



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

**ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ
ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Από

ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΣΑΒΟΥΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΡΑΛΕΚΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2021

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου. Απαγορεύεται η αναδημοσίευση, η αποθήκευση και η αναπαραγωγή και μεταβίβαση τμήματος ή ολόκληρου του παρόντος έργου χωρίς την προηγούμενη άδεια του συγγραφέα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

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

Στην συγκεκριμένη εργασία, έγινε αρχικά μία περιγραφή των βασικών υπολογιστικών εργαλείων (CAD,CAE,CAM) που χρησιμοποιούνται σε κάθε μελέτη τοπολογικής βελτιστοποίησης και κατασκευής μηχανολογικών εξαρτημάτων. Στη συνέχεια αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά της τοπολογικής βελτιστοποίησης και πιο συγκεκριμένα της μεθόδου SIMP, που χρησιμοποιείται από τα περισσότερα εμπορικά λογισμικά. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας, αξιοποιήθηκαν δύο βασικά εξαρτήματα από τον ογκομετρικό μηχανισμό βιομηχανικής μηχανής πλήρωσης υγρών προϊόντων. Συγκεκριμένα, έγινε ο σχεδιασμός, η στατική ανάλυση και η βελτιστοποίηση των εμβόλων του μηχανισμού και του φορείου τους, με τη χρήση των λογισμικών SOLIDWORKS 2020 και SOLIDWORKS Simulation 2020 αντίστοιχα. Ακολούθως, έγινε η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω επόμενης στατικής ανάλυσης για τα δύο εξαρτήματα. Τέλος πραγματοποιήθηκε η μελέτη κατασκευασιμότητας των βελτιστοποιημένων εξαρτημάτων, αναλύθηκαν οι εναλλακτικές επιλογές και έγινε κατασκευή του βελτιστοποιημένου εμβόλου με προσθετική μέθοδο FDM.

ABSTRACT

The rising need of the modern construction industry for short and efficient new product development cycles (NPD), combined with the requirement for minimum consumption of resources, have led to the use of specialized methodology and technological tools. At the same time, the intense competition pushes the manufacturers to achieve products with high performance and increased structural efficiency. So inevitably, industry interest has shifted to optimization processes and especially to the design stage, before any prototyping process. The goal of optimization is the manufacturing of products that will have the minimum possible mass, the maximum possible robustness and will be feasible, functional and safe solutions. One of the optimization methods that is applied in most cases and is recognized for the quality of its results, is that of topology optimization.

In this work, a description of the basic computational tools (CAD, CAE, CAM) utilized in every topology optimization and construction study of mechanical components, was initially made. Consequently, the characteristics of topology optimization were analyzed, and more elaborately those of the SIMP method, used by most commercial software. For the application of the methodology, two main components of the volumetric mechanism of an automatic industrial liquid filling machine were utilized. Specifically, the design, static analysis and optimization of the pistons and their base plate were carried out, using SOLIDWORKS 2020 and SOLIDWORKS Simulation 2020 software, respectively. Subsequently, the results of topology optimization were confirmed through another static analysis for each component. Finally, the manufacturability study of the optimized components was carried out, the alternatives were analyzed, and the optimized piston was constructed using the FDM additive manufacturing method.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Καραλέκα Δημήτριο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και να συνεργαστώ μαζί του. Η υποστήριξη και η διάθεση του να με βοηθήσει, πριν και κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής είναι συγκινητική.

Θέλω να ευχαριστήσω την Επίκουρη Καθηγήτρια Χατζηνταή Νικολέτα για τη φιλική προσφορά της για βοήθεια κατά την εκπόνηση της διπλωματικής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και Γενικό Διευθυντή της εταιρείας AlfaSolid, κ. Μανώλη Δημήτριο, για τη μη κερδοσκοπική και άμεση παροχή των Ακαδημαϊκών λογισμικών SOLIDWORKS που χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, που είναι πάντα δίπλα μου σε κάθε στάδιο της ζωής μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης.....	8
2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ CAD, CAE ΚΑΙ CAM	11
2.1 Εργαλεία Σχεδιασμού – CAD	11
2.2 Εργαλεία Μελέτης – CAE	13
2.3 Εργαλεία Κατασκευής – CAM	15
3. ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	18
3.1 Διαδικασία Τοπολογικής Βελτιστοποίησης.....	18
3.2 Γενικευμένο Πρόβλημα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης	22
3.3 Μέθοδος Τοπολογικής Βελτιστοποίησης SIMP	22
3.3.1 Ανάλυση Μεθόδου SIMP	22
3.3.2 Στόχος Μεγιστοποίησης Δυσκαμψίας	25
3.3.3 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	26
4. ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ	27
4.1 Βιομηχανικός Μηχανισμός Ογκομέτρησης.....	27
4.2 Τοπολογική Βελτιστοποίηση Φορείου Εμβόλων	29
4.3 Τοπολογική Βελτιστοποίηση Εμβόλου	35
5. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ	40
5.1 Μελέτη Κατασκευασιμότητας Φορείου	40
5.2 Μελέτη Κατασκευασιμότητας Εμβόλου	41
5.3.1 Κατασκευή Εμβόλου με Προσθετική Μέθοδο FDM	43
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	46
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Συγκριση βελτιστοποίησης μεγέθους, σχήματος και τοπολογίας	10
Εικόνα 2: SOLIDWORKS CAD, CAE	11
Εικόνα 3: Στάδια τυπικής μελέτης CAE.....	14
Εικόνα 4: Εκτέλεση CAM με το λογισμικό SolidCAM	15
Εικόνα 5: Παράδειγμα κώδικα G.....	16
Εικόνα 6: Γεωμετρική μετάβαση από αρχικό μοντέλο σε μοντέλο TO	18
Εικόνα 7: Βελτιστοποιημένη διάταξη υλικού φορτισμένης δοκού	23
Εικόνα 8: Διάταξη εκροής και κύλινδροι ογκομετρικού μηχανισμού.....	27
Εικόνα 9: Έμβολα ογκομετρικού μηχανισμού	28
Εικόνα 10: Ογκομετρικός μηχανισμός	28
Εικόνα 11: Φορείο εμβόλων	29
Εικόνα 12: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά τη φόρτιση του φορείου εμβόλων.....	30
Εικόνα 13: Μετατόπιση κατά τη φόρτιση του φορείου εμβόλων	31
Εικόνα 14:Material Mass Plot φορείου εμβόλων.....	32
Εικόνα 15: Απεικόνιση διακριτοποιημένου σώματος (smoothed mesh).....	32
Εικόνα 16: Συσσωμάτωμα σώματος εξαγωγής και τροποποιημένου πρωτότυπου.....	33
Εικόνα 17: Αναπτυσσόμενες τάσεις βελτιστοποιημένου φορείου εμβόλων.....	34
Εικόνα 18:Μετατόπιση βελτιστοποιημένου φορείου εμβόλων.....	34
Εικόνα 19: Έμβολο ογκομετρικού μηχανισμού με εξαρτήματα	35
Εικόνα 20:Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά τη φόρτιση του εμβόλου	36
Εικόνα 21: Μετατόπισης κατά τη φόρτιση του εμβόλου	36
Εικόνα 22:Material Mass Plot εμβόλου.....	37
Εικόνα 23: Διακριτοποιημένο-βελτιστοποιημένο σώμα και τροποποιημένο CAD	38
Εικόνα 24:Αναπτυσσόμενες τάσεις βελτιστοποιημένου εμβόλου.....	39
Εικόνα 25:Μετατόπισης βελτιστοποιημένου εμβόλου	39
Εικόνα 26: Φορείο εμβόλων με διαμόρφωση οπής που πρέπει να αφαιρεθεί.....	41
Εικόνα 27:Φορείο εμβόλων στο οποίο έχει αφαιρεθεί η διαμόρφωση οπής.....	41
Εικόνα 28:Τομή βελτιστοποιημένου εμβόλου.....	41
Εικόνα 29: Αναπτυσσόμενες τάσεις-μετατοπίσεις μοντέλου τórνευσης.....	42
Εικόνα 30:Αναπτυσσόμενες τάσεις-μετατοπίσεις μοντέλου κέντρου κατεργασίας....	42
Εικόνα 31: FDM 3D Printer Prusa i3 MK3S.....	43
Εικόνα 32: Μοντέλο εμβόλου με στηρίγματα στο περιβάλλον του PrusaSlicer.....	44
Εικόνα 33:Τομή μοντέλου με στηρίγματα.....	45
Εικόνα 34:Εκτυπωμένο έμβολο με στηρίγματα και μετά την αφαίρεση τους.....	45

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο προγραμματισμός της καινοτομίας απαιτεί χρόνο και εστιασμένη προσπάθεια για τη μεταφορά ενός προϊόντος από την ιδέα στην αγορά. Απαραίτητες προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί οτιδήποτε ως καινοτόμο είναι η αλλαγή και η βελτίωση. Έτσι μια καινοτομία μπορεί να είναι βελτιωτική και να τροποποιεί τα χαρακτηριστικά ενός υφιστάμενου προϊόντος, ή ριζική προσφέροντας εντελώς νέα προϊόντα που δημιουργούν πρωτοφανείς ανάγκες και προοπτικές. Η διαδικασία ανάπτυξης νέων προϊόντων ή βελτίωσης των υφιστάμενων, στοχεύει όχι μόνο να δημιουργήσει κάτι καινοτόμο, αλλά πάνω απ' όλα να μεγιστοποιήσει την αξία του και να μετριάσει τους κινδύνους αποτυχίας.

Η αξία πρέπει να μεγιστοποιείται τόσο για την αγορά στην οποία απευθύνεται το εκάστοτε προϊόν, όσο και για τον ίδιο τον κατασκευαστή του. Στο πλαίσιο αυτό, η σύγχρονη βιομηχανία δίνει έμφαση στο στάδιο σχεδιασμού των προϊόντων προσπαθώντας να επιτύχει τον κατάλληλο συνδυασμό βάρους, αντοχής και χρόνου παραγωγής. Ο σχεδιασμός προϊόντων με την ελάχιστη πιθανή μάζα και τη μέγιστη στιβαρότητα, είναι ένας απαιτητικός στόχος που προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων και συγκεκριμένη μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση της δομικής απόδοσης των κατασκευών. Έτσι οι διαδικασίες βελτιστοποίησης λαμβάνουν σημαντική θέση στον κύκλο ανάπτυξης νέων προϊόντων και αξιοποιούν όλα τα σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία και τις τεχνολογίες κατασκευής, προκειμένου να επιτύχουν ελάχιστη κατανάλωση υλικού, μέγιστη δομική απόδοση και ασφάλεια.

1.1 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης εξ ορισμού επιδιώκουν να βελτιώσουν τον σχεδιασμό ενός εξαρτήματος ή ενός μηχανισμού προσαρμόζοντας τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης, προκειμένου να πετύχουν ή τουλάχιστον να προσεγγίσουν ικανοποιητικά τους επιθυμητούς στόχους. Οι στόχοι αυτοί στις περισσότερες περιπτώσεις μηχανολογικών εξαρτημάτων, σχετίζονται με την απόδοση της δομής και πιο συγκεκριμένα με την αναλογία μάζας και στιβαρότητας (δυσκαμψίας). Γενικά, η ελαφρύτερη πιθανή δομή με τη μέγιστη πιθανή δυσκαμψία που εξακολουθεί να ικανοποιεί τους λειτουργικούς της στόχους, θεωρείται ως η βέλτιστη λύση. Ταυτόχρονα με την τροποποίηση των σχεδιαστικών μεταβλητών, πραγματοποιείται και ο έλεγχος των πιθανών περιορισμών του προβλήματος έτσι ώστε να μην

παραβιάζεται κανένας, και η εκάστοτε μέθοδος βελτιστοποίησης να καταλήγει σε ένα εφικτό και ασφαλές αποτέλεσμα.

Έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις και μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης που ποικίλλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις και τον τομέα εφαρμογής. Ανεξάρτητα από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης, η πλειονότητα των κατασκευαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις παρακάτω τρεις ευρύτερες κατηγορίες. Η ταξινόμηση τους έχει γίνει βάσει αυξανόμενης πολυπλοκότητας και συχνότητας εφαρμογής, με την τοπολογική βελτιστοποίηση να είναι η πλέον σύγχρονη μέθοδος αντιμετώπισης προβλημάτων βελτιστοποίησης.

1. Βελτιστοποίηση μεγέθους (Size optimization)
2. Βελτιστοποίηση σχήματος (Shape optimization)
3. Βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization)

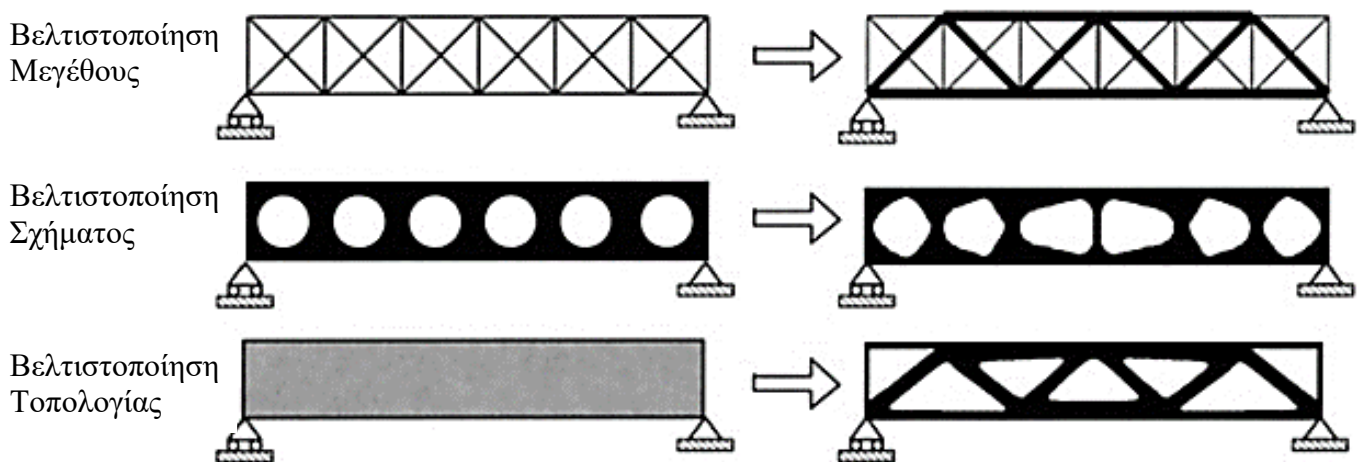
Στη βελτιστοποίηση μεγέθους, προσδιορίζονται οι τιμές επιλεγμένων διαστάσεων που επιτυγχάνουν καλύτερα τους στόχους σχεδίασης ενώ παράλληλα ικανοποιούν τους υφιστάμενους περιορισμούς. Για τυπικές εφαρμογές βελτιστοποίησης της δομής, οι στόχοι θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την ελαχιστοποίηση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης, της ενέργειας παραμόρφωσης, της μετατόπισης και της μάζας ενός αντικειμένου. Ένα ή περισσότερα από αυτά τα μεγέθη μπορούν επίσης να οριστούν ως περιορισμοί. Για μεμονωμένα μηχανολογικά εξαρτήματα, ένας μικρός αριθμός διαστάσεων μπορεί να αποτελεί μέρος του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ειδικότερα όταν ο σχεδιασμός είναι παραμετρικός και υπάρχουν συσχετίσεις μεταξύ των διαστάσεων, οι μεταβλητές μπορούν να μειωθούν σημαντικά. Ωστόσο, για κυψελοειδείς ή πλεγματικές δομές ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού θα μπορούσε να ανέλθει σε χιλιάδες ανάλογα με την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας.

Η βελτιστοποίηση σχήματος ενός εξαρτήματος ή μιας συγκεκριμένης περιοχής του, αποτελεί μια γενίκευση της βελτιστοποίησης μεγέθους. Τυπικά η μέθοδος αυτή βελτιώνει το σχήμα των καμπυλών ή των επιφανειών που οριοθετούν την περιοχή που έχει προσδιοριστεί ως αντικείμενο μελέτης. Έτσι είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές σχεδίασης, τα σημεία ελέγχου των εκάστοτε καμπυλών ή επιφανειών του μοντέλου. Ειδικότερα με την ενσωμάτωση των γεωμετριών NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) στα CAD συστήματα, ο έλεγχος και η περιγραφή σύνθετων καμπυλών γίνεται μια τυποποιημένη διαδικασία. Οι NURBS, είναι μαθηματικές αναπαραστάσεις της τρισδιάστατης γεωμετρίας που μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια οποιοδήποτε σχήμα, από μια απλή 2D γραμμή, κύκλο, τόξο ή καμπύλη έως την πιο περίπλοκη τρισδιάστατη οργανική επιφάνεια ελεύθερης μορφής (freeform). Λόγω της ευελιξίας και της ακρίβειας τους, τα μοντέλα NURBS μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε διαδικασία, από την απεικόνιση και την κίνηση μέχρι την βελτιστοποίηση και την κατασκευή. Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζεται ένας συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων βελτιστοποίησης, έτσι ώστε να επιτευχθούν δομές οι οποίες να έχουν σχήμα ελεύθερης μορφής ή κάποιο τυποποιημένο με συγκεκριμένες διαστάσεις.

Τέλος, η τοπολογική βελτιστοποίηση προσδιορίζει το συνολικό σχήμα, τη διάταξη των δομικών στοιχείων αλλά και τον τρόπο σύνδεσής τους στον χώρο σχεδίασης. Οι βασικές διαφορές μεταξύ της βελτιστοποίησης τοπολογίας και των αντίστοιχων σχήματος ή μεγέθους, οφείλονται στη διαφορετική αρχική διαμόρφωση αλλά και στην επιλογή των μεταβλητών. Οι διαφορές αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές βελτιώσεις της δομικής απόδοσης του μοντέλου. Το ενδιαφέρον, τόσο της επιστημονικής κοινότητας όσο και της προηγμένης βιομηχανίας για την τοπολογική βελτιστοποίηση ως διαδικασία σχεδιασμού για παραγωγή με προσθετικές τεχνολογίες κατασκευής (3D Printing), δικαιολογεί μια πιο αναλυτική εξέταση αυτής της μεθοδολογίας.

Ως παράδειγμα, θεωρείται ένα πρόβλημα σχεδίασης όπου χρήζει δομικής βελτιστοποίησης στο οποίο το σχήμα, το μέγεθος και η τοπολογία ενός προϊόντος διαμορφώνονται ταυτόχρονα ή ξεχωριστά. Αυτές οι έννοιες είναι πολύ σημαντικές για να βρεθεί το καταλληλότερο μέγεθος, σχήμα και κατανομή του υλικού κατά τη διάρκεια ανάπτυξης ενός προϊόντος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1, η βελτιστοποίηση μεγέθους ασχολείται με τη βελτιστοποίηση των γενικών διαστάσεων ενός αντικειμένου (μήκος, πλάτος, ύψος). Αντίθετα, η βελτιστοποίηση του σχήματος στοχεύει στην εύρεση του βέλτιστου σχήματος ενός τμήματος ή υποπεριοχών του αντικειμένου. Σαν συνδυαστικός κρίκος μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων, η τοπολογική βελτιστοποίηση ασχολείται με τη βελτιστοποίηση ολόκληρης της γεωμετρίας του σώματος, συμπεριλαμβάνοντας το μέγεθος και το σχήμα.



Εικόνα 1: Συγκριτική απεικόνιση της βελτιστοποίησης μεγέθους, σχήματος και τοπολογίας (Bendsoe & Sigmund, 2003).

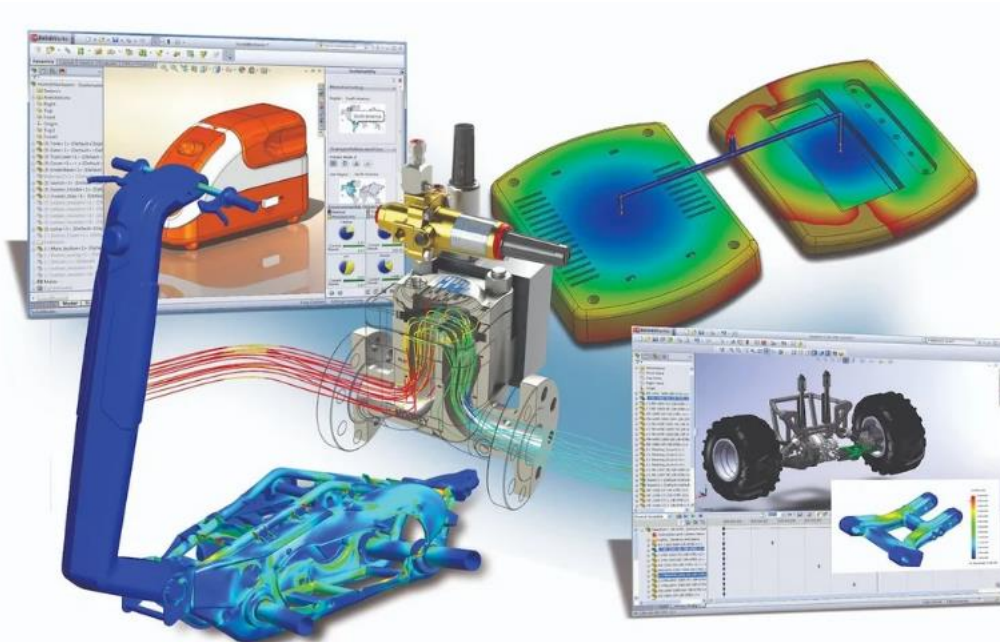
2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ CAD, CAE ΚΑΙ CAM

2.1 Εργαλεία Σχεδιασμού – CAD

Ο σχεδιασμός με τη χρήση υπολογιστή (CAD – Computer Aided Design) αναφέρεται σε υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για να υποστηρίξουν τη διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων σε κάθε είδους βιομηχανία. Τα λογισμικά CAD επιτρέπουν τη δημιουργία ψηφιακών τρισδιάστατων μοντέλων, παρέχοντας τη δυνατότητα ελέγχου όλων των φυσικών ιδιοτήτων του αντικειμένου ή του μηχανισμού πριν χρησιμοποιηθεί για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ήταν το 1962 όταν ο μηχανικός υπολογιστών Ivan Sutherland δημιούργησε το πρώτο πρόγραμμα γραφικών, γνωστό ως "SketchPad", το οποίο επέτρεπε στους ανθρώπους να γράφουν ή να σχεδιάζουν απλές εικόνες απευθείας σε μια οθόνη με τη βοήθεια μιας ειδικής γραφίδας. Αυτό σηματοδότησε την έναρξη όλων των μελλοντικών λογισμικών CAD.

Στην αρχή, το CAD χρησιμοποιήθηκε μόνο για ερευνητικούς σκοπούς, αλλά στη δεκαετία του 1970, μεγάλες εταιρείες της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροδιαστημικής άρχισαν να αναπτύσσουν το δικό τους λογισμικό, επεκτείνοντας τις εφαρμογές του σε άλλες βιομηχανίες τη δεκαετία του 1980. Μόλις τη δεκαετία του 1990 γεννήθηκαν εργαλεία όπως το CATIA και το AutoCAD, καθιστώντας δυνατή τη χρήση του CAD σε πολλούς επαγγελματικούς τομείς.



Εικόνα 2: SOLIDWORKS CAD, CAE (Source: blogs.solidworks.com)

Τα εργαλεία σχεδιασμού CAD είναι κατάλληλα διαμορφωμένα έτσι ώστε να επιτρέπουν στους μηχανικούς να μετατρέπουν μια αρχική ιδέα ενός προϊόντος σε τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο με πλήρη δεδομένα για τις φυσικές του ιδιότητες (διαστάσεις, υλικό κατασκευής, μάζα, κ.α.). Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής ή του κλάδου, υπάρχουν πολλά διαφορετικά και εξειδικευμένα λογισμικά CAD που διαθέτουν τα κατάλληλα εργαλεία σχεδιασμού και ελέγχου.

Τα σχεδιαστικά λογισμικά στο σύνολο τους χρησιμοποιούν μία ή περισσότερες βασικές μεθοδολογίες μοντελοποίησης από τις παρακάτω.

- 2D Σχεδιασμός
- Μοντέλα ακμών (Wireframe Models)
- Μοντέλα επιφανειών (Surface Models)
- Μοντέλα Στερεών (Solid Models)
- Στερεά Παραμετρικά Μοντέλα με Μορφολογικά Χαρακτηριστικά (Solid Parametric & Feature Based Models)

Βασικότερα πλεονεκτήματα CAD λογισμικών:

- Άμεση μετάβαση από την ιδέα στην ψηφιακή μοντελοποίηση
- Λεπτομερής απεικόνιση του προϊόντος με απόλυτο έλεγχο ρεαλισμού
- Δυνατότητα γρήγορης τροποποίησης και ελέγχου διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών
- Παραμετρική μοντελοποίηση
- Έλεγχος κατασκευασιμότητας και συναρμογής
- Έλεγχος φυσικών ιδιοτήτων προϊόντος
- Μετατροπή σε διαφορετικές μορφές αρχείων συμβατών με συστήματα CAD, CAM, CAE και μηχανές παραγωγής (CNC, 3D Printing, Laser-cut, κ.α.)
- Εξαγωγή κατασκευαστικών σχεδίων

Η συνεχόμενη εξέλιξη των συστημάτων CAD και των αντίστοιχων hardware αυξάνουν σημαντικά τις δυνατότητες των μηχανικών στα στάδια πριν την τελική παραγωγή των προϊόντων, προσφέροντας αξιοσημείωτα οφέλη στον χρόνο και στο κόστος ανάπτυξης. Η επόμενη γενιά συστημάτων CAD σύμφωνα με την τάση της σύγχρονης βιομηχανίας θα είναι περισσότερο προσανατολισμένη σε αυτό που ονομάζεται Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR-Augmented Reality) και Εικονική Πραγματικότητα (VR-Virtual Reality). Με τα συστήματα αυτά, τόσο οι μηχανικοί όσο και οι δυνητικοί χρήστες των προϊόντων

θα είναι σε θέση να έχουν μια ρεαλιστική και ολοκληρωμένη εμπειρία με τα προϊόντα πολύ νωρίτερα από το στάδιο παραγωγής.

Στην κορυφή της τεχνολογικής εξέλιξης η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI-Artificial Intelligence) θα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των μελλοντικών CAD συστημάτων παρέχοντας επιλογές που θα διευρύνουν την ανθρώπινη φαντασία και θα προσεγγίζουν ικανοποιητικά αυτό που αποκαλείται βέλτιστη λύση. Τα AI συστήματα ήδη δοκιμάζονται και λειτουργούν περισσότερο με απαιτήσεις και προδιαγραφές παρά με σχεδιαστικές εντολές.

2.2 Εργαλεία Μελέτης – CAE

Τα υπολογιστικά εργαλεία CAE (Computer Aided Engineering) είναι λογισμικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για τη μελέτη και ανάλυση της συμπεριφοράς των εξαρτημάτων ή των μηχανισμών όταν αυτά καταπονούνται κατά τη λειτουργία τους, πριν από οποιοδήποτε στάδιο παραγωγής και πραγματικών δοκιμών. Ευρύτερα, τα λογισμικά CAE χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση δοκιμών και προσομοιώσεων οποιουδήποτε φυσικού συστήματος που μπορεί να αναλυθεί επαρκώς και βρίσκουν εφαρμογή στην πλειονότητα των επιστημονικών κλάδων.

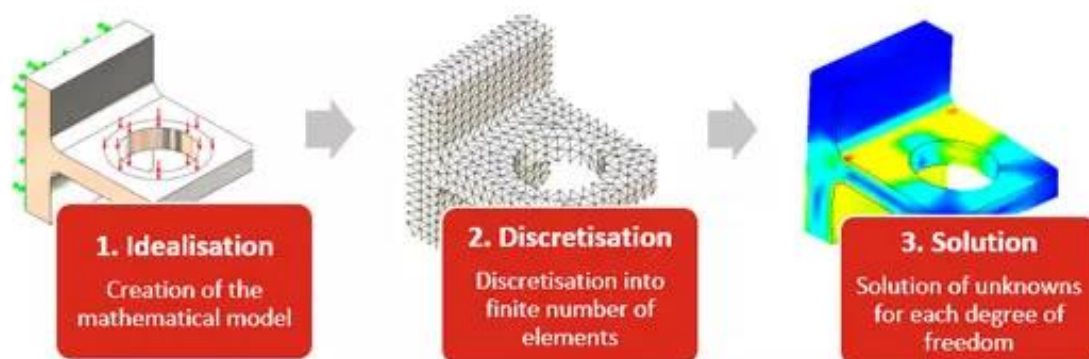
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια μελέτη CAE είναι απαραίτητο να υπάρχει κατάλληλα διαμορφωμένο ψηφιακό μοντέλο από κάποιο σύστημα CAD. Έτσι στα σύγχρονα λογισμικά σχεδιασμού και μελέτης τα εργαλεία CAD και CAE ενσωματώνονται σε μια κοινή πλατφόρμα προκειμένου να διευκολύνουν τον χρήστη στη μετάβαση από τον σχεδιασμό στη μελέτη. Αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα της υπολογιστικής προσομοίωσης, το κόστος και ο χρόνος κάθε κύκλου επανάληψης σχεδιασμού, καθώς και η συνολική διαδικασία ανάπτυξης, μπορούν να μειωθούν σημαντικά.

Στο πλαίσιο των CAE, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι προσομοίωσης περιλαμβάνουν:

- Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA/FEM)
- Υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD)
- Θερμική ανάλυση
- Κινηματική ανάλυση
- Δυναμική ανάλυση μηχανισμών (MBD)
- Ανάλυση κατασκευής (Casting, Molding)
- Βελτιστοποιήσεις (Topology Optimization, Generative Design)

Μια τυπική ανάλυση CAE ξεκινάει πάντα με ένα ολοκληρωμένο μοντέλο CAD στον οποίο ορίζονται οι συνθήκες υπό τις οποίες θα καταπονείται. Για μεμονωμένα μηχανολογικά εξαρτήματα είναι απαραίτητο να οριστούν οι ιδιότητες του υλικού κατασκευής, ο τρόπος συγκράτησης του εξαρτήματος και το φορτίο που θα δέχεται κατά τη χρήση του. Οι οριακές συνθήκες της μελέτης αποτελούν τον σημαντικότερο παράγοντα μιας ανάλυσης CAE και καθορίζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έχοντας ορίσει τις συνθήκες και τις ιδιότητες του συστήματος μπορεί πλέον να επιλυθεί το υπολογιστικό πρόβλημα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στη συνέχεια αξιολογούνται και χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του σχεδιασμού.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου πληρούνται όλες οι απαιτήσεις του προϊόντος και ουσιαστικά επιβεβαιωθούν. Σε περίπτωση αδύναμων σημείων ή περιοχών όπου η απόδοση του ψηφιακού πρωτοτύπου δεν ταιριάζει με τις προσδοκίες, οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές μπορούν να βελτιώσουν το μοντέλο CAD και να ελέγξουν τα αποτελέσματα της αλλαγής τους, δοκιμάζοντας τον ενημερωμένο σχεδιασμό σε μια νέα προσομοίωση. Αυτή η διαδικασία υποστηρίζει ταχύτερη ανάπτυξη προϊόντων καθώς δεν υπάρχει ανάγκη κατασκευής φυσικών πρωτοτύπων σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης.



Εικόνα 3: Στάδια τυπικής μελέτης CAE (Source: solidsolutions.co.uk)

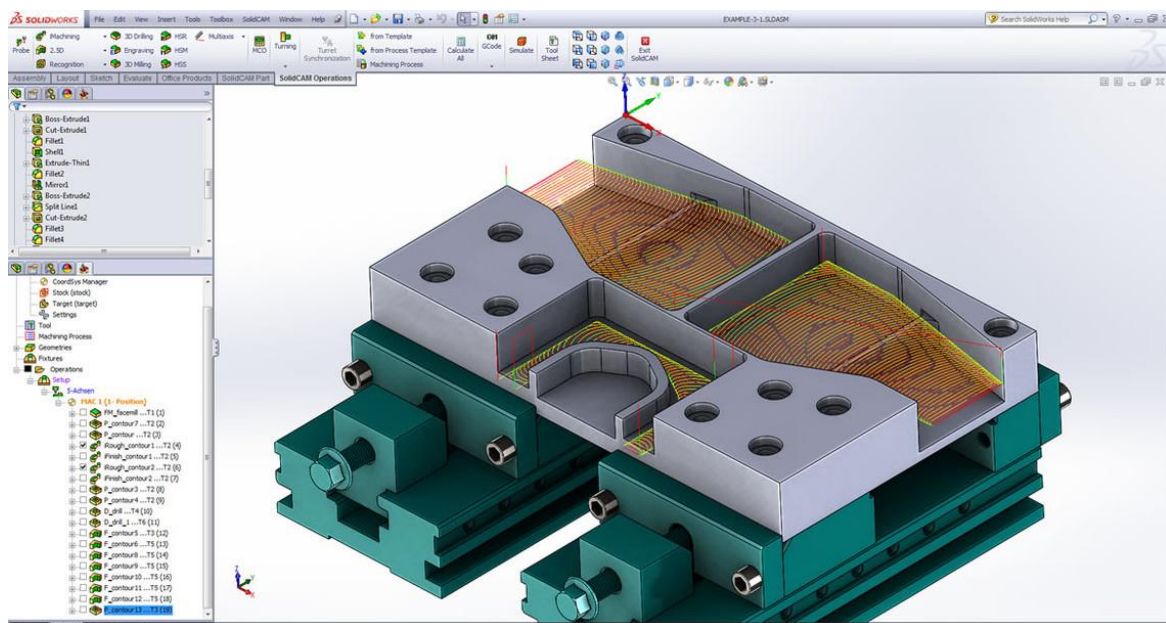
Οι απαιτήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας για εξαρτήματα που θα έχουν τη μέγιστη δυνατή απόδοση και στιβαρότητα με την ελάχιστη δυνατή μάζα, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη συστημάτων CAE που στόχο έχουν τη βελτιστοποίηση των προϊόντων σύμφωνα με τις προκαθορισμένες συνθήκες καταπόνησής τους. Με τα εργαλεία βελτιστοποίησης η ανάλυση CAE εξάγει αποτελέσματα που πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές αντοχής και μάζας αφαιρώντας υλικό από περιοχές του μοντέλου που δεν επηρεάζουν σημαντικά την τελική συμπεριφορά του. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνονται οργανικές δομές που ξεπερνούν τα όρια της ανθρώπινης φαντασίας και στις περισσότερες περιπτώσεις οδηγούν σε μοναδικές

επιλογές για την κατασκευή των προτεινόμενων μορφών. Στην πλειονότητα τους τα εξαρτήματα που περιλαμβάνουν οργανικές δομές δεν μπορούν να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας και η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) γίνεται η μοναδική επιλογή.

2.3 Εργαλεία Κατασκευής – CAM

Τα υπολογιστικά εργαλεία CAM (Computer Aided Manufacturing) είναι λογισμικά με τα οποία πραγματοποιείται η μελέτη κατασκευής εξαρτημάτων και εξάγεται ο απαραίτητος κώδικας (G code) που θα οδηγήσει την κατάλληλη εργαλειομηχανή (μηχανή κατεργασίας CNC, 3D Printer). Έτσι τα βασικά στοιχεία που αποτελούν ένα λειτουργικό σύστημα CAM είναι:

- Μοντέλο που έχει δημιουργηθεί σε κάποιο σύστημα CAD
- Καθορισμός των στρατηγικών κατεργασίας μέσω του συστήματος CAM
- Post Processor που θα μετατρέψει τις στρατηγικές κατεργασίας σε γλώσσα κατανοητή από την εργαλειομηχανή
- Αρχείο κώδικα G που θα οδηγήσει την εργαλειομηχανή
- Εργαλειομηχανή CNC που θα πραγματοποιήσει την κατεργασία



Εικόνα 4: Εκτέλεση CAM με το λογισμικό SolidCAM (Source: solidcam.com)

Λόγω της άμεσης συσχέτισης του CAD με το CAM, τα δύο συστήματα είναι συνήθως ενσωματωμένα σε κοινή πλατφόρμα προκειμένου να διευκολύνουν τον χρήστη στην μετάβαση από τον σχεδιασμό στη μελέτη κατασκευής.

Τα συστήματα CAM στην πλειονότητα τους είναι διαμορφωμένα για να ικανοποιούν τις ανάγκες κατεργασιών αφαίρεσης υλικού. Οποιαδήποτε διαδικασία προγραμματίζεται στο περιβάλλον CAM, αυτόματα αντιστοιχίζεται σε κώδικα G (εικόνα 5) που θα ενεργοποιήσει και θα οδηγήσει συγκεκριμένα συστήματα εργαλειομηχανών (CNC, 3D Printer), με πλήρως καθορισμένο και προβλέψιμο τρόπο. Ο χρήστης του CAM αντιμετωπίζει το CAD μοντέλο σαν να είναι πραγματικό τεμάχιο προς κατεργασία, έτσι όλα τα εργαλεία και οι στρατηγικές που περιλαμβάνονται στο περιβάλλον του CAM ανταποκρίνονται στις συνθήκες μιας πραγματικής κατεργασίας με εργαλειομηχανή CNC.

```
G00 T404 (ROUGH TURN)
G50 S5000

G96 S300 M03
M08

G00 X127. Z2.

G71 P100 Q110 D4.0 U.2 W.1 F0.2
N100 G00 X39.731
G01 Z-0.356
X79.059 Z-29.852
G03 X80.0 Z-31.406 R2.8
G01 Z-70.0
X88.4
G03 X120.0 Z-85.8 R15.8
N110 G01 X127.0

M98 P600(TOOL CHANGE)
M01
```

Εικόνα 5: Παράδειγμα κώδικα G

Ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τα χαρακτηριστικά ενός εξαρτήματος, ο κώδικας G μπορεί να αποτελείται από μερικές απλές σειρές, μέχρι εκατοντάδες σειρές σύνθετου κώδικα. Πριν την εποχή του CAM ήταν δουλειά του μηχανικού να γράψει τον απαραίτητο κώδικα για την κατεργασία των εξαρτημάτων. Η διαδικασία αυτή απαιτούσε σημαντικό χρόνο εργασίας ακόμα και για απλές κατεργασίες ενώ η πιθανότητα σφαλμάτων και μειωμένης απόδοσης ήταν μεγάλη. Επιπλέον οι αυξημένες δυνατότητες των προηγμένων εργαλειομηχανών CNC για κατεργασία σύνθετων εξαρτημάτων με ταυτόχρονη κίνηση πολλών αξόνων της μηχανής, καθιστά σχεδόν αδύνατο για τον οποιοδήποτε χρήστη να γράψει τον απαραίτητο κώδικα G.

Τα σύγχρονα συστήματα CAM είναι βασισμένα στην αναγνώριση χαρακτηριστικών (features) του κάθε εξαρτήματος και στη χρήση συγκεκριμένων στρατηγικών ανάλογα με τις ανάγκες της κατεργασίας και τις δυνατότητες της κάθε εργαλειομηχανής. Εφόσον ο μηχανικός ορίσει και ελέγξει μέσω προσομοίωσης όλες τις στρατηγικές κατεργασίας για το υπό μελέτη εξάρτημα, η εξαγωγή του σωστού κώδικα G είναι πλέον μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, δεδομένου του κατάλληλα διαμορφωμένου post processor. Ο post processor τροποποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις από εξειδικευμένο προσωπικό έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στην κινηματική και τα χαρακτηριστικά της κάθε εργαλειομηχανής. Ο ρόλος του post processor είναι να μεταφράζει τις στρατηγικές κατεργασίας που έχουν διαμορφωθεί στο περιβάλλον CAM, σε γλώσσα κατανοητή από τον controller της εργαλειομηχανής. Ένας σωστός post processor πρέπει να διαμορφώνεται μία φορά πριν τη λειτουργία της εκάστοτε εργαλειομηχανής και να καλύπτει πλήρως τις δυνατότητες της. Εξαιτίας των αυξημένων αναγκών της κατασκευαστικής βιομηχανίας για αποδοτικότερες κατεργασίες και μέγιστο χρόνο ζωής του εξοπλισμού, τα λογισμικά CAM πλέον διαθέτουν αυτοματοποιημένες στρατηγικές (όπως το iMachining του λογισμικού SolidCAM) που προσαρμόζουν τις συνθήκες κατεργασίας στις απαιτήσεις του εκάστοτε εξαρτήματος, συνυπολογίζοντας τη βέλτιστη χρήση των εργαλειομηχανών και των κοπτικών εργαλείων.

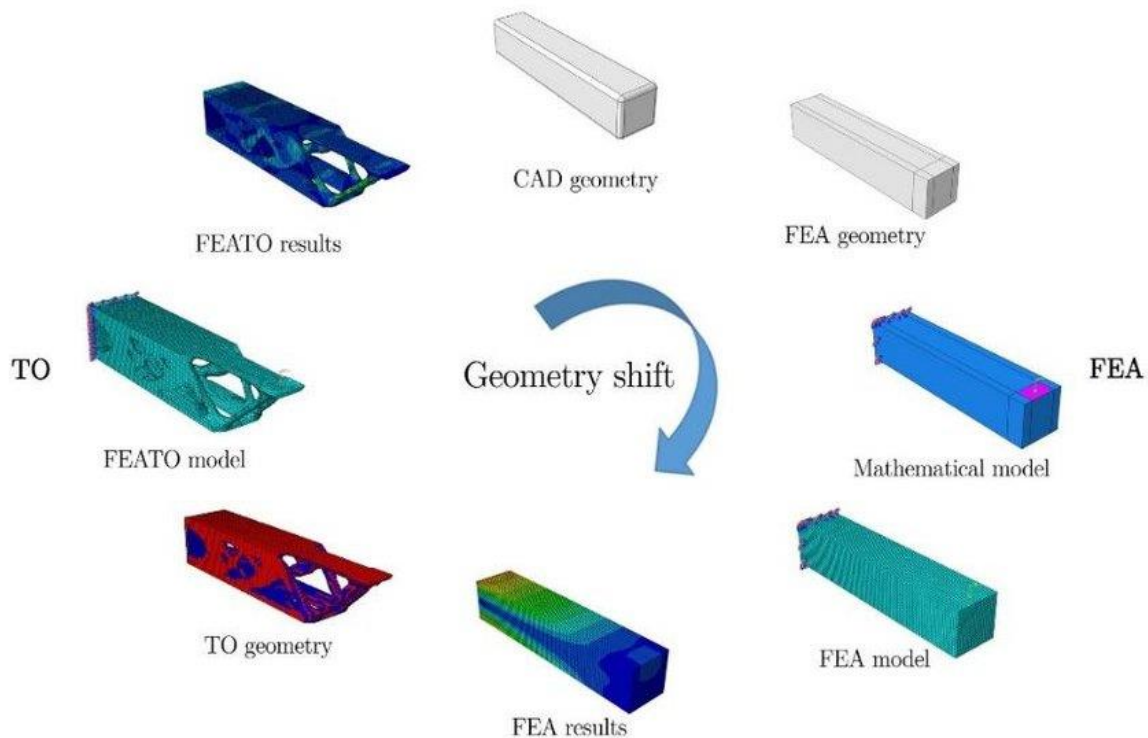
Με την ίδια λογική που ένα σύστημα CAM εξάγει τον απαραίτητο κώδικα G ώστε να οδηγήσει με τον κατάλληλο τρόπο μια εργαλειομηχανή CNC, έτσι και σε συστήματα προσθετικής κατασκευής (3D Printing), ο slicer του λογισμικού εξάγει έναν αντίστοιχο κώδικα G για τις απαιτήσεις του 3D printer. Μέσω του slicer γίνονται εικονικές τομές επιπέδων στο μοντέλο CAD καθ' ύψος του μοντέλου και σύμφωνα με τον τρόπο τοποθέτησης του στον χώρο εκτύπωσης. Τα επίπεδα αυτά είναι παράλληλα με το επίπεδο αναφοράς της μηχανής (επίπεδο μηδέν) και ο αριθμός τους είναι ανάλογος με το ελάχιστο δυνατό βήμα της μηχανής στον κάθετο άξονα κίνησης και με το συνολικό ύψος του μοντέλου. Σε κάθε εικονικό επίπεδο που δημιουργεί ο slicer, γίνεται προβολή της τομής του μοντέλου ως ένα δυσδιάστατο σχέδιο από το οποίο εξάγεται ο αντίστοιχος κώδικας G.

Σε αντίθεση με τη σύνθετη κινηματική μιας εργαλειομηχανής CNC (5axis) που μπορεί να περιλαμβάνει την ταυτόχρονη κίνηση πολλών αξόνων, ο έλεγχος της κίνησης σε έναν 3D printer είναι μια πολύ πιο απλή και τυποποιημένη διαδικασία. Ένας 3D printer έχει μόνο τρεις άξονες κίνησης (X,Y,Z) ενώ η πρόσθεση υλικού σε κάθε επίπεδο του μοντέλου πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη κίνηση μόνο των δύο. Ο κάθετος άξονας χρησιμοποιείται μόνο για τη μεταφορά της κεφαλής εκτύπωσης σε επόμενο επίπεδο ώστε να κατασκευαστεί το αντίστοιχο προφίλ του μοντέλου. Έτσι όλοι οι εμπορικοί 3D printers συνοδεύονται από έναν τυποποιημένο slicer ή και από αντίστοιχους open source που μπορούν να εξάγουν χωρίς κανένα πρόβλημα τον κατάλληλο κώδικα G για την πλειονότητα των μηχανών.

3. ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

3.1 Διαδικασία Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization-TO) είναι μια επαναληπτική διαδικασία ανάλυσης προσαρμοσμένη στα υπολογιστικά εργαλεία σχεδιασμού (CAD) και μελέτης (CAE). Ο κύριος στόχος αυτής της μεθόδου είναι η καλύτερη δομική απόδοση (performance), μέσω ταυτοποίησης της βέλτιστης κατανομής υλικού εντός του διαθέσιμου όγκου μιας κατασκευής σε σχέση με τα φορτία, τις οριακές συνθήκες και τους περιορισμούς που ορίζονται κατά την μελέτη. Μέσω της τοπολογικής βελτιστοποίησης τροποποιείται το μέγεθος, το σχήμα και η τοπολογία μιας αρχικής μορφής προκειμένου να ικανοποιηθούν συγκεκριμένες συνθήκες μάζας, αντοχής και στιβαρότητας ενός εξαρτήματος. Εάν η τοπολογική βελτιστοποίηση ενσωματωθεί στην παραδοσιακή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA), η διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε 8 βήματα όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: Γεωμετρική μετάβαση από αρχικό μοντέλο σε μοντέλο TO

Αυτό το σχήμα απεικονίζει τη μετάβαση γεωμετρίας μιας δομής από την αρχική μορφή της, στη γεωμετρία βελτιστοποιημένης τοπολογίας (TO). Στο πρώτο στάδιο εφαρμόζεται μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο CAD. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν γεωμετρικές τροποποιήσεις προκειμένου να απλοποιηθεί το αρχικό πρόβλημα, αλλά το στάδιο αυτό είναι δύσκολο να τυποποιηθεί επειδή περιλαμβάνει την εφαρμογή εμπειρίας και κρίσης με ποιοτικό τρόπο. Ωστόσο, το πιο κρίσιμο βήμα στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) είναι ο ορισμός του προβλήματος και το αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο με όλες τις απαιτούμενες παραμέτρους (ιδιότητες υλικών, φορτία και περιορισμούς).

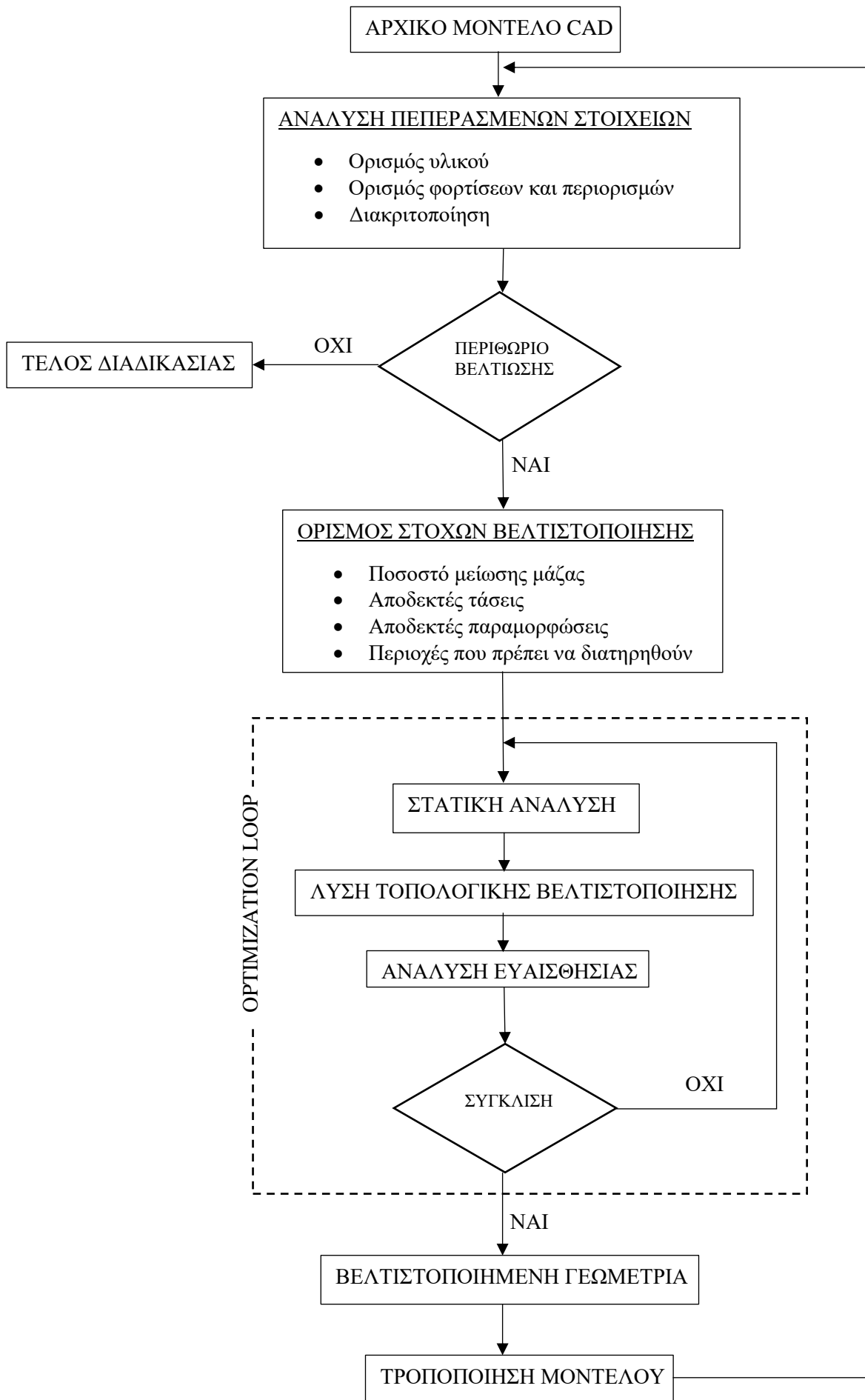
Τα βέλτιστα αποτελέσματα προκύπτουν μέσω της διακριτοποίησης (meshing) του μοντέλου και με επαναλαμβανόμενη μέθοδο σύγκλισης. Προκειμένου να έχει νόημα η έννοια της σύγκλισης, η διαδικασία προετοιμασίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει συγκεκριμένους στόχους για το τελικό μοντέλο που θα προκύψει. Έτσι πριν από την εκτέλεση της τοπολογικής βελτιστοποίησης πρέπει να οριστούν στόχοι όπως:

- Το επιθυμητό ποσοστό μείωσης της μάζας
- Οι μέγιστες αποδεκτές τάσεις
- Οι μέγιστες αποδεκτές παραμορφώσεις
- Περιοχές του μοντέλου που ενδεχομένως πρέπει να παραμείνουν ανέπαφες
- Συντελεστής ασφαλείας
- Ελάχιστο ή μέγιστο επιθυμητό πάχος τοιχωμάτων
- Γεωμετρικοί στόχοι που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες μεθόδους κατασκευής (κατεργασία κοπής, χύτευση, 3D Printing)

Η διαδικασία διακριτοποίησης αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για τα τελικά αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Κατά κανόνα υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της λεπτομέρειας του mesh (διαστάσεις, πυκνότητα και γεωμετρία πεπερασμένων στοιχείων) και του χρόνου ολοκλήρωσης της ανάλυσης. Όσο πιο μικρά είναι τα στοιχεία που απαρτίζουν το διακριτοποιημένο σώμα, τόσο περισσότερος χρόνος και υπολογιστική ισχύς απαιτούνται για να γίνει ο απαραίτητος υπολογισμός των αποτελεσμάτων. Κατά την αρχική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του πρωτότυπου μοντέλου CAD, η ανάγκη μεγάλης λεπτομέρειας του mesh είναι περιορισμένη και παρατηρείται σχεδόν αμελητέα διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων για συγκεκριμένο εύρος διαστάσεων των στοιχείων. Έτσι κατά κανόνα η αρχική μελέτη FEA πρέπει να εκτελείται με ικανοποιητική λεπτομέρεια διακριτοποίησης αλλά όχι υπερβολική εφόσον κοστίζει σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ, ενώ δεν προσφέρει περισσότερες πληροφορίες από πλευράς αποτελεσμάτων.

Αντίθετα, για την περίπτωση της τοπολογικής βελτιστοποίησης η μεγαλύτερη λεπτομέρεια διακριτοποίησης δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να ερευνήσει σε μεγαλύτερο βάθος τις απαιτήσεις του εκάστοτε εξαρτήματος και να προτείνει λεπτομερέστερες λύσεις. Πρακτικά, όσο μικρότερα είναι τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα μοντέλο τόσο περισσότερες οι εναλλακτικές επιλογές για τον αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος. Εξαιτίας της επαναληπτικής διαδικασίας συγκλήσεων καθώς και της απαιτούμενης λεπτομέρειας στη διακριτοποίηση, η τοπολογική βελτιστοποίηση έχει πολύ υψηλό κόστος σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ ακόμα και για αρκετά απλά προβλήματα. Ένας τρόπος να επιλυθεί μερικώς αυτός ο περιορισμός είναι η αξιοποίηση της γεωμετρικής συμμετρίας για όσα εξαρτήματα το επιτρέπουν. Για εξαρτήματα που περιλαμβάνουν από ένα και περισσότερα επίπεδα συμμετρίας, η διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να ολοκληρωθεί σε αντίστοιχα μειωμένο χρόνο. Έτσι, ένα εξάρτημα με ένα επίπεδο πλήρους συμμετρίας μπορεί να αναλυθεί κατά το ήμισυ ($1/2$ υπολογιστικών απαιτήσεων και χρόνου επίλυσης) και με τα κατάλληλα ορίσματα να επιλυθεί ως πλήρες. Τυπικό παράδειγμα συμμετρικών σωμάτων με μεγάλη δυνατότητα μείωσης των υπολογιστικών απαιτήσεων είναι όσα προκύπτουν εκ περιστροφής και χαρακτηρίζονται από πλήρη ομοιομορφία. Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο μπορεί να τμηθεί στον επιθυμητό αριθμό επιπέδων και να μελετηθεί σε υποπολλαπλάσιο χρόνο σε σχέση με το αρχικό πλήρες σώμα.

Η μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης προσφέρει μια νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία με αξιοσημείωτη μείωση μάζας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα νέο σημείο εκκίνησης για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε περαιτέρω ανάλυση είναι απαραίτητο να τροποποιηθεί το πρωτογενές CAD μοντέλο ώστε να αντικατοπτρίζει τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μοντέλο που προκύπτει από την διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι σε μορφή διακριτοποιημένου σώματος (mesh body) και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για νέα ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Τα CAD λογισμικά συνήθως διαθέτουν τα κατάλληλα εργαλεία εξαγωγής αξιοποιήσιμων μορφών (solid body, surface body) ώστε να διευκολύνουν τη διαδικασία τροποποίησης και επανασχεδιασμού. Υπό τη μορφή του mesh body ένα εξάρτημα μπορεί να μετατραπεί επίσης σε μορφή STL (Stereolithography CAD) και να κατασκευαστεί ως έχει με τη μέθοδο του 3D Printing. Προκειμένου να έχει πρακτικό νόημα κάτι τέτοιο, απαιτείται αρκετά μεγάλη λεπτομέρεια στην αρχική διακριτοποίηση πριν από την επίλυση της τοπολογικής βελτιστοποίησης, έτσι ώστε να επιτευχθούν ομαλές και πλήρεις επιφάνειες στο τελικό εξάρτημα. Τέλος, με την ολοκλήρωση των σχεδιαστικών τροποποιήσεων μπορεί να γίνει επόμενη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στη νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της επίλυσης και η ικανοποίηση των αρχικών στόχων της μελέτης. Συνολικά η διαδικασία βελτιστοποίησης, παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.



3.2 Γενικευμένο Πρόβλημα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Η γενική μαθηματική λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με συνεχή στοιχεία επιδιώκει την ελάχιστη (top down) ή τη μέγιστη (bottom up) τιμή μιας συνάρτησης $f(x)$ και του σχετικού μεταβλητού διανύσματος της $x = (x_1, \dots, x_n) \in IR^n$ σε σχέση με πιθανές συνθήκες και περιορισμούς. Η f μπορεί να ονομασθεί συνάρτηση στόχου και αντίστοιχα οι ποσότητες $x_i, i = 1, \dots, n$ μεταβλητές σχεδιασμού και n ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού. Οι μεταβλητές σχεδιασμού εξαρτώνται από την ισότητα μεταξύ των περιορισμών, οπότε μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι ο πραγματικός χώρος σχεδιασμού είναι ένας υποχώρος του IR^n , όπου η διάστασή του θα είναι n μείον τον αριθμό των ανεξάρτητων περιορισμών ισότητας. Στη συνέχεια, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{array}{ll}
 f(x) & \text{Ελαχιστοποίηση συνάρτησης στόχου} \\
 h_j(x) = 0, & j = 1, \dots, n_h \quad \text{περιορισμοί ισότητας} \\
 g_k(x) \leq 0, & j = 1, \dots, n_g \quad \text{περιορισμοί ανισότητας} \\
 x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, & i = 1, \dots, n \quad \text{μεταβλητές σχεδιασμού}
 \end{array}$$

Ο όρος εφικτός τομέας (feasible domain) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σύνολο μεταβλητών σχεδίασης που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς ισότητας και αντίστοιχα ανέφικτος τομέας το σύνολο αυτών που δεν ικανοποιούν τουλάχιστον ένα. Ως εκ τούτου, υπάρχουν είτε προβλήματα γραμμικής βελτιστοποίησης, όπου τόσο οι περιορισμοί στην ισότητα όσο και στην ανισότητα είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού, είτε προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης (τα περισσότερα από τα προβλήματα δομικής βελτιστοποίησης), όπου τουλάχιστον ένας από τους περιορισμούς είναι μια μη γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών σχεδιασμού.

3.3 Μέθοδος Τοπολογικής Βελτιστοποίησης SIMP

3.3.1 Ανάλυση Μεθόδου SIMP

Η δυνατότητα για βελτιστοποίηση των προϊόντων είναι ανάγκη και απαίτηση για τη σύγχρονη βιομηχανία προκειμένου να επιτυγχάνει τις επιθυμητές επιδόσεις και αποδόσεις. Ταυτόχρονα το πρόβλημα της τοπολογικής βελτιστοποίησης και γενικότερα η έννοια της βελτιστοποίησης, παρουσιάζει

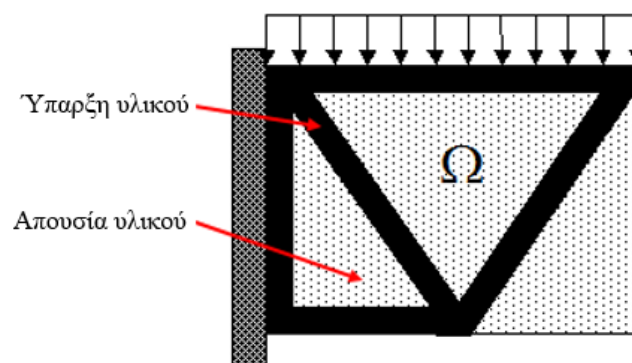
έντονο ενδιαφέρον για ένα αυξανόμενο μέρος της επιστημονικής κοινότητας. Έτσι, τα τελευταία 30 χρόνια τόσο επιστημονικές ομάδες του ακαδημαϊκού χώρου όσο και ομάδες βιομηχανικών τμημάτων R&D, έχουν αναπτύξει αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις και μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση και επίλυση προβλημάτων τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Η πιο δημοφιλής μαθηματική μέθοδος για προβλήματα βελτιστοποίησης της τοπολογίας είναι η Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP), που αρχικά διατυπώθηκε από τους Bendsoe & Kikuchi (1988) και Rozvany & Zhou (1992). Η μέθοδος SIMP προβλέπει τη βέλτιστη κατανομή υλικού εντός ενός δεδομένου χώρου σχεδίασης, για δεδομένες περιπτώσεις φορτίου, οριακές συνθήκες, περιορισμούς κατασκευής και απαιτήσεις απόδοσης.

Σύμφωνα με τον Bendsoe (1989), η βελτιστοποίηση σχήματος στην πιο γενική της μορφή πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορία για κάθε σημείο του χώρου αναφοράς, προσδιορίζοντας την ύπαρξη υλικού ή μη στο δεδομένο σημείο. Η παραδοσιακή προσέγγιση στη βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι η διακριτοποίηση ενός τομέα (domain) σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζονται ιστροπικές στερεές μικροδομές. Κάθε στοιχείο είναι γεμάτο με υλικό για τις περιοχές που απαιτούν υλικό, ή άνευ υλικού για περιοχές όπου μπορεί να αφαιρεθεί (ή που αντιπροσωπεύει κενά). Η κατανομή πυκνότητας υλικού σε έναν τομέα σχεδίασης, ρ , είναι διακριτή και σε κάθε στοιχείο λαμβάνει μια δυαδική τιμή:

- $\rho_{(e)} = 1$ όπου απαιτείται υλικό (μαύρο)
- $\rho_{(e)} = 0$ όπου αφαιρείται υλικό (άσπρο)

Για παράδειγμα, η εικόνα παρουσιάζει την βελτιστοποιημένη διάταξη υλικού μιας φορτισμένης δοκού. Τα στερεά στοιχεία με πυκνότητα $\rho_{(e)} = 1$ εμφανίζονται με μαύρο, ενώ τα κενά στοιχεία με $\rho_{(e)} = 0$ αφαιρούνται.

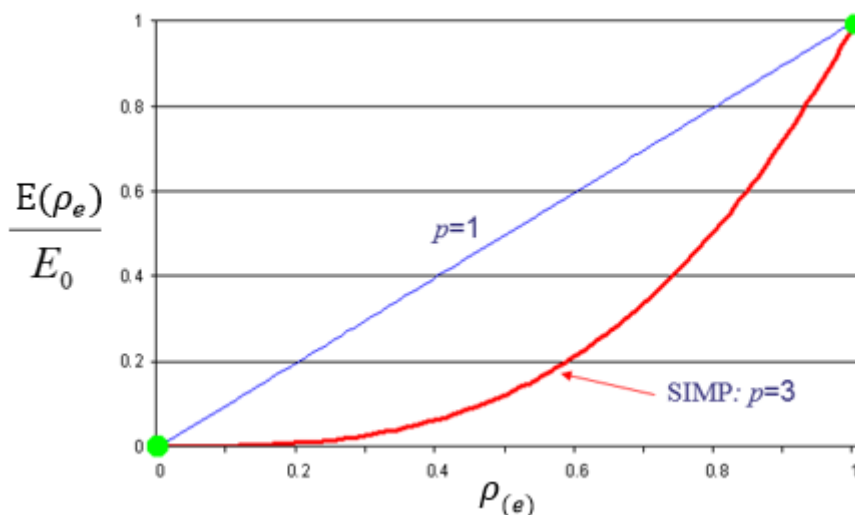


Εικόνα 7: Βελτιστοποιημένη διάταξη υλικού φορτισμένης δοκού

Η εισαγωγή μιας συνεχούς κατανομής της σχετικής πυκνότητας αποφεύγει τη δυαδική, on-off φύση του προβλήματος. Για κάθε στοιχείο, η εκχωρούμενη σχετική πυκνότητα μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής ρ_{\min} και 1, η οποία επιτρέπει την εκχώρηση ενδιάμεσης πυκνότητας για στοιχεία που μπορούν να χαρακτηριστούν ως πορώδη. Η ρ_{\min} είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της σχετικής πυκνότητας για κενά στοιχεία που είναι μεγαλύτερα από το μηδέν. Αυτή η τιμή πυκνότητας διασφαλίζει την αριθμητική σταθερότητα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Δεδομένου ότι η σχετική πυκνότητα υλικού μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, ο συντελεστής ελαστικότητας Young σε κάθε στοιχείο μπορεί επίσης να μεταβάλλεται αντίστοιχα. Για κάθε στοιχείο e , η σχέση μεταξύ του συντελεστή σχετικής πυκνότητας υλικού ρ_e και του συντελεστή ελαστικότητας Young του εκχωρημένου μοντέλου ισοτροπικού υλικού E_0 υπολογίζεται από τον νόμο:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0$$



Ο παράγοντας ποινής p (penalty factor) μειώνει τη συνεισφορά των στοιχείων με ενδιάμεσες πυκνότητες (γκρίζα στοιχεία) στη συνολική δυσκαμψία. Ο παράγοντας ποινής κατευθύνει τη λύση βελτιστοποίησης σε στοιχεία που είναι είτε συμπαγές μαύρο ($\rho_e = 1$) είτε κενό λευκό ($\rho_e = \rho_{\min}$). Τα αριθμητικά πειράματα δείχνουν ότι είναι κατάλληλη μια τιμή συντελεστή ποινής $p = 3$.

Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας του στοιχείου οδηγεί σε μείωση της δυσκαμψίας των στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο SIMP, η ολική δυσκαμψία διαμορφώνεται σύμφωνα με:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min}) \rho_e^p] K_e$$

Όπου K_e είναι η μήτρα δυσκαμψίας των στοιχείων, το ρ_{min} είναι η ελάχιστη σχετική πυκνότητα, το ρ_e είναι η σχετική πυκνότητα του στοιχείου, το p είναι ο παράγοντας ποινής και το N είναι ο αριθμός των στοιχείων στον τομέα σχεδίασης.

3.3.2 Στόχος Μεγιστοποίησης Δυσκαμψίας

Ένας συνηθισμένος στόχος τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής δυσκαμψίας μιας δομής, ή η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας της με δεδομένη ποσότητα αφαίρεσης μάζας. Η ενδοτικότητα είναι ένα μέτρο της συνολικής ευκαμψίας μιας δομής και είναι το αντίστροφο της δυσκαμψίας. Η συνολική ενδοτικότητα ισούται με την αθροιστική ενέργεια παραμόρφωσης των στοιχείων. Η ελαχιστοποίηση της συνολικής ενδοτικότητας, C , ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση της συνολικής δυσκαμψίας. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, επιδιώκει να επιλύσει τις πυκνότητες στοιχείων (που είναι οι μεταβλητές σχεδιασμού βελτιστοποίησης) που ελαχιστοποιούν την συνολική ενδοτικότητα της δομής.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

Το $[u_e]$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης του στοιχείου e , $[K_e]$ είναι η δυσκαμψία του στοιχείου e και το διάνυσμα $\{\rho\}$ περιέχει τις σχετικές πυκνότητες των στοιχείων ρ_e . Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης βελτιστοποίησης, ο περιορισμός μάζας στόχου, η συνολική ισορροπία δύναμης-δυσκαμψίας και οι απαιτούμενοι λειτουργικοί περιορισμοί πρέπει να ικανοποιούνται:

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{target}$$

V_e είναι ο όγκος των στοιχείων και το M_{target} είναι η μάζα στόχος της βελτιστοποίησης.

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\}$$

Το $[K\{\rho\}]$ είναι η μήτρα συνολικής δυσκαμψίας που διαμορφώνεται από το διάνυσμα σχετικών πυκνοτήτων, το $\{u\}$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης και το $\{F\}$ είναι το διάνυσμα εξωτερικής δύναμης.

$$\theta(\{\rho\}, \{u\})_1 \leq \theta_1^*, \theta(\{\rho\}, \{u\})_2 \leq \theta_2^*, \dots$$

Ο παραπάνω τύπος περιέχει περιορισμούς σχεδιαστικής απόκρισης, όπως όρια στις τάσεις, μετατοπίσεις, ιδιοσυχνότητες κ.λπ.

3.3.3 Ανάλυση Ευαισθησίας

Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εκτελεί ανάλυση ευαισθησίας, για να αξιολογήσει τον αντίκτυπο που έχει η διακύμανση της πυκνότητας του υλικού στα αποτελέσματα της συνάρτησης στόχου για τη μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Μαθηματικά, η ανάλυση ευαισθησίας εκφράζεται ως παράγωγος της συνάρτησης στόχου σε σχέση με τις πυκνότητες υλικού:

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1} [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

Κατά τη διάρκεια μιας ανάλυσης ευαισθησίας, τα στοιχεία που αξιολογούνται με χαμηλούς συντελεστές πυκνότητας υλικού τελικά χάνουν τη δομική τους υπόσταση και εξαλείφονται κατά τη διάρκεια περαιτέρω επαναλήψεων.

Εάν πραγματοποιηθεί υπολογισμός της ευαισθησίας για κάθε στοιχείο ανεξάρτητα και δεν ληφθεί υπόψη η συνδεσιμότητα μεταξύ των στοιχείων, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέχεια υλικού και σε όγκους που δεν θα συνδέονται με την κύρια γεωμετρία. Αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο σκακιέρας (chessboard effect). Για να μειωθεί το φαινόμενο σκακιέρας, ένα σχήμα φιλτραρίσματος εφαρμόζει μια ακτίνα επιρροής στοιχείων, και εξισορροπεί τις ευαισθησίες κάθε στοιχείου εντός της περιοχής επιρροής του.

Οι επαναλήψεις βελτιστοποίησης συνεχίζονται έως ότου οι παραλλαγές της συνάρτησης στόχου συγκλίνουν και οι επαναλήψεις ικανοποιήσουν τα κριτήρια που έχουν τεθεί.

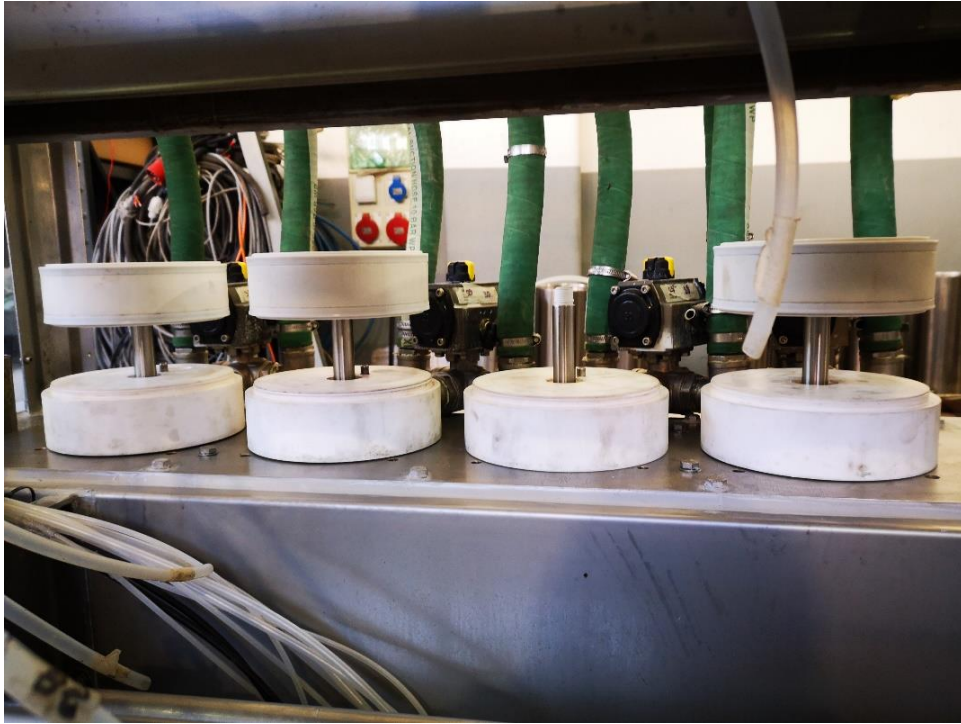
4. ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ

4.1 Βιομηχανικός Μηχανισμός Ογκομέτρησης

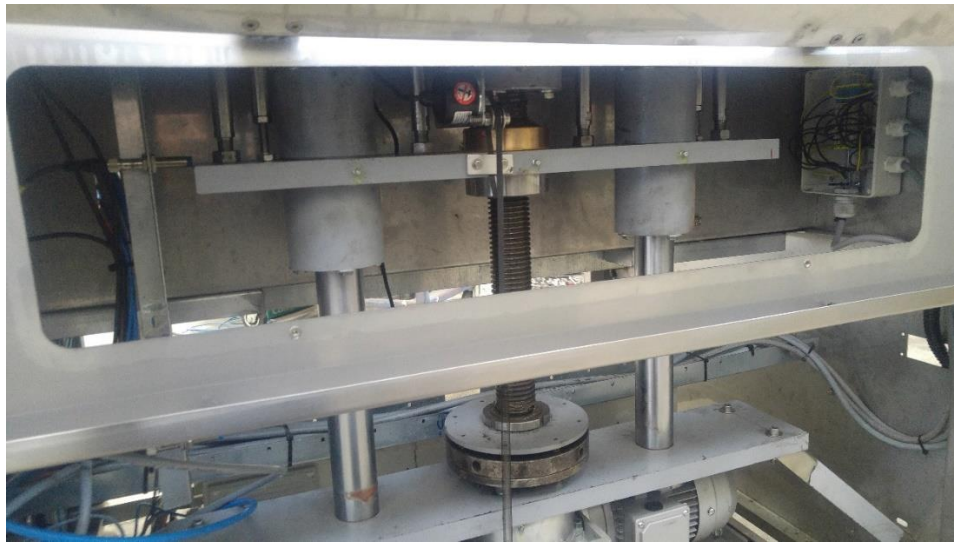
Για τη μελέτη τοπολογικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικά εξαρτήματα του μηχανισμού ογκομέτρησης μιας αυτόματης βιομηχανικής μηχανής πλήρωσης υγρών προϊόντων (τροφίμων και χημικών). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός ελέγχει την κίνηση τεσσάρων εμβόλων διπλής ενεργείας προκειμένου να επιτύχει την πλήρωση των ογκομετρικών κυλίνδρων (5 Lt προϊόντος ανά κύλινδρο) και την παροχή του υλικού στα δοχεία τελικής συσκευασίας μέσω των διατάξεων εκροής. Τα εξαρτήματα που δέχονται τις μέγιστες καταπονήσεις και πρόκειται να μελετηθούν είναι το έμβολο του μηχανισμού (POM Acetal Copolymer, εικόνα 9) και το κινητό φορείο των εμβόλων (AISI 304, εικόνα 10). Σε κάθε κύκλο πλήρωσης η μία πλευρά του εμβόλου εξωθεί το υλικό ενώ ταυτόχρονα με την κίνηση του εμβόλου γεμίζει ο κύλινδρος με υλικό για τον επόμενο κύκλο. Αντίστοιχα για την επόμενη πλήρωση, η αντίθετη πλευρά του εμβόλου αναλαμβάνει την παροχή του υλικού και ο κύκλος επαναλαμβάνεται προκειμένου να ικανοποιήσει τις ανάγκες της επιθυμητής παραγωγικότητας.



Εικόνα 8: Διάταξη εκροής και κύλινδροι ογκομετρικού μηχανισμού



Εικόνα 9: Έμβολα ογκομετρικού μηχανισμού



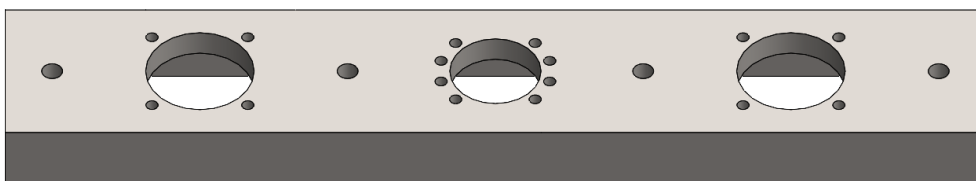
Εικόνα 10: Ογκομετρικός μηχανισμός

Στο σύστημα του μηχανισμού περιλαμβάνονται αρκετά εξαρτήματα τα οποία δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Ενδεικτικά αναφέρονται εξαρτήματα όπως ο τριφασικός ηλεκτροκινητήρας και μειωτήρας στροφών, άξονες και έδρανα ολίσθησης, στοιχεία στεγανοποίησης κυλίνδρων, ball screw, torque limiter, στοιχεία έδρασης, υδραυλικός και πνευματικός εξοπλισμός, ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός.

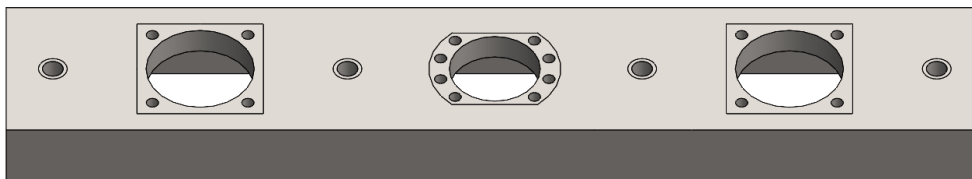
Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μηχανής και τις συνθήκες κανονικής λειτουργίας της, η μέγιστη δύναμη που ασκείται σε κάθε έμβολο κατά τον κύκλο πλήρωσης είναι 388,45 N. Η δύναμη που προκύπτει είναι αποτέλεσμα της πίεσης που έχει μετρηθεί στην έξοδο των κυλίνδρων (0.2 bar) με κατάλληλη διάταξη, και της μάζας του προϊόντος για συσκευασία. Ως πυκνότητα προϊόντος έχει θεωρηθεί αυτή του νερού (1000 kg/m^3) δεδομένου ότι τα περισσότερα υλικά που εξυπηρετεί η συγκεκριμένη μηχανή έχουν περίπου ίση ή μικρότερη πυκνότητα από αυτή του νερού. Για τον σχεδιασμό, την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και την τοπολογική βελτιστοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί το λογισμικό SOLIDWORKS 2020 και SOLIDWORKS Simulation 2020 αντίστοιχα.

4.2 Τοπολογική Βελτιστοποίηση Φορείου Εμβόλων

Για τη μελέτη του φορείου των εμβόλων αρχικά σχεδιάστηκε το απαραίτητο τρισδιάστατο μοντέλο στο λογισμικό SOLIDWORKS, ενώ στη συνέχεια δημιουργήθηκαν κάποιες ξεχωριστές επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν την επαφή με τα συνεργαζόμενα εξαρτήματα. Συγκεκριμένα τα εξαρτήματα που προσαρμόζονται στο φορείο είναι οι 4 άξονες των εμβόλων, τα 2 γραμμικά έδρανα που λειτουργούν ως οδηγοί ευθυγράμμισης του φορείου κατά την κίνηση του, και το περικόχλιο του ball screw που αναλαμβάνει την κίνηση του φορείου. Οι επιφάνειες αυτές χρησιμοποιήθηκαν σε επόμενη φάση προκειμένου να οριστούν τα απαραίτητα φορτία και οι περιορισμοί για την ανάλυση FEA. Η απλή αποτύπωση των επιφανειών σε αντίθεση με την εισαγωγή των αντίστοιχων τρισδιάστατων εξαρτημάτων απλοποιεί το πρόβλημα και μειώνει σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις και τον χρόνο επίλυσης.



(α)



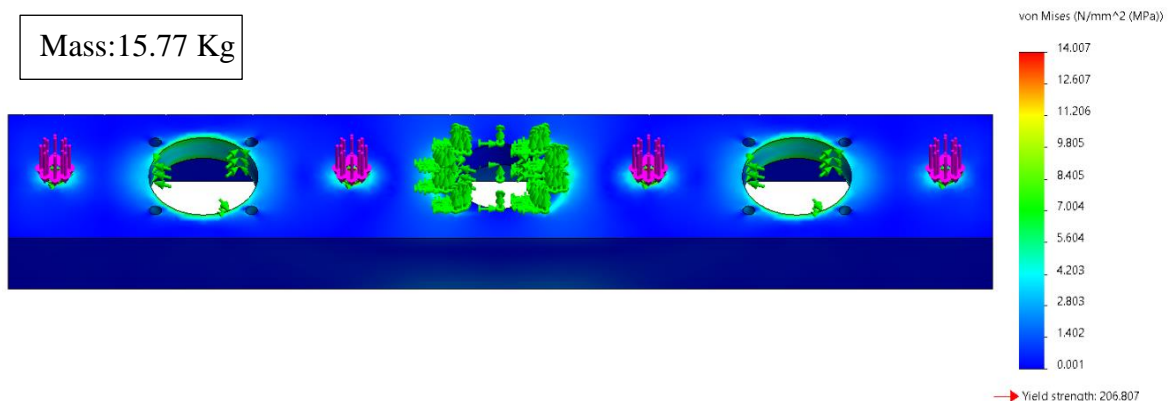
(β)

Εικόνα 11: α) Φορείο εμβόλων χωρίς επιφάνειες εξαρτημάτων β) Φορείο εμβόλων με επιφάνειες εξαρτημάτων

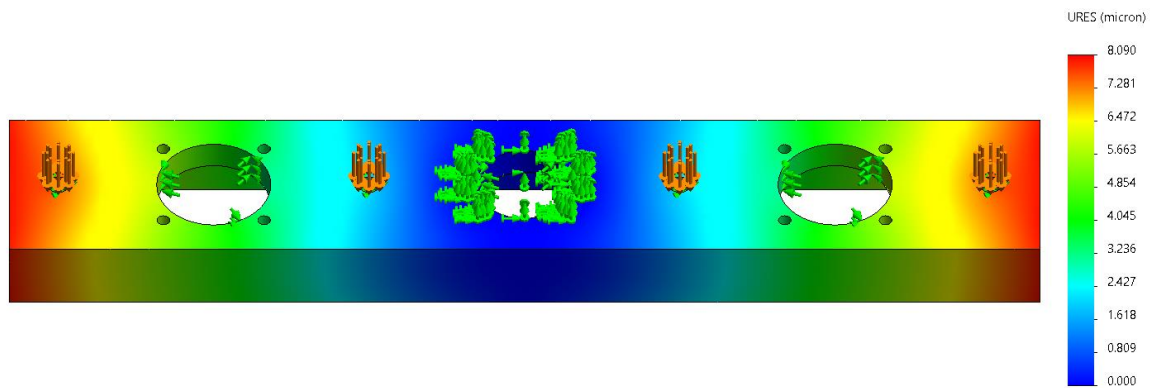
Σε κάθε μελέτη FEA είναι απαραίτητο να αξιοποιούνται και να διακριτοποιούνται μόνο τα εξαρτήματα άμεσου ενδιαφέροντος για τα οποία πρέπει να εξαχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι για εξαρτήματα που δεν πρόκειται να μελετηθούν αλλά επιδρούν στην προσομοίωση, θεωρείται σκόπιμο να οριστούν μόνο οι περιορισμοί και οι δυνάμεις που μεταφέρουν στη μελέτη και όχι τα ίδια τα εξαρτήματα. Αυτό επιτυγχάνεται είτε σχεδιαστικά με την εισαγωγή κατάλληλων επιφανειών που δεν επηρεάζουν την συμπεριφορά του εξαρτήματος αλλά οριοθετούν περιοχές ενδιαφέροντος, είτε με την εφαρμογή απομακρυσμένων φορτίων (remote loads), ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε διάταξης.

Για την εκτέλεση της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων έγινε χρήση του SOLIDWORKS Simulation που είναι ενσωματωμένο στο περιβάλλον CAD. Προκειμένου να προκύψουν οι τάσεις και παραμορφώσεις που δέχεται το φορείο κατά την κανονική λειτουργία του, πραγματοποιήθηκε μια στατική ανάλυση του μοντέλου CAD. Για να προσομοιωθούν οι συνθήκες λειτουργίας θεωρήθηκε ότι το φορείο είναι πακτωμένο (fixed) με το περικόχλιο του ball screw όπως υποδεικνύουν τα πράσινα διανύσματα στο κεντρικό μέρος της γεωμετρίας στην εικόνα 12. Επιπλέον τόσο για την οπή του ball screw όσο και για τις 2 οπές των γραμμικών εδράνων έχουν οριστεί οι περιορισμοί επαφής με τα αντίστοιχα εξαρτήματα που εμποδίζουν την ακτινική μεταβολή των οπών αλλά επιτρέπουν την αξονική μετακίνηση.

Για τα φορτία που ασκούνται στο φορείο κατά τη λειτουργία του, έχουν οριστεί οι μέγιστες δυνάμεις των εμβόλων όταν αυτά αρχίζουν την εξώθηση υλικού από τους πλήρως γεμάτους κυλίνδρους και όταν βρίσκονται στην κατώτατη θέση στον όγκο εμβολισμού. Το φορείο δέχεται τις δυνάμεις των εμβόλων μέσω των αξόνων διαμέτρου $\Phi 20$, έτσι ως επιφάνεια εφαρμογής των φορτίων έχει οριστεί η επιφάνεια που δημιουργείται μεταξύ της οπής του κάθε άξονα και της εξωτερικής διαμέτρου του. Τα φορτία που παρουσιάζονται στην εικόνα 12 ως μωβ διανύσματα είναι υπό την μορφή κάθετης δύναμης 408,45 N για κάθε έμβολο, συνυπολογίζοντας τη μάζα των εμβόλων και των αξόνων τους.



Εικόνα 12: Απεικόνιση αναπτυσσόμενων τάσεων (MPa) κατά τη φόρτιση του φορείου εμβόλων (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)



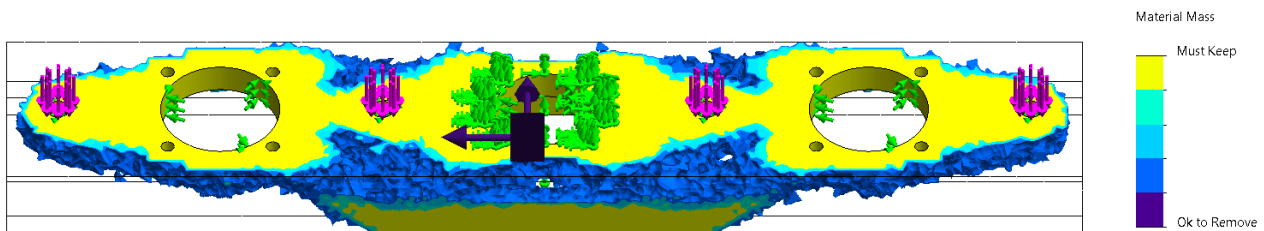
Εικόνα 13: Απεικόνιση μετατόπισης (microns) κατά τη φόρτιση του φορείου εμβόλων (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)

Ολοκληρώνοντας τον ορισμό των φορτίων και των περιορισμών του προβλήματος έγινε η διακριτοποίηση του μοντέλου (curvature based meshing) και εκτελέστηκε η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση είναι 14 MPa με το όριο ελαστικότητας να είναι στα 207 MPa, και η μέγιστη μετατόπιση 8.1μm όπως φαίνεται στις εικόνες 12 και 13 αντίστοιχα.

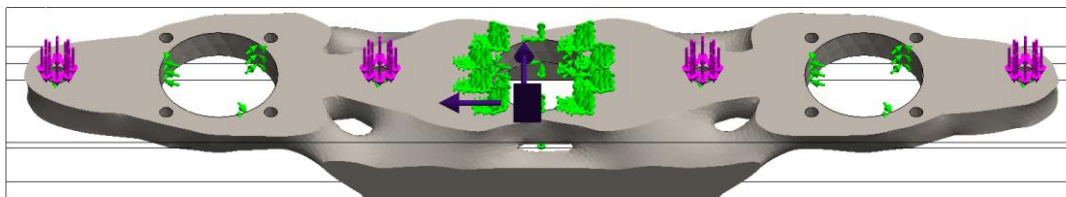
Αξιολογώντας τις τιμές των μεγεθών σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή του εξαρτήματος και τις αποδεκτές μετατοπίσεις κατά τη λειτουργία, κρίθηκε σκόπιμο να συνεχιστεί η μελέτη με την εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα υπολογιστικά εργαλεία του SOLIDWORKS Simulation. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε μελέτη τοπολογικής βελτιστοποίησης όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι απαραίτητο να οριστούν συγκεκριμένοι στόχοι για το επιθυμητό αποτέλεσμα που ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα προσπαθήσει να επιτύχει.

Διατηρώντας τις συνθήκες φόρτισης και τους περιορισμούς από την στατική ανάλυση που προηγήθηκε, ορίστηκαν ως στόχοι της ανάλυσης η μείωση της μάζας κατά 50%, η μέγιστη μετατόπιση να είναι μικρότερη από 1.2 φορές της μετατόπισης του αρχικού μοντέλου, να διατηρηθεί η συμμετρία του σώματος ως προς το επίπεδο συμμετρίας του, και να διατηρηθούν ανέπαφες οι περιοχές στις οποίες υπάρχει σύνδεση με άλλα εξαρτήματα του μηχανισμού. Στην συνέχεια έγινε η διακριτοποίηση και η εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Με τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων το λογισμικό προτείνει την γεωμετρία που φαίνεται στην εικόνα 14 και κάνει έναν σαφή χρωματικό διαχωρισμό μεταξύ των περιοχών του μοντέλου που μπορούν να αφαιρεθούν και εκείνων που πρέπει να διατηρηθούν προκειμένου να ικανοποιούνται οι συνθήκες βελτιστοποίησης. Με κίτρινο χρώμα εμφανίζονται οι περιοχές που συμμετέχουν άμεσα στη δυσκαμψία της γεωμετρίας και οι περιοχές που ορίστηκε ότι πρέπει να διατηρηθούν ώστε να ικανοποιείται η λειτουργικότητα του εξαρτήματος. Αντίστοιχα με αποχρώσεις

του μπλε και του μωβ εμφανίζονται περιοχές του μοντέλου που συμμετέχουν λιγότερο στη δυσκαμψία και περιοχές που μπορούν να αφαιρεθούν. Για καλύτερη απεικόνιση της προτεινόμενης γεωμετρίας υπάρχει η επιλογή της εμφάνισης ως διακριτοποιημένο σώμα (smoothed mesh) όπως φαίνεται στην εικόνα 15. Έχοντας ορίσει ένα επιθυμητό ποσοστό μείωσης της μάζας 50% το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ελέγξει πιθανές γεωμετρίες που προκύπτουν και με μικρότερα ή μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης χωρίς να χρειαστεί να εκτελεστεί εκ νέου ο αλγόριθμος. Μικρότερα ποσοστά μείωσης έχουν ως αποτέλεσμα την προσθήκη περισσότερου υλικού στις αντίστοιχες περιοχές του μοντέλου.



Εικόνα 14: Material Mass Plot- Απεικόνιση των περιοχών που μπορεί να αφαιρεθεί υλικό



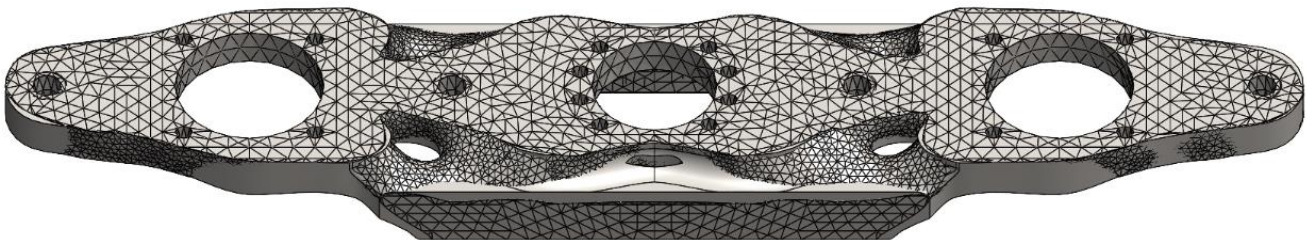
Εικόνα 15: Απεικόνιση διακριτοποιημένου σώματος (smoothed mesh)

Η επιλογή της καταλληλότερης πυκνότητας υλικού σε αυτό το στάδιο εξαρτάται εξολοκλήρου από την κρίση και την εμπειρία του μηχανικού. Προκειμένου να πιστοποιηθεί η εγκυρότητα της όποιας απόφασης κρίνεται απαραίτητο να γίνει έλεγχος της προτεινόμενης γεωμετρίας με μια νέα ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ώστε να υπολογιστεί ο βαθμός βελτιστοποίησης. Ένα μοντέλο σε διακριτοποιημένη μορφή (mesh body) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για μελέτη FEA και έτσι είναι απαραίτητο ένα στάδιο τροποποίησης του αρχικού μοντέλου ή ακόμα και επανασχεδιασμού ανάλογα με την πολυπλοκότητα της προτεινόμενης γεωμετρίας και των τεχνικών σχεδιασμού που έχουν χρησιμοποιηθεί στο πρωτότυπο μοντέλο. Για τη διευκόλυνση του χρήστη σε αυτή τη διαδικασία το SOLIDWORKS προσφέρει την επιλογή εξαγωγής του διακριτοποιημένου σώματος σε μορφή στερεού σώματος (solid body) ή σώματος επιφανειών (surface body). Ανάλογα με τη λεπτομέρεια διακριτοποίησης (διαστάσεις πεπερασμένων

στοιχείων) που εφαρμόστηκε πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, αντίστοιχη θα είναι και η ποιότητα των επιφανειών του εξαγόμενου σώματος. Όσο μικρότερα είναι τα στοιχεία διακριτοποίησης τόσο μεγαλύτερη είναι η λεπτομέρεια που θα μεταφερθεί στο σώμα και ως εκ τούτου η ομοιομορφία και ομαλότητα των επιφανειών.

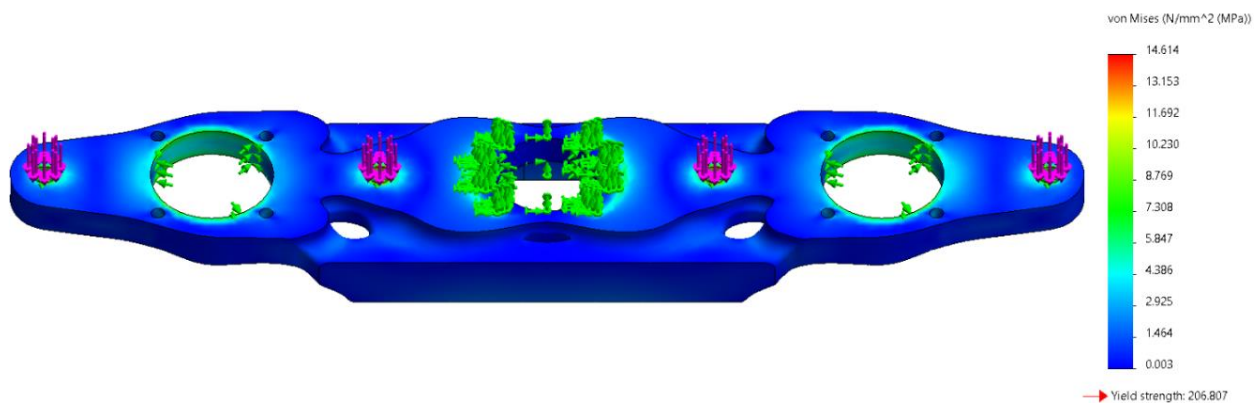
Έτσι για το φορείο των εμβόλων έγινε εξαγωγή του μοντέλου σε μορφή στερεού σώματος και με βάση αυτό τροποποιήθηκε αντίστοιχα το πρωτότυπο CAD μοντέλο ώστε να ταυτίζεται με την προτεινόμενη γεωμετρία. Το τελικό αποτέλεσμα της σχεδιαστικής τροποποίησης φαίνεται στην εικόνα 16 ως συσσωμάτωμα με το στερεό σώμα που προέκυψε από την εξαγωγή. Σε πλεγματική μορφή εμφανίζονται στοιχεία που ανήκουν στο στερεό σώμα ενώ με συνεχείς επιφάνειες τα στοιχεία του τροποποιημένου CAD μοντέλου.

Η αποτύπωση της γεωμετρίας από ένα διακριτοποιημένο σώμα είναι μια δύσκολη διαδικασία που εξαρτάται στον μεγαλύτερο βαθμό από την ικανότητα του σχεδιαστή και των διαθέσιμων εργαλείων του κάθε λογισμικού. Το στάδιο αυτό περιγράφεται καλύτερα ως μια διαδικασία που είναι γνωστή ως Αντίστροφη Μηχανική (Reverse Engineering) και υπάρχουν εξειδικευμένα λογισμικά (όπως το Geomagic Design X) που εξυπηρετούν αποκλειστικά τις ανάγκες τέτοιων διαδικασιών. Στο παρελθόν η Αντίστροφη Μηχανική αφορούσε αποκλειστικά εξειδικευμένες βιομηχανίες και τεχνολογίες. Με την εμπορική χρήση τεχνολογιών όπως η 3D σάρωση, 3D εκτύπωση και των αντίστοιχων υπολογιστικών εργαλείων, η ανάγκη για διαδικασίες Αντίστροφης Μηχανικής είναι πλέον εμφανής στους περισσότερους κατασκευαστικούς κλάδους. Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ανάγκης για ικανοποιητική διαχείριση τέτοιων σωμάτων και διαδικασιών, τα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά CAD όπως και το SOLIDWORKS διαθέτουν κατάλληλα εργαλεία για τη μετάβαση από τη διακριτοποιημένη γεωμετρία σε αξιοποιήσιμα μοντέλα βάσει χαρακτηριστικών (feature-based).

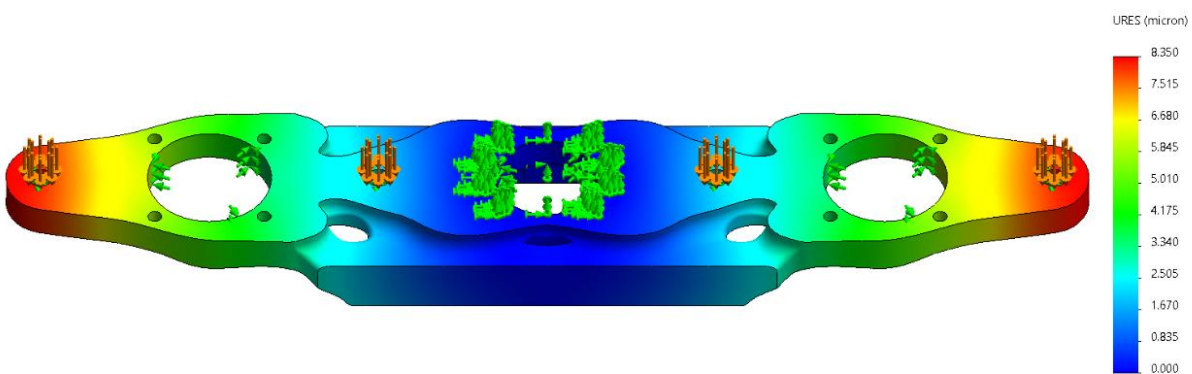


Εικόνα 16: Συσσωμάτωμα στερεού σώματος εξαγωγής και τροποποιημένου πρωτότυπου μοντέλου CAD

Με την ολοκλήρωση της σχεδιαστικής τροποποίησης έγινε απομόνωση του βελτιστοποιημένου μοντέλου και στη συνέχεια εκτελέστηκε μια νέα ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Για τη μελέτη ορίστηκαν ακριβώς οι ίδιοι περιορισμοί και συνθήκες φόρτισης με τη μελέτη της πρωτότυπης γεωμετρίας του φορείου. Από τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης προκύπτει ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση που εμφανίζεται στη βελτιστοποιημένη γεωμετρία είναι 14.6 MPa (4.3% αύξηση από την αναπτυσσόμενη τάση της αρχικής γεωμετρίας 14 MPa), και η μετατόπιση 8.35 μm (3.1% αύξηση από την αντίστοιχη της αρχικής γεωμετρίας 8.1 μm), όπως φαίνεται στις εικόνες 17 και 18 αντίστοιχα. Η μάζα του βελτιστοποιημένου μοντέλου είναι 8.85 Kg (44% μείωση από την αρχική μάζα 15.77 Kg). Αξιολογώντας τα αποτελέσματα κρίνεται ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση στη συμπεριφορά του μοντέλου δεδομένου ότι παρατηρείται μεγάλη μείωση της μάζας και ταυτόχρονα αμελητέα μεταβολή στα μεγέθη της τάσης και της μετατόπισης. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση αποτελεί μόλις το 7% του ορίου ελαστικότητας και η μετατόπιση των 8.1 μm είναι αδιάφορη διότι είναι πολύ μικρότερη από τις ανοχές συναρμογής μεταξύ των κινούμενων εξαρτημάτων του μηχανισμού.

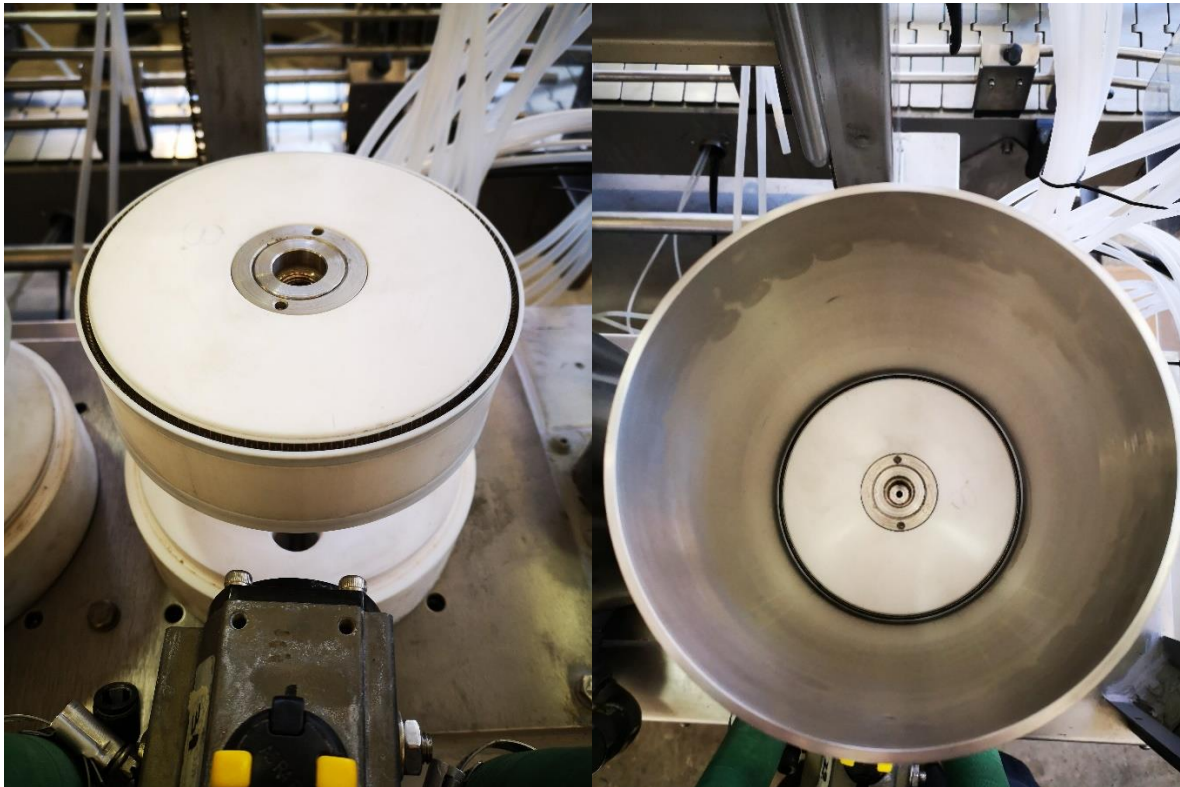


Εικόνα 17: Απεικόνιση αναπτυσσόμενων τάσεων (MPa) κατά τη φόρτιση του βελτιστοποιημένου φορείου εμβόλων (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)



Εικόνα 18: Απεικόνιση μετατόπισης (microns) κατά τη φόρτιση του βελτιστοποιημένου φορείου εμβόλων (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)

4.3 Τοπολογική Βελτιστοποίηση Εμβόλου

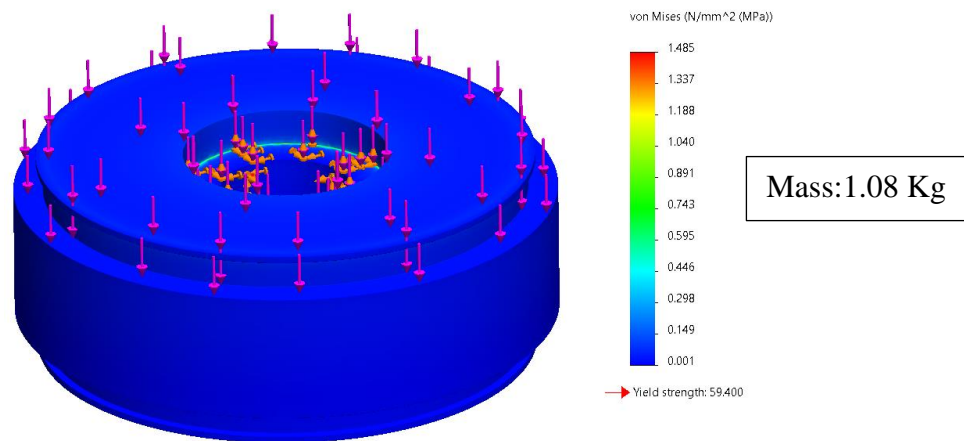


Εικόνα 19: Έμβολο ογκομετρικού μηχανισμού με εξαρτήματα σύνδεσης και στεγανοποίησης

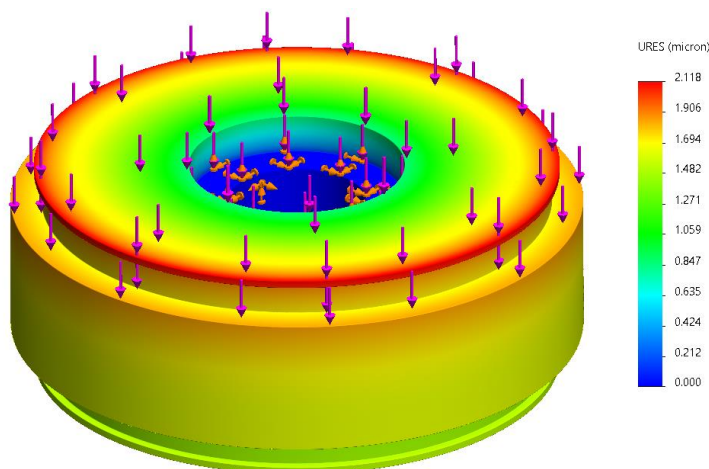
Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία που αναλύθηκε παραπάνω για τη βελτιστοποίηση του φορείου των εμβόλων στη συνέχεια έγινε η μελέτη και βελτιστοποίηση των ίδιων των εμβόλων (POM Acetal Copolymer) του ογκομετρικού μηχανισμού. Όπως φαίνεται στην εικόνα 19 το έμβολο αποτελεί μέρος ενός συναρμολογήματος εξαρτημάτων που συμμετέχουν στη διαδικασία εμβολισμού. Συγκεκριμένα τα εξαρτήματα αυτά είναι οι δύο τσιμούχες στεγανοποίησης (Teflon) στο πάνω και στο κάτω μέρος του εμβόλου, ένας σύνδεσμος (AISI 316) των αξόνων στο κέντρο του εμβόλου, ένα O-Ring στεγανοποίησης στο κέντρο του συνδέσμου και δύο περικόχλια συγκράτησης (AISI 316) του συνδέσμου στο εσωτερικό του εμβόλου.

Όπως και στη μελέτη που έχει προηγηθεί, για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αξιοποιήθηκε μόνο το μοντέλο CAD του εμβόλου ενώ η συμμετοχή των υπόλοιπων εξαρτημάτων έχει οριστεί με τη μορφή περιορισμών (constraints) και συνδέσεων (fixtures) ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις του προβλήματος χωρίς να επηρεαστεί το αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα έχουν οριστεί ως πακτωμένες (fixed) οι επιφάνειες του εμβόλου που έρχονται σε επαφή με τον σύνδεσμο των αξόνων και

τα δύο περικόχλια του. Κατά τη μετακίνηση του εμβόλου στη διαδικασία πλήρωσης αυτά τα εξαρτήματα παραμένουν ακλόνητα και έτσι αποτελούν τους παράγοντες περιορισμού των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου. Το φορτίο καταπόνησης υπό τη μορφή δύναμης (N) εφαρμόζεται ομοιόμορφα στις επιφάνειες του εμβόλου μέσω του ρευστού προϊόντος στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Η μέγιστη δύναμη που έχει υπολογιστεί ότι ασκείται σε κάθε έμβολο του μηχανισμού είναι αποτέλεσμα του βάρους του προϊόντος (50 N) και της μέγιστης πίεσης (0.2 bar) που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Έτσι για κάθε έμβολο έχει οριστεί μια δύναμη 388,45 N η οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στις επιφάνειες του εμβόλου που έρχονται σε επαφή με το ρευστό. Η δύναμη των 50 N προϊόντος είναι η μέγιστη πιθανή καθ' όλη τη διάρκεια πλήρωσης και αντιπροσωπεύει την κατάσταση όπου το έμβολο βρίσκεται στην κατώτατη θέση του όγκου εμβολισμού.



Εικόνα 20: Απεικόνιση αναπτυσσόμενων τάσεων (MPa) κατά τη φόρτιση του εμβόλου (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)

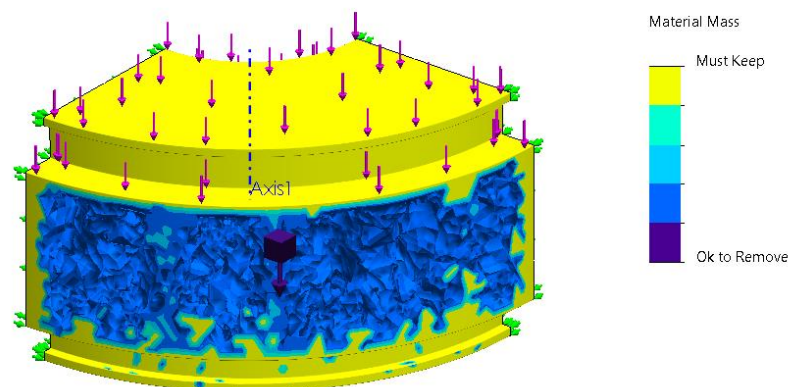


Εικόνα 21: Απεικόνιση μετατόπισης (microns) κατά τη φόρτιση του εμβόλου (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)

Έχοντας ορίσει το υλικό του εμβόλου, τους περιορισμούς και τα φορτία έγινε η διακριτοποίηση του μοντέλου και στη συνέχεια η στατική ανάλυση από την οποία προέκυψαν οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις (1.5 MPa) και μετατοπίσεις (2.1 μm) όπως φαίνεται στις εικόνες 20 και 21 αντίστοιχα. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα φαίνεται πως η μέγιστη τάση είναι σημαντικά μικρότερη από το όριο ελαστικότητας του υλικού (59.4 MPa) και η μετατόπιση αμελητέα σε σχέση με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Έτσι κρίθηκε σκόπιμο να συνεχιστεί η μελέτη με μία ανάλυση τοπολογικής βελτιστοποίησης προκειμένου να μειωθεί η μάζα του εμβόλου που στη δεδομένη φάση είναι 1.08 Kg.

Το έμβολο είναι κατασκευασμένο εκ περιστροφής και πλήρως συμμετρικό, έτσι έγινε τροποποίηση της γεωμετρίας προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα και να μειωθούν σημαντικά οι υπολογιστικές απαιτήσεις. Συγκεκριμένα αποφασίστηκε να γίνει τομή του μοντέλου σε δύο επίπεδα και η μελέτη να πραγματοποιηθεί σε ένα τεταρτημόριο της συνολικής γεωμετρίας. Στη συνέχεια με τα κατάλληλα ορίσματα, τα αποτελέσματα θα αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά του ολοκληρωμένου μοντέλου αλλά με το 1/4 του υπολογιστικού κόστους σε σχέση με την ανάλυση του πλήρους σώματος.

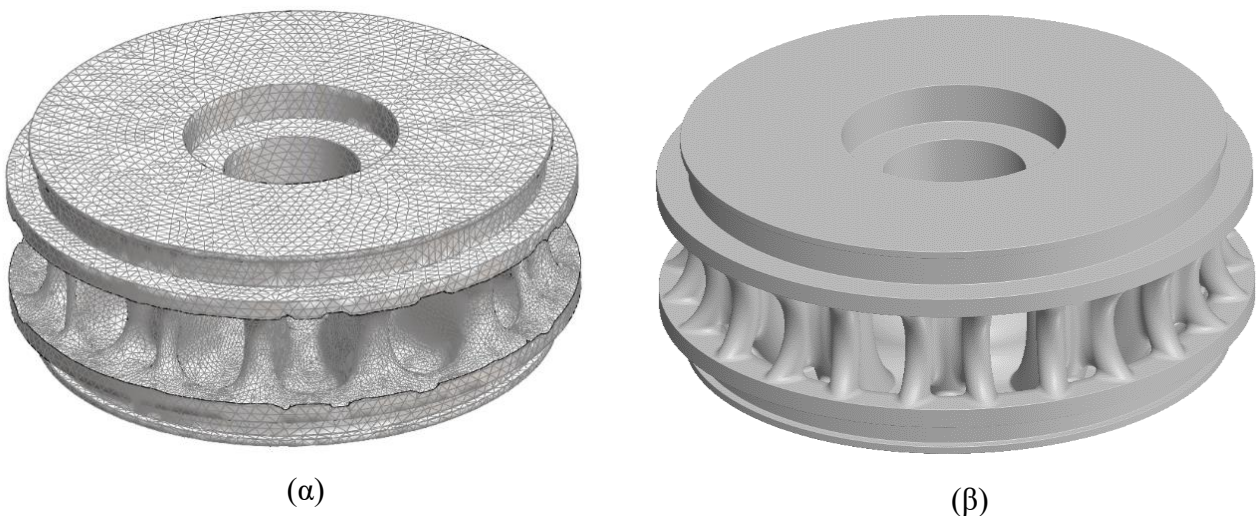
Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι απαραίτητο να οριστούν συγκεκριμένοι στόχοι τους οποίους θα προσπαθήσει να επιτύχει ο αλγόριθμος. Από την αρχική μελέτη πεπερασμένων στοιχείων έχουν μεταφερθεί οι περιορισμοί ενώ το φορτίο είναι μειωμένο στο 1/4 του αρχικού για να αντικατοπτρίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τροποποιημένου μοντέλου, έτσι η δύναμη που θα εφαρμόζεται σε κάθε τεταρτημόριο του σώματος είναι 97.11 N. Επιπλέον ορίστηκαν περιορισμοί κυλινδρικής συμμετρίας ώστε να δηλωθούν και τα υπόλοιπα τεταρτημόρια του μοντέλου και τα αποτελέσματα να αφορούν το ολοκληρωμένο έμβολο. Ως στόχοι της ανάλυσης ορίστηκαν, η μείωση της μάζας κατά 55%, η βέλτιστη αναλογία δυσκαμψίας /μάζας (best stiffness to weight ratio), η διατήρηση των περιοχών που έρχονται σε επαφή με άλλα εξαρτήματα, το ελάχιστο πάχος των περιοχών αυτών να είναι στα 4 mm, η διατήρηση της συμμετρίας στο πάνω και κάτω μέρος του εμβόλου.



Εικόνα 22: Material Mass Plot- Απεικόνιση των περιοχών που μπορεί να αφαιρεθεί υλικό

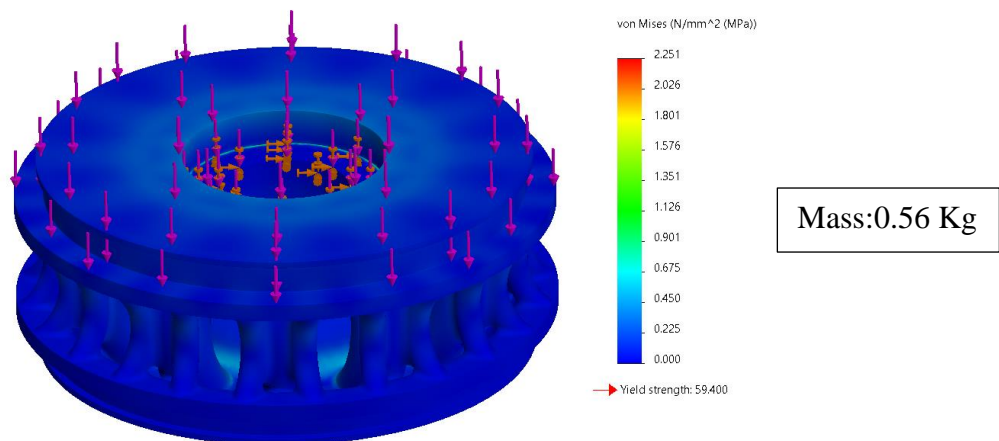
Έχοντας ορίσει πλήρως τους στόχους της ανάλυσης, στη συνέχεια έγινε η διακριτοποίηση του μοντέλου και η εκτέλεση του αλγορίθμου τοπολογικής βελτιστοποίησης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 22 με κίτρινο παρουσιάζονται οι περιοχές του μοντέλου που πρέπει να διατηρηθούν, ενώ με αποχρώσεις του μπλε και του μωβ οι περιοχές του μοντέλου που δεν συμμετέχουν στον ίδιο βαθμό στη δυσκαμψία της γεωμετρίας και μπορούν να αφαιρεθούν ανάλογα με την κρίση του μηχανικού.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο αλγόριθμος αυτόματα θεωρεί σημαντικές όλες τις περιοχές του μοντέλου στις οποίες ασκούνται φορτία ή έχουν οριστεί περιορισμοί. Έτσι τα επίπεδα συμμετρίας που ορίζουν τα διαφορετικά τεταρτημόρια του σώματος θεωρούνται από το λογισμικό περιοχές που πρέπει να διατηρηθούν και ως εκ τούτου παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα. Επιπλέον επειδή αυτές οι περιοχές είναι πλήρως επίπεδες επιφάνειες (εφόσον προέκυψαν από κάθετη τομή) το κάθε βελτιστοποιημένο τεταρτημόριο περιλαμβάνει δύο ανέπαφες επιφάνειες ως ορίσματα συμμετρίας και μεταξύ των επιπέδων αυτών έχει αφαιρεθεί η απαραίτητη μάζα. Το πάχος των επιφανειών αυτών είναι το μισό του ελάχιστου πάχους που είχε οριστεί στους στόχους της ανάλυσης (άρα 2 mm). Στην πραγματικότητα είναι γνωστό από τον ορισμό του προβλήματος ότι αυτά τα επίπεδα δεν υπάρχουν και χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά για να αποτυπώσουν την κυλινδρική συμμετρία και να απλοποιήσουν τους υπολογισμούς. Έτσι κρίνεται ότι αυτές οι επιφάνειες που παραμένουν μετά τη βελτιστοποίηση μπορούν να αφαιρεθούν και να διατηρηθεί η συμμετρία που ορίζεται από τα υπόλοιπα τμήματα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Η ιδιαιτερότητα αυτή του αλγορίθμου αντιμετωπίζεται σχεδιαστικά σε επόμενη φάση της μελέτης. Με την ολοκλήρωση της τοπολογικής βελτιστοποίησης γίνεται εξαγωγή του μοντέλου σε μορφή στερεού σώματος, διαγραφή των επιπέδων που έχουν παραμείνει, συμπλήρωση των τεταρτημόριων που ολοκληρώνουν το μοντέλο του εμβόλου (εικόνα 23,α) και κατάλληλη τροποποίηση του πρωτότυπου CAD ώστε να ταυτίζεται με την προτεινόμενη βελτιστοποιημένη γεωμετρία (εικόνα 23,β).

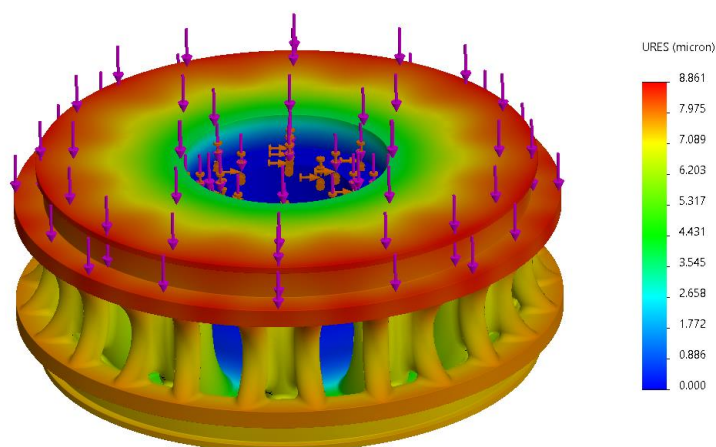


Εικόνα 23: Διακριτοποιημένο-βελτιστοποιημένο σώμα (α) και τροποποιημένο πρωτότυπο CAD μοντέλο (β)

Στη συνέχεια προκειμένου να γίνει αξιολόγηση και πιστοποίηση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, πραγματοποιήθηκε μια νέα ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Τόσο οι περιορισμοί όσο και τα φορτία της μελέτης ταυτίζονται με αυτά της αρχικής ανάλυσης του εμβόλου, έτσι έγινε η διακριτοποίηση του μοντέλου και η εκτέλεση της στατικής ανάλυσης. Από τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στις εικόνες 24 και 25 αντίστοιχα, προκύπτει ότι η νέα μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση είναι 2.25 MPa (αύξηση 50% σε σχέση με το αρχικού μοντέλου 1.5 MPa) και η μέγιστη μετατόπιση είναι 8.86 μm (αύξηση 322% σε σχέση με του αρχικού μοντέλου 2.1 μm), με τη μάζα να είναι στα 0.56 Kg (μείωση 48% σε σχέση με του αρχικού μοντέλου 1.08 Kg). Παρά τη μεγάλη ποσοστιαία αύξηση των μεγεθών τάσης και μετατόπισης, οι τιμές τους είναι ικανοποιητικές και αποδεκτές με γνώμονα το όριο ελαστικότητας του υλικού (59.4 MPa), τις ανοχές συναρμογής του μηχανισμού και της συχνότητας εμβολισμού. Ταυτόχρονα η διαφορά στη μάζα μεταξύ πρωτότυπου μοντέλου και βελτιστοποιημένου είναι αξιοσημείωτη και δικαιολογεί εν μέρη τις σημαντικές μεταβολές των μεγεθών τάσης και μετατόπισης.



Εικόνα 24: Απεικόνιση αναπτυσσόμενων τάσεων (MPa) κατά τη φόρτιση του βελτιστοποιημένου εμβόλου (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)



Εικόνα 25: Απεικόνιση μετατόπισης (microns) κατά τη φόρτιση του βελτιστοποιημένου εμβόλου (αποτέλεσμα στατικής ανάλυσης FEA)

5. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

5.1 Μελέτη Κατασκευασιμότητας Φορείου

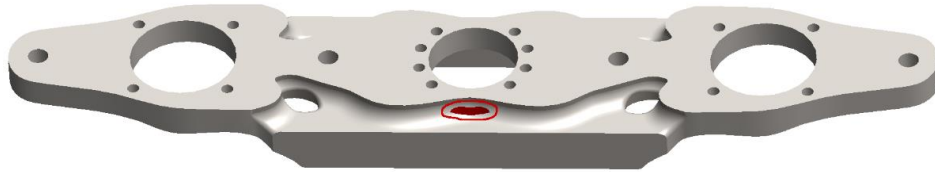
Μέσω της διαδικασίας τοπολογικής βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε για το φορείο των εμβόλων, επιβεβαιώθηκε η προτεινόμενη γεωμετρία μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων ως ασφαλής λύση που ικανοποιεί τους λειτουργικούς στόχους του εξαρτήματος. Το γεγονός αυτό από μόνο του δεν είναι αρκετό ώστε να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη μορφή στο εξάρτημα που τελικά θα παραχθεί, και αυτό οφείλεται στο γεγονός των κατασκευαστικών περιορισμών που επιβάλλει η προτεινόμενη γεωμετρία.

Στη βελτιστοποιημένη του μορφή το φορείο θα μπορούσε να κατασκευαστεί με προσθετική μέθοδο (Metal 3D Printing), αλλά αυτή η επιλογή δεν δικαιολογείται για τον ρόλο που επιτελεί το συγκεκριμένο εξάρτημα. Η μέθοδος του Metal 3D Printing παρουσιάζει σημαντικά αυξημένο κόστος σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη συμβατική μέθοδο παραγωγής και επιλέγεται μόνο όταν απαιτείται μέγιστη δομική απόδοση που επιτυγχάνεται με σύνθετες οργανικές δομές. Επιπλέον για το συγκεκριμένο εξάρτημα η προσθετική μέθοδος είναι πολύ πιο χρονοβόρα από τις αντίστοιχες μεθόδους αφαίρεσης υλικού, και οι διαστάσεις του θα απαιτούσαν πολύ εξειδικευμένο 3D printer που ελάχιστες βιομηχανίες παγκοσμίως διαθέτουν.

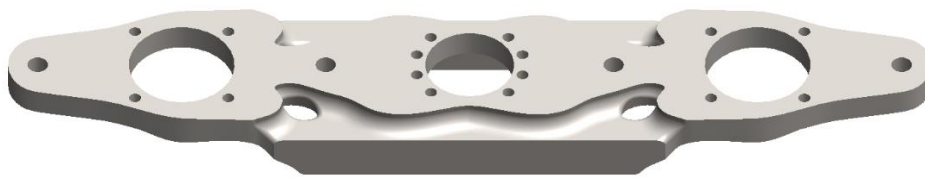
Έτσι, είναι δεδομένο ότι θα πραγματοποιηθούν αλλαγές στο μοντέλο CAD του φορείου προκειμένου να μπορεί να κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας. Οι αλλαγές μπορεί να είναι μικρότερες ή μεγαλύτερες ανάλογα με τα διαθέσιμα εργαλεία κατεργασίας αλλά σε κάθε περίπτωση θα βασίζονται στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την τοπολογική βελτιστοποίηση.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 26 η οπή του μοντέλου που έχει σημειωθεί με κόκκινο χρώμα, δεν είναι εύκολο να κατασκευαστεί διότι περιλαμβάνει γωνίες στην οποίες κανένα κοπτικό εργαλείο δεν θα μπορούσε να πραγματοποιήσει κατεργασία. Επιπλέον, το μεγαλύτερο κοπτικό εργαλείο που θα μπορούσε να πραγματοποιήσει αυτή την διαμόρφωση (εξαιρουμένων των γωνιών) είναι διαμέτρου 3mm και υπάρχει σημαντικός κίνδυνος να σπάσει κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, ενώ παράλληλα η προσπάθεια θα απαιτούσε σημαντικό χρόνο απασχόλησης της εργαλειομηχανής. Η συνεισφορά των συγκεκριμένων οπών (μια από την κάθε συμμετρική πλευρά) δεν είναι σημαντική για τη μείωση της μάζας του εξαρτήματος (-10 gr από τη συνολική μάζα) ενώ δημιουργεί προβλήματα στην κατεργασία του. Έτσι αποφασίζεται να διαγραφεί από το μοντέλο όπως φαίνεται στην εικόνα 27. Στη νέα του μορφή,

το φορείο των εμβόλων μπορεί να κατασκευαστεί ασφαλώς με εργαλειομηχανή CNC τριών αξόνων και πάνω ώστε να αποτυπωθούν πλήρως οι καμπύλες που περιλαμβάνονται.



Εικόνα 26: Φορείο εμβόλων με διαμόρφωση σπής που πρέπει να αφαιρεθεί



Εικόνα 27: Φορείο εμβόλων στο οποίο έχει αφαιρεθεί η διαμόρφωση σπής

5.2 Μελέτη Κατασκευασιμότητας Εμβόλου

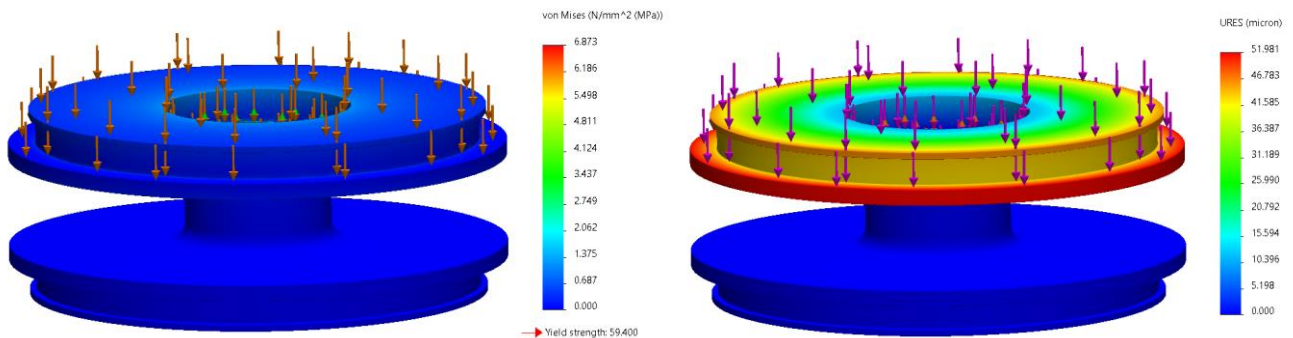
Το έμβολο του ογκομετρικού μηχανισμού στη βελτιστοποιημένη του μορφή όπως φαίνεται στην εικόνα 23, μπορεί να κατασκευαστεί μόνο με προσθετική μέθοδο και αυτό διότι περιλαμβάνει περιοχές στις οποίες κανένα κοπτικό εργαλείο, οποιασδήποτε εργαλειομηχανής, δεν μπορεί να έχει πρόσβαση (εικόνα 28). Έτσι πρόκειται για μια περίπτωση εξαρτήματος στην οποία ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης οδηγεί σε μια μοναδική κατασκευαστική λύση, εφόσον γίνουν αποδεκτά τα προτεινόμενα αποτελέσματα.



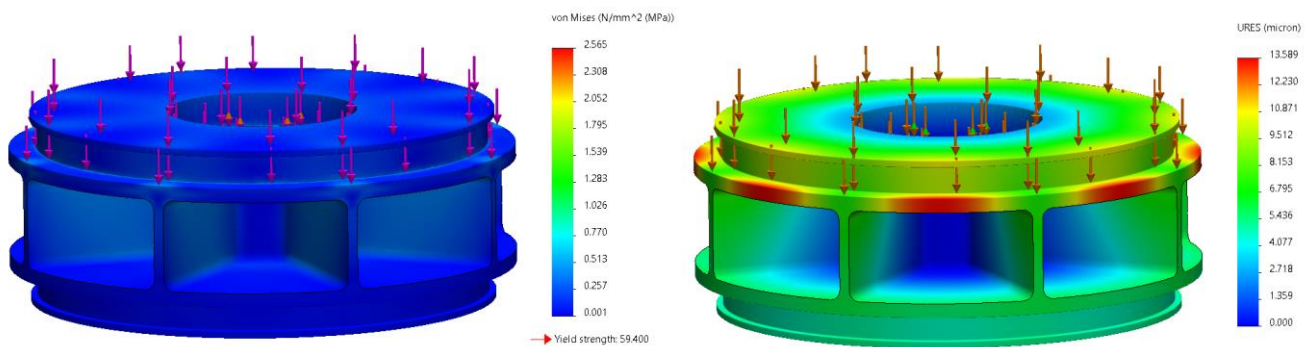
Εικόνα 28: Τομή βελτιστοποιημένου εμβόλου

Το υλικό κατασκευής του εμβόλου είναι πολυμερές (POM Acetal) και διαθέσιμη επιλογή για κατασκευή με προσθετική μέθοδο σε μια πληθώρα διαφορετικών 3D Printers. Έτσι αποφασίστηκε να μελετηθεί περαιτέρω η συγκεκριμένη μέθοδος, της οποίας η διαδικασία και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα.

Προκειμένου να μελετηθεί επαρκώς τόσο η κατασκευασσιμότητα του βελτιστοποιημένου εμβόλου όσο και οι πιθανές εναλλακτικές μέθοδοι κατεργασίας, παρακάτω παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις τροποποιημένων μοντέλων του εμβόλου που μπορούν να κατασκευαστούν με απλή τórνευση και κέντρο κατεργασίας αντίστοιχα. Για λόγους σύγκρισης και ώστε να διατηρηθεί η αναλογία, τα δύο μοντέλα έχουν διαμορφωθεί έτσι ώστε να έχουν την ίδια μάζα με αυτή του βελτιστοποιημένου εμβόλου (0.56 Kg). Στη συνέχεια εκτελέστηκε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος της τροποποιημένης γεωμετρίας στην αντοχή του εξαρτήματος. Από τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης προκύπτει ότι το μοντέλο τórνευσης παρουσιάζει αύξηση της τάσης και της μετατόπισης κατά 199% και 486.7% αντίστοιχα, ενώ το μοντέλο του κέντρου κατεργασίας, αύξηση 13.7% και 53.4%. Παρά την αυξημένη ποσοστιαία αύξηση, οι τιμές των μεγεθών καθιστούν τα μοντέλα εφικτές επιλογές, με αυτό του κέντρου κατεργασίας να παρουσιάζει την καλύτερη δομική απόδοση μεταξύ των δύο.



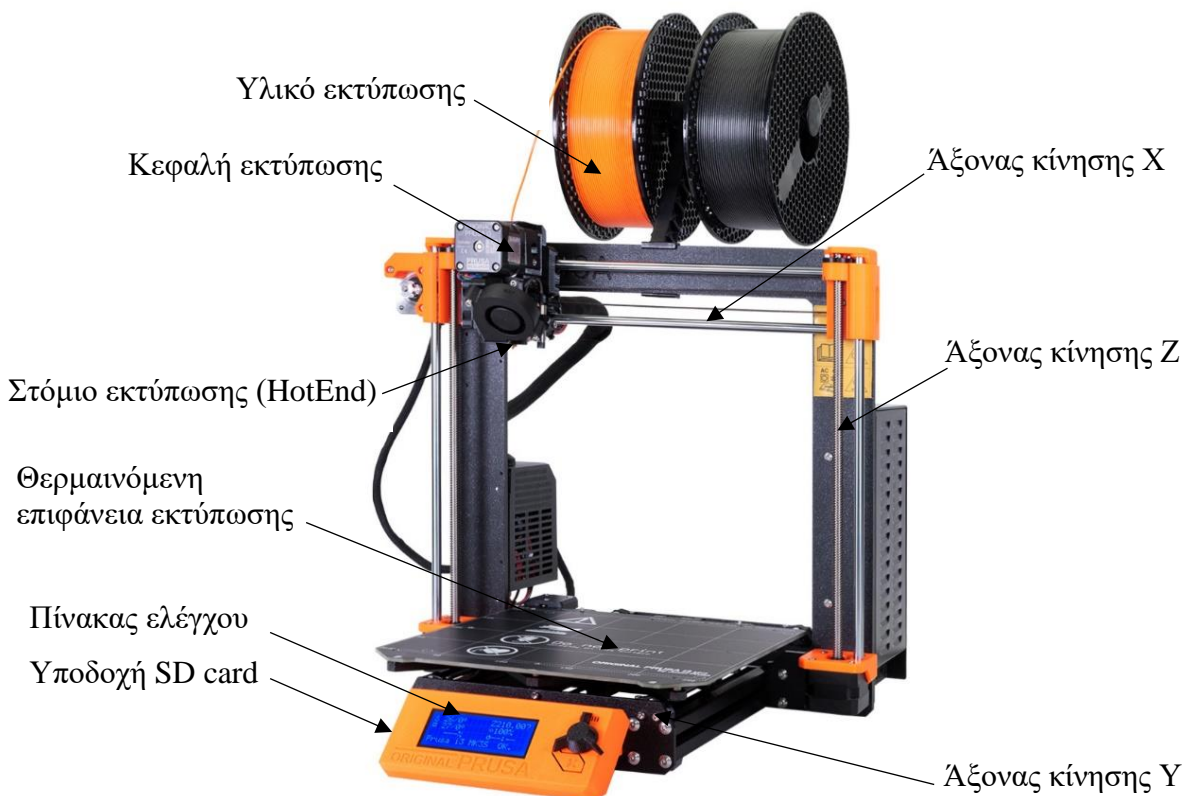
Εικόνα 29: Αναπτυσσόμενες τάσεις (MPa) και μετατοπίσεις (microns) μοντέλου τórνευσης



Εικόνα 30: Αναπτυσσόμενες τάσεις (MPa) και μετατοπίσεις (microns) μοντέλου κέντρου κατεργασίας

5.3.1 Κατασκευή Εμβόλου με Προσθετική Μέθοδο FDM

Για τη μελέτη κατασκευασιμότητας του βελτιστοποιημένου εμβόλου με προσθετική μέθοδο, έγινε χρήση ενός FDM 3D Printer οικιακής χρήσης (Prusa i3 MK3S). Η τεχνολογία FDM (Fused Deposition Modeling) είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος προσθετικής κατασκευής για εξαρτήματα από πολυμερές, και χρησιμοποιείται σε μια πληθώρα διαφορετικών μηχανημάτων. Κατά τα πρώτα στάδια εμπορικής χρήσης των FDM μηχανών, τα διαθέσιμα υλικά δεν επέτρεπαν τη χρήση των εξαρτημάτων σε βιομηχανικές εφαρμογές και ο ρόλος τους εξυπηρετούσε περισσότερο τις ανάγκες αυτού που είναι γνωστό ως ταχεία πρωτοτυποποίηση (rapid prototyping). Εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης της βιομηχανίας για την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, πλέον έχουν αναπτυχθεί υλικά βιομηχανικών προδιαγραφών που χρησιμοποιούνται σε μηχανές FDM. Έτσι η τεχνολογία FDM μπορεί να καλύψει μια ευρεία γκάμα βιομηχανικών υλικών μεταξύ των οποίων είναι και τα carbon fiber, fiberglass, Kevlar. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί 3D Printers που μέσω της τεχνολογίας FDM ως αρχικό στάδιο, κατασκευάζουν εξαρτήματα από μέταλλα (όπως ο 3D Printer της Markforged, Metal X).

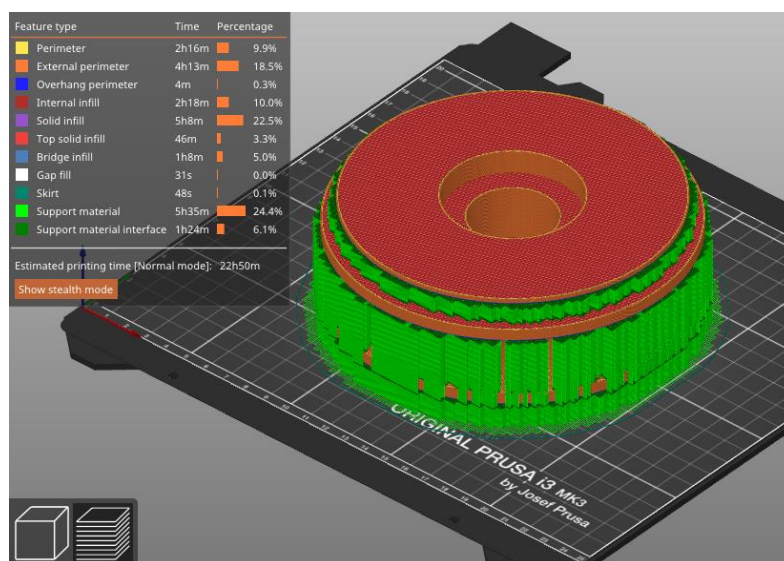


Εικόνα 31: FDM 3D Printer Prusa i3 MK3S

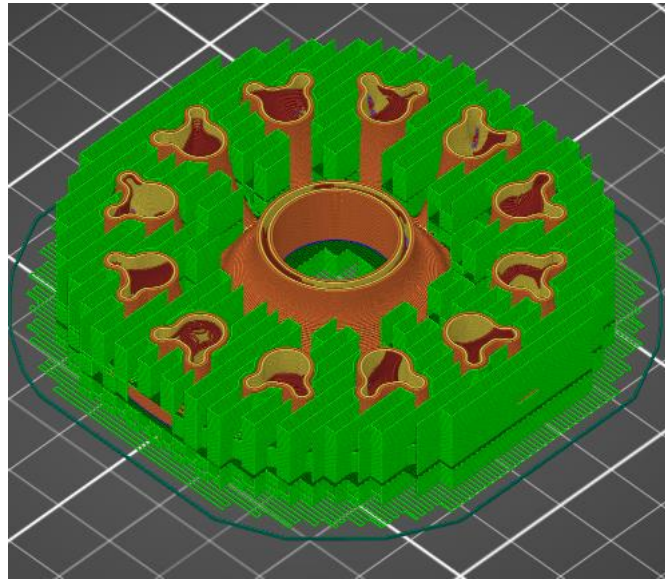
Στη μέθοδο κατασκευής FDM, το υλικό με τη μορφή νήματος εισέρχεται μέσω κατάλληλης διάταξης στην κεφαλή εκτύπωσης όπου θερμαίνεται και ρευστοποιείται. Η διαμόρφωση του στομίου εκτύπωσης (HotEnd) και ο μηχανισμός της κεφαλής, εξασφαλίζουν την ομαλή και ομοιόμορφη εξαγωγή του υλικού κατά τη διάρκεια μιας εκτύπωσης.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, η προσθετική κατασκευή κωδικοποιείται μέσα από την διαδικασία του τεμαχισμού (slicing) όπου εξάγεται και ο απαραίτητος κώδικας G. Έτσι ένα εξάρτημα που θα κατασκευαστεί μέσω 3D Printing, έχει προηγουμένως χωριστεί σε κατάλληλο αριθμό επιπέδων (layers) από τον αντίστοιχο slicer. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαδικασία εκτύπωσης ενός εξαρτήματος, αποτελείται από επιμέρους εκτυπώσεις σε κάθε επίπεδο που έχει δημιουργηθεί στο πρόγραμμα. Ο κάθε κύκλος εκτύπωσης, προσθέτει στο αντίστοιχο επίπεδο του άξονα Z μία προβολή της τομής του εξαρτήματος, μέσω της συντονισμένης κίνησης της κεφαλής στους άξονες X,Y. Για την έναρξη ενός επόμενου κύκλου γίνεται η αντίστοιχη μετακίνηση της κεφαλής στον άξονα Z, και ένα επόμενο στρώμα υλικού εναποτίθεται σε εκείνο του προηγούμενου κύκλου. Έτσι ανά επίπεδο ολοκληρώνεται η κατασκευή ενός εξαρτήματος με την μέθοδο FDM.

Για την κατασκευή του βελτιστοποιημένου εμβόλου έγινε αρχικά μια επεξεργασία του μοντέλου στον slicer του εκτυπωτή. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μια διαδικασία προσαρμογής κατάλληλων στηριγμάτων όπου κρίθηκε αναγκαίο, ώστε να μπορεί να εκτυπωθεί το μοντέλο. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για όσα μοντέλα παρουσιάζουν κάποιον πρόβολο στη γεωμετρία τους (overhangs), σε γωνία που δεν μπορεί να υποστηριχτεί το υλικό από κάποιο προηγούμενο στρώμα. Έτσι, αν δεν προβλεφθεί μια τέτοια συνθήκη, η κεφαλή εκτύπωσης θα προσπαθήσει να εναποθέσει υλικό στον αέρα και η δομή θα καταρρεύσει. Τα στηρίγματα που τοποθετήθηκαν φαίνονται στην εικόνα 32 με πράσινο χρώμα.

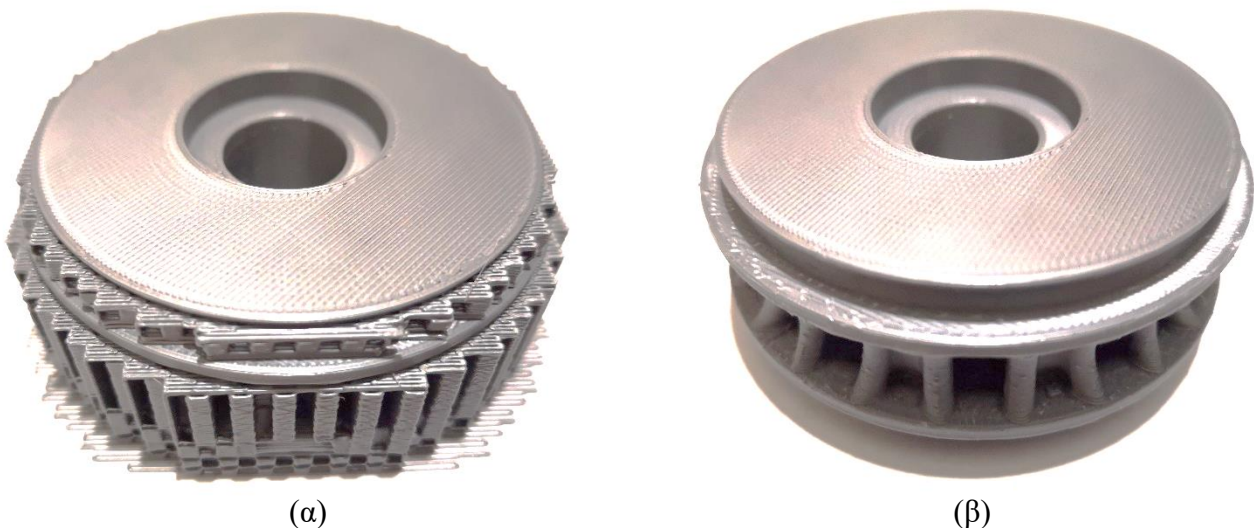


Εικόνα 32: Μοντέλο εμβόλου με στηρίγματα στο περιβάλλον του PrusaSlicer



Εικόνα 33: Τομή μοντέλου με στηρίγματα

Τα στηρίγματα είναι αναγκαστικά για παρόμοιες περιπτώσεις μοντέλων και η εισαγωγή τους αυξάνει τον χρόνο εκτύπωσης ενώ επιβάλλει επεξεργασία του εξαρτήματος για την απομάκρυνσή τους. Επιπλέον στις περισσότερες περιπτώσεις τα στηρίγματα προκαλούν αλλοιώσεις στις επιφάνειες του εξαρτήματος εξαιτίας της άμεσης επαφής μαζί του. Το μοντέλο του εμβόλου στις πραγματικές του διαστάσεις και με ποσοστό infill 5% θα χρειαζόταν 23 ώρες για την εκτύπωση του. Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, έγινε το slicing του μοντέλου και η εξαγωγή του κώδικα G που θα οδηγήσει τον 3D printer. Το εκτυπωμένο μοντέλο (50% downscale, 5% infill, PLA) φαίνεται στην εικόνα 34, πριν και μετά την αφαίρεση των στηριγμάτων.



Εικόνα 34: Εκτυπωμένο έμβολο με στηρίγματα (α) και μετά την αφαίρεση τους (β)

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από τα αποτελέσματα της μελέτης, γίνεται προφανής η ανάγκη για την ένταξη διαδικασιών βελτιστοποίησης κατά την ανάπτυξη νέων προϊόντων ή εξέλιξης των υφιστάμενων. Μέσω της βελτιστοποίησης μηχανολογικών εξαρτημάτων, προκύπτουν γεωμετρίες με αυξημένη δομική απόδοση και αξιοσημείωτα μειωμένη μάζα. Συγκεκριμένα η μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης προσφέρει τα πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης, 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 και εύλογες, μέχρι σύνθετες οργανικές και πλεγματικές δομές που είναι αδύνατο να φανταστεί κάποιος μηχανικός. Έτσι 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 σε κάθε επιχειρησιακή δραστηριότητα.

Η ανάγκη για ακριβή σχεδιασμό και ανάλυση πριν από οποιοδήποτε παραγωγικό στάδιο, επιβάλλει τη διαθεσιμότητα και καλή χρήση εξειδικευμένων υπολογιστικών εργαλείων (CAD,CAE,CAM) και κατασκευαστικών τεχνολογιών (CNC,3D Printing). Η ενσωμάτωση της τοπολογικής βελτιστοποίησης στο οικείο περιβάλλον CAD, έχει μετατρέψει τα σύνθετα μαθηματικά μοντέλα σε εύχρηστα και διαισθητικά εργαλεία στα χέρια των μηχανικών, αυξάνοντας περαιτέρω την απόδοση της διαδικασίας σχεδιασμού. Ως δυνητικός περιορισμός που προκύπτει από τη χρήση μεθόδων τοπολογικής βελτιστοποίησης, μπορεί να θεωρηθεί η κατασκευασσιμότητα των προτεινόμενων μορφών, και αυτό διότι ο αλγόριθμος τείνει σε λύσεις οργανικών δομών που μόνο με τη χρήση προσθετικής κατασκευής είναι εφικτές. Το γεγονός αυτό από μόνο του δεν είναι αρνητικό, αλλά μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να είναι αντιπαραγωγικό.

Η προσθετική μέθοδος κατασκευής μπορεί να επιτύχει σχεδόν οποιαδήποτε σύνθετη δομή σε αντίθεση με συμβατικές μεθόδους κατεργασίας, αλλά ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή μπορεί να γίνει απαγορευτικός για τις ανάγκες μιας βιομηχανίας. Επιπλέον, για πολλές περιπτώσεις προσθετικής κατασκευής όπου απαιτείται η χρήση μετάλλων, το κόστος της παραγωγής μπορεί να γίνει ασύγκριτα υψηλότερο από το αντίστοιχο των συμβατικών κατεργασιών κοπής. Έτσι είναι πολύ σημαντικό να αιτιολογείται η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της τοπολογικής βελτιστοποίησης, και να υπάρχουν εναλλακτικά σχέδια που να μπορούν να υλοποιηθούν με συμβατικές μεθόδους.

Όπως προκύπτει και από την περίπτωση του εμβόλου, η προσθετική κατασκευή πολλές φορές επιβάλλει τη χρήση στηριγμάτων τα οποία πρέπει στην συνέχεια να αφαιρεθούν, αλλοιώνοντας τις επιφάνειες των εξαρτημάτων. Αυτό το post processing που απαιτείται, επιβαρύνει χρονικά την παραγωγικότητα. Σε αρκετές περιπτώσεις οι παραμορφώσεις των επιφανειών από τα στηρίγματα μπορούν να οδηγήσουν σε εξαρτήματα που δεν επιδέχονται διόρθωση και απορρίπτονται. Έτσι γίνεται φανερό ότι ακόμα και η επιλογή της προσθετικής μεθόδου κατασκευής δεν είναι πανάκεια και απαιτεί κατάλληλη αξιολόγηση και σχεδιασμό προκειμένου να παραχθούν ασφαλή και λειτουργικά εξαρτήματα. Μια πιθανή λύση στο ζήτημα των στηριγμάτων για τη μέθοδο FDM, θα ήταν η χρήση 3D Printer με δύο κεφαλές εκτύπωσης και αξιοποίηση δεύτερου υδατοδιαλυτού υλικού όπως το PVA αποκλειστικά για τα στηρίγματα. Έτσι οι αλλοιώσεις στις επιφάνειες των εξαρτημάτων μειώνονται στο ελάχιστο και το post processing γίνεται τυποποιημένο.

Ένα μειονέκτημα που εμφανίζεται κατά τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης, είναι η ανάγκη επανασχεδιασμού και τροποποίησης του αρχικού μοντέλου CAD, ώστε να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος της προτεινόμενης γεωμετρίας μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι απλή για εξαρτήματα με μικρό πάχος, και να πραγματοποιείται εύκολα με κατάλληλες 2D καμπύλες και αντίστοιχα εργαλεία αφαίρεσης υλικού. Για πιο σύνθετα εξαρτήματα η διαδικασία τροποποίησης του πρωτότυπου CAD μπορεί να γίνει πολύ δύσκολη και χρονοβόρα, ειδικότερα όταν το βελτιστοποιημένο σώμα περιλαμβάνει οργανικές δομές. Επιπλέον, μέσα από τη διαδικασία επανασχεδιασμού προκύπτουν αποκλίσεις από τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία, με αντίστοιχες επιπτώσεις στη συμπεριφορά του σώματος κατά την καταπόνηση του. Έτσι για σύνθετες γεωμετρίες, προτείνεται η εισαγωγή επιπλέον λογισμικού ποιοτικού ελέγχου και επιθεώρησης στη φάση επανασχεδιασμού. Λογισμικά όπως το Geomagic Control X επιτρέπουν τον έλεγχο και την ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων μεταξύ του σώματος αναφοράς και του μοντέλου CAD. Στο μέλλον, με την εξέλιξη των αλγορίθμων και την ενσωμάτωση νευρωνικών δικτύων και τεχνητής νοημοσύνης, η ανάγκη επανασχεδιασμού αναμένεται να εξαλειφθεί.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση όπως εφαρμόζεται σε ένα εμπορικό λογισμικό, μπορεί να επιτυγχάνει σημαντική μείωση της μάζας και αυξημένη δομική απόδοση αλλά δεν αποτελεί το ανώτατο όριο βελτιστοποίησης για μια δεδομένη αρχική γεωμετρία. Έτσι προτείνεται η περαιτέρω μελέτη των εξαρτημάτων και η εισαγωγή επιπλέον βήματος στη διαδικασία βελτιστοποίησης, που θα εντάσσει στην ανάλυση κυψελοειδής και πλεγματικές δομές. Με τον τρόπο αυτό θα επιτυγχάνεται ακόμα μεγαλύτερη μείωση της μάζας ενός εξαρτήματος, καθώς και αύξηση της δομικής απόδοσης. Οι κυψελοειδής δομές έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον της επιστήμης και της σύγχρονης βιομηχανίας, και τα τελευταία χρόνια έχουν ενσωματωθεί σε προϊόντα κορυφαίων επιδόσεων και προδιαγραφών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bendsoe, M.P., Sigmund, O. (2004) *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Bendsoe, M.P. (1989) *Optimal shape design as a material distribution problem*, Structural Optimization, vol. 1, pp. 193-202.
- Bendsoe, M.P., Kikuchi N. (1988) *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 71, no. 2, pp. 197-224.
- Cazacu, R. and Grama L. (2014) *Overview of Structural Topology Optimization Methods for Plane and Solid Structures*, Annals of the University of Oradea, Issue No.3
- Clausen, A., Aage, N. and Sigmund, O. (2016) ‘Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load’, *Engineering*. THE AUTHORS, 2(2), pp. 250–257. doi: 10.1016/J.ENG.2016.02.006.
- Fiedler, K., Rolfe, B. F., & De Souza, T. (2017). Integrated Shape and Topology Optimization-Applications in Automotive Design and Manufacturing. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 10(2017-01-1344), 385-394.
- Gebisa A.W, Lemu H.G, (2017), “A case study on topology optimized design for additive manufacturing”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 276
- Hassani, B., & Hinton, E. (1999). Homogenization and structural topology optimization: theory, practice, and software. London; New York: Springer
- Huang, X., Xie, M., (2010). Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications, John Wiley & Sons, Ltd, Sussex, UK
- Pedersen, C.B.W., Allinger, P. (2006) *Industrial implementation and applications of topology optimization and future needs*, IUTUAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines, and Materials: Status and Perspectives (eds. M.P. Bendsøe, N. Olhoff and O. Sigmund), Springer, pp. 147-156.
- Querin, O., Victoria, M., Alonso, C., Ansola, R. and Marti, P., (2017). Topology Design Methods for Structural Optimization, Elsevier Academic Press
- Rozvany, G.I.N, Zhou M., and Birker T. (1992) *Generalized shape optimization without homogenization*, Structural optimization, vol. 4, no. 3-4, pp. 250-252.

- Sigmund, O. & Maute, K. (2013). Topology optimization approaches. A comparative review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6), 1031-1055. doi:10.1007/s00158-013-0978-6
- Wang, M., Wang, X., and Guo, D., (2003), “A level set method for structural topology optimization”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192, Issues 1-2, pp.227-246

Διαδικτυακές Πηγές

- Aykut Kentli (2019). *Topology Optimization Applications on Engineering Structures*. Available at: <https://www.intechopen.com/books/truss-and-frames-recent-advances-and-new-perspectives/topology-optimization-applications-on-engineering-structures> [Accessed at 11 April 2021]
- iMachining - the Revolution in CNC Machining. SolidCAM. Available at: <https://www.solidcam.com/imachining-the-revolution-in-cnc-machining/> [Accessed at 07 April 2021]
- IndiaCADworks. (2015). *Applications of Artificial Intelligence in CAD Technology*. Available at: <https://www.indiacadworks.com/blog/applications-of-artificial-intelligence-in-cad-technology/> [Accessed at 05 April 2021]
- Ivan Sutherland, Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Ivan_Sutherland [Accessed at 05 April 2021]
- Marti Deans (2021), *What is CAM (Computer-Aided Manufacturing)?* Autodesk. Available at: [https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/#:~:text=Computer%20Aided%20Manufacturing%20\(CAM\)%20is,a%20product%20by%20generating%20toolpaths.](https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/#:~:text=Computer%20Aided%20Manufacturing%20(CAM)%20is,a%20product%20by%20generating%20toolpaths.) [Accessed at 05 April 2021]
- Sketchpad, Wikipedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sketchpad> [Accessed at 05 April 2021]
- Tyflopoulos, E., Flem, D., Steinert, M., Olsen, A. (2018). State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs. Available at: https://www.researchgate.net/publication/334974685_State_of_the_art_of_generative_design_and_topology_optimization_and_potential_research_needs [Accessed at 11 April 2021]
- Yuksel, O (2019). AN OVERVIEW ON TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS EMPLOYED IN STRUCTURAL ENGINEERING. 5. 159-175. 10.34186/klujes.606666. Available at: https://www.researchgate.net/publication/338264424_AN_OVERVIEW_ON_TOPOLOGY_OPTIMIZATION_METHODS_EMPLOYED_IN_STRUCTURAL_ENGINEERING [Accessed at 11 April 2021]