοντέλο.



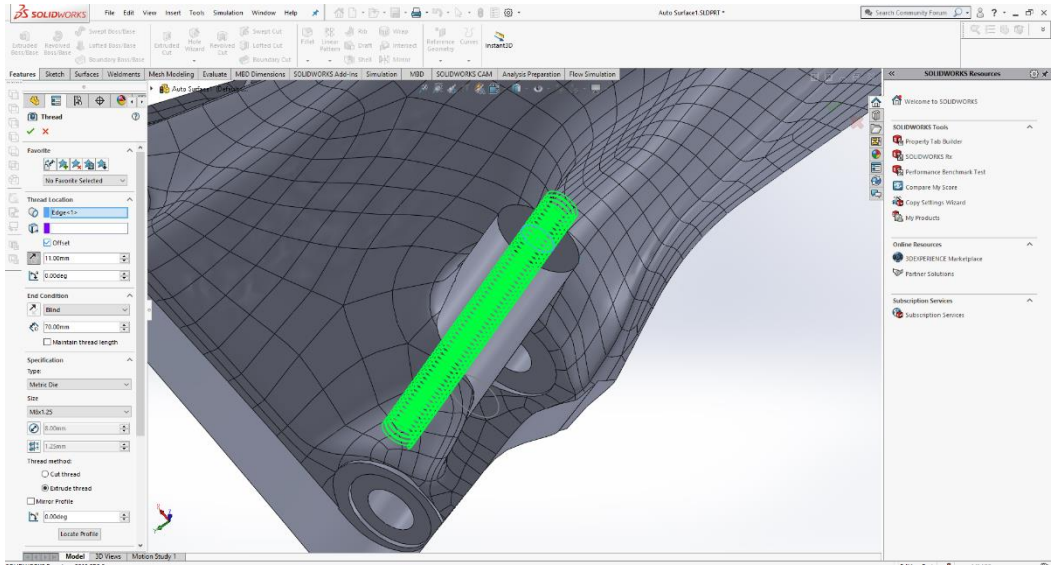
Εικόνα 6.6. *Διόρθωση μέσω σχεδιαστικών μέσων στις πατούρες της βάσης κινητήρα.*



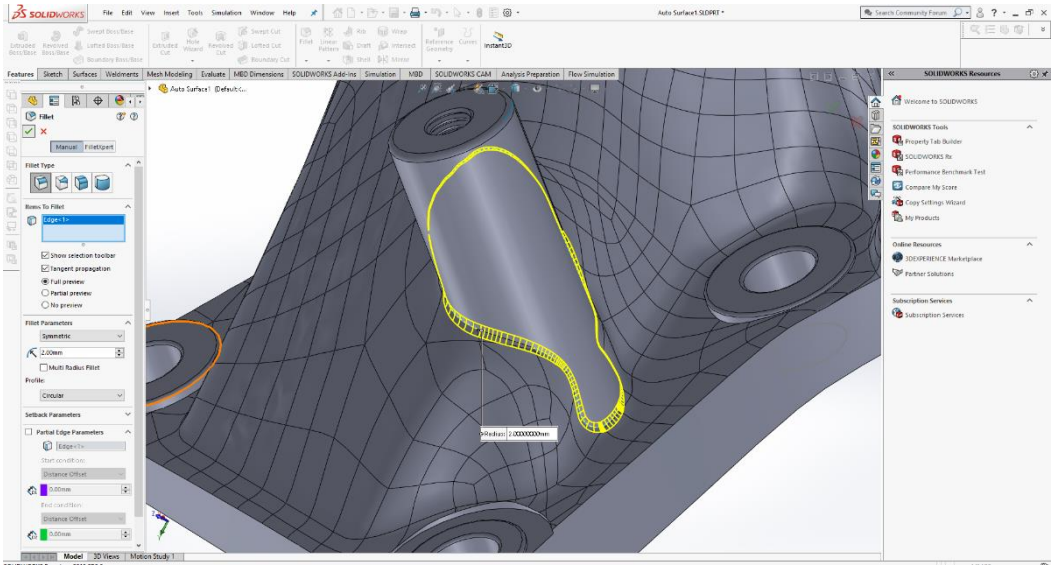
Εικόνα 6.7. *Διόρθωση μέσω σχεδιαστικών μέσων στην πατούρα στήριξης του κινητήρα.*



Εικόνα 6.8. *Διορθωμένη η πλευρά στήριξης του κινητήρα.*

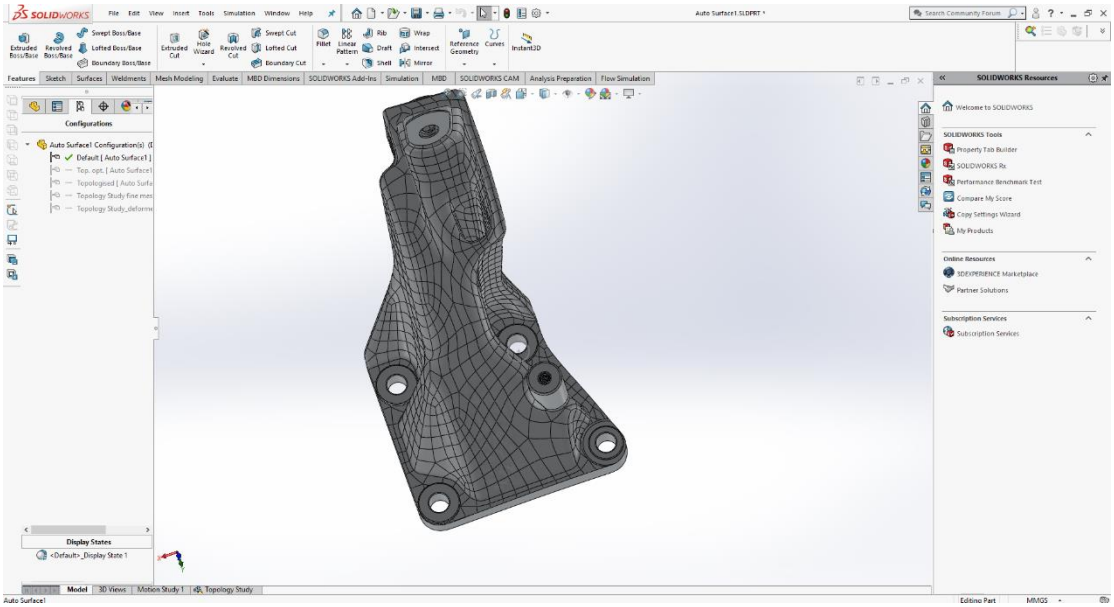


Εικόνα 6.9. *Επιδιόρθωση και κατασκευή σπειρώματος στην βάση.*

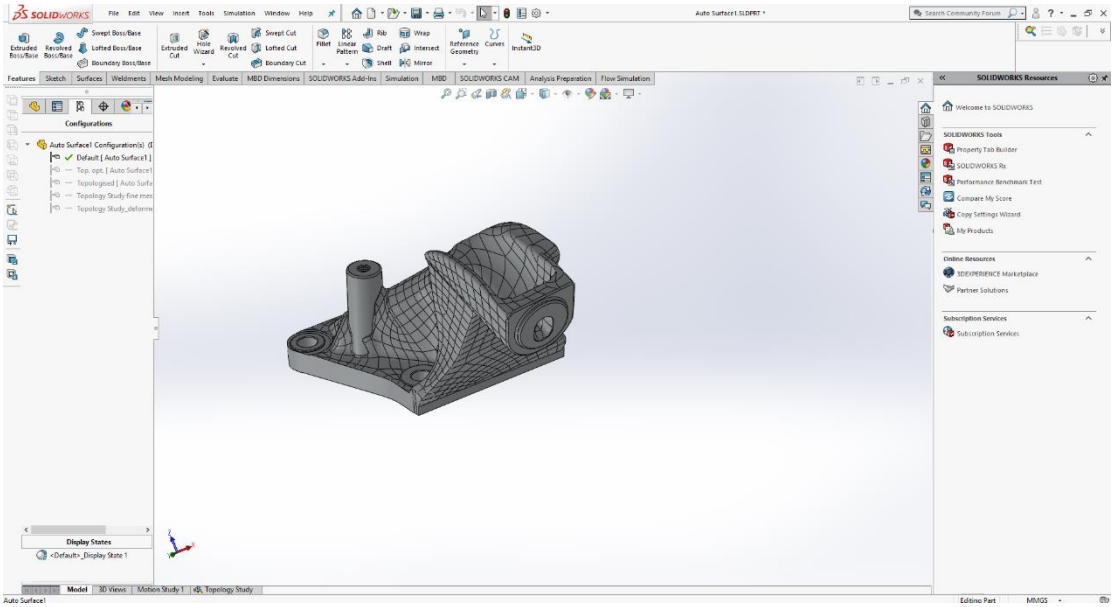


Εικόνα 6.10. *Διόρθωση ακτίνων καμπυλοτήτων της βάσης του κινητήρα σύμφωνα με το πρωτότυπο.*

Εδώ έχει τελειώσει η διαδικασία επεξεργασίας του αρχείου, αφού έχει φτάσει το εικονικό μοντέλο να έχει τα ίδια διαστασιολογικά χαρακτηριστικά με το πραγματικό (Εικόνα 6.11, Εικόνα 6.12).



Εικόνα 6.11. *Η γεωμετρία φινιρισμένη από το πρωτότυπο εξάρτημα.*



Εικόνα 6.12. *Διόρθωση μέσω σχεδιαστικών μέσων στις πατούρες της βάσης κινητήρα.*

6.2. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω SolidWorks

3ο Βήμα: Για να προχωρήσει το πείραμα στην προσομοίωση και στην τοπολογική βελτιστοποίηση πρέπει πρώτα να παρθούν οι εξής αποφάσεις που αφορούν:

- Υλικό κατασκευής
- Σημεία στήριξης
- Σημεία άσκησης δυνάμεων
- Είδη στήριξης
- Μέγεθος δυνάμεων

Η συγκεκριμένη βάση κινητήρα που είναι υπό μελέτη, είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο αλόης (αναγράφεται επάνω) alsi9cu3(fe) γνωστό και ως ENAC-46000. Τα σημεία στήριξης βρίσκονται στις

τέσσερις οπές που διαθέτει στην βάση της και θεωρούνται πακτωμένα αφού η βάση είναι βιδωμένη επάνω στο σασί του αυτοκινήτου. Η δύναμη ασκείται κάθετα ως προς την βάση από την πλευρά που βασίζεται ο κινητήρας. Στο συγκεκριμένο αυτοκίνητο ο κινητήρας έχει τις εξής κρατήσεις:

- Δύο βάσεις όπως αυτήν (μία σε κάθε πλευρά για να παραμένει στο ύψος που πρέπει και να μην καταπονεί περαιτέρω το κιβώτιο ταχυτήτων)
- Στο κιβώτιο ταχυτήτων
- Το κιβώτιο ταχυτήτων διαθέτει τις βασικές στηρίξεις για την αντοχή των στρεπτικών καταπονήσεων.

Επομένως η δύναμη που έχει να διαχειριστεί η συγκεκριμένη βάση, θεωρείται μόνο κάθετη ως προς αυτή, όπως στην εικόνα 6.15 και η δύναμη που ασκείται επάνω της υπολογίζεται από:

- Το μοντέλο του κινητήρα
- Τον συντελεστή ασφαλείας
- Τον συντελεστή απώλειας (ή δυσλειτουργίας) της μίας βάσης
- Την βαρύτητα

Το μοντέλο του κινητήρα είναι N42B18 και ζυγίζει 178kg υπολογισμένος με τα υγρά (λιπαντικό και αντιψυκτικό υγρό) στην πράξη, ο συντελεστής ασφαλείας είναι 1,4, ο συντελεστής απώλειας ή δυσλειτουργίας της μίας βάσης είναι 2 και η βαρύτητα θεωρείται 9,81m/s. Άρα η δύναμη υπολογίζεται ως εξής:
$F_{επιτρ.}$ = 178kg*1,4*2*9,81m/s
$F_{επιτρ}$ = 4889N και επιλέγεται $F_{ονομ.}$= 4900N > $F_{επιτρ}$ = 4889N
Τα βασικά χαρακτηριστικά του alsi9cu3(fe) είναι τα εξής:

- Brinell Hardness = 91
- Elastic (Young's, Tensile) Modulus = 73 GPa
- Tensile Strength: Yield (Proof) = 160 MPa
- Poisson's Ratio = 0.33

Έχοντας υπολογίσει τα απαραίτητα στοιχεία, μπορεί το πείραμα να προχωρήσει στο επόμενο βήμα.

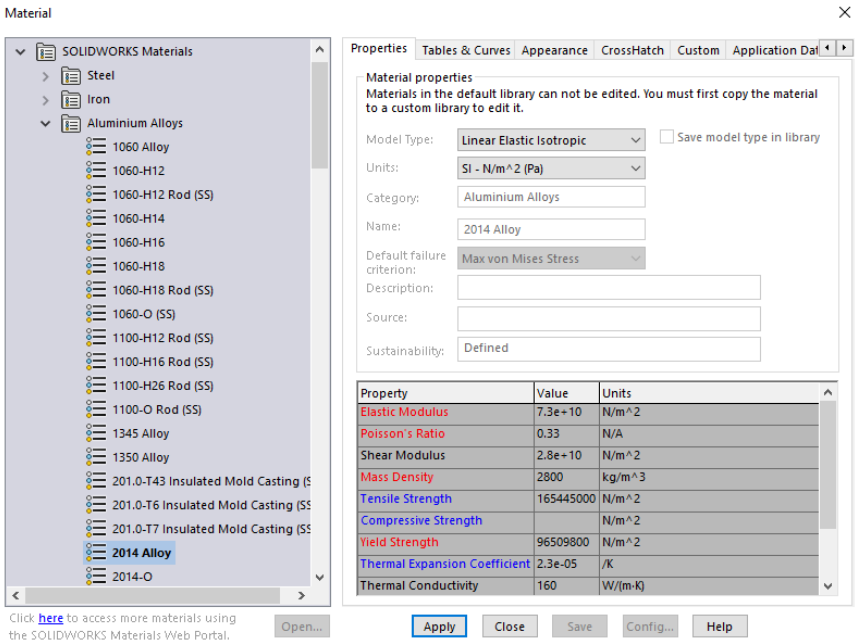
4ο Βήμα: Τοπολογική βελτιστοποίηση. Η τοπολογική βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σε δύο διαφορετικά λογισμικά, για να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων. Και τα δύο λογισμικά χρησιμοποιούνται από μεγάλες εταιρείες και συμβάλλουν σημαντικά σε μεγάλες βιομηχανίες. Το ένα είναι το Solidworks και το άλλο είναι το nTopology.

Τοπολογική βελτιστοποίηση στο Solidworks:
Για να πραγματοποιηθεί η τοπολογική βελτιστοποίηση στο SolidWorks, πρέπει να οριστούν κάποια συγκεκριμένα δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά είναι τα εξής:

- Το υλικό κατασκευής
- Οι στηρίξεις
- Τα είδη στηρίξεων
- Το είδος και το μέγεθος των δυνάμεων
- Οι επιφάνειες που απαιτείται να παραμείνουν αναλλοίωτες
- Η ευκρίνεια του πλέγματος μελέτης (mesh)

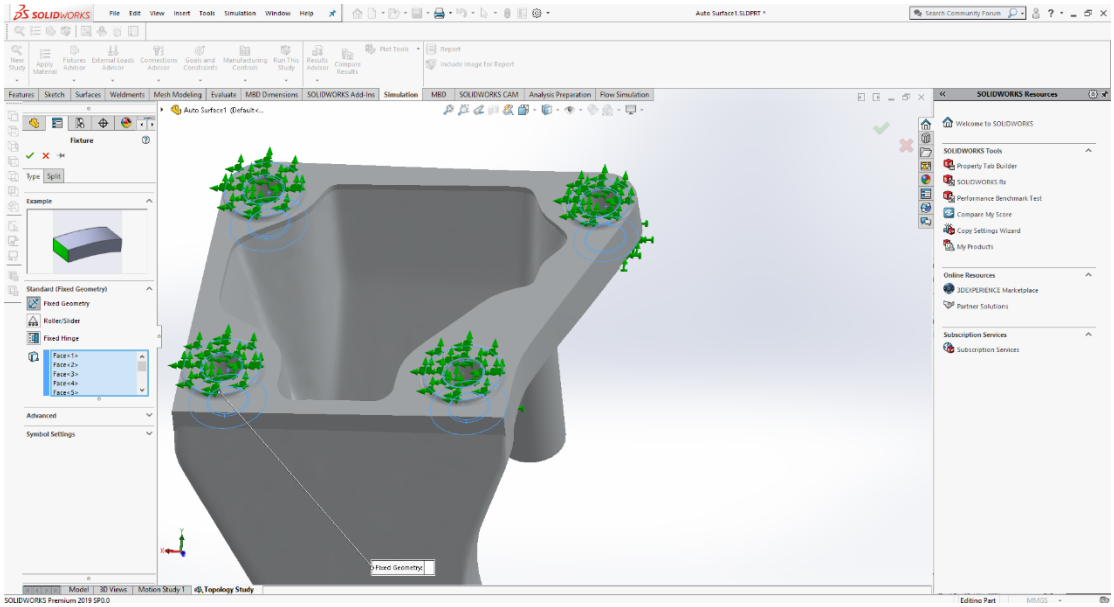
- Ο συντελεστής ασφαλείας
- Ο σκοπός της τοπολογικής βελτιστοποίησης

Το υλικό κατασκευής δηλώνεται από την επιλογή “edit/apply material” και στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε το “2014 alloy” από την κατηγορία aluminium alloys, το οποίο διαθέτει τα ίδια χαρακτηριστικά αντοχών σε καταπονήσεις με το ENAC-46000. (Εικόνα 6.13)



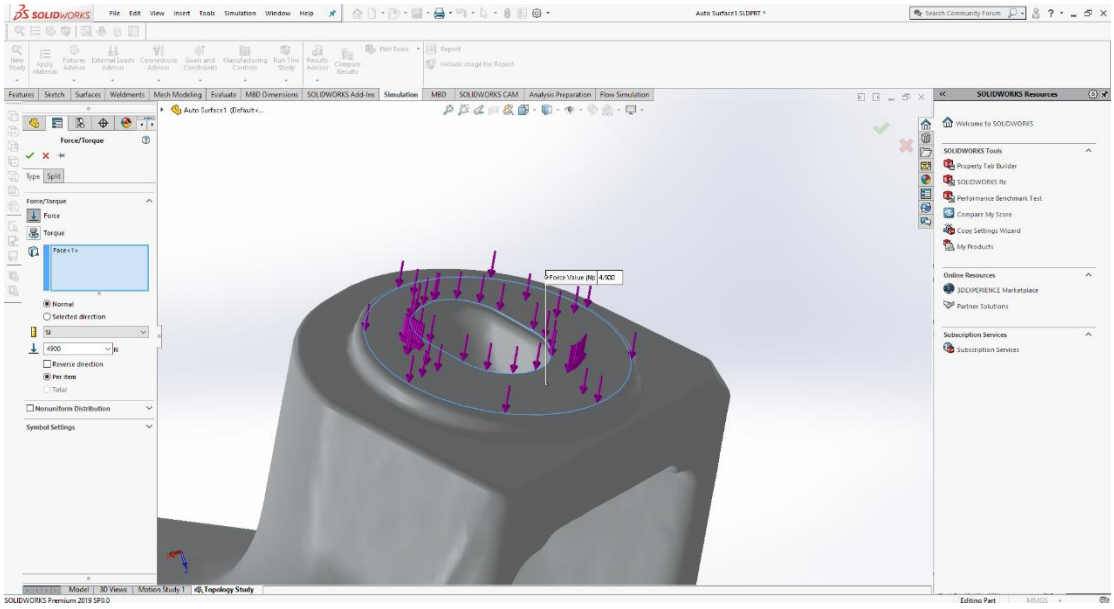
Εικόνα 6.13. *Ο πίνακας υλικών του SolidWorks 2019. Στην εικόνα φαίνονται το υλικό που έχει επιλεχθεί καθώς και τα χαρακτηριστικά του.*

Τα σημεία στήριξης δηλώνονται από την επιλογή “FIXTURES” και στην συνέχεια “Fixed Geometry” επιλέγοντας τις επιφάνειες στις οποίες επιθυμούμε να είναι οι στηρίξεις πακτωμένες (Εικόνα 6.14).



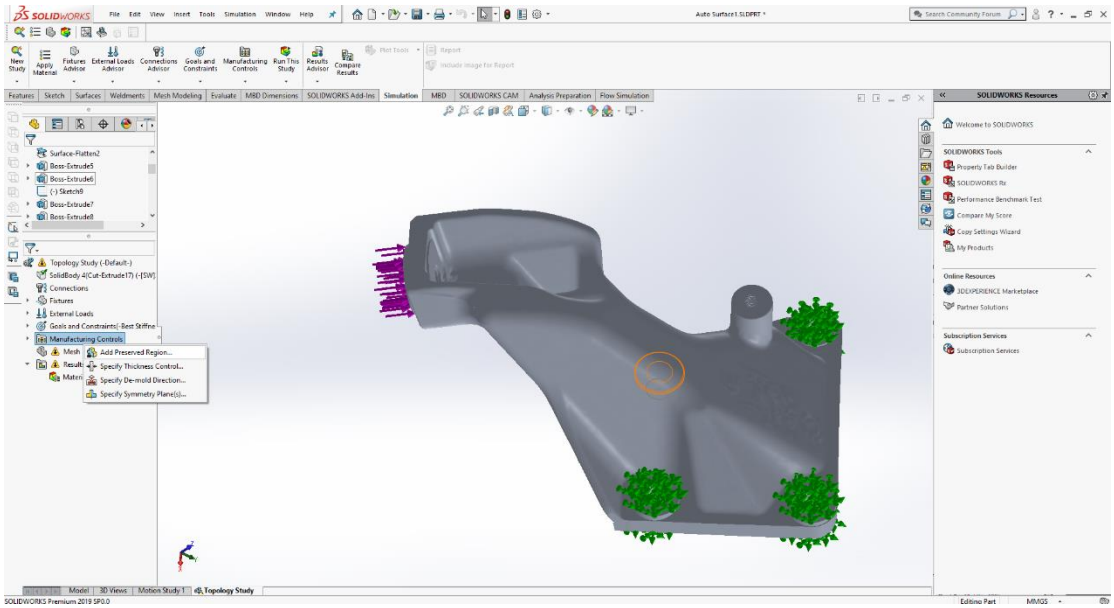
Εικόνα 6.14. *Δήλωση των σημείων των στηρίξεων καθώς και το είδος στηρίξεων.*

Το σημείο άσκησης των δυνάμεων δηλώνεται από την επιλογή “External Loads” και έπειτα “Force”. Όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση δηλώθηκαν 4900N κάθετα ως προς την επιθυμητή επιφάνεια (Εικόνα 6.15).

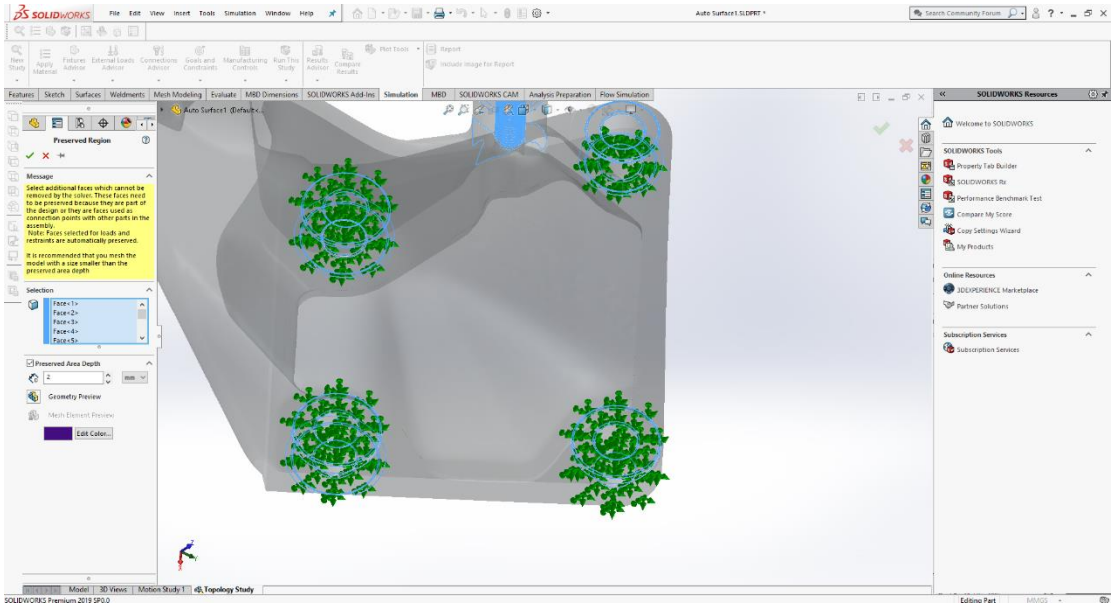


Εικόνα 6.15. *Δήλωση των σημείων των δυνάμεων καθώς και το είδος τους.*

Οι επιφάνειες που είναι επιθυμητό να μείνουν αναλλοίωτες, ορίζονται από την επιλογή “Manufacturing Controls” και έπειτα “Add Preserved Region”. Επιλέγοντας τις επιφάνειες που δεν πρέπει να αλλοιωθούν κατά την τοπολογική βελτιστοποίηση, δηλώνονται κατευθείαν και από την επιλογή “preserved area depth” ορίζεται η απόσταση, από την οποία πιθανόν θα ξεκινάει η παραμόρφωση (στην συγκεκριμένη περίπτωση 2mm) (Εικόνα 6.17).

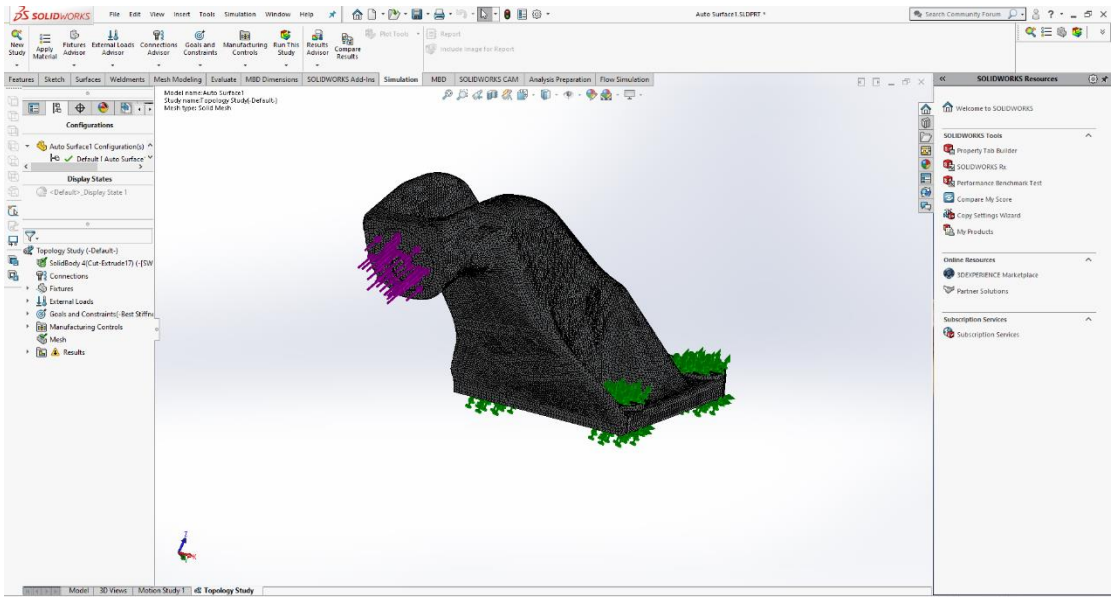


Εικόνα 6.16. *Επιλογή της εντολής ΄΄Add preserved region΄΄.*



Εικόνα 6.17. *Δήλωση περιοχών που είναι επιθυμητό να μείνουν αναλλοίωτες καθώς και των ορίων τους.*

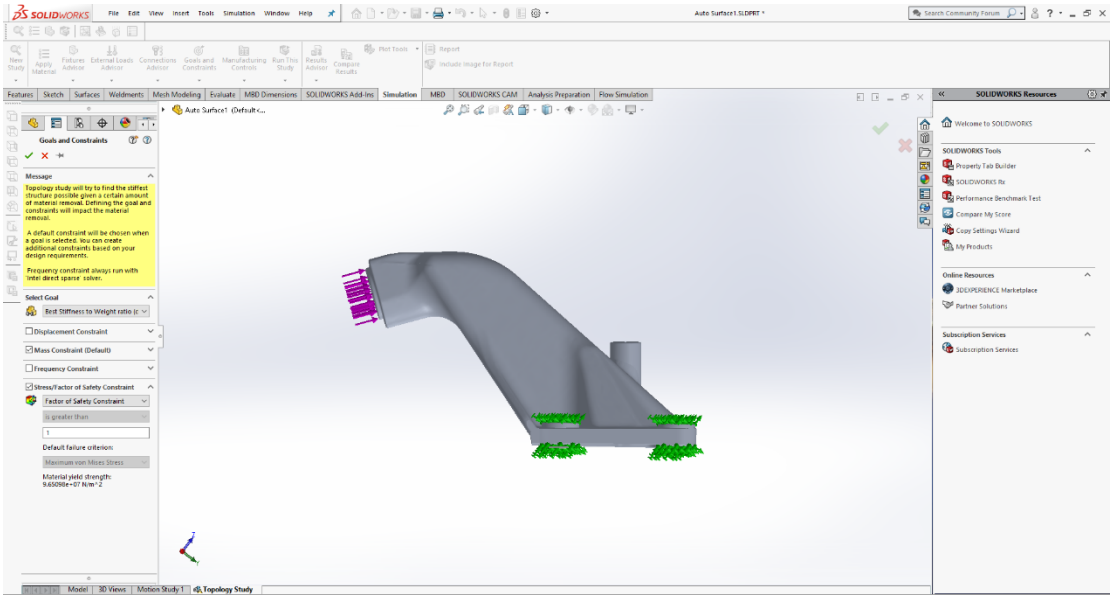
Το mesh ή αλλιώς το πλέγμα, ορίζεται από την επιλογή “mesh” και έπειτα “create mesh”. Πιο συγκεκριμένα, αυτό χωρίζει το κομμάτι σε μικρά τρίγωνα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία και θα αναλυθούν δυναμικά ένα ένα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ορίστηκε ένα αρκετά υψηλής ευκρίνειας mesh (πολύ λεπτό). Αυτό σημαίνει πως η μελέτη θα είναι αρκετά πιο λεπτομερής και ομοιόμορφη, αλλά ο χρόνος διάρκειάς της θα είναι πολύ μεγαλύτερος. Επιπλέον, μία τόσο λεπτομερής μελέτη, χρειάζεται έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή υψηλών προδιαγραφών και κατά την διάρκεια της, καλό είναι να ελέγχεται η θερμοκρασία του επεξεργαστή, για τυχόν υπερθέρμανση (Εικόνα 6.18).



Εικόνα 6.18. *Η γεωμετρία μετά από την δημιουργία του fe Mesh.*

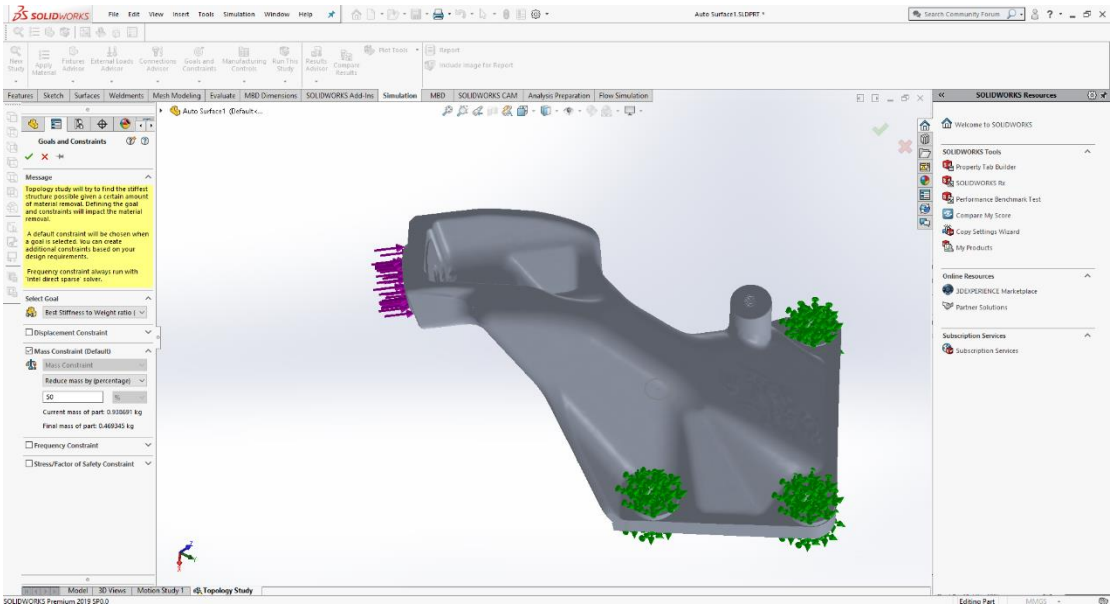
Ο συντελεστής ασφαλείας έχει ήδη συνυπολογιστεί στην δύναμη που δέχεται η βάση και είναι ο αριθμός 1,4. Εάν δεν είχε υπολογιστεί ο αριθμός αυτός στην συνολική δύναμη, ή εάν υπήρχαν πολλές δυνάμεις σε διάφορα σημεία, θα ήταν πιο εύχρηστο να οριστεί απευθείας μέσα στο πρόγραμμα. Στην περίπτωση αυτή θα δηλωθεί συντελεστής ίσος με 1 ώστε να λάβει υπόψη τα μεγέθη των

δυνάμεων που έχουν δοθεί. Εάν δεν δηλωθεί συντελεστής ασφαλείας, θα βγει ένα αποτέλεσμα βάσει της κατανομής των τάσεων, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη το μέγεθος των δυνάμεων. Αυτό σημαίνει πως μπορεί το τελικό αποτέλεσμα στην πράξη να αποτύχει. Στην ουσία, ο συντελεστής ασφαλείας που ορίζεται μέσα στο λογισμικό, περιορίζει τα όρια αφαίρεσης υλικού, έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει τις πιθανότητες αποτυχίας του εξαρτήματος.



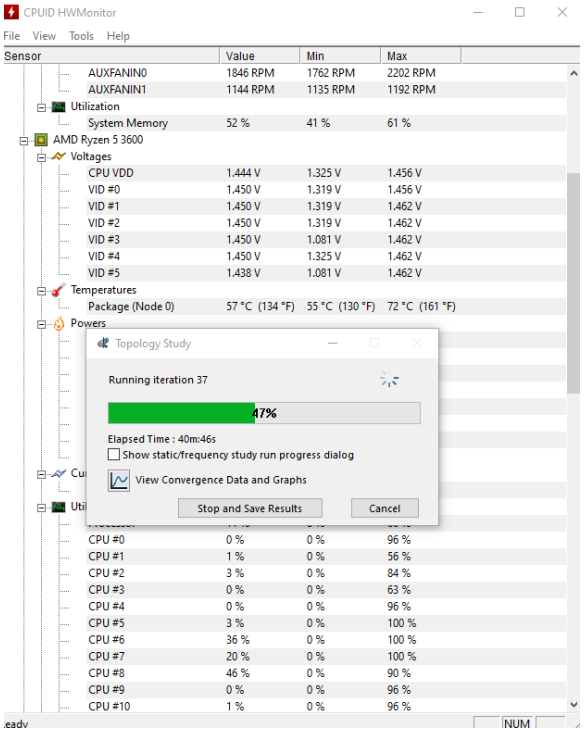
Εικόνα 6.19. *Η επιλογή της εντολής ΄΄best stiffness to weight ratio΄΄.*

Ο σκοπός της τοπολογικής βελτιστοποίησης ορίζεται από την επιλογή “Goals and Constraints” και στην συνέχεια για την συγκεκριμένη μελέτη, επιλέγεται το “Best stiffness to weight ratio”. Έπειτα δηλώνεται ότι είναι επιθυμητό να γίνει μείωση βάρους κατά 50%, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα όταν και εάν βγει αποτέλεσμα να επιλεγεί μία τιμή τελικής μείωσης βάρους, από 0% έως και 50%, εάν είναι ασφαλής (Εικόνα 6.20).



Εικόνα 6.20. *Η δήλωση ποσοστού αφαίρεσης υλικού μέσα στην εντολή ΄΄best stiffness to weight ratio΄΄.*

Αφού οριστούν όλα τα παραπάνω, η μελέτη είναι σε θέση να αρχίσει. Για να ξεκινήσει η μελέτη πρέπει να επιλεχθεί το “Topology Study” με δεξί κλικ και έπειτα να επιλεγεί το “Run”. Ταυτόχρονα με την μελέτη, παρακολουθείται και η θερμοκρασία του επεξεργαστή για να προληφθεί κάποια τυχόν υπερθέρμανση με την χρήση της πλατφόρμας HWMonitor (Εικόνα 6.21).

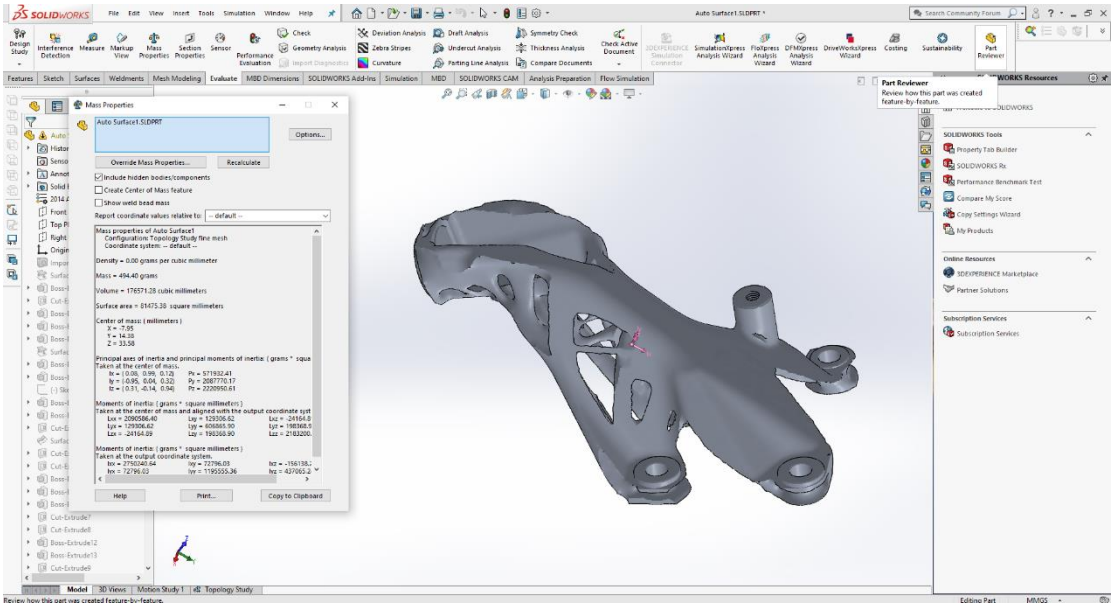


Εικόνα 6.21. *Η επίβλεψη του ηλεκτρονικού υπολογιστή μέσω του λογισμικού HWMonitor*

Το αποτέλεσμα της τοπολογικής μελέτης έρχεται μετά από κάποιο χρόνο, ο χρόνος αυτός εξαρτάται από κάποιους παράγοντες:

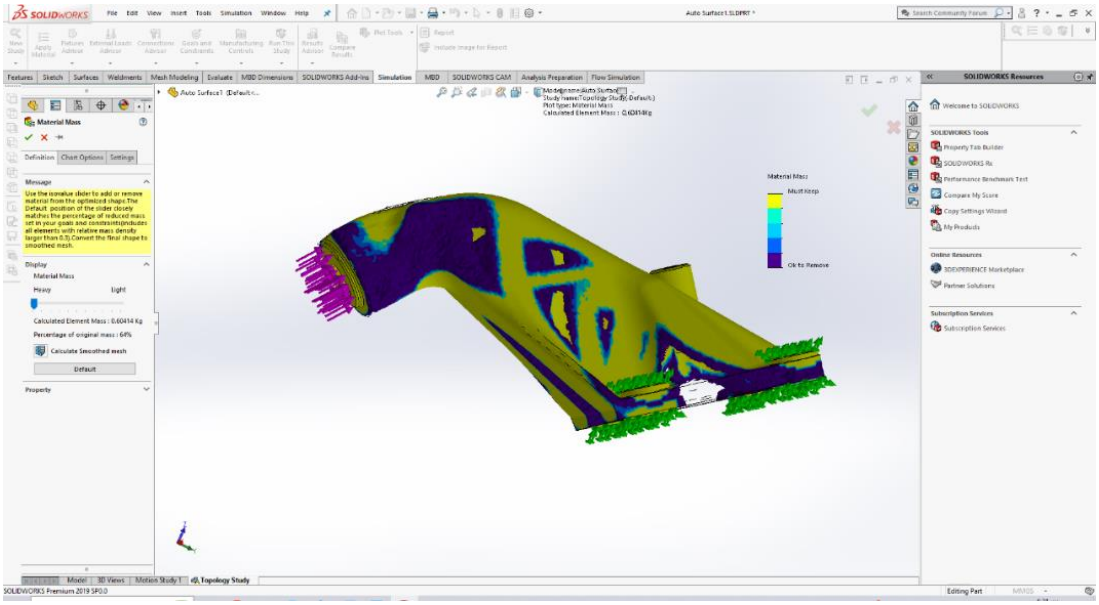
- Την πολυπλοκότητα του εξαρτώμενου αντικειμένου
- Τον αριθμό δυνάμεων και κρατήσεων
- Την ευκρίνεια του πλέγματος
- Τον συντελεστή ασφαλείας

Αυτό το πείραμα, έτρεξε την πρώτη δοκιμαστική φορά, χωρίς συντελεστή ασφαλείας και διήρκησε περίπου 1 ώρα και 32 λεπτά (Εικόνα 6.22).



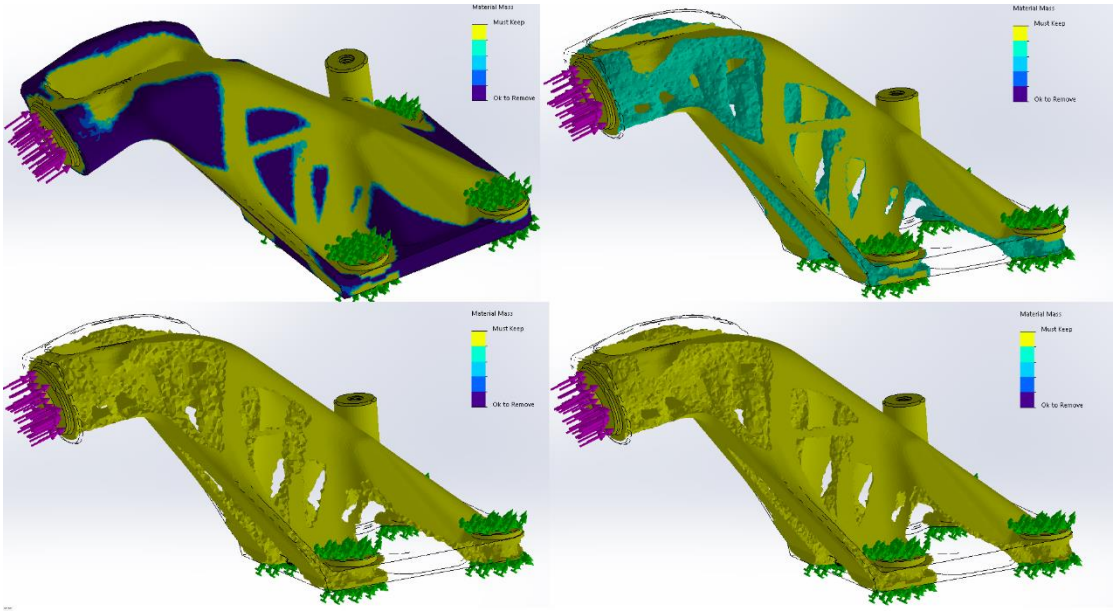
Εικόνα 6.22. *Πολύπλοκη γεωμετρική μορφή κομματιού που παράχθηκε από την τοπολογική βελτιστοποίηση πριν ληφθεί υπόψη ο συντελεστής ασφαλείας.*

Εφόσον λοιπόν λειτούργησε χωρίς κάποιο σφάλμα, δηλώθηκε ο συντελεστής ασφαλείας = 1 και ξανά έτρεξε η μελέτη από την αρχή. Αυτήν την φορά διήρκησε περίπου 9 ώρες (Εικόνα 6.23).



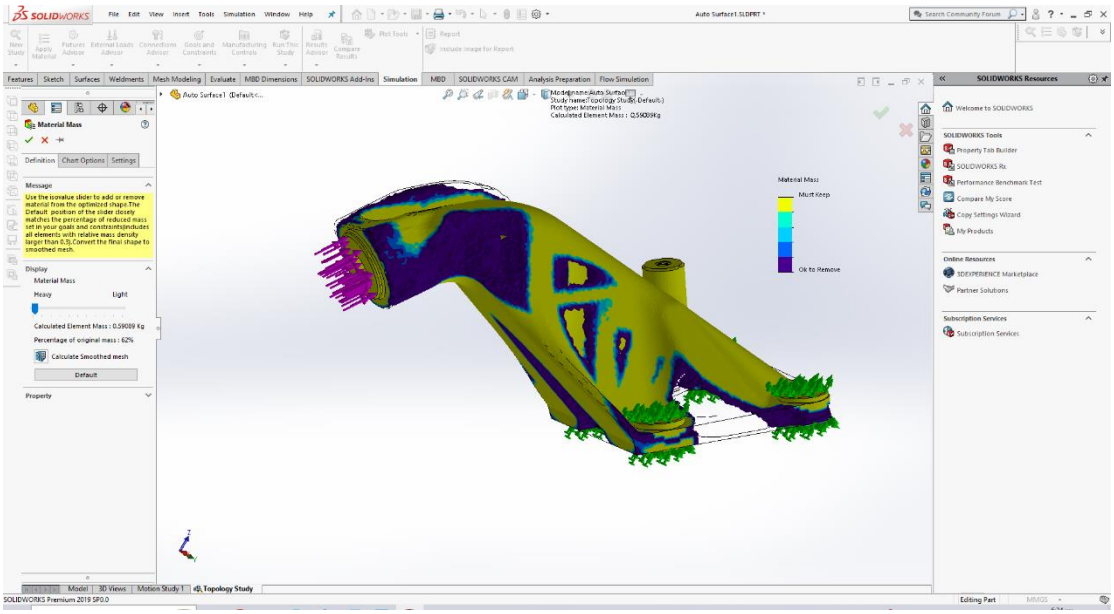
Εικόνα 6.23. *Πολύπλοκη γεωμετρική μορφή κομματιού που παράχθηκε από την τοπολογική βελτιστοποίηση μετά που εφαρμόστηκε ο συντελεστής ασφαλείας.*

Το αποτέλεσμα με μία πρώτη ματιά είναι όπως την εικόνα 6.23. Ο χειριστής πλέον μπορεί να επιλέξει, μέσα σε κάποια όρια, το πόσο υλικό θέλει να αφαιρέσει και υπάρχει η χρωματική βοήθεια όπως φαίνεται δεξιά της εικόνας 5.29. Εάν ο χρήστης αρχίζει να αφαιρεί υλικό, τόσο ώστε να αρχίζει να μειώνεται η κίτρινη επιφάνεια, τότε μεγιστοποιείται η πιθανότητα να σπάσει το εξάρτημα.



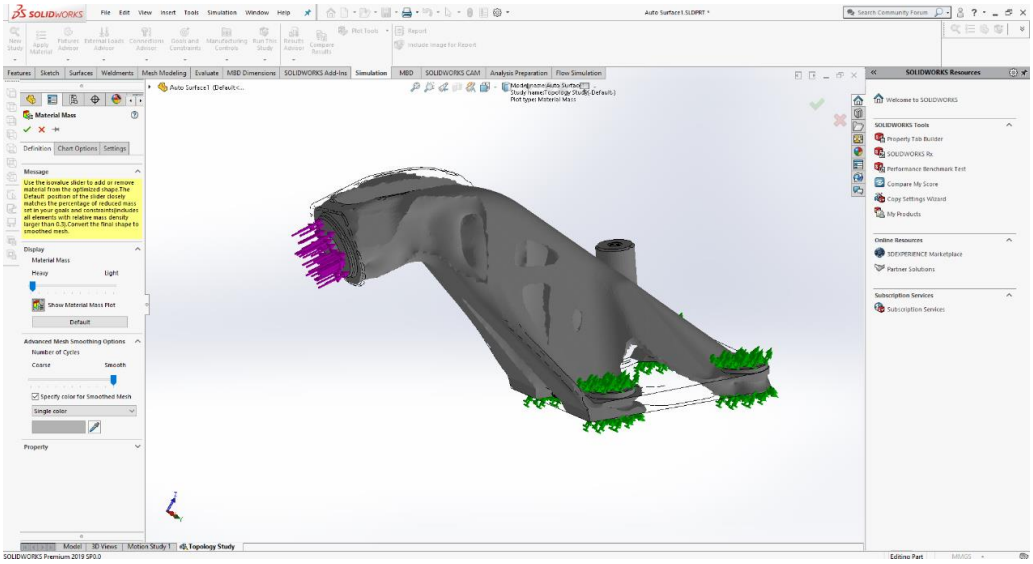
Εικόνα 6.24. *Οι διάφορες επιλογές αφαίρεσης υλικού και οι μεταβολές πάχους.*

Πρέπει ο χρήστης να επιλέξει μία τιμή μείωσης υλικού τέτοια, ώστε να γίνει σωστά η εξομάλυνση του εξαρτήματος.



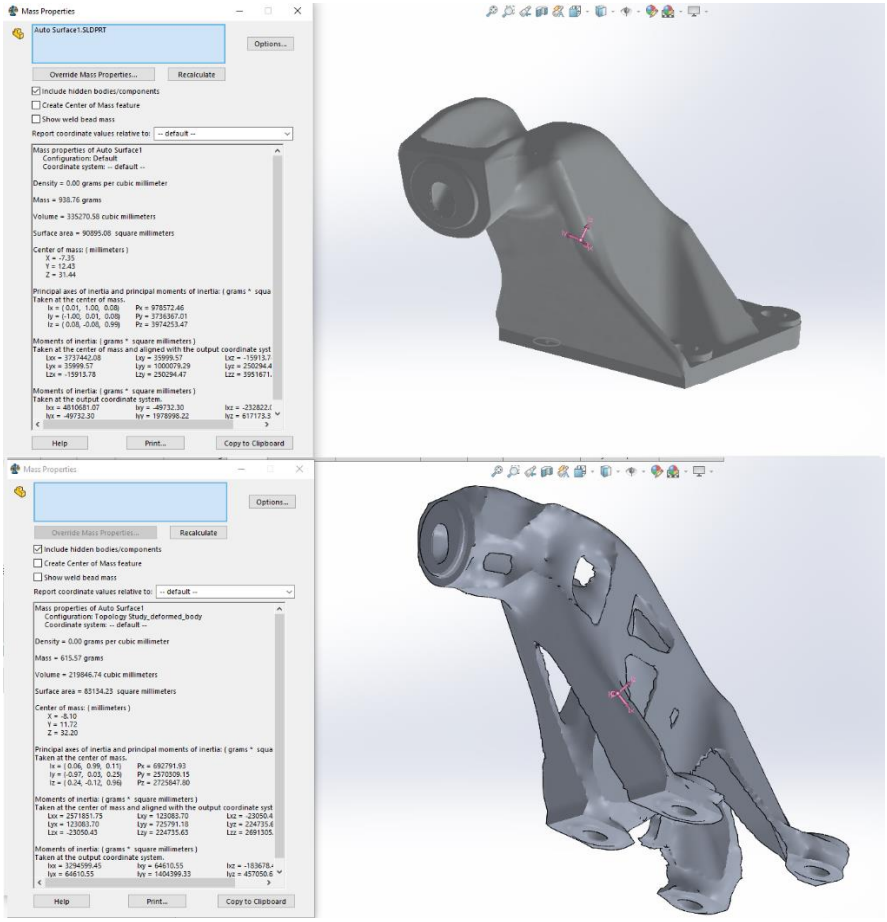
Εικόνα 6.25. *Η τελική επιλογή πάχους πριν την διαδικασία της εξομάλυνσης (smoothing).*

Η διαδικασία του smoothing προσθέτει υλικό για να επιτευχθεί.



Εικόνα 6.26. *Πολύπλοκη γεωμετρική μορφή κομματιού, που παράχθηκε με την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης, μετά από την διαδικασία της εξομάλυνσης, που αποτελεί το τελικό αρχείο*

Το τελικό αποτέλεσμα αποθηκεύεται με την επιλογή Result → export smoothed mesh. Οι επιλογές αποθήκευσης είναι graphics body, surface body και solid body. Για το συγκεκριμένο πείραμα έγινε export σαν solid body. Πλέον είναι ορατά τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Εικόνα 6.27).

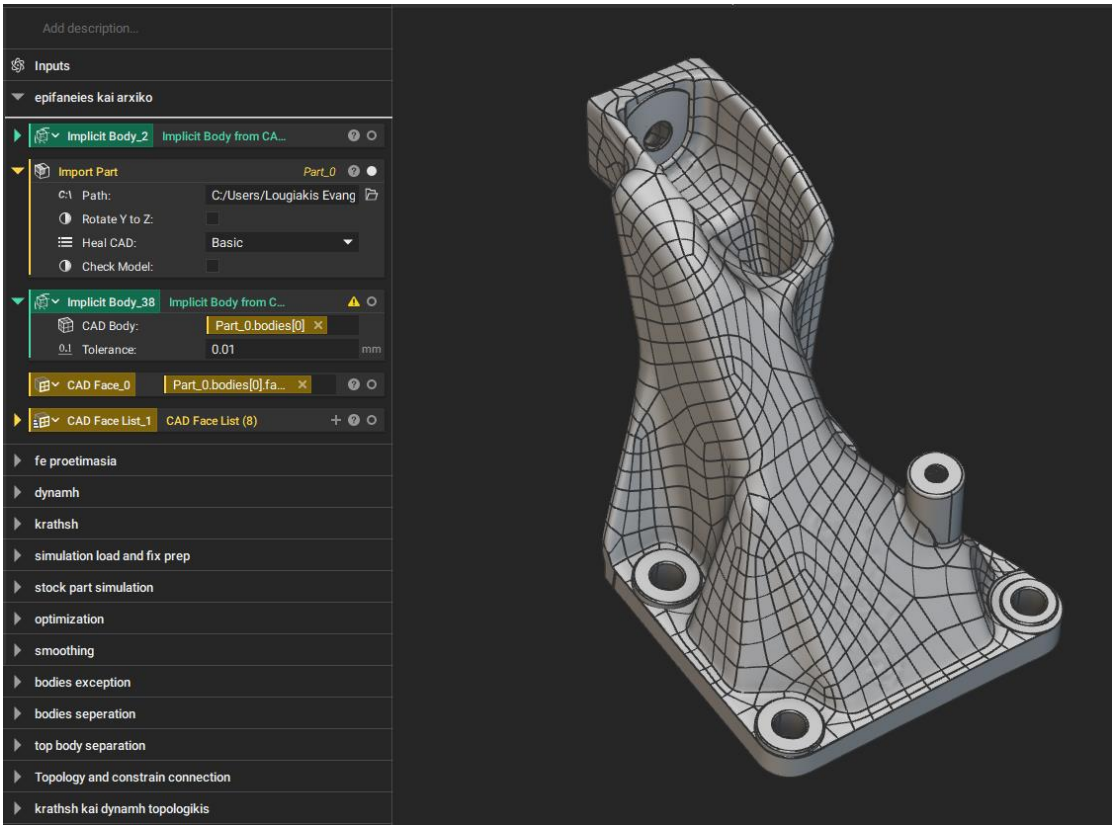


Εικόνα 6.27. *Σύγκριση του αποτελέσματος (615,57 γραμμάρια) με το πρωτότυπο αρχείο (938,76 γραμμάρια)*

6.3. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω nTop

Η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω του nTop, συνεχίζει από το *3ο Βήμα* στο υποκεφάλαιο 6.2, όπως ακριβώς η διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω του Solidworks. Εφόσον τώρα είναι γνωστά το υλικό κατασκευής, τα σημεία στήριξης, τα σημεία άσκησης των δυνάμεων, τα είδη στήριξης και το μέγεθος των δυνάμεων, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

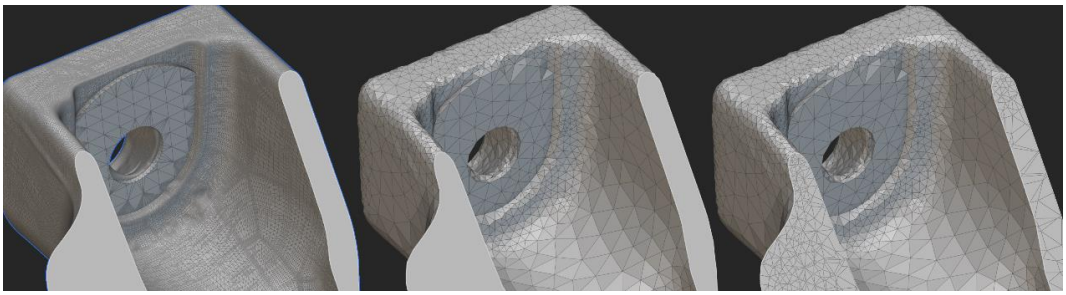
Για να ξεκινήσει η διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης στο nTop, πρέπει να αρχίζει να σχεδιάζεται ένας κώδικας. Ο σχεδιασμός γίνεται με κουτιά (blocks), που είναι σαν "κόμβοι", σε ένα οπτικό περιβάλλον προγραμματισμού. Επομένως, σαν πρώτο βήμα για την αρχή του αλγορίθμου, με την χρήση του block ΄΄Import part΄΄, γίνεται η εισαγωγή του αρχικού αρχείου, ενώ θα εισαχθεί με μορφή .STEP. Στην συνέχεια, με την βοήθεια των block CAD Face και επιλέγοντας τις κατάλληλες επιφάνειες, δημιουργούνται τα πρόσωπα των επιφανειών των βάσεων στήριξης του εξαρτήματος υπό επεξεργασία. Λόγω του ότι θα χρειαστεί αργότερα για την δήλωση δυνάμεων, με την χρήση ενός block Implicit Body, επιλέγοντας την κατάλληλη επιφάνεια, δημιουργείται ένα plane παράλληλα και μέσα στην κύρια βάση, όπου ασκούνται οι δυνάμεις. Με την βοήθεια αυτής της επιφάνειας, επιτυγχάνεται η ομοιόμορφη κατανομή δύναμης σε όλη την επιφάνεια της βάσης που περικλείεται από την επιφάνεια αυτή.



Εικόνα 6.28. *Εισαγωγή αρχικού αρχείου.*

Το επόμενο στάδιο, είναι η προετοιμασία των πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή η δημιουργία ενός πεπερασμένου μοντέλου. Για να γίνει αυτό, υπάρχουν κάποιες προαπαιτούμενες διακριτοποιήσεις (mesh) που πρέπει να λάβουν χώρα. Πάντα με την χρήση blocks, πρώτα γίνεται ένα Mesh from Cad Body για να καταλάβει το λογισμικό την επιφάνεια του αντικειμένου. Έπειτα, τοποθετώντας την Mesh from Cad Body μέσα σε μία Remesh Surface, επιτυγχάνεται η απλούστευση

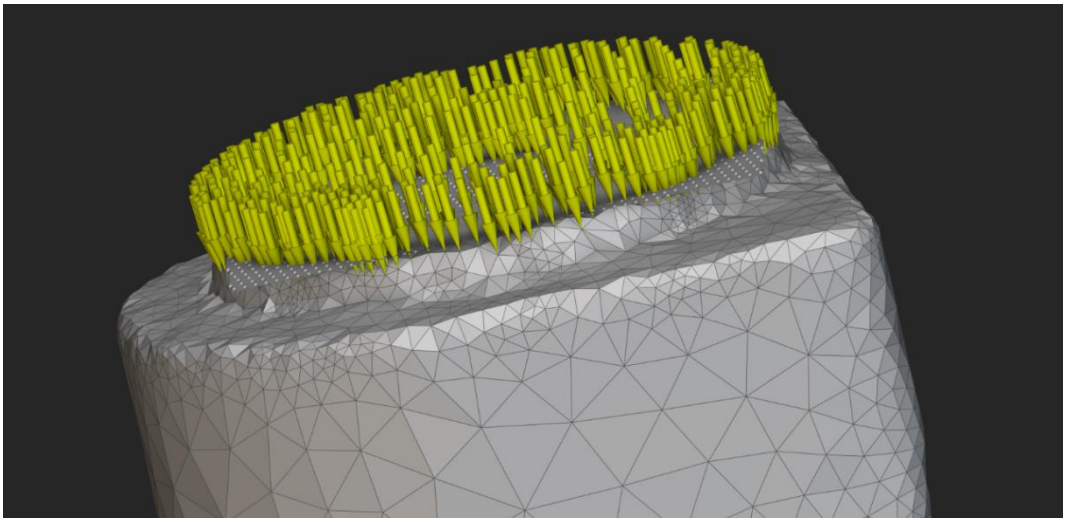
της διακριτοποίησης της επιφάνειας. Η τρίτη και τελευταία διακριτοποίηση, πραγματοποιείται τοποθετώντας την Remesh Surface, μέσα σε μία Volume mesh, για να καταλάβει το λογισμικό τον όγκο του αντικειμένου. Τέλος, για την ολοκλήρωση της ολικής διακριτοποίησης, τοποθετείται η Volume mesh μέσα σε μια FE Volume mesh, ώστε να οριστεί στο λογισμικό, ότι αυτή η διακριτοποίηση του συγκεκριμένου όγκου, θα χρησιμοποιηθεί για υπολογισμούς και θα μπορούν πλέον να οριστούν ιδιότητες σε αυτό, όπως για παράδειγμα υλικό κατασκευής.



Εικόνα 6.29. *Διακριτοποιήσεις από την αρχική έως την διακριτοποίηση του όγκου.*

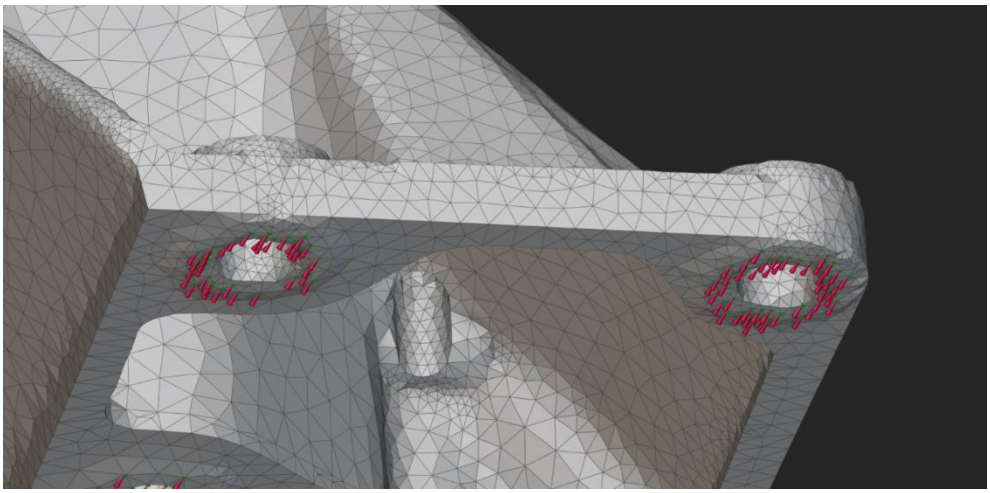
Τοποθετώντας σε ένα block Material, ένα Properties block, το οποίο περιέχει ένα Isotropic Linear Elastic Property block, μπορεί πλέον να δηλωθεί το ελαστικό μέτρο (Young's Modulus), το οποίο στο συγκεκριμένο πείραμα είναι 73GPa και ο Λόγος Poisson (Poisson's Ratio), ο οποίος είναι 0.33. Βάζοντας ένα Fe Attribute List σε ένα Fe Attribute, μέσα στο οποίο τοποθετείται το Material, παρέχεται ένα σύμπλεγμα blocks, το οποίο δημιουργεί σιγά σιγά το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Σε ένα Components block εισαγάγεται η FE Volume Mesh και η Fe Attribute List. Τέλος, εφόσον εισαχθεί η Components σε ένα Fe Model block, είναι έτοιμο το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής, είναι να οριστεί το σωστό υλικό σε όλο τον όγκο και στο σωστό σχήμα της βάσης του κινητήρα που βρίσκεται υπό μελέτη.

Ακολουθεί η δημιουργία των δυνάμεων. Σε ένα Fe Force block, τοποθετείται το Fe Volume Mesh, ώστε να καταλαβαίνει το λογισμικό ποιον όγκο θα αφορούν τα παρακάτω. Έπειτα με την βοήθεια μιας Boolean Union εντολής, εκμεταλλεύεται την επιφάνεια που είχε δημιουργηθεί στην αρχή (Implicit Body_2) και τέλος μετά από τον κατάλληλο υπολογισμό, από την κλίση του τεμαχίου μέσα στο λογισμικό και την συνολική ασκούμενη δύναμη, γίνεται ανάλυση σε συνιστώσες δυνάμεις (σε x,y,z) και δηλώνεται στην Fe Force. Με αυτή την διαδικασία, έχει γνωστοποιηθεί στο λογισμικό το μέγεθος, η έκταση και η ακριβής επαφή των δυνάμεων με το εξεταζόμενο τεμάχιο. (Εικόνα 6.30)



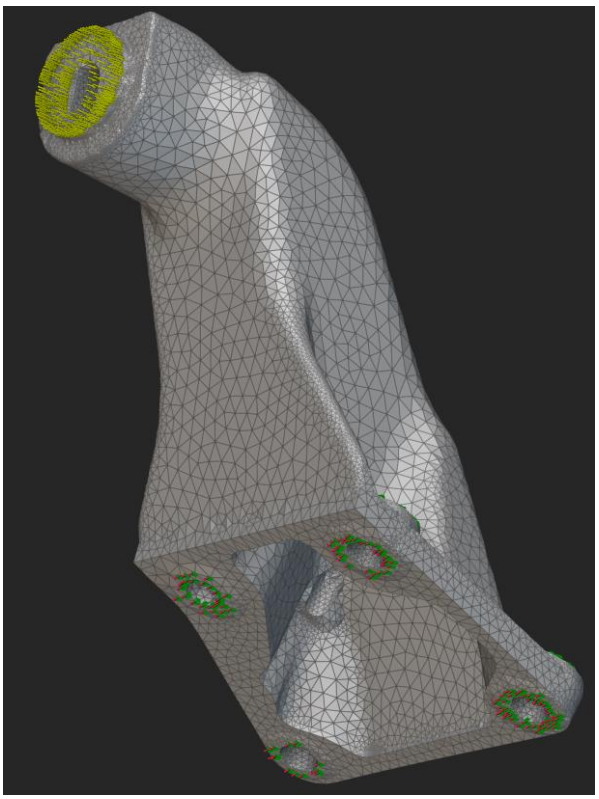
Εικόνα 6.30. *Δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα.*

Η δημιουργία των στηρίξεων είναι σχετικά απλή. Επιλέγοντας τις επιφάνειες όπου πραγματοποιείται η στήριξη με χειροκίνητο τρόπο, με ένα δεξί κλικ με το ποντίκι και επιλέγοντας στην συνέχεια Create Cad Face List variable, δημιουργείται μία λίστα με τις επιφάνειες που είναι επιθυμητό να δηλωθούν σαν στηρίξεις. Έπειτα, σε ένα Fe Face Boundary block τοποθετούνται, η λίστα αυτή και το Fe Volume Mesh. Τέλος, εισαγάγεται η Fe Face Boundary σε ένα Displacement Restrain block και με αυτό τον τρόπο ή μεταβλητή των στηρίξεων είναι έτοιμη προς χρήση. (Εικόνα 6.31)



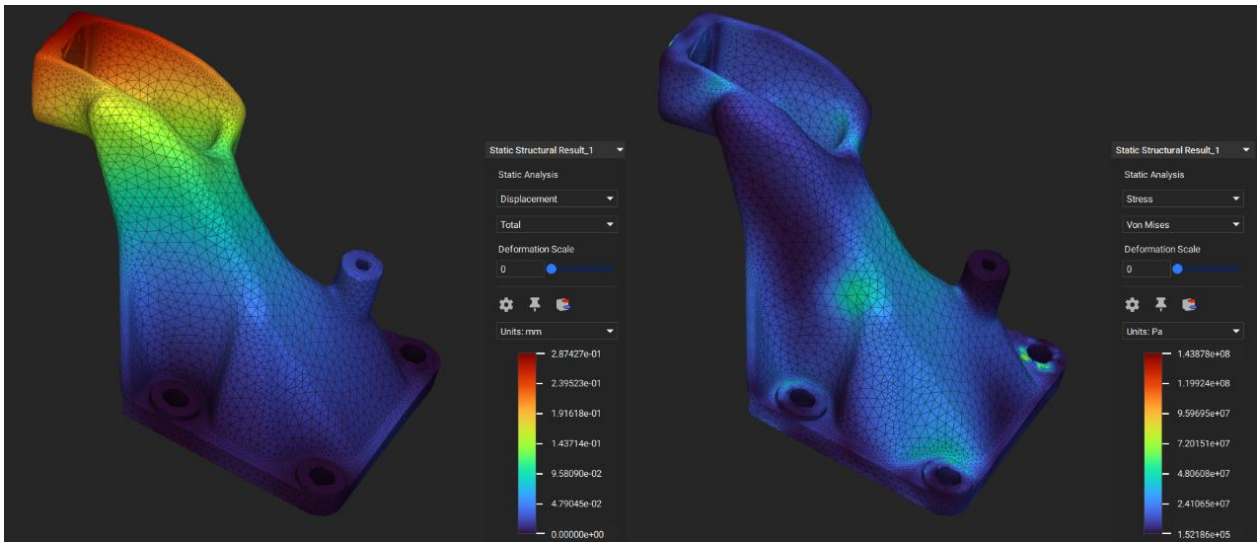
Εικόνα 6.31. *Κρατήσεις του σώματος.*

Πριν προχωρήσει το πείραμα στην πρώτη προσομοίωση, πρέπει να δημιουργηθεί μία τελευταία μεταβλητή, η οποία αφορά την συνύπαρξη των δυνάμεων και των κρατήσεων. Επομένως, σε ένα Structural Compliance Response block τοποθετείται ένα Load Case block μέσα στο οποίο εισάγονται τα Displacement Restrain και Fe Force.



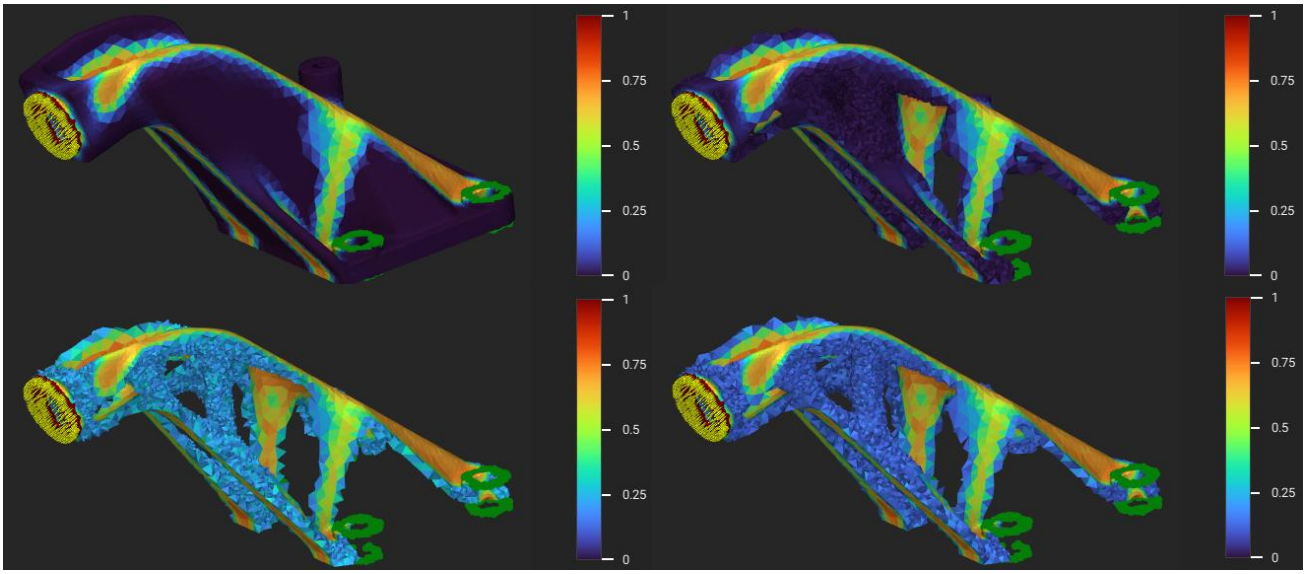
Εικόνα 6.32. *Η βάση του κινητήρα με όλες τις δυνάμεις και τις στηρίξεις που ασκούνται στο σώμα*

Πριν προχωρήσει το πείραμα στην τοπολογική βελτιστοποίηση, θα ήταν πιο ασφαλές να γίνει μια στατική πρώτη προσομοίωση στο αρχικό τεμάχιο. Για να γίνει η προσομοίωση αυτή σε ένα Static Analysis block, τοποθετούνται τα Fe Model, και Structural Compliance Response, στην συνέχεια υλοποιείται για ένα μικρό χρονικό διάστημα η μελέτη (συνήθως της τάξης κάποιων λεπτών ή δευτερολέπτων) και εμφανίζονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 6.33. *Αποτέλεσμα στατικής προσημείωσης (Static Simulation).*

Όπως είναι ορατό στην εικόνα 6.33, το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει κάποια αστοχία (θραύση τεμαχίου) και οι μέγιστες τάσεις από 143MPa με μέγιστη μετατόπιση 0.287mm. Για να αρχίσει η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης, σε ένα Topology Optimization block τοποθετείται το FE Model, ένα Optimization Objective block το οποίο περιέχει τον στόχο της τοπολογικής βελτιστοποίησης (στην συγκεκριμένη περίπτωση μείωση βάρους) και ένα Optimization Constrain list, ώστε να οριστεί πόση θα είναι η μείωση του βάρους (επιλέχθηκε λιγότερο 20% του αρχικού). Εφόσον οριστούν οι κατάλληλες τιμές (Εικόνα 7.1), το λογισμικό εκτελεί αυτόματα την μελέτη και δίνει το πρώτο αποτέλεσμα. Το επόμενο βήμα είναι η μετατροπή του αποτελέσματος σε υπολογίσιμο μαθηματικό σώμα. Αυτό γίνεται με την βοήθεια του block Implicit Body from Topology Optimization, χρησιμοποιώντας μέσα, το αποτέλεσμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης και ορίζοντας τον χρόνο (δηλαδή τον αριθμό της επανάληψης) στον οποίο παίρνεται το αποτέλεσμα (στην συγκεκριμένη περίπτωση πάρθηκε στην 43η επανάληψη της βελτίωσης) και το όριο πυκνότητας (στην συγκεκριμένη περίπτωση 0.083) (Εικόνα 6.34).



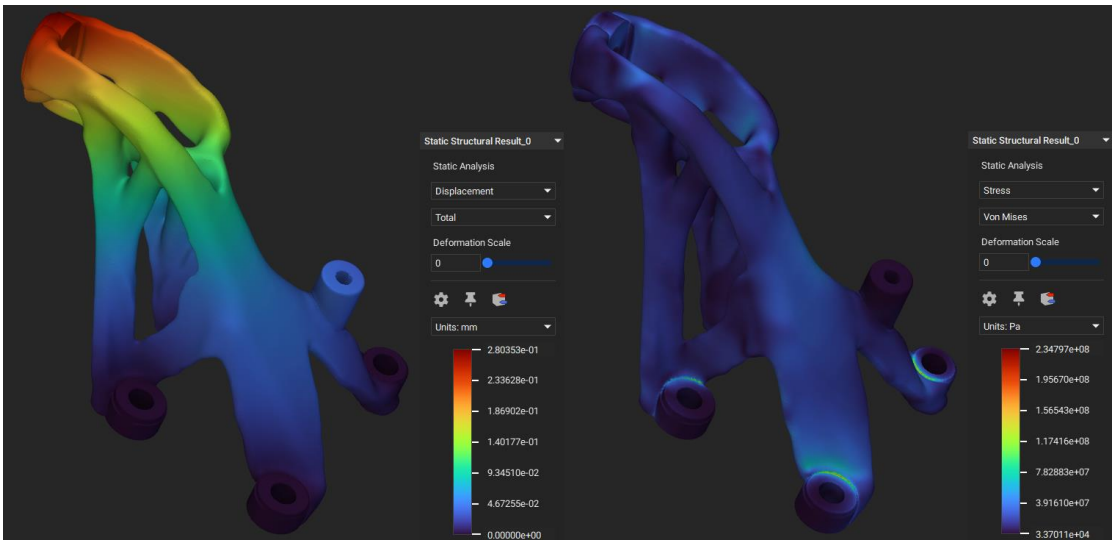
Εικόνα 6.34. Αρχικό α*ποτέλεσμα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης.*

Ακολουθεί η εξομάλυνση του μαθηματικού σώματος με το block Smoothen Body, επιλέγοντας το μέγεθος του πλέγματος εξομάλυνσης, εκτελείται αυτόματα και εξέρχεται το αποτέλεσμα. Στο τελικό αποτέλεσμα μετά και την εξομάλυνση, όπως φαίνεται, όλα τα βασικά μέρη που χρησιμοποιούνται (οι βάσεις στήριξης, η βάση που στηρίζεται επάνω η μία πλευρά του κινητήρα όπως και η βάση της γείωσης) έχουν παραμορφωθεί. Με την χρήση των εντολών Boolean γίνεται ένας διαχωρισμός από το αρχικό αρχείο και επανατοποθέτηση στο βελτιστοποιημένο (Εικόνα 7.1 στα body exception, body separation, top body separation από τα blocks). Η τελική ένωση όλων των απαραίτητων γεωμετριών πραγματοποιείται με ένα Boolean Union block, ενώνοντας το βελτιστοποιημένο σώμα με τις κατάλληλα διαχωρισμένες βάσεις (Εικόνα 6.35).



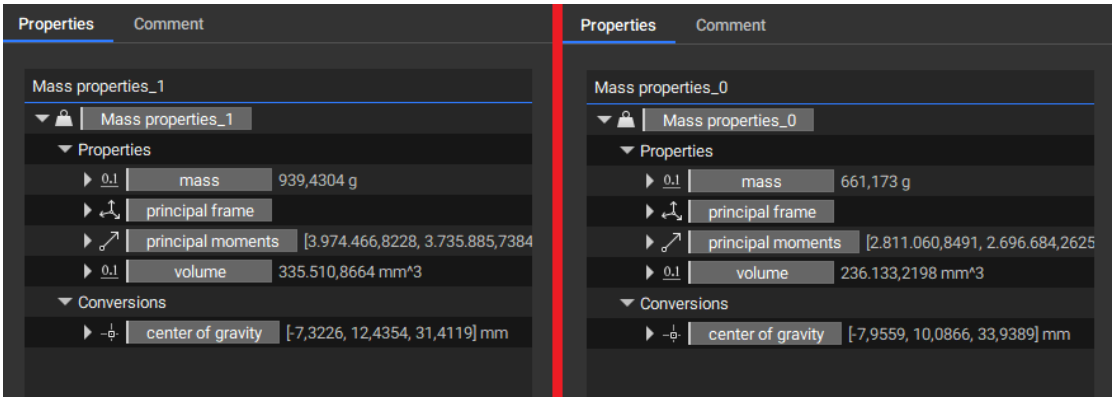
Εικόνα 6.35. *Αρχική εξομάλυνση τεμαχίου και μετέπειτα ένωση με επιθυμητά αναλλοίωτα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.*

Για την ποιοτική επιβεβαίωση του τελικού αποτελέσματος, απαιτείται να ξαναγίνει μία στατική ανάλυση στο τοπολογικά βελτιστοποιημένο πλέον τεμάχιο. Με ακριβώς την ίδια λογική, όπως την πρώτη στατική ανάλυση στο αρχικό κομμάτι, θα γίνει και σε αυτή την φάση η ανάλυση. Η μόνη διαφορά είναι, ότι το κομμάτι που θα ορίζεται σαν κύριο σώμα είναι το βελτιστοποιημένο και όχι το αρχικό. Τα αποτελέσματα πλέον την ανάλυσης αυτής, επιβεβαιώνουν ότι το υπό μελέτη τεμάχιο δεν αποτυγχάνει. Η μέγιστη μετατόπιση έχει μια αμελητέα μείωση της τάξης των 0.07mm, δηλαδή μπορεί να ειπωθεί, ότι η μέγιστη μετατόπιση είναι η ίδια με το αρχικό τεμάχιο στα 0.28mm. Όπως είναι αναμενόμενο, οι εσωτερικές τάσεις αυξήθηκαν κατά περίπου 90MPa, κάτι το οποίο, όπως απεικονίζει το λογισμικό, είναι απολύτως ανεκτό για το συγκεκριμένο υλικό σε αυτήν την γεωμετρία. (Εικόνα 6.36)



Εικόνα 6.36. *Αποτέλεσμα στατικής προσομοίωσης στο τοπολογικά βελτιστοποιημένο τεμάχιο.*

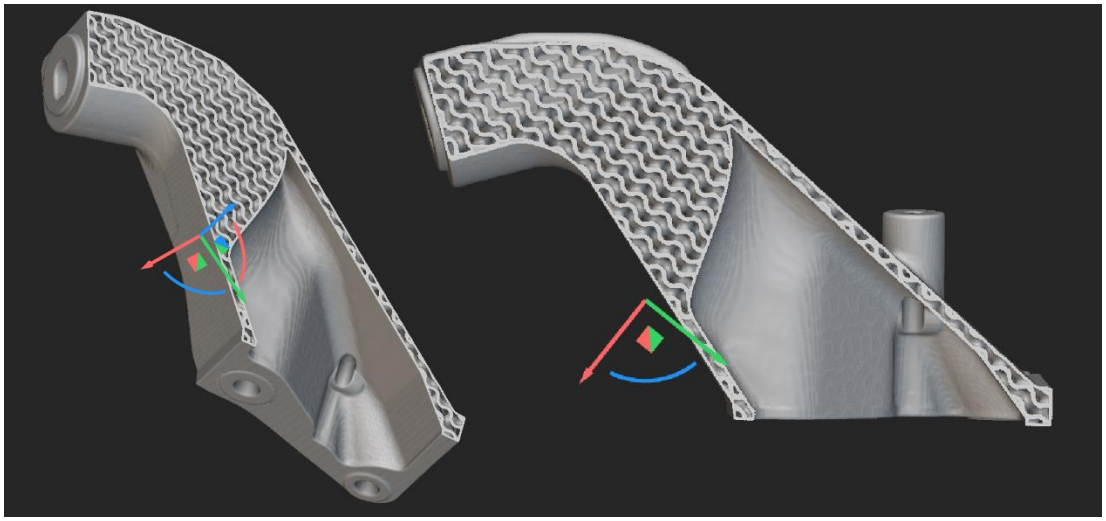
Τέλος επιτεύχθηκε μια μείωση του βάρους κατά 29.6%, δηλαδή από 939 γραμμάρια στα 661 γραμμάρια. (Εικόνα 6.37)



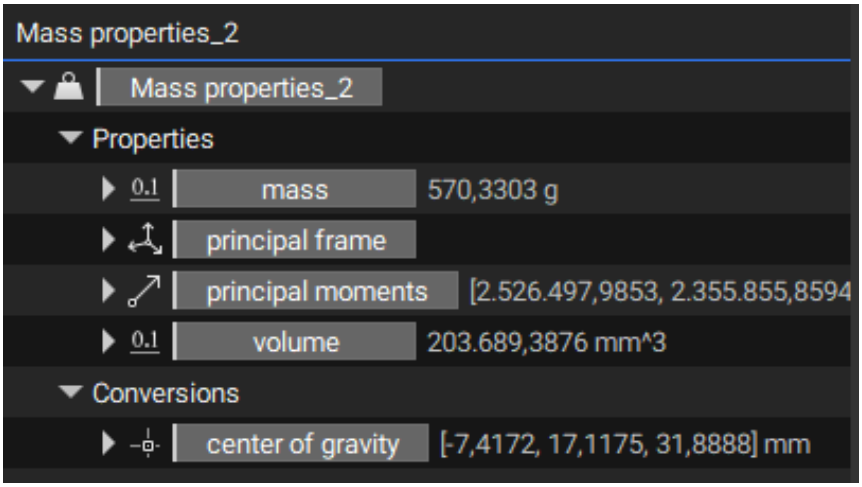
Εικόνα 6.37. *Το βάρος της βάσης κινητήρα πριν και μετά την τοπολογική βελτιστοποίηση.*

6.3.1 Γενική συζήτηση για το nTopology

Σε αυτό το πείραμα που πραγματοποιήθηκε, έγινε μία μελέτη Τοπολογικής Βελτιστοποίησης. Παρ' όλα αυτά το λογισμικό nTopology, δεν περιορίζεται μόνο σε αυτού του είδους την βελτιστοποίηση, αλλά διεισδύει στο γενικότερο φάσμα του Generative Design. Αυτό σημαίνει, πως μπορεί να προσφέρει πολυποίκιλες γεωμετρικές λύσεις, αναλόγως την εκάστοτε περίπτωση. Για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργήσει πλεγματικές δομές διαφόρων ειδών, οι οποίες μπορούν να δώσουν διαφορετικές ιδιότητες στην θλίψη, τον εφελκυσμό, την διάτμηση, την απορρόφηση κραδασμών και στην γενικότερη αντοχή και μάζα του αντικειμένου. (Εικόνα 6.38)

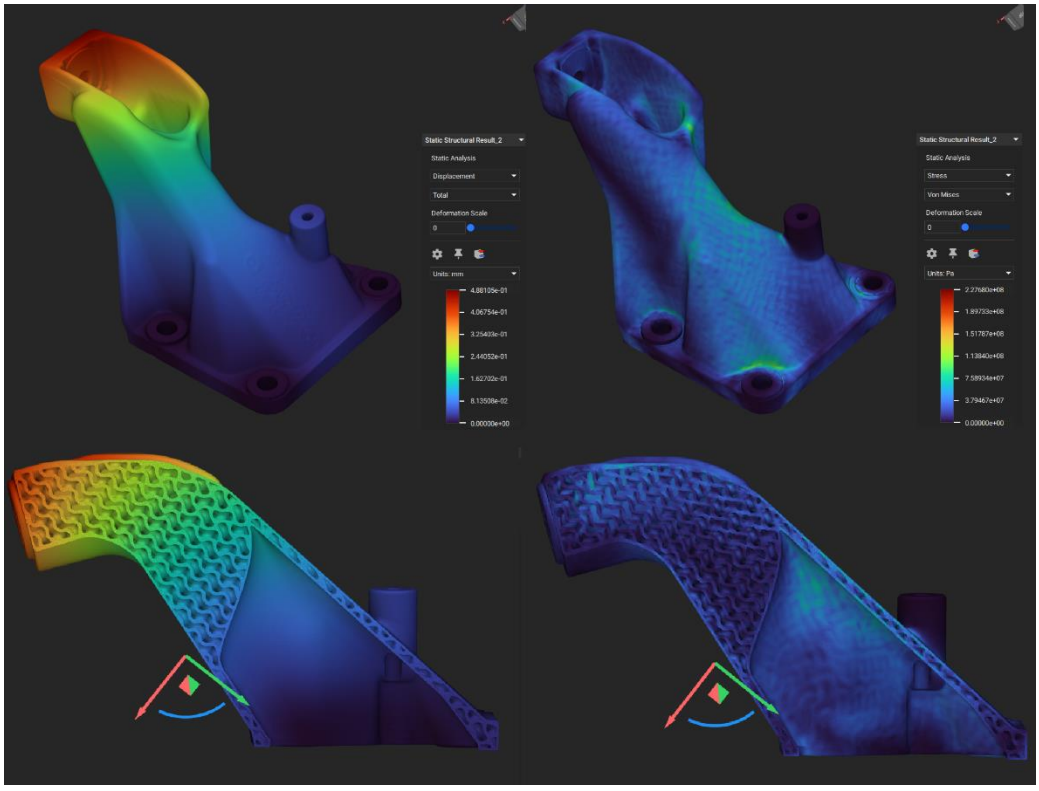


Εικόνα 6.38. *1ο Παράδειγμα με την χρήση γυροειδούς εσωτερικής δομής στο μη τοπολογικά βελτιστοποιημένο τεμάχιο. (Gyroid Lattice)*



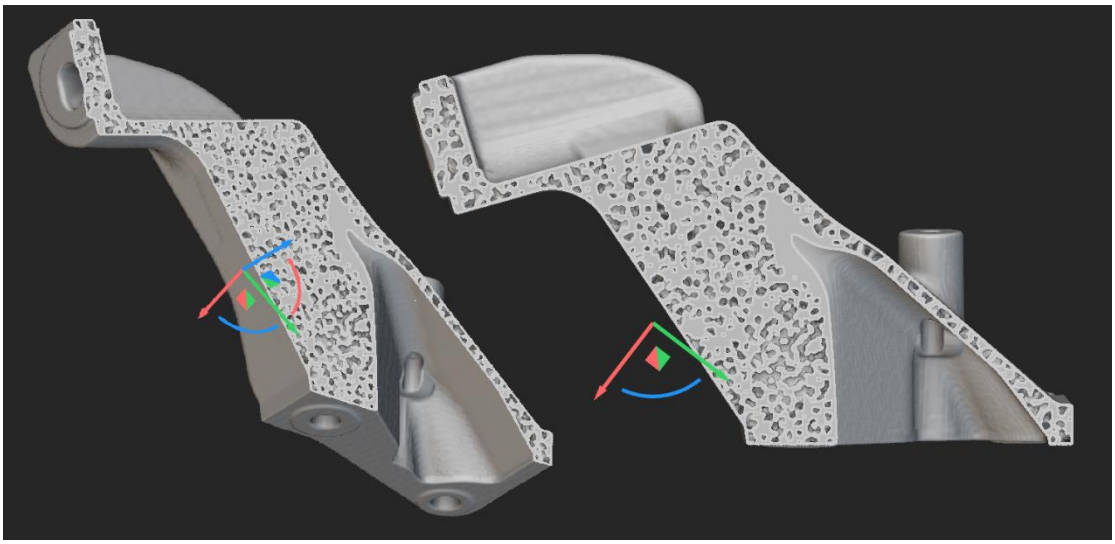
Εικόνα 6.39. *Βάρος του τεμαχίου για το 1ο Παράδειγμα.*

Όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 6.39 υπήρξε μείωση της μάζας του τεμαχίου στα 570gr, έγινε δηλαδή μείωση του βάρους κατά 40%. Ωστόσο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.40, η βάση του κινητήρα ανέχεται αυτήν την παρέμβαση, καθώς οι εσωτερικές τάσεις είναι παρόμοιες με αυτές της τοπολογικής βελτιστοποίησης και η μέγιστη μετατόπιση αυξήθηκε στα 0.048mm. Με μία πρόχειρη ματιά, θα έλεγε κανείς, ότι οι τάσεις είναι καλύτερες κατά 3% από την τοπολογική βελτιστοποίηση, αλλά η μέγιστη μετατόπιση είναι μεγαλύτερη κατά 58%.

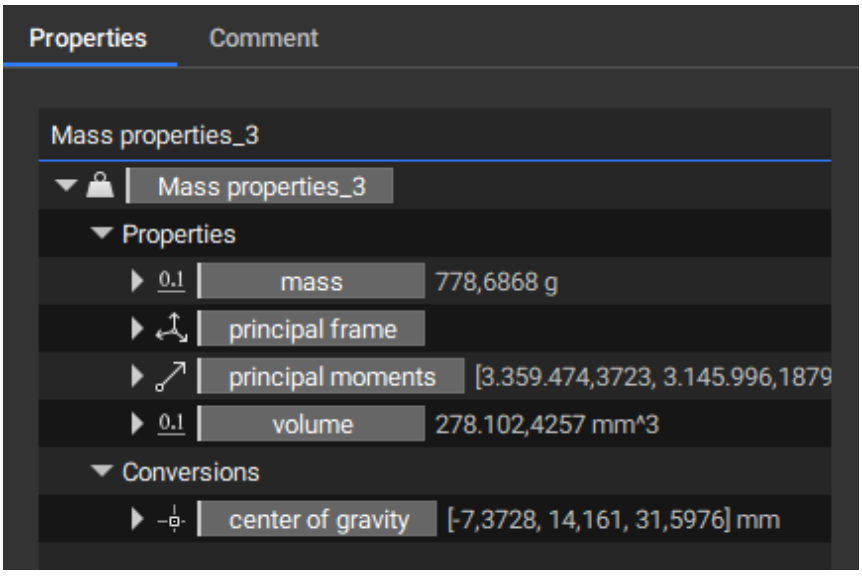


Εικόνα 6.40. *Στατική προσομοίωση του 1ου παραδείγματος.*

Στα παρακάτω παραδείγματα δεν έχει γίνει κάποια μελέτη όσον αφορά την αντοχή τους, χρησιμοποιήθηκαν καθαρά για παραδειγματικούς σκοπούς. Στο παράδειγμα της εικόνας 6.41 η εσωτερική δομή επιτεύχθηκε επιλέγοντας απόσταση σημείων 4mm και πάχος δομής 2mm. Το τελικό βάρος που προέκυψε, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.42, είναι περίπου 778gr.

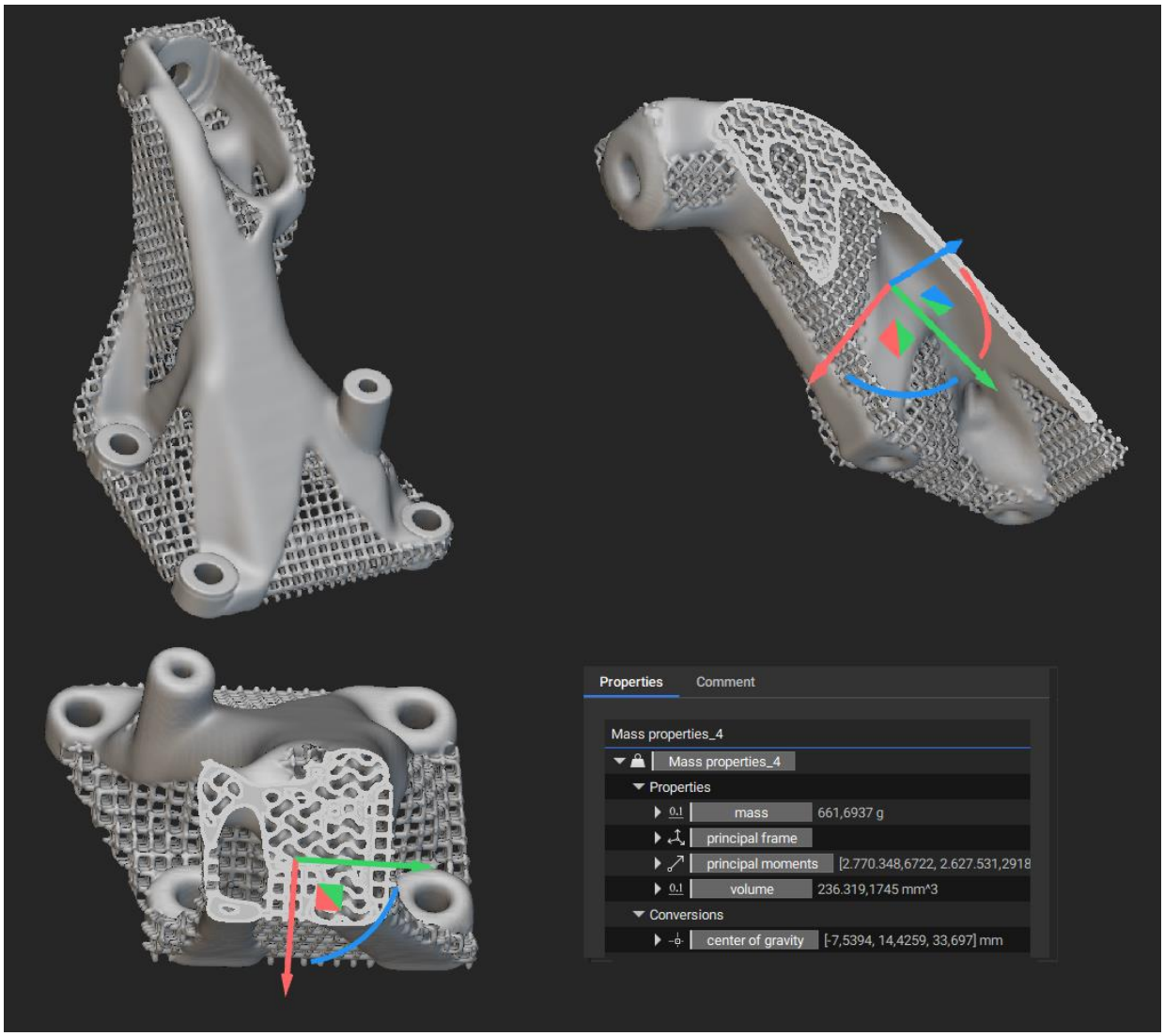


Εικόνα 6.41. *2ο Παράδειγμα με την χρήση Voronoi εσωτερικής δομής σε μορφή πλέγματος. (Voronoi Lattice)*



Εικόνα 6.42. *Βάρος του τεμαχίου για το 2ο Παράδειγμα.*

Επιπλέον θα μπορούσε να υπάρξει συνεργασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης με τον γενετικό σχεδιασμό, όπως το παράδειγμα που ακολουθεί. Αυτό θα ωφελούσε στην συγκεκριμένη κατάσταση για την μείωση των τάσεων, λόγω της αύξησης της συνολικής επιφάνειας και της δημιουργίας νευρώνων μέσω της πλεγματικής δομής, με πολύ μικρή αύξηση της μάζας στο τελικό αποτέλεσμα. (Εικόνα 6.43.)



Εικόνα 6.43. *3ο Παράδειγμα με συνεργασία τοπολογικής βελτιστοποίησης με εσωτερική δομή τεμαχίου γυροειδούς μορφής και εξωτερική ενίσχυση με την βοήθεια τετραγωνικού πλέγματος.*

6.4 Συμπεράσματα

Το τελικό αποτέλεσμα του πρώτου πειράματος (6.2), είναι να μειωθεί το βάρος της κατασκευής από 940 γραμμάρια στα 615. Δηλαδή η διαφορά είναι 325 γραμμάρια περίπου. Επομένως επιτεύχθηκε μία αξιοσημείωτη μείωση μάζας και όγκου κατά 34%. Η βιομηχανία που παρήγαγε αυτό το μοντέλο αυτοκινήτου, στο οποίο ανήκει αυτή η βάση κινητήρα, βάσει επίσημων στοιχείων είχε παραγωγή 561.249 μοντέλων μέχρι το 2002 και η βάση αυτή χρησιμοποιήθηκε στα τετρακύλινδρα μοντέλα 316, 318, 320 [9,10]. Ενώ εκτιμάται ότι τα τετρακύλινδρα μοντέλα αντιπροσώπευαν πάνω από το 55% της συνολικής παραγωγής [9,10], εάν υποθέσουμε όμως ότι αντιπροσώπευαν 50% της συνολικής παραγωγής, με την επίτευξη της μείωσης των 325 γραμμαρίων από μία απλή βάση στήριξης κινητήρα θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν περίπου 91.2 τόνοι από το υλικό κατασκευής.

Το τελικό αποτέλεσμα του δεύτερου πειράματος (6.3), είναι να μειωθεί το βάρος της κατασκευής από 940 γραμμάρια στα 660. Δηλαδή, η διαφορά είναι 280 γραμμάρια περίπου. Επομένως επιτεύχθηκε μία αξιοσημείωτη μείωση μάζας και όγκου κατά 29,7%. Με την επίτευξη της μείωσης των 280 γραμμαρίων από μία απλή βάση στήριξης κινητήρα θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν περίπου 78,5 τόνοι από το υλικό κατασκευής. Μπορεί να είναι πιο βαρύ από το αποτέλεσμα του πρώτου πειράματος μέσω του SolidWorks, αλλά είναι πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα, επομένως η υψηλότερη ακρίβεια και τα λιγότερα φυσικά πειράματα αντοχής που θα χρειαστεί να γίνουν θα μειώσουν το χρόνο ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Όμως, όπως είναι εμφανές, ενώ το πρωτότυπο αντικείμενο είναι κατασκευασμένο με μία συμβατική μέθοδο (χύτευση), δεν είναι πλέον εφικτό, η καινούρια βάση κινητήρα να παραχθεί με κάποια από τις συμβατικές μεθόδους (χύτευση, cnc, φρέζα είτε πολυαξονικός τόρνος), λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητάς της. Επειδή η βάση αυτή είναι μεταλλική μπορεί να παραχθεί μόνο με διεργασίες σύντηξης πούδρας σε κλίνη - Powder Bed Fusion (PBF) και διεργασίες εναπόθεσης υλικού με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη - Direct Energy Deposition (DED). Οι PBF διεργασίες, μπορούν να παρέχουν μια ταχεία μαζική παραγωγή, με άψογα αποτελέσματα και για αυτό θα ήταν η προτιμότερη επιλογή. Εάν το εξάρτημα αυτό ήταν κάποιο πλαστικό πολυμερές, είτε κάποιο κεραμικό υλικό, θα μπορούσε να παραχθεί με συστήματα εξώθησης υλικού – Fused Deposition Modelling (FDM) ή συστήματα Φωτοπολυμερισμού σε κάδο - Vat Photopolymerization (VP), (SL).

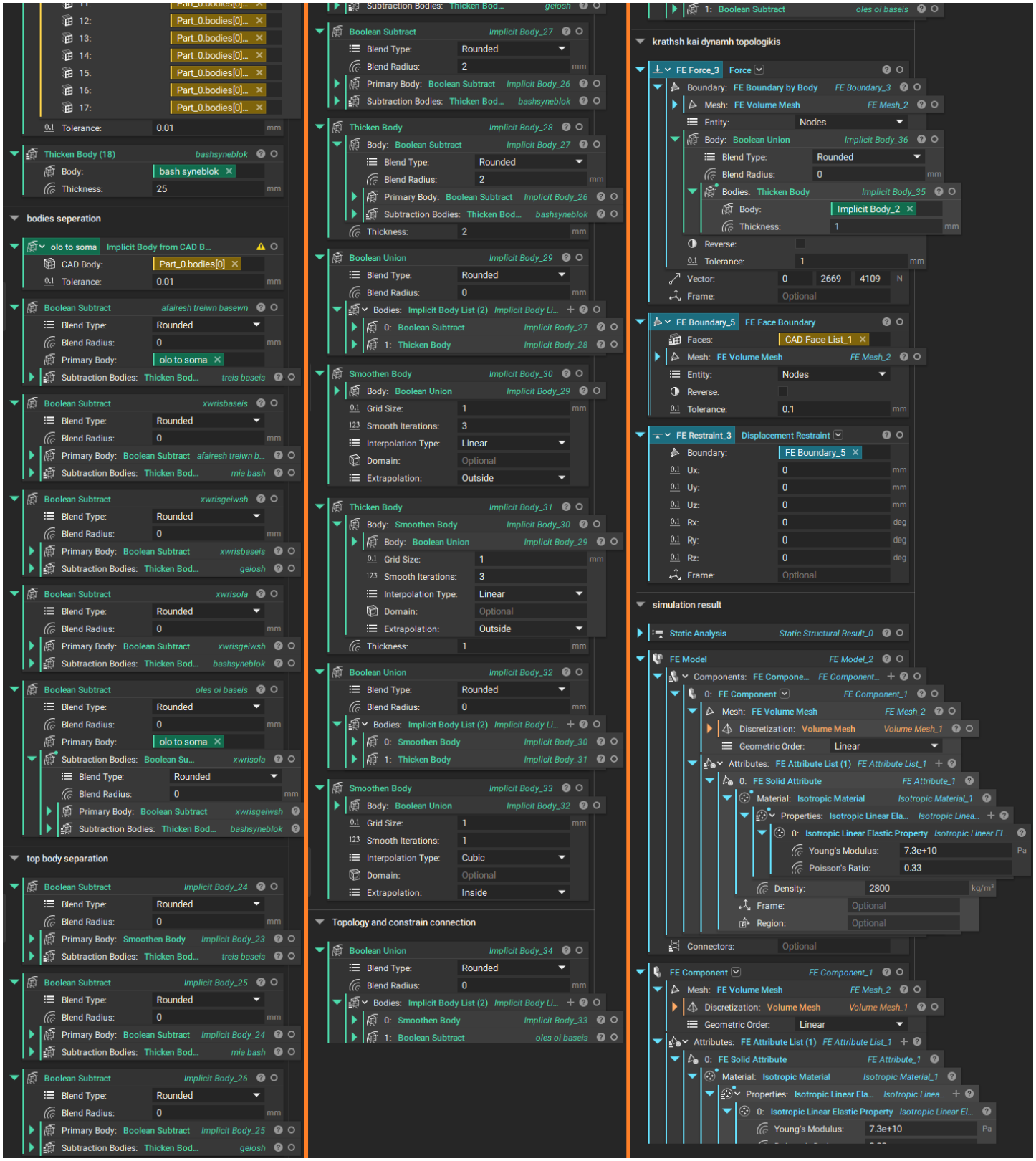
Επομένως, είναι εμφανές ότι η καλύτερη επιλογή για την βιομηχανία, είναι να χρησιμοποιεί εξειδικευμένο λογισμικό για την εκάστοτε εργασία. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση, για την συγκεκριμένη βάση για παράδειγμα, θα ήταν να σκαναριστεί, έπειτα να διορθωθεί μέσω του SolidWorks και να μελετηθεί μέσω του nTop.

Με την βοήθεια των εργαλείων τοπολογικής βελτιστοποίησης, ανοίγονται νέοι ορίζοντες με φωτεινές προοπτικές, όσον αφορά την βελτίωση των κατασκευαζόμενων προϊόντων, αλλά και την εξοικονόμηση υλικών. Αυτό συνεπώς, οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης των προϊόντων, της κερδοφορίας, αλλά αποτελεί επιπλέον μια μέθοδο πιο φιλική προς το περιβάλλον από τις συμβατικές. Κλείνοντας, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ανοίγονται νέες θέσεις εργασίας, καθώς για να επιτευχθεί η οποιαδήποτε τέτοιου είδους μελέτη, απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις και εκπαίδευση, τόσο για την χρήση των λογισμικών όσο και για την χρήση των μηχανών κατασκευής.

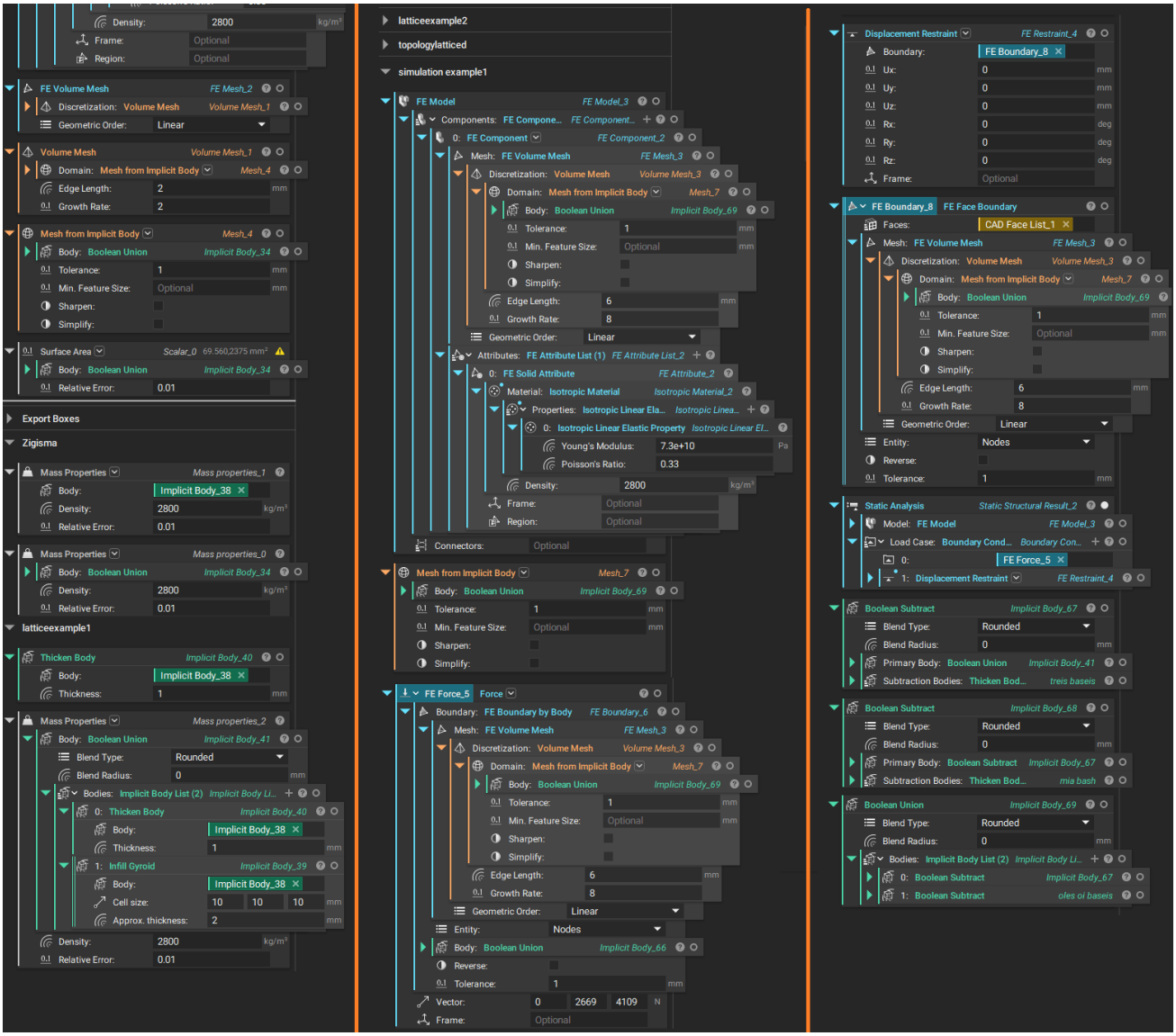
Παράρτημα: Παράθεση Blocks



Εικόνα 7.1. *Παράθεση 1ου μέρους του συνδυασμού blocks για την εκτέλεση του πειράματος 5.6.3. (Διαβάζεται από την αριστερή και συνεχίζει προς την δεξιά στήλη)*



Εικόνα 7.2. *Παράθεση 2ου μέρους του συνδυασμού blocks για την εκτέλεση του πειράματος 5.6.3. (Διαβάζεται από την αριστερή και συνεχίζει προς την δεξιά στήλη)*



Εικόνα 7.3. *Παράθεση 3ου μέρους του συνδυασμού blocks για την εκτέλεση του πειράματος 5.6.3. (Διαβάζεται από την αριστερή και συνεχίζει προς την δεξιά στήλη)*

Βιβλιογραφία/Αναφορές

[1] Νικολαΐδης, Γ. (2007). *Μεθοδολογίες οργάνωσης και βελτιστοποίησης μοντελοποίησης μηχανολογικών κατασκευών κατά τη δομική ανάλυσή τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών και Μηχανολογικού Σχεδιασμού).

[2] Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ... & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP annals*, *65*(2), 737-760.

[3] Tkac, J., Samborski, S., Monkova, K., & Debski, H. (2020). Analysis of mechanical properties of a lattice structure produced with the additive technology. *Composite Structures*, *242*, 112138.

[4] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/ © 2011-2023 UltiMaker

[5] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.researchgate.net/figure/Overview-Topology-Optimization-Algorithm_fig3_277184056 © 2008-2023 ResearchGate GmbH. All rights reserved.

[6] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.scaninabox.com/

[7] Raja, Vinesh, and Kiran J. Fernandes, eds. *Reverse engineering: an industrial perspective*. Springer Science & Business Media, 2007.

[8] Thompson, Mary Kathryn, et al. "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints." *CIRP annals* 65.2 (2016): 737-760.

[9] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.theautochannel.com/news/2004/01/27/178201.html Copyright 1996–2023 The Auto Channel.

[10] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://encyclopedia.pub/entry/32664 © 2023 Encyclopedia is subsidized by MDPI.

[11] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ Τρισδιάστατη εκτύπωση, ταχεία πρωτοτυποποίηση και άμεση ψηφιακή κατασκευή, Εκδόσεις Κριτική, 1η Έκδοση Νοέμβριος 2017

[12] Νικόλαος Μπιλάλης, Εμμανουήλ Μαραβελάκης, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM ΚΑΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, Εκδόσεις Κριτική, 3η Έκδοση Οκτώβριος 2020

[13] William D. Callister, JR., David G. Rethwisch, ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, 2017, 2016 ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ

[14] Krishna, L. S. R., Mahesh, N., & Sateesh, N. (2017). Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing. Materials today: proceedings, 4(2), 1414-1422.

[15] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.solidworks.com/, 2002-2023 Dassault Systèmes SolidWorks Corporation

[16] Stevens MJ, Covas JA, Extruder principles and operation, 2 edn. Springer Dordrecht, 494 p. (1995), ISBN: 0412635909, 9780412635908

[17] Keicher DM, Miller WD, Metal powder report (1998) 53:26

[18] Boothroyd G, Dewhurst P, Knight W, Product design for manufacture and assembly, Marcel Dekker, New York (1994)

[19] Dewhurst P, Srothongchai S, An Investigation of minimum-weight dual-material symmetrically loaded, wheels and torsion arms. ASME J ApplMech (2005)

[20] Baldick R, Applied optimization. Cambridge University Press, Cambridge (2006)

[21] Qi X, Wang MY, Shi T, A method for shape and topology optimization of truss-like structures. Struct Multidisc Optim (2013)

[22] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://3dprintingindustry.com/news/bmw-demos-3d-printed-s1000rr-sport-bike-following-12-3-million-investment-132331/ © Copyright 2017 | All Rights Reserved | 3D Printing Industry

[23] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.topgear.com/car-news/supercars/bugatti-has-3d-printed-brake-caliper-titanium BBC is a trademark of the British Broadcasting Corporation. Logos © 1996

[24] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.dexigner.com/news/28047 © 2023 Dexigner. All rights reserved.

[25] Ελένη Σπ. Κοκκινάκη "Τοπολογική βελτιστοποίηση κυψελωτών δομών με χρήση του προγράμματος NX" Χανιά, Μάρτιος 2018

[26] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.cpuid.com/softwares/hwmonitor.html ©2001-2023 - All website content subjected to copyright

[27]Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.autodesk.com/products/autocad/overview © 2023 Autodesk Inc. All rights reserved

[28] Bidari, S., Kamyab, M., Ghandhari, H., & Komeili, A. (2021). Efficacy of Computer-Aided Design and Manufacturing Versus Computer-Aided Design and Finite Element Modeling Technologies in Brace Management of Idiopathic Scoliosis: A Narrative Review. Asian spine journal, 15(2), 271.

[29] Weiss, H. R., Tournavitis, N., Nan, X., Borysov, M., & Paul, L. (2017). Workflow of CAD/CAM scoliosis brace adjustment in preparation using 3D printing. The open medical informatics journal, 11, 44.

[30] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.altair.com/topology-optimization/ 2022 Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved. We are currently listed on Nasdaq as ALTR.

[31] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.3ds.com/products-services/catia/ ©2002 - 2023 Dassault Systèmes - All rights reserved

[32] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/ © Siemens 2023

[33] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.ptc.com/en/products/creo/pro-engineer © Copyright 2023 PTC

[34] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://solidedge.siemens.com/en/ © Siemens 2023

[35] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://oqton.com/geomagic-designx/ Oqton, Inc. Attn: Legal Department

[36] Ntintakis, I., G. E. Stavroulakis, and N. Plakia. "The perspective of topology optimization on 3d printed furniture prototypes." *Sim-AM 2019: II International Conference on Simulation for Additive Manufacturing*. CIMNE, 2019.

[37] Ntintakis, Ioannis, Georgios Eleftherios Stavroulakis, and Niki Plakia. "Topology optimization by the use of 3D printing technology in the product design process." *HighTech and Innovation Journal* 1.4 (2020): 161-171.

[38] Ntintakis, Ioannis, et al. "Utilizing generative design for additive manufacturing." *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems: Select Proceedings of RAM 2021*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. 977-989.

[39] Ntintakis, Ioannis, and Georgios E. Stavroulakis. "Infill microstructures for additive manufacturing." *Applied Sciences* 12.15 (2022): 7386.

[40] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://support.ntop.com/hc/en-us/categories/360003678133-Knowledge-Base © nTopology Inc. 2025. All rights reserved.

[41] Διαθέσιμη στην ιστοσελίδα: https://www.ntop.com/ © nTopology Inc. 2025. All rights reserved.