

# Αξιοποίηση της διαδικασίας DFAM για τον σχεδιασμό και την παραγωγή μηχανολογικών εξαρτημάτων

Διπλωματική Εργασία



Νίκος Ζούπας

2017010080

Τριμελής επιτροπή:

Σταυρουλάκης Γεώργιος, Καθηγητής

Ντιντάκης Ιωάννης, Επ. καθηγητής, ΕΛΜΕΠΑ

Δρ. Μπακατσάκη Μαρία, ΕΔΙΠ



## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη για την πολύτιμη ευκαιρία που μου δόθηκε αλλά και την υπομονή που έδειξε κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Ιωάννη Ντιντάκη για την καθοδήγηση και την συμβουλευτική βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που μου έδωσε την ευκαιρία να σπουδάσω και μου παρείχε όλα τα μέσα για να πετύχω τους στόχους μου και τον συμβουλευτικό ρόλο του αδερφού μου, μοιράζοντας τις γνώσεις του στη μηχανολογία. Εξίσου σημαντική ήταν η στήριξη των φίλων και συμφοιτητών σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Με το πέρασμα των χρόνων έχει αρχίσει όλο ένα και περισσότερο να αναδεικνύεται η τρισδιάστατη εκτύπωση. Η δυνατότητα τύπωσης ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου σε στρώματα μπορεί να αποδώσει αντικείμενα μεγάλης ακρίβειας αλλά και σύνθετης πολυπλοκότητας. Εφόσον επιτευχθεί η ακρίβεια στην σχεδίαση, σκοπός πλέον είναι η βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των αντικειμένων μέσω της σχεδίασης για κατασκευή προσθέτων (DfAM), μια από αυτές τις μεθόδους είναι η τοπολογική βελτιστοποίηση.

Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε με τον σχεδιασμό ενός ζύγωθρου. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ανάλυση για τις τάσεις τις οποίες δέχεται το αντικείμενο κατά την χρήση του και θα εφαρμοστεί η τοπολογική βελτιστοποίηση. Έπειτα θα πραγματοποιηθεί δεύτερη ανάλυση για την επιβεβαίωση ότι το ζύγωθρο δεν ξεπερνάει το όριο διαρροής. Για την εκπόνηση της διπλωματικής θα γίνει χρήση του λογισμικού Inventor για την σχεδίαση και του λογισμικού Ansys για την ανάλυση των δυνάμεων αλλά και της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Σκοπός είναι να προκύψει ένα αντικείμενο με βελτιωμένη δομική απόδοση αλλά και μικρότερο βάρος σε σχέση με το αρχικό αντικείμενο.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη .....	4
Πίνακας περιεχομένων εικόνων .....	6
Κατάλογος πινάκων .....	8
1. Τεχνική Ανάλυση Ζύγωθρου .....	9
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Λειτουργία του ζύγωθρου .....	9
1.3 Υλικά κατασκευής .....	11
1.4 Κατηγοριοποίηση ζύγωθρων .....	11
1.5 Αστοχίες κατά την λειτουργία .....	14
2. Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης για προσθετική κατασκευή.....	16
2.1 Τοπολογική βελτιστοποίηση .....	16
2.1.1 Εισαγωγή .....	16
2.1.2 Μοντελοποίηση προβλήματος τοπολογική βελτιστοποίησης .....	17
2.1.3 Solid Isotropic Material with Penalization/SIMP Method.....	18
2.2 Επίλυση προβλήματος τοπολογικής βελτιστοποίησης .....	19
2.3 Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης κατά την προσθετική κατασκευή.....	20
2.4 Design for Additive Manufacturing .....	22
3. Μοντελοποίηση και μελέτη ζυγώθρου. ....	23
3.1 Μοντελοποίηση με την χρήση Autodesk Inventor. ....	23
3.1.1 Εισαγωγή στο Autodesk Inventor .....	23
3.1.2 Μοντελοποίηση ζυγώθρου.....	23
3.2 Μελέτη ζυγώθρου με την χρήση του λογισμικού Ansys.....	28
3.2.1 Εισαγωγή στο Ansys .....	28
3.2.2 Στατική ανάλυση.....	30
3.2.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση .....	36
3.2.4 Επαλήθευση αποτελεσμάτων .....	38
3.3 Περιπτώσεις φορτίσεων.....	44
4. Αποτελέσματα.....	51
5. Συμπεράσματα.....	52
Βιβλιογραφία.....	53

## Πίνακας περιεχομένων εικόνων

Εικόνα 1-1 Συναρμολόγηση ζυγώθρων .....	9
Εικόνα 1-2 Διάταξη μηχανισμού κεφαλής κινητήρα .....	10
Εικόνα 1-3 .....	10
Εικόνα 1-4 Stamped Steel Rocker arm .....	12
Εικόνα 1-5 Roller Tipped Rocker arm .....	12
Εικόνα 1-6 Full Roller Rocker arm .....	13
Εικόνα 1-7 Shaft Rocker arms .....	13
Εικόνα 1-8 End Pivot (Finger Follower) Rocker arm.....	14
Εικόνα 1-9 Φθορά στο κεντρικό σημείο περιστροφής .....	14
Εικόνα 1-10 Θραύση στο λαιμό του ζυγώθρου .....	14
Εικόνα 2-1 Γενική μορφή σχεδιαστικού προβλήματος εύρεσης κατανομής υλικού .....	18
Εικόνα 2-2 Συσχέτιση συμβατικής μεθόδου κατεργασίας και προσθετικής κατασκευής .....	20
Εικόνα 2-3 Σχεδιασμός τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	21
Εικόνα 3-1 Αρχικό περιβάλλον Autodesk Inventor .....	24
Εικόνα 3-2 Περιβάλλον Autodesk Inventor .....	24
Εικόνα 3-3 2Δ σχέδιο.....	25
Εικόνα 3-4 Εντολή Extrude .....	25
Εικόνα 3-5 Εντολή "Fillet 1".....	26
Εικόνα 3-6 Εντολή "Fillet 2".....	26
Εικόνα 3-7 Σχεδίαση οπής Φ24 mm .....	26
Εικόνα 3-8 Εκτέλεση εντολής "Extrude" .....	26
Εικόνα 3-9 Σχεδίαση σημείου επαφής ζυγώθρου-βαλβίδας .....	27
Εικόνα 3-10 Εκτέλεση εντολής "Extrude" .....	27
Εικόνα 3-11 Σχεδίαση οπής Φ8,5 mm .....	27
Εικόνα 3-12 Εκτέλεση εντολής "Extrude" .....	27
Εικόνα 3-13 Εκτέλεση εντολής "Extrude" .....	28
Εικόνα 3-14 Παρουσίαση τελικού εξαρτήματος .....	28
Εικόνα 3-15 Ροή εργασιών .....	29
Εικόνα 3-16 Εκχώρηση ιδιοτήτων υλικού.....	31
Εικόνα 3-17 Κατασκευή πλεγματικής δομής .....	32
Εικόνα 3-18 Εισαγωγή εντολή χαχτρογαφημένης επιφάνειας στις περιοχές φορτίσεων και στήριξης.....	32
Εικόνα 3-19 Εντολή "Frictionless support" .....	34
Εικόνα 3-20 Εντολή "Fixed support" .....	35
Εικόνα 3-21 Εισαγωγή δύναμης ελατηρίου .....	35
Εικόνα 3-22 Κατανομή τάσεων von-Misses .....	36
Εικόνα 3-23 Συνολική παραμόρφωση.....	36
Εικόνα 3-24 Απεικόνιση περιοχών βελτιστοποίησης.....	37
Εικόνα 3-25 Εισαγωγή κριτηρίου συμμόρφωσης .....	37
Εικόνα 3-26 Τοπολογικά βελτιστοποιημένο εξάρτημα.....	38
Εικόνα 3-27 Strut-based πλεγματικές δομές A) BCC, B) FCC.....	39
Εικόνα 3-28 Τοπολογικά βελτιωμένη FCC δομή .....	39
Εικόνα 3-29 TPMS πλεγματικές δομές A)Schoen, B)Schwarz, C) Neovius.....	39
Εικόνα 3-30 Μοναδιαία κυψελίδα.....	40
Εικόνα 3-31 Εισαγωγή βελτιστοποιημένου μοντέλου στο Spaceclaim .....	41
Εικόνα 3-32 Εφαρμογή εντολής "Shrinkwrap" .....	41

Εικόνα 3-33 Εφαρμογή εντολής "Smooth" .....	42
Εικόνα 3-34 Εφαρμογή εντολής "Reduce" .....	43
Εικόνα 3-35 Στερεό αντικείμενο .....	43
Εικόνα 3-36 Κατανομή τάσεων Von-Mises.....	44
<i>Εικόνα 3-37 Εφαρμογή δύναμης 15 μοιρών από τον κατακόρυφο άξονα</i> .....	45
<i>Εικόνα 3-38 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης</i> .....	45
Εικόνα 3-39 Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	45
Εικόνα 3-40 Α) αποτέλεσμα αρχικής περίπτωσης φορτίσεως, Β) αποτέλεσμα πρώτης περίπτωσης φορτίσεως.....	46
Εικόνα 3-41 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης.....	46
<i>Εικόνα 3-42 Εφαρμογή δύναμης 30 μοιρών από τον κατακόρυφο άξονα</i> .....	47
<i>Εικόνα 3-43 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης</i> .....	47
Εικόνα 3-44 Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	47
Εικόνα 3-45 (Α) Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης περίπτωση 2, (Β) Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης περίπτωση 1.....	48
Εικόνα 3-46 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης.....	48
Εικόνα 3-47 Εφαρμογή δύναμης 45 μοιρών από τον κατακόρυφο άξονα.....	49
Εικόνα 3-48 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης.....	49
Εικόνα 3-49 Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	49
Εικόνα 3-50 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης.....	50

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Ιδιότητες κράματος σε διαφορετικά πάχη στρώσεων .....	31
Πίνακας 2 χαρακτηριστικά κινητήρα .....	33
Πίνακας 3 Δεδομένα υπολογισμού δύναμης βαλβίδας .....	33
Πίνακας 4 Μέγιστες τάσεις εξαρτημάτων .....	51



# 1. Τεχνική Ανάλυση Ζύγωθρου

## 1.1 Εισαγωγή

Το ζύγωθρο αποτελεί ένα σημαντικό εξάρτημα της κεφαλής του κινητήρα, με κύρια λειτουργία το άνοιγμα των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής, σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Πιο συγκεκριμένα, το ένα του άκρο είναι σε επαφή με την κορυφή του στελέχους της βαλβίδας ενώ, το άλλο άκρο βρίσκεται είτε σε άμεση επαφή με τον εκκεντροφόρο ή βρίσκεται σε επαφή με τη ράβδο ώθησης/διωστήρα (σε περίπτωση όπου ο εκκεντροφόρος βρίσκεται χαμηλότερα από την κεφαλή του κινητήρα), όπου δέχεται την κίνηση από το εκκεντροφόρο [1]. Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης, το σημείο περιστροφής βασίστηκε σε λιγότερο αποτελεσματικές θεωρίες έχοντας σαν αποτέλεσμα την φθορά των άκρων των βαλβίδων, των οδηγών τους και άλλων εξαρτημάτων της σειράς των βαλβίδων. Με το πέρασμα των χρόνων, η λειτουργία τους έχει μελετηθεί και βελτιωθεί. Οι παραλλαγές αυτές μπορεί να αξιοποιούν δύο ζύγωθρα ανά βαλβίδα, ενώ σε άλλα σχέδια εισάγεται στην άκρη τους ρουλεμάν, για να ασκεί πίεση στην βαλβίδα. Παρόλες τις διαφοροποιήσεις στον σχηματισμό τους όλα τα ζύγωθρα εξακολουθούν να εκτελούν την ίδια λειτουργία. [2]

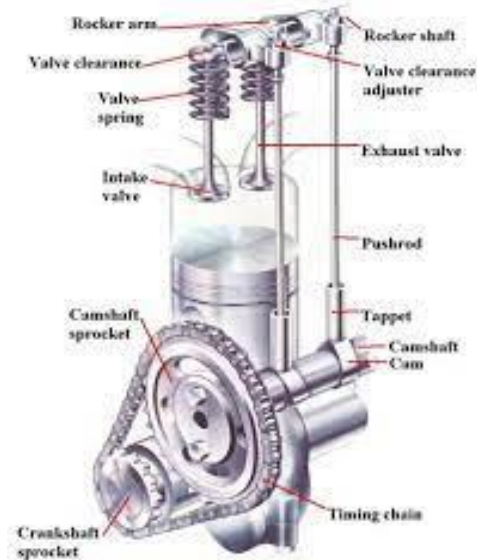
## 1.2 Λειτουργία του ζύγωθρου



Εικόνα 1-1 Συναρμολόγηση ζυγώθρων

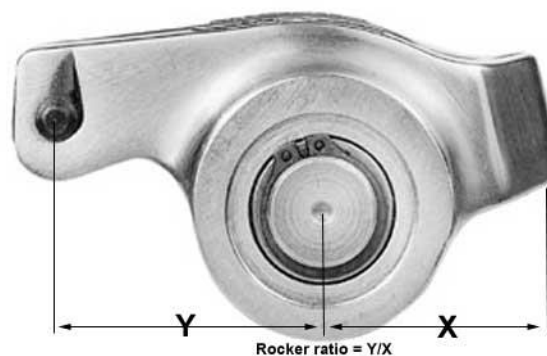
Αναλύοντας λίγο παραπάνω την χρήση του ζύγωθρου, θα μπορούσαμε να το χαρακτηρίσουμε ως ένα ταλαντευόμενο μοχλό που μεταφέρει την ακτινική κίνηση από την κάμα του εκκεντροφόρου σε γραμμική κίνηση στις βαλβίδες ούτως ώστε να τις ανοίξει. Πιο συγκεκριμένα, η κάμα του εκκεντροφόρου ανυψώνει το εξωτερικό μέρος του ζύγωθρου (είτε απευθείας είτε μέσω του διωστήρα), ενώ το εσωτερικό μέρος παράλληλα πιέζει το στέλεχος της βαλβίδας για να ανοίξει. Στη συνέχεια το

εξωτερικό μέρος επανέρχεται στην αρχική του θέση λόγω της περιστροφής του εκκεντροφόρου με αποτέλεσμα το ελατήριο της βαλβίδας να κλείσει πάλι την βαλβίδα [3]. Παρατηρώντας όμως τις δυνάμεις που μπορεί να δέχεται ένα ζύγωθρο έχει αποδηχθεί ότι, τα ζύγωθρα για τις βαλβίδες εξαγωγής δέχονται μεγαλύτερες δυνάμεις σε σχέση με αυτά των βαλβιδών εισαγωγής αλλά, πρακτικά για λόγους ευκολίας στη παραγωγή τους είναι φτιαγμένα με το ίδιο υλικό [4].



**Εικόνα 1-2 Διάταξη μηχανισμού κεφαλής κινητήρα**

Σημαντικός παράγοντας ο οποίος προκύπτει από τη λειτουργία του ζύγωθρου είναι η αναλογία ανύψωσης (Rocker Ratio). Ο λόγος αυτός προσδιορίζεται από την απόσταση του κέντρου περιστροφής μέχρι το στέλεχος της βαλβίδας ως προς την απόσταση από το κέντρο περιστροφής μέχρι το σημείο επαφής με τον διωστήρα ή την κάμα [5].



**Εικόνα 1-3**

**X= Απόσταση κέντρου περιστροφής από το διωστήρα,  
Y= Απόσταση κέντρου περιστροφής από το στέλεχος της βαλβίδας**

Πρακτικά η αναλογία αυτή μας περιγράφει την βύθιση της βαλβίδας σε σχέση με την ανύψωση του διωστήρα από την κάμα. Για παράδειγμα, σε ένα κινητήρα όπου χρησιμοποιεί ζύγωθρα με αναλογία 1.5, αν υποθέσουμε ότι η κάμα του εκκεντροφόρου ανυψώνει κατά Α χιλιοστά το εξωτερικό μέρος του ζύγοθρου τότε, η βύθιση που θα προκαλεί η εσωτερική μερία στην βαλβίδα θα δίνεται από το γινόμενο  $A \cdot 1.5$ . Επομένως για αύξηση της αναλογίας αυτής, με την συγκεκριμένη ανύψωση της κάμας του εκκεντροφόρου, συμπεραίνουμε ότι αυξάνεται η βύθιση της βαλβίδας, αυξάνοντας έτσι την δυνατότητα εισαγωγής περισσότερου αέρα στον θάλαμο καύσης και αντίστοιχα αυξάνει την δυνατότητα αποβολής των καυσαερίων από το θάλαμο.

### 1.3 Υλικά κατασκευής

Με το πέρασμα των χρόνων οι ερευνητές ψάχνουν όλο ένα και περισσότερα υλικά τα οποία θα μειώσουν το βάρος και το θόρυβο αλλά και να έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε δυναμικές καταπονήσεις, με σκοπό την πιο αποτελεσματική λειτουργία. Στην περίπτωση μας, για την κατασκευή ενός ζύγοθρου αναζητούμε υλικά με χαμηλό βάρος, υψηλή αντοχή, χαμηλό κόστος και καλή θερμική αγωγιμότητα. Έτσι τα πιο δημοφιλή υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή είναι ο χάλυβας, είτε σφυρηλατημένος είτε ανοξείδωτος, το αλουμίνιο ενώ έρευνες έχουν μελετήσει την χρήση κραμάτων και συνθετικών υλικών [3].

Πιο συγκεκριμένα για την χρήση συνθετικών υλικών για την παραγωγή ζύγοθρων, βιβλιογραφία μελετά την χρήση HMCF/ High Modulus Carbon Fiber [3]. Πρόκειται για ένα υλικό ευρέως γνωστό, ως το πιο ελαφρύ υλικό ικανό να χρησιμεύσει σαν εναλλακτική λύση στα συμβατικά μέταλλα, με κύρια χαρακτηρίστηκα το υψηλό μετρό ελαστικότητας και την ειδική αντοχή σε εφελκυσμό [6].

Επίσης, έρευνες έχουν δείξει και την αξιοποίηση υλικού HDPE/High Density Polyethylene ενισχυμένο με ίνες γυαλιού [7]. Η παραγωγή αυτή συνδυάζει τόσο την απαιτούμενη απόδοση όσο και την οικονομική αποδοτικότητα τόσο των ινών όσο και των θερμοπλαστικών. Με την χρήση του συγκεκριμένου συνθετικού να είναι ευρέως γνωστή σε διάφορες εφαρμογές μηχανικής, αεροναυπηγικής λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, όπως η υψηλή ειδική αντοχή και άλλες μηχανικές ιδιότητες μαζί με την ευκολία κατασκευής [8].

### 1.4 Κατηγοριοποίηση ζύγοθρων

Ο σχεδιασμός ενός ζύγοθρου διαφοροποιείται ανάλογα με τις απαιτήσεις που δημιουργούνται. Για παράδειγμα, διαφοροποίηση παρατηρείται για κάθε τύπο οχήματος, όπως τα μηχανάκια, τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και ούτω κάθε εξής. Επίσης, εξαρτάται και από τον τύπο του κινητήρα εσωτερικής καύσης, δηλαδή εάν ο κινητήρας λειτουργεί με διωστήρα ή εάν ο εκκεντροφόρος εδράζεται στην κεφαλή του κινητήρα [9]. Οι διάφορες κατηγορίες χωρίζονται ως εξής:

1. **Stamped Steel Rocker arms:** Αποτελούν τον πιο κοινό τύπο παραγωγής για όλα τα ζύγωθρα, με την κατασκευή τους να είναι εύκολη και

οικονομική καθώς παράγονται από ένα κομμάτι μέταλλο. Για την λειτουργία τους εδράζονται πάνω σε άξονα ενεργοποίησης και συγκρατούνται στη θέση τους με παξιμάδι που έχει στρογγυλεμένο το κάτω μέρος [9].



*Εικόνα 1-4 Stamped Steel Rocker arm*

- 2. Roller Tipped Rocker arms:** Αποτελεί μία ελαφρώς διαφορετική εκδοχή του Stamped steel rocker arm. Η διαφορά εντοπίζεται στο σημείο επαφής του ζυγώθρου με το στέλεχος βαλβίδας όπου και εδράζεται ένα ρουλεμάν, με αποτέλεσμα να μειώνει την τριβή καθώς και την φθορά στο άκρο της βαλβίδας. Για την έδρασή του, το συγκεκριμένο ζύγωθρο, εξακολουθεί να χρησιμοποιεί παξιμάδι για την περιστροφή. Τέλος, συγκεκριμένου τύπου ζύγωθρα μπορούν να παραχθούν είτε με χύτευση είτε με μηχανική κατεργασία από χάλυβα ή αλουμίνιο [9].



*Εικόνα 1-5 Roller Tipped Rocker arm*

- 3. Full Roller Rocker arms:** Συγκεκριμένου τύπου ζύγωθρα προκύπτουν από μηχανικές κατεργασίες και κατασκευάζονται είτε από αλουμίνιο είτε από χάλυβα. Εδράζονται πάλι σε άξονα ενεργοποίησης αλλά για την περιστροφή του χρησιμοποιούν ρουλεμάν. Πιο αναλυτικά, εξοπλίζονται με έναν μικρό άξονα ο οποίος διαθέτει στα δύο άκρα του ρουλεμάν (εντός του ζύγωθρου), τα οποία του επιτρέπουν να περιστρέφεται [9].



*Εικόνα 1-6 Full Roller Rocker arm*

4. **Shaft Rocker arms:** Τα ζύγωθρα αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από Foul roller ζύγωθρα, τα οποία εδράζονται σε άξονα ανά δυο και σε άλλες περιπτώσεις ο άξονας διέρχεται από όλα τα ζύγωθρα, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής της κεφαλής. Η τοποθέτηση του άξονα σε σχέση με τον άξονα ενεργοποίησης είναι ότι προσδίδει μεγαλύτερη ακαμψία, καθώς μειώνει την πιθανότητα ανεξέλεγκτης κίνησης των ζύγωθρων σε υψηλές στροφές του κινητήρα [9].



*Εικόνα 1-7 Shaft Rocker arms*

5. **Center Pivot Rocker arms:** Η διαφορά με τους υπόλοιπους τύπους είναι ότι στον συγκεκριμένο τύπο δεν χρησιμοποιείται διωστήρας αλλά, ο εκκεντροφόρος έχει εγκατασταθεί στην κεφαλή του κινητήρα, με αποτέλεσμα να ασκεί δύναμη στο εξωτερικό μέρος του ζύγωθρου έτσι ώστε να ανοίξει την βαλβίδα [9].
6. **End Pivot (Finger Follower) Rocker arms:** Στην συγκεκριμένη κατηγορία, το σημείο περιστροφής του ζύγωθρου βρίσκεται στην άκρη του, με αποτέλεσμα ο εκκεντροφόρος να ασκεί πίεση στο κέντρο το αντικειμένου ωθώντας να μετακινηθεί κατακόρυφα [9].

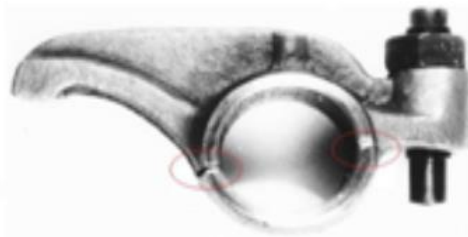


*Εικόνα 1-8 End Pivot (Finger Follower) Rocker arm*

## 1.5 Αστοχίες κατά την λειτουργία

Με το πέρασμα των χρόνων οι μηχανικοί σχεδίασης έχουν μελετήσει και βελτιώσει τη λειτουργία των ζύγων. Για να φτάσει όμως στο σημείο που της εξέλιξης που βρίσκεται τώρα, πρέπει να γνωρίζουμε τις αιτίες που προκάλεσαν τις δυσλειτουργίες, οι αιτίες αυτές αναφέρονται παρακάτω:

1. **Θραύση στο τοίχωμα της οπής:** Η κόπωση σε πολλαπλά σημεία θεωρείται ένας από τους κύριους μηχανισμούς αποτυχίας. Αποτέλεσμα της ανάπτυξης αυτών των ρωγμών είναι η χαμηλή αντοχή σε κόπωση από μία μικροδομή [10].



*Εικόνα 1-9 Φθορά στο κεντρικό σημείο περιστροφής*

2. **Θραύση στο λαιμό του ζύγων:** Η ζημία προκλήθηκε σε ζύγω το οποίο είναι κατασκευασμένο με την μέθοδο χύτευση σε μήτρα από χυτό κράματος αλουμινίου. Το πορώδες του αερίου που εισαγόταν κατά την διαδικασία της χύτευσης οδηγούσε σε πρόωρη ρωγμή κόπωσης και κατά συνέπεια θραύση του ζύγου [10].



*Εικόνα 1-10 Θραύση στο λαιμό του ζύγου*

3. **Αστοχία του ζύγωθρου που προκαλείται από φορτίο κάμψης:** Τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα υπολογιστικής μηχανικής, για την οριακή συνθήκη αστοχίας που αντλήθηκαν από την ορθογώνια διάταξη, έδειχναν ότι οι μέγιστες και ελάχιστες τάσεις ήταν 711 MPa και 161 MPa αντίστοιχα, με την διαφορά των τάσεων να είναι  $\Delta\sigma$  550 MPa. Η διαφορά των τάσεων που προέκυψε από την σχέση των μεταξύ της απόστασης των ραβδώσεων και του εύρους του παράγοντα έντασης τάσης ήταν 592,42 MPa. Η οριακή συνθήκη αστοχίας που εκτιμήθηκε με την χρήση της μεθόδου ANOVA, έδειξε ότι το σχετικό σφάλμα μεταξύ των περιοχών τάσεων που προέκυψε από την απόσταση των ραβδώσεων και των τιμών των τάσεων από το πρόγραμμα υπολογιστικής μηχανικής βρισκόταν εντός κατά 7%. Δεδομένο που αποδικνύει ότι η αστοχία προκλήθηκε από το φορτίο κάμψης [10].
4. **Αστοχία κόπωσης του άξονα του ζύγωθρου:** Η ρωγμή κόπωσης στον άξονα του ζύγωθρου ξεκίνησε από τη διαμπερή οπή και στη συνέχεια διαδόθηκε κατά μήκος του πλευρικού τοιχώματος του. Εάν ο άξονας του ζύγωθρου λειτουργεί υπό πραγματική οριακή συνθήκη αστοχίας, ο αριθμός των κύκλων μέχρι τη θραύση αναμένεται να είναι μικρότερος από 129.650 κύκλους. Η μέγιστη τάση που μετράτε στην περιοχή αστοχίας κάτω από την πιο επικίνδυνη οριακή συνθήκη αστοχίας του άξονα του ζύγωθρου μεταξύ κάθε συνθήκης φόρτωσης είναι 221,2 MPa, η οποία υπερβαίνει το όριο κόπωσης των 206 MPa και ως αποτέλεσμα ο άξονας με αυτήν την οριακή συνθήκη έχει πεπερασμένη διάρκεια ζωής κόπωσης [10].
5. **Συσσώρευση άνθρακα στην άκρη του στελέχους βαλβίδας:** Η φθορά του οδηγού βαλβίδας εμφανίζεται στην εσωτερική διάμετρο του οδηγού βαλβίδας σε ευθεία γραμμή με την κεντρική γραμμή του ζύγωθρου [10].
6. **Αστοχία λόγω τριβής:** Η συνεχής αλληλεπίδραση με το στέλεχος της βαλβίδας και τη ράβδο ώθησης προκαλούν τριβή καθώς έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και αυτό έχει ως αποτέλεσμα φθινό σχηματισμό [10].



## 2. Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης για προσθετική κατασκευή

### 2.1 Τοπολογική βελτιστοποίηση

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Η θεωρία και οι μέθοδοι βελτιστοποίησης [11] έχουν εφαρμοστεί σε ποικίλους τομείς για να αντιμετωπίσουν διάφορα πρακτικά ζητήματα, με πολλές προσεγγίσεις να έχουν προταθεί για τα την επίλυση προβλημάτων δομικής βελτιστοποίησης.

Σημαντικός παράγοντας για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, είναι η πρόοδος των λογισμικών υπολογιστικής μηχανικής [12], με την χρήση αριθμητικών μεθόδων, για την προσέγγιση προβλημάτων μηχανικής. Έχουν οδηγήσει στην αυξημένη χρήση τους για την προσέγγιση βελτιστοποιημένων δομών σε πραγματικές εφαρμογές. Η σημαντική αυτή ανάπτυξη των υπολογιστών στις μέρες μας, προσφέρει την δυνατότητα εξέτασης περίπλοκων δομών, βοηθώντας κατά αυτόν τον τρόπο να επιλυθούν προβλήματα μεγαλύτερου όγκου.

Η δομική βελτιστοποίηση αποτελεί εργαλείο ανάπτυξης μηχανικών προϊόντων αλλά και συμβάλει στη φάση σχεδιασμού κατασκευών ή μηχανολογικών εξαρτημάτων. Χρησιμοποιώντας ως παράγοντα τις δυναμικές φορτίσεις που δέχονται οι κατασκευές ή τα μηχανολογικά εξαρτήματα, τον όγκο που καταλαμβάνουν αλλά και τις δομές στήριξης αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης για την κατανομή του υλικού εντός του προκαθορισμένου όγκου σχεδίασης [12]. Παρακάτω γίνεται διάκριση των μεθόδων βελτιστοποίησης:

- **Βελτιστοποίηση μεγέθους:** Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πιο απλή μορφή της δομικής βελτιστοποίησης, κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι η δομή της κατασκευής θεωρείται ως δεδομένο και ο προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε την κατασκευή προσαρμόζονται τα μεγέθη των εξαρτημάτων, όπου και θεωρούνται μεταβλητές (π.χ. το πάχος και η διάμετρος της ράβδου, το εμβαδό διατομής μιας δοκού) [13].
- **Βελτιστοποίηση σχήματος:** Κατά την εφαρμογή της μεθόδου στόχος είναι ο καθορισμός ενός βέλτιστου σχήματος σε ήδη υπάρχουσα δομή [12]. Πιο αναλυτικά, όπως και στη βελτιστοποίηση μεγέθους, η τοπολογία της δομής είναι ήδη γνωστή ενώ, τα δομικά μέρη που ενδέχεται να βελτιστοποιηθούν μπορεί να είναι, η κατανομή του πάχους κατά μήκος των δομικών μελών, η διάμετρος των οπών ή ακόμα και οι ακτίνες καμπυλότητας μεταβατικών περιοχών κόψεων [13].



- **Τοπολογική βελτιστοποίηση:** Η τοπολογική βελτιστοποίηση [14] αποτελεί την πιο γενική μέθοδο δομικής βελτιστοποίησης και πιθανόν την πιο δύσκολη από τις τρεις μεθόδους. Συνήθως αποτελεί ένα αρχικό στάδιο για τον σχεδιασμό ενός αντικειμένου. Πρόκειται για μια μαθηματική μέθοδο όπου, βασικός σκοπός της είναι να γίνει βέλτιστη ανακατανομή του υλικού εντός ενός προκαθορισμένου σχεδίου, με αποτέλεσμα η δομή που θα προκύψει να μπορεί να αντέξει δυναμικά φορτία ικανοποιώντας παράλληλα τις οριακές συνθήκες [13].

Η παρούσα διπλωματική, εξετάζει την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης για την χρήση ενός ζυγώθρου, ικανοποιώντας κανόνες σχεδίασης για προσθετική κατασκευή (Design for Additive Manufacturing/DfAM) με αποτέλεσμα την παραγωγή του αντικειμένου με την μέθοδο εκτύπωσης Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Εστιάζοντας περαιτέρω στην συμβολή της τοπολογικής βελτιστοποίησης, παρατηρούμε ότι προσδίδει σημαντικά οφέλη στην παραγωγή προϊόντων [15]. Ένα από τα οφέλη είναι η δημιουργία ελαφριών δομών, το οποίο οδηγεί στο αμέσως επόμενο βήμα, την εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων υλικού, λόγω της στοχευμένης μείωσης του όγκου των μηχανολογικών εξαρτημάτων. Επίσης δημιουργούνται σχέδια έτοιμα για την κατασκευή, τα οποία δεν απαιτούν υποχρεωτικά την επιπλέον χρήση φυσικής δοκιμής τους, καθώς τα αντικείμενα έχουν ελεγχθεί με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι υλοποίησης της τοπολογικής βελτιστοποίησης, με αυτούς να διακρίνονται στις εξής μεθόδους:

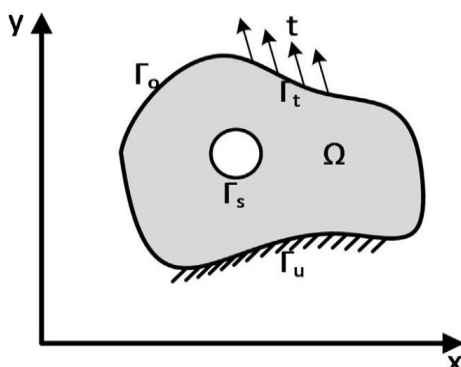
- Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP)
- Level Set Method
- Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO)

Η τοπολογική βελτιστοποίηση και η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing-AM) μπορούν να συνδυαστούν αποδοτικά, προσδίδοντας στο έπακρο τις δυνατότητές τους, προκειμένου να επιτρέψουν ευρείες προοπτικές εφαρμογής στη σύγχρονη κατασκευή [12].

### 2.1.2 Μοντελοποίηση προβλήματος τοπολογική βελτιστοποίησης

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η τοπολογική βελτιστοποίηση ερευνά την βέλτιστη κατανομή υλικού σε έναν προσχεδιασμένο χώρο. Κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος οι δοσμένες παράμετροι είναι ο χώρος  $\Omega$ , όπου και θα δημιουργηθεί το βελτιστοποιημένο αντικείμενο, οι οριακές συνθήκες  $\Gamma$  και οι συνθήκες φόρτωσης  $L$  (βλέπε Εικόνα 2-1). Επομένως εφόσον έχουν βρεθεί οι αρχικές συνθήκες, μένει να επιλυθεί το πρόβλημα της σωστής κατανομής υλικού, εντός του προσχεδιασμένου χώρου  $\Omega$ . Το πρόβλημα της τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να επιλυθεί αξιοποιώντας μεθόδους κατανομής υλικού για να βρεθεί μία βέλτιστη δομή ενός αντικειμένου όμως, το μείζον ζήτημα του προβλήματος είναι η βέλτιστη κατανομή του βάρους εντός του προσχεδιασμένου

χωρίου  $\Omega$  τηρώντας το κριτήριο της συμμόρφωσης. Ο έλεγχος της κατανομής του υλικού γίνεται μέσω τιμών πυκνότητας οι οποίες κατανέμονται μέσα στο προσχεδιασμένο χωρίο [16].



Εικόνα 2-1 Γενική μορφή σχεδιαστικού προβλήματος εύρεσης κατανομής υλικού

### 2.1.3 Solid Isotropic Material with Penalization/SIMP Method

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την επίλυση του προβλήματος κατανομής υλικού εφαρμόζεται η μέθοδος SIMP. Η οποία αποτελεί μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδο όπου διατυπώθηκε πρώτη φορά το 1989 από τον Bendsoe.

Για την εύρεση της νέας τοπολογίας του μηχανολογικού εξαρτήματος, θα πρέπει να βρεθεί η νέα βέλτιστη κατανομή ιστροπικού υλικού, όπου θα καθοριστούν περιοχές στις οποίες θα εναποθετηθεί υλικό και ποιες περιοχές θα παραμείνουν κενές. Για την προσέγγιση της συγκεκριμένης επίλυσης, χρησιμοποιείται η αντικατάσταση των ακέραιων μεταβλητών με συνεχείς μεταβλητές καθώς και η εφαρμογή κάποιας μορφής ποινής που κατευθύνει τις λύσεις σε διακριτές τιμές 0-1.

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E_{ijkl}^0, p > 1, \quad [1]$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V, 0 \leq \rho(x) \leq 1, x \in \Omega \quad [2]$$

Στις εξισώσεις [1], [2] απεικονίζονται τα εξής:

- $\rho(x)$ : Απεικονίζει την συνάρτηση πυκνότητας ως συνάρτηση σχεδιασμού
- $E_{ijkl}^0$ : Απεικονίζει τις ιδιότητες του συγκεκριμένου ιστροπικού υλικού
- $p$ : Παράγοντας τιμωρίας

Η συνάρτηση της πυκνότητας παρεμβάλλεται μεταξύ των ιδιοτήτων του υλικού 0 και  $E_{ijkl}^0$  δεδομένο που σημαίνει ότι, στον τελικό καθορισμό της πυκνότητας τα σημεία θα δέχονται τιμές 0 και 1, δημιουργώντας ένα ασπρόμαυρο φυσικό μοντέλο. Κατά την εκτέλεση της μεθόδου SIMP επιλέγεται ο παράγοντας τιμωρίας  $p > 1$ , έτσι ώστε οι ενδιάμεσες πυκνότητες να θεωρούνται δυσμενής δηλαδή, ότι η ακαμψία που προκύπτει είναι μικρή συγκριτικά με το κόστος του υλικού. Ωστόσο, για την λήψη

ορθότερων σχεδίων απεικόνισης 0 και 1 απαιτείται συντελεστής  $p=3$ , στις περιπτώσεις όπου ο περιορισμός όγκου είναι ενεργός.

Κλείνοντας, η μέθοδος SIMP επιτρέπει την μετατροπή του βέλτιστου τοπολογικά προβλήματος σε ένα πρόβλημα διαστασιολόγησης εντός ενός σταθερού πεδίου. Η παρούσα μέθοδος διαφέρει σε σύγκριση με τα περισσότερα προβλήματα διαστασιολόγησης καθώς, ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού είναι συνήθως αρκετά μεγάλος, με τον αριθμό των παραμέτρων σχεδίασης και τον αριθμό των αναλύσεων να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Επομένως, η αποδοτικότητα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης είναι κρίσιμη και είναι απαραίτητο να υιοθετηθούν ρυθμίσεις βελτιστοποίησης όπου ανταλλάσσουν τον αριθμό των περιορισμών με τον αριθμό των μεταβλητών σχεδιασμού, ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας είναι το πρόβλημα σχεδιασμού συμμόρφωσης. Σε αυτού του είδους το πρόβλημα επεξεργάζονται πολλές μεταβλητές, καθώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει μόνο ένα περιορισμό, εκτός από τους απλούς περιορισμούς πλαισίου, όπου προκύπτουν το ανώτερο και κατώτερο όριο στην μεταβλητή πυκνότητας [17].

## 2.2 Επίλυση προβλήματος τοπολογικής βελτιστοποίησης

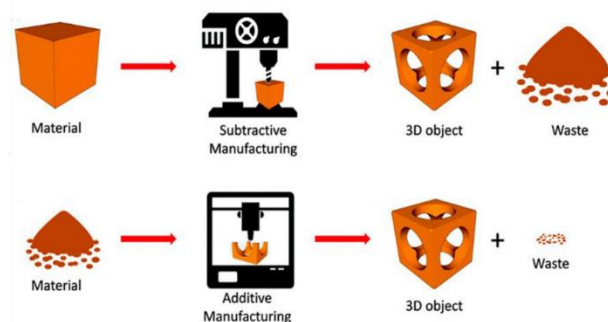
Ο καθορισμός της νέας βέλτιστης τοπολογίας αποτελεί αποτέλεσμα των μεθόδων κατανομής υλικού, οι οποίες στηρίζονται σε αριθμητικό υπολογισμό, της συνολικής κατανομής της πυκνότητας υλικού εντός του προκαθορισμένου χωρίου. Για την μέθοδο SIMP η οποία τιμωρεί τις ενδιαμέσες πυκνότητες, πρωταρχικός σκοπός της είναι η απεικόνιση της βελτιστοποιημένη τοπολογίας σε 0 και 1. Όμως για την εύρεση του σωστού αποτελέσματος κατανομής της νέας τοπολογίας είναι σημαντικό το κριτήριο παρεμβολής να εκτελεί τα παρακάτω βήματα [17].

1. Προκαθορισμός της γεωμετρίας και των συνθηκών φορτίσεως του αντικειμένου: Σε αρχικό στάδιο πρέπει γίνει η εισαγωγή του προκαθορισμένου σχεδίου όπου και εφαρμόζονται οι δυνάμεις, οι στηρίξεις, καθώς και χωρία κενών και μη περιοχών. Μέσω αυτών των αρχικών δεδομένων προκύπτουν οι περιοχές οι οποίες θα πρέπει να μείνουν κενές ή συμπαγείς. Στην συνέχεια θα πρέπει να κατασκευαστεί πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, για το προκαθορισμένο σχέδιο, με αρκετά μικρό μέγεθος στοιχείων, έτσι ώστε το πλέγμα να περιγράφει με ακρίβεια τις περιοχές των δεδομένων φόρτισης και στήριξης αλλά και για να αποδώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα του βελτιστοποιημένου χωρίου. Το πλέγμα θα πρέπει να παραμένει αμετάβλητο καθ' όλη τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.
2. Βελτιστοποίηση: Σε αυτό το σημείο, πραγματοποιείται η εύρεση της βέλτιστης κατανομής, της σχεδιαστικής μεταβλητής πυκνότητας  $\rho$ , εντός του προκαθορισμένου χωρίου. Η επίλυση είναι βασισμένη σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με το κριτήριο βελτιστοποίησης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:
  - Ορίζετε αρχικό σχέδιο με την χρήση ομοιογενής κατανομής υλικού. Υλοποιείται η έναρξη του βρόγχου.
  - Για την συγκεκριμένη κατανομή της πυκνότητας, υπολογίζονται η μετατόπιση και η παραμόρφωση με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

- Σε αυτό το βήμα υπολογίζεται η συμμόρφωση. Σε περίπτωση οριακής βελτίωσης της συμμόρφωσης, συγκριτικά με το τελευταίο σχέδιο, σταματάει ο βρόγχος, αλλιώς συνεχίζει. Για μελέτες όπου απαιτείται λεπτομερή εξέταση, ο βρόγχος σταματάει όταν πληρούνται οι απαραίτητες συνθήκες βελτιστοποίησης.
  - Υπολογίζονται οι νέες τιμές της μεταβλητής της πυκνότητας. Σε αυτό το βήμα υπάρχει ένας ακόμα εσωτερικός βρόγχος επανάληψης για την εύρεση της τιμής του συντελεστή Lagrange  $\lambda$  για τον περιορισμό όγκου.
3. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων: Σε αυτό το τελικό στάδιο γίνεται η ερμηνεία της κατανομής του υλικού από την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης, μέσω της αναπαράστασης από το μοντέλο CAD. Σημαντικό είναι να έχει καθοριστεί, ποιο είναι το σχήμα παρεμβολής (στην περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης είναι η μέθοδος SIMP). Η μέθοδος SIMP, αξιοποιώντας υψηλή τιμή τιμωρίας  $p$  αποδίδει πολύ καλά αποτελέσματα και μπορεί να εφαρμόσει τύπο πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

## 2.3 Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης κατά την προσθετική κατασκευή.

Στις μέρες μας η προσθετική κατασκευή, ή αλλιώς Additive Manufacturing (AM), εισάγεται όλο ένα και περισσότερο σε βιομηχανικές μονάδες. Ευρέως γνωστή για τον πρωτότυπο τρόπο κατασκευής, εναποθέτοντας υλικό σε στρώσεις, αλλά και για τις σχεδιαστικές δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει, καθώς αποδίδει μεγάλη ανεξαρτησία στους μηχανικούς σχεδίασης. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να αποφέρει πολύπλοκα σχήματα, εσωτερικές δομές όπου βοηθούν στην εξοικονόμηση υλικού καθώς και την δυνατότητα εκτύπωσης ολοκληρωμένων συναρμολογήσεων [15].

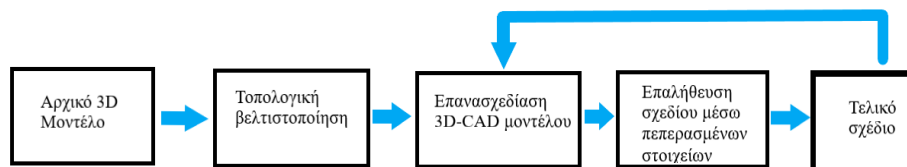


**Εικόνα 2-2 Συσχέτιση συμβατικής μεθόδου κατεργασίας και προσθετικής κατασκευής**

Η τοπολογική βελτιστοποίηση, παρόλο που έχει αναπτυχθεί εδώ και πολύ καιρό, δεν ωφελούσε επαρκώς λόγω των κατασκευαστικών περιορισμών που εφαρμόζονταν από τις υπάρχουσες τεχνικές κατασκευής [15]. Έτσι ο συνδυασμός της τοπολογικής βελτιστοποίησης με την προσθετική κατασκευή μπορούν να αποδώσουν σημαντικά χαρακτηριστικά στην κατασκευή πρωτοτύπων [12], κάποια από αυτά αναφέρονται παρακάτω:

- Ελευθερία στην σχεδίαση, καθώς περιπλοκές γεωμετρίες μπορούν να επιτευχθούν με την τοπολογική βελτιστοποίηση, οι οποίες ήταν πολύ δύσκολο να παραχθούν με τις συμβατικές μεθόδους.
- Κατασκευή στιβαρών δομών με την ανίχνευση της κατανομής εντός του αρχικού σχεδίου. Η ανίχνευση της κατανομής πραγματοποιείται με την χρήση αλγορίθμων τοπολογικής βελτιστοποίησης.
- Η τοπολογική βελτιστοποίηση μπορεί να συμβάλει στην επανασχεδίαση ενός υπάρχοντος προϊόντος με μειωμένο βάρος [15].

Προκειμένου να φτάσουμε στο σημείο όπου θα υπάρχει το βελτιστοποιημένο αντικείμενο έτοιμο για εκτύπωση πρέπει να ακολουθηθεί μια σχεδιαστική διαδικασία (Εικόνα 2-3). Για την κατασκευή του αρχικού μοντέλου πρέπει μέσω λογισμικού CAD να κατασκευαστεί ένα 3D μοντέλο και στην συνέχεια, θα γίνει ανάλυση των δυνάμεων των οποίων δέχεται, έτσι ώστε να βρεθεί η κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων στο αντικείμενο. Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται η τοπολογική βελτιστοποίηση. Με βάση την κατανομή των τάσεων και τις μετατοπίσεις, αφαιρεί υλικό από περιοχές οι οποίες δεν συμβάλουν δομικά στην κατανομή των τάσεων στο εξάρτημα. Το τρισδιάστατο μοντέλο που θα προκύψει, θα χρειαστεί κάποιες διαδικασίες λείανσης, των επιφανειών όπου αφαιρέθηκε υλικό. Έτσι το μοντέλο που έχει προκύψει επαληθεύεται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων όπου και πραγματοποιείται έλεγχος για την ικανοποίηση των σχεδιαστικών απαιτήσεων. Σε περίπτωση όπου το καινούργιο μοντέλο δεν πληροί τα κριτήρια για την ικανοποίηση των σχεδιαστικών απαιτήσεων ξανά γίνεται μελέτη επαλήθευσης.



**Εικόνα 2-3 Σχεδιασμός τοπολογικής βελτιστοποίησης**

Τα παραπάνω βήματα εφαρμόστηκαν και στην παρούσα διπλωματική εργασία για την μελέτη και επανασχεδίαση ενός ζυγώθρου (εξαρτήματος κεφαλής κινητήρα εσωτερικής καύσης).

Η τοπολογική βελτιστοποίηση συμβάλει ιδιαίτερα σε δύο περιπτώσεις, στην ανάπτυξη νέων αντικειμένων ή στον επανασχεδιασμό ενός υπάρχοντος αντικειμένου, με σκοπό την δημιουργία μίας ελαφριάς δομής η οποία θα διατηρεί τις λειτουργικές της απαιτήσεις, αξιοποιώντας ταυτόχρονα τις τεχνικές της προσθετικής κατασκευής επιτυγχάνοντας πολύπλοκες δομές. Αρκετές βιβλιογραφίες εστιάζουν στην επανασχεδίαση ενός εξαρτήματος, όπως για παράδειγμα συνδέσμους [18]–[20], με αξιοσημείωτη την μείωση του βάρους που έχει επιτευχθεί. Για παράδειγμα, αναλύθηκε ένας σύνδεσμος ποδηλάτου [20], ο οποίος συνέδεε το πίσω μέρος του σκελετού με την ανάρτηση. Η μελέτη έδειξε μείωση του βάρους άνω του 50% με αρχικό βάρος 410 gr. και τελικό 180 gr με τη μέγιστη τάση που δέχεται το εξάρτημα να ανέρχεται στα 80 MPa, όπου συγκριτικά με το όριο διαρροής να είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

## 2.4 Design for Additive Manufacturing

Οι δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής δεν παύουν να είναι μοναδικές και να βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως στην αεροναυπηγική [21], κατασκευάζοντας εξαρτήματα χαμηλού βάρους και ταυτόχρονα να πληρούν τις δομικές απαιτήσεις, καθώς και στην κατασκευή μοσχευμάτων για ιατρικούς λόγους [22].

Αυτή η ανάπτυξη δεν αποτελεί όμως τον κανόνα για τους περισσότερους σχεδιαστές καθώς, αρκετοί είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής ή ακόμα δεν διαθέτουν τα κατάλληλα εργαλεία σχεδίασης έτσι ώστε να αξιοποιούν τις δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής [23]. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν κάποιοι σχεδιαστικοί κανόνες, Design for additive manufacturing (DfAM). Πιο συγκεκριμένα αποτελούν μία μέθοδο η οποία, βελτιστοποιεί την μορφή και την λειτουργία ενός εξαρτήματος ή ακόμα και μίας συναρμολόγησης για την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των διαδικασιών της παραγωγής προσθέτων. Για να πραγματοποιηθούν αυτοί οι στόχοι, θα πρέπει να διατηρούνται κάποιες κατευθυντήριες γραμμές όταν σχεδιάζονται νέα ή υπάρχοντα προϊόντα [24]:

- Η κατασκευή προσθέτων επιτρέπει τη χρήση σύνθετων γεωμετριών για την επίτευξη στόχων σχεδιασμού χωρίς να αυξάνεται ο χρόνος κατασκευής ή το κόστος σε σύγκριση με την απλή γεωμετρία.
- Η κατασκευή προσθέτων επιτρέπει τη χρήση προσαρμοσμένης γεωμετρίας και εξαρτημάτων με άμεση παραγωγή από τρισδιάστατο εκτυπωτή.
- Η κατασκευή προσθέτων προσφέρει την δυνατότητα ενοποίησης εξαρτημάτων, κατασκευάζοντας περίπλοκα μέρη με ενσωματωμένα χαρακτηριστικά αποφεύγοντας τα προβλήματα συναρμολόγησης (Εικόνα 2-4).
- Η κατασκευή προσθέτων επιτρέπει στους σχεδιαστές να αγνοούν όλους τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τις συμβατικές διαδικασίες παραγωγής.

Με άλλα λόγια σκοπός των σχεδιαστών μέσω του DfAM είναι η βελτιστοποίηση της διαδικασίας της ανάπτυξης ενός προϊόντος αξιοποιώντας πλήρως τις δυνατότητες της κατασκευής προσθέτων.

## 3. Μοντελοποίηση και μελέτη ζυγώθρου.

### 3.1 Μοντελοποίηση με την χρήση Autodesk Inventor.

#### 3.1.1 Εισαγωγή στο Autodesk Inventor

Στον τομέα της 3Δ σχεδίασης και της μηχανικής το πρόγραμμα Inventor της Autodesk αποτελεί μία εξαιρετική λύση για την σχεδίαση εξαρτημάτων και συναρμολογήσεων.

Το Autodesk Inventor το οποίο αναπτύχθηκε από την Autodesk Inc., έκανε για πρώτη φορά την εμφάνισή του το 1999, εμβαθύνοντας ιδιαίτερα στην ψηφιακή προτυποποίηση και την παραμετρική σχεδίαση. Φτάνοντας στο σήμερα το πρόγραμμα έχει δεχθεί σπουδαία αναβάθμιση ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες και βελτιώσεις με στόχο την διαρκή ανάπτυξη, καλύπτοντας τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των μηχανικών σχεδίασης.

Στα βασικά του χαρακτηριστικά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η παραμετρική σχεδίαση όπου, οι διαστάσεις στο 3Δ μοντέλο ελέγχονται από παραμέτρους με αποτέλεσμα αν αλλάξει η τιμή της μίας διάστασης να αλλάζει και το τελικό μοντέλο, καθώς και σχεδίαση λαμαρινών προσδίδοντας μεγαλύτερη ακρίβεια δημιουργώντας πολύπλοκα σχέδια. Εξίσου σημαντικό εργαλείο είναι και η κατασκευή συναρμολογήσεων, όπου οι σχεδιαστές μπορούν να έχουν μία πρώτη επαφή με τις αλληλεπιδράσεις των εξαρτημάτων μεταξύ τους αλλά και τους περιορισμούς που μπορεί να προκύπτουν κατά την λειτουργία τους προσομοιώνοντας τις κινήσεις που πραγματοποιούν τα εξαρτήματα. Το Autodesk Inventor προσφέρει ένα ακόμα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης και ανάλυσης βασιζόμενο σε πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιώνοντας τα φορτία που δέχεται ένα 3Δ μοντέλο, προσφέροντας δεδομένα για στατική ανάλυση και μηχανική απόδοση.

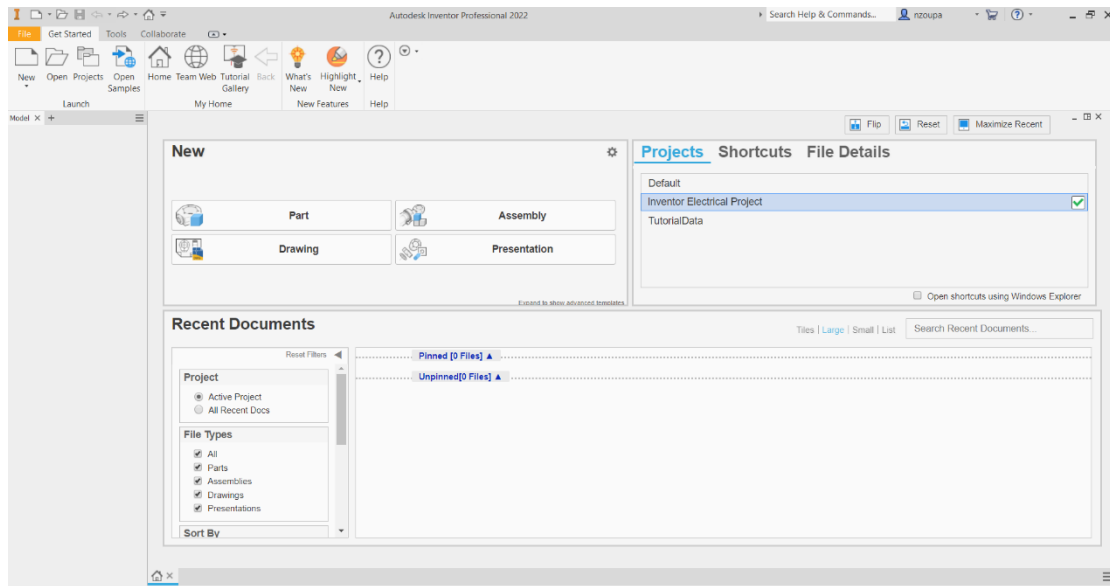
#### 3.1.2 Μοντελοποίηση ζυγώθρου

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας πρωταρχικός στόχος είναι η ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιώντας το Autodesk Inventor. Βασικός στόχος είναι η κατασκευή ενός μοντέλου που θα διαθέτει μεγάλο όγκο κατασκευής προκειμένου να αφαιρεθεί περίσσεια υλικού κατά την τοπολογική βελτιστοποίηση, προκειμένου να αυξηθεί η δομική απόδοση του εξαρτήματος.

Ανοίγοντας το Autodesk Inventor βρισκόμαστε στο αρχική οθόνη του λογισμικού (Εικόνα 3-1) όπου και υπάρχουν οι εξής επιλογές:

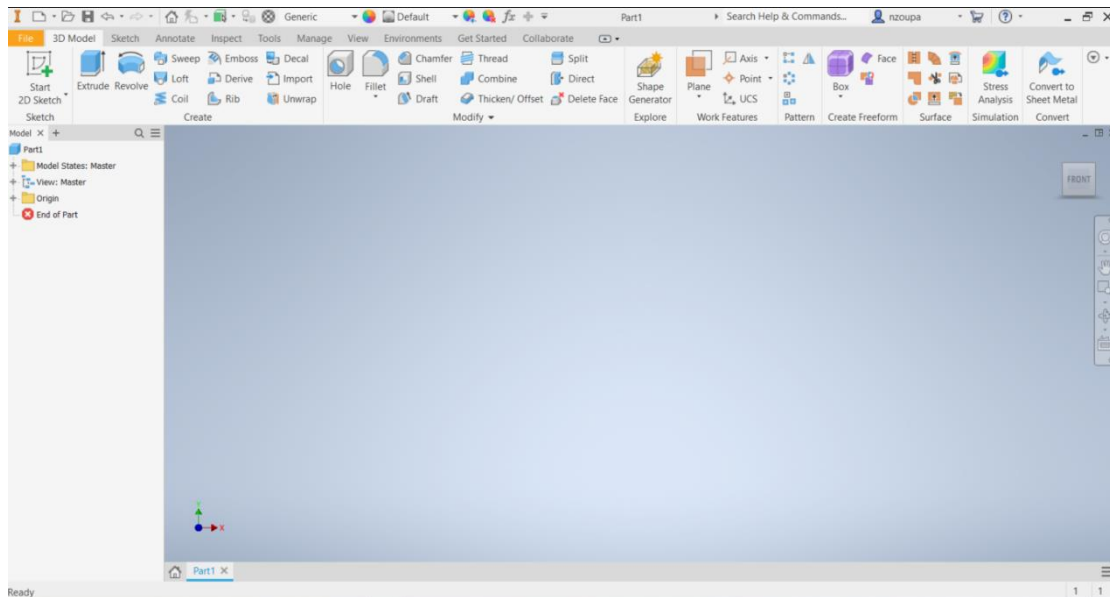
- **New part:** για την έναρξη σχεδίασης νέου εξαρτήματος
- **New Assembly:** για την δημιουργία νέας συναρμολόγησης
- **New Drawing:** για την δημιουργία νέους 2Δ σχεδίου
- **New Presentation:** για την δημιουργία Exploded view μίας συναρμολόγησης.





**Εικόνα 3-1 Αρχικό περιβάλλον Autodesk Inventor**

Στην παρούσα φάση επιλέγεται το παράθυρο “New Part”. Στο νέο περιβάλλον που εμφανίζεται (Εικόνα 3-1), στο επάνω μέρος παρατηρούμε το παράθυρο με τις εντολές που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός σχεδίου ενώ στα αριστερά της οθόνης εμφανίζεται το ιστορικό με τις ενέργειες που έχουν εφαρμοστεί επάνω στο 3D μοντέλο.

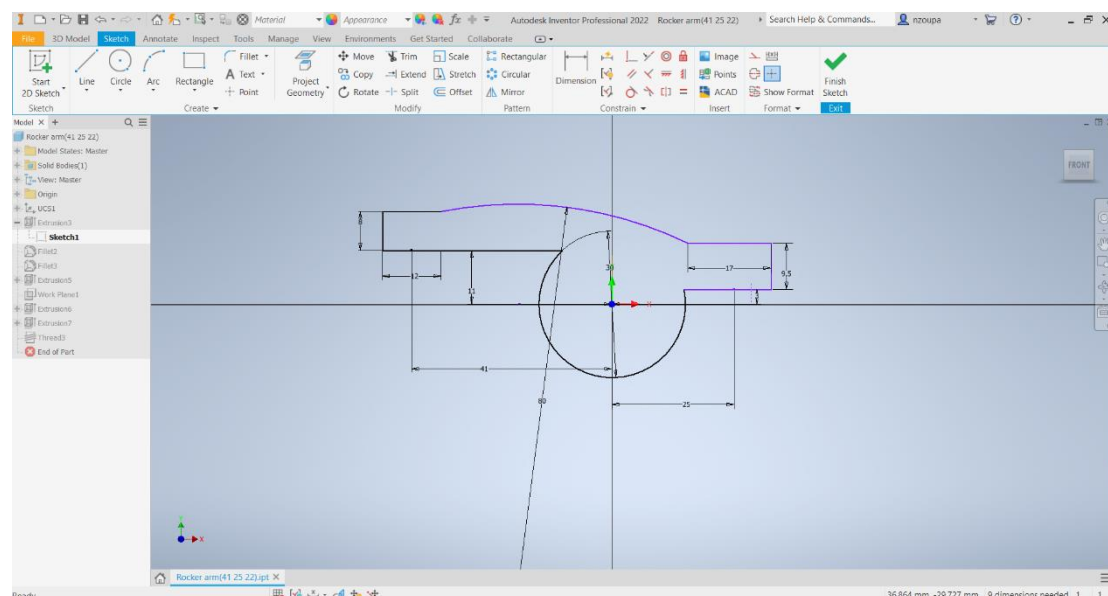


**Εικόνα 3-2 Περιβάλλον Autodesk Inventor**

Ως αρχικό βήμα για την μοντελοποίηση το ζυγώθρου είναι η κατασκευή ενός 2D σχεδίου στο οποίο θα πρέπει να εφαρμοστούν οι κρίσιμες διαστάσεις του αντικειμένου. Κρίσιμη διάσταση αποτελεί η διάσταση από το σημείο περιστροφής ως το σημείο επαφής στο άκρο της βαλβίδας καθώς και η διάσταση από τον διωστήρα μέχρι το σημείο περιστροφής. Αυτές οι δύο διαστάσεις είναι και αυτές που



προσδίδουν το rocker ratio ίσο με 1,64 για το ζύγωθρο το οποίο σχεδιάστηκε. Επομένως επιλέγουμε πάνω αριστερά την εντολή “Start 2D Sketch” για να σχεδιάσουμε το αρχικό περίγραμμα του αντικειμένου. Για την σχεδίαση επιλέγεται το Plane XY. Το αποτέλεσμα του 2Δ σχεδίου απεικονίζεται στην Εικόνα 3-3.

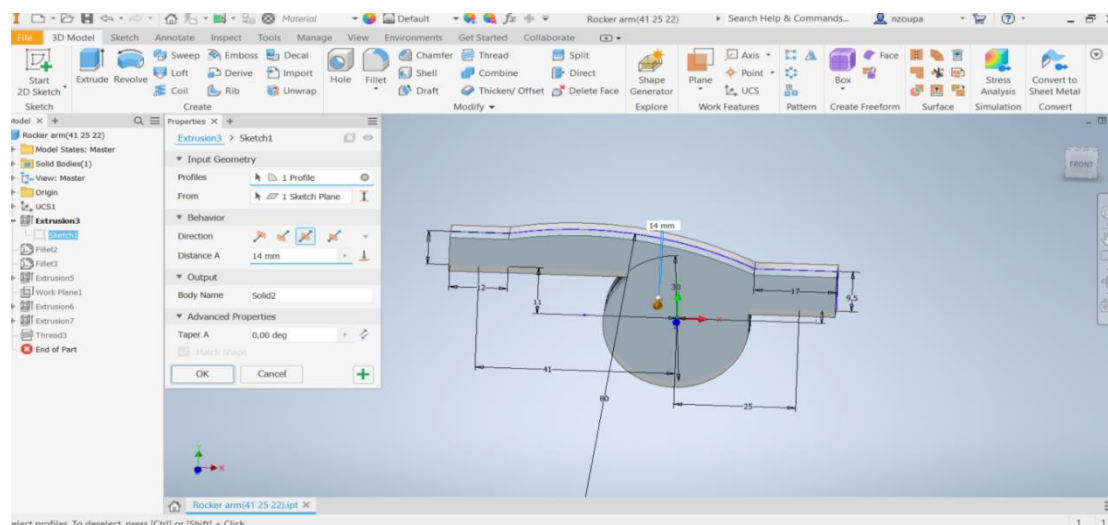


**Εικόνα 3-3 2Δ σχέδιο**

Στην συνέχεια για να δημιουργήσουμε ένα συμπαγές στερεό γίνεται χρήση της εντολής “Extrude”. Η εντολή “Extrude” εκτελείται κατά τον άξονα Z υπό 4 περιπτώσεις:

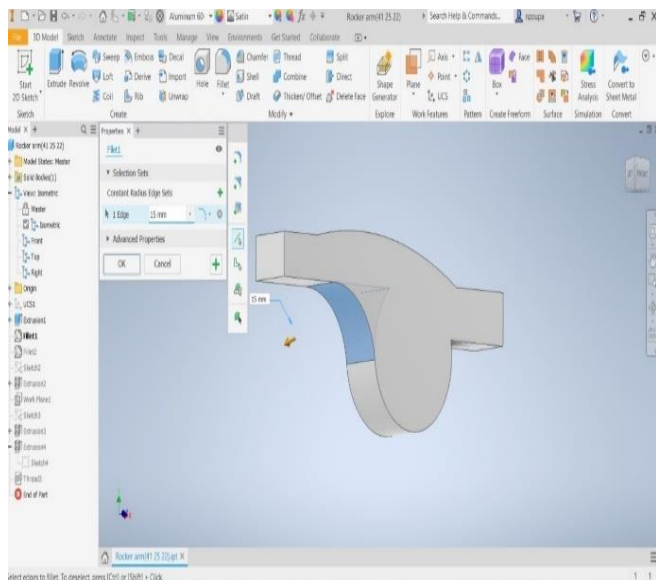
- Κατά την διεύθυνση του άξονα Z
- Κατά την διεύθυνση του άξονα -Z
- Συμμετρικά ως προς το Plane XY
- Ασύμμετρα ως προς το Plane XY

Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει γίνει επιλογή συμμετρικά από το Plane XY και σε απόσταση 14mm (Εικόνα 3-4).

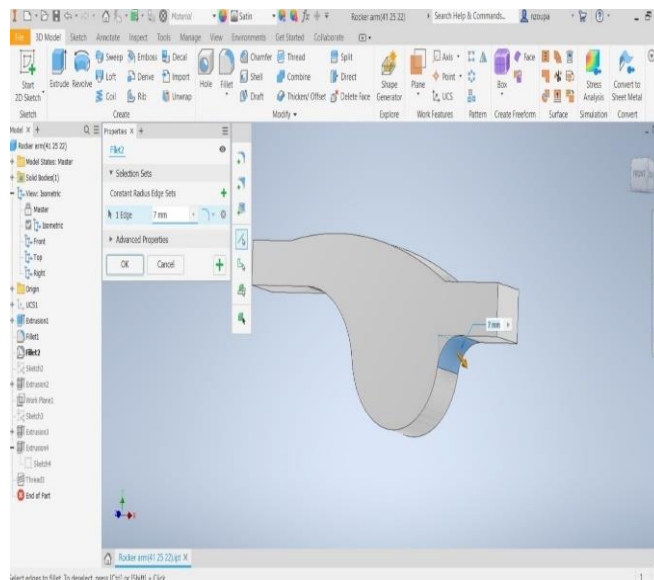


**Εικόνα 3-4 Εντολή Extrude**

Στην συνέχεια θα επιλεγθούν δύο ακμές στις οποίες θα τοποθετηθούν ράδια. Επιλέγεται η εντολή “Fillet” και ύστερα επιλέγεται η ακμή στην οποία χρειάζεται να τοποθετηθεί το ράδιο (Εικόνα 3-5). Στην συνέχεια επιλέγεται η ακτίνα 15 mm. Αντίστοιχα για την άλλη ακμή ακολουθείται η ίδια διαδικασία αλλά με ακτίνα 7 mm (Εικόνα 3-6).

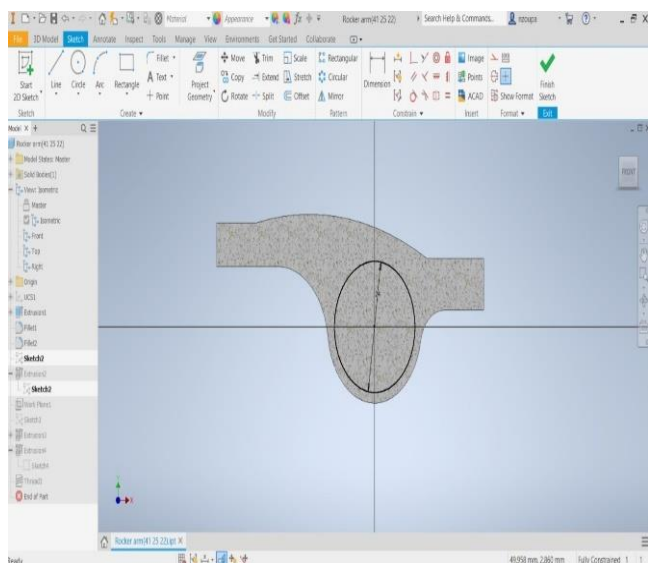


Εικόνα 3-5 Εντολή “Fillet 1”

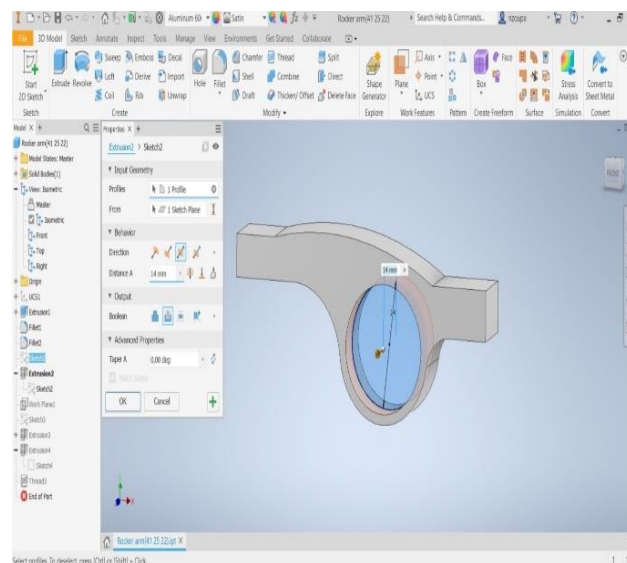


Εικόνα 3-6 Εντολή “Fillet 2”

Στο επόμενο βήμα κατασκευάζεται η οπή κατά την οποία επιτυγχάνεται η στήριξη του αντικειμένου στον άξονα. Για την κατασκευή επιλέγεται να δημιουργηθεί ένα 2D σχέδιο στο Plane XY και σχεδιάζεται κύκλος διαμέτρου 24 mm (Εικόνα 3-7). Για να προκύψει η 3D απεικόνιση του σκίτσου εκτελείται η εντολή “Extrude”. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται το 2D σχέδιο από Model Tree (στα αριστερά της οθόνης), με συμμετρική κατεύθυνση και η επιλογή “Cut” καθώς θέλουμε να αφαιρέσουμε υλικό από το ήδη υπάρχον αντικείμενο (Εικόνα 3-8).

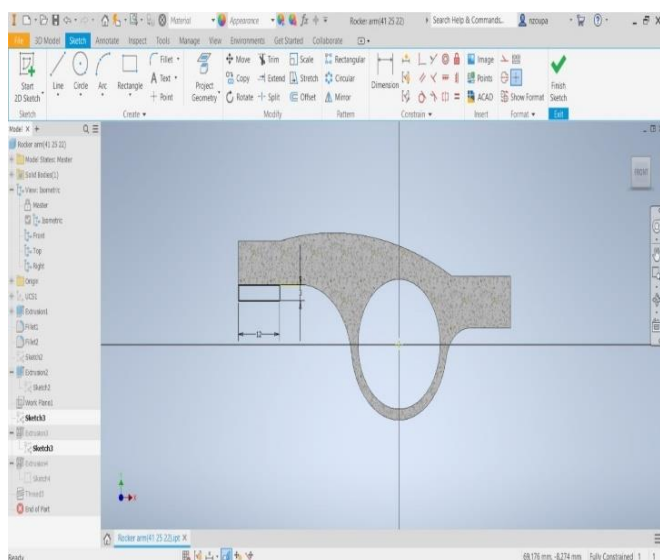


Εικόνα 3-7 Σχεδίαση οπής Φ24 mm

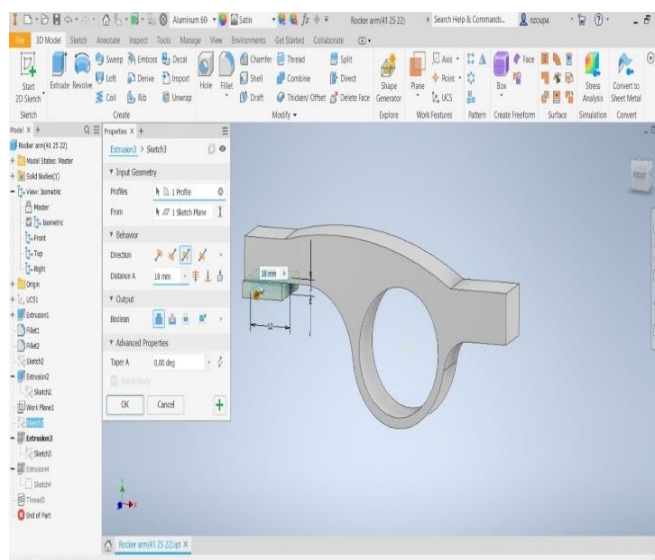


Εικόνα 3-8 Εκτέλεση εντολής “Extrude”

Στη συνέχεια με τον ίδιο τρόπο επιλέγοντας την σχεδίαση σε Plane XY κατασκευάζεται ένα ορθογώνιο μήκους 12 mm και πλάτους 3 mm (Εικόνα 3-9) και θα εκτελεστεί η εντολή “Extrude” σε συμμετρική διεύθυνση και συνολική απόσταση 18 mm και στο πεδίο “Output” επιλέγεται η εντολή “Join” (Εικόνα 3-10).

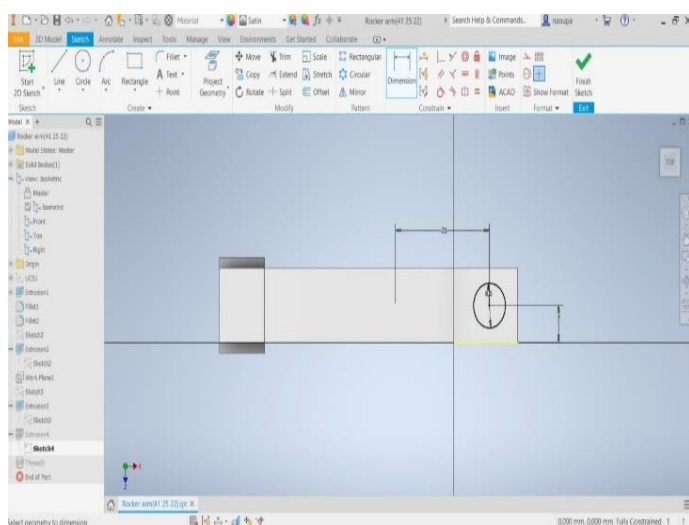


**Εικόνα 3-9 Σχεδίαση σημείου επαφής ζυγώθρου-βαλβίδας**

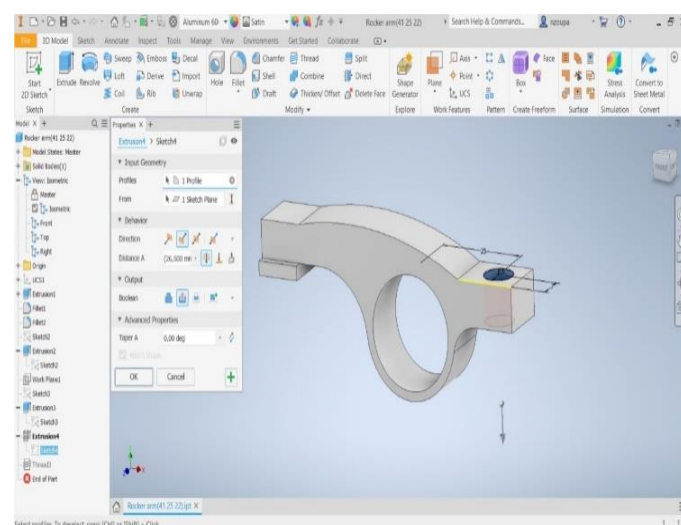


**Εικόνα 3-10 Εκτέλεση εντολής "Extrude"**

Τέλος, χρειάζεται να κατασκευαστεί το σημείο πρόσδεσης του διωστήρα με το ζυγώθρο. Επιλέγεται η επιφάνεια που φαίνεται στην Εικόνα 3-11 όπου και θα σχεδιαστεί ένας κύκλος διαμέτρου 8 mm και σε απόσταση από το σημείο περιστροφής ίση με 25 mm. Η απόσταση αυτή προκύπτει από τη διαίρεση της απόστασης από το κέντρο περιστροφής έως το σημείο επαφής με την βαλβίδα διά το Rocker ratio. Ύστερα μέσω της εντολής “Extrude” και της επιλογής “Trough all” θα αφαιρεθεί υλικό προκειμένου να τοποθετηθεί σε επόμενο βήμα σπείρωμα στην οπή αυτή (Εικόνα 3-12).

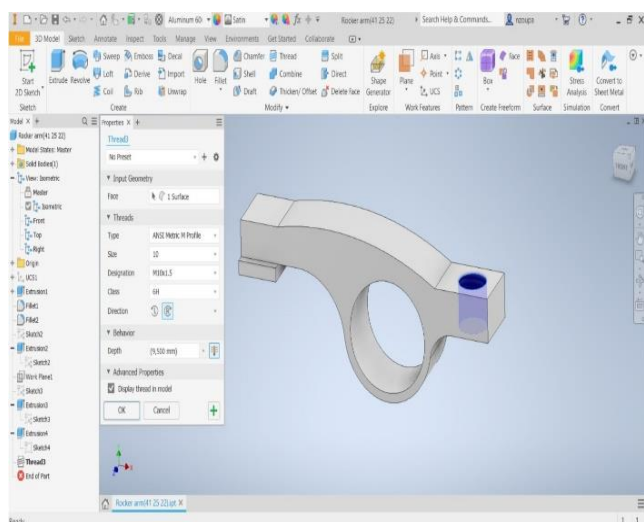


**Εικόνα 3-11 Σχεδίαση οπής  $\Phi 8,5$  mm**

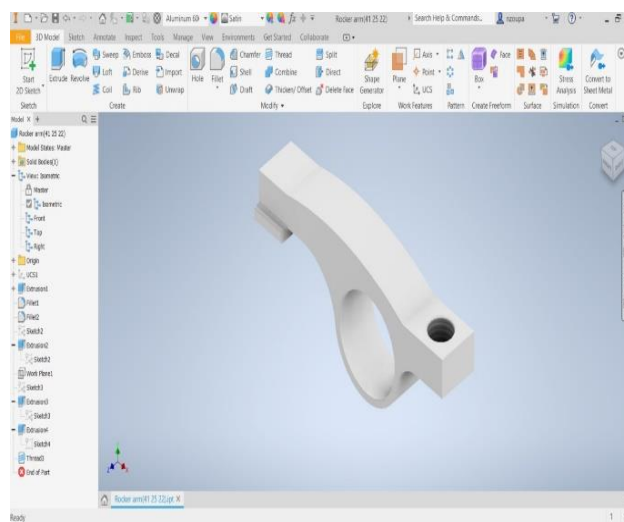


**Εικόνα 3-12 Εκτέλεση εντολής "Extrude"**

Κατά την εντολή "Thread", επιλέγεται σαν όρισμα η επιφάνεια που έχει αφαιρεθεί υλικό και εισάγονται τα στοιχεία του σπειρώματος. Πιο συγκεκριμένα το μέγεθος, ίσο με 10 mm, και η ονομασία του σπειρώματος, στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε σπείρωμα M10x1.5 (Εικόνα 3-13).



Εικόνα 3-13 Εκτέλεση εντολής "Extrude"



Εικόνα 3-14 Παρουσίαση τελικού εξαρτήματος

## 3.2 Μελέτη ζυγώθρου με την χρήση του λογισμικού Ansys

### 3.2.1 Εισαγωγή στο Ansys

Για την εκπόνηση της μελέτης, έχει γίνει η επιλογή του λογισμικού Ansys. Το Ansys αποτελεί ένα λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο βρίσκει ευρέως χρήση επίλυσης ζητημάτων δομικής ανάλυσης, εφαρμόζοντας προηγμένες λύσεις. Διαθέτοντας εξίσου μεγάλη ανάπτυξη και σε ζητήματα προσομοίωσης καθώς και σχεδίασης μέσω της σουίτας Ansys Spaceclaim.

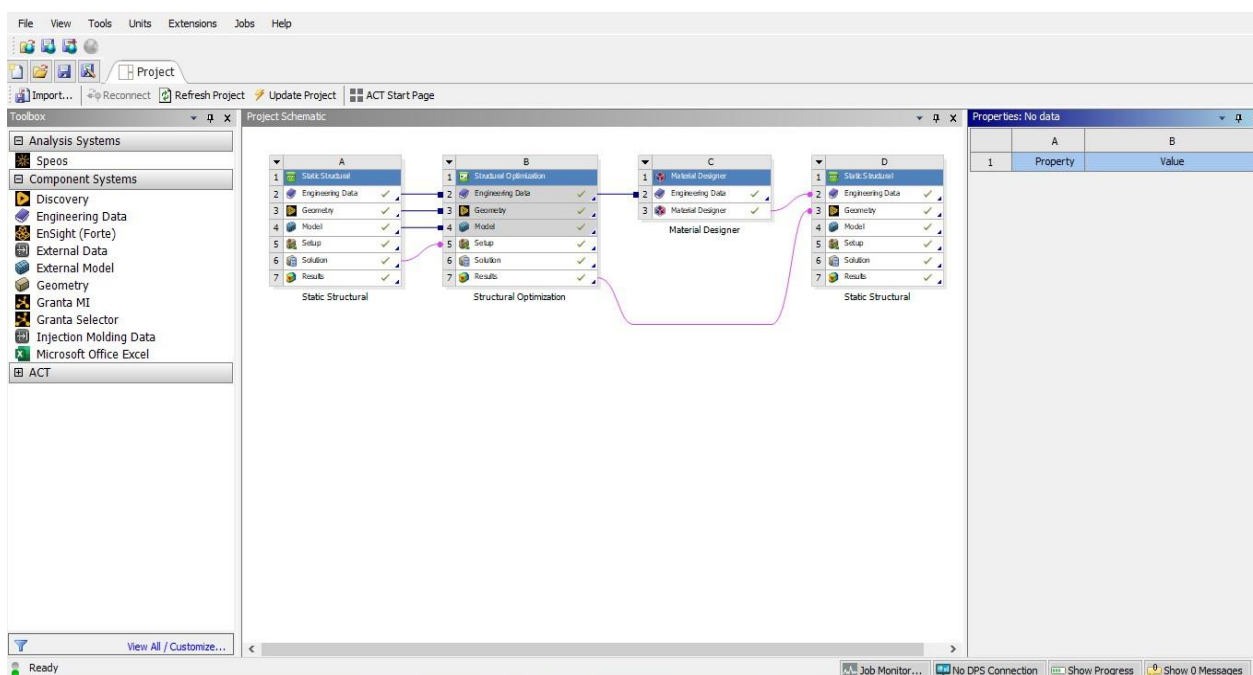
Με άλλα λόγια αποτελεί ένα εργαλείο για τους μηχανικούς σχεδίασης, το οποίο προσφέρει εξαιρετικές δυνατότητες προσομοίωσης σε διάφορους κλάδους των επιστημών καλύπτοντας ανάγκες διαφόρων βιομηχανιών. Πιο αναλυτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ζητημάτων δομικής ανάλυσης κατασκευών, εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων όπως στατικών, δυναμικών και μη γραμμικών, αξιολογώντας έτσι τις τάσεις που δέχονται οι κατασκευές, τις παραμορφώσεις καθώς και την δομική ακεραιότητα. Ένα ακόμα πεδίο λειτουργίας είναι η υπολογιστική ρευστομηχανική, προσφέροντας την δυνατότητα μοντελοποίησης και ανάλυσης της ροής των ρευστών, τη μεταφορά θερμότητας και την προσομοίωση αεροδυναμικής. Στις δυνατότητες του λογισμικού επίσης προσφέρονται και η προσομοίωση προσθετικής κατασκευής όπου και υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις στο αντικείμενο, προσομοιώσεις αντοχής και κόπωσης με σκοπό την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ενός εξαρτήματος αξιολογώντας την κόπωση ενός εξαρτήματος λόγω ζημιάς, διάδοση ρωγμών καθώς και διάφορες άλλες λειτουργίες για την αντιμετώπιση οποιονδήποτε μηχανολογικών ζητημάτων.



Με την χρήση των παραπάνω λειτουργιών το Ansys βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους κλάδους όπου μπορεί να υπάρχει η ανάγκη για την προσομοίωση και την ανάλυση προϊόντων και διαδικασιών. Ξεκινώντας από τον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου βρίσκουν εφαρμογές σε δομική ανάλυση, υπολογιστική ρευστομηχανική αλλά και προσομοίωση αντοχής. Συνεχίζοντας στην προσομοίωση βιομηχανικού εξοπλισμού, όπου επίσης αξιοποιούνται τα εργαλεία δομικής ανάλυσης και ρευστομηχανικής για την βελτίωση της αποδοτικότητας αλλά και τις αξιοπιστίας. Εφαρμογή επίσης βρίσκει και στον τομέα της ενέργειας όπου το Ansys χρησιμοποιείται για την θερμική ανάλυση, την εκτίμηση της δομικής ακεραιότητας, σε ζητήματα προσομοίωσης ρευστού καθώς και ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής υπήρχαν οι απαιτήσεις για την αξιοποίηση εργαλείων του Ansys για δομική ανάλυση καθώς και βελτιστοποίησης και εξερεύνησης σχεδιασμού. Πιο αναλυτικά, σε αυτό το σημείο θα αναλυθούν οι δυνάμεις τις οποίες δέχεται ένα ζύγωθρο κατά την λειτουργία του, μέσω της στατικής ανάλυσης και θα εφαρμοστεί τοπολογική βελτιστοποίηση μειώνοντας υλικό από σημεία του αντικειμένου όπου δεν δέχονται μεγάλες τάσεις, με σκοπό την μείωση του βάρους του αντικειμένου και σε συνέχεια την αύξηση της ακαμψίας του. Τέλος θα επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα, μέσω στατικής ανάλυσης, ότι οι τάσεις που δέχεται το εξάρτημα είναι μικρότερες από το όριο διαρροής του επιλεγμένου υλικού.

Ανοίγοντας το πρόγραμμα του Ansys πρέπει να καθοριστεί η σειρά των εργασιών που θα ακολουθηθούν. Στο πρώτο στάδιο βρίσκεται η στατική ανάλυση, όπου θα οριστούν οριακές συνθήκες και φορτίσεις του αντικειμένου και θα αναλυθούν οι τάσεις που δέχεται. Στην συνέχεια ακολουθεί η τοπολογική βελτιστοποίηση, όπου υλικό αφαιρείται από περιοχές του αντικειμένου, οι οποίες δεν δέχονται μεγάλες φορτίσεις, με σκοπό να βελτιστοποιηθεί η ακαμψία του. Ακολουθεί η διαδικασία της ομογενοποίησης για την δημιουργία της εσωτερικής δομής και τέλος εφαρμόζεται πάλι το στάδιο της στατικής ανάλυσης για την επικύρωση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3-15 Ροή εργασιών

### 3.2.2 Στατική ανάλυση

Στο αρχικό αυτό στάδιο επιθυμούμε να εφαρμόσουμε την στατική ανάλυση στο μοντέλο προκυμμένου να αντιληφθούμε τις δυναμικές καταπονήσεις που δέχεται. Η ανάλυση αυτή βοηθάει στην αναγνώριση των κρίσιμων περιοχών των τάσεων και παραμόρφωσης. Επίσης, συντελεί στον καθορισμό οριακών συνθηκών οι οποίες σε συνέχεια θα εφαρμοστούν στην τοπολογική βελτιστοποίηση ως κρίσιμες περιοχές για την αποφυγή αφαίρεσης υλικού από τις συγκεκριμένες περιοχές. Κατά την στατική ανάλυση εκτελούνται τα εξής βήματα:

- Εισαγωγή 3D μοντέλου
- Εισαγωγή μετάλλου
- Δημιουργία πλεγματικής δομής
- Καθορισμός οριακών συνθηκών και φορτίσεων

Ξεκινώντας θα πρέπει να γίνει εισαγωγή του 3D μοντέλου από το Autodesk Inventor στο περιβάλλον του Ansys υπό την μορφή .stp μέσω του πεδίου “Geometry”.

Στο επόμενο βήμα πρέπει να οριστεί το υλικού του αντικειμένου. Για τις απαιτήσεις της διπλωματικής έχει επιλεγθεί κράμα αλουμινίου σε μορφή πούδρας, AlSi10Mg, το οποίο θα κατασκευαστεί μέσω 3D εκτύπωση [25],[26], με την μέθοδο DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Η κατασκευή μηχανολογικών εξαρτημάτων από κράμα αλουμινίου είναι ευρέως εδραιωμένη σε διάφορους τομείς όπως η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία. Όσον αφορά το κράμα AlSi10Mg, πρόκειται για ένα κράμα με χαμηλό βάρος λόγω της χαμηλής πυκνότητας (ίση με  $2,67 \text{ gr/cm}^3$ ) καθιστώντας το κατάλληλο για κατασκευές μειωμένου βάρους. Επίσης, διατηρεί ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες συμπεριλαμβάνοντας υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και όριο διαρροής.

Το συγκεκριμένο κράμα είναι συμβατό με μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Διαθέτει εξαιρετικά χαρακτηριστικά ρευστότητας και στερεοποίησης κατά την διαδικασία της εκτύπωσης, αποδίδοντας έτσι υψηλής ποιότητας εξαρτήματα [27]. Όμως οι ιδιότητες του τελικού εξαρτήματος επηρεάζονται σημαντικά από το πάχος κάθε στρώσης κατά την εκτύπωση. Στον πίνακα 1 αποτυπώνονται τα δεδομένα για τις δυναμικές ιδιότητες, από κατασκευαστή για τη μέθοδο Direct metal laser melting σε δύο διαφορετικά πάχη στρώσεων, για δύο διαφορετικές καταστάσεις του αντικειμένου (χωρίς να δεχτεί θερμική κατεργασία και αφού έχει δεχτεί). Σύμφωνα με τον κατασκευαστή [25], ενδείκνυνται θερμική κατεργασία T6 όπου περιλαμβάνει δύο στάδια:

- Διαδικασία ανόπτωσης για 30 λεπτά στους  $530^\circ\text{C}$  και ψύξη εξαρτήματος με νερό
- Τεχνητή γήρανση για 6 ώρες στους  $165^\circ\text{C}$  και ψύξη με την χρήση αέρα.

Η θερμική κατεργασία λαμβάνει χώρα μετά την εκτύπωση του αντικειμένου και μπορεί να ενισχύσει την πλαστικότητα του αντικειμένου χωρίς να μειώνει σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό.

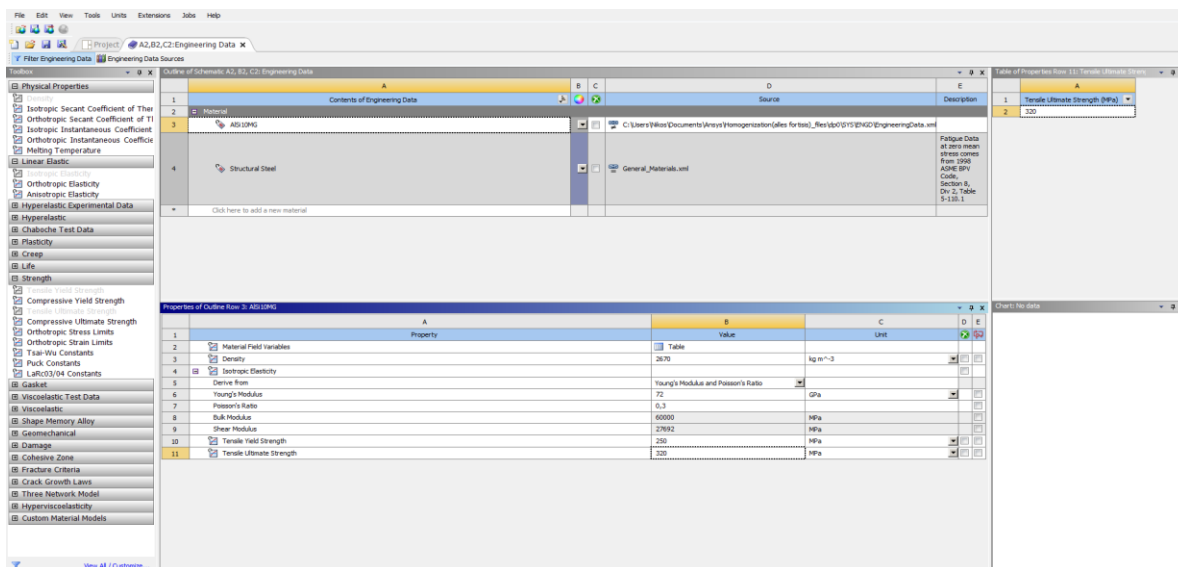
	Χωρίς θερμική επεξεργασία		Με θερμική επεξεργασία	
	Όριο διαρροής (MPa)	Εφελκυστική τάση (MPa)	Όριο διαρροής (MPa)	Εφελκυστική τάση (MPa)
Πάχος στρώσης 30 $\mu\text{m}$	240	440	250	320
Πάχος στρώσης 60 $\mu\text{m}$	230	460	250	310
Πάχος στρώσης 90 $\mu\text{m}$	240	380	230	300

Πίνακας 1 Ιδιότητες κράματος σε διαφορετικά πάχη στρώσεων

Για την εισαγωγή των δεδομένων θα θεωρηθεί ότι το εξάρτημα θα κατασκευαστεί με πάχος στρώσης 30  $\mu\text{m}$ . Η εισαγωγή των δεδομένων στο Ansys γίνεται μέσω του πεδίου “Engineering data” όπου και εισάγονται τα εξής:

- Πυκνότητα
- Λόγος Poisson
- Μέτρο ελαστικότητας
- Όριο διαρροής
- Μέγιστη εφελκυστική τάση.

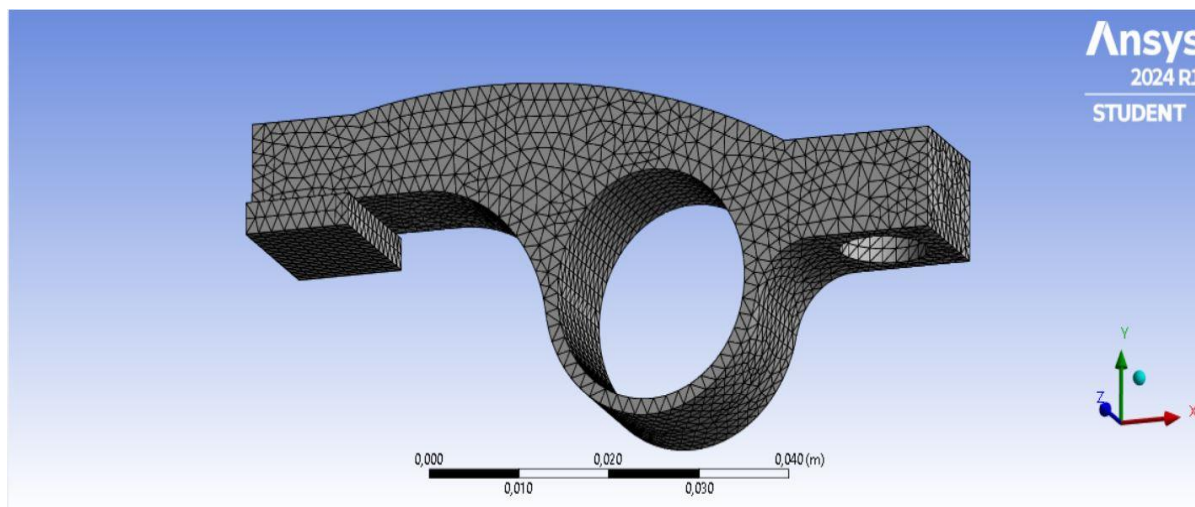
Τα δεδομένα που εισάγονται είναι με βάση πάχος στρώσεις 60  $\mu\text{m}$  και έπειτα από θερμική κατεργασία (Εικόνα 3-16).



Εικόνα 3-16 Εκχώρηση ιδιοτήτων υλικού

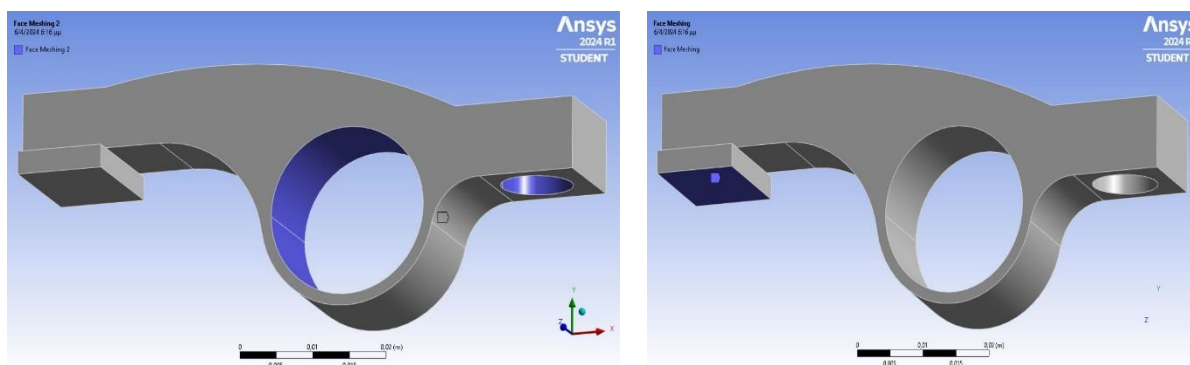
Ένα από τα πιο σημαντικά στάδια της μελέτης αποτελεί η κατασκευή της πλεγματικής δομής [28]. Η πλεγματική δομή αποτελείται από τετράπλευρα ή τριγωνικά σημεία με τους κόμβους να βρίσκονται στα άκρα των στοιχείων. Πιο πυκνές δομές, δηλαδή δομές με αυξημένο αριθμό στοιχείων, μπορούν να οδηγήσουν

σε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας, καθώς κατά αυτόν τον τρόπο περιγράφεται η συμπεριφορά των στοιχείων στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 3-17 Κατασκευή πλεγματικής δομής

Για την κατασκευή της πλεγματικής δομής αρχικά πρέπει να οριστεί η μέθοδος με την οποία θα κατασκευαστεί έτσι στο πεδίο “Mesh” εισάγεται η εντολή “Method” και για την επιλογή της μεθόδου διαλέγεται η τετραεδρική μέθοδος. Αντίστοιχα για την εισαγωγή μέγεθος των στοιχείων εισάγεται η εντολή “Sizing” και συμπληρώνεται στο χωρίο “Element size”. Στην συνέχεια χρησιμοποιούνται εντολές χειρισμού του πλέγματος “Face meshing” για την δημιουργία χαρτογραφημένου πλέγματος στις περιοχές φορτίσεων και στηρίξεων. Για την αρχική περίπτωση φόρτισης έχει οριστεί μέγεθος στοιχείου ίσο με 1,5 mm, ενώ συνολικά για την κατασκευή του πλέγματος έχουν δημιουργηθεί 47.520 κόμβοι και 31.102 στοιχεία.



Εικόνα 3-18 Εισαγωγή εντολή χαρτογραφημένης επιφάνειας στις περιοχές φορτίσεων και στήριξης

Σε αυτό το σημείο πρέπει να εφαρμοστούν οι δυνάμεις και οι στηρίξεις όπου δέχεται το εξάρτημα κατά την πλήρη βύθιση της βαλβίδας, οι οποίες κατηγοριοποιούνται ως εξής [3]:

- Συνολικό φορτίο στην βαλβίδα.
- Αρχική δύναμη ελατηρίου.
- Δύναμη λόγω επιτάχυνσης της βαλβίδας.



Οι υπολογισμοί λαμβάνουν χώρα για τις στροφές όπου ο κινητήρας εσωτερικής καύσης αποδίδει την μέγιστη ισχύ. Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα παρουσιάζονται στον πίνακα 2:

<b>Αριθμός κυλίνδρων</b>	6 κύλινδροι σε διάταξη τύπου V
<b>Κυβισμός</b>	2523 cc
<b>Μέγιστη ισχύ κινητήρα</b>	46.3 kW στις 3200 rpm
<b>Μέγιστη ροπή κινητήρα</b>	195 NM στις 1440-2200 rpm

Πίνακας 2 χαρακτηριστικά κινητήρα

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στο ζυγώθρο χρειάστηκαν τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον πίνακα 3:

Περιγραφή	Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Διάμετρος διάμετρος μοχλοβραχίωνα (d1)	22	mm
Μάζα βαλβίδας (M <sub>v</sub> )	0.09	Kg
Διάμετρος κεφαλής βαλβίδας (D <sub>v</sub> )	40	mm
Ανύψωση βαλβίδας (h)	9.4	mm
Στροφές κινητήρα (N)	3200	RPM
Πίεση κυλίνδρου (P <sub>c</sub> )	0.4	N/mm <sup>2</sup>
Μέγιστη πίεση αναρρόφησης (P <sub>s</sub> )	0.02	N/mm <sup>2</sup>
Διάμετρος στελέχους βαλβίδας (D <sub>1</sub> )	34	mm
Μήκος βαλβίδας (L <sub>v</sub> )	41	mm
Rocker ratio	1.64	
Γωνία ενεργοποίησης κάμας	110	Degrees
Σταθερά ελατηρίου (K)	23	N/mm
Προφόρτηση ελατηρίου (P <sub>1</sub> )	249.5	N

Πίνακας 3 Δεδομένα υπολογισμού δύναμης βαλβίδας

Στο αρχικό στάδιο υπολογισμού, πρέπει να βρεθεί το συνολικό φορτίο που επιδράει στη βαλβίδα:

$$P = P_g + w \quad (1)$$

Όπου w το βάρος του ζυγώθρου:

$$w = m * g = 31.7 * 10^{-3} * 9.81 = 0.31 \text{ N} \quad (2)$$

Και P<sub>g</sub> η δύναμη των αερίων που ασκούνται στην βαλβίδα:

$$P_g = \frac{\pi}{4} * (D_v)^2 * P_c = \frac{\pi}{4} * 1600 * 0.4 = 502.65 \text{ N} \quad (3)$$

Επομένως με βάσει τις εξισώσεις 1,2,3:

$$P = 502,65 + 0,31 = 502,96 \text{ N}$$

Έπειτα υπολογίζονται οι δυνάμεις από το ελατήριο:

$$F_s = \frac{\pi}{4} * (D_v)^2 * P_s - w = \frac{\pi}{4} * 1600 * 0.02 - 0.31 = 24.82 \text{ N}$$

Για τον υπολογισμό της δύναμης λόγω της επιτάχυνσης της βαλβίδας πρέπει να υπολογιστή αρχικά η γωνιακή ταχύτητα του εκκεντροφόρου:

$$N_s = \frac{N}{2} = \frac{3200}{2} = 1600 \text{ rpm}$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να ανοίξει ή να κλείσει η βαλβίδα:

$$T = \frac{\text{Γωνία ενεργοποίησης κάμας}}{\text{Γωνία περιστροφής εκκεντροφόρου}} = \frac{110}{\left(\frac{1600}{60}\right) * 360} = 0.001145 \text{ sec}$$

Εφόσον υπάρχουν τα στοιχεία που χρειάζονται για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι:

$$a = \omega^2 * r = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 * r = 1550 \text{ m/s}^2$$

Επομένως για τον υπολογισμό της δύναμης λόγω της επιτάχυνσης της βαλβίδας χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

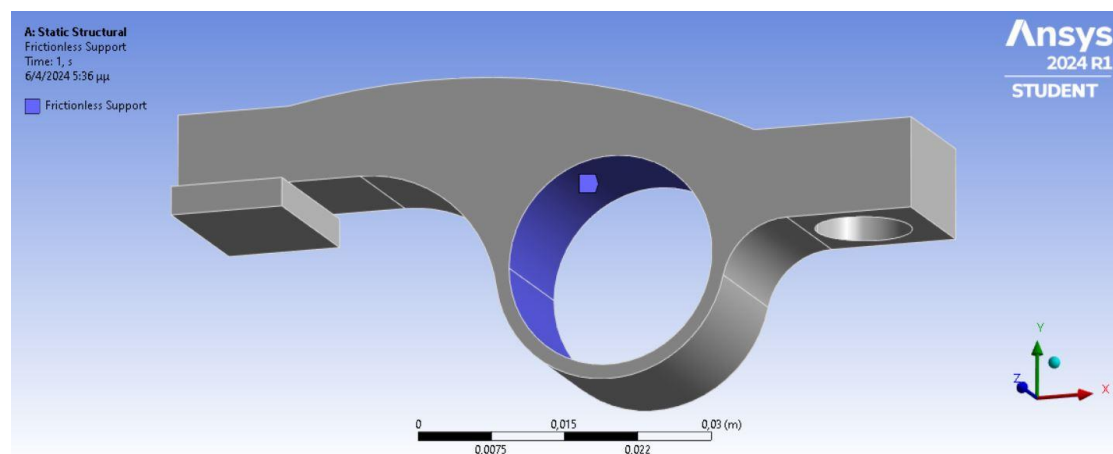
$$F_a = Mv * a + w = 0.09 * 1550 + 0.31 = 139.81 \text{ N}$$

Άρα η μέγιστη δύναμη που δέχεται το ζύγωθρο υπολογίζεται ως εξής:

$$F = P + F_s + F_a = 502.65 + 24.82 + 139.81 = 667.28 \text{ N}$$

Η μέγιστη δύναμη που δέχεται το ζύγωθρο είναι ίση με 667,28 N.

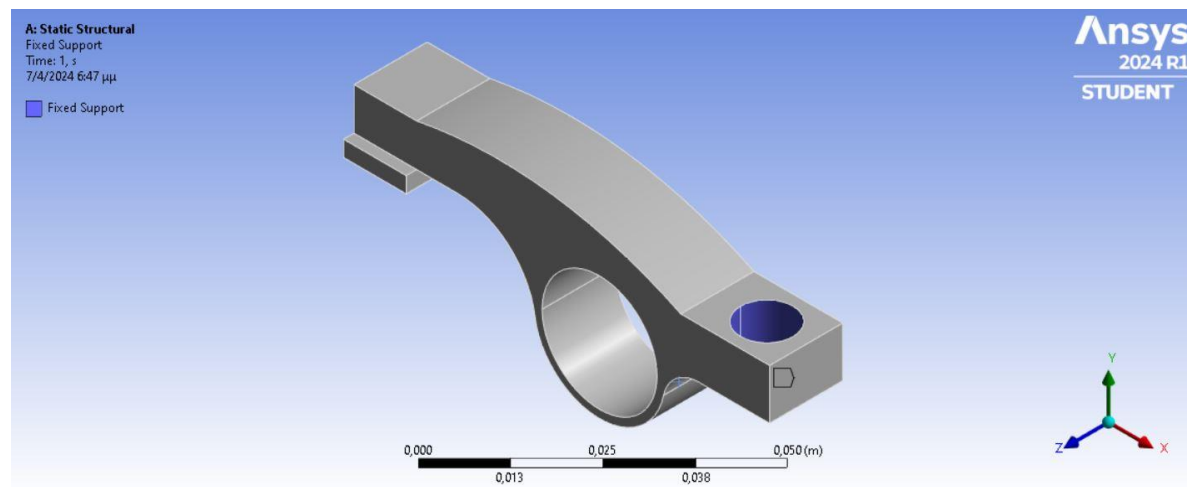
Εφόσον πλέον είναι γνωστή η δύναμη που δέχεται το εξάρτημα πρέπει να γίνει η εισαγωγή της δύναμης και των στηρίξεων στο Ansys. Ξεκινώντας από την αρχική έδραση του αντικειμένου πάνω στον άξονα περιστροφής, προσομοιώνεται μέσω της εντολής “Frictionless support”, περιορίζοντας έτσι το αντικείμενο να κινηθεί σε ακτινική κατεύθυνση ενώ είναι ελεύθερο σε εφαπτομενική (Εικόνα 3-19).



Εικόνα 3-19 Εντολή “Frictionless support”

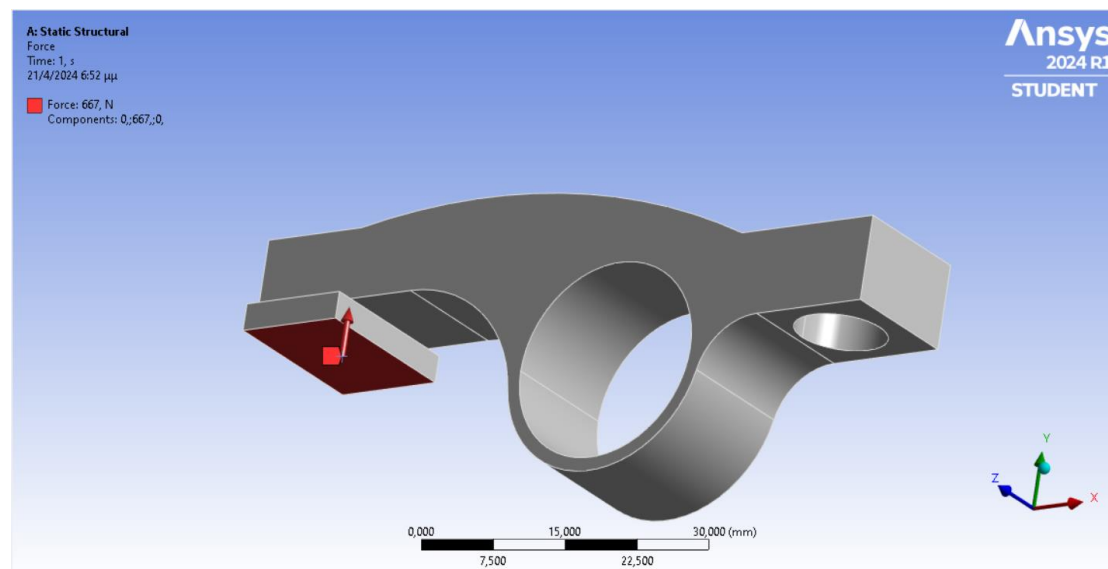
Η επόμενη εντολή έδρασης είναι η εντολή “Fixed support”. Σε αυτήν την περίπτωση θέτουμε την μετατόπιση και την περιστροφή του αντικειμένου ίση με μηδέν σε όλους τους άξονες. Κατά αυτόν τον τρόπο προσομοιάζεται η λειτουργία του

διωστήρα, δεχόμενος την αξονική δύναμη από την κάμα για την πλήρη βύθιση της βαλβίδας.



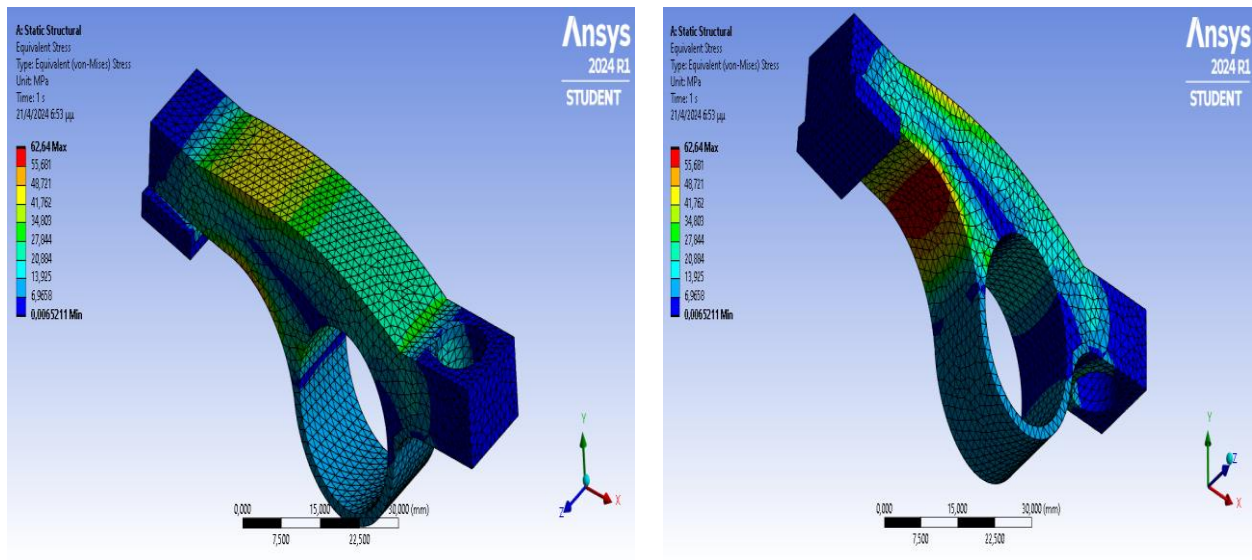
Εικόνα 3-20 Εντολή "Fixed support"

Τέλος εισάγεται η δύναμη που ασκείται από το ελατήριο στο ζύγωθρο κατά την πλήρη βύθιση. Η δύναμη είναι ίση με 667 N με διεύθυνση κατά τον άξονα Y.

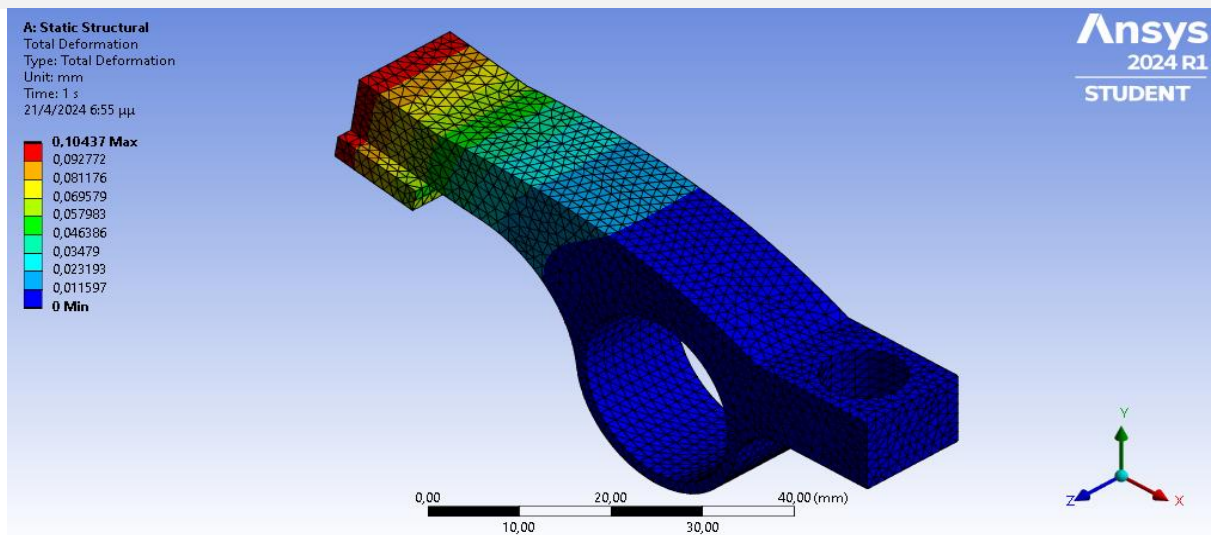


Εικόνα 3-21 Εισαγωγή δύναμης ελατηρίου

Εφόσον έχει κατασκευαστεί η πλεγματική δομή και έχουν οριστεί οι συνθήκες φόρτισης και στήριξης εξάγονται τα αποτελέσματα για τα συγκεκριμένα δεδομένα. Ποιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι κατανομή των τάσεων στο αντικείμενο και η συνολική παραμόρφωση. Η μέγιστη τάση που δέχεται το αντικείμενο είναι ίση με 62.64 MPa ενώ η μέγιστη συνολική παραμόρφωση ανέρχεται στα 0,1 mm.



Εικόνα 3-22 Κατανομή τάσεων von-Misses

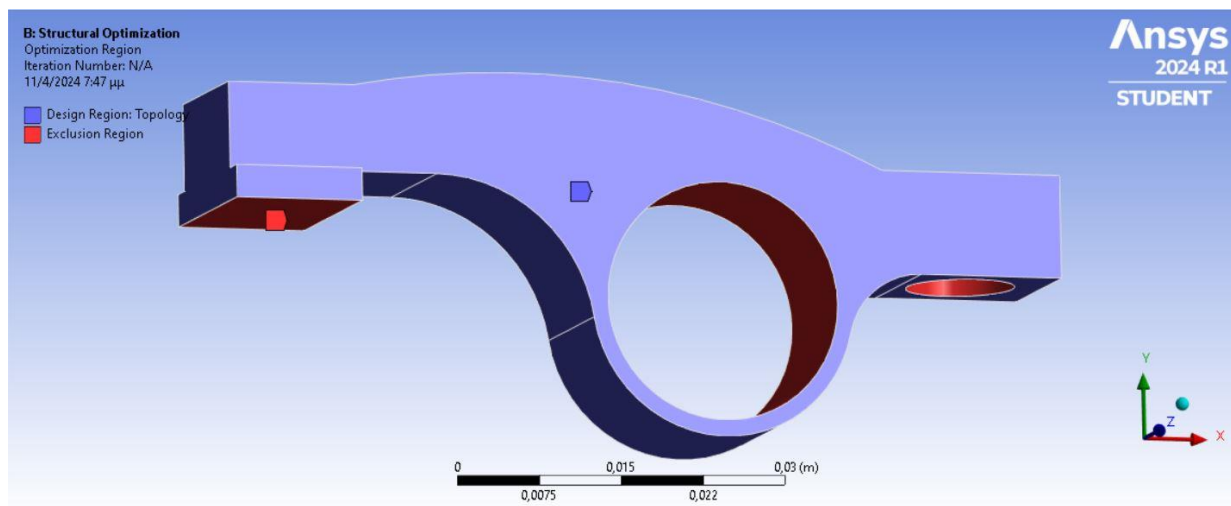


Εικόνα 3-23 Συνολική παραμόρφωση

### 3.2.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση

Η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης αποτελεί το στάδιο όπου μειώνεται στοχευμένα υλικό από το εξάρτημα, κυρίως από περιοχές οι οποίες δεν δέχονται μεγάλες δυναμικές φορτίσεις με σκοπό την αύξηση της ακαμψίας.

Εφόσον έχει επιλυθεί η στατική ανάλυση τα δεδομένα από αυτή τη διαδικασία μεταφέρονται σαν ορίσματα και στην τοπολογική βελτιστοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές στις οποίες έχουν οριστεί δυνάμεις αλλά και στηρίξεις πλέον αποτελούν περιοχές στις οποίες δεν είναι επιθυμητό να αφαιρεθεί υλικό. Συνεπώς το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση της διαδικασίας διατηρεί αναλλοίωτες αυτές τις περιοχές. Στην Εικόνα 3-24 διακρίνονται με κόκκινο οι επιφάνειες στις οποίες έχουν εφαρμοστεί προηγουμένως οι οριακές συνθήκες ενώ με μπλε αποτυπώνονται οι περιοχές από τις οποίες θα αφαιρεθεί υλικό.

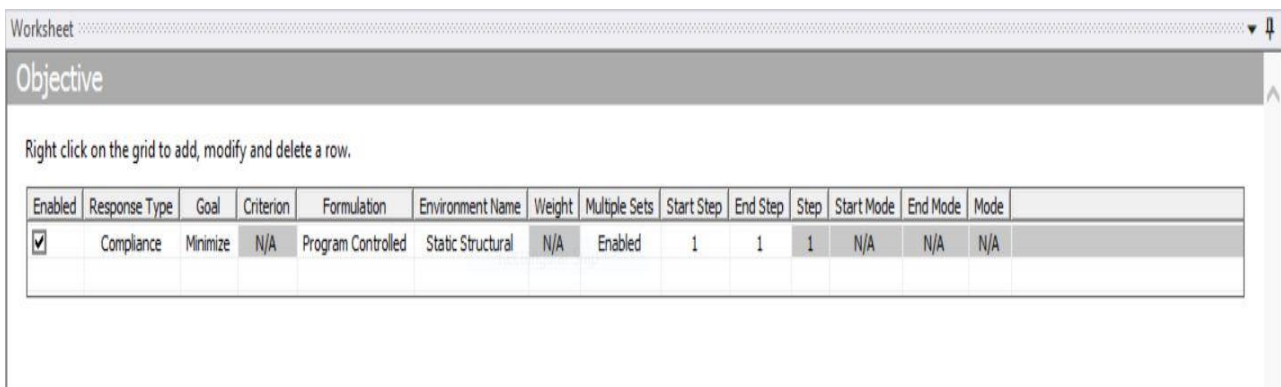


Εικόνα 3-24 Απεικόνιση περιοχών βελτιστοποίησης

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός κριτηρίου μέσω την εντολής “Objective” (Εικόνα 3-25). Το πρόγραμμα διαθέτει εξής κριτήρια:

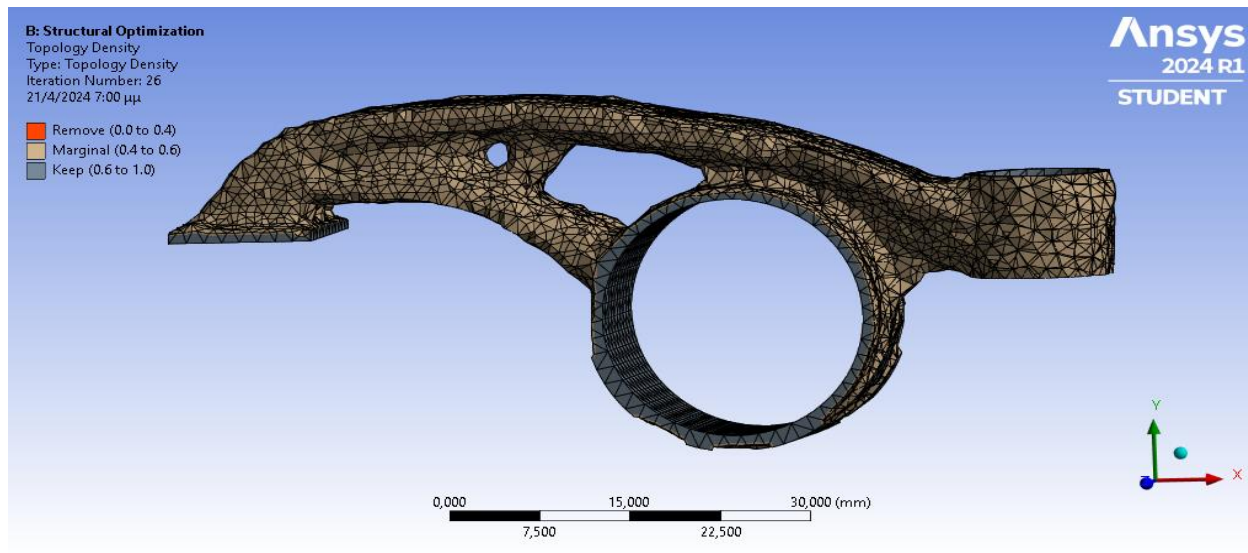
- Μάζα
- Όγκο
- Συμμόρφωση
- Τάσης

Για να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της ακαμψίας επιλέγεται το κριτήριο ελαχιστοποίησης της συμμόρφωσης. Η συμμόρφωση ή αλλιώς ενέργεια παραμόρφωσης αποτελεί ένα συνολικό μέτρο των μετατοπίσεων με αποτέλεσμα όσο μειώνεται το μέτρο αυτό, να αυξάνεται η ακαμψία του αντικειμένου.



Εικόνα 3-25 Εισαγωγή κριτηρίου συμμόρφωσης

Τελικό στάδιο της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι ο ορισμός του ποσοστού διατήρησης υλικού για την εκτέλεση του αλγορίθμου. Για την παρούσα διπλωματική έχει οριστεί ποσοστό διατήρησης υλικού στο 50%. Το αποτέλεσμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-26. Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία, το τοπολογικά βελτιστοποιημένο αντικείμενο ζυγίζει μόλις 18,3 γρ. ενώ το αρχικό μοντέλο ζύγιζε 31,7 γρ., δηλαδή παρατηρείται συνολική μείωση 57 % της μάζας του αντικειμένου.



**Εικόνα 3-26 Τοπολογικά βελτιστοποιημένο εξάρτημα.**

### 3.2.4 Επαλήθευση αποτελεσμάτων

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποδίδει μία πρώτη εικόνα σχετικά με την σχετικά με την βελτιστοποιημένη μορφή του εξαρτήματος καθώς το αντικείμενο που προκύπτει δεν είναι έτοιμο για παραγωγή και θα πρέπει να πραγματοποιηθούν κάποιες διαδικασίες εξομάλυνσης των βελτιστοποιημένων επιφανειών. Εφόσον πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες ενέργειες μένει να αξιολογηθεί εάν ο νέος σχεδιασμός του εξαρτήματος πληροί τις λειτουργικές απαιτήσεις, με βάση τα χαρακτηριστικά του υλικού που έχει επιλεγεί.

Θέτοντας μία ροή εργασιών για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να είχε την εξής εικόνα:

1. Ορισμός ομογενοποιημένης εσωτερικής πλεγματικής δομής.
2. Επανασχεδίαση αντικειμένου μέσω Spaceclaim.
3. Στατική ανάλυση.

#### **Ορισμός ομογενοποιημένης εσωτερικής πλεγματικής δομής**

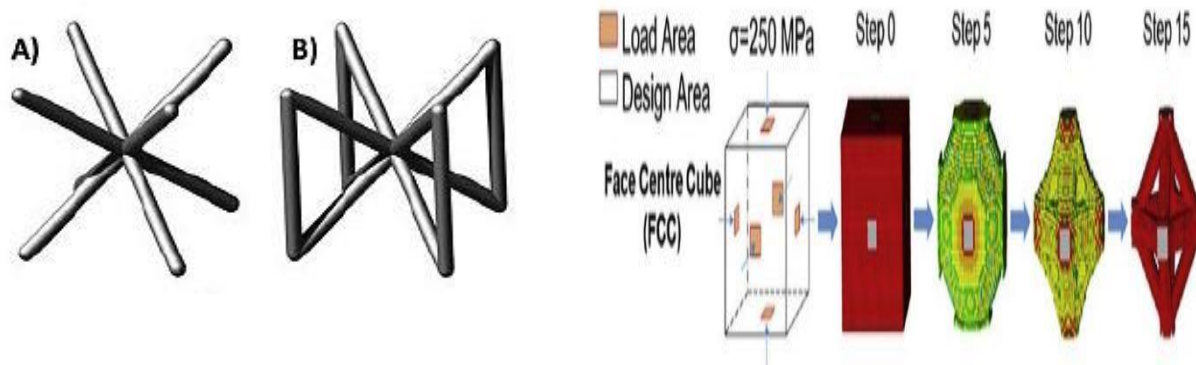
Οι εσωτερικές πλεγματικές δομές είναι τοπολογικά προσδιορισμένες, τρισδιάστατες δομές αποτελούμενες από μία ή πολλαπλές μοναδιαίες κυψελίδες. Οι κυψελίδες αυτές χαρακτηρίζονται από τις διαστάσεις και την συνδεσιμότητα των στοιχείων που τις αποτελούν τα οποία συνδέονται σε συγκεκριμένους κόμβους [29].

Με την προσαρμογή των δομικών παραμέτρων των πλεγματικών δομών, όπως για παράδειγμα η τοπολογία της κυψελίδας, η συνδεσιμότητα ή η γεωμετρία, δηλαδή το μέγεθος της κυψελίδας, η φυσική απόδοση των δομών μπορεί να τροποποιηθεί και να αποδώσει ιδιότητες που δεν ήταν εφικτές από υλικά τα οποία προέρχονται. Για παράδειγμα, παρουσιάζουν βελτιστοποίηση σε ακουστικές, διηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες [30].



Οι δομές αυτές κατηγοριοποιούνται με βάση την μηχανική απόκρισή τους, διακρίνονται σε δομές όπου κυριαρχεί η κάμψη ή ο εφελκυσμός. Με βάση την πρώτη κατηγορία οι δομές δέχονται καμπτικές ροπές επομένως είναι εύκαμπτες ενώ στην δεύτερη κατηγορία δέχονται αξονικά φορτία επομένως είναι πιο δύσκαμπτες και ισχυρές από τις δομές που κυριαρχούνται από κάμψη [31]. Υπάρχουν δύο σημαντικές υποκατηγορίες των δομών αυτών:

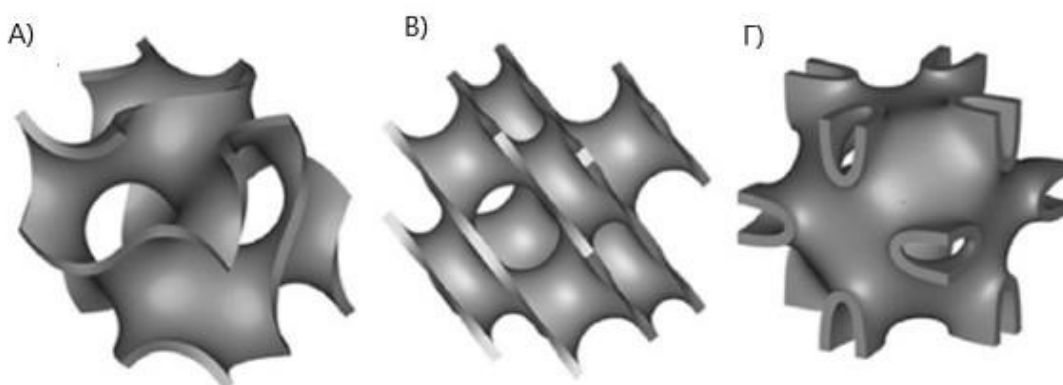
- Strut-based δομές πλέγματος: οι δομές αυτές είναι εμπνευσμένες από τις κρυσταλλικές δομές των μεταλλικών υλικών αλλά και παραλλαγές των δομών αυτών μέσω τοπολογικής βελτιστοποίησης.



Εικόνα 3-27 Strut-based πλεγματικές δομές A) BCC, B) FCC

Εικόνα 3-28 Τοπολογικά βελτιωμένη FCC δομή

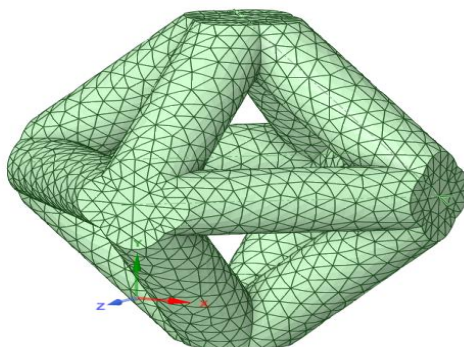
- Τριπλά περιοδικές δομές ελάχιστων επιφανειακών πλεγμάτων (TPMS): Παραδείγματα αυτών των δομών αποτελούν οι δομές Schoen, Schwarz και Neovius, οι οποίες αναπτύχθηκαν βάση μαθηματικής φόρμουλας (Εικόνα 3-29). Αυτού του τύπου οι δομές μπορούν να αποφέρουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τις Strut-based δομές καθώς, κατά την κατασκευή τους η γωνία κλίσης των κυτταρικών τοιχωμάτων μεταβάλλεται συνεχώς, έτσι τα προηγούμενα στρώματα υλικού υποστηρίζουν τα επόμενα κατά την εκτύπωση [30].



Εικόνα 3-29 TPMS πλεγματικές δομές A) Schoen, B) Schwarz, C) Neovius

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει επιλεγθεί η δημιουργία τοπολογικά βελτιστοποιημένης FCC πλεγματική δομή (Εικόνα 3-20). Πιο συγκεκριμένα η δομή σχεδιάστηκε με την βοήθεια το “Material designer” (περιβάλλον

του προγράμματος Ansys) με μοναδιαίες διαστάσεις κυψελίδας 2\*2\*2 mm. Η χρήση της εφαρμογής “Material designer” συμβάλει στην διαδικασία της ομογενοποίησης, όπου η μοναδιαία κυψελίδα εξετάζεται ως ένα ανεξάρτητο στοιχείο με σκοπό τον προσδιορισμό των ελαστικών ιδιοτήτων. Με την υπόθεση ότι η μοναδιαία κυψελίδα επαναλαμβάνεται ομοιόμορφα εντός του προσχεδιασμένου χωρίου, οι ιδιότητές της θα χαρακτηρίσουν το τελικό αντικείμενο.



*Εικόνα 3-30 Μοναδιαία κυψελίδα*

Η μέθοδος της ομογενοποίησης συχνά οδηγεί σε υπολογιστική αποδοτικότητα σε σχέση με την ενσωμάτωση των εσωτερικών πλεγματικών δομών στο 3D μοντέλο, μειώνοντας τα υπολογιστικά κόστη της προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα της μεθόδου απεικονίζεται ως ένας ορθοτροπικός πίνακας ακαμψίας, ο οποίος στην συνέχεια θα ενσωματωθεί στο τοπολογικά βελτιστοποιημένο μοντέλο ως δεδομένα του υλικού.

### **Επανασχεδίαση αντικειμένου μέσω Spaceclaim**

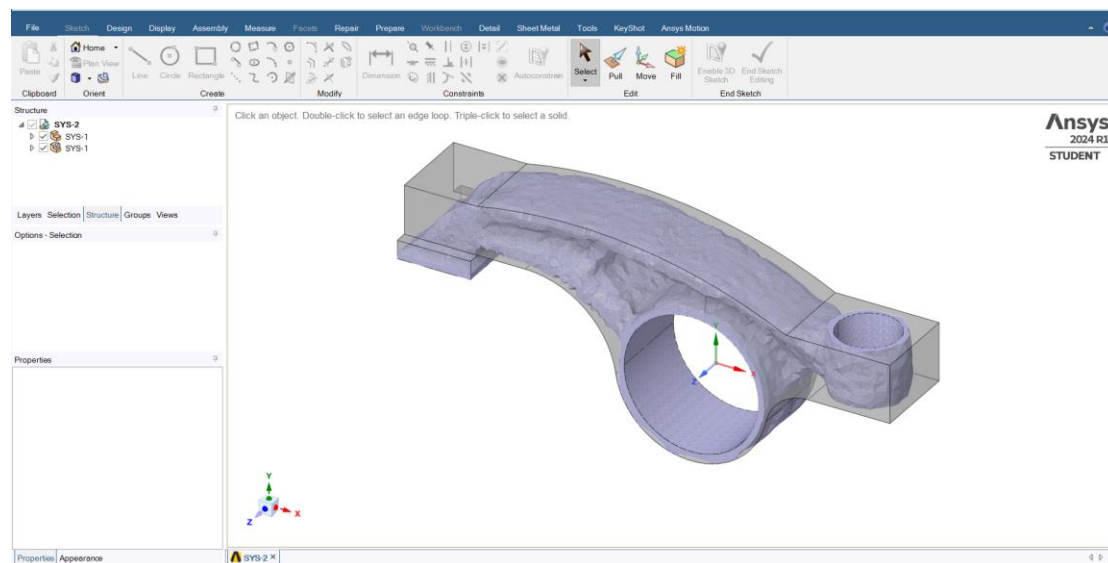
Το Spaceclaim αποτελεί ένα 3D σχεδιαστικό λογισμικό της Ansys, ιδιαίτερα φιλικό προς τον χρήστη χωρίς την απαίτηση πολύπλοκων παραμετρικών τεχνικών μοντελοποίησης καθιστώντας το ιδανικό για την προετοιμασία του τοπολογικά βελτιστοποιημένου εξαρτήματος για το τελικό στάδιο της στατικής ανάλυσης.

Αφού έχει ολοκληρωθεί η μελέτη της τοπολογικής βελτιστοποίησης, το αποτέλεσμα που λαμβάνεται είναι ένα STL αρχείο, για το οποίο απαιτείται μία διαδικασία βελτίωσης των επιφανειών του 3D μοντέλου καθώς αποτελείται από τραχιές επιφάνειες. Οι λόγοι που απαιτείται αυτή η διαδικασία αφορούν τόσο την εκτύπωση όσο και την μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να προκαλέσει ανακρίβειες στο αποτέλεσμα της μελέτης καθώς το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δεν μπορεί να απεικονίσει με ακρίβεια τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας και μπορεί να δημιουργεί πλέγμα χαμηλής ποιότητας. Επίσης, τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσουν σε περίπλοκες γεωμετρίες οι οποίες προκειμένου να κατασκευαστούν να χρειάζονται πρώτα μία διαδικασία εκλέπτυνσης.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, θα χρειαστεί να κατασκευαστεί ένα αντικείμενο με ομαλές επιφάνειες, στα σημεία όπου έχει αφαιρεθεί υλικό και η



διατήρηση των επιφανειών των αποκλειστικών περιοχών όπου εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες.



**Εικόνα 3-31 Εισαγωγή βελτιστοποιημένου μοντέλου στο Spaceclaim**

Το Spaceclaim διαθέτει εργαλεία βελτιστοποίησης του 3D μοντέλου όπου ανιχνεύει προβλήματα, σχετικά με τα στοιχεία των επιφανειών, που πρόκειται να επηρεάσουν αρνητικά το πλέγμα στην μελέτη αργότερα αλλά και επιδιορθώνει τα ελαττωματικά στοιχεία. Κατά αυτόν τον τρόπο μέσω της εντολής “Check facets” ελέγχονται τα στοιχεία και επιδιορθώνονται μέσω της εντολής “Auto fix”.

Αφού ελεγχθεί το 3D μοντέλο και δεν υπάρχει κάποιο σφάλμα τότε εφαρμόζεται η εντολή “Shrinkwrap”. Η εντολή αυτή περικλείει τις εξωτερικές επιφάνειες του αντικείμενου και δημιουργεί ένα αντικείμενο μειωμένης περιπλοκότητας αφαιρώντας λεπτομέρειες που επιδρούν αρνητικά στο αντικείμενο κατά την διάρκεια της μελέτης, μειώνοντας έτσι το μέγεθος του αρχείου. Ως ορίσματα δέχεται μία τιμή που καθορίζει την μέγιστη απόσταση μεταξύ των περιοχών που θεωρούνται κενές και όποιες αποστάσεις είναι μεγαλύτερες από αυτό το όρισμα θεωρούνται αποδεκτές καθώς και ένα κατώφλι γωνίας όπου καθορίζει την λείανση του αντικείμενου, οποιαδήποτε γωνία ξεπερνάει αυτό το όριο δεν θα εξομαλυνθεί.

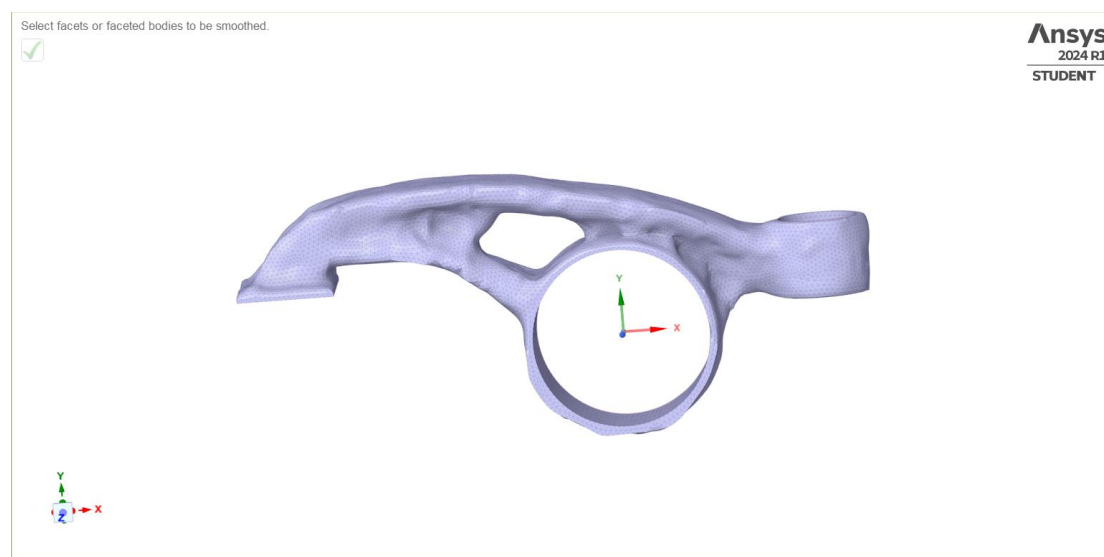


**Εικόνα 3-32 Εφαρμογή εντολής "Shrinkwrap"**

Στην συνέχεια εφαρμόζεται η εντολή "Smooth". Μέσω την εντολής αυτής επιτυγχάνεται μία περαιτέρω εκλέπτυνση των περιοχών όπου έχει αφαιρεθεί υλικό κατά την τοπολογική βελτιστοποίηση. Αντίστοιχα, όπως και στην εντολή "Shrinkwrap" έτσι και τώρα χρησιμοποιείται σαν κατώφλι το όρισμα μίας γωνίας και σε σημεία όπου στοιχεία ενώνονται σε γωνίες άνω του ορίου δεν επηρεάζονται από την εντολή. Υπάρχουν τρία διαφορετικά εργαλεία για την εκτέλεση την εντολή:

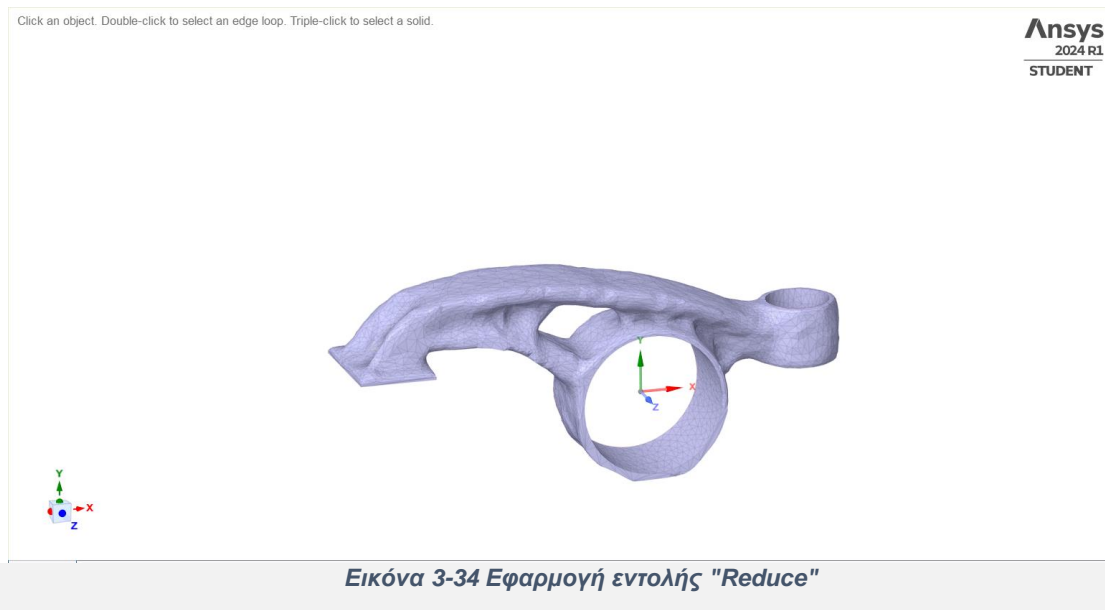
- Flatten peaks: όπου λειτουργεί τοπικά σε ελαφρώς τραχιές επιφάνειες.
- Add facets: όπου επιτρέπει στα στοιχεία των επιφανειών να μετακινούνται και κατά αυτόν τον τρόπο αποδίδει πιο ομαλά αποτελέσματα αυξάνοντας όμως το πλήθος των στοιχείων του πλέγματος.
- Volume aware: όπου λειαίνει τις τραχιές επιφάνειες διατηρώντας το πλήθος των στοιχείων του πλέγματος

Για τις απαιτήσεις της διπλωματικής επιλέγετε το εργαλείο "Add facets" με κατώφλι γωνίας ίσο με  $180^\circ$ .

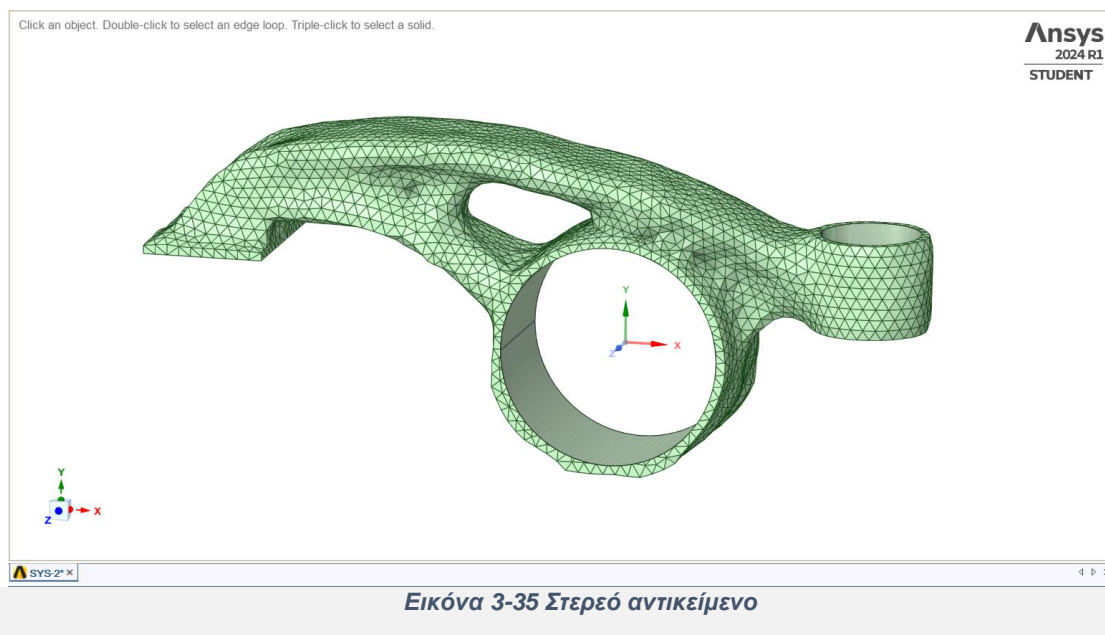


Εικόνα 3-33 Εφαρμογή εντολής "Smooth"

Στην συνέχεια επειδή το πλήθος των στοιχείων έχει αυξηθεί θα πρέπει να εφαρμοστεί εντολή όπου θα μειώνει το πλήθος των στοιχείων (Εικόνα 3-34). Κατά την εντολή αυτή δέχεται σαν ορίσματα το ποσοστό της μείωσης που είναι επιθυμητό να επιτευχθεί, ίσο με 100%, αλλά και την μέγιστη απόκλιση όπου ελέγχει την απόσταση των στοιχείων από τις πραγματικές ακμές του αντικειμένου ίσο με 0,05 mm.



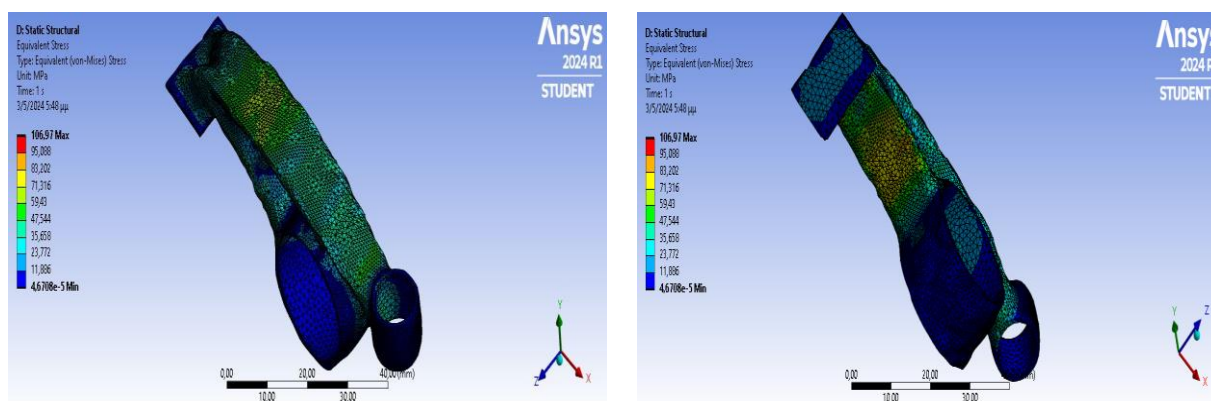
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-34 το πλέγμα των επιφανειών είναι ακανόνιστο, για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα αυτό εφαρμόζουμε ξανά την εντολή "Shrinkwrap". Εφόσον πραγματοποιηθεί η εντολή τότε το μοντέλο μετατρέπεται από αρχείο τριγωνικών επιφανειών (STL) σε στερεό προκειμένου να πραγματοποιηθεί η τοπολογική ανάλυση.



Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία την εκλέπτυνσης των επιφανειών το αντικείμενο είναι έτοιμο για την στατική ανάλυση. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με την πρώτη στατική ανάλυση με μερικές διαφοροποιήσεις.

Αρχικά, κατά την εισαγωγή του υλικού επιλέγεται το νέο υλικό που έχει προκύψει από την ομογενοποίηση, κατά αυτό τον τρόπο ενσωματώνονται οι ιδιότητες της εσωτερικής πλεγματικής δομής στο βελτιστοποιημένο εξάρτημα χωρίς την απαίτηση

δημιουργίας της εσωτερικής πλεγματικής δομής. Κατά αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία αυξημένων στοιχείων πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Στην συνέχεια κατασκευάζεται νέο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας τις ίδιες συνθήκες με που ορίστηκαν και στο Κεφάλαιο 3.2.2 δημιουργώντας συνολικά 106.567 κόμβους και 63.803 στοιχεία. Τέλος εφαρμόζεται η δύναμη και οι στηρίξεις στις επιφάνειες που είχαν οριστεί προηγουμένως προκειμένου να λάβουμε τα αποτελέσματα από την στατική ανάλυση. Παρατηρείται ότι το βελτιστοποιημένο αντικείμενο δέχεται μέγιστη τάση ίση με 107 MPa, στην ίδια επιφάνεια όπου είχε παρατηρηθεί μέγιστη τάση και στην αρχική στατική ανάλυση.



Εικόνα 3-36 Κατανομή τάσεων Von-Mises

### 3.3 Περιπτώσεις φορτίσεων

Η εξέταση διαφορετικών περιπτώσεων φόρτισης αποτελεί μία κρίσιμη διαδικασία για έναν μηχανικό όσον αφορά την σχεδίαση ενός εξαρτήματος. Οι έλεγχοι αυτοί μπορούν να διασφαλίσουν την ασφαλή λειτουργία του εξαρτήματος μελετώντας διαφορετικές φορτίσεις και διασφαλίζοντας ότι δεν θα επέλθει αστοχία. Κατά αυτόν τον τρόπο επιλέγονται τα κατάλληλα υλικά αλλά και μέθοδοι κατασκευής έτσι ώστε να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση των σχεδίων σε ζητήματα αντοχής και κόστους.

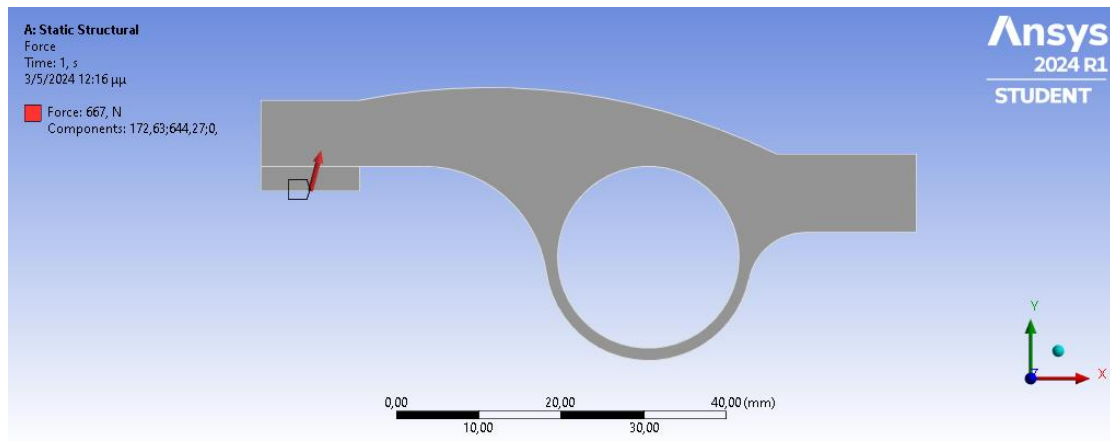
Στην παρούσα φάση της διπλωματικής λήφθηκαν οι εξής περιπτώσεις φορτίσεων:

- Περίπτωση 1: Περιστροφή της γωνίας δύναμης από την βαλβίδα κατά 15 μοίρες
- Περίπτωση 2: Περιστροφή της γωνίας δύναμης από την βαλβίδα κατά 30 μοίρες
- Περίπτωση 3: Περιστροφή της γωνίας δύναμης από την βαλβίδα κατά 45 μοίρες

Κατά την εκπόνηση των διαφορετικών περιπτώσεων φόρτισης διατηρήθηκε το μέγεθος στοιχείων του πλέγματος και η ροή εργασιών παρέμεινε η ίδια, όπως περιεγράφηκε στο παραπάνω κεφάλαιο.

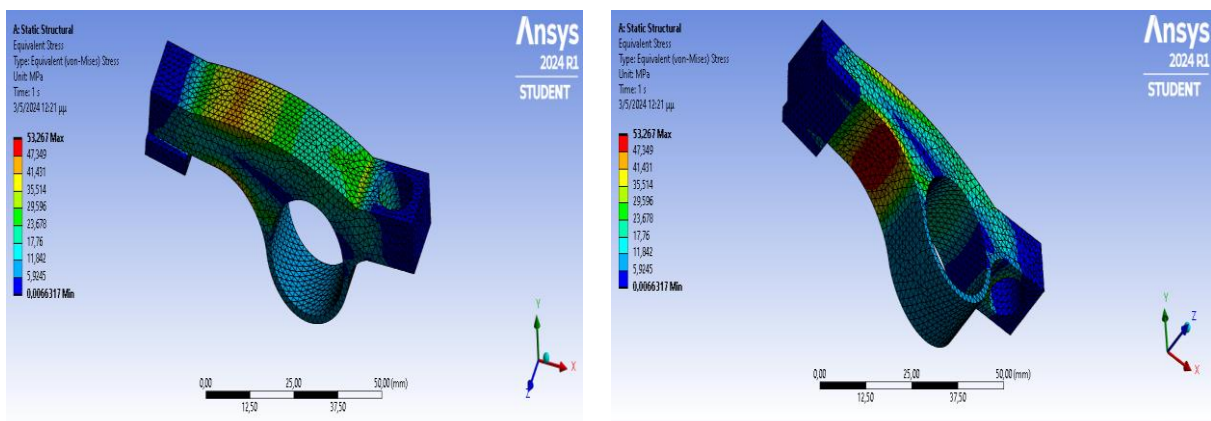
#### Περίπτωση 1:

Ξεκινώντας από την περίπτωση 1, γωνία της δύναμης έχει περιστραφεί κατά 15 μοίρες από τον κατακόρυφο άξονα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-37, με συνιστώσα δύναμη στον άξονα X ίση με 172,63 N και στον Y 644,27 N.

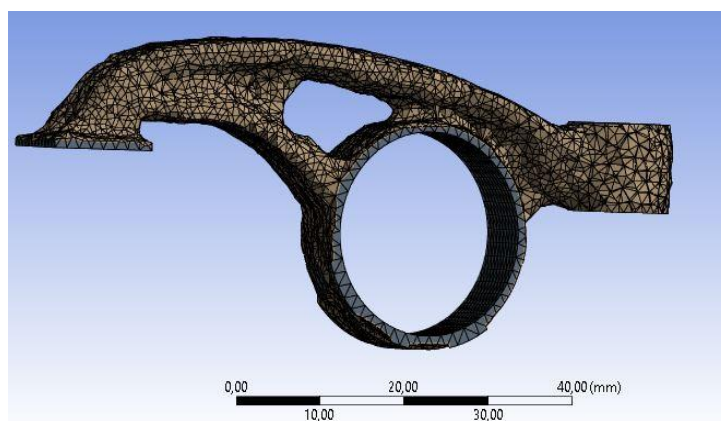


**Εικόνα 3-37 Εφαρμογή δύναμης 15 μοιρών από τον κατακόρυφο άξονα**

Εφόσον έχουν οριστεί οι οριακές συνθήκες τότε πραγματοποιείται η στατική ανάλυση και η τοπολογική βελτιστοποίησης. Στην Εικόνα 3-38 παρατηρείται η κατανομή των τάσεων του εξαρτήματος ενώ στην Εικόνα 3-39 βρίσκεται το βελτιστοποιημένο αντικείμενο.



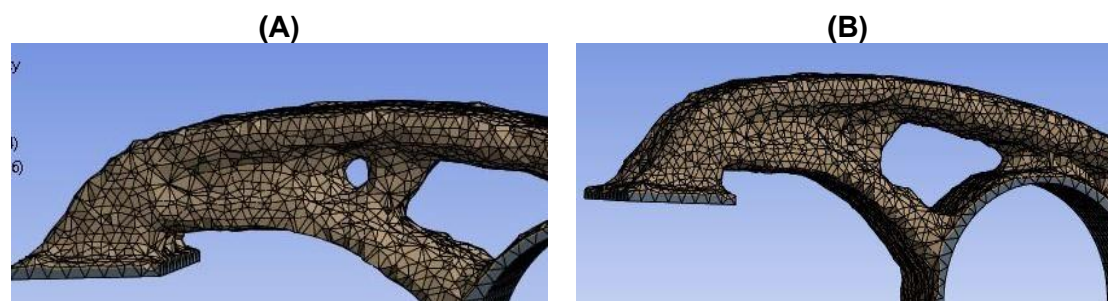
**Εικόνα 3-38 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης**



**Εικόνα 3-39 Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης**

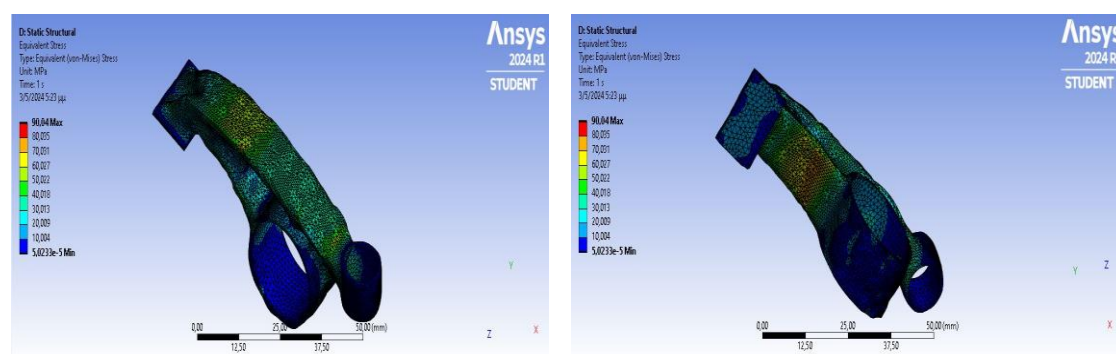


Από την συλλογή των αποτελεσμάτων παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που δέχεται το αντικείμενο ανέρχεται στα 53 MPa με τις περιοχές όπου δέχεται μέγιστη τάση να μην αλλάζει σημαντικά σε σύγκριση με την αρχική μελέτη. Επίσης μικρή αλλαγή παρουσιάζει το αποτέλεσμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης όπου δεν παρατηρείται μία περιοχή όπου είχε αφαιρεθεί πλήρως το υλικό (Εικόνα 3-40).



Εικόνα 3-40 Α) αποτέλεσμα αρχικής περίπτωσης φορτίσεως, Β) αποτέλεσμα πρώτης περίπτωσης φορτίσεως

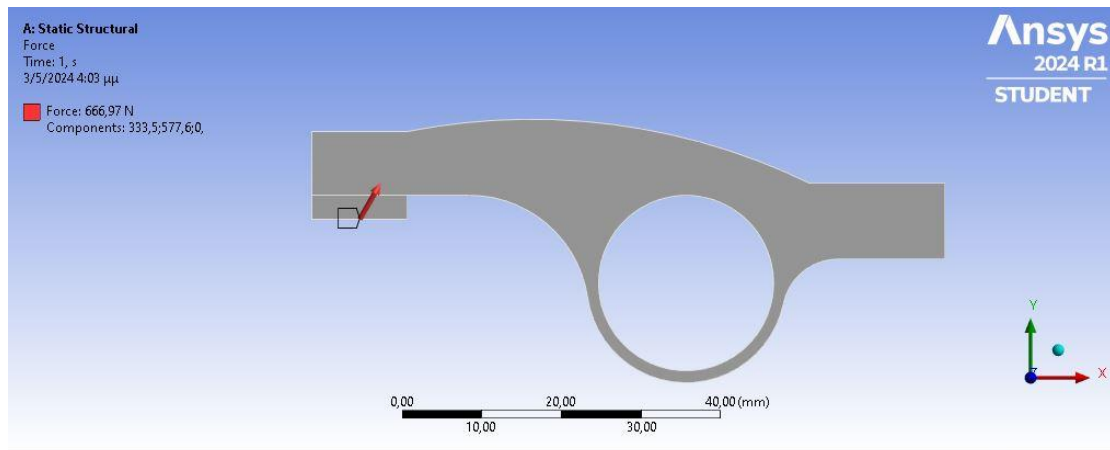
Κατά την επαλήθευση του τοπολογικά βελτιστοποιημένου εξαρτήματος φάνηκε ότι το αντικείμενο δέχεται μέγιστη τάση ίση με 90 MPa δύναμη μικρότερη σε σύγκριση με την αρχική περίπτωση ενώ οι περιοχές εφαρμογής των τάσεων φαίνεται να δρουν σε παρόμοιες περιοχές.



Εικόνα 3-41 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης

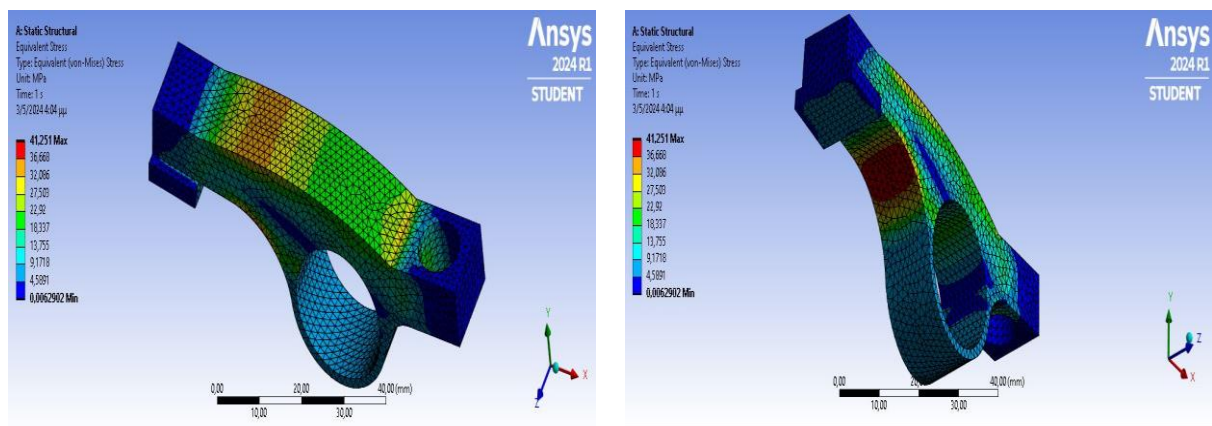
## Περίπτωση 2:

Στην δεύτερη περίπτωση φορτίσεων γωνία της δύναμης έχει περιστραφεί κατά 30 μοίρες από τον κατακόρυφο άξονα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-42, με συνιστώσα δύναμη στον άξονα X ίση με 333,5 N και στον Y 577,6 N.

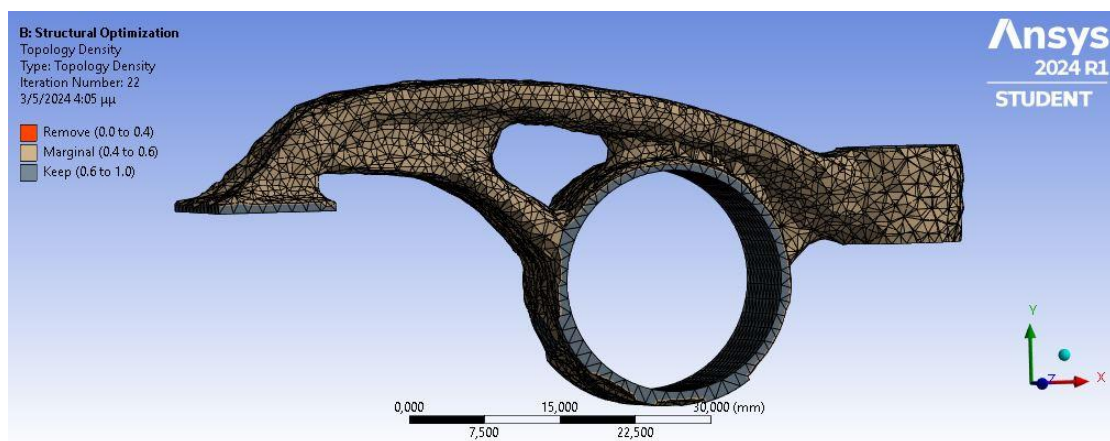


**Εικόνα 3-42 Εφαρμογή δύναμης 30 μοιρών από τον κατακόρυφο άξονα**

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την στατική ανάλυση και την τοπολογική βελτιστοποίησης απεικονίζονται στις Εικόνες 3-38 και 3-39 αντίστοιχα.



**Εικόνα 3-43 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης**

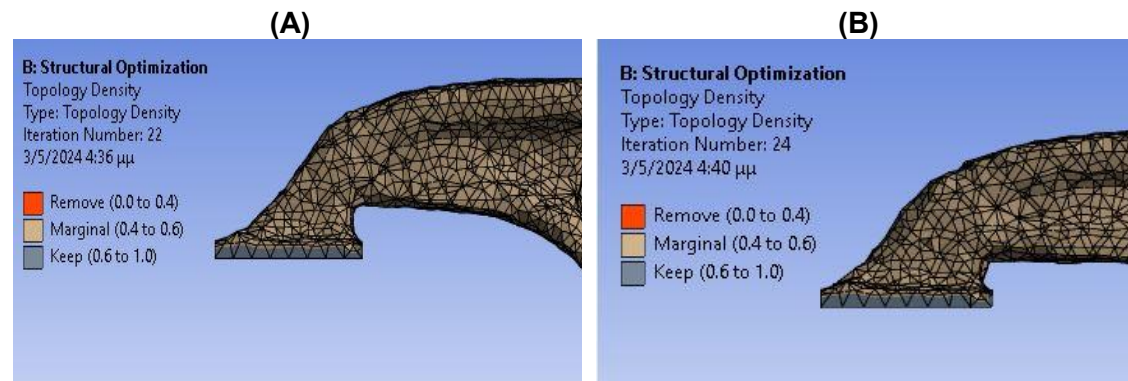


**Εικόνα 3-44 Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης**

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, για την στατική ανάλυση το εξάρτημα δέχεται μέγιστη τάση 41,2 MPa, με τις περιοχές όπου δέχεται μεγαλύτερες τάσεις να παραμένουν ίδιες με αυτές της αρχικής μελέτης. Ωστόσο, παρατηρείται μία αύξηση

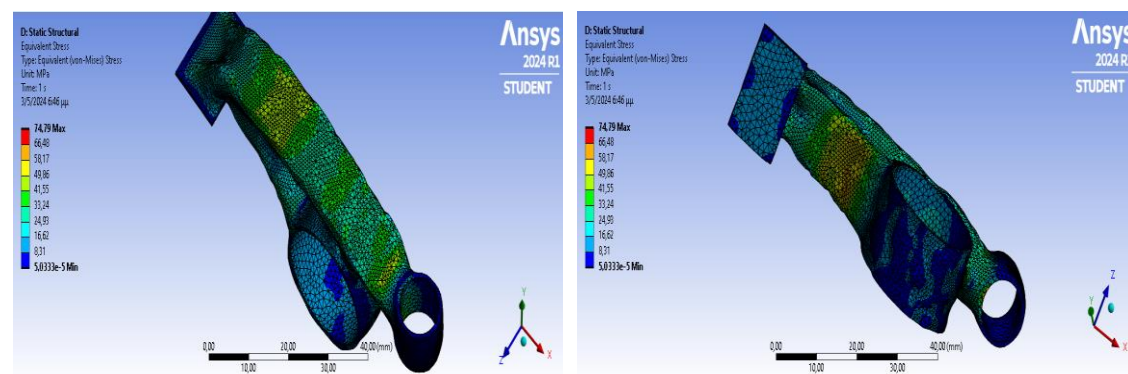


στην τάση που δέχεται το εξάρτημα στην επάνω επιφάνειά του σε σχέση με την αρχική μελέτη. Κατά την τοπολογική βελτιστοποίηση, δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά σε σχέση με την πρώτη περίπτωση φόρτισης παρά μόνο μία διαφορά στην κλίση του μπροστινού μέρους του εξαρτήματος, υποδηλώνοντας της εξάρτηση του αποτελέσματος από την κλίση της δύναμης.



**Εικόνα 3-45 (Α) Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης περίπτωση 2, (Β) Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης περίπτωση 1**

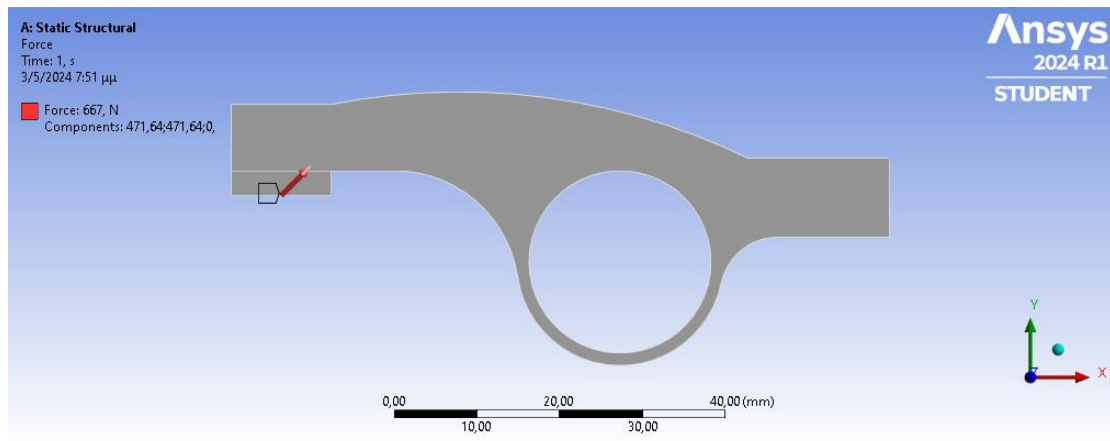
Κατά την επαλήθευση του τοπολογικά βελτιστοποιημένου εξαρτήματος φάνηκε ότι το αντικείμενο δέχεται μέγιστη τάση ίση με 74,8 MPa, τάση μικρότερη σε σύγκριση με την περίπτωση 1 ενώ οι περιοχές εφαρμογής των τάσεων φαίνεται να δρουν σε παρόμοιες περιοχές.



**Εικόνα 3-46 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης**

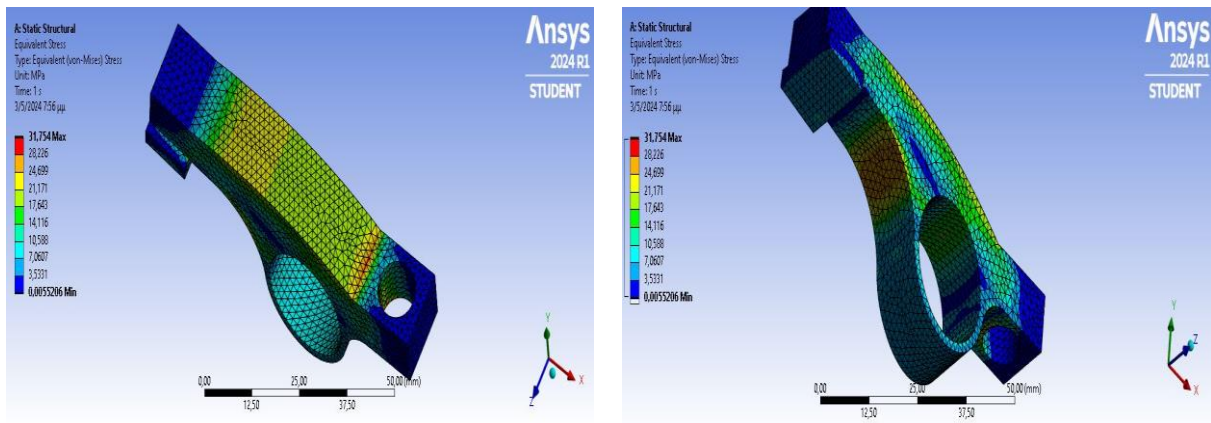
### Περίπτωση 3:

Στην τρίτη περίπτωση φορτίσεων γωνία της δύναμης έχει περιστραφεί κατά 45 μοίρες από τον κατακόρυφο άξονα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-47, με τις συνιστώσες στους δύο άξονες να είναι ίσες με 471,6 N.

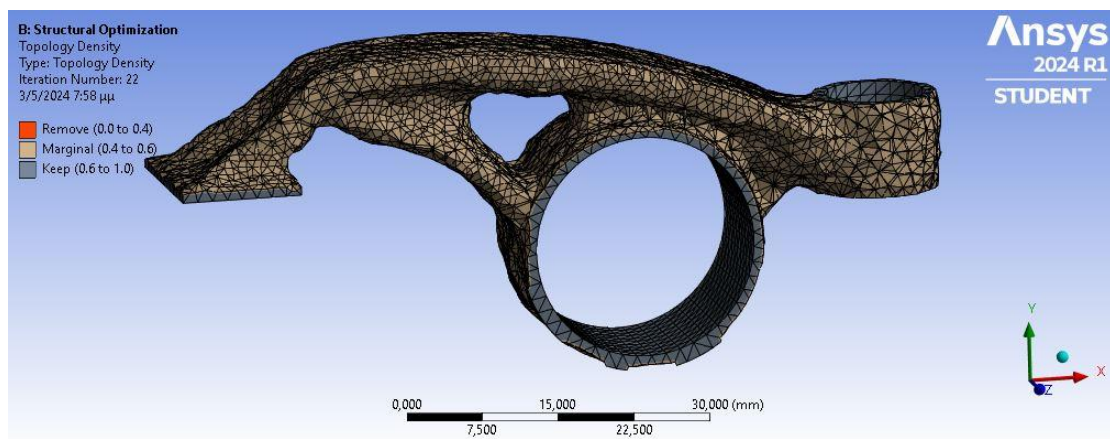


**Εικόνα 3-47 Εφαρμογή δύναμης 45 μοιρών από τον κατακόρυφο άξονα**

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την στατική ανάλυση και την τοπολογική βελτιστοποίησης απεικονίζονται στις Εικόνες 3-48 και 3-49 αντίστοιχα.



**Εικόνα 3-48 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης**

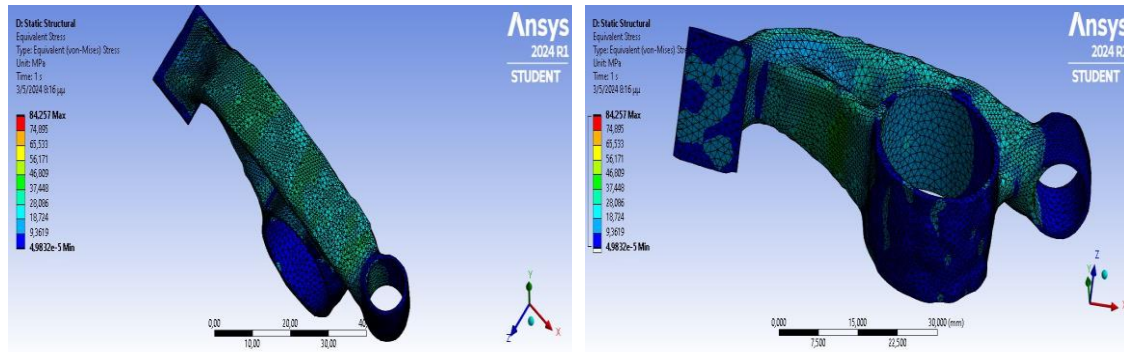


**Εικόνα 3-49 Αποτέλεσμα τοπολογικής βελτιστοποίησης**

Υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης το εξάρτημα φαίνεται να δέχεται μέγιστη τάση ίση με 31,7 MPa, με την μέγιστη τάση να εντοπίζεται αυτή τη φορά κοντά στο σημείο πρόσδεσης του διωστήρα, ενώ το αποτέλεσμα της τοπολογικής

βελτίωσης σημειώνει μεγαλύτερη διαφορά σε σχέση με τις υπάρχουσες περιπτώσεις φορτίσεων.

Στο τελικό στάδιο της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων το βελτιστοποιημένο εξάρτημα φαίνεται να δέχεται μέγιστη τάση 84 MPa.



Εικόνα 3-50 Αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης

## 4. Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από την στατική ανάλυση των τοπολογικά βελτιστοποιημένων μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα στην πρώτη στήλη φαίνονται τα αποτελέσματα για την στατική ανάλυση του αρχικού μοντέλου για κάθε περίπτωση φόρτισης ενώ, στην δεύτερη στήλη βρίσκονται τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης για κάθε περίπτωση φόρτισης των βελτιστοποιημένων εξαρτημάτων.

Παρατηρήθηκε επίσης, ότι η τέταρτη μελέτη (γωνία κλίσης της δύναμης 45 μοιρών) αποδίδει την μεγαλύτερη αύξηση στην μέγιστη τάση όπου δέχεται το εξάρτημα, με συνολική αύξηση πάνω από 250% σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Ελάχιστη αύξηση παρατηρήθηκε στην πρώτη περίπτωση φόρτισης (γωνία κλίσης της δύναμης 15 μοιρών) με αύξηση 170% ενώ η αρχική περίπτωση φόρτισης παρουσίασε αύξηση 172% και η δεύτερη περίπτωση (γωνία κλίσης της δύναμης 30 μοιρών) 182%.

**Πίνακας 4 Μέγιστες τάσεις εξαρτημάτων**

Κλίση από άξονα Y	Στατική ανάλυση αρχ. εξαρτήματος (MPa)	Στατική ανάλυση βελ. εξαρτήματος (MPa)
0°	62,24	107
15°	53	90
30°	41,2	74,8
45°	31,7	84

## 5. Συμπεράσματα

Οι αλγόριθμοι της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τις μεθόδους της κατασκευής προσθέτων αποτελούν ισχυρά εργαλεία για έναν μηχανικό. Η σχεδιαστική ελευθερία που αποδίδει η κατασκευή προσθέτων βοηθάει στην κατασκευή περίπλοκων δομών όπου μπορεί να προκύψουν από τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης, ξεπερνώντας τους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων κατασκευής, δημιουργώντας εξαρτήματα με σημαντική δομική αποδοτικότητα αλλά και μειωμένου βάρους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να κατασκευαστεί ένα αντικείμενο, με μειωμένο βάρος το οποίο θα αποδίδει σημαντικά δομικά χαρακτηριστικά, με σκοπό να ανταπεξέρχεται στις φορτίσεις που θα δέχεται κατά την λειτουργία του, διατηρώντας μέγιστες τάση κάτω του ορίου διαρροής. Οι διαφορετικές περιπτώσεις φορτίσεων διασφαλίζουν την αντοχή του εξαρτήματος σε διαφορετικές φορτίσεις. Η μελέτη έδειξε ότι ανάλογα με την κλίση της δύναμης κατευθύνεται και η συσσώρευση του όγκου του αντικειμένου. Ο σκοπός της μελέτης αποσκοπεί στη δημιουργία ενός εξαρτήματος έτοιμου για κατασκευή εφαρμόζοντας τους σχεδιαστικούς κανόνες της παραγωγής προσθέτων (DfAM).

## Βιβλιογραφία

- [1] S. Jeur and R. R. Arakerimath, "Comparative Analysis and 3D Printing of Rocker Arm of 4 Cylinder Engine with Minimum Weight," no. June, pp. 2751–2753, 2019.
- [2] I. Journal, E. Sciences, and I. Chief, "International Journal of Engineering Sciences & Research Technology IJESRT Chief Editor," vol. 8, no. 1, pp. 5–8, 2019.
- [3] S. Bacha, P. Swaminadhan, and D. Deshpande, "Design and Static Structural Analysis of Rocker Arm in I . C .," vol. 7, no. 4, pp. 755–763, 2018.
- [4] A. Karki, A. R. Jha, R. Jaiswal, S. Rajgadga, A. Basnet, and D. Das, "Design and Analysis of Rocker Arm by Finite Element Method using ANSYS," vol. 2, no. 4, pp. 2–7, 2016.
- [5] Nagaraja A and Suresh Babu G, "Design and Optimization of Four Wheeler Rocker Arm for Neck and Hole," *Int. J. Mag. Eng. Technol. Manag. Res.*, vol. 2 (2015), no. 7, p. 8, 2015.
- [6] M. N. Collins, M. Culebras, and G. Ren, "The use of lignin as a precursor for carbon fiber–reinforced," *Micro Nanolignin Aqueous Dispersions Polym. Interact. Prop. Appl.*, pp. 237–250, 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-823702-1.00011-6.
- [7] A. Mishra, "Stress Analysis of Glass / HDPE Composite Rocker Arm by Finite Element Method," vol. 3, no. 3, pp. 212–218, 2014.
- [8] N. M. Barkoula, B. Alcock, N. O. Cabrera, and T. Peijs, "Flame-Retardancy Properties of Intumescent Ammonium Poly(Phosphate) and Mineral Filler Magnesium Hydroxide in Combination with Graphene," *Polym. Polym. Compos.*, vol. 16, no. 2, pp. 101–113, 2008, doi: 10.1002/pc.
- [9] T. Mushiri and C. Mbohwa, "Finite element analysis of a car rocker arm," pp. 687–694, 2015.
- [10] D. R. Kullayappa, M. N. R. Krishna, M. A. Chakravarthy, and R. R. Chandra, "Analysis and Optimization of Rocker ARM," vol. 7, no. 9, pp. 14917–14925, 2017.
- [11] J. F. Tsai, J. G. Carlsson, D. Ge, Y. C. Hu, and J. Shi, "Optimization Theory, Methods, and Applications in Engineering 2014," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/345858.
- [12] I. Ntintakis, "“ Topology optimization of an object for additive manufacturing ,”" TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE, 2022. [Online]. Available: <http://purl.tuc.gr/dl/dias/D9E7629F-59BF-4646-BD4E-A2FDCDF530D9>
- [13] N. T. Kaminakis, "Τοπολογική βελτιστοποίηση πολυμορφικών κατασκευών και μηχανισμών με χρήση ολικής και πολυκριτήριας βελτιστοποίησης," TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE, 2015. [Online]. Available: <http://purl.tuc.gr/dl/dias/1D4839A8-0776-4C3E-B75F-D7010299A9A5>
- [14] P. K. Srivastava and S. Shukla, "Structural Optimization Methods : A General Review," pp. 88–92, 2017.
- [15] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, "A case study on topology optimized design for additive manufacturing," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 276, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/276/1/012026.

- [16] G. Kazakis, I. Kanellopoulos, S. Sotiropoulos, and N. D. Lagaros, "Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing," *Heliyon*, vol. 3, no. 10, p. e00431, 2017, doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00431.
- [17] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, "Topology optimization by distribution of isotropic material," *Topol. Optim.*, pp. 1–69, 2004, doi: 10.1007/978-3-662-05086-6\_1.
- [18] S. N. Reddy, V. Maranan, T. W. Simpson, T. Palmer, and C. J. Dickman, "Application of topology optimization and design for additive manufacturing guidelines on an automotive component," *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 2A-2016, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1115/DETC2016-59719.
- [19] C. Emmelmann, P. Sander, J. Kranz, and E. Wycisk, "Laser additive manufacturing and bionics: Redefining lightweight design," *Phys. Procedia*, vol. 12, no. PART 1, pp. 364–368, 2011, doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.046.
- [20] P. Zeleny and M. Cadek, "Topology optimization of a bicycle part," *MM Sci. J.*, vol. 2015, no. OCTOBER, pp. 696–700, 2015, doi: 10.17973/MMSJ.2015\_10\_201538.
- [21] A. Angrish, "A critical analysis of additive manufacturing technologies for aerospace applications," *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, no. July, 2014, doi: 10.1109/AERO.2014.6836456.
- [22] A. L. Jardini *et al.*, "Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created using additive manufacturing," *J. Cranio-Maxillofacial Surg.*, vol. 42, no. 8, pp. 1877–1884, 2014, doi: 10.1016/j.jcms.2014.07.006.
- [23] Y. Tang and Y. F. Zhao, "A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 569–590, 2016, doi: 10.1108/RPJ-01-2015-0011.
- [24] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. 2019. doi: 10.1007/978-981-13-8281-9\_2.
- [25] EOS GmbH, "EOS Aluminium AlSi10Mg Material Data Sheet EOS Aluminium AlSi10Mg Good Strength & Dynamic Load Bearing Capacity," 2022.
- [26] A. du Plessis *et al.*, "Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 125, no. April 2021, p. 100918, 2022, doi: 10.1016/j.pmatsci.2021.100918.
- [27] A. Arjunan, M. Singh, A. Baroutaji, and C. Wang, "Additively manufactured AlSi10Mg inherently stable thin and thick-walled lattice with negative Poisson's ratio," *Compos. Struct.*, vol. 247, no. April, p. 112469, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112469.
- [28] X. Wang, Q. Yue, and X. Liu, "Intelligent mesh generation for crack simulation using graph neural networks," *Comput. Struct.*, vol. 292, no. November 2023, p. 107234, 2024, doi: 10.1016/j.compstruc.2023.107234.
- [29] A. A. Zadpoor, "Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials," *Acta Biomater.*, vol. 85, pp. 41–59, 2019, doi: 10.1016/j.actbio.2018.12.038.
- [30] T. Maconachie *et al.*, "SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges," *Mater. Des.*, vol. 183, p. 108137, 2019, doi:



10.1016/j.matdes.2019.108137.

- [31] A. Zargarian, M. Esfahanian, J. Kadkhodapour, S. Ziaei-Rad, and D. Zamani, "On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 100, no. January, pp. 225–232, 2019, doi: 10.1016/j.tafmec.2019.01.012.