



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγκριτική μελέτη Generative Design και
Topology Optimization στη παραγωγή
δοκιμίων Προσθετικών Κατασκευών ως προς
τις μηχανικές ιδιότητες.

ΦΟΙΤΗΤΗΣ

Νιάκας Ευάγγελος

ΑΜ: 18392087

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ

Στεργίου Κωνσταντίνος

Σαγιάς Βασίλειος

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Comparative study of Generative Design and
Topology Optimization in Additive
Manufacturing specimens mechanical
properties.

STUDENT

Niakas Evangelos

Registration Number: 18392087

SUPERVISING PROFESSORS

Stergiou Konstantinos

Sagias Vasileios

ATHENS, MARCH 2024

Τίτλος εργασίας: Συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization στη παραγωγή δοκίμιων Προσθετικών Κατασκευών ως προς τις μηχανικές ιδιότητες.

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

| A/α | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|-----|-----------------------|------------------|
| 1 | ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ | |
| 2 | ΒΑΪΡΗΣ ΑΧΙΛΛΕΑΣ | |
| 3 | ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ | |

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Νιάκας Ευάγγελος του Αποστόλου, με αριθμό μητρώου 18392087 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ημερομηνία

7/3/2024

Ο Δηλών



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τον Επιβλέποντα Καθηγητή Σαγιά Βασίλειο για την ευκαιρία που μου έδωσε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να αναλάβω αυτή την ερευνητική προσπάθεια. Η παρούσα διατριβή αποτελεί απόδειξη της εξαιρετικής καθοδήγησης και της υποστήριξης που μου έδωσε, χωρίς την οποία η ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας δεν θα ήταν δυνατή. Είμαι πραγματικά ευγνώμων για τον διαρκή αντίκτυπο που θα έχει αυτό το ακαδημαϊκό ταξίδι στις πνευματικές και επαγγελματικές μου αναζητήσεις. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς την οικογένεια μου για την ανεκτίμητη υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη συγκριτική μελέτη των τεχνικών Γενετικής Σχεδίασης (Generative Design) και Βελτιστοποίησης Τοπολογίας (Topology Optimization) που εφαρμόζονται σε δοκίμια Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing), με ιδιαίτερη έμφαση στις μηχανικές τους ιδιότητες. Η έρευνα περιλαμβάνει μια σε βάθος ανάλυση των υποκείμενων θεωριών πίσω από τον Γενετικό Σχεδιασμό και τη Βελτιστοποίηση Τοπολογίας, διερευνώντας τις αρχές και τις εφαρμογές τους στο πλαίσιο της Προσθετικής Κατασκευής.

Για την πειραματική σύγκριση των μεθοδολογιών, πραγματοποιήθηκαν πρακτικές μελέτες με τη χρήση του CAD/CAE συστήματος (Fusion 360). Η έρευνα περιλαμβάνει τη δημιουργία και ανάλυση δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε κάμψη και στρέψη, χρησιμοποιώντας τόσο τις τεχνολογίες Generative Design (GD) όσο και Topology Optimization (TO). Στη συνέχεια, τα μοντέλα αυτά υποβλήθηκαν σε ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) σε λογισμικό Computer-Aided Engineering (CAE) για την αξιολόγηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο γενετικός σχεδιασμός παράγαγε δοκίμια, με αυξημένο συντελεστή ασφαλείας, με καλύτερη κατανομή των τάσεων στο αντικείμενο, ωστόσο η βελτιστοποίηση τοπολογίας μείωσε αποτελεσματικότερα την μετατόπιση, ενώ απαιτούσε σημαντικά λιγότερο χρόνο υπολογισμού συγκριτικά με τον γενετικό σχεδιασμό. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση τοπολογίας παρουσίαζε αρκετά προβλήματα με το πλέγμα τα οποία δυσκόλευαν την μετέπειτα χρήση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.

Σε δεύτερο χρόνο για να γίνει καλύτερα η προσέγγιση των αποτελεσμάτων από προσθετικές κατασκευές, αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα ορθοτροπικού υλικού, για πολυαμίδιο, για την καλύτερη αποτύπωση της ανισοτροπικής φύσης των τρισδιάστατα εκτυπωμένων υλικών. Η εφαρμογή αυτών των μοντέλων περιλάμβανε τη χρήση CAD/CAE συστήματος (Ansys), όπου πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες μελέτες βελτιστοποίησης τοπολογίας για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων, σε καταπόνηση κάμψης και στρέψης. Τα δεδομένα για τα υλικά αυτό πάρθηκαν από προηγούμενο πείραμα.

Τα αποτελέσματα της συγκριτικής ανάλυσης φανερώνουν τα δυνατά και τα αδύνατα σημεία του Γενετικού Σχεδιασμού και της Βελτιστοποίησης Τοπολογίας στο πλαίσιο της Προσθετικής Κατασκευής, προσφέροντας πληροφορίες για τις αντίστοιχες επιπτώσεις τους στις μηχανικές ιδιότητες. Η παρούσα έρευνα συμβάλλει στον αυξανόμενο όγκο γνώσεων στον τομέα της Προσθετικής Κατασκευής, παρέχοντας επιπλέον πληροφορίες για σχεδιαστές, μηχανικούς και ερευνητές που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων σε εξαρτήματα παραγόμενα από προσθετικές κατασκευές.

Λέξεις – κλειδιά

Γενετικός Σχεδιασμός, Βελτιστοποίηση Τοπολογίας, Προσθετικές Κατασκευές, Μηχανικές Ιδιότητες, Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων, Ορθοτροπικό υλικό, Ανισοτροπία, Συγκριτική Μελέτη, Ανάλυση Κάμψης, Ανάλυση Στρέψης, Μέθοδοι Βελτιστοποίησης, Σχεδιασμός με Βοήθεια Υπολογιστή, Μηχανική με την Βοήθεια Υπολογιστή.

Abstract

This thesis presents a comprehensive comparative study of Generative Design and Topology Optimization techniques applied to Additive Manufacturing (AM) specimens, with a specific focus on their mechanical properties. The research involves an in-depth analysis of the underlying theories behind Generative Design and Topology Optimization, exploring their principles and applications in the context of AM.

To empirically evaluate the performance of these methodologies, practical studies were conducted in a CAD/CAE system (Fusion 360). The research involved the creation and analysis of specimens subjected to bending and torsion, utilizing both Generative Design (GD) and Topology Optimization (TO) technologies. Subsequently, these designs underwent Finite Element Analysis (FEA) in Computer-Aided Engineering (CAE) software to assess their mechanical behaviors. The results showed that the Generative Design yielded specimens with a better factor of safety, distributed stresses more efficiently along the geometry, exhibiting a lower maximum value, however the topology optimization reduced displacement more efficiently, while requiring significantly less computation time compared to the Generative Design. In addition, topology optimization presented several problems with the mesh that made subsequent use of the optimized geometry difficult.

Furthermore for a better approach of future simulations, two orthotropic material models were developed to better capture the anisotropic nature of 3D printed materials, specifically for polyamide. The implementation of this model involved the use of a CAD/CAE system (Ansys), where additional Topology Optimization studies were carried out to refine the mechanical properties of the specimens, in bending and torsional stress. The data for each material was taken from a previous experiment.

The results of the comparative analysis reveal the strengths and weaknesses of Generative Design and Topology Optimization in the context of Additive Manufacturing, offering insights into their respective impacts on mechanical performance. This research contributes to the growing body of knowledge in additive manufacturing, providing valuable information for designers, engineers, and researchers aiming to optimize mechanical properties in 3D-printed components.

Key – words

Generative Design, Topology Optimizaton, Additive Manufacturing, Mechanical Properties, Finite Element Analysis, Orthotropic Material, Anisotropy, Comparative Study, Bending Analysis, Rotation Analysis, Optimization Techniques, Computer Aided Design, Computer Aided Engineering.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 12 |
| 1.1 | Εισαγωγή και ιστορικό | 12 |
| 1.2 | Αντικείμενα, σκοπός και ερωτήματα της έρευνας | 13 |
| 1.3 | Συμβολή της έρευνας..... | 13 |
| 1.4 | Δομή της διπλωματικής | 14 |
| 2 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ/ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... | 15 |
| 2.1 | Επισκόπηση των προσθετικών κατασκευών και των εφαρμογών τους. | 15 |
| 2.1.1 | Ιστορικό. | 15 |
| 2.1.2 | Παροντικές εφαρμογές και προοπτικές..... | 15 |
| 2.1.3 | Διαφορετικά είδη κατασκευών..... | 17 |
| 2.1.4 | Υλικά που χρησιμοποιούνται. | 19 |
| 2.1.5 | Ανάλυση της επιλεγμένης τεχνολογίας και υλικού. | 20 |
| 2.2 | Generative Design. | 22 |
| 2.2.1 | Η Έννοια του Generative Design. | 22 |
| 2.2.2 | Εφαρμογές του Generative Design σε AM..... | 23 |
| 2.2.3 | Αλγόριθμοι του Generative Design..... | 30 |
| 2.2.4 | Σύγκριση των αλγόριθμων. | 35 |
| 2.2.5 | Ο ρόλος του AI στο Generative Design..... | 37 |
| 2.3 | Topology Optimization | 38 |
| 2.3.1 | Ο ορισμός και οι έννοιες της τοπολογίας..... | 38 |
| 2.3.2 | Προσεγγίσεις του Topology Optimization..... | 40 |
| 2.3.3 | Μέθοδοι του Topology Optimization..... | 41 |
| 2.3.4 | Πρακτικές δυσκολίες του Topology Optimization σε AM..... | 45 |
| 2.3.5 | Προοπτικές εξέλιξης του Topology Optimization σε AM..... | 48 |
| 2.3.6 | Εφαρμογές του Topology Optimization σε AM..... | 51 |
| 2.4 | Σύγκριση του Generative Design και του Topology Optimization..... | 53 |
| 2.4.1 | Εμβάθυνση στο Topology Optimization..... | 53 |
| 2.4.2 | Εμβάθυνση στο Generative Design..... | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.3 Σύγκριση των δύο τεχνολογιών..... | 56 |
| 2.5 Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών προσθετικής κατασκευής. | 57 |
| 2.5.1 Η ανισοτροπία των παραγόμενων μέσω AM δοκιμών..... | 57 |
| 2.5.2 Οι πόροι ως ατέλειες και ως λειτουργικές δομές..... | 58 |
| 2.5.3 Η επίδραση των πόρων στην αντοχή, την δυσκαμψία και την ανθεκτικότητα..... | 61 |
| 2.6 Προηγούμενες έρευνες σχετικά με τη συγκριτική μελέτη του Generative Design και του Topology Optimization σε μηχανικές ιδιότητες δοκιμών προσθετικών κατασκευών. | 64 |
| 2.6.1 Συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization για πλαίσιο μοτοσυκλέτας..... | 64 |
| 2.6.2 Συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization για ανάρτηση αυτοκινήτου. | 67 |
| 2.6.3 Συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization για το Rocker ανάρτησης..... | 69 |
| 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ..... | 72 |
| 3.1 Περιγραφή της ερευνητικής προσέγγισης και σχεδιασμού..... | 72 |
| 3.2 Περιγραφή των ερευνητικών μεθόδων και διαδικασιών..... | 72 |
| 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ..... | 74 |
| 4.1 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του δοκιμίου κάμψης και της μοντελοποίησης αυτού..... | 74 |
| 4.1.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Topology Optimization..... | 77 |
| 4.1.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Generative Design..... | 80 |
| 4.1.3 Μοντελοποίηση των βελτιστοποιημένων γεωμετριών για μελέτη στατικής καταπόνησης..... | 89 |
| 4.1.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων..... | 111 |
| 4.2 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του πρώτου δοκιμίου στρέψης και της μοντελοποίησης αυτού..... | 113 |
| 4.2.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Topology Optimization..... | 116 |
| 4.2.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Generative Design..... | 118 |
| 4.2.3 Μοντελοποίηση των βελτιστοποιημένων γεωμετριών για μελέτη στατικής καταπόνησης..... | 123 |
| 4.2.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων..... | 139 |
| 4.3 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του δεύτερου δοκιμίου στρέψης και της μοντελοποίησης αυτού..... | 141 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Topology Optimization. | 141 |
| 4.3.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Generative Design..... | 143 |
| 4.3.3 Μοντελοποίηση των βελτιστοποιημένων γεωμετριών για μελέτη στατικής καταπόνησης. | 146 |
| 4.3.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων..... | 152 |
| 4.4 Περιγραφή της διαδικασίας δημιουργίας ορθοτροπικού υλικού. | 153 |
| 4.5 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής των δοκιμίων και μοντελοποίησης αυτών. | 160 |
| 4.5.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών του δοκιμίου κάμψης. | 160 |
| 4.5.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών του πρώτου δοκιμίου στρέψης. | 165 |
| 4.5.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων..... | 169 |
| 5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ | 170 |
| 5.1 Περίληψη της μελέτης..... | 170 |
| 5.2 Περιορισμοί / δυσκολίες της μελέτης..... | 175 |
| 5.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων..... | 175 |
| 5.4 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα..... | 177 |
| 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 178 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή και ιστορικό

Το Generative Design (GD) και η τεχνολογία Additive Manufacturing (AM) δύνανται να πραγματοποιήσουν πολύπλοκα και καινοτόμα σχέδια, αναδιαμορφώνοντας το τοπίο του σχεδιασμού και της κατασκευής. Αναλυτικότερα, η ανάπτυξη των Τρισδιάστατων Εκτυπωτών σε συνδυασμό με την συνεχή ανάγκη για εξατομίκευση προϊόντων και την ακόμα πιο επιτακτική ανάγκη για την μείωση του κόστους παραγωγής, έχουν δημιουργήσει πρόσφορο έδαφος για την εύρεση τρόπων εξοικονόμησης πόρων. Το Generative Design, προσφέρει την λύση, δημιουργώντας οργανικά σχέδια, τα οποία όχι μόνο είναι ανθεκτικά αλλά οικονομικότερα και ελαφρύτερα. Αν και αυτά τα οργανικά σχέδια ήταν δύσκολο να παραχθούν με τους συνήθεις τρόπους κατασκευής, πλέον η δυνατότητα αυτή παρέχεται μέσω της AM τεχνολογίας.

Η ιστορία του γενετικού σχεδιασμού έχει τις ρίζες της στους υπολογιστικούς αλγόριθμους (computational algorithms) και την τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence), όπου ο συνδυασμός της παραμετρικής μοντελοποίησης και των πολύπλοκων αλγορίθμων επέτρεψε την εξερεύνηση αμέτρητων επαναλήψεων σχεδιασμού (design iterations). Η συγκεκριμένη προσέγγιση, εμπνευσμένη από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης της φύσης επιτρέπει στους σχεδιαστές να δημιουργήσουν δομές και μορφές που οι παραδοσιακές μέθοδοι θα παραέβλεπαν. Ταυτόχρονα, η προσθετική κατασκευή, εμφανίστηκε ως μία επαναστατική διαδικασία η οποία επιτρέπει την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων στρώμα προς στρώμα, αφού τους καταχωρηθεί το ψηφιακό μοντέλο (Cem C. Tutum, Etienne Vouga, Supawit Chockchawat, Risto Miikkulainen, 2018).

Η AM είναι μία πολύ ευέλικτη διαδικασία παραγωγής η οποία μπορεί να συνεισφέρει στο rapid prototyping, καθώς και στην μείωση του χρόνου παραγωγής. Σε συνδυασμό λοιπόν με την ανάπτυξη του GD, παρατηρείται μία διαρκής αύξηση του συνδυασμού των δύο τεχνολογιών σε μεγάλες βιομηχανίες, όπως της αεροναυπηγικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Είναι ξεκάθαρο πως και στις δύο βιομηχανίες, η μείωση του υλικού θα προσφέρει παραπάνω κέρδη και καλύτερες αποδόσεις, λόγω της μείωσης του βάρους. Γι' αυτόν τον λόγο πολλές εταιρείες παραγωγής CAD προγραμμάτων έχουν αναπτύξει τον δικό τους κώδικα για GD. Μάλιστα ο ανταγωνισμός είναι τόσο μεγάλος που πολλές εταιρείες CAD προγραμμάτων συγχέουν την έννοια του Topology Optimization (TO), με αυτή του GD (Tristan Briard, Frédéric Segonds, Nicolo Zamariola, 2020).

Το Topology Optimization, κοινώς βελτιστοποίηση τοπολογίας, έχει απασχολήσει επιστήμονες εδώ και 150 χρόνια, σε αντίθεση με το GD που είναι πιο πρόσφατη τεχνολογία. Το Topology Optimization είναι μια πολύ σύνθετη υπολογιστική διαδικασία, που βελτιστοποιεί τα στοιχεία του μεγέθους και του σχήματος μιας τρισδιάστατης γεωμετρίας. Ερευνήθηκε αρκετά τον 20^ο

αιώνα και μέχρι σήμερα βρίσκεται στα περισσότερα 3D CAD προγράμματα, βοηθώντας μηχανικούς να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια και να μειώσουν το υλικό, αφαιρώντας αυτό που δεν χρειάζεται αναλόγως τις ασκούμενες δυνάμεις και ροπές (ISMAIL, János LÓGÓ, Hussein, 2020).

1.2 Αντικείμενα, σκοπός και ερωτήματα της έρευνας

Η παρούσα έρευνα θα ασχοληθεί με το Generative Design, τις διαφορές αυτού με το Topology Optimization, με μηχανικές καταπονήσεις, συγκεκριμένα κάμψη και στρέψη και θα χρησιμοποιηθούν σχεδιαστικά προγράμματα, το Fusion 360 της Autodesk και το Ansys Workbench. Τα CAD, τα CAE και τα Simulations αυτών των προγραμμάτων θα δώσουν την δυνατότητα παραγωγής σχεδίων, με Topology Optimization και Generative Design για τις επιλεγμένες γεωμετρίες. Σε επόμενο στάδιο θα δημιουργηθεί ορθοτροπικό υλικό με την βοήθεια προηγούμενων πειραμάτων εφελκυσμού με απώτερο ερώτημα αν αυτός ο τρόπος θα προσεγγίσει την πραγματικότητα αποδοτικότερα, σε σχέση με το εξιδανικευμένο ισοτροπικό υλικό.

Σκοπός της έρευνας, είναι η βαθύτερη κατανόηση του GD καθώς και αν αυτό είναι συνυφασμένο με το TO, αν πρόκειται για δύο διακριτές έννοιες ή αν η μία τεχνολογία είναι υποσύνολο της άλλης. Παράλληλα, σκοπεύει να συγκρίνει τα δύο αυτά σχεδιαστικά εργαλεία ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες, την ευχρηστία και την αποδοτικότητα τους.

1.3 Συμβολή της έρευνας

Η συγκεκριμένη έρευνα πραγματεύεται τεχνολογίες αιχμής, οι οποίες έχουν μπει στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια, όπως το GD και την AM. Αρχικά, θα αντιπαραθέσει το GD και το TO, θέμα το οποίο απασχολεί αρκετά την επιστημονική κοινότητα και θα καταλήξει, στο ποια τεχνολογία δημιούργησε τα αποδοτικότερα δοκίμια. Επομένως, χρησιμοποιώντας τα πιο σύγχρονα και πρόσφατα προγράμματα των επιλεγμένων εταιρειών, θα αξιολογήσει το GD σε σχέση με το TO, καταδεικνύοντας που βρίσκεται το GD τεχνολογικά. Θα βρεθεί, ουσιαστικά, κάτω από αυτές τις συνθήκες ο αποδοτικότερος τρόπος μείωσης υλικού και εξοικονόμησης πόρων, ζήτημα αρκετά κρίσιμο την σημερινή εποχή στα πλαίσια του sustainability και της μεγιστοποίησης του κέρδους εταιρειών. Παράλληλα, θα πραγματοποιηθεί προσπάθεια προσέγγισης με την χρήση ορθοτροπικού υλικού που θα βοηθήσει περαιτέρω σε μελλοντική προσέγγιση της πραγματικότητας κατά την πειραματική επαλήθευση.

Παράλληλα, διερευνώνται οι δυνατότητες που παρέχουν οι δύο αυτές διαδικασίες, σε συνδυασμό με την AM, που έχει εξίσου απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική κοινότητα και γενικότερα την παραγωγή, όσον αφορά τις δυνατότητες χρήσης αυτού για mass production και όχι μόνο rapid prototyping, ή ιδιωτική χρήση.

1.4 Δομή της διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται η Εισαγωγή στο 1^ο Κεφάλαιο, όπου ξεκαθαρίζονται, ο σκοπός, το ιστορικό, το αντικείμενο και η συμβολή της έρευνας.

Στο 2^ο Κεφάλαιο, ακολουθεί μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση, σχετικά με την προσθετική κατασκευή, το Generative Design, το Topology Optimization και τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών προσθετικών κατασκευών. Θα γίνει προσπάθεια σύνδεσης της υπάρχουσας έρευνας με την παρούσα μελέτη καθώς και ποια κενά στοχεύει να καλύψει αυτή.

Στο 3^ο Κεφάλαιο ακολουθεί η μεθοδολογία της έρευνας, περιγράφεται η ερευνητική προσέγγιση, οι ερευνητικοί μέθοδοι και αιτιολογείται ο λόγος που πραγματοποιείται η έρευνα με βάση προηγούμενα ερευνητικά ερωτήματα που έχουν διατυπωθεί, περιγράφεται δηλαδή το κίνητρο της έρευνας.

Αμέσως μετά, στο 4^ο Κεφάλαιο ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας και θα γίνει λεπτομερής ανάλυση. Περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παραγωγή δοκιμών με GD και TO. Αναφέρονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων για τα επιλεγμένα δοκίμια. Επιπλέον, επεξηγείται ο τρόπος δημιουργίας ορθοτροπικού υλικού και παρουσιάζονται τα βελτιστοποιημένα δοκίμια.

Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται η συζήτηση, όπου ερμηνεύονται τα ευρήματα της μελέτης και συζητούνται οι συστάσεις για μελλοντική έρευνα. Εξηγείται ο τρόπος που ενισχύουν τα αποτελέσματα που βρέθηκαν, την παρούσα βιβλιογραφία, αναλύονται οι περιορισμοί και οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν. Δίνονται συστάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο 6^ο Κεφάλαιο υπάρχει λίστα με τις αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική καθώς και συμπληρωματικό υλικό.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ/ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Επισκόπηση των προσθετικών κατασκευών και των εφαρμογών τους.

2.1.1 Ιστορικό.

Η προσθετική κατασκευή είναι γνωστή επίσης ως Layered Manufacturing (LM) και Solid Freeform Fabrication (SFF), αφού δημιουργεί στερεά αντικείμενα εναποθέτοντας διαδοχικά στρώματα υλικού, ενώ παρέχει αρκετή ελευθερία κατασκευής σε οποιαδήποτε μορφή και σχήμα χωρίς μεγάλους περιορισμούς. Στα αρχικά στάδια, οι δύο αυτές πτυχές της AM, δηλαδή η παροχή ελευθερίας κατασκευής και η εναπόθεση διαδοχικών στρωμάτων ανήκαν σε διαφορετικές σχολές στερεάς μοντελοποίησης. Θεωρείται, πως η AM προέκυψε από την ένωση της φωτογλυπτικής (τεχνική κατασκευής γλυπτών) και της τοπογραφίας (τεχνική κατασκευής χαρτών). Αυτές οι τεχνικές μοντελοποίησης εξελίχθηκαν ξεχωριστά. Οι τεχνικές φωτογλυπτικής χρησιμοποιούνταν στην αναπαράσταση ανθρώπων, ζώων ή άλλων αντικειμένων, όσο πιο κοντά στην πραγματικότητα γίνεται. Από την άλλη μεριά, η τοπογραφία αφοσιωνόταν στην ακριβή απεικόνιση περιγραμμάτων και τοπολογικών λεπτομερειών. Εν τέλει αυτές οι δύο σχολές συγχωνεύτηκαν και τέθηκαν τα θεμέλια της προσθετικής κατασκευής.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν εξελίξεις ως προς τα υλικά που χρησιμοποιούταν και έπειτα εξελίξεις όσον αφορά τις τεχνολογίες και τα είδη των κατεργασιών (Terry Wohlers, Tim Gornet, Noah Mostow, Ian Campbell, Olaf Diegel, Joseph Kowen, Ray Huff, Brent Stucker, Ismail Fidan, 2016).

2.1.2 Παροντικές εφαρμογές και προοπτικές.

Η πρόοδος της AM σε βιοϊατρικές εφαρμογές, αλλιώς γνωστή ως bioprinting, οφείλεται στις καινοτομίες που έχουν σημειωθεί όσον αφορά τα βιολογικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τις εκτυπώσεις. Το bioprinting, προσφέρει ακριβή και ταχέως εξελισσόμενη τεχνολογία, η οποία επιτρέπει τον έλεγχο της κατανομής των κυττάρων για την εκτύπωση ιστών. Χρησιμοποιεί ως υλικό βιομελάνια με συγκεκριμένο ιζώδες. Προσφέρει αποτελεσματικό έλεγχο της κατασκευής του ικριώματος και της κατανομής των κυττάρων. Αυτή η τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη εκτύπωση ιστών. Η ολοκληρωμένη εκτύπωση οργάνων (Integrated Organ Printing) αναπτύσσεται, με σκοπό την εκτύπωση ζωντανών οργάνων απευθείας στο ανθρώπινο σώμα κατά την διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης. Ακόμα, η AM δύναται να προσομοιώσει το ανθρώπινο δέρμα με χαμηλό κόστος, ώστε να γίνονται πάνω σε αυτό δοκιμές φαρμακευτικών και χημικών προϊόντων. Με την εκτύπωση χαπιών, μπορεί να μειώσει το κόστος, αφού με αυτόν τον τρόπο είναι πιο εύκολη η σωστή δοσολογία του εκάστοτε τεμαχίου, χωρίς την υπέρβαση αυτής. Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα εκτύπωσης καρκινικού ιστού με σκοπό την επιτάχυνση της μελέτης της συγκεκριμένης ασθένειας. Τέλος, έχει τις προοπτικές να βοηθήσει

στην εκπαίδευση νευροχειρουργών αφού θα μπορούν πλέον να εκπαιδεύονται σε ένα ιστό ο οποίος θα προσομοιάζει τον ανθρώπινο σε μεγάλο βαθμό.

Παράλληλα, η AM έχει σημειώσει αυξανόμενη πρόοδο στον κατασκευαστικό τομέα, δίνοντας την δυνατότητα εκτύπωσης σπιτιών με γρήγορους ρυθμούς και χαμηλά κόστη, διευκολύνοντας την κατασκευή σύνθετων αρχιτεκτονικών μοντέλων. Μάλιστα, με την βοήθεια της AM στον συγκεκριμένο τομέα μπορεί να μειωθεί το συνολικό κόστος τσιμέντου κατά 35% έως 60% απλώς αφαιρώντας την διαδικασία καλουπώματος. Με την εξέλιξη λοιπόν του Building Information Modeling (BIM), θα επιτευχθεί ακριβέστερος και ταχύτερος τρόπος κατασκευής κτηρίων, ο οποίος θα παρέχει και πληροφορίες ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά τους. Καθίσταται σαφές, ότι παρέχεται ευκολία και ταχύτητα ως προς την κατασκευή, διευκολύνεται η επικοινωνία με τους πελάτες λόγω της απεικόνισης των ιδεών των μηχανικών και αρχιτεκτόνων.

Στον τομέα παραγωγής φαγώσιμων προϊόντων, η AM καταφέρνει να εξατομικεύσει και να ψηφιοποιήσει τις διατροφικές και ενεργειακές ανάγκες του κάθε ατόμου αναλόγως τις φυσικές του απαιτήσεις. Δύναται να μετασχηματίσει ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων, να μειώσει τον όγκο μεταφοράς συσκευασίας, διανομής καθώς και το γενικότερο κόστος.

Πέραν των εφαρμογών στους άνωθεν τομείς, η AM έχει κάποιες αρκετά σημαντικές εφαρμογές και στην παραγωγή. Δίνει την δυνατότητα παραγωγής εξατομικευμένων προϊόντων, αντικαθιστά εξαρτήματα σε χαμηλότερο κόστος και σε λιγότερο χρόνο. Επιτρέπει γρήγορες αλλαγές πάνω στα προϊόντα αφού η γεωμετρία των αντικειμένων είναι ψηφιοποιημένη μέσω των CAD συστημάτων, το reverse engineering και η παραγωγή ενός προϊόντος γίνεται αρκετά γρήγορα μέσω scanners, μειώνει το κόστος παραγωγής αφού με την βοήθεια περίπλοκων γεωμετριών μειώνονται οι ανάγκες σε υλικά.

Χρησιμοποιείται ευρέως στην αεροναυπηγική, αφού οι δύο βασικές απαιτήσεις αυτής είναι το χαμηλό βάρος και η υψηλή ασφάλεια. Η AM έχει βοηθήσει ώστε να μειωθεί το βάρος με την χρήση πολύπλοκων γεωμετριών και μειώνοντας τον αριθμό αρθρώσεων. Συγκεκριμένα έχει εφαρμοστεί για την αντικατάσταση ενός ατσαλένιου βραχίονα σε Airbus A320 με βραχίονα από ατσάλι ο οποίος είχε περάσει διαδικασία βελτιστοποίησης του σχήματος του ώστε να κρατηθεί μόνο το απαραίτητο υλικό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιτεύχθηκε συνολική μείωση του βάρους κατά 75% ή κατά 10 kg. Η SpaceX εκτύπωσε μία μηχανή που ονομάστηκε Super Draco και θα χρησιμοποιούταν ώστε να τροφοδοτεί το σύστημα εκτόξευσης του διαστημικού σκάφους Dragon. Στην συγκεκριμένη μηχανή πραγματοποιήθηκαν επιτυχείς δοκιμές. Παράλληλα, η ίδια εταιρεία χρησιμοποιεί την AM για την κατασκευή πτερυγίων και άλλων εξαρτημάτων για τους κινητήρες Merlin που κινούν το όχημα εκτόξευσης Falcon 9 (Sheikh, Sunil C. Joshi & Abdullah A., 2015).

Η αυτοκινητοβιομηχανία επωφελείται σε μεγάλο βαθμό από διαδικασίες οι οποίες μειώνουν το βάρος και το κόστος. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι έχει επωφεληθεί και από την ανάπτυξη της AM. Αναλυτικότερα, επιτρέπεται πλέον η παραγωγή ελαφρύτερων εξαρτημάτων, ενώ επιταχύνεται κατασκευή του πρωτοτύπου. Η Ford, πρωτοπορεί χρησιμοποιώντας την

προσθετική κατασκευή για την εκτύπωση μερών του κινητήρα αλλά και για την διαδικασία του rapid prototyping. Η BMW χρησιμοποιεί την συγκεκριμένη τεχνολογία με σκοπό την κατασκευή εργαλείων δοκιμών και συναρμολόγησης. Στον ίδιο χρόνο, η AUDI συνεργαζόμενη με την SLM Solution Group AG, εκτυπώνει εξαρτήματα και πρωτότυπα.

Η αυξανόμενη προσβασιμότητα της AM στην επιστήμη, την τεχνολογία και την κατασκευή ξεκλειδώνει ποικίλες εφαρμογές. Αυτό περιλαμβάνει την ευρεία χρήση διαφόρων τεχνολογιών για τη δημιουργία δομικών ηλεκτρονικών συσκευών με χαρακτηριστικά όπως τη μαζική προσαρμογή και τον προσαρμοστικό σχεδιασμό. Για την παραγωγή τρισδιάστατων ηλεκτροδίων χρησιμοποιείται η μέθοδος Fused Deposition Modelling, προσφέροντας μια οικονομικά και χρονικά αποδοτική μέθοδο για μαζική παραγωγή. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ηλεκτρόδια, όπως το αλουμίνιο, ο χαλκός και ο άνθρακας, ο σχεδιασμός και η επιφάνεια των τρισδιάστατων ηλεκτροδίων μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν για συγκεκριμένες εφαρμογές. Η πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία της AM αυτών των ηλεκτροδίων είναι εξαιρετικά ακριβής, επιτρέποντας την παραγωγή οκτώ ηλεκτροδίων σε μόλις 30 λεπτά. Ταυτόχρονα επεκτείνεται σε ενεργά ηλεκτρονικά εξαρτήματα ικανά να ενισχύουν και να ελέγχουν ηλεκτρικά φορτία, συμπεριλαμβανομένων συσκευών που παράγουν ενέργεια. Οι παραδοσιακές διαδικασίες κατασκευής αυτών των εξαρτημάτων είναι πολύπλοκες, αλλά η τεχνολογία AM, ιδίως με δυνατότητες πολλαπλών υλικών, προσφέρει αποτελεσματικότητα και καινοτομία. Διευκολύνεται η δημιουργία πιο περίπλοκων σχεδίων με μία μόνο διαδικασία. Τονίζεται η επείγουσα ανάγκη για πράσινες ηλεκτρονικές συσκευές με χαμηλό κόστος κατασκευής, αυξημένη ασφάλεια, υψηλή αξιοπιστία και ταχεία παραγωγή, ώστε να αντιμετωπιστούν οι περιβαλλοντικές ανησυχίες της σημερινής κοινωνίας (N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, 2019).

2.1.3 Διαφορετικά είδη κατασκευών.

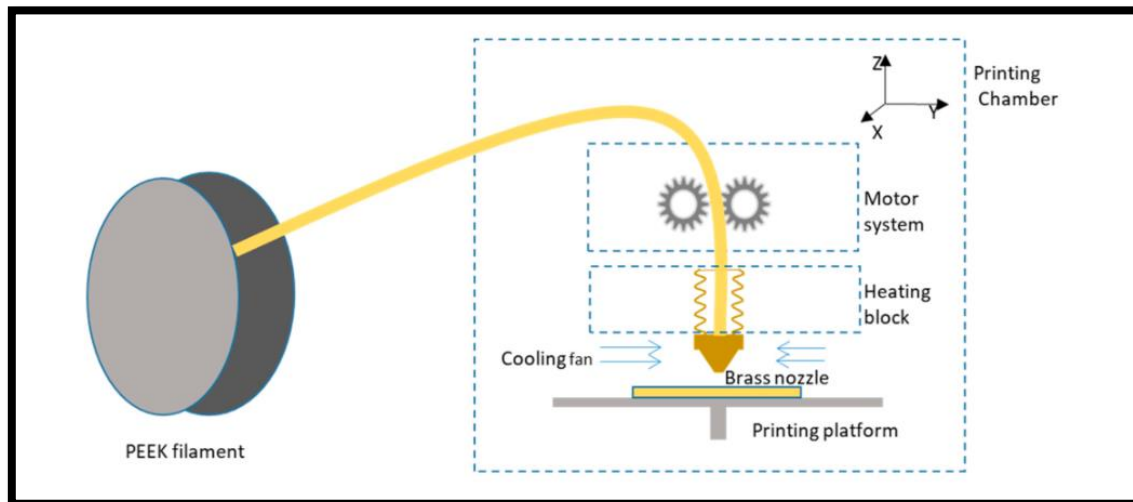
Με βάση το πρότυπο κατά ASTM F2792 – 12a, χωρίζονται οι τωρινές και μελλοντικές τεχνολογίες AM σε επτά ομάδες (ASTM, 1994).

a) **Binder jetting**: πρόκειται για μια διαδικασία rapid prototyping, κατά την οποία ένα υγρό συνδετικό υλικό εναποτίθεται για να ενώσει τα σωματίδια σκόνης (κονιοποιημένο υλικό). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα χημικό συνδετικό υλικό πάνω στην απλωμένη σκόνη για τον σχηματισμό του στρώματος. Η συγκεκριμένη κατεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μοντέλων χύτευσης, ακατέργαστων προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης, ή παρόμοιων προϊόντων μεγάλου όγκου από άμμο. Δύναται να εκτυπώσει μέταλλα, άμμο, πολυμερή και κεραμικά. Πρόκειται για μια απλή γρήγορη και φθηνή διαδικασία της οποίας η ειδοποιός διαφορά είναι ότι μπορεί να εκτυπώσει μεγάλους όγκους.

b) **Directed energy deposition**: Πρόκειται για μία πολύ σύνθετη διαδικασία που αφορά την επισκευή ή την προσθήκη υλικού σε υπάρχοντα εξαρτήματα. Η ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου είναι πολύ υψηλή. Μοιάζει με την FDM τεχνολογία, ωστόσο το ακροφύσιο δεν είναι σταθερό σε συγκεκριμένο άξονα αλλά κινείται προς πολλές κατευθύνσεις. Τα υλικά που

χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη διαδικασία ποικίλουν σε κεραμικά, πολυμερή, υβρίδια μετάλλων που έχουν την μορφή σύρματος ή σκόνης.

c) **Materials extrusion:** Η μέθοδος αυτή έχει χαρακτηριστικό παράδειγμα την FDM (Fused Deposition Method) τεχνολογία. Πρόκειται για μια τεχνολογία με χαμηλά κόστη που δύναται να τυπώσει με διαφορετικά υλικά, με παράγωγα προϊόντα διαφορετικών χρωμάτων. Τυπώνει με διαδοχικά στρώματα σε ένα θερμαινόμενο κρεβάτι, υλικό το οποίο θερμαίνεται σε ημι-υγρή κατάσταση και εναποτίθεται στην βάση. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιεί και Supports όπου χρειάζονται, δηλαδή υλικό το οποίο μετά αφαιρείται και σκοπός αυτού είναι η προσωρινή στήριξη της γεωμετρίας κατά την εκτύπωση.



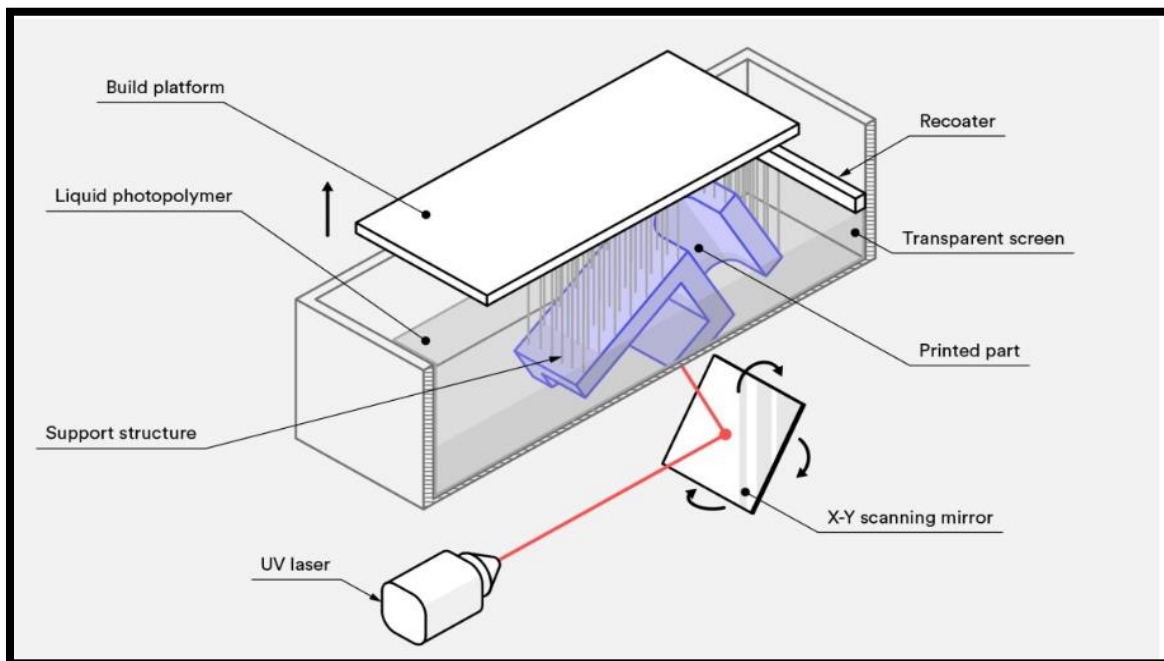
Εικόνα 1: Προσθετική Κατασκευή, Fused Deposition Method. (morgen-filament.de).

d) **Materials jetting:** Κατά την συγκεκριμένη διαδικασία, εναποτίθεται φωτοευαίσθητο υλικό επιλεκτικά, σταγόνα προς σταγόνα, σε μία πλάκα πάνω στην οποία έπειτα στερεοποιείται με την βοήθεια υπεριώδους φωτός (UV light). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε διαδοχικά στρώματα και προκύπτουν προϊόντα με ομαλή επιφάνεια και υψηλή ακρίβεια διαστάσεων. Στα εκτυπώσιμα υλικά περιλαμβάνονται πολυμερή, κεραμικά, composites και βιολογικά.

e) **Power bed fusion:** Η συγκεκριμένη διαδικασία περιλαμβάνει την τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting), την επιλεκτική πυροσυσσώματωση με laser, (Selective Laser Sintering) και την επιλεκτική εκτύπωση με θερμική πυροσυσσώματωση (Selective Heat Sintering).

Χρησιμοποιείται είτε μία δέσμη ηλεκτρονίων είτε ένα laser, ώστε να ενώσει το κονιοποιημένο υλικό. Υλικά εκτύπωσης μπορεί να είναι μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή και composites.

f) **Sheet lamination:** Η διαδικασία περιλαμβάνει φύλλα υλικών τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους για την παραγωγή ενός τμήματος αντικειμένου. Οι δύο τεχνολογίες που υπόκεινται σε αυτή τη κατηγορία είναι η Laminated Object Manufacturing (LOM) και η Ultrasound Additive Manufacturing (UAM). Πρόκειται για φθηνή διαδικασία, με δυνατότητα ποικιλίας χρωμάτων και ανακύκλωσης της φύρας.



Εικόνα 2: Προσθετική κατασκευή, Stereolithography (hubs.com).

g) **Vat Photopolymerization:** Ο φωτοπολυμερισμός, αναφέρεται στην σκλήρυνση φωτοαντιδραστικών πολυμερών με την χρήση laser, φωτός ή υπεριώδους ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η στερεολιθογραφία (SLA) και η ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP). Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι υγρό το οποίο έπειτα σκληραίνεται στην επιφάνεια (N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, 2019).

2.1.4 Υλικά που χρησιμοποιούνται.

Η AM και οι διαφορετικοί τύποι κατασκευής που έχει, χρησιμοποιούν πληθώρα υλικών, τα οποία πρέπει να τηρούν κάποιες προδιαγραφές ώστε να είναι συμβατά με την εκάστοτε διαδικασία. Τα υλικά αυτά κατηγοριοποιούνται σε:

a) **Μέταλλα:** Χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου, κοβαλτίου, τιτανίου, νικελίου και χάλυβα. Τα κράματα κοβαλτίου χρησιμοποιούνται στην οδοντιατρική, τα κράματα νικελίου στην αεροναυπηγική, ενώ τα κράματα τιτανίου χρησιμοποιούνται και στην βιοϊατρική αλλά και στην αεροναυπηγική επίσης.

b) **Πολυμερή:** Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα Polylactic Acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polypropylene (PP) και Polyethylene (PE). Παράλληλα, χρησιμοποιούνται και νήματα με μεγαλύτερο σημείο τήξης όπως Polyetheretherketone (PEEK) και Polymethyl Methacrylate (PMMA). Ως επί το πλείστον τα υλικά της συγκεκριμένης κατηγορίας χρησιμοποιούνται ως αδρανή υλικά στα προϊόντα ιατρικών συσκευών, ενώ σε άλλες περιπτώσεις προσφέρουν στήριξη σε ορθοπεδικά εμφυτεύματα.

c) **Κεραμικά:** Η κατηγορία αυτή αποτελείται από υλικά όπως αλουμίνα, βιοενεργά γυαλιά και ζirkονία. Η αλουμίνα είναι ένα κεραμικό οξείδιο που χρησιμοποιείται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, σαν καταλύτης, προσροφητικό, μικροηλεκτρονικά, χημικά, στην αεροναυπηγική βιομηχανία και σε άλλες βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας.

d) **Σύνθετα υλικά (Composites):** Σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber) και σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Fiber Glass), αποτελούν παραδείγματα αυτής της κατηγορίας. Το Carbon Fiber χρησιμοποιείται ευρέως στην αεροδιαστημική λόγω της υψηλής ειδικής δυσκαμψίας, της αντοχής και της καλής απόδοσης σε κόπωση. Το Fiber Glass έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και συγκριτικά χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Επιπρόσθετα, το Fiberglass δεν μπορεί να καεί και δεν επηρεάζεται από θερμοκρασίες σκλήρυνσης που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες κατασκευής.

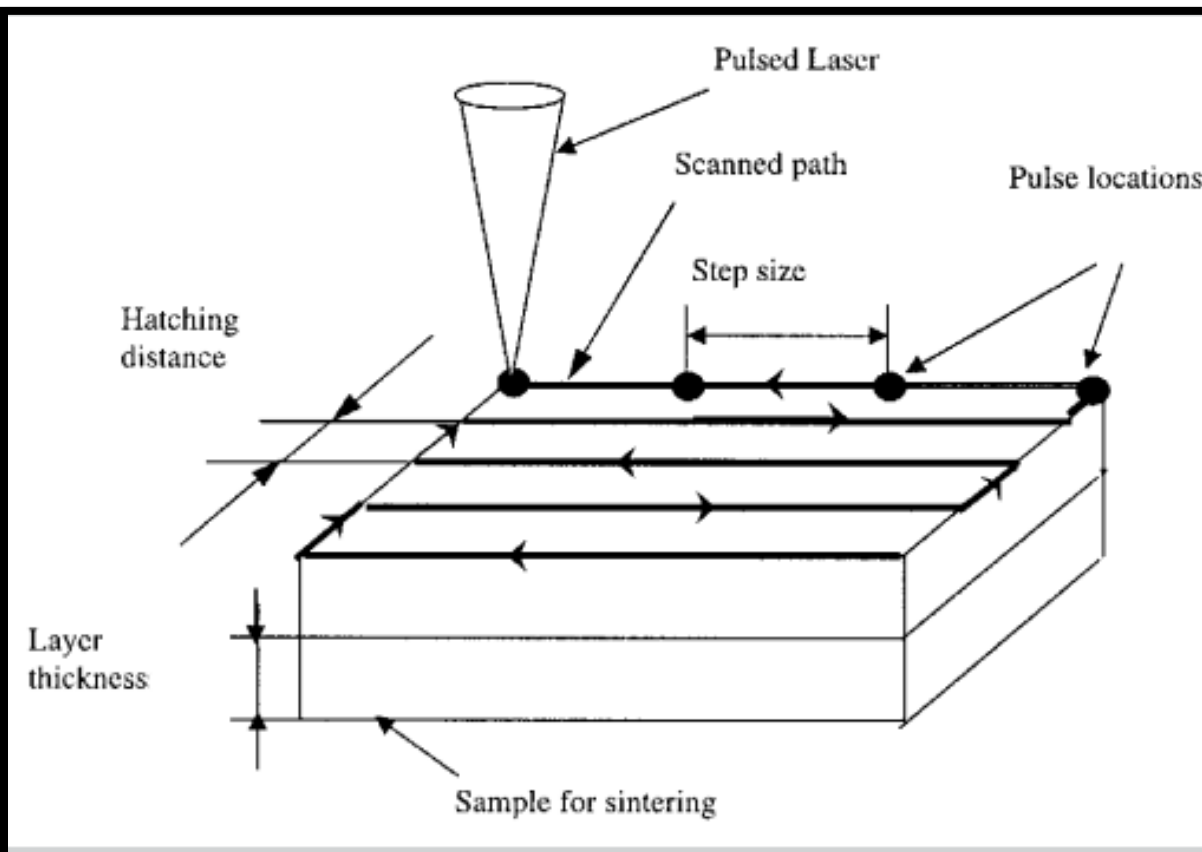
e) **Έξυπνα υλικά:** Ως έξυπνα, ορίζονται τα υλικά τα οποία δύνανται να αλλάξουν το σχήμα ή την γεωμετρία ενός αντικειμένου όταν αυτά επηρεαστούν από κάποιον εξωτερικό παράγοντα όπως ζέστη ή νερό. Αυτά τα υλικά ονομάζονται αλλιώς και 4D υλικά, καθώς μεταβάλλονται και στην τέταρτη διάσταση, τον χρόνο. Υπάρχουν κράματα που διατηρούν μνήμη ως προς το αρχικό τους σχήμα και χρησιμοποιούνται ως εμφυτεύματα. Υπάρχουν πολυμερή τα οποία αντιδρούν σε φως ή σε κάποιων ειδών χημικά.

f) **Ειδικά υλικά:** Αυτή είναι ειδική κατηγορία καθώς αποτελείται από πληθώρα διαφορετικών υλικών, όπως φαγώσιμων, δηλαδή σοκολάτα, κρέας κ.λ.π., σεληνιακή σκόνη αλλά ακόμα και ύφασμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανία μόδας (N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, 2019).

2.1.5 Ανάλυση της επιλεγμένης τεχνολογίας και υλικού.

Στην διπλωματική η εκτύπωση των δοκιμών θα πραγματοποιηθεί με την Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Laser, ή αλλιώς Selective Laser Sintering (SLS), είναι μια διεργασία κατασκευής με βάση κονιοποιημένο υλικό που προσθέτει στρώματα και χρησιμοποιείται γενικά για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων και την ταχεία κατασκευή εργαλείων. Ακτίνες laser είτε

σε συνεχή είτε σε παλμική λειτουργία, χρησιμοποιούνται ως πηγή θερμότητας για τη σάρωση και την ένωση σκονών σε προκαθορισμένα μεγέθη και σχήματα στρώσεων. Η γεωμετρία των σαρωμένων στρωμάτων αντιστοιχεί στις διάφορες διατομές των μοντέλων σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) ή των αρχείων στερεολιθογραφίας (STL) του αντικειμένου. Μετά το πρώτο στρώμα, εναποτίθεται ένα δεύτερο στρώμα πάνω από αυτό και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται από κάτω προς τα πάνω. Είναι επίσης γνωστή ως Selective Laser Reactive Sintering όταν αξιοποιεί τη χημική αντίδραση των συστατικών του μείγματος παρουσία δέσμης laser και Selective Laser Melting, (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS).



Εικόνα 3: Προσθετική κατασκευή, Selective Laser Sintering (Kumar, 2003).

Όταν η θερμική ενέργεια του laser απορροφάται από τα υλικά, οι σκόνες δεσμεύονται μέσω των ακόλουθων μηχανισμών: δέσμευση ιξώδους ροής, φαινόμενο καμπυλότητας, διαβροχή σωματιδίων, πυροσυσσωμάτωση στερεάς κατάστασης, πυροσυσσωμάτωση υγρής φάσης και πραγματική τήξη. Η δέσμευση ιξώδους ροής είναι κυρίαρχη σε υλικά με τις κατάλληλες θερμοκρασία ιξώδους, ενώ το φαινόμενο καμπυλότητας είναι η κινητήρια δύναμη στα νανοκρυσταλλικά υλικά.

Οι παράμετροι που μεταβάλλονται στην SLS περιλαμβάνουν το μέγεθος της σκόνης, την ταχύτητα σάρωσης, την πυκνότητα της σκόνης, τη συχνότητα παλμών, την ισχύ του λέιζερ

πλήρωσης, το μέγεθος σάρωσης, την απόσταση σάρωσης, τη θερμοκρασία του κομματιού, το πάχος του στρώματος, το μέγεθος παλμού, την ισχύ του λέιζερ (απόδοση), την ενέργεια του λέιζερ, το μέγεθος της κηλίδας, την κατανομή του μεγέθους της σκόνης, την αναλογία των σκονών του μίγματος και το κλάσμα όγκου του συνδεδετικού υλικού (Kumar, 2003).

Το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί είναι το Nylon PA-12 (Πολυαμίδιο). Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται για την εκτύπωση δοκιμών με την βοήθεια της SLS τεχνολογίας λόγω των υψηλών μηχανικών επιδόσεων του. Διακρίνεται από ευκολία επεξεργασίας, μειωμένη στρέβλωση και δεν είναι τόσο πορώδες (Feifei Yang, Navid Zobeiry, Ramulu Mamidala, Xu Chen, 2023).

2.2 Generative Design.

2.2.1 Η Έννοια του Generative Design.

Το Generative Design (GD) είναι η διαδικασία χρήσης αλγορίθμων που βοηθούν στη διερεύνηση των παραλλαγών ενός σχεδίου πέρα από αυτό που είναι σήμερα δυνατό με την παραδοσιακή διαδικασία σχεδιασμού. Μιμούμενο την εξελικτική προσέγγιση της φύσης, το GD χρησιμοποιεί παραμέτρους και στόχους για τη γρήγορη διερεύνηση χιλιάδων παραλλαγών σχεδιασμού με σκοπό την εύρεση της καλύτερης λύσης. Πρόκειται για μία επαναληπτική διαδικασία που δοκιμάζει τη δομή και μαθαίνει από κάθε βήμα, εφαρμόζοντας αλλαγές σε κάθε στάδιο για να βοηθήσει στην παραγωγή μιας βελτιστοποιημένης λύσης που ανταποκρίνεται τους στόχους του σχεδίου εντός των παραμέτρων που περιγράφονται στη ρύθμιση της μελέτης. Αυτή η διαδικασία οδηγεί συχνά σε σχεδιασμούς που δεν θα ήταν διαφορετικά δυνατοί να δημιουργηθούν με την παραδοσιακή διαδικασία σχεδιασμού. Καθώς οι τελικές μορφές σχεδιάζονται για να ταιριάζουν σε μια συγκεκριμένη ανάγκη, το σχήμα τους είναι μοναδικό και συχνά αναφέρεται ως οργανικό.

Κατά την διαδικασία του παραδοσιακού σχεδιασμού ενός προϊόντος, ο σχεδιαστής μηχανικός, χρησιμοποιώντας την εμπειρία και τις γνώσεις του, προσπαθεί να προσεγγίσει τις ανάγκες του καταναλωτή. Για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα χρειάζονται αρκετές εργατώρες και πολλές επαναλήψεις της διαδικασίας. Ωστόσο, ακόμα και τότε είναι πιθανό το τελικό σχέδιο να μην προσεγγίζει το βέλτιστο. Συνδυάζοντας λοιπόν τον παραδοσιακό τρόπο σχεδιασμού με το GD, καθίσταται σαφές ότι η διαδικασία αυτή επιταχύνεται λόγω της παραμετροποίησης που προσφέρει, καθώς και το Design Exploration, που δείχνει στον μηχανικό διαφορετικές εναλλακτικές που ίσως δεν θα μπορούσε να σκεφτεί.

Το GD λοιπόν, ευνοεί την συνεργασία μεταξύ του σχεδιαστή και του υπολογιστή, καθιστώντας τους συν-δημιουργούς του τελικού σχεδίου. Η διαδικασία που ακολουθείται συνήθως μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα βήματα.

Αρχική φάση: Εισάγονται παράμετροι και σχεδιαστικοί στόχοι. Σε αυτούς περιλαμβάνονται τα υλικά και οι ιδιότητες τους, (π.χ. Βάρος, αντοχή, κόστος), συνθήκες φόρτισης, περιορισμοί

κινήσεων και διάφορες χωρικές εκτιμήσεις. Οι στόχοι συνήθως αναφέρονται σε μάζα, παραμόρφωση, ή τάση.

Φάση αλγοριθμικής παραγωγής: Με την χρήση αλγορίθμων και εγγενούς λογικής, το GD παράγει αυτόνομα ένα πλήθος σχεδίων υποβάλλοντας το καθένα σε ανάλυση επιδόσεων. Αυτή η διαδικασία της παραγωγής αποτελέσματος, μπορεί να συμβαίνει είτε τοπικά στον υπολογιστή, είτε στο cloud της εταιρείας που διαθέτει το πρόγραμμα.

Φάση ανάλυσης και βελτίωσης: Μετά τη λήψη των αρχικών αποτελεσμάτων, ο σχεδιαστής/μηχανικός εξετάζει συστηματικά διάφορες επιλογές, προσαρμόζοντας τις παραμέτρους και τους στόχους για την επαναληπτική βελτίωση του προβλήματος. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό ανθρώπινης διαίσθησης και υπολογιστικής τεχνητής νοημοσύνης (AI), εντοπιστεί η πιο κατάλληλη λύση.

Φάση οριστικοποίησης και κατασκευής: Πλέον ο μηχανικός/σχεδιαστής είναι έτοιμος να προχωρήσει στην κατασκευή του αντικειμένου. Λόγω της οργανικής φύσεως των σχημάτων που προκύπτουν και της περιπλοκότητας τους, πολλές φορές απαιτείται η χρήση διαδικασιών παραγωγής που μπορούν να ανταπεξέλθουν. Σε αυτό το σημείο αναδεικνύεται κυρίαρχη η Προσθετική Κατασκευή.

Τυπικά, δημιουργεί κατασκευές οι οποίες χαρακτηρίζονται από, μειωμένο βάρος συγκριτικά με τα παραδοσιακά σχέδια, τα οποία όμως καταφέρνουν να διατηρήσουν ή και να αυξήσουν την αποδοτικότητα τους ανάλογα με τις ανάγκες της κατασκευής. Απαιτούν μικρότερο χρόνο κατασκευής, έχουν αυξημένη δημιουργικότητα και εξατομίκευση (McKnight, 2017).

2.2.2 Εφαρμογές του Generative Design σε AM.

Καθίσταται σαφές από τα προαναφερθέντα, ότι το GD μπορεί να προσφέρει λύσεις στην βιομηχανία και στην παραγωγή προϊόντων. Γι' αυτό το λόγο οι εταιρείες έχουν εκμεταλλευτεί το συγκεκριμένο εργαλείο σε πληθώρα εφαρμογών.

Πιο συγκεκριμένα, η **TOYOTA** με αρωγό το GD, επανασχεδίασε τα πλαίσια των θέσεων αυτοκινήτων της, με σκοπό την βελτίωση της ασφάλειας, της άνεσης και με γνώμονα το sustainability. Το σχέδιο που προέκυψε δεν θυμίζει σε καμία περίπτωση κάποια προσέγγιση που θα γινόταν μόνο με την σχεδιαστική εμπειρία του μηχανικού. Το project, ξεκίνησε με την ανάγκη για περισσότερο χώρο στην καμπίνα του αυτοκινήτου. Το ορθογώνιο σύνηθες σχήμα των θέσεων που θυμίζει πλάκα, δεν θα βοηθούσε, επομένως υπήρξε η σκέψη μεταφοράς του περισσότερου βάρους στο κέντρο της θέσης. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλιζόταν περισσότερος χώρος για τους επιβάτες στις πίσω θέσεις. Δεδομένου ότι σε περίπτωση ατυχήματος, οι πίσω επιβάτες μπορεί να χτυπήσουν την θέση, πρέπει το σχέδιο που θα πρόκυπτε να είχε και τις απαραίτητες αντοχές. Σε βάθος τριών με τεσσάρων μηνών και έπειτα από αλληπάλληλες δοκιμές έφτασαν στο τελικό αποτέλεσμα (Matsunaka, 2023).



Εικόνα 4: Πλαίσιο θέσης αυτοκινήτου Toyota, με αρωγό το Generative Design (Matsunaka, 2023).

Η **VW (Volkswagen)**, χρησιμοποίησε το GD σε ένα ηλεκτρικό Concept Bus, με γνώμονα την μεγιστοποίηση της δύναμης και την ελαχιστοποίηση του βάρους σχεδιάζοντας αρκετά μέρη του συγκεκριμένου οχήματος. Όπως είναι φανερό η μείωση του βάρους είναι αρκετά σημαντική στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, καθώς όσο το λιγότερο ζυγίζει, τόσο λιγότερη ενέργεια απαιτείται για να κινηθεί. Αυξάνεται με αυτόν τον τρόπο η αυτονομία του. Αναλυτικότερα, το εργαλείο του GD χρησιμοποιήθηκε στους τροχούς, όπου η μείωση του βάρους είναι αρκετά σημαντική, γιατί αφενός μειώνεται η συνολική μάζα και αφετέρου μειώνεται η αντίσταση κύλισης. Το τελικό σχέδιο ήταν κατά 18% ελαφρύτερο. Παράλληλα, το GD χρησιμοποιήθηκε για τον επανασχεδιασμό του τιμονιού, την δομή της στήριξης των πίσω θέσεων και των πλαϊνών καθρεφτών (Deplazes, 2019).



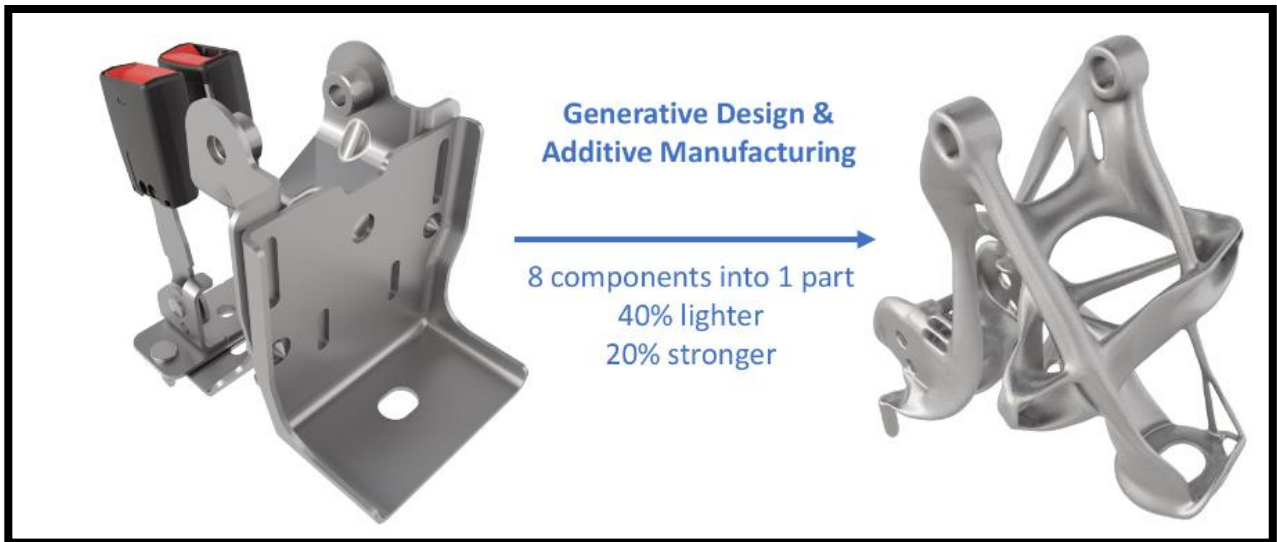
Εικόνα 5: Τροχός VW Microbus 1962, σχεδιασμένος με Generative Design (Deplazes, 2019).



Εικόνα 6: Τιμόνι VW Microbus 1962, σχεδιασμένο με Generative Design (Deplazes, 2019).



Εικόνα 7: Καθρέφτης VW Microbus 1962, σχεδιασμένος με Generative Design (Deplazes, 2019).

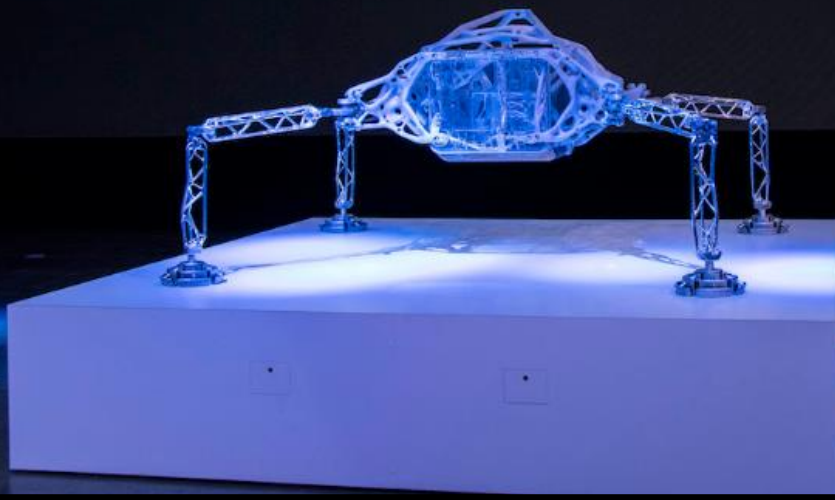


Εικόνα 8: General Motors: Βραχίονας καθίσματος αυτοκινήτου σχεδιασμένος με Generative Design (Danon, 2018).

Η **GM (General Motors)**, έχει χρησιμοποιήσει την αναλυθείσα τεχνική μείωσης βάρους, για την βελτιστοποίηση των βραχιόνων των καθισμάτων αυτοκινήτων, οι οποίοι ασφαλίζουν τους υποδοχείς της ζώνης στις θέσεις και ακολούθως τις θέσεις στο πάτωμα του αυτοκινήτου. Το πρόγραμμα έβγαλε πάνω από 150 εναλλακτικά σχέδια, ενώ με την επιλογή του βέλτιστου κατάφεραν να μειώσουν το βάρος κατά 40%, ενώ να κάνουν το εξάρτημα 20% δυνατότερο. Το συγκεκριμένο εξάρτημα αποτελούνταν από 8 κομμάτια στο παρελθόν ενώ πλέον από ένα μοναδικό κομμάτι. Γίνεται αντιληπτό ότι με την εφαρμογή του συγκεκριμένου concept και στα υπόλοιπα εξαρτήματα του αυτοκινήτου, το βάρος θα μειωθεί σημαντικά, ακολουθούμενο από την κατανάλωση του καυσίμου, ενώ παράλληλα θα γίνει πιο εύκολη η συναρμογή του οχήματος, καθώς παρουσιάστηκε στο συγκεκριμένο παράδειγμα, εξαρτήματα που στο παρελθόν έπρεπε να συναρμολογηθούν, πλέον θα χρειάζονται λιγότερα κομμάτια (Danon, 2018).

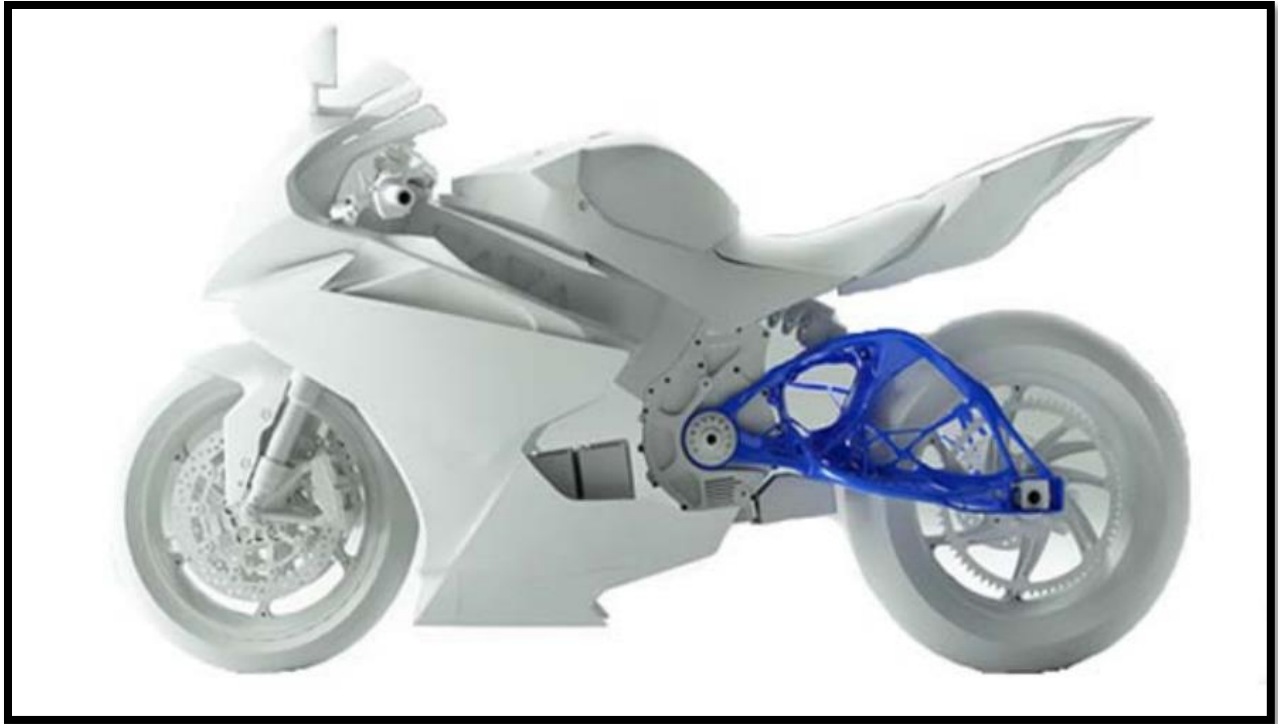
Ολοκληρώνοντας το κομμάτι της αυτοκινητοβιομηχανίας, εξάγεται ως αποτέλεσμα ότι το GD, μπορεί να αποτελέσει καθοριστικός αρωγός στην αύξηση του χώρου της καμπίνας των αυτοκινήτων, να αυξήσει την αυτονομία των οχημάτων, ηλεκτρικών και μη, μειώνοντας παράλληλα και το συνολικό υλικό που χρειάζεται.

AUTODESK. UNIVERSITY



Εικόνα 9: NASA: Μηχανισμός σεληνιακής προσεδάφισης σχεδιασμένος με Generative Design (Collins, 2018).

Σε αυτά τα πλαίσια, το εργαλείου του GD χρησιμοποιήθηκε και από την **NASA**, με σκοπό την κατασκευή ενός μηχανισμού σεληνιακής προσεδάφισης. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός, καλείται να εκτελέσει περίπλοκες διαδικασίες σε θερμοκρασίες αρκετά χαμηλότερες του μηδενός, καθώς και να αντέξει σε ακτινοβολίες κατά χιλιάδες φορές μεγαλύτερες από αυτές της γης. Όλα αυτά, διατηρώντας αρκετό χώρο για τα καύσιμα του. Κατά την διαστημική εξερεύνηση, το βάρος κατά την απογείωση παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς οποιαδήποτε ποσότητα μάζας μειώνεται από τον μηχανισμό, μπορεί να προστεθεί στους αισθητήρες και τα όργανα του, ενισχύοντας τις λειτουργίες αυτών (Collins, 2018).



Εικόνα 10: Lightning Motorcycles: Βραχίονας μοτοσυκλέτας (Martin Pollák, Jozef Török, 2022).

Η εταιρεία **Lightning Motorcycles** σε συνεργασία με το Autodesk Research Center εργάστηκαν για την βελτίωση του βραχίονα της μοτοσυκλέτας. Η συγκεκριμένη εταιρεία είχε προσπαθήσει και στο παρελθόν να βελτιώσει το συγκεκριμένο εξάρτημα, με την βοήθεια της ΑΜ. Ωστόσο, τα σχέδια που παράχθηκαν δεν μπορούσαν να ανταπεξέλθουν στις συνολικές δυνάμεις που αναπτύσσονταν. Με την βοήθεια πλέον του Generative Design, κατάφεραν όχι μόνο να μειώσουν το απαραίτητο υλικό, αλλά και να ενισχύσουν δομικά το εξάρτημα αλλά και την απόδοση της μηχανής (Martin Pollák, Jozef Török, 2022).

2.2.3 Αλγόριθμοι του Generative Design.

Ως αλγόριθμοι του Generative Design, ή αλλιώς Generative Design Algorithms (GDA), ονομάζονται οι διαφορετικοί υπολογιστικοί αλγόριθμοι που βοηθούν στην εξερεύνηση του σχεδιαστικού χώρου, συνήθως χαράσσοντας ένα πλαίσιο με αρχές και διαδικασίες για τη δημιουργία πολυάριθμων εναλλακτικών λύσεων. Αυτοί διαφέρουν σημαντικά ως προς τις διαδικασίες, τα κριτήρια, την αποδοτικότητα και τα δομικά τους μέρη. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για το GD μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 3 μέρη, σε αλγόριθμους αντικατάστασης, εξέλιξης και αλληλεπίδρασης (Singh, 2011).

Στους **αλγόριθμους αντικατάστασης**, ένα μέρος του σχεδίου αντικαθίσταται από ένα άλλο, με σκοπό την παραγωγή εναλλακτικών σχεδίων, βασιζόμενοι συχνά σε κάποιους συγκεκριμένους κανόνες. Στην συγκεκριμένη κατηγορία υπάγονται οι Shape Grammars και τα L-Systems. Η διαφορά των δύο αυτών, έγκειται στο ότι τα L-Systems αποτελούνται κυρίως από σύμβολα ή συμβολικές γεωμετρίες. Επίσης, άλλη μία διαφορά είναι ότι χαρακτηρίζονται από την επιλογή πολλαπλών κανόνων σε κάθε βήμα. Και οι δύο αλγόριθμοι μοιράζονται τον εξής περιορισμό: Δεν διαθέτουν κάποιον μηχανισμό ο οποίος να μπορεί να αξιολογεί την αποτελεσματικότητα των παράγωγων σχεδίων. Ακολουθεί περαιτέρω ανάλυση του κάθε αλγόριθμου ξεχωριστά.

Shape Grammars (SG): Τα SG περιληπτικά είναι μια σειρά σχηματικών κανόνων που μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να παραχθεί μια σειρά ή αλλιώς μία γλώσσα σχεδίων. Η εφαρμογή των κανόνων παράγει σχέδια, ενώ οι κανόνες αποτελούν περιγραφές των παραγόμενων σχεδίων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν σχεδιαστικά εργαλεία, ή σαν εργαλεία ανάλυσης για την κατανόηση των υπάρχοντων σχεδίων. Οι 4 συνιστώσες των SG, είναι ότι η σειρά των σχημάτων (S), των συμβόλων (L) και των σχηματικών κανόνων (R) είναι πεπερασμένη και η τελευταία είναι το αρχικό σχήμα (I). Κατά την παραγωγή σχεδίων προσθέτονται, αφαιρούνται ή αντικαθίστανται τα στοιχεία (elements). Οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων ορίζονται, ή αλλάζουν με βάση τους σχηματικούς κανόνες. Τα διαφορετικά σχέδια προκύπτουν από την εναλλαγή της σειράς εφαρμογής των εν λόγω σχηματικών κανόνων

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη προσέγγιση τα σχήματα των σετ S και τα σύμβολα των σετ L αποτελούν τα δομικά στοιχεία για τον ορισμό των σχηματικών κανόνων των σετ R και του αρχικού σχήματος I. Τα ενδεικτικά σχήματα που παράγονται βασίζονται στα προαναφερθέντα στοιχεία. Ένας σχηματικός κανόνας αποτελείται από δύο ενδεικτικά σχήματα. Αυτά και το αρχικό σχήμα αποτελούνται από σχήματα των σετ S και σύμβολα των σετ L. Το ενδεικτικό σχήμα τοποθετημένο στην αριστερή πλευρά του σχηματικού κανόνα καθώς και το αρχικό σχήμα, δεν επιτρέπεται να είναι κενά, σε αντίθεση με το ενδεικτικό σχήμα στην δεξιά πλευρά.

Ένας σχηματικός κανόνας $\alpha \rightarrow \beta$ (αλλαγή του σχήματος από α στο β εφαρμόζεται σε ένα ενδεικτικό σχήμα γ , όταν μπορεί να πραγματοποιηθεί μια αλλαγή τ , έτσι ώστε το $\tau(\alpha)$ να αποτελεί υποσχήμα του γ . Σε αντίθετη περίπτωση, θεωρείται ότι το τ αποτελεί μια γενική αλλαγή του σχήματος, όπου το α είναι παρόμοιο του γ , ή ενός μέρους αυτού. Το ενδεικτικό σχήμα που παράγεται από αυτή τη διαδικασία υπόκειται στην αλλαγή $[\gamma - \tau(\alpha)] + \tau(\beta)$. Το ενδεικτικό σχήμα που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο αποτελείται από την σχηματική διαφορά

του γ με του $\tau(\alpha)$, η οποία ενώνεται με το $\tau(\beta)$. Σε περίπτωση λοιπόν που το $\tau(\beta)$ είναι κενό, πάλι προκύπτει ένα νέο ενδεικτικό σχήμα, από το οποίο έχει αφαιρεθεί το $\tau(\alpha)$.

Τα ενδεικτικά σχήματα λοιπόν παράγονται από μία σχηματική γραμματική, εφαρμόζοντας τους σχηματικούς κανόνες, έναν την κάθε φορά, στο αρχικό σχήμα, ή στα ενδεικτικά σχήματα που προέκυψαν από προηγούμενες εφαρμογές των κανόνων. Ένα ενδεικτικό σχήμα γ , παράγεται από την σχηματική γραμματική αν υπάρχει πεπερασμένη σειρά ενδεικτικών σχημάτων τα οποία ξεκινούν με το αρχικό σχήμα και τελειώνουν στο γ , έτσι ώστε κάθε όρος της σειράς εκτός από τον πρώτο να παράγεται εφαρμόζοντας έναν σχηματικό κανόνα στον άμεσο προκάτοχο του.

Η σχηματική γραμματική ορίζει ένα σετ σχημάτων που ονομάζεται γλώσσα. Αυτή η γλώσσα περιέχει όλα τα σχήματα S που παράγονται από την σχηματική γραμματική και δεν συνδέονται με κανένα σύμβολο L . Κάθε ένα από αυτά τα σχήματα προκύπτει από το αρχικό σχήμα εφαρμόζοντας τους σχηματικούς κανόνες (Behbahani, Ning Gu and Peiman Amini, 2021), (Stiny, 1980).

Lindenmayer-systems (LS): Πρόκειται για μαθηματικούς αλγόριθμους που παράγουν πραγματολογικές μορφές που προσομοιάζουν χαρακτηριστικά βιολογικής ανάπτυξης. Έχουν χρησιμοποιηθεί για μεγάλο εύρος σχεδιαστικών προβλημάτων, από απλά μοτίβα έως περίπλοκους σχεδιασμούς και αναλύσεις πόλεων. Είναι κυρίως μία σειρά κανόνων παραγωγής που εφαρμόζονται αναδρομικά μέσω της επαναγραφής των string (συμβολοσειρών). Για τον σκοπό της παραγωγής σχεδίων, αποτελούν τις αρχές μιας σχεδιαστικής γραμματικής, με την ειδοποιό διαφορά, ότι λειτουργούν με συμβολοσειρές και όχι άμεσα με το σχέδιο. Τυπικά, το σχέδιο αρχικά συμβολίζεται με συμβολοσειρές. Έπειτα εφαρμόζονται μηχανισμοί επανεγραφής των συμβολοσειρών και παράγεται το σχέδιο. Για την οπτικοποίηση ή την αξιολόγηση του παραγόμενου σχεδίου, οι συμβολοσειρές αναδιαμορφώνονται σε κατάλληλες μορφές, μέσω γραφικών ερμηνειών. Τουναντίον, σε μια τυπική σχεδιαστική γραμματική τα στοιχεία σχεδιασμού, όπως τα σχήματα, χρησιμοποιούνται άμεσα στους κανόνες σχεδιασμού, ενώ η εφαρμογή των κανόνων συνεπάγεται οπτικές και χωρικές πράξεις σε αυτά τα στοιχεία. Η εφαρμογή της σχεδιαστικής γραμματικής στον υπολογιστή απαιτεί αυτά τα στοιχεία σχεδιασμού να αναπαρασταθούν τελικά ως σύμβολα στο υπολογιστικό σύστημα. Τα LS λοιπόν αποτελούν παραλλαγές των γραμματικών σχεδιασμού.

Θεμελιώδης για τα LS είναι η έννοια της παράλληλης επανεγραφής, σύμφωνα με την οποία ένα σύνολο συμβόλων επανεγράφεται (αντικαθίσταται, αλλάζει) σύμφωνα με κάποιο σύνολο κανόνων. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο το σύνολο των συμβόλων ταυτόχρονα, προσομοιάζοντας την παράλληλη ανάπτυξη των στοιχείων, παρόμοια με τον τρόπο που αναπτύσσονται τα κύτταρα σε έναν οργανισμό (McCormack, 2004).

Οι **αλγόριθμοι εξέλιξης** βασίζονται στην βιολογία. Η ειδοποιός διαφορά με τους αλγόριθμους αντικατάστασης, είναι ότι τα παράγωγα σχέδια πρέπει να ανταποκρίνονται σε κάποιους σε μία σειρά καταπονήσεων έτσι ώστε έπειτα από κάθε βήμα να συνεχίζει το βέλτιστο σχέδιο. Σε

αυτούς υπάγονται οι γενετικοί αλγόριθμοι Genetic Algorithms (GA), ενώ γίνεται αναφορά και στους αλγόριθμους της Autodesk, mammal Bone Density and Slime Mold algorithms.

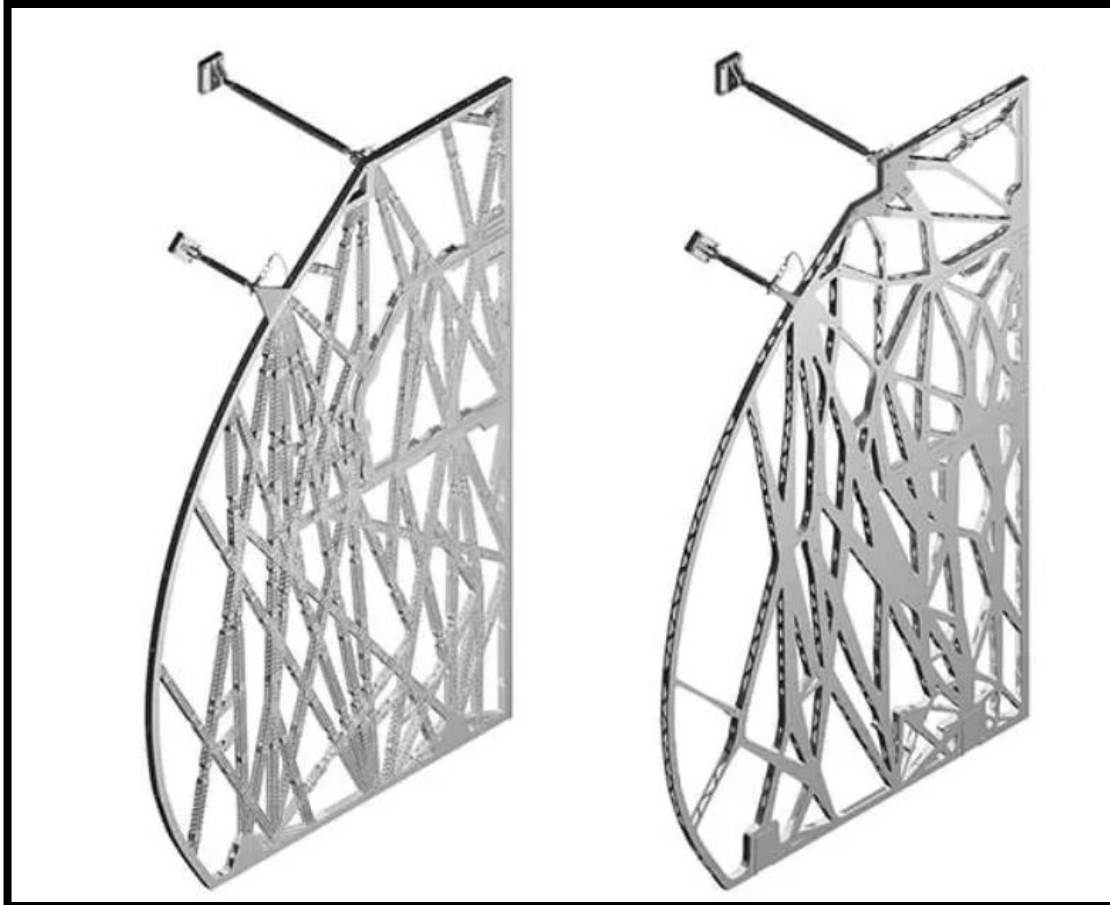
Genetic Algorithms (GA): Οι GA και ο γενετικός προγραμματισμός είναι εξελικτικές τεχνικές εμπνευσμένες από τις φυσικές εξελικτικές διαδικασίες. Οι GA χρησιμοποιούν τα ανάλογα των εξελικτικών τελεστών σε έναν πληθυσμό καταστάσεων σε ένα χώρο αναζήτησης για να βρουν τις καταστάσεις που βελτιστοποιούν μια συνάρτηση καταλληλότητας. Ο χώρος αναζήτησης αποτελείται από σειρές χαρακτήρων σταθερού ή μεταβλητού μήκους (χρωμοσώματα ή γονότυποι) που αποτελούνται από τα στοιχεία ενός συγκεκριμένου αλφαβήτου (αλληλόμορφα). Ο χώρος γονότυπων απεικονίζεται σε έναν άλλο χώρο αναζήτησης (φαινότυπος). Η συνάρτηση καταλληλότητας ορίζεται ως συνάρτηση μιας κατάστασης στο χώρο φαινοτύπων.

Το γονίδιο, είναι η μικρότερη μονάδα ενός γονότυπου. Τα αλλήλια είναι διαφορετικές μορφές γονιδίων. Οι γενετικοί κώδικες είναι νούμερα, ή γράμματα της αλφαβήτου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση σε έναν γονότυπο. Η γενετική περιγραφή, περιέχει γενετικούς όρους. Οι γενετικές λειτουργίες που χρησιμοποιούνται στα γενετικά συστήματα μπορούν να εκτελεστούν στην γενετική περιγραφή. Η γενετική δομή είναι μία παρτίδα γονιδίων με συγκεκριμένη σειρά ή σχέση. Ο γονότυπος, είναι η γενετική διάταξη του σχεδίου, ενώ ο φαινότυπος είναι οι οπτικά προσβάσιμες ιδιότητες του σχεδίου, η μορφή του.

Οι GA βασίζονται στα ακόλουθα βήματα. Στο 1^ο βήμα, τίθεται μια μεταβλητή π.χ. t ίση με το 0. Στο 2^ο βήμα παράγεται ο αρχικός πληθυσμός POP(t) και σε 3^ο βήμα αυτός αξιολογείται. Στο 4^ο βήμα αν ικανοποιείται η συνθήκη παύσης, τότε σταματάει η διαδικασία, αλλιώς συνεχίζει στο 5^ο βήμα. Εκεί η μεταβλητή t τίθεται ως $t+1$ και στο 6^ο βήμα επιλέγονται μεταβλητές από έναν νέο πληθυσμό POP($t-1$) για να δημιουργηθεί ο POP(t). Στο 7^ο βήμα εφαρμόζονται οι γενετικές λειτουργίες στον POP(t). Αξιολογείται κάθε μεταβλητή του POP(t) στο 8^ο βήμα και τέλος σαν 9^ο βήμα, επανέρχεται στο 4^ο όπου και ελέγχεται αν πληρείται η συνθήκη παύσης.

Με άλλα λόγια, η τεχνική αυτή, εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ένας καλός γονότυπος περιέχει κάποια επιθυμητά γονίδια, τα οποία καθιστούν την επιλογή του συγκεκριμένου προϊόντος καλή. Γι' αυτό όταν ανταλλάσσονται γενετικές πληροφορίες επαναλαμβάνεται αυτή η διαδικασία ώστε να γίνει η παραγωγή προϊόντος, το οποίο θα κατέχει τα επιθυμητά γονίδια που θα το κάνουν να υπερτερεί. Όπως προκύπτει λογικά, η κάθε γενιά θα είναι πιο κοντά στα επιθυμητά χαρακτηριστικά που έχουν οριστεί. Το δυνατό σημείο των GA έγκειται στο γεγονός ότι η μελέτη ξεκινάει από ένα πληθυσμό σημείων και όχι ένα μεμονωμένο. Παράλληλα οι GA δουλεύουν με άμεσο προγραμματισμό των παραμέτρων, που τους καθιστούν ιδανικούς για ασυνεχή, μεγάλων διαστάσεων και πολύτροπα προβλήματα (P. V. (Sundar) Balakrishnan, Varghese S. Jacob, 1996).

Autodesk's slime mold and mammal bones algorithms: Το GD μιμείται την φυσική επιλογή και μετά από αρκετές επαναλήψεις βρίσκεται η καλύτερη επιλογή σχεδίου. Μαθαίνει από κάθε επανάληψη τι δουλεύει και τί όχι, καταλήγοντας σε ένα τελικό σχέδιο. Η Autodesk, για την κατασκευή ενός ατσαλένιου βραχίονα για ένα Airbus, χρησιμοποίησε για το πλαίσιο έναν αλγόριθμο βασισμένο στα αναπτυξιακά μοτίβα της μούχλας (slime mold), έναν μονοκύτταρο



Εικόνα 11: Ατσαλένιος βραχίονας Airbus, σχεδιασμένος με Generative Design (Anon., n.d.)

οργανισμό, ο οποίος έχει την δυνατότητα να συνδέει διαφορετικά σημεία σε έναν χώρο με μεγάλη αποδοτικότητα. Παράλληλα, χρησιμοποίησε έναν αλγόριθμο για την δομή εσωτερικά του πλαισίου, ο οποίος βασίζεται στην αναπτυξιακή δομή του δικτύματος των κόκκαλων των θηλαστικών. Με βάση αυτόν τον αλγόριθμο, τα σημεία τα οποία υπόκεινται σε μεγάλες δυνάμεις είναι πιο πυκνά συγκριτικά με τα υπόλοιπα σημεία που είναι πιο ελαφριά (Anon., n.d.).

Στην τρίτη κατηγορία βρίσκονται οι **αλγόριθμοι αλληλεπίδρασης**. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μια κοινωνία 'πρακτόρων' οι οποίοι μετακινούνται στον σχεδιαστικό χώρο και παράγουν σχεδιαστικές εναλλακτικές σύμφωνα με τις αλληλεπιδράσεις με το γενικότερο πλαίσιο και τα άλλα στοιχεία. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι ακολουθούν μια bottom-up διαδικασία, κατά την οποία χρήσιμα αποτελέσματα προκύπτουν από την οπτική ή χωρική και λειτουργική μαθηματική αναλογία των συνεργαζόμενων στοιχείων. Το πλεονέκτημα των συγκεκριμένων αλγόριθμων έγκειται στο γεγονός ότι τα παράγωγα σχέδια βρίσκονται κοντά στις προδιαγραφές και στα προκαθορισμένα πλαίσια, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία κατόπιν της διαδικασίας. Ωστόσο, μπορεί να περιορίζονται οπτικά ή χωρικά, καθώς

ο σχεδιαστικός τους χώρος είναι γεωμετρικά περιορισμένος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι Cellular Automata και Swarm Intelligence.

Cellular Automata (CA): Πρόκειται για μία συλλογή από κύτταρα τα οποία βρίσκονται πάνω σε πλέγμα ορισμένου μεγέθους, που αναπτύσσεται σε πάροδο του χρόνου, σύμφωνα με κάποιους κανόνες που ορίζονται από την κατάσταση των γειτονικών κυττάρων. Το πλέγμα μπορεί να κυμαίνεται, από μονοδιάστατες γραμμές, έως καρτεσιανά πλέγματα σε αυθαίρετες διαστάσεις.

Το κύτταρο είναι η μικρότερη λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός 3D ή 2D χώρου. Η κατάσταση του κυττάρου, περιγράφει την παροντική κατάσταση του χώρου της μονάδας. Ένας χώρος για παράδειγμα, μπορεί να χαρακτηρίζεται ως γεμάτος ή ως άδειος. Η κατάσταση των κυττάρων, μπορεί να οριστεί σύμφωνα με τις ανάγκες του σχεδίου. Τα κύτταρα λοιπόν, μπορούν να φτάσουν σε μία σταθερή κατάσταση ώστε να μην επηρεάζονται πλέον από τα γειτονικά τους κύτταρα. Μπορούν επίσης να γίνουν ασταθή και να επηρεάζονται από τις αλλαγές που συμβαίνουν γύρω τους. Τα κύτταρα τα οποία μοιράζονται κάποια προκαθορισμένη χωρική εγγύτητα με ένα κύτταρο, ονομάζονται γειτονιά. Τα κύτταρα δηλαδή που μοιράζονται τουλάχιστον μία επιφάνεια ή ακμή ή κορυφή, ονομάζονται γειτονικά.

Οι σχεδιαστικοί περιορισμοί υλοποιούνται από κάτω προς τα πάνω, (bottom-up) και διέπουν την τοπική συμπεριφορά κάθε κυττάρου. Γι' αυτό τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι συχνά πολύπλοκα και δύσκολα προβλέψιμα. Αν και υπάρχουν μηχανισμοί για μετασχηματισμό των κυττάρων κατά τη διάρκεια της εφαρμογής, σε γενικές γραμμές, τα κύτταρα και οι διαθέσιμες λειτουργίες είναι περιορισμένες και περιορίζονται από τον τύπο του πλέγματος που υιοθετείται.

Με γνώμονα την τοπική επικοινωνία μεταξύ των κυττάρων με την πάροδο του χρόνου, η συμπεριφορά στην CA βασίζεται σε συχνά εντυπωσιακά απλούς κανόνες που εκτελούνται παράλληλα από κύτταρα που είναι τοποθετημένα σε μεγαλύτερα πλέγματα. Βασιζόμενοι στις γεωμετρικές γειτονιές για να καθορίσουν τις καταστάσεις των μεμονωμένων κυττάρων, οι CA είναι εγγενώς χωρικά, ευαίσθητα στο περιβάλλον συστήματα. Έχουν εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων για τη μελέτη πολύπλοκων φαινομένων, από τη φυσική έως τη βιολογία, και έχουν βρει κάποια εφαρμογή στην αρχιτεκτονική. Ως εργαλείο GD, οι CA χρησιμοποιούνται συνήθως με τη μορφή ογκομετρικών μοντέλων που υπερβαίνουν τους παραδοσιακούς τύπους μοντέλων, δεδομένου ότι οι μεμονωμένες ογκομετρικές μονάδες είναι ικανές να αλλάζουν τις ιδιότητές τους σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες. Αντιπροσωπεύοντας μια τυπική προσέγγιση για πειραματισμό στο GD, τα CA έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως για τη διερεύνηση των παραλλαγών των πιθανών λύσεων που προκύπτουν από τη χρονική εξέλιξη των αρχικών ρυθμίσεων με την πάροδο του χρόνου. Οι σχεδιαστικοί περιορισμοί συνήθως υλοποιούνται με τρόπο από κάτω προς τα πάνω με τη μορφή απλών κανόνων που διέπουν την τοπική συμπεριφορά κάθε κυττάρου.

Το αποτέλεσμα ενός συστήματος CA, ωστόσο, είναι συχνά πολύπλοκο και είναι δύσκολο να προβλεφθεί από αυτούς τους κανόνες. Παρόμοια με τα Shape Grammars, τα CA χαρακτηρίζονται

από προσδιοριστικά σύνολα κανόνων που είναι ικανά να παράγουν απροσδόκητα αποτελέσματα. Οι αλληλεξαρτήσεις των γειτονικών καταστάσεων των κυττάρων, ωστόσο, παρέχουν πιο εντοπισμένους μηχανισμούς αξιολόγησης. Αυτό το χαρακτηριστικό υποστηρίζει τοπικά αντί για παγκόσμια μοντέλα ελέγχου, και θεωρείται ως μια μελλοντική ευκαιρία για την προώθηση του GD. Ως στρατηγική GD, οι CA επιλέγονται συνήθως για εργασίες που περιλαμβάνουν απλούς περιορισμούς που λειτουργούν σε μεγάλο αριθμό στοιχείων, όπου επιδιώκεται η διαφοροποίηση και η ποικιλία (Christiane M. Herr, Thomas Kvan, 2005).

Swarm Intelligence (SI) and multi-agent societies: Τα Agent Based Models (ABM), (μοντέλα βασισμένα σε πράκτορες) χρησιμοποιούνται συχνά για την υλοποίηση κοινωνικών ή συλλογικών συμπεριφορών. Τα Agents, είναι συστήματα που έχουν την δυνατότητα να δρουν αυτόνομα και σύμφωνα με τις αποφάσεις τους. Σε μία 'κοινωνία' μπορούν να δράσουν ανεξάρτητα ή να αλληλοεπιδράσουν και να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, ακόμα και να συνεργαστούν ώστε να επιτύχουν τον σκοπό τους.

Η SI είναι η ιδιότητα ενός συστήματος κατά την οποία οι συλλογικές συμπεριφορές μη εξελιγμένων παραγόντων που αλληλοεπιδρούν τοπικά με το περιβάλλον τους προκαλούν την ανάδυση συνεκτικών λειτουργικών παγκόσμιων προτύπων. Η SI παρέχει μία βάση με την οποία είναι δυνατή η διερεύνηση της συλλογικής ή κατανεμημένης επίλυσης προβλημάτων χωρίς κεντρικό έλεγχο ή την παροχή ενός παγκόσμιου μοντέλου. Μπορεί να οριστεί ως ένα σμήνος (swarm) με όρους αυτό-οργάνωσης και στιγματισμού.

Στην αυτό-οργάνωση οι δομές εμφανίζονται σε παγκόσμιο επίπεδο ενός συστήματος από αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών του χαμηλότερου επιπέδου, που βασίζονται μόνο σε τοπικές πληροφορίες, χωρίς αναφορά στο παγκόσμιο πρότυπο. Το παγκόσμιο πρότυπο λέγεται ότι είναι αναδυόμενη ιδιότητα του συστήματος. Το τρισδιάστατο σμήνος πλέγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία κτιριακών μορφών. Η αυτό-οργάνωση βασίζεται στην ανατροφοδότηση, την τύχη και τις αλληλεπιδράσεις.

Ο στιγματισμός αναφέρεται στην έμμεση αλληλεπίδραση των ατόμων, όταν το ένα από αυτά τροποποιεί το περιβάλλον και το άλλο ανταποκρίνεται στο νέο περιβάλλον σε μεταγενέστερο χρόνο. Διευκολύνει τη σταδιακή δόμηση και συχνά συνδέεται με την ευελιξία. Όταν το περιβάλλον αλλάζει λόγω μιας εξωτερικής διαταραχής, τα άτομα ανταποκρίνονται κατάλληλα στην εν λόγω διαταραχή (Singh, 2011).

2.2.4 Σύγκριση των αλγόριθμων.

Γενικά, είναι δυνατή η παραγωγή ενός αλγόριθμου ο οποίος θα συνδυάζει χαρακτηριστικά από όλες τις κατηγορίες ταξινόμησης αυτών, επομένως κρίνεται αναγκαία η σύγκριση των αλγορίθμων και η προβολή των αρνητικών/θετικών χαρακτηριστικών, για την βαθύτερη κατανόηση του GD.

Αρχικά θα συγκριθούν οι αλγόριθμοι σε **τεχνικό επίπεδο**:

Η CA είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τις παράλληλες υπολογιστικές διαδικασίες της και την προσομοίωση προτύπων ανάπτυξης που εξαρτώνται από το πλαίσιο, π.χ. προσομοίωση σεναρίων όπου πολλαπλοί παράγοντες αλληλοεπηρεάζονται μεταξύ τους, όπως αλλαγές σε μια ζώνη που οδηγούν σε αλλαγές στις γειτονικές ζώνες.

Τα SG και LS είναι παρόμοια και χρήσιμα για τη σταδιακή δημιουργία προτύπων, ιδίως για σχέδια βασισμένα στη μορφή.

Τα SG και LS μπορεί να είναι ή να μην είναι περιορισμένα, σε αντίθεση με το CA, το οποίο είναι πάντα περιορισμένο και εξαρτάται από το πλαίσιο.

Η SI είναι χρήσιμη για την προσομοίωση της αυτό-οργάνωσης μεταξύ διαφόρων μονάδων. Το ίδιο με τη CA, το SI επιδεικνύει επίσης παράλληλες υπολογιστικές διαδικασίες. Στο SI οι παράλληλες διεργασίες συμβαίνουν λόγω της αυτονομίας των πρακτόρων/μονάδων, ενώ στο CA ορίζεται από την άποψη των καταστάσεων των κυττάρων και των συνθηκών γειτονίας.

Οι GA βασίζονται σε τροποποιήσεις, συνδυασμούς και άλλες πράξεις στα δομικά στοιχεία καθώς και στο χώρο λύσεων. Η διερεύνηση και η επιλογή του σχεδιασμού πραγματοποιούνται σε κάθε κύκλο, κάτι που δεν συμβαίνει με τα SG ή τα LS. Οι γενετικές πράξεις μπορούν να δημιουργήσουν τυχαία σχέδια και, ως εκ τούτου, είναι ευκολότερο να μοντελοποιηθούν σε σύγκριση με τα SG ή LS, όπου ο εντοπισμός των κανόνων μπορεί να πάρει χρόνο. Η πρόκληση των GA είναι η επιλογή των κατάλληλων αλληλόμορφων, χρωμοσωμάτων και της κατάλληλης συνάρτησης. Οι GA επιτρέπουν επίσης τον παράλληλο υπολογισμό, αλλά σε αντίθεση με την CA και SI όπου ο παράλληλος υπολογισμός γίνεται σε τοπικό επίπεδο, στους GA ο παράλληλος υπολογισμός γίνεται μέσω της εξερεύνησης πολλαπλών λύσεων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ακολουθεί η σύγκριση των αλγόριθμων σε **σχεδιαστικό επίπεδο**:

Οι GA είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

Τα SG και LS είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για τη δημιουργία μορφών και στυλ.

Η CA είναι η πιο κατάλληλη για την υποστήριξη διαδικασιών σχεδιασμού με βάση το πλαίσιο.

Η SI είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση της χρηστικότητας του σχεδιασμού, την προσομοίωση της κυκλοφορίας και των μοτίβων πλοήγησης για την πληροφόρηση της ανάπτυξης του σχεδιασμού και τη δημιουργία σχεδίων που προκύπτουν από την αυτό-οργάνωση αυτόνομων μονάδων.

Η CA και η SI είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για διαδικασίες σχεδιασμού με γνώμονα τη συμπεριφορά, ενώ τα SG και LS είναι κατάλληλα για διαδικασίες σχεδιασμού με γνώμονα τη μορφή. Οι GA επιτρέπουν μια μη κατευθυνόμενη εξερεύνηση του χώρου σχεδιασμού, αλλά

παρέχουν μια αναζήτηση μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας για τη διασφάλιση της ποιότητας.

Ακολουθεί σύγκριση σε **επίπεδο ανάπτυξης συστήματος**:

Τα SG έχουν διερευνηθεί κυρίως χειροκίνητα. Η ανάπτυξη κανόνων SG είναι μια χρονοβόρα και επαναληπτική διαδικασία. Τα LS είναι ομοίως επαναληπτικά.

Υπάρχουν περισσότερα παραδείγματα εφαρμογής της CA επειδή οι καταστάσεις των κυττάρων είναι ευκολότερο να εντοπιστούν και να εφαρμοστούν, εκτός αν οι γειτονιές υψηλότερης τάξης δεν λαμβάνονται υπόψη.

Το SI μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορα επίπεδα αυτονομίας και ευφυΐας των πρακτόρων. Συχνά χρησιμοποιούνται απλοί αντιδραστικοί πράκτορες.

Η επιλογή των αλληλομόρφων και της συνάρτησης καταλληλότητας είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη ενός χρήσιμου εργαλείου GA (Singh, 2011).

2.2.5 Ο ρόλος του AI στο Generative Design.

Το GD είναι μια διαδικασία κατά την οποία ένα σχήμα παράγεται με την βοήθεια των αλγορίθμων του προγράμματος. Πριν από αυτή την διαδικασία όμως, πρέπει ο σχεδιαστής να ορίσει κάποιες παραμέτρους και οριακές συνθήκες οι οποίες κρίνεται απαραίτητο να προσομοιάζουν όσο το δυνατόν γίνεται τις πραγματικές. Πρόκειται για τον ορισμό του υλικού, ποιες περιοχές θα κρατηθούν ακέραιες, τις γεωμετρικές που εμποδίζουν το σχήμα, την επιλογή του αρχικού σχεδίου, τις δυνάμεις/ροπές, στηρίξεις, τον τρόπο παραγωγής του προϊόντος, το τελικό βάρος καθώς και αν είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της ακαμψίας κλπ. Κατά την διαδικασία παραγωγής σχεδίων, πραγματοποιείται μία ανάλυση/προσομοίωση, βασισμένη στα προαναφερθέντα κριτήρια και συνθήκες, ενώ και το AI είναι αρωγός.

Με την βοήθεια του AI και συγκεκριμένα του machine learning, το πρόγραμμα αναγνωρίζει αυτόματα κάποια μοτίβα στα δεδομένα που του δίνονται. Με βάση κάποια δεδομένα εκπαίδευσης, το πρόγραμμα, εκπαιδεύεται εκ' των προτέρων σε αυτή τη διαδικασία, αναγνωρίζοντας μοτίβα σε νέα σετ δεδομένων που ήταν άγνωστα μέχρι πρότινος στο πρόγραμμα. Για να καθιστούν όλα αυτά δυνατά, χρησιμοποιούνται τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, (Artificial Neural Networks), (ANN), αποτελούμενα από τρία επίπεδα ή αλλιώς στρώματα. Το στρώμα εισόδου, δέχεται τις μεταβλητές εισόδου, ακολουθεί το κρυφό στρώμα, το οποίο μπορεί να αποτελείται από πολλά στρώματα και αποτελεί το εσωτερικό των ANN. Το στρώμα εξόδου είναι το τελευταίο στρώμα του δικτύου και παρέχει την ποσότητα εξόδου. Κάθε ένα από αυτά τα στρώματα αποτελείται από πολλούς νευρώνες και ακμές μεταξύ αυτών των νευρώνων, κατά μήκος των οποίων υπάρχει η γνώση των ANN. Με τα δεδομένα εκπαίδευσης αυτή η γνώση τροποποιείται κατά μήκος κάθε ακμής, έτσι ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν μοτίβα με βάση

τα δεδομένα εκπαίδευσης. Για το GD και γενικότερα την βελτιστοποίηση χρησιμοποιούνται τα Variational Autoencoder (VAE), ή τα Generative Adversarial Networks, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία νέων γεωμετριών.

Αναλυτικότερα, το VAE και το GAN είναι τα πιο συνηθισμένα παραγωγικά μοντέλα για Machine Learning, όσον αφορά την βελτιστοποίηση των σχεδίων. Το VAE, μαθαίνει τις παραμέτρους (μέση τιμή και διακύμανση) που αντιπροσωπεύουν την κατανομή των δεδομένων και αναγκάζει τον λανθάνοντα χώρο να πάρει τη μορφή μιας γνωστής κατανομής προσθέτοντας μία απόκλιση Kullback-Leibler στην συνάρτηση κανονικοποίησης. Με αυτόν τον τρόπο παρόμοια παραδείγματα από το δείγμα εκπαίδευσης θα αντιστοιχιστούν σε σημεία που βρίσκονται πιο κοντά το ένα στο άλλο στον κωδικοποιημένο χώρο χαμηλότερης διάστασης, σχηματίζοντας συγκεκριμένα συμπλέγματα. Μια τέτοια αναπαράσταση διευκολύνει αργότερα τη δημιουργία νέων παραδειγμάτων με επιθυμητά χαρακτηριστικά με την εκτέλεση αριθμητικής λανθανόντων διανυσμάτων (Latent Vector Arithmetic).

Σε γενικές γραμμές, ένα τυπικό GAN αποτελείται από δύο δίκτυα που ανταγωνίζονται το ένα το άλλο. Το ένα δίκτυο, που ονομάζεται γεννήτρια, αναλαμβάνει ένα τυχαίο διάνυσμα θορύβου από τον λανθάνων χώρο και προσπαθεί να δημιουργήσει ένα πλαστό δείγμα των δεδομένων εκπαίδευσης. Το άλλο δίκτυο, που ονομάζεται διαχωριστής (Discriminator), προσπαθεί να διακρίνει μεταξύ των δειγμάτων από πραγματικά δεδομένα εκπαίδευσης και εκείνων που παράγονται από τη γεννήτρια, και κατά συνέπεια εξάγει μια εκτίμηση πιθανότητας ($p \in [0, 1]$). Τα δύο δίκτυα εκπαιδεύονται ταυτόχρονα, έτσι ώστε, ο διαχωριστής να γίνεται καλύτερος στο να διακρίνει μεταξύ πραγματικών και παραγόμενων δεδομένων και η γεννήτρια αναγκάζεται να ξεγελάσει τον διαχωριστή δημιουργώντας δείγματα που έχουν πολύ παρόμοια στατιστικά στοιχεία με εκείνα των πραγματικών δεδομένων. Κατά τη σύγκλιση, ο διαχωριστής παράγει πάντα τη τιμή 0,5 και η γεννήτρια παράγει δείγματα από την ίδια κατανομή με εκείνη των πραγματικών δεδομένων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η εκπαίδευση ενός GAN μπορεί να είναι μια πολύ δύσκολη εργασία. Θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι η γεννήτρια δεν ξεπερνά την διαχωριστή πρόωρα κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Σε περίπτωση που συμβεί αυτό, οδηγείται σε κατάρρευση το σύστημα, οπότε η γεννήτρια αρχίζει να συγκλίνει προς την παραγωγή λίγων μόνο δειγμάτων δεδομένων (ανάλογα με τοπικά ελάχιστα) τα οποία είναι γνωστό ότι ξεγελούν τον διαχωριστή (Deepak Nagaraj, Dirk Werth, 2020).

2.3 Topology Optimization

2.3.1 Ο ορισμός και οι έννοιες της τοπολογίας.

Για την ανάπτυξη νέων προϊόντων έχει μεγάλη σημασία να βρεθεί η καλύτερη δυνατή τοπολογία ή διάταξη για δεδομένους σχεδιαστικούς στόχους και περιορισμούς σε πολύ πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού, τη φάση δηλαδή της σύλληψης και του καθορισμού του έργου. Ετυμολογικά, η λέξη προέρχεται από το ελληνικό ουσιαστικό τόπος που σημαίνει τοποθεσία, χώρος ή περιοχή. Μαθηματικά μιλώντας, η τοπολογία ασχολείται με αντικείμενα που παραμορφώνονται με τον

λεγόμενο ελαστικό τρόπο, δηλαδή βρίσκεται σε ισχύ ο κανόνας του πολυέδρου του Euler, διατηρώντας την εγκυρότητά του και στον τρισδιάστατο χώρο, εφόσον πρόκειται για αντικείμενα όπως τετράεδρα, κύβοι, οκτάεδρα κ.λπ. τα οποία παραμορφώνονται με αυθαίρετο τρόπο.

Από μαθηματική άποψη, όλες οι παραμορφώσεις είναι μετασχηματισμοί ή αντιστρεπτά μοναδικές απεικονίσεις. Ως τοπολογικούς μετασχηματισμούς ή τοπολογικές απεικονίσεις ορίζουμε εκείνους τους μετασχηματισμούς ενός τοπολογικού πεδίου σε ένα άλλο που δεν καταστρέφουν τις υπάρχουσες ούτε δημιουργούν νέες σχέσεις γειτονίας. Δύο τοπολογικά πεδία ονομάζονται τοπολογικά ισοδύναμα αν υπάρχει τοπολογική απεικόνιση του ενός πεδίου στο άλλο. Ως εκ τούτου, μια τοπολογική ιδιότητα ενός τομέα είναι ένα χαρακτηριστικό που διατηρείται σε όλες τις τοπολογικές απεικονίσεις δηλαδή, είναι αναλλοίωτη. Επομένως, η τοπολογία θεωρείται ως η θεωρία των αναλλοίωτων τοπολογικών περιοχών. Ο όρος τοπολογική απεικόνιση μπορεί να αναχθεί στον όρο συνεχής απεικόνιση, όπου η απεικόνιση σε ένα πεδίο τοπολογίας ονομάζεται συνεχής αν δεν παραβιάζει οποιεσδήποτε υπάρχουσες σχέσεις γειτονίας. Γενικά, οι τοπολογικοί μετασχηματισμοί μπορούν να διατυπωθούν ως συνεχείς μετασχηματισμοί των οποίων ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι επίσης συνεχής. Η τελευταία περίπτωση ονομάζεται επίσης ομομορφισμός, δηλαδή οι μετασχηματισμοί είναι αντιστρεπτά μοναδικοί (διμερείς) και συνεχείς.

Με βάση τους παραπάνω όρους και ορισμούς της τοπολογίας, σε επόμενο στάδιο θα εξηγηθεί περαιτέρω η σύνδεση μεταξύ τοπολογίας και βελτιστοποίησης. Για το σκοπό αυτό, θα εισαχθεί ο όρος κλάση τοπολογίας (Topology Class) που περιγράφει ορισμένα αντικείμενα ως τοπολογικά ισοδύναμα (Topologically Equivalent). Μια κλάση τοπολογίας ορίζεται γενικά από το βαθμό σύνδεσης των περιοχών. Οι τομείς που ανήκουν σε μια κλάση τοπολογίας είναι τοπολογικά ισοδύναμοι. Μια δεύτερη κλάση τοπολογίας ορίζεται από το βαθμό στον οποίο οι τομείς συνδέονται. Μια περαιτέρω κλάση τοπολογίας εξαρτάται από το n (n -fold connected) εάν απαιτούνται $(n-1)$ τομές από ένα όριο σε ένα άλλο για να μετατραπεί ένα δεδομένο, πολλαπλά συνδεδεμένο πεδίο σε ένα απλά συνδεδεμένο πεδίο.

Όταν οι σχέσεις γειτονίας των μεμονωμένων στοιχείων που δημιουργούν έναν τομέα παραμένουν αμετάβλητες στην κλασική βελτιστοποίηση σχήματος (Shape Optimization) ενός στοιχείου, οι κανόνες απεικόνισης των ομομορφισμών είναι έγκυροι. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας, ωστόσο, αλλάζει τη σχέση γειτονίας, δηλαδή πραγματοποιείται μετασχηματισμός σε διαφορετική κλάση τοπολογίας. Από μαθηματική άποψη, η θέση και το σχήμα του νέου τομέα δεν έχει καμία σημασία. Σε κάθε περίπτωση, τόσο η θέση όσο και το σχήμα επηρεάζουν τη δομική μηχανική συμπεριφορά ενός εξαρτήματος, και επομένως συνήθως επιδιώκεται η βελτίωση του εξαρτήματος τόσο με τη βελτιστοποίηση τοπολογίας όσο και με τη βελτιστοποίηση σχήματος (Hans A Eschenauer, Niels Olhoff, 2001).

2.3.2 Προσεγγίσεις του Topology Optimization.

Η τοπολογία μιας κατασκευής, δηλαδή η διάταξη των υλικών ή η τοποθέτηση των δομικών στοιχείων στην κατασκευή, είναι καθοριστικής σημασίας για τη βέλτιστη λειτουργία της. Παραδοσιακά, η τοπολογία μιας κατασκευής επιλέγεται στις περισσότερες περιπτώσεις είτε διαισθητικά είτε εμπνέεται από ήδη υπάρχοντα σχέδια. Ωστόσο, υπάρχει σημαντική ανάγκη και ενδιαφέρον για τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων με την εύρεση της βέλτιστης δυνατής τοπολογίας τους σε πολύ πρώιμο στάδιο της διαδικασίας σχεδιασμού.

Γενικά, μπορούν να διακριθούν δύο προσεγγίσεις – κατηγορίες, τις υλικές ή αλλιώς Μικρο-προσεγγίσεις (**Material or Micro-approaches**) και τις γεωμετρικές ή Μακρο-προσεγγίσεις (**Geometrical or Macro-approaches**). Αυτές οι δύο προσεγγίσεις έχουν κάποιες σημαντικές διαφορές, γι' αυτό και θα αναλυθούν περαιτέρω.

Κατά την **Μικρο-προσέγγιση**, στόχος του σχεδιασμού είναι να βρεθεί εκείνη η δομική τοπολογία που αποδίδει σε έναν δεδομένο στόχο σχεδιασμού τη βέλτιστη τιμή για μία προκαθορισμένη ποσότητα δομικού υλικού. Γίνεται η υπόθεση ότι σε στερεά μορφή η ποσότητα του υλικού είναι μικρότερη από την ποσότητα που θα χρειαζόταν για να καλυφθεί ολόκληρη η επιτρεπόμενη περιοχή. Ως εκ τούτου, για τον αρχικό σχεδιασμό συνήθως επιλέγεται η ομοιόμορφη κατανομή του υλικού σε κάποια πορώδη, μικροδομική μορφή πάνω στο επιτρεπτό πεδίο σχεδιασμού. Στην προσέγγιση της μικροδομής για τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένα σταθερό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (finite element mesh) για την περιγραφή της γεωμετρίας και των πεδίων μηχανικής απόκρισης σε ολόκληρο το επιτρεπτό πεδίο σχεδιασμού. Συνήθως, το πλέγμα είναι ένα ομοιόμορφο, ορθογώνιο τμήμα του χώρου και οι μεταβλητές σχεδιασμού θεωρείται ότι αποκτούν σταθερές τιμές εντός κάθε πεπερασμένου στοιχείου. Για την ανάλυση, εφαρμόζουμε πεπερασμένα στοιχεία με καταστατικές ιδιότητες που αντικατοπτρίζουν τις σχέσεις μεταξύ των συνιστωσών δυσκαμψίας και της πυκνότητας του υλικού με βάση τη φυσική μοντελοποίηση των πορωδών μικροδομών, των οποίων ο προσανατολισμός και η πυκνότητα περιγράφονται από συνεχείς μεταβλητές στο επιτρεπόμενο πεδίο. Η βελτιστοποίηση συνίσταται στον προσδιορισμό του κατά πόσον κάθε στοιχείο πρέπει να περιέχει υλικό ή όχι. Για το σκοπό αυτό, η πυκνότητα του υλικού εντός κάθε πεπερασμένου στοιχείου χρησιμοποιείται ως μεταβλητή σχεδιασμού που ορίζεται μεταξύ των ορίων 1 και 0. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, οι μεταβλητές σχεδιασμού τείνουν να επιτύχουν μία από τις οριακές τους τιμές, διαμορφώνοντας έτσι ένα σχέδιο με συσσωρεύσεις σημείων (πεπερασμένα στοιχεία) με στερεό υλικό ή κενό, αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι μια πρόχειρη περιγραφή των εξωτερικών καθώς και των εσωτερικών ορίων της συνεχούς δομής που αντιπροσωπεύει το συνολικό βέλτιστο σχέδιο τοπολογίας. Με βάση αυτή την τοπολογία, πραγματοποιείται συνήθως επακόλουθη βελτιστοποίηση σχήματος, έτσι ώστε να προκύψει ένας σχεδιασμός που είναι βέλτιστος τόσο ως προς την τοπολογία όσο και ως προς το σχήμα.

Στην κατηγορία της **Μάκρο-προσέγγισης** εξετάζονται στερεά ισότροπα υλικά και όχι πορώδη, μικροδομημένα υλικά, και καθώς η βελτιστοποίηση τοπολογίας πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση σχήματος, το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων δεν μπορεί να

είναι σταθερό, αλλά πρέπει να αλλάζει με τις αλλαγές των ορίων του σχεδιασμού. Στο πλαίσιο της προσέγγισης της μακροδομής, η τοπολογία ενός στερεού σώματος μπορεί να αλλάξει με την αύξηση ή τον εκφυλισμό υλικού ή με την εισαγωγή οπών. Η πρώτη μέθοδος αναγνωρίζει ότι ένας βέλτιστος σχεδιασμός είναι απλώς ένα υποσύνολο του επιτρεπόμενου πεδίου σχεδιασμού και ότι μπορεί να επιτευχθεί με την κατάλληλη προσθήκη ή αφαίρεση υλικού από το επιτρεπόμενο πεδίο σχεδιασμού. Η δεύτερη μέθοδος που αναφέρθηκε συνίσταται στην επαναληπτική τοποθέτηση νέων οπών ("φυσαλίδων") σε συγκεκριμένα σημεία του πεδίου τοπολογίας. Σε κάθε επανάληψη, οι οπές και τα υπάρχοντα μεταβλητά όρια του συνεχούς σώματος υποβάλλονται ταυτόχρονα σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης σχήματος (Hans A Eschenauer, Niels Olhoff, 2001).

2.3.3 Μέθοδοι του Topology Optimization.

A. Evolutionary Based Algorithms

Η παραδοσιακή προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας με εξελικτικούς αλγορίθμους (EA) είναι η διακριτοποίηση του πεδίου σε ένα ορθογώνιο πλέγμα τετραγωνικών πεπερασμένων στοιχείων για το δισδιάστατο πρόβλημα ή εξαεδρικών στοιχείων για το τρισδιάστατο πρόβλημα. Σε κάθε στοιχείο αυτού του πλέγματος αποδίδεται μια δυαδική τιμή, 1 για την περίπτωση που το στοιχείο είναι γεμάτο με υλικό (μαύρο τετράγωνο) και 0 για την περίπτωση που το στοιχείο αντιπροσωπεύει μια οπή (λευκό τετράγωνο).

Επειδή οι εξελικτικοί αλγόριθμοι βασίζονται σε πληθυσμούς και ο αριθμός των ατόμων που αποτελούν τον πληθυσμό πρέπει να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τον αριθμό των παραμέτρων βελτιστοποίησης (αριθμός στοιχείων του πλέγματος) για να συγκλίνει ο αλγόριθμος, η εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων είναι εξαιρετικά δαπανηρή υπολογιστικά, ιδίως για προβλήματα με αριθμό στοιχείων της τάξης των $10^4 - 10^6$. Στην περίπτωση τρισδιάστατων πεδίων το πρόβλημα χρειάζεται δεκάδες ή εκατοντάδες χιλιάδες αξιολογήσεις συναρτήσεων καταλληλότητας, δηλαδή τόσες προσομοιώσεις FEA, καθιστώντας την άμεση προσέγγιση EA αδύνατη.

Για να μειωθεί ο αριθμός των αξιολογήσεων καταλληλότητας, προτείνεται η δημιουργία της βέλτιστης λύσης σε μια σειρά βημάτων, το καθένα με ένα ολοένα και πιο εκλεπτυσμένο πλέγμα και ολοένα και μεγαλύτερο χρωμόσωμα. Κάθε βήμα ξεκινά από το καλύτερο αποτέλεσμα του προηγούμενου βήματος και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί μια επαρκώς εκλεπτυσμένη λύση. Η προσέγγιση αυτή καταφέρνει να μειώσει σημαντικά τον αριθμό των προσομοιώσεων FEA.

Λόγω της διακριτής αναπαράστασης του τομέα και του στοχαστικού χαρακτήρα των εξελικτικών αλγορίθμων, η εφαρμογή τους στη βελτιστοποίηση τοπολογίας οδηγεί σε προβλήματα συνδεσιμότητας δομών. Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, έχουν προταθεί πολλές λύσεις, μεταξύ των οποίων: εκκίνηση από στοιχεία σπόρου (σημεία εφαρμογής δύναμης, στηρίξεις) και θεωρώντας ως γεμάτα με υλικό μόνο τα στοιχεία που συνδέονται με αυτά,

χρησιμοποιώντας μια μάσκα χρωμοσώματος για το φιλτράρισμα των μη συνδεδεμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο βασισμένο στη συμμόρφωση των στοιχείων, δυναμική τιμωρία των μη συνδεδεμένων στοιχείων και επεξεργασία εικόνας κ.λπ. Όλες αυτές οι τεχνικές είναι ειδικά αποτελεσματικές για επίπεδες κατασκευές, στην τρισδιάστατη περίπτωση το πρόβλημα γίνεται πιο πολύπλοκο και τα ζητήματα ασυνέχειας ενισχύονται (Razvan CAZACU, Lucian GRAMA, 2014).

B. Solid Isotropic Microstructure with Penalization

Η πιο δημοφιλής σήμερα αριθμητική τοπολογία με βάση τη βελτιστοποίηση πεπερασμένων στοιχείων είναι η μέθοδος SIMP. Επίσης αποκαλείται "παρεμβολή υλικού", "τεχνητό υλικό", "νόμος ισχύος", ή μέθοδος "πυκνότητας", αλλά ο όρος "SIMP" χρησιμοποιείται πλέον αρκετά καθολικά. Ο όρος "SIMP" σημαίνει Solid Isotropic Microstructure (or Material) with Penalization for intermediate densities.

Σε πρακτικά προβλήματα βελτιστοποίησης τοπολογίας τύπου ISE (Isotropic Solid or Empty), εμείς συνήθως έχουμε πολύ μεγάλο αριθμό αρχικών στοιχείων. Λόγω του μεγέθους αυτού του προβλήματος διακριτών τιμών (0-1), οι μέθοδοι άμεσης αναζήτησης θα ήταν απαγορευτικά δαπανηρές, και επομένως είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται μια συνεχής μεταβλητή διατύπωση. Εξετάζοντας, για παράδειγμα, τη βελτιστοποίηση τοπολογίας μιας διάτρητης πλάκας σε επίπεδη τάση, μπορεί να συμβολιστεί το πάχος της πλάκας με ρ , το οποίο θα μπορούσε επίσης να αντιπροσωπεύει την πυκνότητα. Εάν βελτιστοποιήσουμε μια πλάκα μεταβλητού πάχους με περιορισμούς για τη συμμόρφωση ή τη μετατόπιση, για παράδειγμα, τη κανονικοποιημένη δυσκαμψία (s) πλάκας πάχους (ρ) η σχέση γίνεται $\rho = s$. Το πάχος της πλάκας κανονικοποιείται (κλιμακώνεται) διαιρώντας με το πραγματικό πάχος της πλάκας $\bar{\rho}$ με το προβλεπόμενο μέγιστο πάχος της πλάκας (ρ_0), δίνοντας $\rho = \bar{\rho} / \rho_0$. Ομοίως, η κανονικοποιημένη δυσκαμψία ισούται με την πραγματική δυσκαμψία διαιρούμενη με τη δυσκαμψία που αντιστοιχεί στο προβλεπόμενο μέγιστο πάχος. Στη συνέχεια, κενά (λευκά) και συμπαγή (μαύρα) στοιχεία, αντίστοιχα, θα έχουν $\rho=0$ και $\rho=1$.

Ωστόσο, οι βέλτιστες λύσεις με βάση τη σχέση $\rho = s$ για προβλήματα συμμόρφωσης ή μετατόπισης θα αποτελούνταν κυρίως από "γκρίζα" στοιχεία με $0 < \rho < 1$. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα θα απείχε πολύ από μια λύση (0-1) που απαιτείται στη βελτιστοποίηση τοπολογίας και, επομένως, δεν θα βοηθούσε πολύ στην εξεταζόμενη κατηγορία προβλημάτων. Σχεδόν "ασπρόμαυρες" τοπολογίες μπορούν να ληφθούν, ωστόσο, αν 'τιμωρηθούν' τα γκριζα στοιχεία που έχουν "ενδιάμεσες" πυκνότητες $0 < \rho < 1$. Για το σκοπό αυτό, διάφορες συναρτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά μία από τις απλούστερες είναι λεγόμενη ως νόμος δύναμης και γράφεται ως εξής: $\rho = s^{1/p}$ ($p > 1$) (Rozvany, 2007).

C. Evolutionary Structural Optimization (ESO) methods

Οι μέθοδοι της οικογένειας ESO είναι παρόμοιες με τις μεθόδους SIMP στο ότι εργάζονται με ένα διακριτό χώρο σχεδιασμού, αλλά είναι μέθοδοι "σκληρού σκοτωμού" ("hard-kill" methods), που σημαίνει ότι κάθε στοιχείο του χώρου έχει πυκνότητα είτε 0 (που αντιστοιχεί σε τρύπα) είτε 1 (που αντιστοιχεί σε υλικό). Η πρώτη ESO προτάθηκε με τη βελτιστοποίηση να ξεκινά με ολόκληρο το χώρο σχεδιασμού γεμάτο με υλικό και στη συνέχεια να εξαλείφει επαναληπτικά τα μη αποδοτικά στοιχεία.

Στη συνέχεια, στην AESO ("additive evolutionary structural optimization"), το μοντέλο ξεκινά από μια δομή που συνδέει τα σημεία εκκίνησης (φορτίο και στηρίξεις) με ελάχιστο αριθμό στοιχείων και νέα στοιχεία προστίθενται επαναληπτικά γύρω από τα στοιχεία με υψηλή ευαισθησία. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί τόσο της ESO όσο και της AESO, εισήχθη ένας συνδυασμός των δύο και ονομάστηκε BESO ("αμφίδρομη εξελικτική δομική βελτιστοποίηση"). Όπως υποδηλώνει το όνομα, η μέθοδος αυτή εξαλείφει τα μη αποδοτικά στοιχεία, ενώ ταυτόχρονα προσθέτει νέα όπου χρειάζεται. Η αρχική BESO τροποποιήθηκε και βελτιώθηκε αργότερα ώστε να επιτρέπει την εξέταση τρισδιάστατων περιοχών και πολλαπλών περιπτώσεων φόρτισης.

Παράλληλα, ένα φίλτρο ανεξαρτησίας πλέγματος (mesh-independency filter) BESO λειτουργεί παρόμοια με αυτό που χρησιμοποιείται στη μέθοδο SIMP για την αποφυγή αριθμητικών ασταθειών, όπως η σκακιέρα και η εξάρτηση από το πλέγμα. Πρώτον, οι αριθμοί ευαισθησίας των κόμβων (a_i^n) οι οποίοι δεν φέρουν καμία φυσική σημασία από μόνοι τους, ορίζονται με τον μέσο όρο των αριθμών ευαισθησίας των συνδεδεμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, αυτοί οι αριθμοί ευαισθησίας κόμβων πρέπει να μετατραπούν πάλι σε στοιχεία πριν από τον προσδιορισμό της τοπολογίας. Για την εκτέλεση αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιείται ένα μοτίβο φιλτραρίσματος. Οι καθορισμένες διαδικασίες φιλτραρίσματος βασίζονται σε μια κλίμακα μήκους r_{min} . Ο πρωταρχικός ρόλος της παραμέτρου κλίμακας r_{min} στο σύστημα φίλτρων είναι να προσδιορίζει τους κόμβους που επηρεάζουν την ευαισθησία του i -οστού στοιχείου (Xiaodong Huang, Yi-Min Xie, 2010).

D. Soft-Kill Option (SKO)

Όπως υποδηλώνει το όνομα, η SKO είναι μια μέθοδος soft-kill, που χρησιμοποιεί ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και επιτρέπει στα στοιχεία του πλέγματος να έχουν κλασματικές ιδιότητες υλικών, όπως ακριβώς και η μέθοδος SIMP. Ωστόσο, μοιάζει επίσης με την τεχνική BESO, καθώς προσθέτει και αφαιρεί επαναληπτικά στοιχεία στο μοντέλο με βάση την κατάσταση των τάσεων τους. Μια άλλη διαφορά από τη SIMP είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιεί κλασματικές ελαστικές ιδιότητες για να αναπαραστήσει πόσο υλικό απαιτείται στα στοιχεία του πλέγματος, αντί για κλασματικές πυκνότητες. Ως εκ τούτου, σε κάθε στοιχείο αποδίδεται ένα μέτρο ελαστικότητας Young E στο διάστημα $[E_{min} - E_{max}]$, ανάλογα με τη θερμοκρασία του, η οποία μπορεί να είναι μια τιμή στο διάστημα $[0 - 100]$ και υπολογίζεται ως συνάρτηση της εντατικής

κατάστασης του στοιχείου. Η θερμοκρασία δεν έχει φυσική σημασία, είναι απλώς ένας βολικός τρόπος για την κλιμάκωση των ιδιοτήτων των υλικών στα εμπορικά προγράμματα FEA.

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό της SKO είναι η χρήση των τάσεων ως στόχους βελτιστοποίησης. Στόχος της μεθόδου είναι η εύρεση εκείνης της γεωμετρίας που δίνει ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων, με στόχο ένα σύνολο τάσεων αναφοράς σ_{ref} . Για να επιτευχθεί αυτό, σε κάθε κόμβο του πλέγματος αποδίδεται μια θερμοκρασία σε αυτόν $T_k^{(i)}$, η οποία αξιολογείται σε κάθε επανάληψη i ως συνάρτηση των τιμών της προηγούμενης επανάληψης $T_k^{(i-1)}$ και τη διαφορά μεταξύ της κύριας τάσης Von Mises στο σημείο αυτό και της τάσης αναφοράς, κλιμακούμενη με συντελεστή s : $T_k^{(i)} = T_k^{(i-1)} + s(\sigma_k - \sigma_{ref})$.

Η σχέση αυτή καθορίζει την τάση κάθε στοιχείου του μοντέλου να εξελίσσεται προς την τάση αναφοράς, με ταχύτητα ανάλογη της διαφοράς μεταξύ της τρέχουσας τάσης και της τάσης αναφοράς. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια δομή με ομοιόμορφη κατανομή τάσεων. Η SKO μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη και τους τεχνολογικούς περιορισμούς (Razvan CAZACU, Lucian GRAMA, 2014).

E. Level-set Methods

Η βασική ιδέα πίσω από τις μεθόδους συνόλων επιπέδων είναι η αναπαράσταση του όγκου της δομής μέσω μιας βοηθητικής συνεχούς συνάρτησης (F), με τον αριθμό των μεταβλητών να ισούται με τον αριθμό των χωρικών διαστάσεων (n). Ο στόχος βελτιστοποίησης γίνεται η ίδια η συνάρτηση, αντί για τον πραγματικό όγκο του σχεδιασμού. Η παραμετροποίηση μιας συνεχούς συνάρτησης αντί για έναν αυθαίρετο τομέα εξαλείφει τις παραδοσιακές δυσκολίες της ΤΟ όσον αφορά τη συνέχεια του υλικού. Οι μη εφικτές λύσεις εξακολουθούν να είναι δυνατές, με το σχηματισμό συνεχούς μη συνδεδεμένης περιοχής, αλλά οι καταστάσεις αυτές είναι πολύ πιο εύκολο να αντιμετωπιστούν. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με παραμετροποίηση και μεταβολή των παραμέτρων της βοηθητικής συνάρτησης και με γεωμετρική ερμηνεία των τιμών της. Αυτό γίνεται θεωρώντας το εξωτερικό όριο της δομής ως το συνεχές σύνολο σημείων για τα οποία η συνάρτηση είναι μηδενική, σύνολο που μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση Γ με $n - 1$ μεταβλητές. Στην τρισδιάστατη περίπτωση, Γ είναι η χωρική επιφάνεια: $\Gamma = \{(x, y, z) \mid F(x, y, z) = 0\}$.

Η επιφάνεια Γ οριοθετεί τον όγκο για τον οποίο η F είναι θετική, που αντιστοιχεί στον πραγματικό όγκο του τεμαχίου. Έξω από αυτήν, η F είναι αρνητική, που αντιστοιχεί στις εσωτερικές και εξωτερικές ζώνες χωρίς υλικό. Όπως στην πλειονότητα των μεθόδων ΤΟ, είναι βολικό να αναπαραστήσουμε το πρόβλημα ως πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο i θεωρείται πλήρες (έχει υλικό) εάν η F είναι θετική στο κέντρο βάρους του: $F(x_i, y_i, z_i)$

Συγκεφαλαιώνοντας τις μεθόδους, προκύπτει ότι η TO είναι ίσως ο σημαντικότερος τύπος Structural Optimization. Η χρήση της είναι ζωτικής σημασίας για να δώσει στους σχεδιαστές μια αρχική διάταξη της δομής, βελτιστοποιημένη σε σχέση με τις λειτουργικές και τεχνολογικές προδιαγραφές. Η πιο δημοφιλής μέθοδος, τόσο όσον αφορά την ερευνητική προσπάθεια όσο και την εφαρμογή σε εμπορικό λογισμικό, είναι η μέθοδος SIMP. Η BESO είναι μια άλλη αγαπημένη μέθοδος των ερευνητών, η οποία χρησιμοποιείται σε πολλές εργασίες, αλλά λιγότερο σε πραγματικές εμπορικές εφαρμογές. Ωστόσο, η BESO έχει μεγάλες δυνατότητες, ιδίως αν ληφθούν υπόψη οι τελευταίες βελτιώσεις, ιδίως όταν συνδυάζεται με άλλες τεχνικές όπως των γενετικών αλγορίθμων. Ένα ζήτημα που πρέπει ακόμη να αντιμετωπιστεί είναι η συμπερίληψη των τεχνολογικών περιορισμών στις μεθόδους BESO.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, που κάποτε δημιουργούσαν μεγάλες δυσκολίες στη TO, έχουν πρόσφατα κερδίσει κάποιο έδαφος σε συνδυασμό με λογισμικό CAD και με μορφολογική αναπαράσταση της γεωμετρίας αντί για την παραγωγή μίας διακριτής. Η προσέγγιση αυτή εξαλείφει τα περισσότερα από τα κλασικά μειονεκτήματα των EA που εφαρμόζονται στην TO.

Η SKO είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα μέθοδος, με προφανή πλεονεκτήματα. Ξεχωρίζει ως μία από τις λίγες μεθόδους που στοχεύει στις τάσεις στο εσωτερικό της δομής ως αντικειμενική συνάρτηση. Στον αντίποδα βρίσκονται οι μέθοδοι level-set, οι οποίες αντιπροσωπεύουν ένα νέο σύνολο τεχνικών TO με μεγάλες υποσχέσεις, αλλά εξακολουθούν να στερούνται βάθους, γενικότητας και ευελιξίας (Razvan CAZACU, Lucian GRAMA, 2014).

2.3.4 Πρακτικές δυσκολίες του Topology Optimization σε AM.

Συνήθως, οι μέθοδοι TO χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση πρακτικών προβλημάτων σχεδιασμού με γνώμονα τις παραδοσιακές διαδικασίες κατασκευής, όπως η χύτευση και η κατεργασία (casting and machining). Οι διεργασίες όπου το τεμάχιο παράγεται με αφαίρεση υλικού μπορούν να περιγραφούν ως αφαιρετικές διεργασίες και οι διεργασίες όπου το τεμάχιο παράγεται με καλούπι μπορούν να περιγραφούν ως διαμορφωτικές διεργασίες. Αυτές οι προσεγγίσεις έχουν σημαντικούς κατασκευαστικούς περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το στάδιο του σχεδιασμού για να εξασφαλιστεί ένας εφικτός σχεδιασμός. Για παράδειγμα, η ανάγκη πρόσβασης στο εργαλείο στην περίπτωση της μηχανικής κατεργασίας ή η ανάγκη αφαίρεσης του τεμαχίου από ένα καλούπι στην περίπτωση της χύτευσης ή της μορφοποίησης. Αυτοί οι περιορισμοί, περιορίζουν τη φυσική υλοποίηση της βέλτιστης τοπολογίας και πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ βελτιστοποίησης και της ευκολίας κατασκευής. Συνήθως αυτοί οι περιορισμοί είτε περιλαμβάνονται στην πραγματική βελτιστοποίηση περιορίζοντας την τοπολογία σε εφικτά σχέδια, είτε με μεταγενέστερη απλούστευση της βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Το πρώτο από αυτά είναι συνήθως προτιμότερο, αλλά δεν μπορούν όλοι οι περιορισμοί να συμπεριληφθούν εύκολα στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η AM διαφέρει από τις δύο προαναφερθείσες ταξινομήσεις διεργασιών στο ότι το εξάρτημα κατασκευάζεται στρώμα προς στρώμα (layer by layer). Η AM αποτελεί εξέλιξη της ταχείας πρωτοτυποποίησης (RP) (Rapid Prototyping) και αποσκοπεί στην παραγωγή εξαρτημάτων τελικής χρήσης και όχι πρωτοτύπων. Για το σκοπό αυτό, τα τελευταία χρόνια έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για την επεξεργασία μετάλλων εκτός από τα πολυμερή, και υπάρχουν πλέον αρκετές εμπορικές διεργασίες μετάλλων ικανές να παράγουν εξαρτήματα τελικής χρήσης. Όπως και η RP, η AM απαιτεί συνήθως ένα τρισδιάστατο μοντέλο σχεδιασμού (CAD) του εξαρτήματος.

Λόγω αυτής της προσέγγισης κατασκευής σε στρώματα, μπορούν να παραχθούν εξαρτήματα σημαντικά μεγαλύτερης πολυπλοκότητας σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διεργασίες και αυτή η αυξημένη πολυπλοκότητα δεν επηρεάζει γενικά σημαντικά το κόστος της διεργασίας. Αυτό παρέχει στον σχεδιαστή σημαντικά μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού και επιτρέπει στο κατασκευασμένο εξάρτημα να είναι πιο κοντά στον βέλτιστο σχεδιασμό από ό,τι είναι δυνατό με τις παραδοσιακές διαδικασίες. Παρόλα αυτά, αντιμετωπίζει κάποιες αδιαμφησβήτητες δυσκολίες όταν συνδυάζεται με το TO.

A. Ανάλυση πλέγματος (Mesh Resolution).

Η TO αποτελεί μια ισχυρή προσέγγιση για τον προσδιορισμό της καλύτερης κατανομής του υλικού σε έναν καθορισμένο τομέα σχεδιασμού παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες και εμπόδια όσον αφορά την ανάλυση του πλέγματος. Αναλυτικότερα, αποτελεί μία πολύπλοκη διαδικασία και λόγω κατασκευαστικών περιορισμών συνήθως απαιτείται είτε απλοποίηση μετά τη βελτιστοποίηση είτε περιορισμός του χώρου σχεδιασμού ώστε να επιτρέπονται μόνο κατασκευάσιμα σχέδια. Η AM επιτρέπει την κατασκευή της τοπολογίας ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα και το κόστος παραγωγής δεν αυξάνεται συνήθως με την πολυπλοκότητα. Στην πραγματικότητα, μερικές φορές το κόστος μπορεί να μειωθεί με την αύξηση της πολυπλοκότητας λόγω της μειωμένης απαίτησης δομής στήριξης (Support Structure). Ο βέλτιστος σχεδιασμός δυσκαμψίας ευνοεί την πολύ λεπτή μικροδομή, η οποία είναι εγγενώς πολύ πολύπλοκη. Ανάλογα με την κλίμακα του σχεδιαζόμενου εξαρτήματος, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το πιο κατάλληλο μέγεθος πλέγματος εκ των προτέρων για την επίτευξη αυτής της δομής εντός των κατασκευαστικών ορίων. Όταν χρησιμοποιούνται παραδοσιακοί τρόποι κατασκευής, η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα των κατασκευών είναι και πιο δαπανηρή γι' αυτό και συνήθως αποφεύγεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή μη βέλτιστων εξαρτημάτων. Με την AM, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής πολύ πολύπλοκων τοπολογιών και επομένως δεν υπάρχει λόγος να απαγορεύεται η δημιουργία αυτής της πολυπλοκότητας.

Αυτό οδηγεί σε ορισμένες πρακτικές δυσκολίες κατά την εφαρμογή της TO για AM. Πρώτον, η βέλτιστη τοπολογία μπορεί να προσδιοριστεί μόνο εάν το πλέγμα επιτρέπει την αναπαράστασή της. Είναι γνωστό ότι καθώς το πλέγμα τελειοποιείται, αναδύονται περισσότερες λεπτομέρειες και βελτιώνεται η βέλτιστη τοπολογία. Για τη TO, είναι σύνηθες για κάθε πεπερασμένο στοιχείο με την περιοχή σχεδιασμού να ορίζεται ως μεταβλητή σχεδιασμού, επιτρέποντας τη μεταβολή της πυκνότητας (ομογενοποίηση, SIMP) ή του κενού-στερεού (BESO). Κάθε μέλος της δομής

πρέπει να έχει τουλάχιστον 2-3 πεπερασμένα στοιχεία σε όλο το πάχος του, ώστε να εξασφαλίζεται ο ακριβής υπολογισμός της μετατόπισης και αυτό έχει επιπτώσεις στον συνολικό αριθμό των μεταβλητών σχεδιασμού στο μοντέλο.

B. Περιορισμοί της παραγωγικής διαδικασίας.

Παράλληλα, παρουσιάζονται διάφορες δυσκολίες λόγω της ύπαρξης περιορισμών από την παραγωγική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, παρόλο που οι κατασκευαστικοί περιορισμοί για την AM είναι πολύ λιγότερο σημαντικοί από αυτούς των παραδοσιακών κατασκευαστικών τρόπων, εξακολουθούν να υπάρχουν κάποιοι που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Πολλοί από τους περιορισμούς της AM θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν καλύτερα ως κατασκευαστικοί προβληματισμοί, καθώς δεν περιορίζουν απαραίτητα το σχεδιασμό. Η ανάγκη για δομές κριωμάτων για τη στήριξη μεγάλων προεξοχών εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διαδικασία AM που χρησιμοποιείται, καθώς ορισμένες δεν απαιτούν καθόλου δομές στήριξης. Μέχρι ενός σημείου, οι διεργασίες που απαιτούν στηρίγματα, μπορούν να αυτοϋποστηρίζονται εφόσον η προεξοχή είναι πάνω από μια συγκεκριμένη γωνία ως προς την οριζόντια. Σε ορισμένες από τις μεταλλικές διεργασίες, όπως η SLM, οι δομές απαιτούνται κυρίως για να περιορίσουν την καμπύλωση/στρέβλωση της λιωμένης σκόνης λόγω των υψηλών κλίσεων θερμοκρασίας, παρά για να παρέχουν μηχανική στήριξη. Η ανάγκη για δομές στήριξης εξαρτάται επίσης από τη γεωμετρία και συχνά εξετάζεται το ενδεχόμενο να τροποποιηθεί ο σχεδιασμός ώστε να μην υπάρχει ανάγκη για επιπλέον στήριξη. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού είναι η μείωση της απαίτησης μεταγενέστερης επεξεργασίας για την αφαίρεση των δομών στήριξης από το σχεδιασμένο εξάρτημα, η οποία είναι συνήθως μια χειρωνακτική εργασία, ενώ η πιθανή μείωση της χρήσης υλικών είναι επίσης ένα πλεονέκτημα. Ορισμένες διεργασίες, όπως η FDM, διαθέτουν υδατοδιαλυτά στηρίγματα που μειώνουν σημαντικά την επιβάρυνση μετά την επεξεργασία. Άλλοι κατασκευαστικοί περιορισμοί είναι η ακρίβεια κατασκευής, το φινίρισμα της επιφάνειας και οι μηχανικές ιδιότητες της διεύθυνσης z, αλλά αυτές έχουν μικρότερη σημασία για την τοπολογία του εξαρτήματος.

Ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτήματος, η εξοικονόμηση βάρους μπορεί να είναι ο πρωταρχικός στόχος και όχι η μείωση του κόστους κατασκευής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, δεν θα ήταν λογικό να αυξηθεί το βάρος του εξαρτήματος και κατ' επέκταση να μειωθεί η ανάγκη στηρίξεων, για να μειωθεί το κόστος κατασκευής. Για εφαρμογές όπου το κόστος κατασκευής είναι πιο σημαντικό, τότε αυτό θα μπορούσε να είναι χρήσιμο.

C. Διαχείριση του μοντέλου κατόπιν της βελτιστοποίησης.

Λόγω της επιθυμητής πολυπλοκότητας της προκύπτουσας τοπολογίας, προκύπτουν σε τρίτο στάδιο κάποιες πρακτικές δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν μετά το στάδιο της βελτιστοποίησης. Οι δυσκολίες αυτές συναντιούνται συνήθως όταν χρησιμοποιούνται παραδοσιακές διαδικασίες κατασκευής που απαιτούν απλούστερη τοπολογία, αλλά επιδεινώνονται με την AM. Μετά το στάδιο TO, είναι σύνηθες να εξομαλύνεται η τοπολογία για να μειωθούν οι επιδράσεις των ορίων των στοιχείων και να μετατραπεί το αποτέλεσμα σε μία

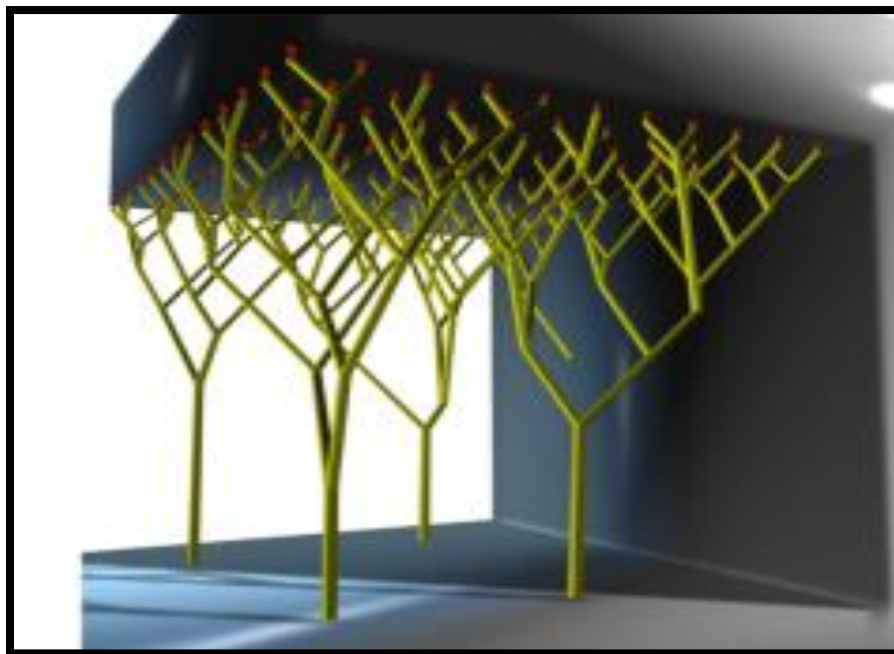
μαθηματική αναπαράσταση CAD. Αυτό το στάδιο πρέπει συνήθως να γίνεται χειροκίνητα από τον σχεδιαστή είτε με "ιχνηλάτηση" του αποτελέσματος της βελτιστοποίησης είτε με χρήση κάποιας μορφής αναγνώρισης χαρακτηριστικών, η οποία είναι εφικτή μόνο για απλές τοπολογίες. Συχνά, η τοπολογία απλοποιείται σε αυτό το στάδιο ώστε η μετατροπή αυτή να είναι πιο απλή ή με γνώμονα τους κατασκευαστικούς περιορισμούς. Λόγω του υψηλού βαθμού τοπολογικής πολυπλοκότητας κατά τη βελτιστοποίηση για AM, η χειροκίνητη μετατροπή σε CAD είναι παράλογη και οι τρέχουσες αυτόματες μέθοδοι μετατροπής δεν έχουν σχεδιαστεί για να χειριστούν αυτό το επίπεδο πολυπλοκότητας (D. Brackett, I. Ashcroft, R. Hague, 2011).

2.3.5 Προοπτικές εξέλιξης του Topology Optimization σε AM.

Έπειτα από εκτενή αναφορά στις δυσκολίες που παρουσιάζει το TO σε AM, κρίνεται απαραίτητη η ανάλυση προοπτικών και διορθωτικών κινήσεων που θα καταφέρουν να κάνουν ευκολότερο το "πάντρεμα" των δύο τεχνολογιών. Θα γίνει αναφορά, στις λύσεις που προτείνονται για τις δομές στήριξης (Support Structures), καθώς και για την πλήρωση (Infill).

A. Λέπτυνση των δομών στήριξης.

Μέχρι στιγμής, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα δομικά πρότυπα για να μειωθούν οι της στήριξης, συμπεριλαμβανομένης της δομής με κεκλιμένο τοίχο, τη δένδροειδή δομή, ικρίωμα που μοιάζει με γέφυρα και επαναλαμβανόμενες κυψελοειδείς δομές, οι οποίες σχηματίζουν ελαφριά στήριξη που υπόκειται στην καλά καθορισμένη γεωμετρία του τεμαχίου και την



Εικόνα 12: Δένδροειδής δομή στήριξης, (Jikai Liu¹ & Andrew T. Gaynor² & Shikui Chen³ & Zhan Kang⁴ & Krishnan Suresh⁵ & Akihiro Takezawa⁶ & Lei Li⁷ &, 2018)

κατεύθυνση κατασκευής. Ακόμα, αναπτύχθηκε μια μέθοδος αδυνατίσματος στήριξης βασισμένη στη βελτιστοποίηση σχήματος, η οποία αδυνατίζει τη στήριξη μεταβάλλοντας το σχήμα του τεμαχίου. Η βελτιστοποίηση της κατεύθυνσης κατασκευής θα μειώνει επίσης αποτελεσματικά την κατανάλωση υλικού στήριξης.

Μια άλλη προοπτική που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι ελάφρυνση δομής στήριξης έχει επιτευχθεί μέσω διαφορετικών προσεγγίσεων- ωστόσο, λίγη προσοχή έχει δοθεί στην θερμομηχανική απόδοση, η οποία μπορεί να προκαλέσει αποτυχία. Ειδικά για την εκτύπωση μετάλλων που εμπλέκεται μια πηγή θερμότητας, όπου η θερμική παραμένουσα τάση μπορεί να οδηγήσει σε ρηγμάτωση της στήριξης ή στον διαχωρισμό (Delamination) από το υπόστρωμα εκτύπωσης. Επομένως, κρίνεται λογική η ΤΟ όσον αφορά τις δομές στήριξης με γνώμονα θερμομηχανικούς περιορισμούς, ενώ η κύρια πρόκληση είναι η ανάπτυξη μιας υπολογιστικά αποδοτικής τεχνικής θερμομηχανικής προσομοίωσης. Τα τρέχοντα εμπορικά διαθέσιμα εργαλεία λογισμικού από AutoDesk Netfabb, Simulia Abaqus της Dassault Systemes, MSC Simufact, και άλλα προσφέρουν εργαλεία για την προσομοίωση των θερμο-μηχανικά καθοδηγούμενων διαδικασιών κατασκευής, αλλά απαιτούν πολλούς πόρους υπολογιστικά μιλώντας.

B. Εξάλειψη της ανάγκης των δομών στήριξης.

Με γνώμονα αυτή τη λύση, κρίνεται σκόπιμο όλες οι γωνίες προεξοχών (Overhang Angles) να είναι μεγαλύτερες από την ελάχιστη αυτό-υποστηριζόμενη γωνία. Ένας απλός τρόπος για να επιτευχθεί ο σχεδιασμός χωρίς προεξοχές είναι μέσω της μετεπεξεργασίας- π.χ., προσθέτοντας υλικά στο αποτέλεσμα της ΤΟ στο CAD, ώστε να μην υπάρχουν γωνίες που να παραβιάζουν τον παραπάνω κανόνα. Σίγουρα με αυτό τον τρόπο δεν επιτυγχάνεται η βέλτιστη τοπολογία, ωστόσο εκμηδενίζεται η ανάγκη για Support Structures. Ένας πιο αυστηρός τρόπος για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι με την προσαρμογή της φόρμουλας της βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η επαναληπτική γραμικοποίηση των δομικών ορίων, να μετρούνται τα μήκη και οι προσανατολισμοί, και να “τιμωρούνται” τα τμήματα που χρειάζονται στήριξη.

Άλλος τρόπος, προτείνει ένα φίλτρο πυκνότητας το οποίο επιτυγχάνει αποτέλεσμα χωρίς προεξοχές. Ένας περιορισμός της μεθόδου που βασίζεται στο φίλτρο πυκνότητας είναι ότι το επιπλέον στρώμα προβολής αυξάνει το κόστος υπολογιστικών πόρων.

Παράλληλα, έχουν χρησιμοποιηθεί οι κλίσεις πυκνότητας ώστε να εκπληρώνεται το κριτήριο έλλειψης προεξοχών, ενώ με την βοήθεια της μεθόδου Heaviside, τέθηκε σαν περιορισμός στο πρόγραμμα.

Άλλος τρόπος ανέπτυξε μια προσέγγιση δύο βημάτων για τη βελτίωση της δυνατότητας εκτύπωσης: πρώτα βελτιστοποιώντας μια διακριτή δικτυωτή βάση για την αντιμετώπιση της απαίτησης αυτό-υποστήριξης και στη συνέχεια εκτέλεση της βελτιστοποίησης της συνεχούς

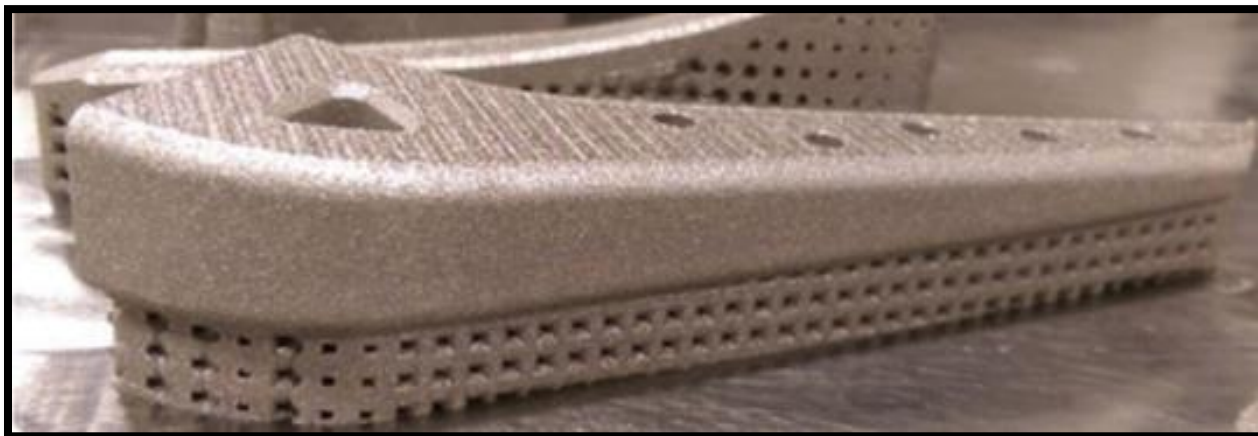
τοπολογίας με το διακριτό σχεδιασμό ως αφητηρία. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η προφανώς βελτιωμένη ικανότητα εκτύπωσης χωρίς σημαντική αλλαγή στον συνεχή αλγόριθμο ΤΟ.

C. Βελτιστοποίηση της πλήρωσης.

Λόγω της διαδικασίας κατασκευής σε στρώσεις, δεν είναι απαραίτητη η στερεή πλήρωση (100%) κατά το σχεδιασμό μηχανικών στοιχείων- αντίθετα, η πορώδης πλήρωση μπορεί να αποτελέσει μια καλή εναλλακτική λύση, καθώς παρουσιάζει βασικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την υψηλή αντοχή σε σχέση με τη σχετικά χαμηλή μάζα, την καλή απορρόφηση ενέργειας και την υψηλή θερμική και ηχητική μόνωση σε σύγκριση με το αντίστοιχο στερεό υλικό. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί διαφοροποιημένες μέθοδοι για τη ΤΟ της πορώδους.

Μια απλή προσέγγιση είναι η χρήση μοντέλου δικτυώματος για την εκτέλεση της πλήρωσης. Οι διάμετροι και οι κομβικές θέσεις των υποστυλωμάτων μπορούν να βελτιστοποιηθούν αποτελεσματικά με διακριτές μεθόδους ΤΟ. Επιπλέον, η μέθοδος των κύριων τάσεων και η μέθοδος του κινούμενου μορφοποιήσιμου στοιχείου (MMC), οι οποίες προήλθαν από τις συμβατικές συνεχείς ΤΟ, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν για τον σχεδιασμό ενός παρόμοιου τύπου πορώδους πλήρωσης.

Μια εναλλακτική λύση είναι μια τοιχοειδής πλήρωση, όπως οι κυψέλες και οι εσωτερικές δομές με μοτίβο πλέγματος. Για την υλοποίηση της ΤΟ της τοιχοειδούς πλήρωσης, απαιτείται βελτιστοποίηση τοπολογίας υψηλής ανάλυσης για τη δημιουργία των πολυάριθμων τοπικών λεπτομερειών. Αναπτύχθηκε μια μέθοδος βελτιστοποίησης πλήρωσης χωρίς προεξοχές, η οποία γέμισε προσαρμοστικά το εσωτερικό του τεμαχίου με αυτό-υποστηριζόμενα ρομβοειδή κελιά που υπόκεινται στα κριτήρια δυσκαμψίας και ευστάθειας μέσω υπολογισμού υψηλής ανάλυσης (Jikai Liu¹ & Andrew T. Gaynor² & Shikui Chen³ & Zhan Kang⁴ & Krishnan Suresh⁵ & Akihiro Takezawa⁶ & Lei Li⁷ &, 2018).



Εικόνα 13: Βελτιστοποιημένη δομή στήριξης, (Jikai Liu¹ & Andrew T. Gaynor² & Shikui Chen³ & Zhan Kang⁴ & Krishnan Suresh⁵ & Akihiro Takezawa⁶ & Lei Li⁷ &, 2018)

2.3.6 Εφαρμογές του Topology Optimization σε AM.

Το TO και η AM υιοθετήθηκαν για την ανάπτυξη μιας βάσης στήριξης καλωδίων στην μπροστινή δοκό του κατακόρυφου σταθεροποιητή ενός **Airbus A350 XWB (Cable mount on the front spar of the vertical stabilizer)**. Σε σύγκριση με το συμβατικά παραγόμενο εξάρτημα που αποτελείται από περισσότερα από 30 επιμέρους μέρη, αυτή η ολοκληρωμένη λύση που αποτελείται απλώς από ένα μόνο μέρος όχι μόνο πραγματοποίησε 30% μείωση του βάρους, αλλά και μείωσε σημαντικά τους χρόνους κατασκευής και εγκατάστασης.



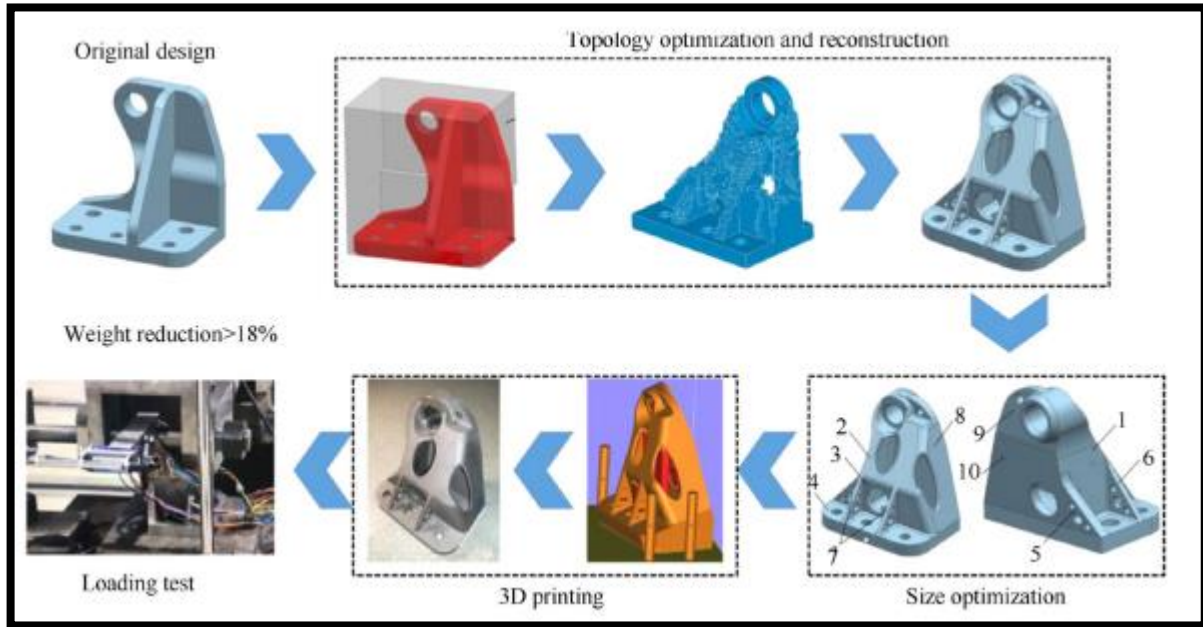
Εικόνα 14: Airbus A350 XWB (Cable mount on the front spar of the vertical stabilizer). (Jihong ZHU, Han ZHOU, Chuang WANG, Lu ZHOU, Shangqin YUAN, Weihong ZHANG, 2020)

Ο βραχίονας κεραίας (**Antenna Bracket**) για τον δορυφόρο Sentinel της **RUAG** είναι ένα άλλο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα επιτυχημένης εφαρμογής του TO και της AM. Οι ελάχιστες απαιτήσεις ακαμψίας του βελτιστοποιημένου εξαρτήματος υπερκαλύφθηκαν κατά περισσότερο από 30% και το βάρος μειώθηκε στα 940 g από 1,6 kg.



Εικόνα 15: Antenna bracket για τον δορυφόρο Sentinel της RUAG (Jihong ZHU, Han ZHOU, Chuang WANG, Lu ZHOU, Shangqin YUAN, Weihong ZHANG, 2020)

Παράλληλα υιοθετήθηκε η TO και η AM για έναν αεροδιαστημικό βραχίονα (**Aerospace Bracket**) που αναπτύχθηκε από το **NWPU** και το **CASIC**. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από τρία βασικά βήματα, τη TO την ανακατασκευή, τη βελτιστοποίηση μεγέθους και το κατασκευασμένο τμήμα μέσω SLM. Γενικά, η TO χρησιμοποιείται για τον εννοιολογικό σχεδιασμό της δομής, ενώ η διαστασιολόγηση και η βελτιστοποίηση σχήματος χρησιμοποιούνται για τον λεπτομερή σχεδιασμό της δομής (Jihong ZHU, Han ZHOU, Chuang WANG, Lu ZHOU, Shangqin YUAN, Weihong ZHANG, 2020).



Εικόνα 16: Aerospace Bracket της CAISIC και του NWPU. (Jihong ZHU, Han ZHOU, Chuang WANG, Lu ZHOU, Shangqin YUAN, Weihong ZHANG, 2020)

2.4 Σύγκριση του Generative Design και του Topology Optimization.

Λόγω των πολυπληθών εφαρμογών του GD, δεν υπάρχει ακόμα ένας απόλυτος και γενικός ορισμός που μπορεί να εφαρμοστεί, γι' αυτό τον λόγο η διαφορά του με τη TO δεν είναι πάντα ξεκάθαρη. Με μία προσέγγιση, μπορεί να ειπωθεί ότι το GD περιέχει όλη τη σχεδιαστική διαδικασία. Προσομοιάζοντας τις συνθήκες ενός προβλήματος, παράγεται ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο άμεσα. Η TO αποτελεί μία από πολλές κατηγορίες της βελτιστοποίησης της δομής στην οποία μπορεί να κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθούν επιπλέον αλλαγές στο μοντέλο, ώστε αυτό να μπορεί να παραχθεί. Μπορεί δηλαδή να γίνει η προσέγγιση ότι η TO αποτελεί μέρος της όλης διαδικασίας του GD.

Άλλη μία προσέγγιση είναι ότι η διαφοροποίηση του GD και της TO, έγκειται στο γεγονός ότι το GD δεν αποσκοπεί στην εύρεση του απολύτως βελτιστοποιημένου μοντέλου, αλλά δύναται να προτείνει αρκετά σχέδια τα οποία ικανοποιούν μία σειρά κριτηρίων ορισμένα από τον χρήστη, σε μία αυτοματοποιημένη διαδικασία. Αποσκοπεί δηλαδή στην εξερεύνηση πολλών και διαφορετικών αρχικών μοντέλων για να εμπνευστεί ο σχεδιαστής.

2.4.1 Εμβάθυνση στο Topology Optimization.

Για να ξεκαθαριστεί το συγκεκριμένο θέμα, κρίνεται η περαιτέρω ανάλυση της TO. Πιο συγκεκριμένα, η TO είναι μια υπολογιστική μέθοδος σχεδιασμού, η οποία έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της κατανομής του υλικού σε έναν δεδομένο χώρο σχεδιασμού σε σχέση με τα φορτία και τους περιορισμούς, μεγιστοποιώντας παράλληλα την απόδοση του σχεδιασμού. Συνήθως χρησιμοποιείται στην πρώιμη φάση σχεδιασμού για τη διερεύνηση και αξιολόγηση

πολύαριθμων δυνατοτήτων σύμφωνα με τους καθορισμένους στόχους, όπως η ελαχιστοποίηση του βάρους, η μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας, η μείωση των τάσεων, η μείωση της μετατόπισης κ.λπ. Τα εργαλεία βελτιστοποίησης τοπολογίας αναπτύσσονται για να μειώσουν τις προσπάθειες των μηχανικών που απαιτούνται για την εκτέλεση των επαναληπτικών διαδικασιών σχεδιασμού και ανάλυσης πολλαπλών παραλλαγών, καθώς και για να υποστηρίξουν τη δημιουργικότητα προσφέροντας λύσεις που οι μηχανικοί ίσως δεν θα είχαν σκεφτεί.

Αποτελεί μία από τις τρεις κύριες κατηγορίες της δομικής βελτιστοποίησης (Structure Optimization), μαζί με τη βελτιστοποίηση σχήματος (Shape Optimization) και μεγέθους (Size Optimization). Η βελτιστοποίηση σχήματος εξετάζει καθορισμένες παραμέτρους περιγραμμάτων που ορίζονται από τις θέσεις των κόμβων προκειμένου να ικανοποιηθούν καθορισμένα κριτήρια και στόχοι σχεδιασμού (π.χ. μείωση των συγκεντρώσεων τάσεων ή αύξηση της διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης). Η βελτιστοποίηση μεγέθους μεταβάλλει τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού που σχετίζονται με τα εμβαδά διατομής των στοιχείων, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση όσον αφορά το βάρος, τάσεις, μετατοπίσεις κ.λπ. Η τελευταία εφαρμόζεται συχνά σε προβλήματα που αφορούν δομές δικτυωμάτων, ράβδους στήριξης και πλαίσια κατασκευών. Σε αντίθεση με τη ΤΟ, οι μέθοδοι αυτές δεν επιτρέπουν την προσθήκη ή την αφαίρεση νέων στοιχείων ή κενών στη δομή, παρά μόνο την αλλαγή των τιμών των παραμέτρων τους. Επιπλέον, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης σχήματος και μεγέθους απαιτούν την ύπαρξη ενός αρχικού παραμετροποιημένου μοντέλου για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης, ενώ η ΤΟ μόνο απαιτεί έναν καθορισμένο αρχικό όγκο.

Υπάρχουν πολύαριθμες μέθοδοι ΤΟ που βασίζονται σε διάφορους αλγόριθμους, οι οποίοι μπορεί να είναι ντετερμινιστικοί ή στοχαστικοί. Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι πιο κατάλληλοι για την αναζήτηση πολλαπλών λύσεων λόγω του στοιχείου της τυχαιότητας στη διαδικασία τους, γεγονός που τους καθιστά πιο κατάλληλους για την εννοιολογική φάση. Στους αλγόριθμους οι αντικειμενικές συναρτήσεις ορίζονται συνήθως ως συναρτήσεις ελαχιστοποίησης ή συναρτήσεις μεγιστοποίησης για τις δεδομένες παραμέτρους σχεδιασμού. Κάθε αλγόριθμος βελτιστοποίησης πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον έναν στόχο για την πλοήγηση στη διαδικασία σχεδιασμού, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση ενός μονοσήμαντου στόχου βελτιστοποίησης (Single-Objective Optimization), (SOA). Συχνά συμβαίνει να υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι που κατασκευάζουν τον ορισμό ενός προβλήματος. Οι στόχοι μπορεί να είναι αντικρουόμενοι, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μία και μοναδική βέλτιστη λύση για το πρόβλημα, αλλά μια πληθώρα λύσεων, οι οποίες όλες ικανοποιούν διαφορετικά τα συγκεκριμένα κριτήρια. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αναζήτηση λύσεων όταν πρέπει να ικανοποιηθούν πολλαπλοί στόχοι (κριτήρια) ονομάζεται βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων, (Multi-Objective Optimization) (MOO). Η μέθοδος αυτή είναι πολύ βολική για να εφαρμοστεί σε προβλήματα σχεδιασμού, τα οποία συχνά έχουν αντίθετες απαιτήσεις. Ένα από τα πιο απλά παραδείγματα αντικρουόμενων απαιτήσεων είναι η μείωση του κόστους και η αύξηση της ασφάλειας του χρήστη, η οποία συνήθως εκφράζεται μέσω της επιλογής υλικών, της ακαμψίας και άλλων ιδιοτήτων. Ο στόχος της MOO είναι να συμπεριλάβει ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια στην αναζήτηση για να παρέχει αποτελέσματα που έχουν τις καλύτερες συμβιβαστικές

λύσεις μεταξύ όλων των σχετικών στόχων. Φυσικά, οι λύσεις αυτές θα επιφέρουν βελτίωση σε μία ή λίγες πτυχές και θα επιδεινωθούν σε άλλες, αλλά εξακολουθούν να είναι αρκετά καλές συνδυαστικές λύσεις. Ένα σύνολο σημείων που έχουν ίσες βέλτιστες συμβιβαστικές λύσεις, που δεν μπορούν να βελτιωθούν σε κανέναν από τους στόχους χωρίς να υποβαθμιστεί τουλάχιστον ένας από τους άλλους, ονομάζεται βέλτιστο μέτωπο Pareto.

Οι πιο συχνά εφαρμοζόμενες μέθοδοι για TO είναι: Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) ως προσέγγιση βασισμένη σε στοιχεία, διακριτές προσεγγίσεις όπως η Evolutionary Structural Optimization method (ESO), η Level Set Method (LSM) καθώς και συνδυασμένες προσεγγίσεις. Πολλά από τα εμπορικά εργαλεία TO χρησιμοποιούν τη μέθοδο SIMP, η οποία εξαρτάται από το πλέγμα (mesh), πράγμα που σημαίνει ότι απαιτεί μια αρχική γεωμετρία μελέτης που είναι ένας κλειστός όγκος (στερεό σώμα). Όσον αφορά τη λειτουργικότητα σε αυτά τα λογισμικά, είναι ως επί το πλείστον ικανά για βελτιστοποίηση ενός ή πολλαπλών στόχων που ανάγεται σε έναν, με την εφαρμογή βαρών. Για τη διερεύνηση του βέλτιστου μετώπου Pareto με την εύρεση πολλαπλών βελτιστοποιημένων αποτελεσμάτων, θα πρέπει να εκτελεστεί μια σειρά από επαναλήψεις αυτής της διαδικασίας αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων μελέτης, όπως τα υλικά ή τον στόχο.

2.4.2 Εμβάθυνση στο Generative Design.

Όσον αφορά το GD, η έρευνα ξεκίνησε γύρω στη δεκαετία του 1980, αλλά εκείνη την εποχή περιλάμβανε κυρίως δημοσιεύσεις που ήταν καθαρά θεωρητικές, χωρίς κανένα αξιοσημείωτο παράδειγμα εφαρμογής. Με την επερχόμενη ανάπτυξη των υπολογιστών και της τεχνολογίας, οι ερευνητές άρχισαν να αναζητούν πιθανές λύσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν αυτούς τους νέους πόρους για να βελτιώσουν τις διαδικασίες εργασίας τους. Το μεγαλύτερο αρχικό ενδιαφέρον εκδηλώθηκε στον τομέα της αρχιτεκτονικής, αλλά αμέσως μετά, οι ερευνητές από άλλους τομείς άρχισαν να διερευνούν πιθανές ευκαιρίες και εφαρμογές που οι θα μπορούσε να προσφέρει ο συνδυασμός της πληροφορικής και των αναλογιών που αντλούνται από τη θεωρία της εξέλιξης.

Στον τομέα του μηχανολογικού σχεδιασμού εισηγήθηκε η θεωρία του αυτογενετικού σχεδιασμού (Autogenetic Design Theory) το 2005, όπου διερευνήθηκαν οι ομοιότητες της διαδικασίας σχεδιασμού ως μέρος του προϊόντος και της φυσικής διαδικασίας της εξέλιξης. Η ανάπτυξη προϊόντων είναι μια διαδικασία που μπορεί να περιγραφεί από την εξελικτική άποψη ως μια συνεχής βελτιστοποίηση μιας βασικής λύσης παρατηρώντας τις αρχικές συνθήκες, τις οριακές συνθήκες και τους περιορισμούς. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την εξέλιξη του σχεδιασμού και θέτουν σε λειτουργία τον χώρο σχεδιασμού. Μπορούν να εκφραστούν ως παραγγελίες, πελατειακές απαιτήσεις, αυθόρμητες ιδέες, κατευθυντήριες γραμμές κ.λπ. και είναι δυνατόν να αλλάξουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, η οποία είναι ανάλογη με τις αλλαγές στο περιβάλλον που παρατηρούνται στη φύση.

Μέχρι σήμερα, λόγω του αρκετά μεγάλου πεδίου εφαρμογής του, δεν υπάρχει ακόμη κοινά αποδεκτός ορισμός για το GD. Ο στόχος του μπορεί να περιγραφεί ως εξής: "τα συστήματα GD αποσκοπούν στη δημιουργία νέων διαδικασιών σχεδιασμού που παράγουν χωροταξικά

καινοτόμα αλλά και αποδοτικά και κατασκευάσιμα σχέδια μέσω της εκμετάλλευσης των σημερινών δυνατοτήτων υπολογισμού και κατασκευής. Άλλη μία προσέγγιση μπορεί να δοθεί, εστιάζοντας στην εφαρμογή του στο CAD: "Το GD είναι μια διαδικασία διερεύνησης σχεδιασμού με βάση τον σχεδιαστή, με παραμετρικούς περιορισμούς, η οποία λειτουργεί πάνω σε παραμετρικά συστήματα CAD με βάση την ιστορία, τα οποία είναι δομημένα για να υποστηρίζουν τον σχεδιασμό ως αναδυόμενη διαδικασία". Ωστόσο, σήμερα υπάρχουν εφαρμογές στον μηχανολογικό σχεδιασμό που δεν δεσμεύονται από παραμετρικά μοντέλα και αυτές που ξεπερνούν τη χρήση των τυποποιημένων προγραμμάτων CAD.

Το GD μπορεί να γίνει κατανοητό ως μια μέθοδος για τη δημιουργία πολλαπλών σχεδίων, η οποία περιλαμβάνει ορισμένο βαθμό αυτοματοποίησης και αυτονομίας στη διαδικασία. Η εξελικτική προσέγγιση της φύσης εφαρμόζεται στη διαδικασία του σχεδιασμού, ξεκινώντας με ένα ή έναν αριθμό διαφορετικών σχεδίων που εξαπλώνονται σε όλο το χώρο σχεδιασμού, τα οποία εξελίσσονται με το χρόνο σε πιο κατάλληλες μορφές για τις δεδομένες συνθήκες. Τα σχέδια που δεν ταιριάζουν στις συνθήκες ή δεν ακολουθούν τους στόχους του σχεδιασμού απορρίπτονται και η εξελικτική διαδικασία συνεχίζει να πλοηγείται προς άλλες κατευθύνσεις. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές συμμετέχουν στη διαδικασία κυρίως για να θέσουν τους περιορισμούς και τους στόχους σχεδιασμού πριν από την έναρξη της 'γενιάς', αλλά θα μπορούσαν επίσης να συμπεριληφθούν, καθώς και οι πελάτες, να παρεμβαίνουν καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής. Παρόλο που το GD μπορεί να γίνει απλώς με ένα στυλό και χαρτί χρησιμοποιώντας ένα καθορισμένο σύνολο κανόνων, ο όρος χρησιμοποιείται συνήθως για σχεδιασμό με υπολογιστική υποστήριξη. Τα παραγόμενα αποτελέσματα μπορούν να λάβουν διάφορες μορφές: εικόνες, μοντέλα, ήχους, κινούμενα σχέδια κ.λπ., επομένως η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς όπως η αρχιτεκτονική, η μηχανική και η σχεδιασμός, τέχνη, μουσική, μόδα και πολλοί άλλοι.

Το GD σχετίζεται συνήθως με τη χρήση αλγορίθμων ως βάση για τη δημιουργία σχεδίων. Πρόσφατα έχουν εισαχθεί εργαλεία GD ως ξεχωριστές ενότητες σε ορισμένα εμπορικά λογισμικά CAD για μηχανολογικό σχεδιασμό. Τα εργαλεία αυτά, βασίζονται αρχικά σε αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στο TO, δηλαδή στη μέθοδο συνόλων επιπέδων (LSM). Λειτουργούν με κινούμενα όρια αντί για τοπικές μεταβλητές πυκνότητας, επομένως έχουν τη δυνατότητα να είναι ανεξάρτητες από πλέγματα, έχοντας έτσι διαφορετικές απαιτήσεις για τη ρύθμιση του σχεδιασμού από ό,τι η TO. Οι LSM χαρακτηρίζονται από ευελιξία και ικανότητα χειρισμού απαιτητικών τοπολογικών αλλαγών.

2.4.3 Σύγκριση των δύο τεχνολογιών.

Ολοκληρώνοντας την σύγκριση των δύο λογισμικών, κρίνεται απαραίτητο να συγκριθούν και οι διαφορές στις προϋποθέσεις και στις παραμετρικές επιλογές τους. Αναλυτικότερα, η TO επιλέγει σαν αρχική γεωμετρία ένα στερεό σώμα, το οποίο αποτελεί και τον μέγιστο όγκο του τελικού μοντέλου, ενώ το GD μελετά το πρόβλημα επιλέγοντας έναν όγκο από ένα assembly γύρω από το οποίο επιλέγονται τα σώματα που είναι εμπόδια και δεν πρέπει να τα παραβεί το τελικό μοντέλο, καθώς και σώματα που πρέπει να συμπεριληφθούν στο τελικό μοντέλο. Η TO δύναται

να συμπεριλάβει μόνο 1 υλικό ανά προσομοίωση και δεν περιέχει το CAM, σε αντίθεση με το GD όπου ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει παραπάνω από ένα υλικά για τα τελικά αποτελέσματα του καθώς και παραπάνω από έναν τρόπους κατασκευής. Παράλληλα, από την TO θα παραχθεί ένα και μοναδικό μοντέλο έπειτα από κάποια λεπτά, ενώ το GD θα παράγει πολλαπλά σχέδια σε βάθος κάποιων ωρών. Τέλος, η TO θα χρειαστεί περαιτέρω επεξεργασία του τελικού μοντέλου σε αντίθεση με το GD στο οποίο τα περισσότερα σχέδια που θα παράγει δεν χρειάζονται κάποια επεξεργασία, ενώ παράλληλα, επιτρέπει την σύγκριση των τελικών σχεδίων όσον αφορά την μάζα και τις καταπονήσεις.

Προκύπτει λοιπόν ότι παρόλο που και τα δύο εργαλεία βασίζονται σε αλγορίθμους για τη σύνθεση τοπολογίας, απαιτούν διαφορετικές προσεγγίσεις. Η TO συνήθως εφαρμόζει μεθόδους βελτιστοποίησης που εξαρτώνται από το πλέγμα, όπως SIMP, η οποία διερευνάται ευρέως και προσαρμόζεται στο επίπεδο που παρέχει χρήσιμα βέλτιστα αποτελέσματα, ωστόσο η αρχική γεωμετρία που απαιτείται για τη μελέτη περιορίζει την τελική μορφή των παραγόμενων σχεδίων. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα από την πλευρά του χρήστη, είναι δυνατή η δημιουργία του αρχικού μοντέλου ως ένα πολύ μεγάλο σχέδιο χώρου, αλλά η διαδικασία αυτή μπορεί να απαιτήσει σημαντικές προσπάθειες εάν υπάρχουν πολλά εξαρτήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες που περιβάλλουν το τμήμα του σχεδιασμού-στόχου. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτού του εργαλείου είναι ότι παράγει μόνο έναν μοντέλο ανά μελέτη. Από την άλλη πλευρά, τα εργαλεία GD που βασίζονται στη LSM για βελτιστοποίηση, δεν απαιτούν πλήρως καθορισμένο χώρο σχεδιασμού, γεγονός που αφήνει περισσότερες δυνατότητες στον αλγόριθμο για παραλλαγή του σχεδιασμού. Ωστόσο, η δημιουργία γεωμετρίας μελέτης για το GD θα απαιτούσε από τους μηχανικούς να υιοθετήσουν ένα διαφορετικό τρόπο σκέψης και προσέγγισης του σχεδιασμού (D. Vlah , R. Žanbi and N. Vukašinić, 2020).

2.5 Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών προσθετικής κατασκευής.

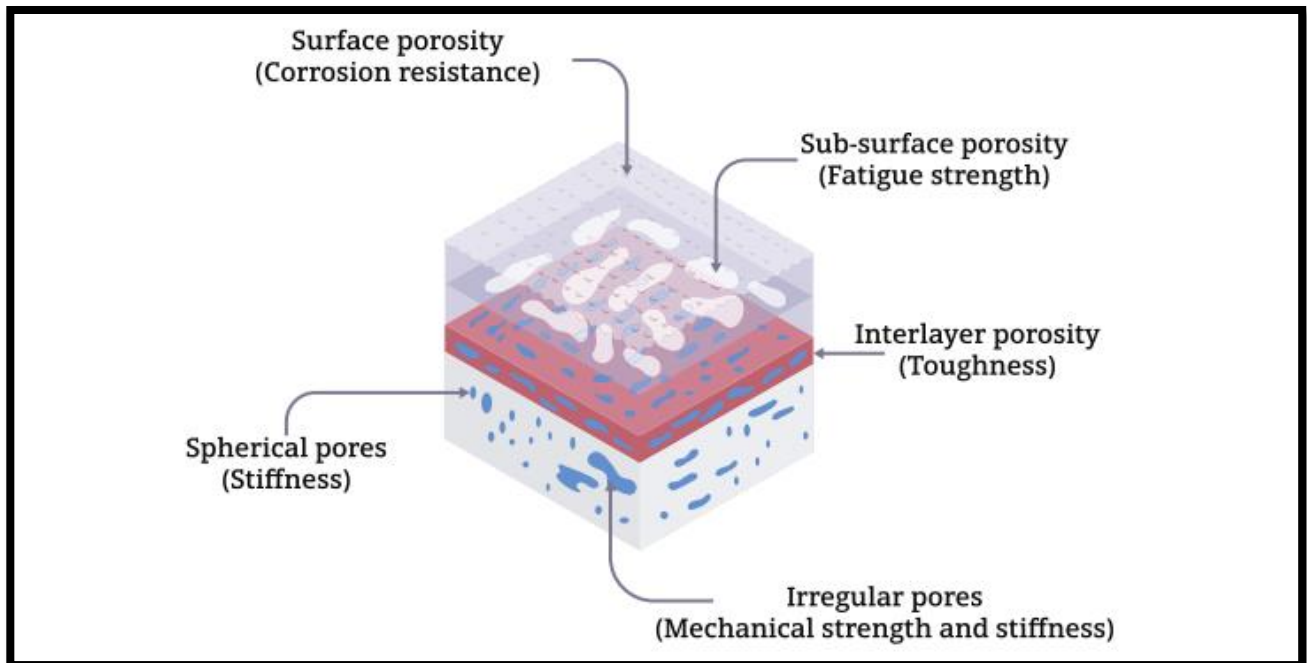
2.5.1 Η ανισοτροπία των παραγόμενων μέσω AM δοκιμών.

Η ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων στα AM υλικά είναι μία ουσιαστική πρόκληση για τον δομικό σχεδιασμό και την εφαρμογή αυτού. Πολλές πειραματικές παρατηρήσεις αποδεικνύουν ότι η μικροδομή του υλικού ποικίλει, ανάλογα με τον τρόπο που κατασκευάστηκε, στο οριζόντιο επίπεδο κάθετα στη διεύθυνση του “κρεβατιού” και στο κατακόρυφο επίπεδο παράλληλα στη διεύθυνση του “κρεβατιού”. Η ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων οφείλεται κυρίως στην ανισοτροπία της μικροδομής. Για παράδειγμα, οι μικροδομές του υλικού των εναποθέσεων χαλκού που έχουν ψεκαστεί εν ψυχρώ παρουσιάζουν ισουΰψες σχήμα στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο παρουσιάζουν σχήμα φακού. Ως αποτέλεσμα, η μικροσκληρότητα στο οριζόντιο επίπεδο είναι χαμηλότερη από ό,τι στο κατακόρυφο επίπεδο.

Εκτός από τα μεταλλικά υλικά, τα AM πολυμερή υλικά παρουσιάζουν επίσης ανισοτροπία τόσο της μικροδομής όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων. Έχει διαπιστωθεί ότι το υλικό που κατασκευάζεται με SLA είναι σχεδόν εγκάρσια ισότροπο στην ελαστική συμπεριφορά και στις

μηχανικές του ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου του μέτρου ελαστικότητας, του ορίου διαρροής και της τάσης θραύσης, στο οριζόντιο επίπεδο είναι καλύτερες από εκείνες κατά μήκος της διεύθυνσης δόμησης.

Ωστόσο, τα εξιδανικευμένα μοντέλα ιστροπικών υλικών έχουν κυρίως εφαρμοστεί στη ΤΟ, αγνοώντας τις επιδράσεις της ανισοτροπίας του υλικού στον δομικό σχεδιασμό καθώς και στην απόδοση (D. Vlah , R. Žavbi and N. Vukašinić, 2020).



Εικόνα 17: Η επίδραση του τύπου των πόρων και της θέσης αυτών, στις μηχανικές ιδιότητες των AM προϊόντων. (Ahmad Y Al-Maharma, Sandeep P Patil, Bernd Markert, 2020)

2.5.2 Οι πόροι ως ατέλειες και ως λειτουργικές δομές.

Κατά την παραγωγή δοκιμών μέσω AM εμφανίζεται αραιότητα της ύλης (porosity), η οποία αδιαμφησβήτητα παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, η αραιότητα της ύλης στην AM μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο βασικά είδη: (i) φαινομενική αραιότητα που αντιστοιχεί σε πορώδη ελαττώματα που σχηματίζονται ακούσια στην δομή ή/και στην μη χαραγμένη επιφάνεια του προσθετικά κατασκευασμένου υλικού, (ii) τεχνητή αραιότητα που δημιουργείται και ελέγχεται σκόπιμα για μια τεχνητή απόδοση και μια συγκεκριμένη λειτουργία. Η αραιότητα διαθέτει συνήθως φυσικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, των διαστάσεων, του σχήματος και της αρχιτεκτονικής, οι οποίες μπορούν να παραχθούν μέσω μιας ελεγχόμενης διαδικασίας κατασκευής. Οι πόροι μπορούν να ανιχνευθούν σε τρεις κρίσιμες θέσεις των AM υλικών: στην επιφάνεια, υποεπιφανειακά, μεταξύ των εναποτιθέμενων στρωμάτων, πρόσθετα στο εσωτερικό μαζί με το υπόλοιπο υλικό.

Οι πόροι μεταξύ των στρωμάτων είναι πολύ καθοριστικοί για τις ιδιότητες ανθεκτικότητας του τεμαχίου όταν τα φορτία εφαρμόζονται εγκάρσια στον προσανατολισμό των στρωμάτων, καθώς οι ατέλειες αυτές προκαλούν την αποκόλληση μεταξύ των εναποτιθέμενων στρωμάτων. Οι υπόλοιπες θέσεις, όπου κατανέμονται οι πορώδεις ατέλειες, επηρεάζουν κρίσιμα τις αντοχές σε εφελκυσμό και κόπωση, δεδομένου ότι λειτουργούν ως θέσεις έναρξης βλάβης υπό εφελκυσμό και κυκλική φόρτιση. Η τραχιά επιφάνεια μειώνει την αντοχή στη διάβρωση των κατασκευασμένων με AM εξαρτημάτων, ιδίως εκείνων που κατασκευάζονται από μέταλλα, όταν εκτίθενται σε υψηλά επιθετικό διαβρωτικό μέσο.

Η ποσότητα και η κατανομή των πόρων αέρα στο υλικό που έχει υποστεί επεξεργασία με AM εξαρτώνται πλήρως από τη διαδικασία AM. Οι πόροι, επηρεάζουν κυρίως τις μηχανικές επιδόσεις των εξαρτημάτων που παράγονται με διεργασίες AM που βασίζονται σε A. PBF (Power Bed Fusion) και B. εξώθηση νημάτων (FDM), ενώ εκείνα που εκτυπώνονται με SLA παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή και βελτιωμένη ανισοτροπία λόγω της λειτουργικής δύναμης συγκολλητικής σύνδεσης που επιτυγχάνεται από τον πολυμερισμό του νέου στρώματος με το προηγούμενο. Κατά συνέπεια, οι πόροι επηρεάζουν με δραματικό τρόπο την ποιότητα και την αξιοπιστία των εκτυπωμένων υλικών και η εξάλειψη ή τουλάχιστον η ελαχιστοποίηση αυτών των δυσμενών επιδράσεων είναι υψίστης σημασίας στις εφαρμογές της AM.

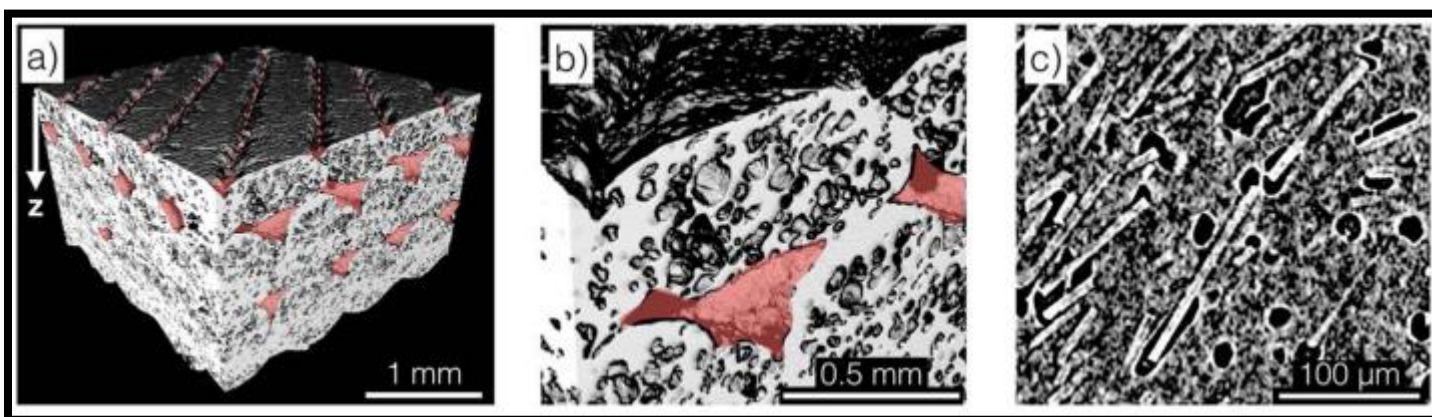
A. Πόροι σε παραγόμενα εξαρτήματα μέσω PBF διαδικασιών.

Τρεις διαφορετικοί τύποι πόρων παρατηρούνται στα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με PBF: (i) Λειτουργικοί πόροι, οι οποίοι είναι ανοικτοί και συνδεδεμένοι πόροι που προκύπτουν από την αποδέσμευση. Αυτοί οι πόροι μπορούν να αφαιρεθούν με τη χρήση πρώτων υλών χαμηλού σημείου τήξης, με μεταεπεξεργασία χρησιμοποιώντας θερμότητα και πίεση και με διήθηση με συμβατά δευτερεύοντα υλικά για την επίτευξη πλήρως πυκνών σύνθετων εξαρτημάτων. (ii) Πόροι μικροδομής: υπολειμματικές ατέλειες και κενά που υπάρχουν στη μικροδομή του κατασκευασμένου εξαρτήματος- δημιουργούνται ακούσια και πρέπει να ελαχιστοποιούνται ή να αποφεύγονται για να να αμβλυνθούν οι αρνητικές επιπτώσεις τους στις μηχανικές ιδιότητες και να εξασφαλιστεί η συνοχή των προσθετικά κατασκευασμένων εξαρτημάτων. (iii) Δομικοί (κατασκευασμένοι) πόροι: σκόπιμοι πόροι οι οποίοι εισάγονται για συγκεκριμένο σκοπό, όπως πόροι σε βιοϊατρικά ικριώματα που ενισχύουν την παροχή θρεπτικών ουσιών και την ανάπτυξη ιστών, ή κενά κύτταρα σε δομές πλέγματος, οι οποίοι μειώνουν το συνολικό βάρος χωρίς καμία επίδραση στην ικανότητα φόρτισης του εξαρτήματος.

B. Πόροι σε εξαρτήματα παραγόμενα μέσω διαδικασιών ME (Material Extrusion)

Δύο βασικοί τύποι κενών μπορούν να εντοπιστούν σε σύνθετα πολυμερή ινών που έχουν υποστεί επεξεργασία με FFF (Fused Filament Fabrication): κενά εντός και μεταξύ των σφαιρών. Οι πόροι εντός της σφαίρας είναι οι πιο κρίσιμοι, οι οποίοι μπορούν να μειωθούν με τη βελτίωση

της πρόσφυσης μεταξύ ίνας και μήτρας και την επιλογή υψηλής ποιότητας νημάτων εκτύπωσης. Η γεωμετρία του ακροφυσίου του εκτυπωτή FFF προκαλεί τους πόρους μεταξύ των σφαιριδίων, και με τη βελτίωση του σχήματος της εξόδου του ακροφυσίου, αυτό μπορεί να μειωθεί στο ελάχιστο. Στα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με διεργασίες ME, οι πόροι σχηματίζουν γραμμικά μοτίβα στη διεπιφανειακή περιοχή μεταξύ των εναποτιθέμενων σφαιριδίων λόγω της στρατηγικής εκτύπωσης με βάση το στρώμα ανά στρώμα. Η εξώθηση της λιωμένης ουσίας πάνω στη στερεοποιημένη από τα προηγούμενα εναποτιθέμενα στρώματα θα μπορούσε να είναι η κύρια αιτία για τη δημιουργία πόρων, η οποία επομένως οδηγεί σε συγκέντρωση τάσεων και πρόωρη αστοχία στα τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα λόγω της ασθενούς αντοχής δεσμού μεταξύ γειτονικών σφαιριδίων. Οι πόροι και η διαφοροποίηση του προσανατολισμού μεταξύ των εναποτιθέμενων σφαιριδίων δημιουργούν αξιοσημείωτη ανισοτροπία στις ιδιότητες των υλικών των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με τη διαδικασία ME. Μια γνωστή τεχνική για τη μείωση της ανισοτροπίας στις ιδιότητες των εκτυπωμένων αντικειμένων είναι η τροποποίηση του προσανατολισμού τους μέσω της διαδικασίας κατασκευής. Άλλα πιθανά μέτρα περιλαμβάνουν διεργασίες φινιρίσματος μετά την εκτύπωση κάθε στρώματος, όπως μηχανική ή χημική στίλβωση, ή μεταγενέστερη κατεργασία μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής.



Εικόνα 18: Εικόνες αξονικής τομογραφίας σύνθετου υλικού CF/ABS με 100% πλήρωση: (α) Πόροι μεταξύ των σφαιρών, με κόκκινο χρώμα (β) Πόροι εντός και μεταξύ των σφαιρών, με κόκκινο χρώμα, (γ) πόροι στη διεπιφάνεια ίνας – μήτρας. (Ahmad Y Al-Maharma, Sandeep P Patil, Bernd Markert, 2020).

Τα σύνθετα υλικά ινών που χαρακτηρίζονται από υψηλές μηχανικές επιδόσεις μπορούν να παραχθούν μέσω διεργασιών ME εάν πληρούνται οι απαιτήσεις ελάχιστων πόρων και ευθυγράμμισης των ινών. Οι τιμές της μηχανικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας των σύνθετων υλικών που παράγονται με ME είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με τα αντίστοιχα υλικά που επεξεργάζονται μέσω παραδοσιακών διαδικασιών κατασκευής, όπως η συμπίεση και η χύτευση με μεταφορά ρητίνης. Ο κύριος λόγος εντοπίζεται στη συσσωμάτωση των ινών στο τήγμα ινών που χαρακτηρίζεται από υψηλό ιξώδες μαζί με υψηλή εσωτερική εμφάνιση πόρων που προέκυψε από την αδύναμη αντοχή πρόσφυσης στη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας, μαζί με τη

μερικώς ανεξάρτητη κίνηση της μήτρας και των ινών μέσω της διαδικασίας εξώθησης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός του ακροφυσίου μονής τροφοδοσίας-συσσωμάτωσης των εμπορικών εκτυπωτών που βασίζονται στην εξώθηση νημάτων δεν είναι σε θέση να επιλύσει αυτό το ζήτημα ενώ ο επανασχεδιασμός του συστήματος τροφοδοσίας των πρώτων υλών ώστε να δέχεται χωριστή τροφοδοσία υλικού και ενισχυτικού πληρωτικού υλικού θεωρείται αξιόπιστη προσέγγιση για την τρισδιάστατη εκτύπωση σύνθετων υλικών. Επιπλέον, η αύξηση της ανισοτροπίας των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με ίνες μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με την αλλαγή της κατεύθυνσης των νανο-πληρωτών σε ώστε να προσανατολίζονται με το νήμα. Αυτά τα πληρωτικά υλικά τείνουν να ευθυγραμμίζονται προς την κατεύθυνση εξώθησης. (Ahmad Y Al-Maharma, Sandeep P Patil, Bernd Markert, 2020)

2.5.3 Η επίδραση των πόρων στην αντοχή, την δυσκαμψία και την ανθεκτικότητα.

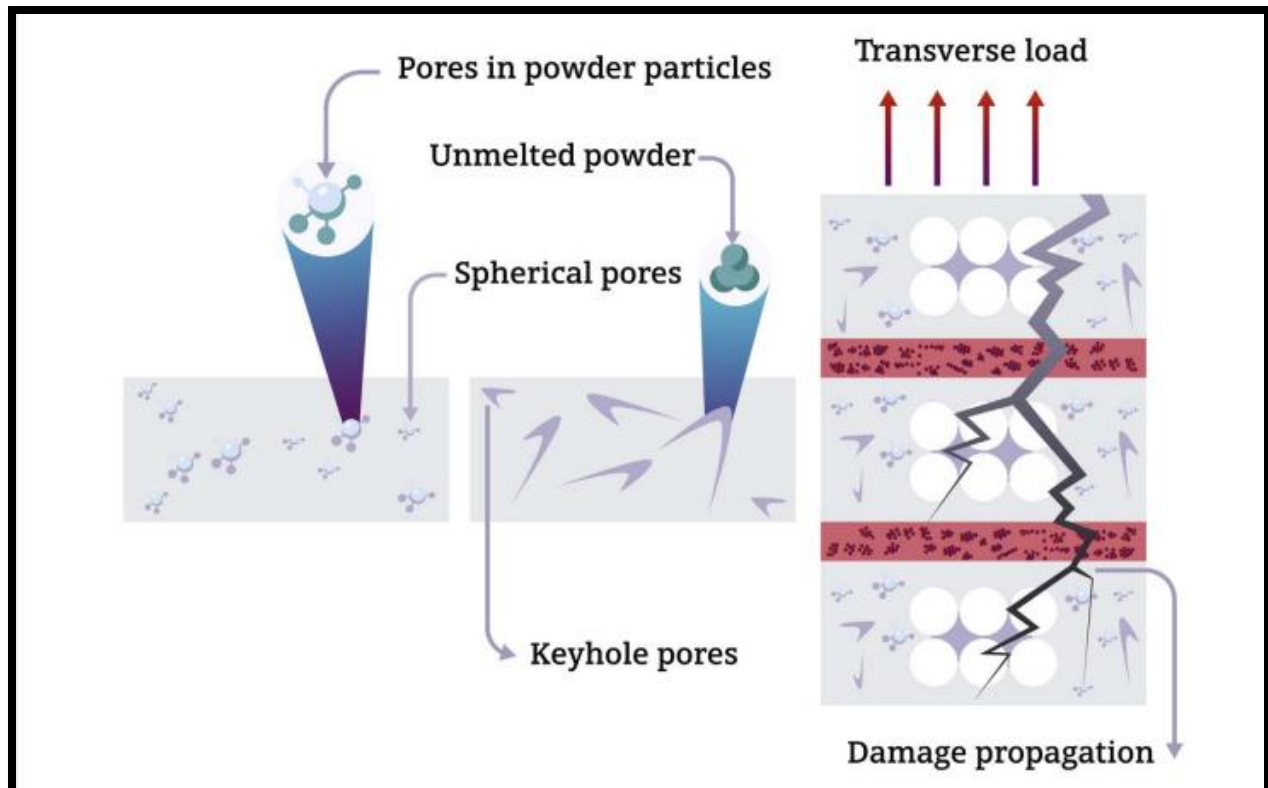
A. Επίδραση των πόρων σε ME μεθόδους.

Οι τιμές της αντοχής και της δυσκαμψίας για σύνθετα ινώδη υλικά που έχουν εκτυπωθεί με ME επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους εκτύπωσης (δηλαδή το ποσοστό πλήρωσης και το σχέδιο - μοτίβο αυτού, μαζί με την ταχύτητα εκτύπωσης και τη θερμοκρασία), οι οποίες δημιουργούν μια αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των τιμών αναφοράς της αντοχής και της δυσκαμψίας. Επιπλέον, οι συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, όπως η χύτευση με έγχυση (Injection Molding), μειώνουν σημαντικά την περιεκτικότητα σε κενά που δημιουργούνται κατά την κατασκευή του τεμαχίου, οδηγώντας σε υψηλές τιμές αντοχής και δυσκαμψίας για τα τεμάχια που παράγονται με αυτές τις τεχνικές. Σύντομες και συνεχείς ίνες, μαζί με σωματίδια, χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας των νημάτων εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται σε FFF/FDM μηχανές. Οι εξαιρετικές ενισχυτικές ίνες όπως ο άνθρακας χρησιμοποιούνται για την αύξηση της ακαμψίας και της αντοχής των καθαρών θερμοπλαστικών πολυμερών που επεξεργάζονται με τη διαδικασία FFF, ώστε οι μηχανικές τους ιδιότητες να είναι συγκρίσιμες με εκείνες των σύνθετων υλικών εποξειδικής μήτρας μονής κατεύθυνσης. Γενικά, υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των σύνθετων υλικών μέσω της τεχνικής FFF: i) Η εκτύπωση κοντών ινών με μέσο μήκος 0,1 mm μέσω συμβατικών διεργασιών ME, (ii) Η επεξεργασία συνεχών ινών μέσω της εφαρμογής ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού της κεφαλής εκτύπωσης. Η ενσωμάτωση κοντών ινών στο νήμα εκτύπωσης αυξάνει την ακαμψία του κατασκευασμένου εξαρτήματος. Ωστόσο, η βελτίωση που επιτυγχάνεται στην αντοχή εξακολουθεί να είναι περιορισμένη, δεδομένου ότι η απομάκρυνση των ινών μπορεί να λάβει χώρα πριν από τη θραύση των ινών. Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας πόρων, η εκτύπωση κοντών ινών κατασκευάζει εξαρτήματα με υψηλότερη ποιότητα από εκείνα που παράγονται μέσω της εκτύπωσης συνεχών ινών. Η μηχανική αντοχή των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με εκτύπωση κοντών ινών μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την ενίσχυση του θερμοπλαστικού νήματος με κοντές ίνες που έχουν μέσο μήκος πάνω από το κρίσιμο μήκος ινών.

B. Επίδραση των πόρων σε PBF μεθόδους.

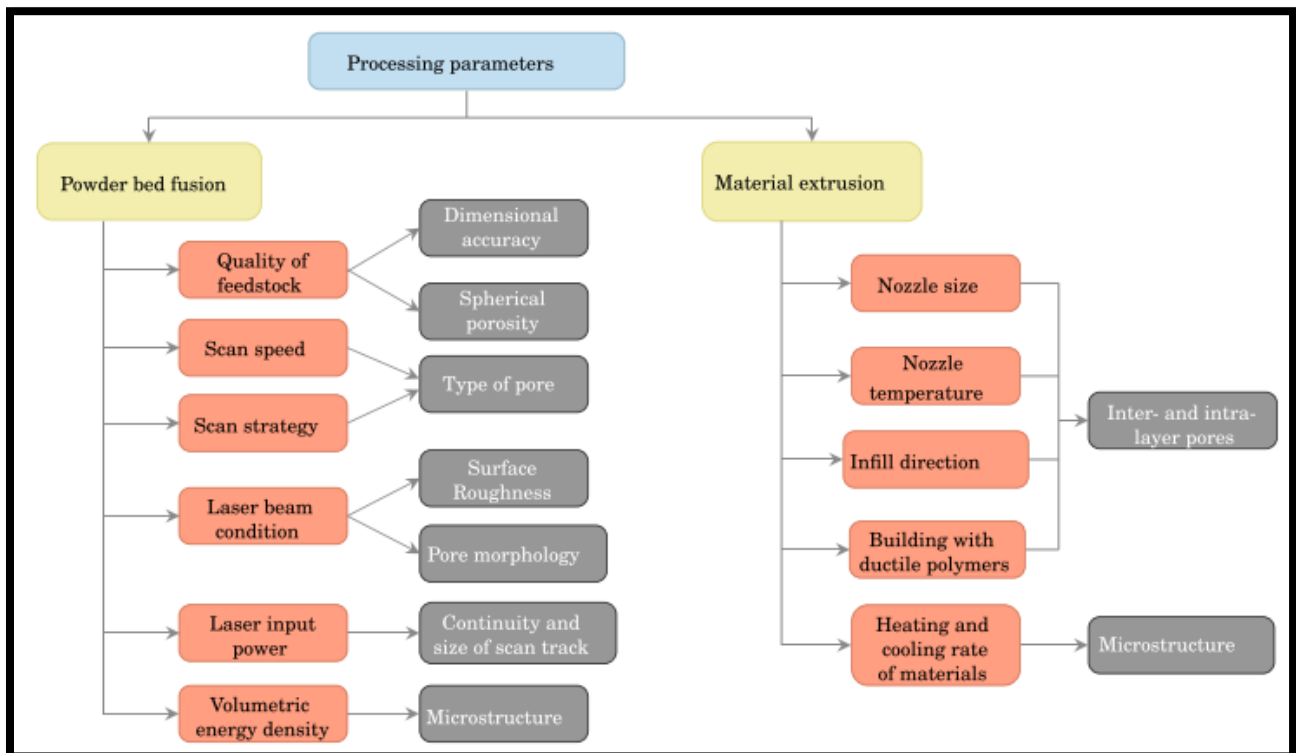
Οι επιφανειακοί, οι υποεπιφανειακοί καθώς και οι εσωτερικοί πόροι έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις ιδιότητες αντοχής και δυσκαμψίας των εξαρτημάτων που παράγονται με τις διεργασίες PBF. Οι επιφανειακοί πόροι μπορούν να μειωθούν σε αυτά τα εξαρτήματα με τη χρήση λεπτότερων σωματιδίων σκόνης, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες αναλογίες μεταφοράς υλικού. Τα μείγματα δύο τύπων σωματιδίων βοηθούν στον μετριασμό των πόρων σε σχέση με τα μείγματα που αποτελούνται από σωματίδια με αυθαίρετα μεγέθη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μηχανική απόδοση των υλικών που επεξεργάζονται με την τεχνολογία PBF εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση της χρησιμοποιούμενης σκόνης, είτε πρόκειται για καινούργια, σε κατάσταση παραλαβής είτε για ανακυκλωμένη. Παρά το γεγονός ότι η μικροδομή της ανακυκλώσιμης και της καινούργιας σκόνης είναι ίδια, τα μολυσμένα σωματίδια μειώνουν σημαντικά την ολκιμότητα δρώντας ως εκκινητές εύθραυστων βλαβών (εύθραυστα εγκλείσματα).

Οι πόροι αερίου (Gas Pores) και οι Keyhole Pores είναι οι κύριες πορώδεις ατέλειες που ευθύνονται για τη μείωση της μηχανικής αντοχής των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με μεθόδους εκτύπωσης PBF. Οι Keyholes λειτουργούν ως σημεία συγκέντρωσης τάσεων στο εσωτερικό της εκτυπωμένης δομής, όπου μπορούν εύκολα να ξεκινήσουν ρωγμές από αυτές



Εικόνα 19: Η επίδραση των πόρων αερίου και των Keyhole Pores, στην μηχανική αντοχή των σύνθετων ινώδων υλικών εκτυπωμένων με PBF μεθόδους. (Ahmad Y Al-Maharma, Sandeep P Patil, Bernd Markert, 2020).

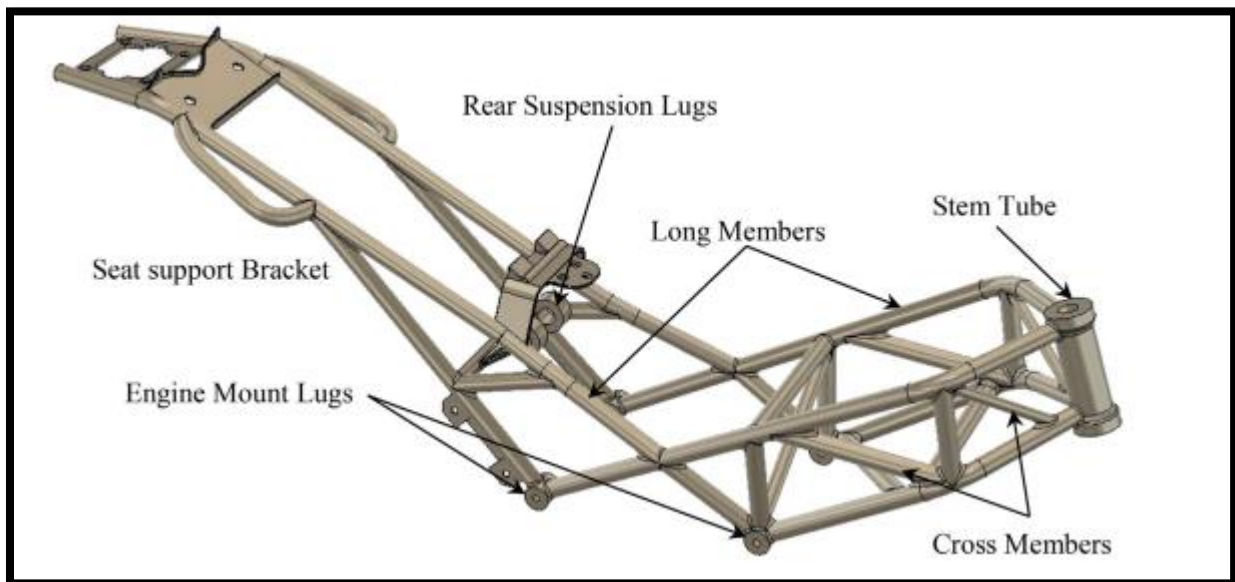
προς τις γειτονικές υγιείς περιοχές. Οι πόροι μπορούν να διαδραματίσουν πολύ καθοριστικό ρόλο όταν τα σύνθετα ινώδη υλικά κατασκευάζονται με μεθόδους PBF, καθώς οι πορώδεις ατέλειες κατανέμονται σε κρίσιμες θέσεις. Όταν ένα εγκάρσιο εφελκυστικό φορτίο εφαρμόζεται στο σύνθετο ινώδες υλικό, οι ενδοστρωματικές ρωγμές προωθούν τον διαχωρισμό των τυπωμένων στρωμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα λόγω της μεγάλης ποσότητας πόρων μεταξύ των στρωμάτων. Επομένως, υπάρχει ανάγκη χρήσης εξωτερικού εξοπλισμού που θα πρέπει να αποτελεί μέρος της μηχανής εκτύπωσης PBF για την εφαρμογή επαρκούς ποσότητας πίεσης που είναι επαρκής για την απομάκρυνση τουλάχιστον των πόρων μεταξύ των στρώσεων εκτός από τη θερμότητα που ανακτάται από τη δέσμη λέιζερ.



Εικόνα 20: Η επίδραση των παραμέτρων εκτύπωσης με ME και PBF μεθόδους, στην μορφολογική συμπεριφορά των υλικών. (Ahmad Y Al-Maharma, Sandeep P Patil, Bernd Markert, 2020).

2.6 Προηγούμενες έρευνες σχετικά με τη συγκριτική μελέτη του Generative Design και του Topology Optimization σε μηχανικές ιδιότητες δοκιμών προσθετικών κατασκευών.

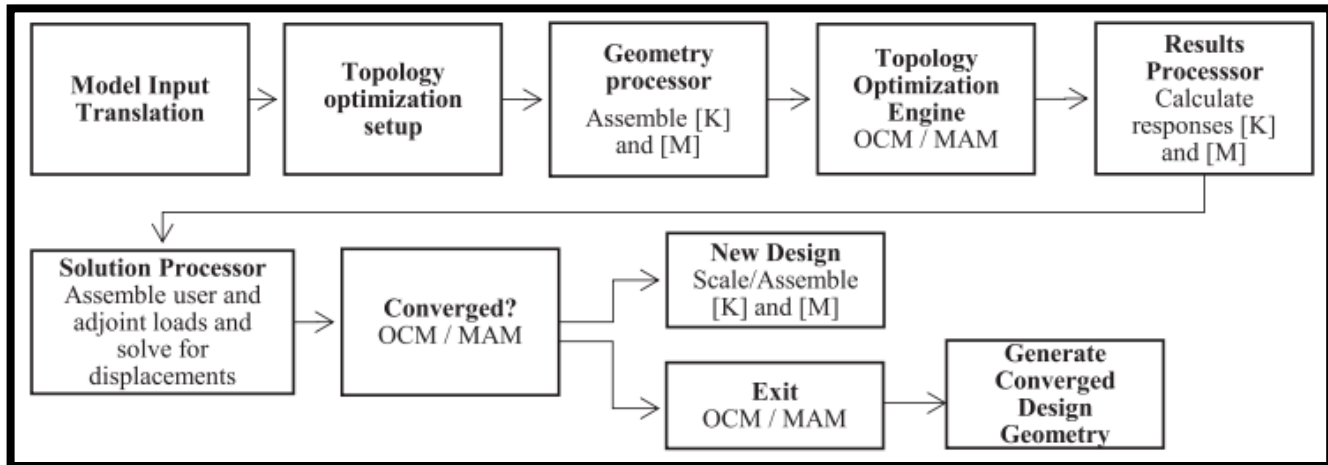
2.6.1 Συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization για πλαίσιο μοτοσυκλέτας. Το πλαίσιο μιας μοτοσυκλέτας φέρει το μεγαλύτερο μέρος των φορτίων και παρέχει επίσης σημεία στήριξης για άλλα εξαρτήματα όπως ο κινητήρας, το σύστημα ανάρτησης κ.λπ. Τα πλαίσια διατίθενται σε διάφορες μορφές με βάση την τελική χρήση του σχεδιασμού. Για να ταιριάζουν σε διαφορετικούς σκοπούς, όπως σπορ, εκτός δρόμου, καθημερινές μετακινήσεις κ.λπ, διατίθενται διαφορετικές μεθοδολογίες σχεδιασμού.



Εικόνα 20: Τυπικό μοντέλο πλαισίου μοτοσυκλέτας. (Shayaan Ahmed, Manoj Kumar Gupta, 2021).

Η ΤΟ βελτιώνει τη δομική απόδοση μέσω του προσδιορισμού της βέλτιστης κατανομής των υλικών στο εσωτερικό του διαθέσιμου όγκου οποιασδήποτε δομής σε σχέση με τα φορτία της, τις οριακές συνθήκες και τους περιορισμούς. Η ενίσχυση της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί είτε ελαχιστοποιώντας τη συμμόρφωση (compliance) είτε μεγιστοποιώντας τη δυσκαμψία (Stiffness). Το πιο κρίσιμο βήμα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τη ΤΟ είναι ο προσδιορισμός των προδιαγραφών και των μαθηματικών μοντέλων. Η βέλτιστη διακριτοποίηση της γεωμετρίας και η επαναλαμβανόμενη σύγκλιση οδηγούν σε μια βελτιστοποιημένη δομή. Για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η ΤΟ του Fusion 360 το οποίο χρησιμοποιεί την μέθοδο SIMP.

Μετά τον προσδιορισμό του πεδίου σχεδιασμού, των οριακών συνθηκών και των περιορισμών, την εφαρμογή της μεθόδου SIMP και τη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία, πρέπει να εφαρμοστεί μια μέθοδος βελτιστοποίησης, η οποία τελικά θα εκτελέσει τις επαναλήψεις και θα προκύψει το πλέον βελτιστοποιημένο δομικά μοντέλο. Δεδομένου ότι, το μοντέλο πλαισίου που χρησιμοποιείται στην παρούσα έρευνα εργασία αποτελείται από έναν μόνο στόχο και έναν μόνο περιορισμό βελτιστοποίησης, χρησιμοποιείται βελτιστοποιητής βασισμένος στη μέθοδο κριτηρίων βελτιστοποίησης (Optimality Criteria Method) (OCM) από τη μηχανή Autodesk NASTRAN για την επίλυση της διαδικασίας βελτιστοποίησης της τοπολογίας της δομής.



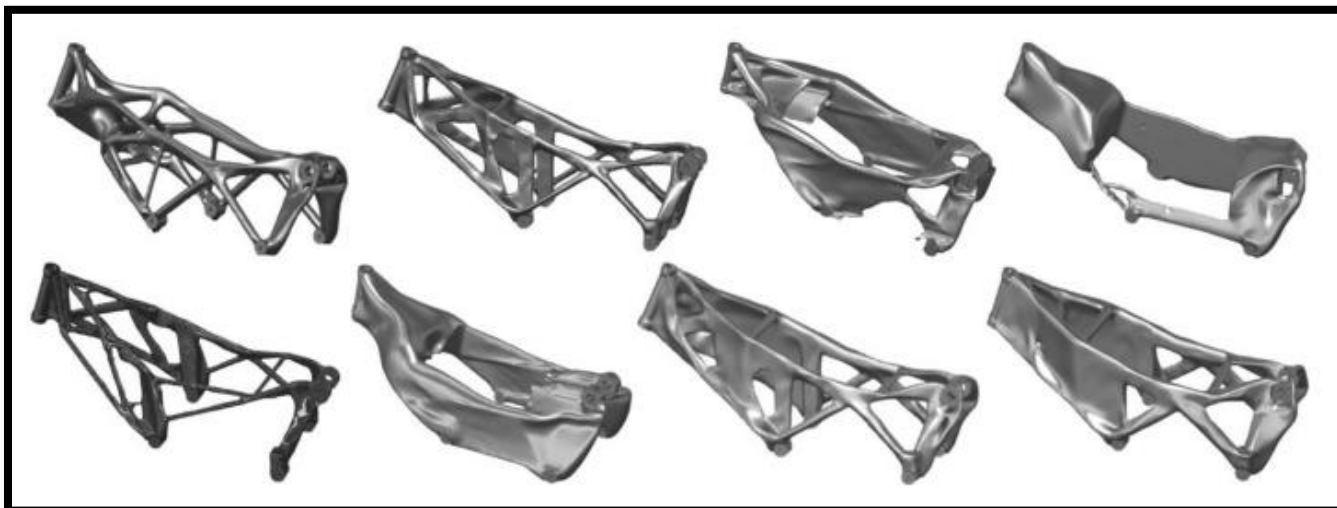
Εικόνα 21: Πλαίσιο βελτιστοποίησης του Autodesk Nastran In-CAD. (Shayaan Ahmed, Manoj Kumar Gupta, 2021).

Για την εφαρμογή της ΤΟ σε φυσικά έργα, προτείνεται η δύναμη ποινής (Penalization Power) να διατηρείται ίση ή μεγαλύτερη από 3 ($p \geq 3$) και η τιμή του λόγου Poisson να διατηρείται γύρω στο $1/3$. Οι φορτίσεις που εφαρμόζονται στο πλαίσιο πλέγματος για το πρόβλημα ΤΟ είναι οι ίδιες με εκείνες που εφαρμόζονται για τη δομική ανάλυση του συμβατικού πλαισίου και τη διαδικασία GD. Το κλάσμα όγκου V δρα ως οριακή συνθήκη για το πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας και ορίζεται μεγαλύτερο ή ίσο με 0,75 ή 75% της αρχικής μάζας του πλαισίου πλέγματος. Δεδομένου ότι το υλικό που χρησιμοποιείται είναι το ίδιο τόσο στις βελτιστοποιημένες όσο και στις μη βελτιστοποιημένες δομές, το κλάσμα όγκου μπορεί να θεωρηθεί το ίδιο με το κλάσμα μάζας. Υπήρχαν μερικοί περιορισμοί σχεδιασμού με τη μορφή του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων, ελάχιστου μεγέθους μέλους και κατασκευαστικών περιορισμών οι οποίοι επιλέγονται μέσω του προγράμματος ως περιοχές διατήρησης (Preserve Geometry) και το επίπεδο συμμετρίας (Symmetry Plane).

Για τη τρέχουσα μελέτη στο πλαίσιο μοτοσικλέτας, τα σημεία τοποθέτησης του κινητήρα και του συστήματος ανάρτησης (εμπρός και πίσω) επιλέχθηκαν και τελειοποιήθηκαν στο generative workspace του Autodesk Fusion 360. Αυτό θεωρήθηκε ως σκελετός για το αρχικό σχέδιο. Τόσο η

γνώση του τομέα όσο και η γνώση ελέγχου της δομής του πλαισίου της μοτοσικλέτας εφαρμόστηκαν για επιτυχή αποτελέσματα. Όταν καθορίστηκαν όλα τα στοιχεία του αρχικού σχεδιασμού, έγινε μια ανασκόπηση με βάση τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις σχεδιασμού για την επαλήθευση του εάν τα σύνολα των παραμέτρων είναι επιτρεπτά ή συγκρούονται. Οι γνώσεις που σχετίζονται με το πλαίσιο της μοτοσικλέτας και τη σχετική δυναμική της μετατράπηκαν σε ένα σύνολο κανόνων και τύπων που καθορίζουν την τελική δομή της.

Για το τρέξιμο της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν και για τη ΤΟ. Ως αρχικό σχήμα επιλέχθηκε το πλαίσιο. Η επιλογή αυτή βοηθά ώστε τα τελικά σχέδια να είναι παρόμοια με το αρχικό.



Εικόνα 22: Αποτελέσματα της εφαρμογής του GD στο πλαίσιο της μοτοσικλέτας. (Shayaan Ahmed, Manoj Kumar Gupta, 2021)

Η μελέτη του GD έδωσε πολλαπλές λύσεις σύμφωνα με τις διάφορες μεθόδους παραγωγής και τα διαφορετικά υλικά που επιλέχθηκαν. Συνολικά προέκυψαν 23 λύσεις από τις οποίες οι 2 κρίνονται κατάλληλες με βάση τις δομικές απαιτήσεις, τη μάζα του πλαισίου, την αισθητική του σχεδιασμού και τη δομική ακεραιότητα του αποτελέσματος. Το συμβατικό πλαίσιο, έχει πολλαπλά σημεία καταπόνησης κοντά στην πίσω ανάρτηση και τον σωλήνα του στελέχους. Αυτό προκαλεί συμπίεση και τάση λόγω των φορτίων στρέψης και πέδησης. Φαίνεται ότι στα σχέδια που παράχθηκαν μέσω GD έχει προστεθεί περισσότερο υλικό στις περιοχές με μέγιστη ενεργή συμπίεση και τάση για να αυξηθεί η σταθερότητα του σωλήνα στελέχους, των εγκάρσιων μελών και, συνεπώς, της συνολικής δομής. Η περίσσεια υλικού στο μπροστινό τμήμα του πλαισίου επίσης αντισταθμίζει τους ισχυρούς κραδασμούς του κινητήρα και συνεπώς μειώνει την κομβική μετατόπιση.

Συμπερασματικά, το GD συγκριτικά με το κανονικό πλαίσιο της μοτοσικλέτας, έχει τρεις βασικές βελτιώσεις, την μειωμένη μάζα, την μείωση της συγκέντρωσης των τάσεων και το ότι προέκυψε

ένα οργανικό, αισθητικά όμορφο σχήμα. Το GD υπερίσχυσε της TO όσον αφορά την μείωση της μάζας αλλά και την χρήση υλικού. Συγκεκριμένα, το GD μείωσε την μάζα κατά 34,29% ενώ η TO κατά 26,63%. Αντίστοιχα, μειώθηκε η χρήση υλικού στο GD κατά 38,75% ενώ στην TO κατά 25.42%. Άλλη μία δυσκολία που προέκυψε με την TO, ήταν η μετατροπή του πλέγματος σε στέρεο σώμα. Προέκυψε λοιπόν ως αποτέλεσμα ότι τα σχέδια που παράχθηκαν με GD ήταν καλύτερα από το αρχικό σχέδιο καθώς και από τα σχέδια που παράχθηκαν με TO. (Shayaan Ahmed, Manoj Kumar Gupta, 2021)

2.6.2 Συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization για ανάρτηση αυτοκινήτου. Η παρούσα εργασία διερευνάει τα σχέδια που παράγονται μέσω της TO και του GD, για να κατανοηθούν οι περιορισμοί κάθε μεθόδου σε συνδυασμό με την AM. Η έρευνα αυτή επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων, ώστε να διαπιστωθεί πώς η εφαρμογή του GD συγκρίνεται με τις παροντικές εφαρμογές. Υπάρχει περιορισμένη έρευνα σε αυτόν τον τομέα και η εφαρμογή αυτής της μεθόδου με την AM ξεκλειδώνει τις πλήρεις δυνατότητές της λόγω της νέας και εξελισσόμενης φύσης του γεννητικού σχεδιασμού.

Για να ξεκινήσει η μελέτη της TO και του GD, δημιουργήθηκε στο SolidWorks ένα αρχικό σχέδιο μιας ανάρτησης αυτοκινήτου. Αυτό έγινε χωρίς τη χρήση συγκεκριμένης διάστασης, καθώς το εξάρτημα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως καμβάς για την παραγωγή υλικών ώστε να καταδειχθεί η χρήση των δύο τεχνολογιών. Αυτός ο αρχικός σχεδιασμός μεταφέρθηκε στη συνέχεια στο ANSYS όπου τέθηκαν φορτία. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον αρχικό σχεδιασμό ήταν αλουμίνιο 2024 T6 το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεθόδους AM, όπως η PBF.

Η TO στον αρχικό σχεδιασμό διεξήχθη υπό την περίπτωση φορτίου πέδησης στροφής και με τη λειτουργία βελτιστοποίησης τοπολογίας του ANSYS. Αυτό επιτεύχθηκε με την επιλογή ολόκληρου του σώματος ως περιοχή σχεδιασμού με αποκλεισμό οποιουδήποτε πακτωμένου σημείου και τις θέσεις των οπών και των εδράνων του συστήματος κίνησης, ώστε να διατηρηθούν όπως είχαν σχεδιαστεί. Χρησιμοποιήθηκε μια αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης της συμμόρφωσης με μεταβαλλόμενο περιορισμό παράγοντα διατήρησης της μάζας. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές επαναλήψεις με στόχο τη διατήρηση του 50%, 35%, 33% και 30% της μάζας με τελική επιλογή τη διατήρηση μάζας 33% που χρησιμοποιήθηκε για το στάδιο του χειροκίνητου επανασχεδιασμού.

Για το GD, οι περιοριστικές γεωμετρίες των οπών των κοχλιών και της κεντρικής οπής για τα έδρανα και το σύστημα μετάδοσης ισχύος απομονώθηκαν στο SolidWorks ως ξεχωριστά σώματα. Αυτά στη συνέχεια εισήχθησαν στο Fusion 360 όπου τέθηκαν οι φορτίσεις με την κατάσταση πέδησης στροφής για τις δυνάμεις, και προστέθηκαν πρόσθετες γεωμετρίες εμποδίων (Obstacle Geometry) για να σταματήσει η κατανομή του υλικού όπου θα υπήρχαν εξωτερικά εξαρτήματα ή χρειαζόταν χώρος για τη πάκτωση αυτών των εξαρτημάτων.



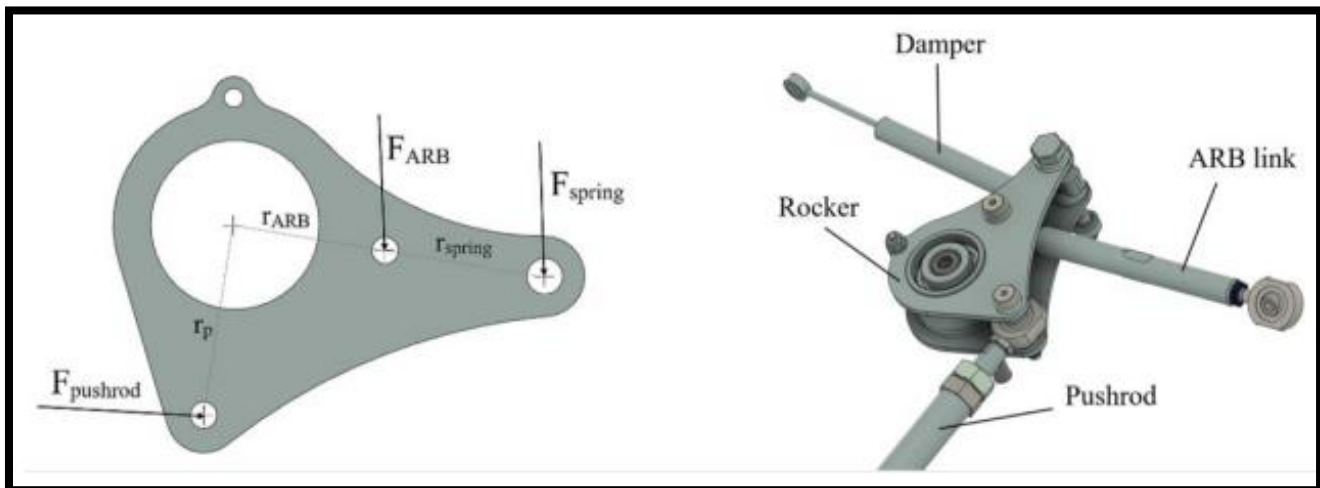
Εικόνα 23: Απεικονίζονται διαδοχικά, το αρχικό σχέδιο της ανάρτησης, αυτό που παράχθηκε με ΤΟ και αυτό που παράχθηκε με GD. (James COULTHARD, Chang Jiang WANG, 2022).

Η ΤΟ κατάφερε να μειώσει την μάζα του αρχικού όγκου κατά 65,17 % ενώ το GD κατά 88,13%. Κατ' επέκταση, το GD συγκριτικά με την ΤΟ πέτυχε 65,91% λιγότερη μάζα. Κανένα μοντέλο δεν απέτυχε κατά την εφαρμογή μελέτης στατικής καταπόνησης. Το αποτέλεσμα της ΤΟ έχει υποστεί χειροκίνητο επανασχεδιασμό και η δύναμη που αυτή η διαδικασία προσθέτει μπορεί να φανεί με τη μέγιστη πίεση που ασκείται να είναι 67,5 MPa. Εάν εξεταστεί το GD, φαίνεται μια μέγιστη τιμή 121,5 MPa. Αυτή είναι μια χρήσιμη σύγκριση, καθώς δείχνει πώς η προσέγγιση του λογισμικού του GD είναι πιο αποτελεσματική. Αναλυτικότερα, το λογισμικό που χρησιμοποιείται βελτιστοποιεί την κατανομή του υλικού πιο αποτελεσματικά, οπότε ενώ η τάση που παρατηρείται είναι υψηλότερη, αυτή είναι καλύτερα βελτιστοποιημένη για την φόρτιση και το υλικό που χρησιμοποιείται, επιτρέποντας τη χρήση λιγότερου υλικού ενώ υφίσταται υψηλότερες τάσεις. Η φάση του χειροκίνητου επανασχεδιασμού της ΤΟ περιορίζει αυτό το πλεονέκτημα, καθώς γίνεται από άνθρωπο και ως εκ τούτου η βέλτιστη ρύθμιση της δομής και η κατανομή του υλικού δεν χρησιμοποιείται. Αυτό αναδεικνύει ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του GD, καθώς σε αντίθεση με τη ΤΟ, είναι ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος υπολογισμού της κατανομής του υλικού, με σκοπό την εξοικονόμηση του, το οποίο αποτελεί βασικό πλεονέκτημα όταν συνδυάζεται με ΑΜ που δύναται να κατασκευάσει τις οργανικές δομές που δημιουργούνται.

Συμπερασματικά, οι δύο μεθοδολογίες οδηγούν σε μεγάλη εξοικονόμηση υλικού, χρόνου και κόστους όταν συνδυάζονται με την ΑΜ. Ωστόσο, στο πεδίο εφαρμογής της ΑΜ, το GD είναι ο ιδανικός συνδυασμός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο γενετικός σχεδιασμός οργανικών και πολύπλοκων γεωμετριών μπορεί να ικανοποιηθεί καλύτερα με την ΑΜ επιτρέποντας ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών και δομών που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις, ενώ παράλληλα

εξοικονομείται πολύ υλικό σε σύγκριση με τα σχέδια της TO. Αυτό οφείλεται κυρίως στη έλλειψη ενός αρχικού σχεδιασμού, που επιτρέπει πολύ πιο ελεύθερες παράγοντας οργανικά σχέδια ανάλογα με τους περιορισμούς που τέθηκαν, ενώ η TO είναι πολύ πιο κατάλληλη για τη βελτίωση ενός αρχικού χειροκίνητα σχεδιασμένου εξαρτήματος. Το γεγονός αυτό αφήνει το GD στην πρώτη γραμμή της έρευνας. στο σχεδιασμό λόγω της πολύ λιγότερο περιορισμένης φύσης του σχεδιασμού που επιτρέπει σε ένα εξάρτημα πολύ μεγαλύτερη ελευθερία, επιτυγχάνοντας με φυσικό τρόπο το βέλτιστο σχεδιασμό του, όταν οι κατάλληλοι περιορισμοί έχουν εφαρμοστεί. (James COULTHARD, Chang Jiang WANG, 2022)

2.6.3 Συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization για το Rocker ανάρτησης. Στην συγκεκριμένη μελέτη, ερευνήθηκαν οι δυνατότητες του GD και της TO πάνω σε ένα Rocker μίας ανάρτησης αγωνιστικού αυτοκινήτου. Το Rocker δέχεται δυνάμεις από τον ωστήρα ($F_{pushrod}$), την μπάρα αντιστρεπτικής δοκού (F_{ARB}) και την δύναμη από το ελατήριο της ανάρτησης (F_{spring}). Για τις ανάγκες της μελέτης DD μοντελοποιήθηκε η σύνδεση του Rocker με τα παραπάνω στοιχεία. Η μάζα του ήταν στα 0,025 Kg και χρησιμοποιήθηκε αλουμίνιο 7075-T6. Και στο GD και στη TO χρησιμοποιήθηκαν ίδια κριτήρια, περιορισμών και φορτίσεων, ώστε να επιτευχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

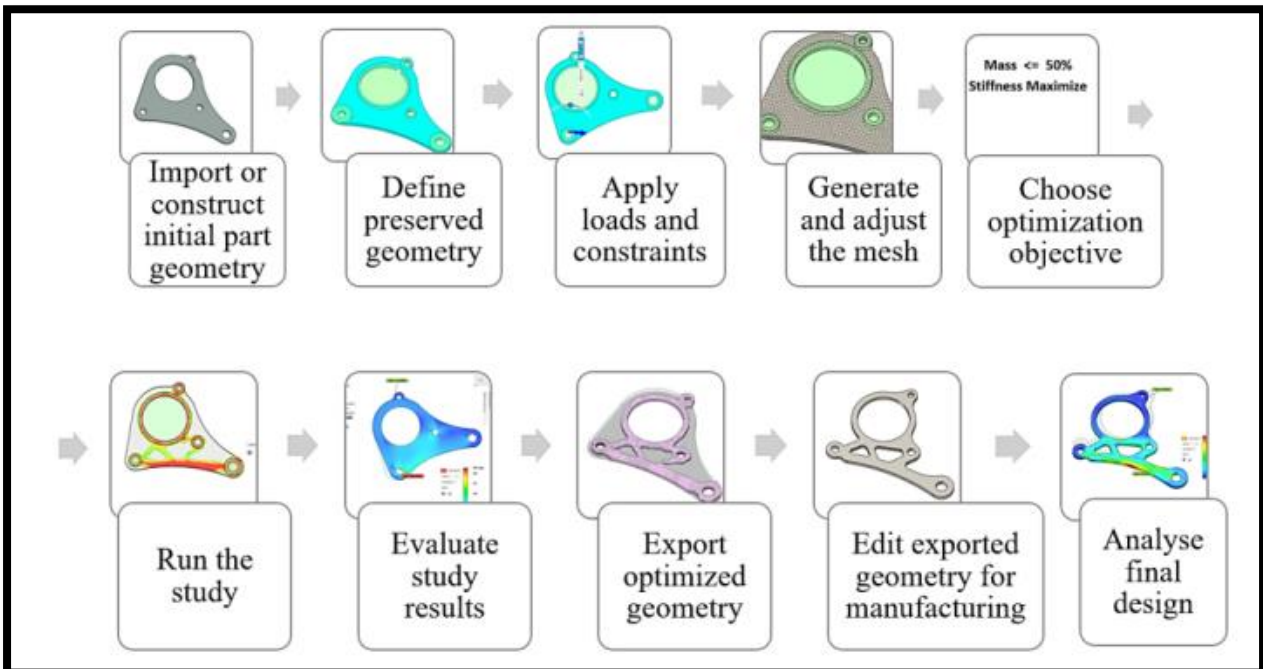


Εικόνα 24: Οι δυνάμεις που επιδρούν στο Rocker της ανάρτησης.

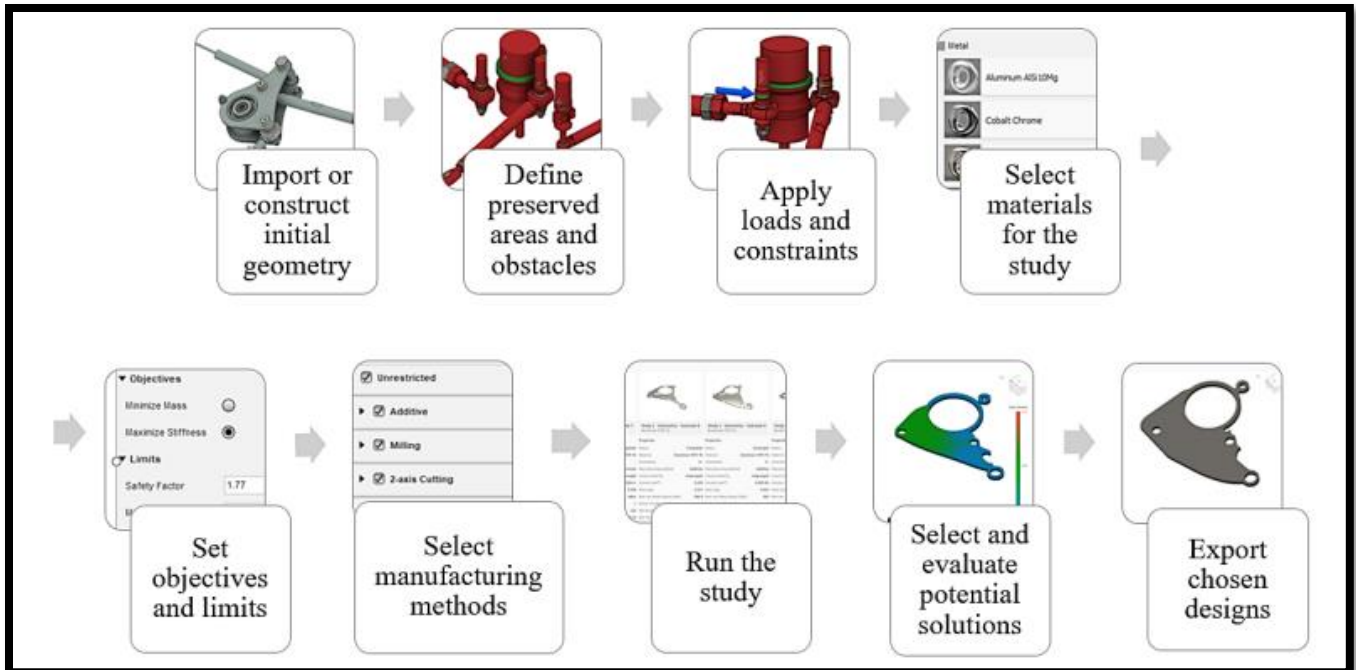
Για την TO, χρησιμοποιήθηκε το Fusion 360 της Autodesk. Αρχικά, ένα μοντέλο STEP του αρχικού σχεδίου του Rocker εισήχθη στο περιβάλλον προσομοίωσης. Το συγκεκριμένο αρχείο αντιπροσωπεύει τα εξωτερικά όρια του χώρου σχεδιασμού, πράγμα που σημαίνει ότι ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός θα είναι εντός αυτού του αρχικού όγκου. Έπειτα πρέπει να ανατεθεί ένα υλικό για τη μελέτη. Δεύτερον, είναι απαραίτητο να οριστούν οι διατηρημένες γεωμετρίες (Preserve Geometry), που είναι συνήθως τα μέρη που βρίσκονται στη θέση των συνδέσεων με άλλα στοιχεία. Ένα απλουστευμένο μοντέλο φορτίου εφαρμόζεται στο εξάρτημα ορίζοντας φορτία και δομικούς περιορισμούς. Στη συνέχεια μπορεί να δημιουργηθεί το πλέγμα, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί περαιτέρω τοπικά ώστε να ταιριάζει καλύτερα στα επιθυμητά

αποτελέσματα. Ο σχεδιασμός μπορεί να βελτιστοποιηθεί σύμφωνα με έναν από τους δύο στόχους: ελαχιστοποίηση της μάζας (minimize mass) ή της μεγιστοποίησης της δυσκαμψίας (maximize stiffness), προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η χρήση υλικών με παράλληλη διατήρηση της απαιτούμενης αντοχής. Ο στόχος του σχεδιασμού ήταν η μείωση της μάζας έως και 50% της αρχικής και η μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας.

Το GD, το οποίο δεν αφαιρεί υλικό από έναν μέγιστο όγκο, όπως η TO, αλλά δημιουργεί την γεωμετρία προσθετικά, συνδέοντας τις περιοχές διατηρημένης γεωμετρίας και αποφεύγοντας τις γεωμετρικές-εμπόδια (Obstacle Geometry). Επίσης, μπορεί να συμπεριλάβει στην μελέτη πολλά διαφορετικά υλικά και τεχνικές παραγωγής ταυτόχρονα. Παράλληλα, μπορεί να τεθεί σαν στόχος μελέτης, είτε η μείωση της μάζας, είτε η μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Δεδομένου ότι το πρόγραμμα ήδη λαμβάνει υπόψιν και τους περιορισμούς παραγωγής, δεν χρειάζεται και περαιτέρω επεξεργασία των σχεδίων.



Εικόνα 25: Ροή εργασιών της Topology Optimization. (D. Vlah , R. Žavbi and N. Vukašinić, 2020).



Εικόνα 26: Ροή εργασιών του Generative Design. (D. Vlah , R. Žavbi and N. Vukašinić, 2020).

Συμπερασματικά, το GD κατάφερε να χρησιμοποιήσει 4 διαφορετικά υλικά, 4 διαφορετικές μεθόδους παραγωγής, σε αντίθεση με την TO που χρησιμοποίησε ένα μόνο υλικό και δεν έλαβε υπόψιν καμία μέθοδο παραγωγής, με αποτέλεσμα να χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία του τελικού σχεδίου της ώστε αυτό να μπορεί να κατασκευαστεί. Ακόμα, προέκυψε ένα Πλέγμα σώματος, (Mesh Body) και όχι στερεό σώμα (Solid Body) όπως στο GD. Η μελέτη της TO, διήρκεσε 2 λεπτά και κατάφερε να μειώσει την μάζα κατά 45%, σε αντίθεση με το GD, η μελέτη του οποίου διήρκεσε 2.5 ώρες και μείωσε την μάζα κατά 32%.

Μειονεκτήματα που παρατηρήθηκαν όσον αφορά το GD:

- Μερικά σχέδια αποτελούνταν από μη λειτουργικές περιοχές όπου το πάχος του υλικού ήταν πολύ μικρό.
- Σπάνια συμπερίληψη πρόσθετων σπών στη δομή, με αποτέλεσμα την υπερβολική κατανομή του υλικού.
- Ήταν διαθέσιμες μόνο λίγες μέθοδοι παραγωγής, για επιλογή ως περιορισμούς στην μελέτη.
- Απαιτεί πολύ υπολογιστική δύναμη, οι μελέτες διαρκούν αρκετές ώρες.

(D. Vlah , R. Žavbi and N. Vukašinić, 2020) (D. Vlah , R. Žavbi and N. Vukašinić, 2020)

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ.

3.1 Περιγραφή της ερευνητικής προσέγγισης και σχεδιασμού.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί μια συγκριτική μελέτη Generative Design και Topology Optimization στις μηχανικές ιδιότητες τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμίων. Γι' αυτό το λόγο, στην βιβλιογραφική ανασκόπηση καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε να αναλυθεί το Generative Design και το Topology Optimization, καθώς και οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια. Από την βιβλιογραφική έρευνα, καθίσταται σαφές ότι το Generative Design βρίσκεται σε αρκετά πρώιμο στάδιο ερευνητικά, σε σημείο που δεν δίνεται καθαρά ο ορισμός του, διαπιστώθηκε ότι η επιστημονική κοινότητα εκτελεί πειράματα σύγκρισης των δύο αυτών τεχνολογιών και ότι τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα παρουσιάζουν μια ανισοτροπία, η οποία δημιουργεί περαιτέρω δυσκολίες στην χρήση τους στην παραγωγή. Επιπρόσθετα, γίνεται φανερό ότι η προσθετική κατασκευή μελετάται αρκετά ως μία πολλά υποσχόμενη και αναπτυσσόμενη τεχνολογία και σε πολλά άρθρα επαινείται ο συνδυασμός αυτής με το Generative Design αλλά και με το Topology Optimization. Με βάση τα παραπάνω, σκοπός της συγκεκριμένης έρευνας είναι: 1. Η σύγκριση του GD και του TO ώστε να αναδειχθεί ποια από τις δύο τεχνολογίες παράγει δοκίμια με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, 2. Να προταθεί τρόπος ο οποίος θα επιτρέπει στα τρισδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια να προσομοιάζουν τις πραγματικές τους μηχανικές ιδιότητες στα πλαίσια του Software και θα συνδυαστεί με την τεχνολογία του Topology Optimization.

Πρόκειται για μία πρωτογενή έρευνα, καθώς δεν θα σταθεί μόνο στα πλαίσια της βιβλιογραφίας και την ανάλυση αυτής, αλλά θα ληφθούν δεδομένα από Software και θα ακολουθήσει ανάλυση και περιγραφή αυτών. Στην βιβλιογραφική ανασκόπηση έχουν αναλυθεί οι έννοιες που πραγματεύεται ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν πιο κατανοητή. Στα πλαίσια της εξυπηρέτησης του σκοπού γίνεται η υπόθεση ότι εφόσον τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια παρουσιάζουν ανισοτροπία, δημιουργώντας ορθοτροπικό υλικό και εισάγοντας αυτό στο Software, θα παράγει αξιόλογα αποτελέσματα τα οποία θα προσομοιάζουν όσο το δυνατόν γίνεται τις πραγματικές συνθήκες. Λοιπές υποθέσεις μικρότερης σημασίας που γίνονται, θα αναλύονται στα συγκεκριμένα σημεία της ανάλυσης όπου συνέβησαν.

3.2 Περιγραφή των ερευνητικών μεθόδων και διαδικασιών.

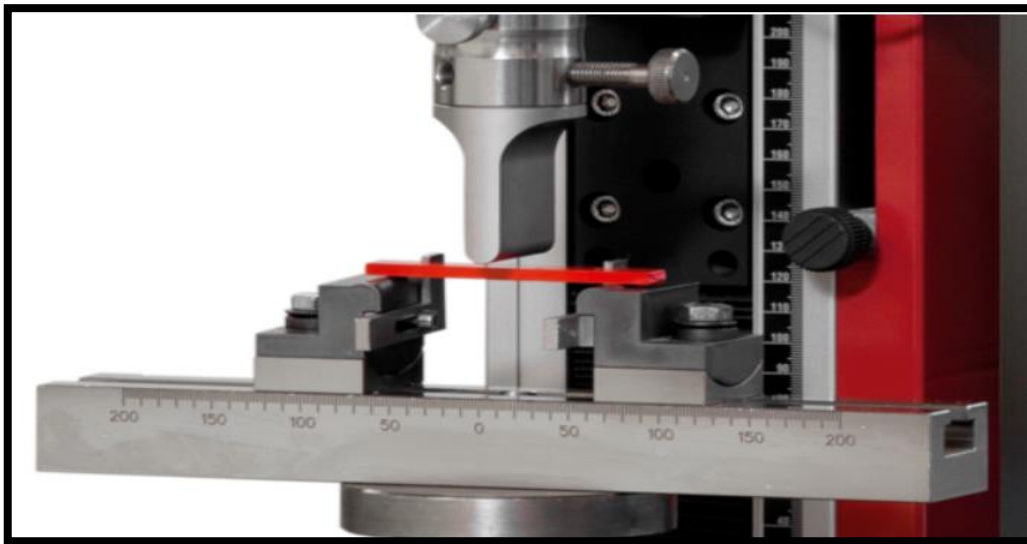
Για την επίτευξη της συγκριτικής μελέτης της διπλωματικής θα χρησιμοποιηθεί το Fusion 360 της Autodesk. Σε αυτό αρχικά θα σχεδιαστούν τα δοκίμια κάμψης και στρέψης. Σε Δεύτερο στάδιο, θα γίνει η μοντελοποίηση και θα τρέξουν οι μελέτες Generative Design και Topology Optimization, χρησιμοποιώντας ίδιες οριακές συνθήκες και θα προκύψουν κάποια παράγωγα σχέδια. Αυτά τα σχέδια θα συγκριθούν ως προς την συνολική μάζα που τους αφαιρέθηκε. Σε τρίτο στάδιο, οι επιλεγμένες γεωμετρικές που προέκυψαν θα εισαχθούν στο πρόγραμμα CAE όπου και θα συγκριθούν ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Για την επίτευξη της προσέγγισης της ανισοτροπίας των τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Ansys Workbench. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας δεδομένα για την μηχανική συμπεριφορά του PA12 αναλόγως με την τοποθέτηση του στο κρεβάτι του εκτυπωτή, θα δημιουργηθεί ορθοτροπικό υλικό, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ανά άξονα. Σε δεύτερο χρόνο, θα σχεδιαστούν οι γεωμετρίες στρέψης και κάμψης με την βοήθεια του Ansys Spaceclaim και έπειτα θα ακολουθήσει η μοντελοποίηση αυτών με την βοήθεια του Ansys Mechanical. Επειδή το Topology Optimization του συγκεκριμένου προγράμματος δουλεύει με compliance θα πραγματοποιηθεί αρχικά η μοντελοποίηση και το τρέξιμο της μελέτης στατικής καταπόνησης. Έπειτα, θα ακολουθήσει η μελέτη του Topology Optimization. Τέλος, οι βελτιστοποιημένες τοπολογικά γεωμετρίες θα τρέξουν πάλι σε μελέτη στατικής καταπόνησης και θα ακολουθήσει σύγκριση όλων των βελτιστοποιημένων τοπολογικά γεωμετριών ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

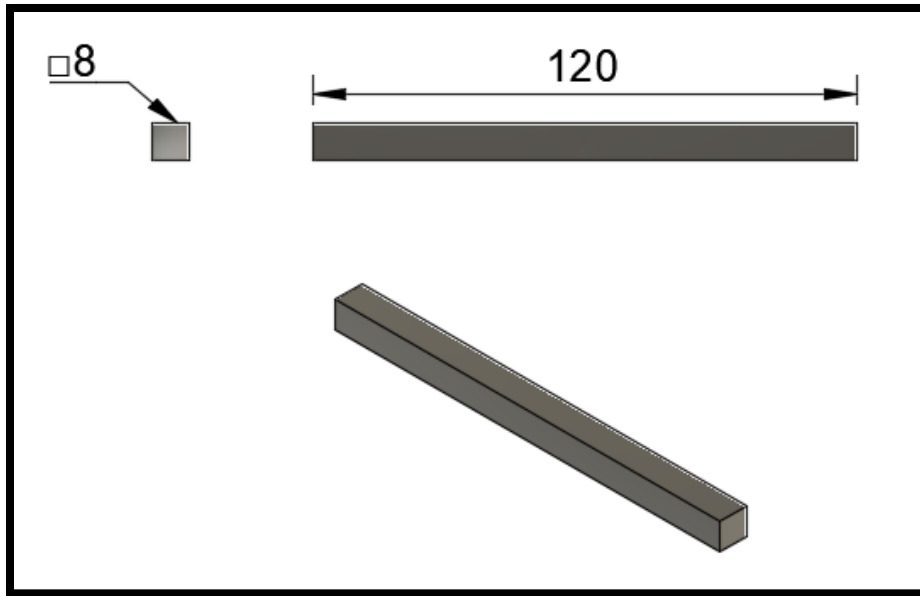
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του δοκιμίου κάμψης και της μοντελοποίησης αυτού.

Σε αυτό το στάδιο της διπλωματικής θα χρησιμοποιηθεί ένα τυποποιημένο δοκίμιο κάμψης. Οι διαστάσεις της ράβδου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 28** θα είναι 8mm * 8mm στην διατομή αυτής, ενώ το μήκος της θα είναι 120 mm. Για τις ανάγκες του πειράματος, θα προσομοιωθεί μία κάμψη τριών σημείων. Σε μία τυπική κάμψη ράβδου τριών σημείων, δύο σημεία στο κάτω μέρος αυτής είναι σταθερά και συγκρατούν την ράβδο, στο πάνω μέρος της οποίας ασκείται μία δύναμη προς τα κάτω, κάθετα και στο κέντρο της ράβδου.

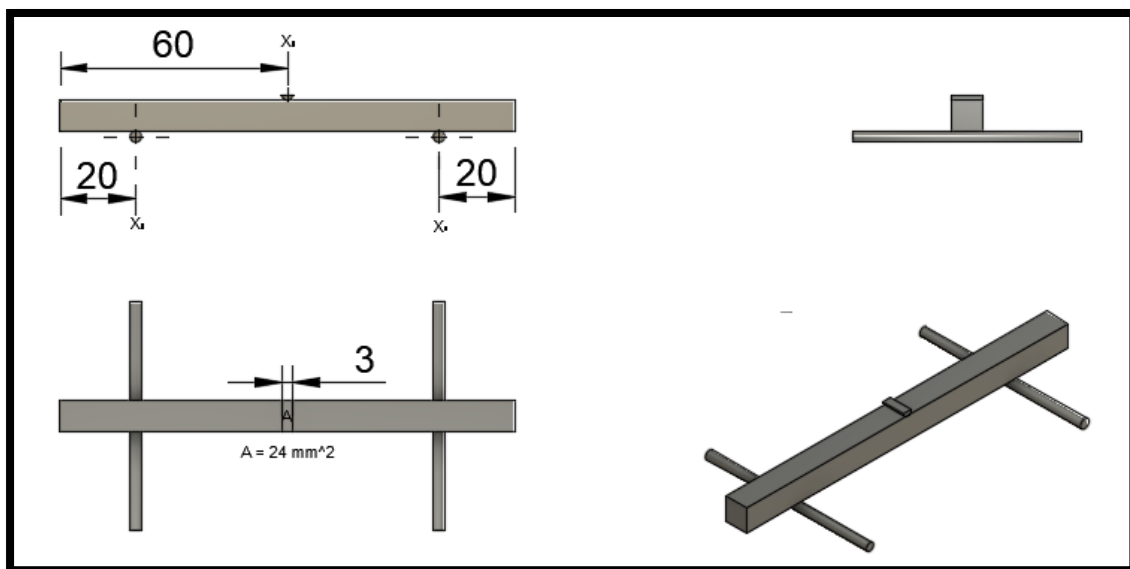


Εικόνα 27: Κάμψη τριών σημείων σε ράβδο, η καταπόνηση που θα προσομοιωθεί. (Zwick Roell, n.d.).



Εικόνα 28: Διαστάσεις ράβδου που θα χρησιμοποιηθεί για κάμψη τριών σημείων.

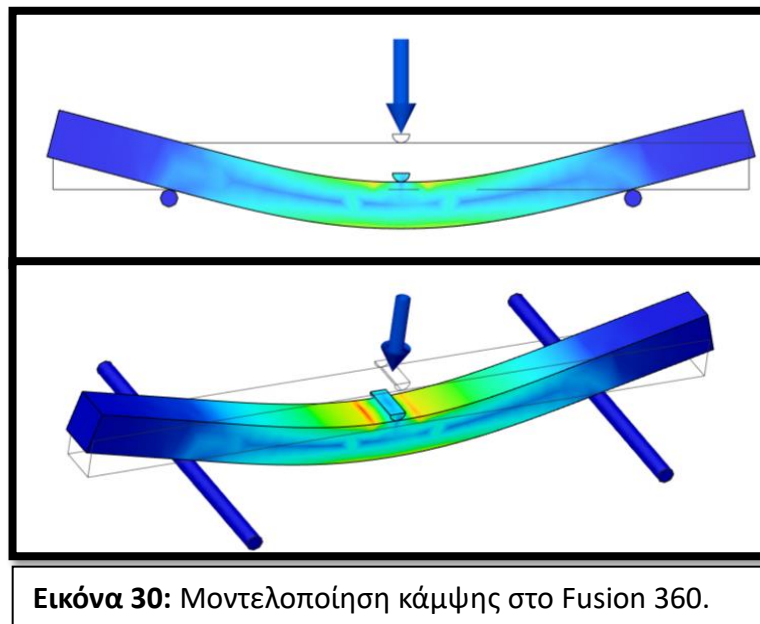
Κατά την κάμψη τριών σημείων, η ράβδος θα έχει τις στηρίξεις στα σημεία $\chi_1 = 20 \text{ mm}$ και $\chi_2 = 100 \text{ mm}$ ενώ η κάθετη φόρτιση θα της ασκείται στο σημείο $\chi_3 = 60 \text{ mm}$, πάντα θεωρώντας ως σημείο $\chi = 0$ την αρχή της ράβδου από αριστερά. Ο σχεδιασμός έγινε ακριβώς όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σημειώνεται πως η επιφάνεια του ημικύλινδρου που ασκεί την φόρτιση είναι $A = 24 \text{ mm}^2$. Οι κύλινδροι σχεδιάστηκαν σε μήκος 60 mm και κυκλική διατομή διαμέτρου 3 mm .



Εικόνα 29: Σχεδιασμός της κάμψης τριών σημείων.

Σε δεύτερο στάδιο κρίνεται απαραίτητο να βεβαιωθεί πως η μοντελοποίηση της κάμψης είναι σωστή. Με άλλα λόγια πρέπει να επιβεβαιωθεί πως ο τρόπος ο οποίος παραμορφώνεται η ράβδος είναι ο σωστός και δεν παράγεται κάποιο παράδοξο αποτέλεσμα. Γι' αυτό το σκοπό θα χρησιμοποιηθεί στο περιβάλλον του Fusion 360 και συγκεκριμένα στα Simulations, η μελέτη στατικής καταπόνησης, (Static stress analysis).

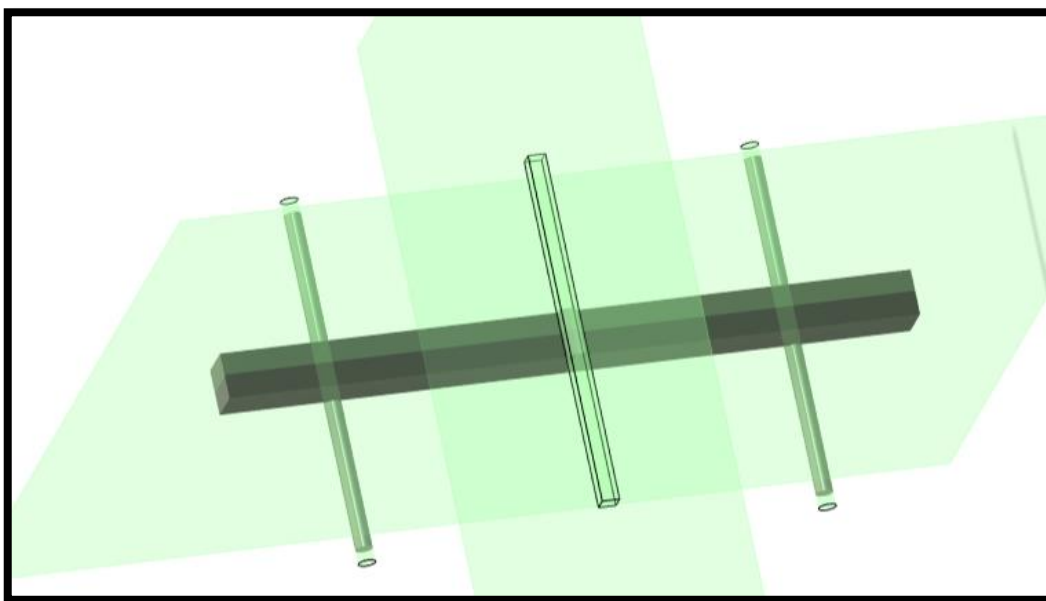
Αρχικά, ορίζεται το υλικό κατασκευής. Στις τρεις δοκούς ορίζεται ως υλικό ο χάλυβας (steel), ενώ στο δοκίμιο κάμψης ορίζεται το πολυαμίδιο, PA – 12 – Nylon. Έπειτα θα επιλεγθούν στηρίξεις σε όλες τις επιφάνειες των δύο δοκών που βρίσκονται κάτω από την ράβδο και συγκεκριμένα πακτώσεις (Fixed Constraints). Στην δοκό άνωθεν της ράβδου, η οποία είναι στρογγυλευμένη στο κάτω μέρος της, θα επιτραπεί μόνο η κάθετη κίνηση. Έπειτα στην άνω επίπεδη επιφάνεια της δοκού θα ασκηθεί μία δύναμη F. Σε επόμενο βήμα, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός σωστών επαφών μεταξύ των μερών της συναρμογής (Contacts Sets). Το δοκίμιο κάμψης κατά την καταπόνηση οφείλει να παραμένει στην θέση του και να καμπυλώνεται προς τα κάτω, όσο παράλληλα γλιστράει συμμετρικά πάνω στις δύο πακτωμένες δοκούς. Παράλληλα, η δοκός που βρίσκεται άνωθεν της ράβδου, κινείται προς τα κάτω και διατηρώντας επαφή με το σημείο που άγγιζε πριν ξεκινήσει η καταπόνηση. Το πλέγμα (mesh) διατηρήθηκε με βάση τις προεπιλογές του προγράμματος στο 10%.



Στην **Εικόνα 30**, η αρχική μορφή της ράβδου είναι το σκιαγραφημένο περίγραμμα, ενώ η μορφή που παίρνει μετά την καταπόνηση είναι η χρωματισμένη. Παρατηρείται ότι η κάμψη βαίνει ομαλά και όπως θα περιμέναμε να συμβεί επομένως με αυτές τις συνθήκες μεταβαίνουμε στην βελτιστοποίηση της τοπολογίας.

4.1.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Topology Optimization.

Έχοντας πλέον βεβαιωθεί πως η κάμψη μοντελοποιείται σωστά, σε επόμενο βήμα θα μοντελοποιηθεί η βελτιστοποίηση τοπολογίας, χρησιμοποιώντας τα ίδια Contact Sets, στηρίξεις και υλικό. Στο περιβάλλον των Simulations επιλέγεται η λειτουργία Shape Optimization. Αρχικά, πρέπει να οριστεί το σώμα το οποίο θα βελτιστοποιηθεί, ή αλλιώς το Target Body. Επιλέγεται φυσικά η ράβδος. Σε δεύτερο χρόνο, πρέπει να οριστούν οι περιοχές τις οποίες δεν πρέπει το πρόγραμμα να συμπεριλάβει για να βελτιστοποιήσει, να μην τους μειώσει την μάζα δηλαδή. Αυτές οι περιοχές ορίζονται ως διατηρητέες, με την λειτουργία Preserve Region. Πιο συγκεκριμένα, με αυτή τη λειτουργία επιλέγονται οι δύο δοκοί – στηρίξεις και τους δίνεται το οριακό σχήμα του κυλίνδρου καλύπτοντας την επιφάνεια τους. Αντίστοιχα επιλέγεται και η ημικυλινδρική δοκός. Σημειώνεται πως αυτές οι περιοχές φαίνονται σκιαγραφημένες. Έπειτα, δίνονται στην γεωμετρία κάποιοι άξονες συμμετρίας με την λειτουργία Symmetry Planes. Επιλέγεται λοιπόν η γεωμετρία να είναι συμμετρική με βάση κάποιες επιφάνειες κάθετα της ράβδου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 31**.



Εικόνα 31: Μοντελοποίηση κάμψης και χρήση συμμετρικών επιφανειών (Symmetry Planes) και διατηρητέων περιοχών (Preserve Regions).

Για την ολοκλήρωση των ρυθμίσεων της βελτιστοποίησης τοπολογίας πρέπει να οριστεί και ο στόχος που είναι επιθυμητός να πετύχει το πρόγραμμα. Αναλυτικότερα, δίνεται εντολή στο πρόγραμμα να διατηρήσει την μάζα μικρότερη ή ίση ιδανικά του 26,5% της αρχικής μάζας, ενώ παράλληλα, να διατηρήσει την δυσκαμψία (Stiffness) στις υψηλότερες τιμές που είναι δυνατό. Να διατηρήσει δηλαδή την ικανότητα του σώματος να επανέρχεται στην αρχική του μορφή ακόμη και έπειτα από την εφαρμογή δυνάμεων σε αυτό. Οι στηρίξεις διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές της μελέτης στατικής καταπόνησης. Το συγκεκριμένο ποσοστό της μάζας δόθηκε με

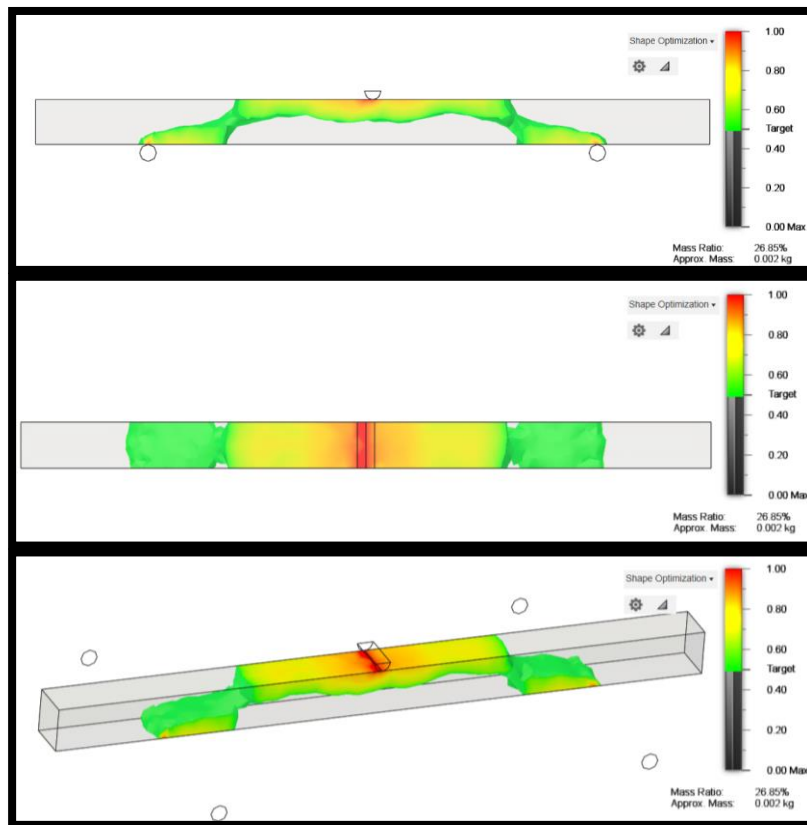
γνώμονα το ποσοστό το οποίο κατάφερε κατάφεραν να διατηρήσουν τα μοντέλα που παράχθηκαν με Generative Design, το οποίο κυμαίνονταν από 20% μέχρι 25%.

Για τις ανάγκες του πειράματος πραγματοποιήθηκε η ίδια μελέτη με τις ίδιες συνθήκες, μεταβάλλοντας ωστόσο την δύναμη που ασκείται στο σώμα. Στην πρώτη περίπτωση ασκείται μία δύναμη 135 N σε μια επιφάνεια $A = 24 \text{ mm}^3$. Δίνοντας εντολή στον Solver να λύσει την μελέτη παράγονται τα επιθυμητά αποτελέσματα. Με την βοήθεια του Slider φαίνεται πως το πρόγραμμα πέτυχε τον στόχο του να διατηρήσει την μάζα κάτω από 26,5%. Παρόλα αυτά παρατηρείται κάποια ασυνέχεια στην δομή, η οποία μειώνοντας κι άλλο την μάζα τείνει να διασπαστεί.



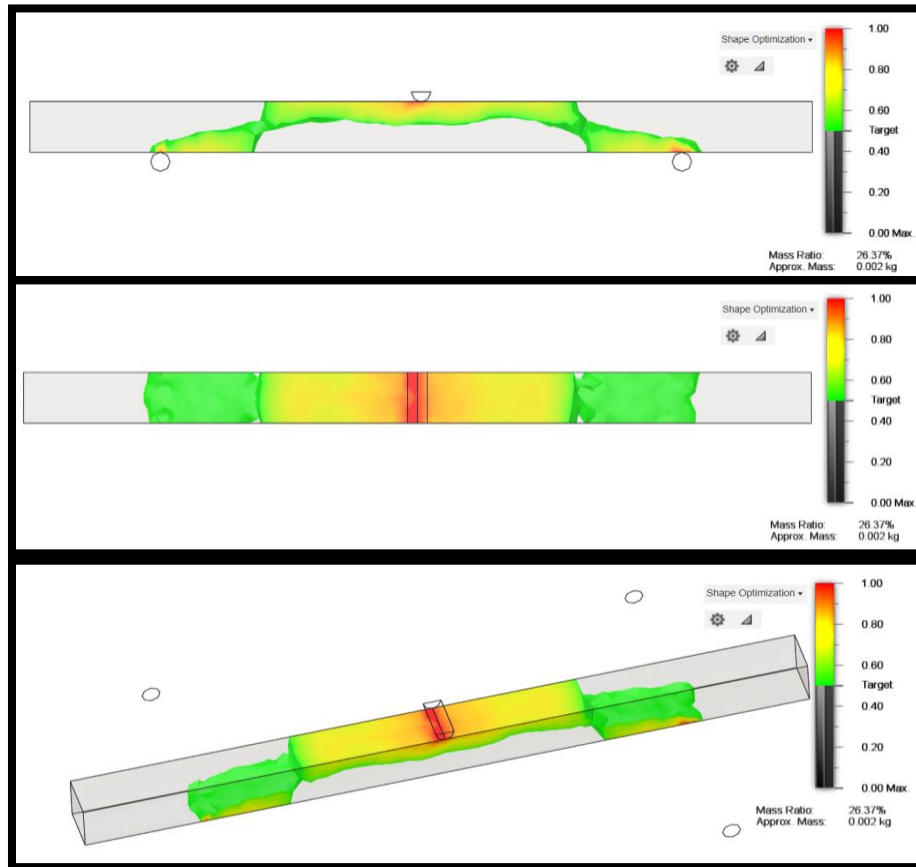
Εικόνα 32: Ασυνέχεια της δομής με μικρή μείωση της διατηρητέας μάζας.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα με μικρή μείωση της διατηρητέας μάζας υπάρχει ασυνέχεια στην δομή, η οποία επισημαίνεται με κύκλο, επομένως θα διατηρηθεί ελάχιστη επιπλέον μάζα όταν η βελτιστοποιημένη γεωμετρία εισαχθεί στο CAE, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα λόγω πολύ μικρού πάχους σε ορισμένα σημεία της γεωμετρίας. Θα επιλεχτεί λοιπόν ένα ποσοστό ελάχιστα πιο πάνω από το 26,5% και θα προβληθεί η δομή του περιφερειακά. Επίσης παρατηρείται ότι η γεωμετρία που προκύπτει είναι πιο τραχιά και όχι τόσο ομαλή, παρουσιάζοντας ακμές σε πολλά σημεία.



Εικόνα 33: Περιφερειακή οπτική της βελτιστοποιημένης τοπολογίας με διατηρημένη μάζα 26,85%, για δύναμη 135 N.

Στην δεύτερη περίπτωση ασκήθηκε μία δύναμη 120 N στην ίδια επιφάνεια $A = 24 \text{ mm}^3$. Είναι λογικό ότι λόγω της μικρότερης δύναμης θα εκπληρωθεί ο στόχος του προγράμματος να παράξει μια γεωμετρία με διατηρητέα μάζα γύρω στο 26,5%. Το ποσοστό αυτό επιλέχτηκε πάλι με γνώμονα το πόσο κατάφεραν να μειώσουν την μάζα τα βελτιστοποιημένα με Generative Design μοντέλα. Προβάλλεται λοιπόν περιφερειακά η βελτιστοποιημένη τοπολογικά γεωμετρία.



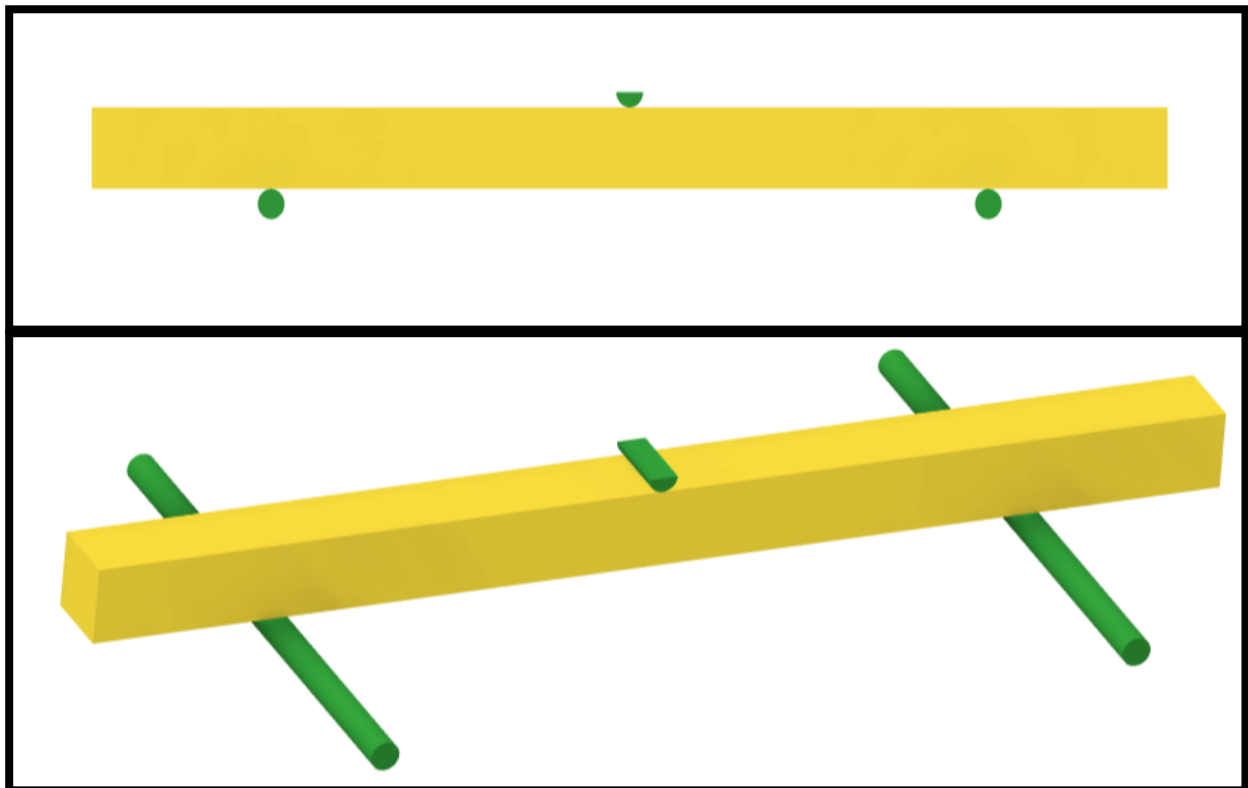
Εικόνα 34: Περιφερειακή οπτική της βελτιστοποιημένης τοπολογίας με διατηρημένη μάζα 26,37%, για δύναμη 120 N.

4.1.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Generative Design.

Α΄ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

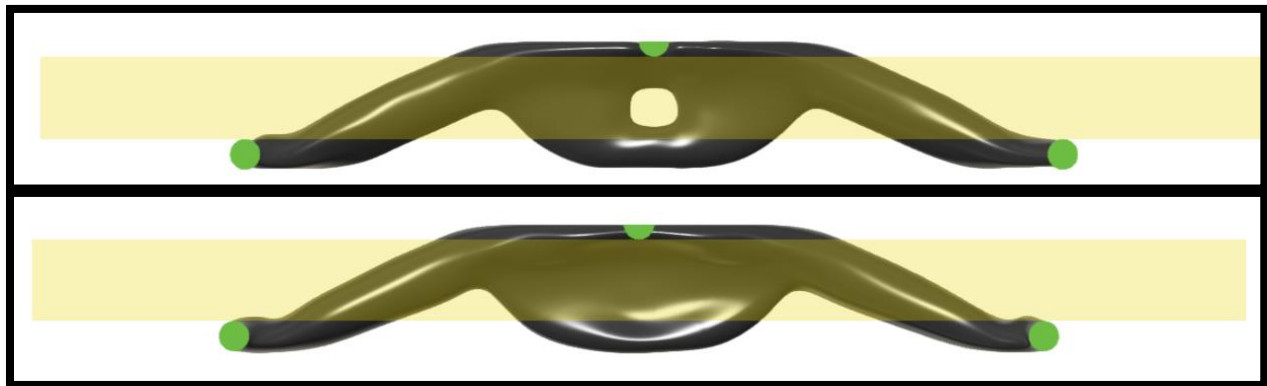
Κατά την μοντελοποίηση της κάμψης για Generative Design, αρχικά καταβλήθηκε προσπάθεια για να ακολουθηθεί η προσέγγιση με τις δοκούς, ακριβώς όπως στο Topology Optimization. Ως υλικό χρησιμοποιείται και σε αυτή τη περίπτωση το PA -12 -Nylon. Σε δεύτερο χρόνο υπάρχει δυνατότητα της πραγματοποίησης της μελέτης με περιορισμούς όσον αφορά τον τρόπο που θα μπορεί να παραχθεί το βελτιστοποιημένο μοντέλο. Π.χ. μπορεί να τεθεί σαν περιορισμός, ότι τα μοντέλα που θα προκύψουν από την μελέτη θα μπορούν να κατασκευαστούν με προσθετική κατασκευή, με φρεζάρισμα, με τόρνο κ.ο.κ. Οι επιλογές κυμαίνονται σε κατασκευή χωρίς περιορισμούς (Unrestricted), δηλαδή θα βρεθεί το βέλτιστο μοντέλο το οποίο θα έχει παραχθεί

χωρίς να έχει ως γνώμονα την δυνατότητα κατασκευής με κάποιο συγκεκριμένο τρόπο. Με Προσθετική κατασκευή και πιο συγκεκριμένα ποιος να είναι ο προσανατολισμός του αντικειμένου κατά την κατασκευή του (Άξονες: X+, X-, Y+, Y-, Z+, Z-) (Additive), κατασκευή μέσω φρεζαρίσματος όπου πάλι υπάρχει δυνατότητα επιλογής άξονα (Milling), κατασκευή με υδροκοπή ή κοπή με Laser ή με πλάσμα (2-axis Cutting) και τέλος με χύτευση. Για τις ανάγκες της διπλωματικής που αποσκοπεί και σε μελλοντική εκτύπωση των μοντέλων, ο παραγωγικός περιορισμός που θα τεθεί στο Generative Design, θα είναι χωρίς περιορισμούς, καθώς και όλους τους άξονες της προσθετικής κατασκευής. Στόχος λοιπόν του Generative Design είναι να ελαχιστοποιήσει την μάζα διατηρώντας ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2. Το αρχικό σχήμα, (Starting Shape), είναι η ράβδος που συμβολίζεται με κίτρινο χρώμα στην **Εικόνα 35**, ενώ οι δοκοί στις οποίες έχουν τεθεί στηρίξεις και δυνάμεις θα είναι σώματα τα οποία δεν θα βελτιστοποιήσει το πρόγραμμα, (Preserve Geometry). Σημειώνεται ότι αυτή η εντολή υποχρεωτικά θέτει τα σώματα ως μέρος της συνολικής βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, χωρίς να τους μεταβάλλει το σχήμα. Πλέον που υπάρχει η δυνατότητα, χρησιμοποιούνται οι ίδιες οριακές συνθήκες που στηρίξεων και φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν στην βελτιστοποίηση τοπολογίας.



Εικόνα 35: Μοντελοποίηση του δοκιμίου κάμψης για Generative Design (Α' προσέγγιση).

Οι μελέτες λύνονται για δύο φορτίσεις όπως και στην περίπτωση για βελτιστοποίηση τοπολογίας, για 120 N και για 135 N. Εν τέλει παράγονται 7 αποτελέσματα για την κάθε μελέτη στο σύνολο 14. Ωστόσο, σε κάθε σχέδιο παρατηρείται ένα πολύ σημαντικό λάθος το οποίο απέχει από την σωστή μοντελοποίηση της κάμψης.



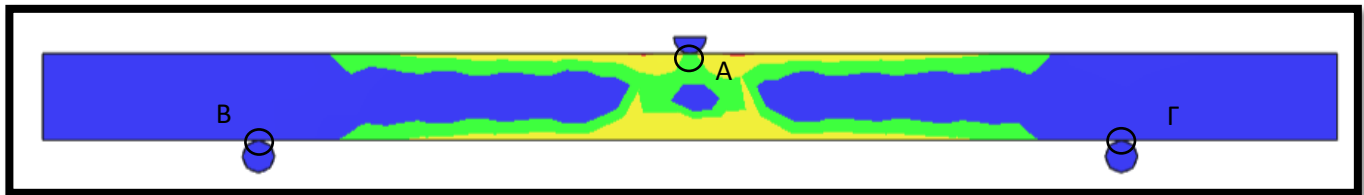
Εικόνα 36: Παράγωγα Generative Design, για 120 και 135 N αντίστοιχα.

Στην εικόνα φαίνονται οι βελτιστοποιημένες γεωμετρίες. Με κίτρινο σκιαγραφημένο χρώμα φαίνεται το αρχικό σχήμα της ράβδου, ενώ με πράσινο χρώμα φαίνονται οι δοκοί. Παρατηρείται ότι η βελτιστοποιημένη γεωμετρία ξεπέρασε τα πλαίσια της αρχικής ράβδου, ενώ οι περιοχές διατήρησης γεωμετρίας, συμπεριλήφθηκαν στην βελτιστοποίηση, ενώθηκαν δηλαδή με το βελτιστοποιημένο σχέδιο διατηρώντας το σχήμα τους. Σε κάθε περίπτωση η συγκεκριμένη μοντελοποίηση δεν κρίνεται σωστή και θα πρέπει να ακολουθηθεί μία άλλη προσέγγιση.

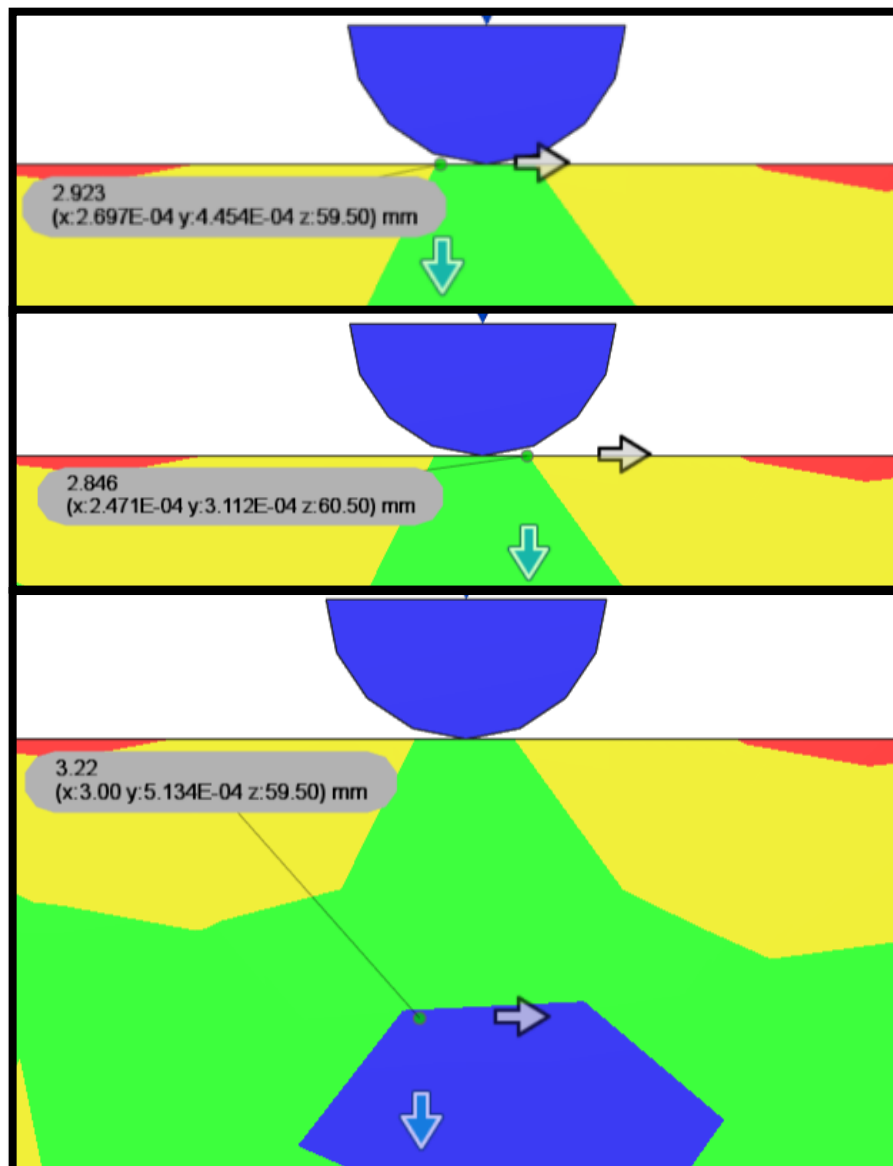
Β' ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Μια δεύτερη και πιο σωστή προσέγγιση, κρίθηκε η αποβολή των δοκών και η χρήση τριών ορθογώνιων παραλληλεπίπεδων, τα οποία θα διατηρούνταν εντός της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας και θα χρησιμοποιούνταν ως στηρίξεις και φόρτιση. Σε πρώτο στάδιο θα πραγματοποιηθεί μια μελέτη καταπόνησης ακριβώς όπως πραγματοποιήθηκε στην βελτιστοποίηση τοπολογίας. Τα ορθογώνια παραλληλεπίπεδα θα τοποθετηθούν, το ένα στο σημείο που θα ασκείται η φόρτιση και τα άλλα δύο στα σημεία που θα ασκούνται οι στηρίξεις. Για να προσεγγιστεί το πρόβλημα όσο πιο κοντά στην πραγματικότητα γίνεται, η μελέτη στατικής καταπόνησης θα χρησιμοποιηθεί ώστε να βρεθούν οι τοποθεσίες που ο συντελεστής ασφαλείας είναι υψηλός, κοντά στα τρία σημεία ενδιαφέροντος ώστε τα ορθογώνια αυτά να μην επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό σημεία που ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρός και το

πρόγραμμα θα πρέπει να βελτιστοποιήσει την συγκεκριμένη περιοχή. Θα μελετηθούν δηλαδή και θα μετρηθούν οι τρεις περιοχές A, B και Γ.

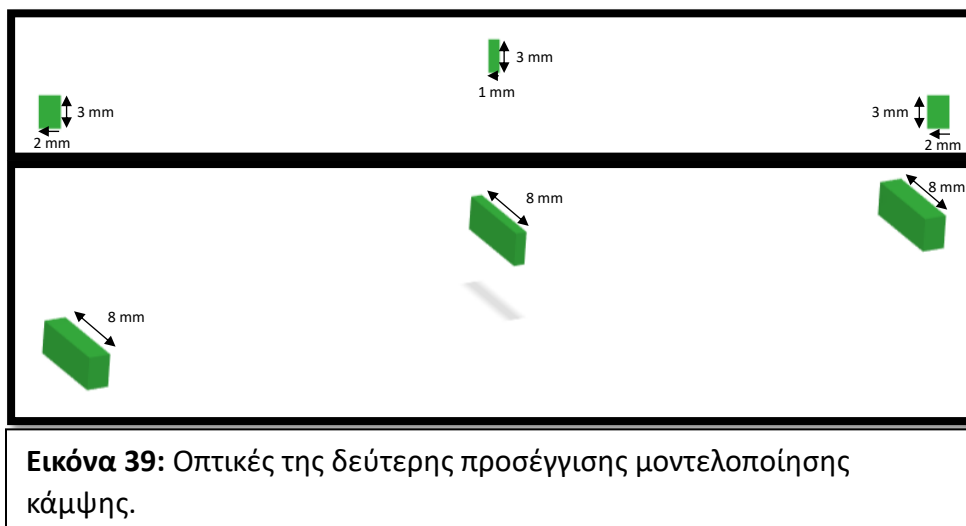


Εικόνα 37: Περιοχές μελέτης συντελεστή ασφαλείας A, B και Γ.



Εικόνα 38: Μέτρηση της A περιοχής ενδιαφέροντος.

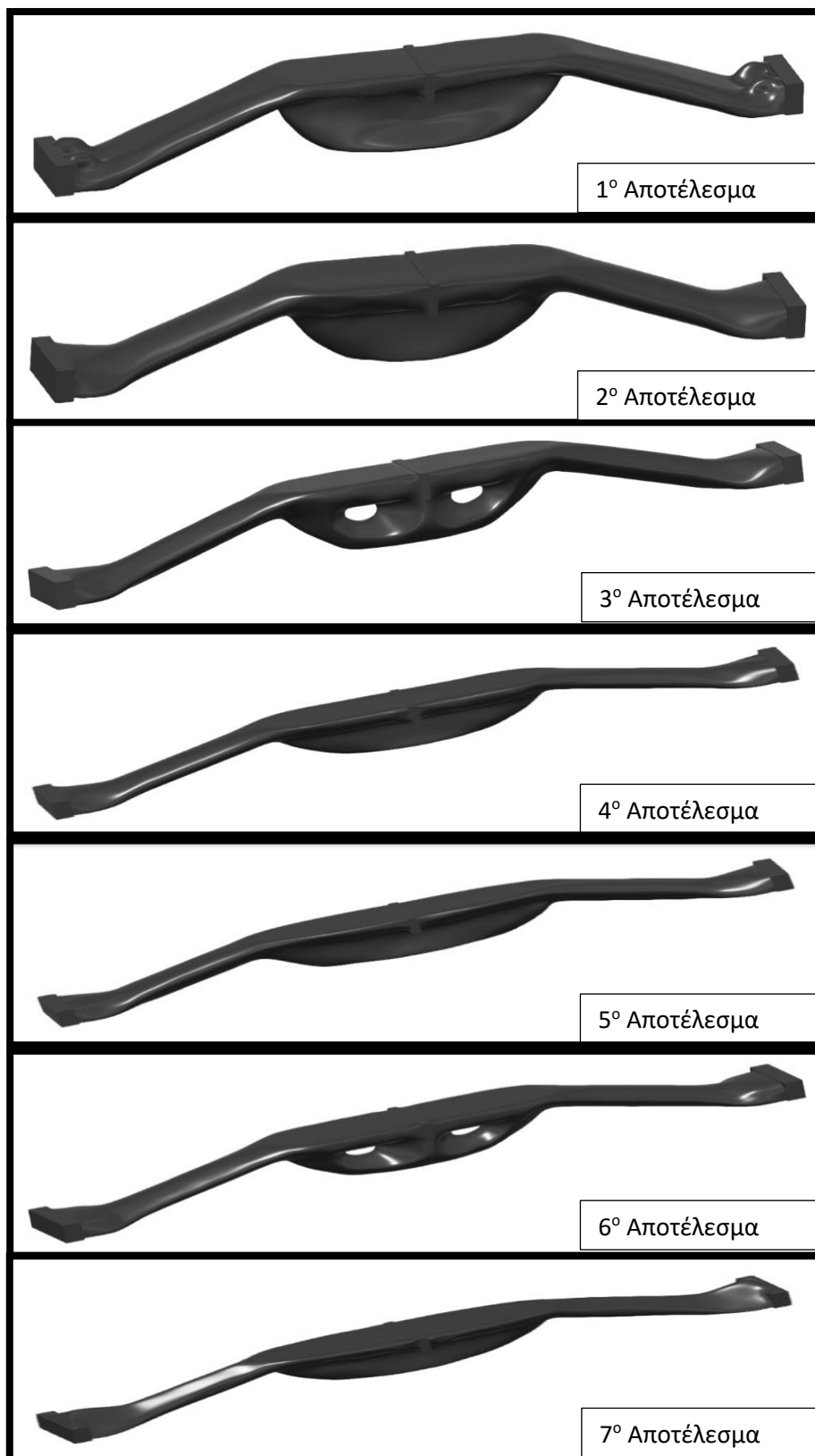
Όπως φαίνεται και από τις εικόνες, ο συντελεστής ασφαλείας στις περιοχές Β και Γ συμβολίζεται με μπλε χρώμα το οποίο σημαίνει ότι είναι άνω του 8 δηλαδή αρκετά μεγάλος οπότε δεν χρειάζεται να πραγματοποιηθεί κάποια επιπλέον μέτρηση. Ωστόσο, η περιοχή Α παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, λόγω της αλλαγής που παρουσιάζει ο συντελεστής ασφαλείας. Γι' αυτό το λόγο μετρείται και φαίνεται ότι για 1 mm στην συγκεκριμένη περιοχή και συγκεκριμένα με βάση τις συντεταγμένες, από 59,5 mm έως 60,5 mm, ο συντελεστής ασφαλείας συμβολίζεται με πράσινο δηλαδή είναι άνω του 3 και μικρότερος του 6. Επιπρόσθετα, μετρείται και το ύψος στο οποίο φαίνεται ξεκάθαρα ότι για 3 mm ο συντελεστής ασφαλείας είναι επίσης άνω του 3 και κάτω του 6. Με βάση αυτές τις μετρήσεις, δίνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης της κάμψης με την δεύτερη προσέγγιση που επιλέχτηκε.



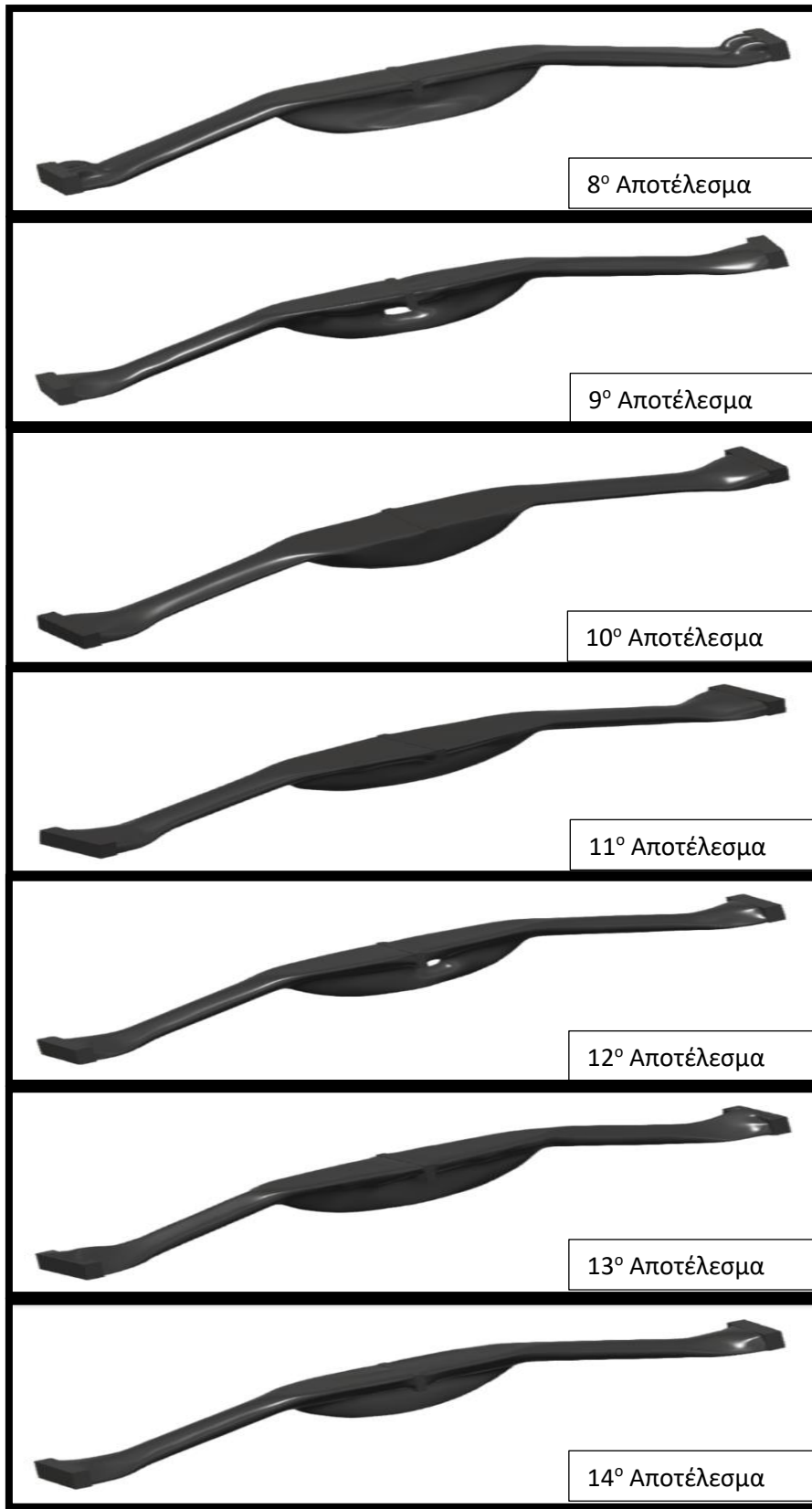
Εικόνα 39: Οπτικές της δεύτερης προσέγγισης μοντελοποίησης κάμψης.

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 39** η νέα προσέγγιση αποτελείται από τρία ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, στο κέντρο των οποίων θα τοποθετούνταν η δοκός με την αντίστοιχη φόρτιση ή στήριξη. Οι διαστάσεις του σχήματος απεικονίζονται στις εικόνες. Απεικονίζονται με πράσινο χρώμα, καθώς επιλέχθηκαν ως διατηρητέες περιοχές. Σαν αρχικό σχήμα δεν χρειάστηκε να επιλεγεί κάτι. Ο στόχος και ο τρόπος κατασκευής είναι ίδιος με την ίδια προσέγγιση, ωστόσο η φόρτιση άλλαξε. Επειδή η επιφάνεια της φόρτισης είναι πλέον 8 mm² πραγματοποιήθηκε αναγωγή και η δύναμη που θα ασκηθεί τώρα θα είναι 40 και 45 N για την πρώτη και την δεύτερη περίπτωση αντίστοιχα. Η επιφάνεια στην οποία ασκείται η δύναμη επιλέγεται ως πάκτωση με ελεύθερη μόνο την κάθετη μετατόπιση, ενώ οι επιφάνειες των στηρίξεων επιλέγονται ως πακτώσεις και δεν έχουν καμία ελευθερία μετατόπισης. Με αυτά τα δεδομένα λοιπόν πραγματοποιούνται οι μελέτες γεννητικού σχεδιασμού, οι οποίες εν τέλει παράγουν 14 βελτιστοποιημένες γεωμετρίες και συγκεκριμένα μία για κάθε επιλεγμένη μέθοδο παραγωγής,

6 για τους 6 άξονες παραγωγής με προσθετική κατασκευή και 1 για την μέθοδο χωρίς περιορισμούς. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 40: Αποτελέσματα 1^{ης} μελέτης για δύναμη 45 N.

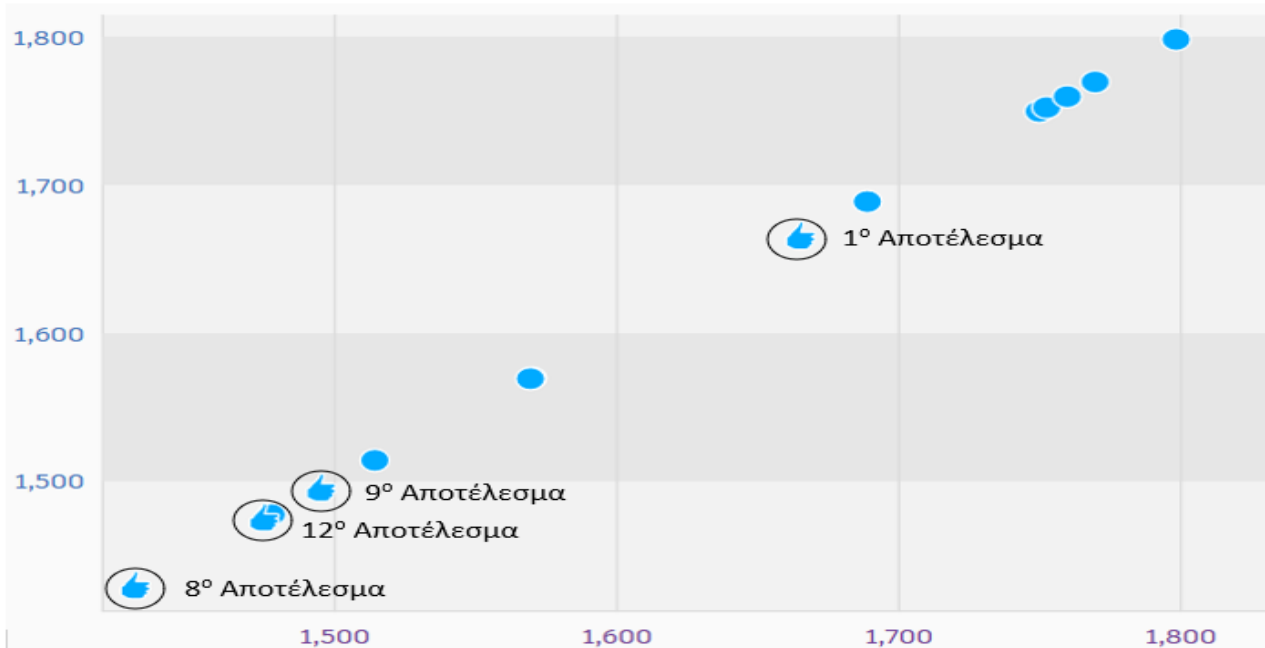


Εικόνα 41: Αποτελέσματα 2^{ης} μελέτης για δύναμη 40 N.

| A/A | Τρόπος Παραγωγής | Συμμετρικό | Προτείνεται | Ποσοστό της αρχικής μάζας (%) |
|-----------------------------|------------------|------------|-------------|-------------------------------|
| 1^η Μελέτη | | | | |
| 1 ^ο Αποτέλεσμα | Unrestricted | ΝΑΙ | ΝΑΙ | 21,68% |
| 2 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X+) | ΝΑΙ | ΟΧΙ | 22,82% |
| 3 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y+) | ΝΑΙ | ΟΧΙ | 22,91% |
| 4 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z+) | ΝΑΙ | ΟΧΙ | 23,04% |
| 5 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X-) | ΝΑΙ | ΟΧΙ | 22,78% |
| 6 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y-) | ΝΑΙ | ΟΧΙ | 23,42% |
| 7 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z-) | ΝΑΙ | ΟΧΙ | 21,99% |
| 2^η Μελέτη | | | | |
| 8 ^ο Αποτέλεσμα | Unrestricted | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 18,60% |
| 9 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X+) | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 19,46% |
| 10 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 20,44% |
| 11 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 19,72% |
| 12 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X-) | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 19,20% |
| 13 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 20,43% |
| 14 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 19,24% |

Πίνακας 1: Περίληψη αποτελεσμάτων Generative Design για κάμψη.

Παρατηρείται πως αν και προέκυψαν συνολικά 14 αποτελέσματα από την λύση της μελέτης, ο Solver δεν πρότεινε όλα τα μοντέλα παρά μόνο κάποια συγκεκριμένα για κάθε μελέτη. Παρατηρείται ότι όπως είναι φυσικό, στην 1^η μελέτη χρειάστηκε να διατηρηθεί μεγαλύτερο ποσοστό μάζας στα μοντέλα συγκριτικά με την 2^η που πρόκειται για μικρότερη δύναμη φόρτισης.



Γράφημα 1: Χάρτης αποτελεσμάτων Generative Design.

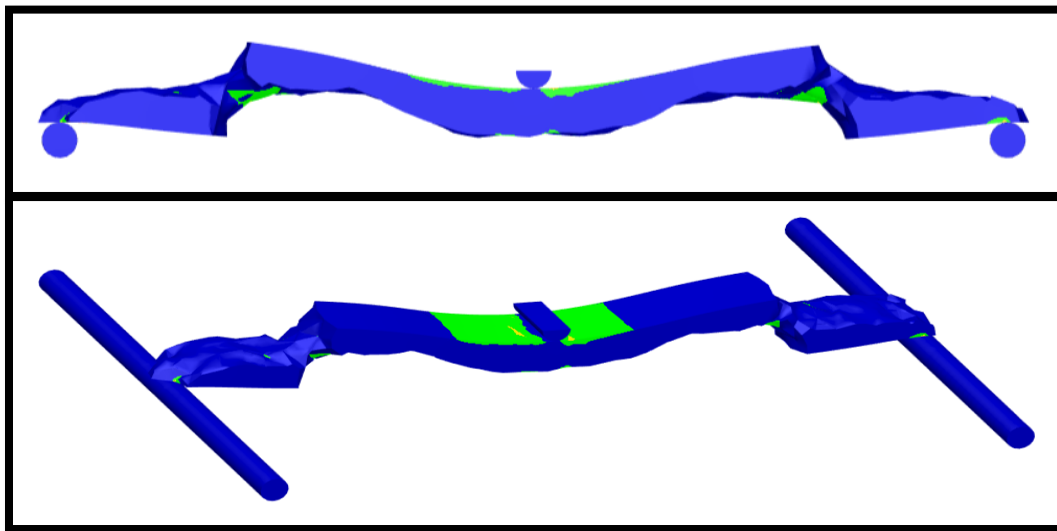
Στο **Γράφημα 1** παρουσιάζονται τα 14 συνολικά αποτελέσματα που προέκυψαν με Generative Design. Στους άξονες y και x αναπαρίστανται οι όγκοι των μοντέλων, επομένως όσο πιο αριστερά στο γράφημα βρίσκεται ένα αποτέλεσμα, τόσο περισσότερο κατάφερε να μειώσει τον συνολικό όγκο. Κάθε ένα από αυτά τα αποτελέσματα αντιστοιχεί και σε έναν διαφορετικό τρόπο παραγωγής όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 1**. Όλα τα αποτελέσματα απεικονίζονται με μπλε τελείες, ενώ αυτά τα αποτελέσματα των οποίων την τελευταία επανάληψη προτείνεται πρόγραμμα απεικονίζονται με το χεράκι με σηκωμένο αντίχειρα.

4.1.3 Μοντελοποίηση των βελτιστοποιημένων γεωμετριών για μελέτη στατικής καταπόνησης.

Για την διευκόλυνση της μετέπειτα σύγκρισης των αποτελεσμάτων, η εισαγωγή των γεωμετριών στα CAE περιλαμβάνει την πρώτη περίπτωση, στην οποία ασκείται μία δύναμη 135 N σε μία επιφάνεια 24 mm² για βελτιστοποίηση τοπολογίας και μία δύναμη 45 N σε μία επιφάνεια 8 mm² για γεννητικό σχεδιασμό, καθώς και την δεύτερη περίπτωση στην οποία ασκείται μία δύναμη 120 N σε μία επιφάνεια 24 mm² για βελτιστοποίηση τοπολογίας και μία δύναμη 40 N σε μία επιφάνεια 8 mm² για γεννητικό σχεδιασμό αντίστοιχα.

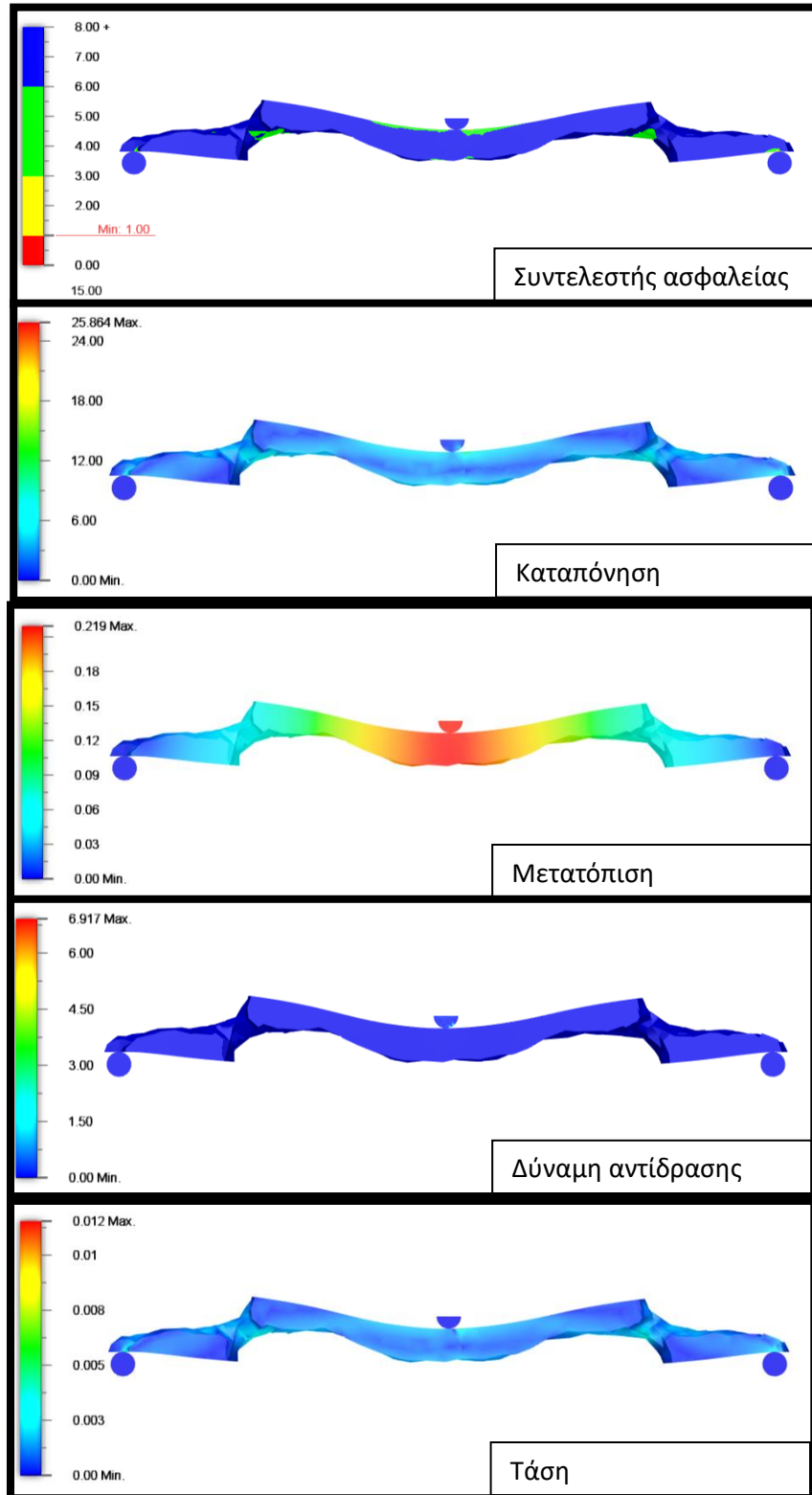
1^η Περίπτωση (135N) - Topology Optimization

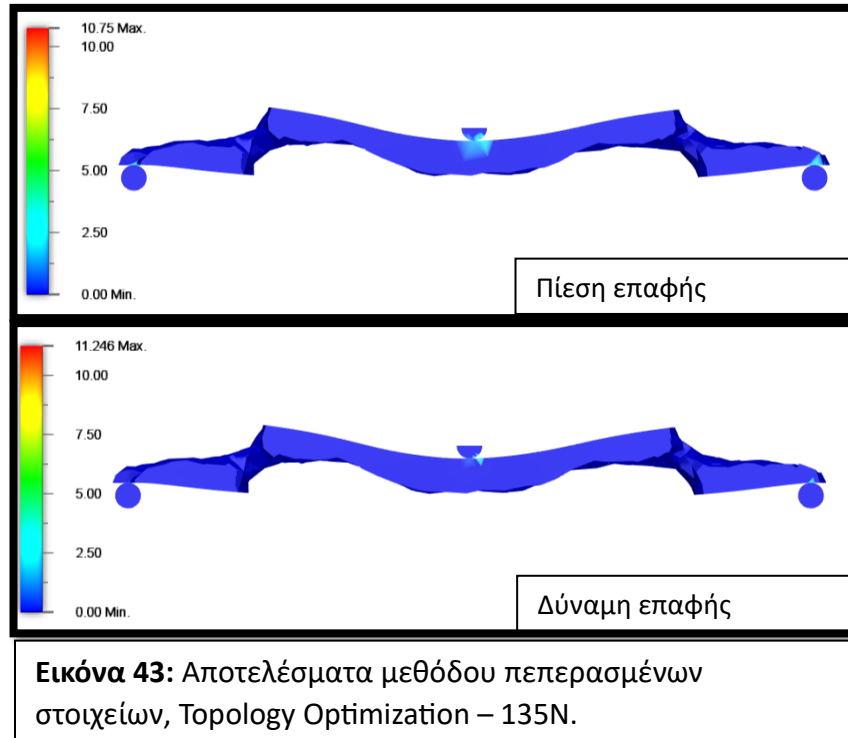
Σε πρώτο στάδιο εισάγεται με τις ίδιες οριακές συνθήκες το μοντέλο βελτιστοποίησης τοπολογίας που προέκυψε, για δύναμη 135 N σε επιφάνεια 24 mm².



Εικόνα 42: Εισαγωγή της βελτιστοποιημένης τοπολογικά γεωμετρίας σε μελέτη στατικής ανάλυσης για δύναμη 135N, με χρωματισμό, ανάλογο του συντελεστή ασφαλείας.

Κατά την εισαγωγή της φόρτισης των 135 N, παρουσιάστηκε συντελεστής ασφαλείας 0,12. Για να υπάρξει αποτελεσματική σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε αναγωγή σε συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1, οπότε κατόπιν υπολογισμών η δύναμη που ασκήθηκε ήταν ίση με 16,573 N.





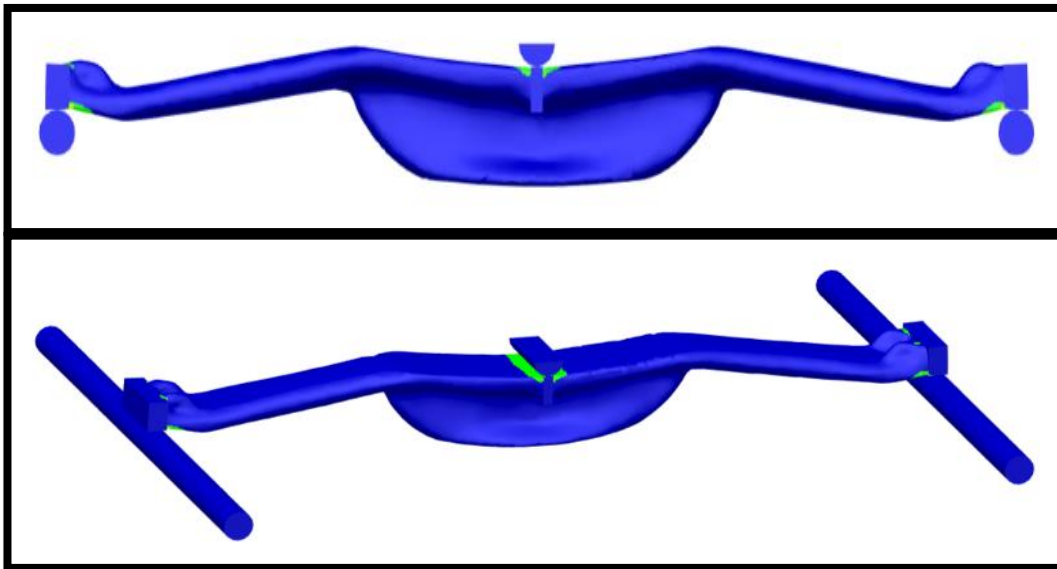
Παρατηρείται από την **Εικόνα 43** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 25,864 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 0,219 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 6,917 N, μέγιστη πίεση επαφής στα 10,75 MPa και μέγιστη τάση 0,012, τέλος η μέγιστη δύναμη επαφής είναι στα 11,246 N. Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης.

| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|-------------|------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.00 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 25.864 MPa |
| 1st Principal | -2.292 MPa | 8.078 MPa |
| 3rd Principal | -26.086 MPa | 1.155 MPa |
| Normal XX | -12.227 MPa | 3.421 MPa |
| Normal YY | -6.692 MPa | 1.61 MPa |
| Normal ZZ | -22.546 MPa | 7.98 MPa |
| Shear XY | -2.233 MPa | 1.83 MPa |
| Shear YZ | -3.038 MPa | 4.642 MPa |
| Shear ZX | -10.396 MPa | 5.853 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.219 mm |
| X | -0.003 mm | 0.219 mm |
| Y | -0.004 mm | 0.002 mm |
| Z | -0.022 mm | 0.024 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 6.917 N |
| X | -1.872 N | 1.398 N |
| Y | -1.708 N | 1.795 N |
| Z | -6.902 N | 5.708 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.012 |
| 1st Principal | -1.037E-05 | 0.006 |
| 3rd Principal | -0.013 | 8.324E-06 |
| Normal XX | -0.002 | 0.001 |
| Normal YY | -0.002 | 0.001 |
| Normal ZZ | -0.008 | 0.003 |
| Shear XY | -0.002 | 0.001 |
| Shear YZ | -0.002 | 0.004 |
| Shear ZX | -0.009 | 0.005 |
| Contact Pressure | | |
| Total | 0.00 MPa | 10.75 MPa |
| X | -8.602 MPa | 3.351 MPa |
| Y | -2.17 MPa | 1.313 MPa |
| Z | -10.396 MPa | 4.914 MPa |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 11.246 N |
| X | -3.864 N | 2.702 N |
| Y | -1.692 N | 2.004 N |
| Z | -7.106 N | 10.56 N |

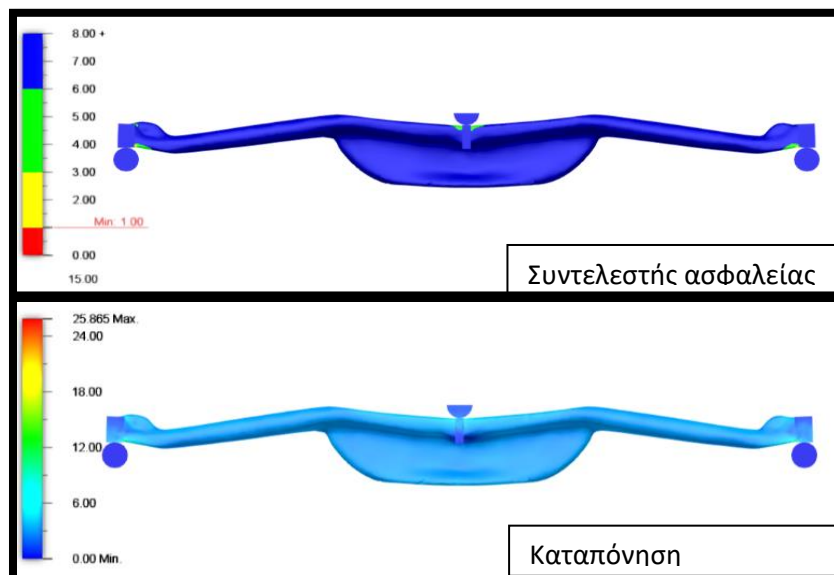
Πίνακας 2: Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, Topology Optimization - 135N.

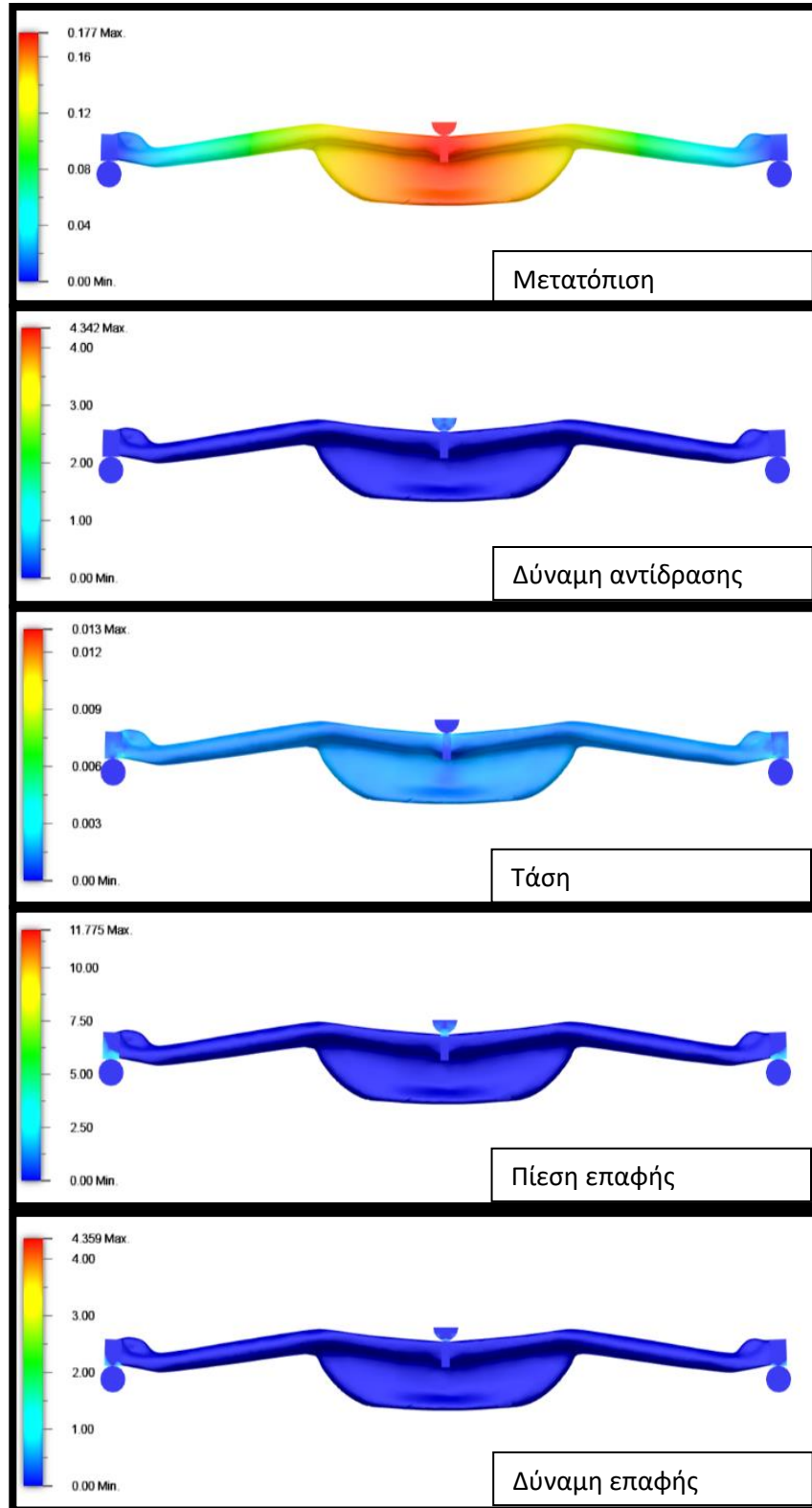
1^η Περίπτωση (135N) - Generative Design – 1^ο Αποτέλεσμα

Σε δεύτερο στάδιο ακολουθεί η εισαγωγή σε μελέτη στατικής καταπόνησης, της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας με χρήση γεννητικού σχεδιασμού, που αφορά καταπόνηση 135 N. Ακριβώς όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, κατά την παραγωγή των αποτελεσμάτων ο συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε ήταν ιδιαίτερα χαμηλός, ήτοι 0,14. Έγινε λοιπόν αναγωγή σε συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1 ώστε να γίνει σωστά η σύγκριση, οπότε ασκήθηκε δύναμη 18,892 N.



Εικόνα 44: Εισαγωγή της βελτιστοποιημένης με γεννητικό σχεδιασμό γεωμετρίας, για δύναμη 135 N, με χρωματισμό ανάλογο του συντελεστή ασφαλείας.





Εικόνα 45: Αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, Generative Design – 135N.

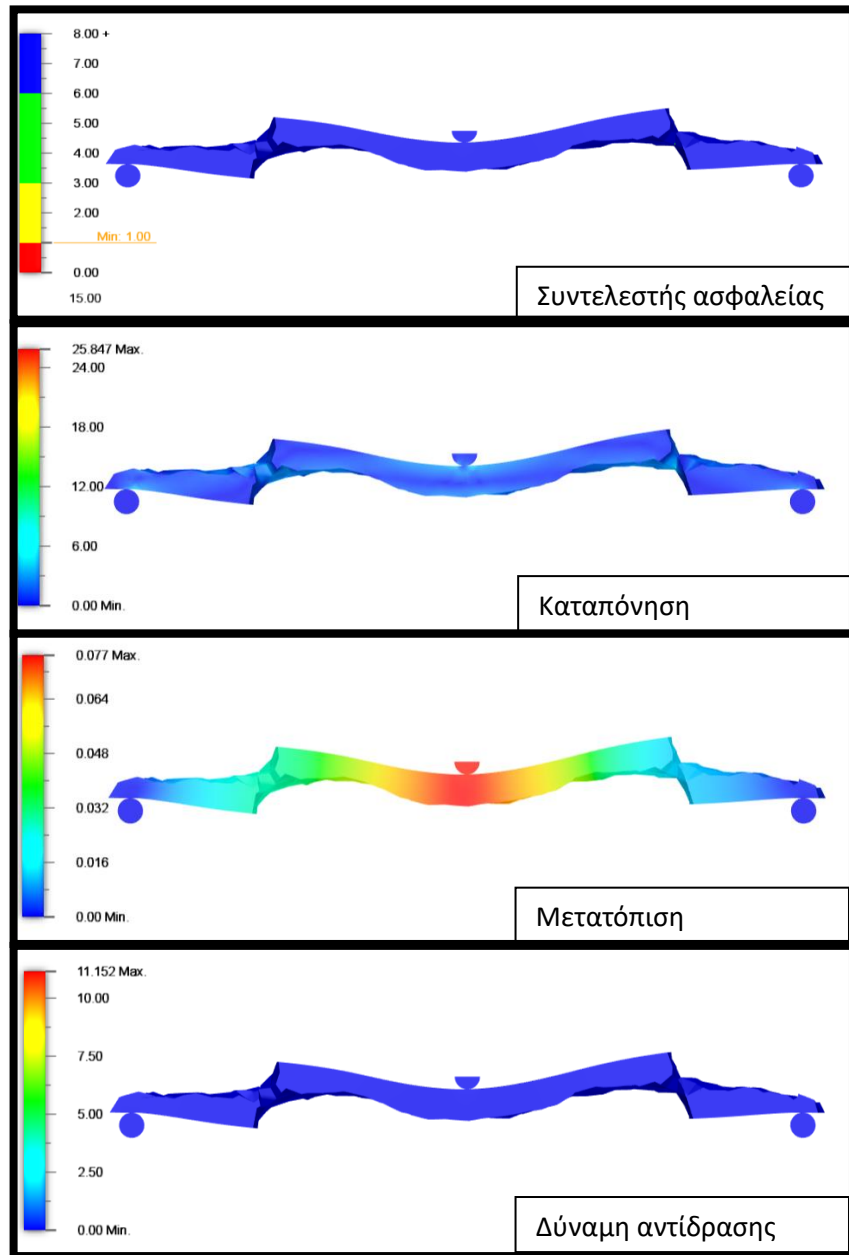
Από την **Εικόνα 45** φαίνεται ότι η μέγιστη καταπόνηση είναι στα 25,865 MPa, η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 0,177 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 4,342 N, η μέγιστη τάση έχει τιμή 0,013, η μέγιστη πίεση επαφής είναι 11,775 MPa και τέλος η μέγιστη δύναμη επαφής είναι 4,359 N. Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης.

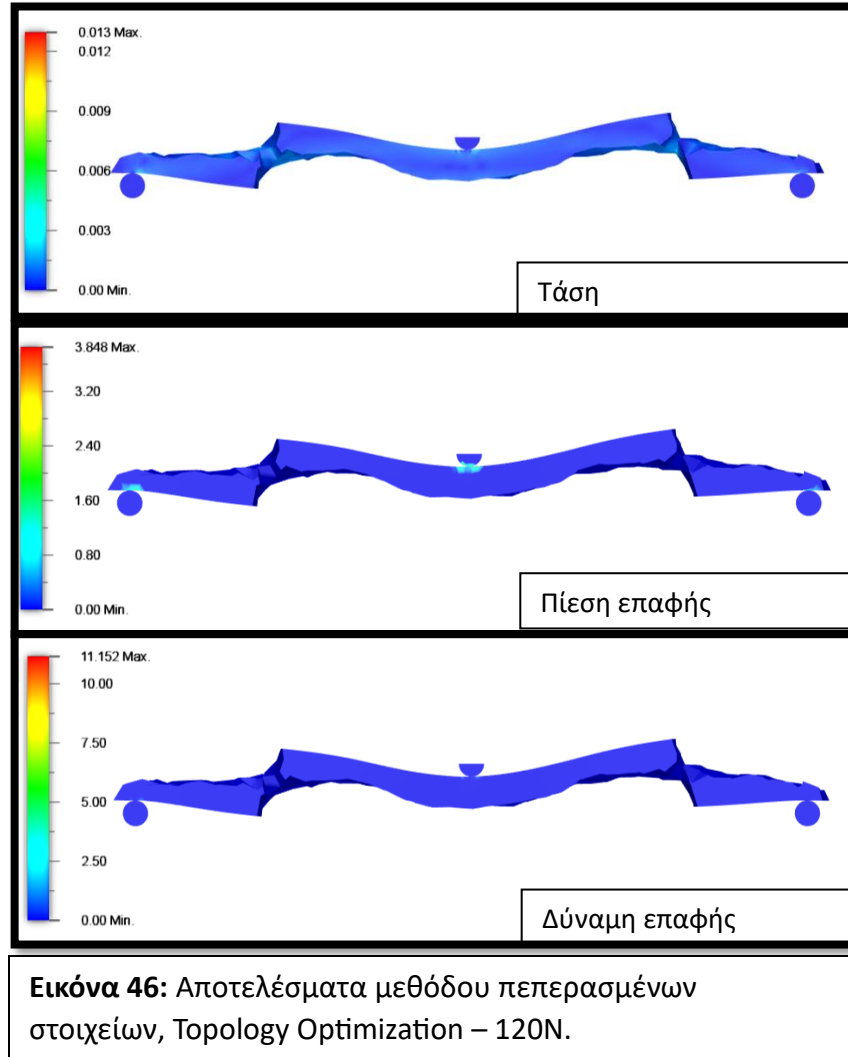
| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|-------------|------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.00 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 25.865 MPa |
| 1st Principal | -5.365 MPa | 8.752 MPa |
| 3rd Principal | -28.292 MPa | 0.565 MPa |
| Normal XX | -19.685 MPa | 5.291 MPa |
| Normal YY | -6.308 MPa | 2.303 MPa |
| Normal ZZ | -11.545 MPa | 2.885 MPa |
| Shear XY | -4.097 MPa | 5.263 MPa |
| Shear YZ | -2.645 MPa | 2.828 MPa |
| Shear ZX | -12.031 MPa | 13.055 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.177 mm |
| X | -0.019 mm | 0.019 mm |
| Y | -0.001 mm | 0.001 mm |
| Z | -0.177 mm | 0.002 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 4.342 N |
| X | -3.542 N | 4.003 N |
| Y | -0.898 N | 0.96 N |
| Z | -1.534 N | 1.938 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.013 |
| 1st Principal | -2.870E-05 | 0.008 |
| 3rd Principal | -0.015 | 0.00 |
| Normal XX | -0.006 | 0.002 |
| Normal YY | -5.159E-04 | 7.221E-04 |
| Normal ZZ | -0.003 | 9.736E-04 |
| Shear XY | -0.003 | 0.004 |
| Shear YZ | -0.002 | 0.002 |
| Shear ZX | -0.01 | 0.011 |
| Contact Pressure | | |
| Total | 0.00 MPa | 11.775 MPa |
| X | -9.53 MPa | 9.792 MPa |
| Y | -1.942 MPa | 2.007 MPa |
| Z | -4.126 MPa | 6.538 MPa |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 4.359 N |
| X | -3.542 N | 4.003 N |
| Y | -1.214 N | 1.284 N |
| Z | -4.358 N | 1.938 N |

Πίνακας 3: Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, Generative Design – 135N.

2^η Περίπτωση (120N) - Topology Optimization

Για την δεύτερη περίπτωση εισάχθηκε αρχικά η βελτιστοποιημένη τοπολογικά γεωμετρία. Αν και η πρώτη προσπάθεια έγινε για φόρτιση 120 N, ο συντελεστής ασφαλείας ήταν 0,054 ιδιαίτερα χαμηλος δηλαδή, επομένως πάλι έγινε αναγωγή σε συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1 και ειδικότερα, ασκήθηκε δύναμη ίση με 5,4 N.





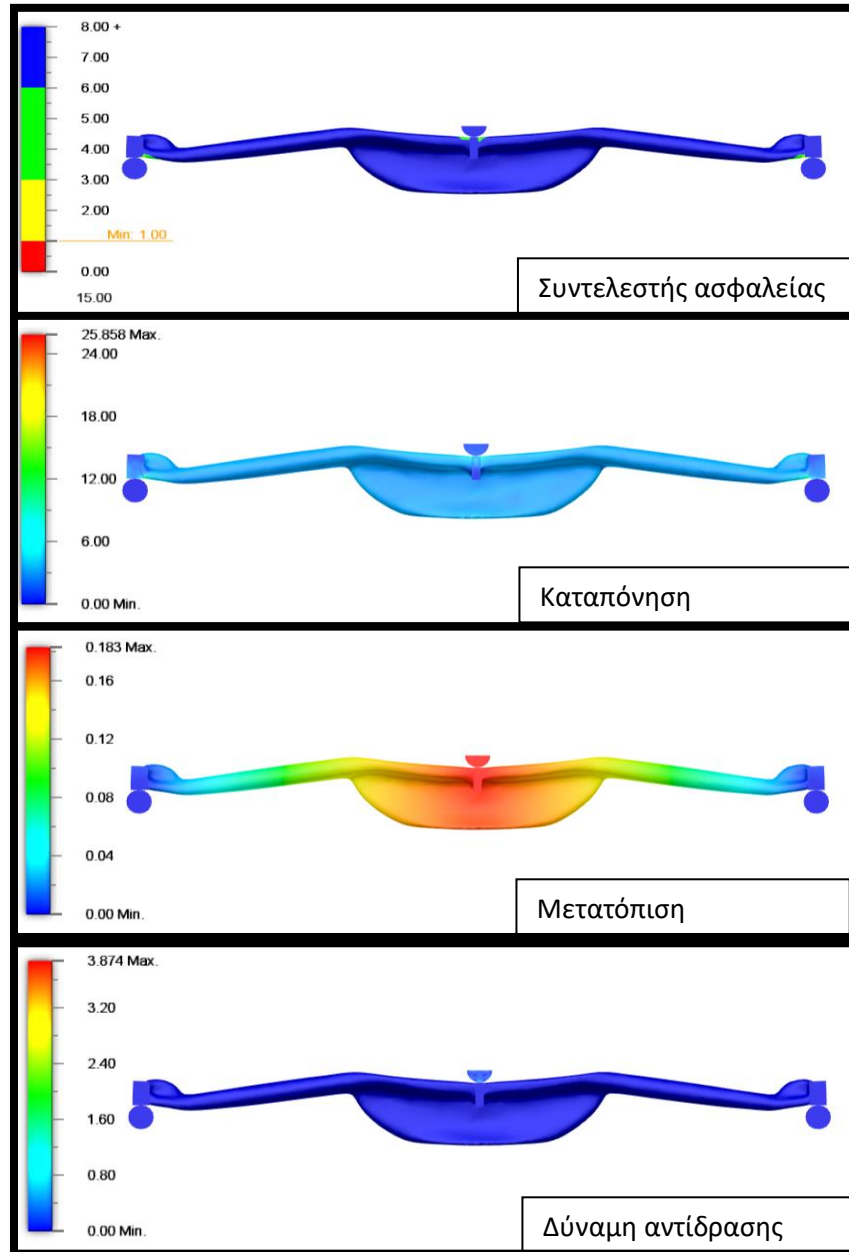
Από την **Εικόνα 46** φαίνεται ότι η μέγιστη καταπόνηση είναι στα 25,847 MPa, η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 0,077 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 11,152 N, η μέγιστη τάση έχει τιμή 0,013, η μέγιστη πίεση επαφής είναι 3,848 MPa και τέλος η μέγιστη δύναμη επαφής είναι 11,152 N. Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης.

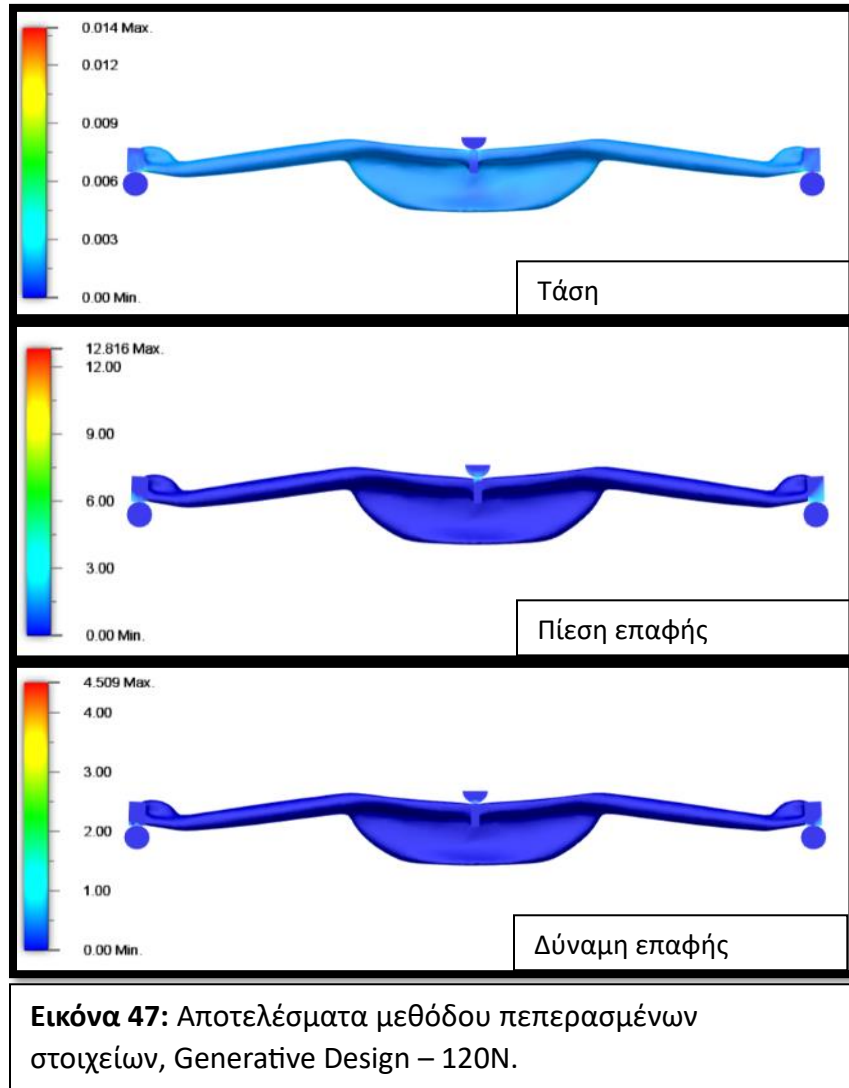
| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.00 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 25.847 MPa |
| 1st Principal | -4.006 MPa | 4.547 MPa |
| 3rd Principal | -27.214 MPa | 0.735 MPa |
| Normal XX | -5.995 MPa | 4.432 MPa |
| Normal YY | -8.299 MPa | 1.51 MPa |
| Normal ZZ | -22.187 MPa | 2.976 MPa |
| Shear XY | -1.258 MPa | 2.58 MPa |
| Shear YZ | -7.991 MPa | 11.942 MPa |
| Shear ZX | -4.218 MPa | 6.73 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.077 mm |
| X | -3.877E-04 mm | 0.077 mm |
| Y | -7.669E-04 mm | 5.108E-04 mm |
| Z | -0.008 mm | 0.007 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 11.152 N |
| X | -9.891 N | 11.15 N |
| Y | -0.581 N | 0.417 N |
| Z | -0.971 N | 1.11 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.013 |
| 1st Principal | -2.519E-06 | 0.007 |
| 3rd Principal | -0.014 | 2.187E-06 |
| Normal XX | -0.002 | 4.756E-04 |
| Normal YY | -0.001 | 2.639E-04 |
| Normal ZZ | -0.007 | 9.754E-04 |
| Shear XY | -6.917E-04 | 0.002 |
| Shear YZ | -0.007 | 0.01 |
| Shear ZX | -0.003 | 0.006 |
| Contact Pressure | | |
| Total | 0.00 MPa | 3.848 MPa |
| X | -3.534 MPa | 3.761 MPa |
| Y | -0.703 MPa | 0.511 MPa |
| Z | -2.775 MPa | 2.024 MPa |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 11.152 N |
| X | -9.891 N | 11.15 N |
| Y | -0.581 N | 0.417 N |
| Z | -0.971 N | 1.11 N |

Πίνακας 4: Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, Topology Optimization -120N.

2^η Περίπτωση (120N) - Generative Design – 8^ο Αποτέλεσμα

Στο επόμενο βήμα εισάχθηκε σε μελέτη στατικής καταπόνησης, η βελτιστοποιημένη με χρήση γεννητικού σχεδιασμού γεωμετρία. Αν και το πρόγραμμα πρότεινε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, επιλέχθηκε αυτή της οποίας την μάζα κατάφερε το πρόγραμμα να μειώσει παραπάνω. Για άλλη μία φορά με την εισαγωγή του σε μελέτη στατικής καταπόνησης και για δύναμη 120 N, έδειξε ότι ο συντελεστής ασφαλείας ήταν εξαιρετικά χαμηλός, 0,14 επομένως έγινε πάλι αναγωγή του συντελεστή ασφαλείας σε 1 και επιλέχθηκε δύναμη ίση με 17,287 N.





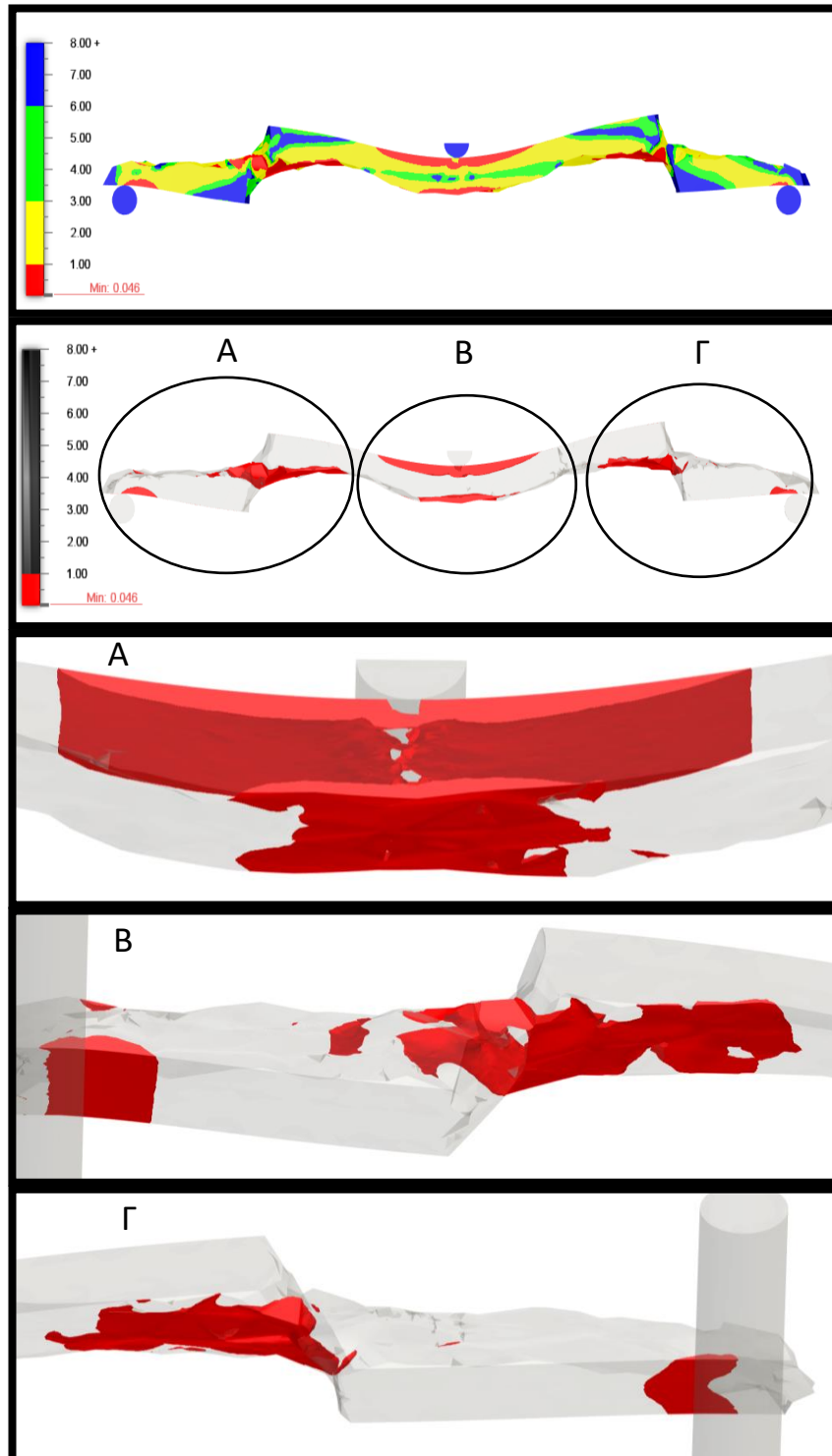
Στην **Εικόνα 47** φαίνεται ότι η μέγιστη καταπόνηση είναι στα 25,858 MPa, η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 0,183 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 3,874 N, η μέγιστη τάση έχει τιμή 0,014, η μέγιστη πίεση επαφής είναι 12,816 MPa και τέλος η μέγιστη δύναμη επαφής είναι 4,509 N. Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης.

| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|-------------|------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.00 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 25.858 MPa |
| 1st Principal | -4.637 MPa | 9.186 MPa |
| 3rd Principal | -27.391 MPa | 0.377 MPa |
| Normal XX | -18.637 MPa | 3.956 MPa |
| Normal YY | -5.091 MPa | 1.808 MPa |
| Normal ZZ | -11.323 MPa | 2.945 MPa |
| Shear XY | -2.728 MPa | 3.126 MPa |
| Shear YZ | -3.291 MPa | 2.897 MPa |
| Shear ZX | -11.77 MPa | 14.088 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.183 mm |
| X | -0.018 mm | 0.018 mm |
| Y | -0.001 mm | 0.001 mm |
| Z | -0.183 mm | 0.002 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 3.874 N |
| X | -3.243 N | 3.126 N |
| Y | -1.027 N | 1.309 N |
| Z | -1.815 N | 2.042 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.014 |
| 1st Principal | -1.681E-06 | 0.008 |
| 3rd Principal | -0.015 | 0.00 |
| Normal XX | -0.006 | 0.001 |
| Normal YY | -0.001 | 5.477E-04 |
| Normal ZZ | -0.003 | 9.724E-04 |
| Shear XY | -0.002 | 0.003 |
| Shear YZ | -0.003 | 0.002 |
| Shear ZX | -0.01 | 0.012 |
| Contact Pressure | | |
| Total | 0.00 MPa | 12.816 MPa |
| X | -10.413 MPa | 10.394 MPa |
| Y | -2.424 MPa | 2.941 MPa |
| Z | -3.994 MPa | 7.417 MPa |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 4.509 N |
| X | -3.243 N | 3.126 N |
| Y | -1.37 N | 1.685 N |
| Z | -4.508 N | 2.042 N |

Πίνακας 5: Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, Generative Design – 120N.

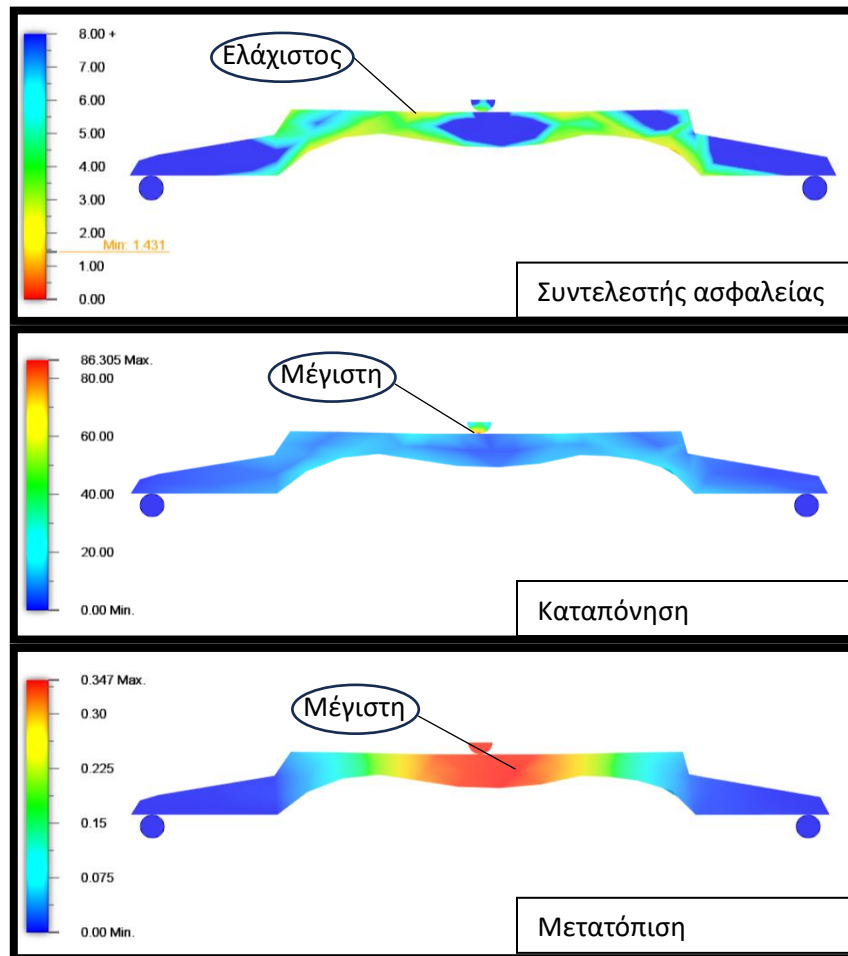
Επαναληπτική επιβεβαίωση 2^{ης} Περίπτωσης (120N) – Topology optimization

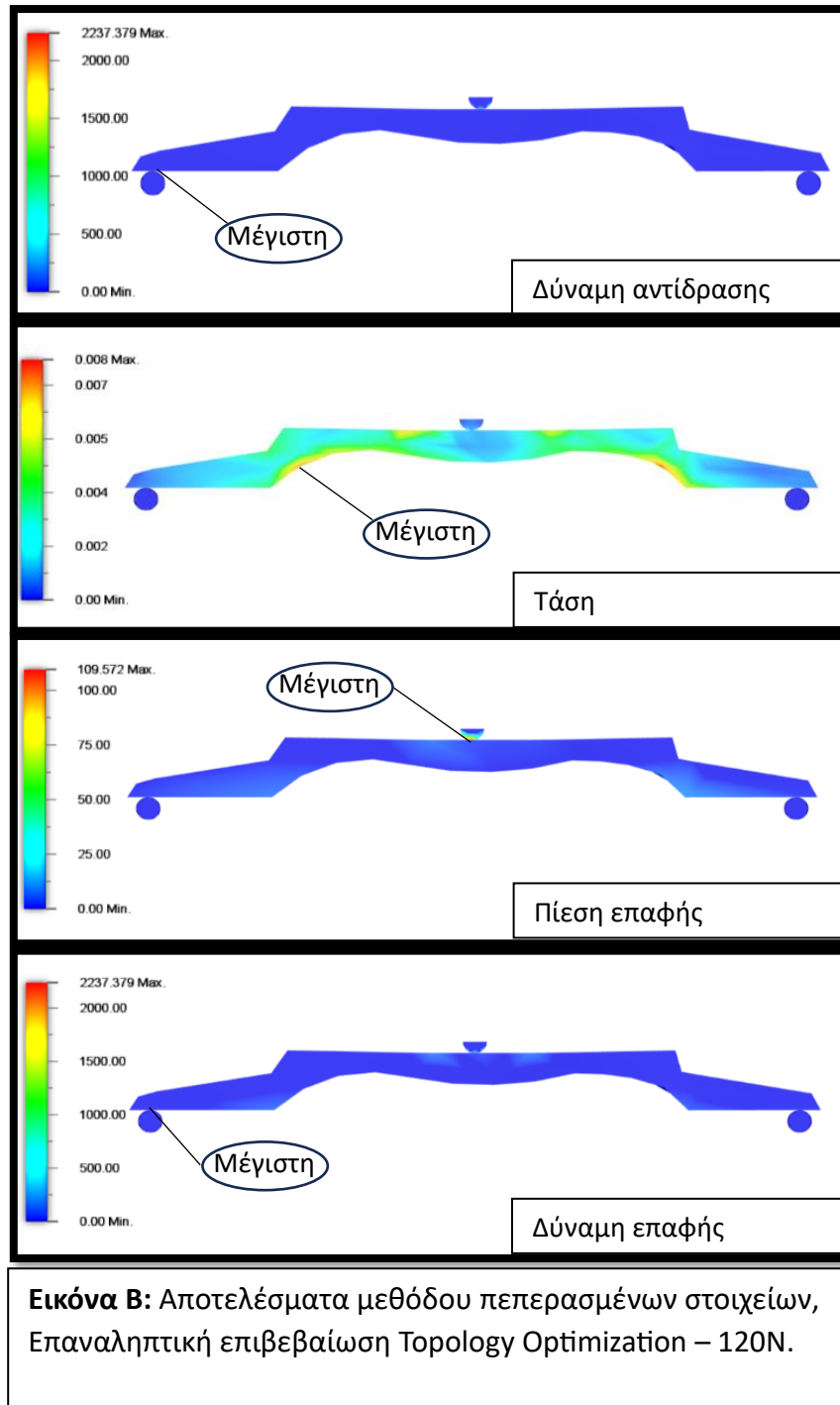
Παρατηρείται ότι η βελτιστοποίηση τοπολογίας εμφάνισε πολύ μικρό συντελεστή ασφαλείας σε ορισμένες περιοχές, ο οποίος είχε τιμή 0,046. Αυτές οι περιοχές συγκέντρωναν τάσεις με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεμονωμένα χαμηλό συντελεστή ασφαλείας.



Εικόνα Α: Σημεία χαμηλού συντελεστή ασφαλείας και επιλεκτική μεγέθυνση των σημείων.

Στην **Εικόνα Α** φαίνονται διαδοχικά οι περιοχές χαμηλού συντελεστή ασφαλείας για την βελτιστοποιημένη τοπολογικά γεωμετρία, έπειτα οι περιοχές του μοντέλου μεμονωμένα στις οποίες ο συντελεστής ασφαλείας δεν είναι αποδεκτός και τέλος πραγματοποιούνται μεγεθύνσεις στις τρεις επιλεγμένες περιοχές Α, Β και Γ. Παρατηρείται από τις μεγεθύνσεις ότι υπάρχουν περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν συγκέντρωση τάσεων λόγω μικρών ακμών και ασυνεχειών. Γι' αυτό το λόγο, κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί περαιτέρω επεξεργασία στο ΤΟ μοντέλο, ώστε να εξαλειφθούν αυτές οι περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθεί το πλέγμα που προέκυψε από τη μελέτη του Topology Optimization και πάνω σε αυτό θα σχεδιαστεί ένα νέο στερεό το οποίο θα έχει πιο λείες επιφάνειες και δεν θα εμφανίζει προβλήματα με το πλέγμα. Αρχικά, χωρίζεται η γεωμετρία σε αρκετές τομές, στις οποίες έπειτα σχεδιάζεται η εκάστοτε διατομή και όλες αυτές ενώνονται, ώστε το τελικό προϊόν να προσεγγίζει το μοντέλο που προέκυψε με Topology Optimization, έχοντας πιο λεία επιφάνεια. Κατόπιν της επεξεργασίας το μοντέλο υπόκειται σε μελέτη στατικής καταπόνησης χρησιμοποιώντας τις ίδιες οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:





Από την **Εικόνα Β** φαίνεται ότι η μέγιστη καταπόνηση είναι στα 86,305 MPa, η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 0,347 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 2237,379 N, η μέγιστη τάση έχει τιμή 0,008, η μέγιστη πίεση επαφής είναι 109,572 MPa και τέλος η μέγιστη δύναμη επαφής είναι 2237,378 N. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκε το 32,55% της αρχικής μάζας, δηλαδή

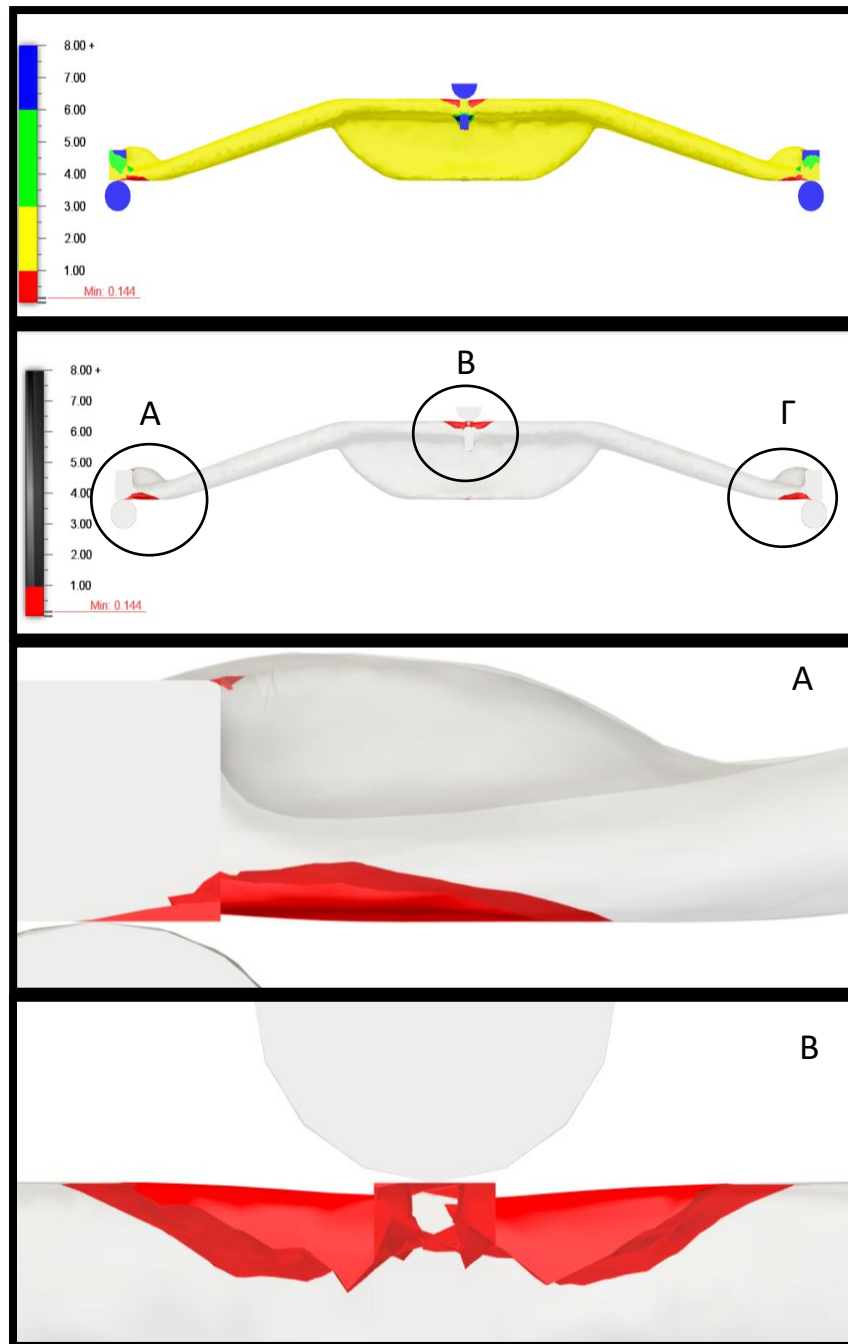
μείωσε την μάζα κατά 67,45%. Στον **Πίνακα Α'** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης.

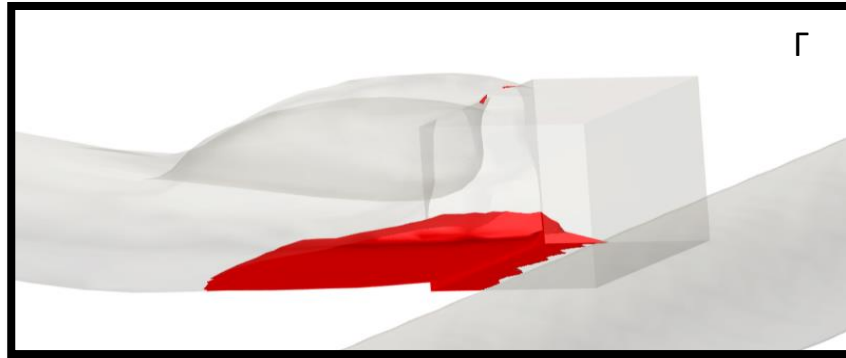
| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|--------------|-------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.431 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 86.305 MPa |
| 1st Principal | -27.019 MPa | 35.411 MPa |
| 3rd Principal | -120.659 MPa | 1.327 MPa |
| Normal XX | -103.375 MPa | 31.853 MPa |
| Normal YY | -44.303 MPa | 9.36 MPa |
| Normal ZZ | -44.303 MPa | 14.241 MPa |
| Shear XY | -9.465 MPa | 28.746 MPa |
| Shear YZ | -1.757 MPa | 3.916 MPa |
| Shear ZX | -7.461 MPa | 22.213 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.347 mm |
| X | -0.002 mm | 0.347 mm |
| Y | -0.004 mm | 0.012 mm |
| Z | -0.05 mm | 0.047 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 2237.379 N |
| X | -1399.072 N | 2205.261 N |
| Y | -148.802 N | 273.297 N |
| Z | -322.34 N | 421.808 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.008 |
| 1st Principal | 0.00 | 0.006 |
| 3rd Principal | -0.009 | 0.00 |
| Normal XX | -0.002 | 0.002 |
| Normal YY | -5.099E-04 | 8.117E-04 |
| Normal ZZ | -0.007 | 0.005 |
| Shear XY | -0.001 | 7.013E-04 |
| Shear YZ | -9.671E-04 | 0.001 |
| Shear ZX | -0.006 | 0.006 |
| Contact Pressure | | |
| Total | 0.00 MPa | 109.572 MPa |
| X | -103.375 MPa | 28.909 MPa |
| Y | -6.684 MPa | 28.746 MPa |
| Z | -18.407 MPa | 37.865 MPa |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 2237.379 N |
| X | -1399.072 N | 2205.261 N |
| Y | -156.551 N | 268.671 N |
| Z | -322.34 N | 421.808 N |

Πίνακας Α': Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, Επαναληπτική επιβεβαίωση Topology Optimization – 120N.

Επαναληπτική επιβεβαίωση 2^{ης} Περίπτωσης (120N) – Generative Design

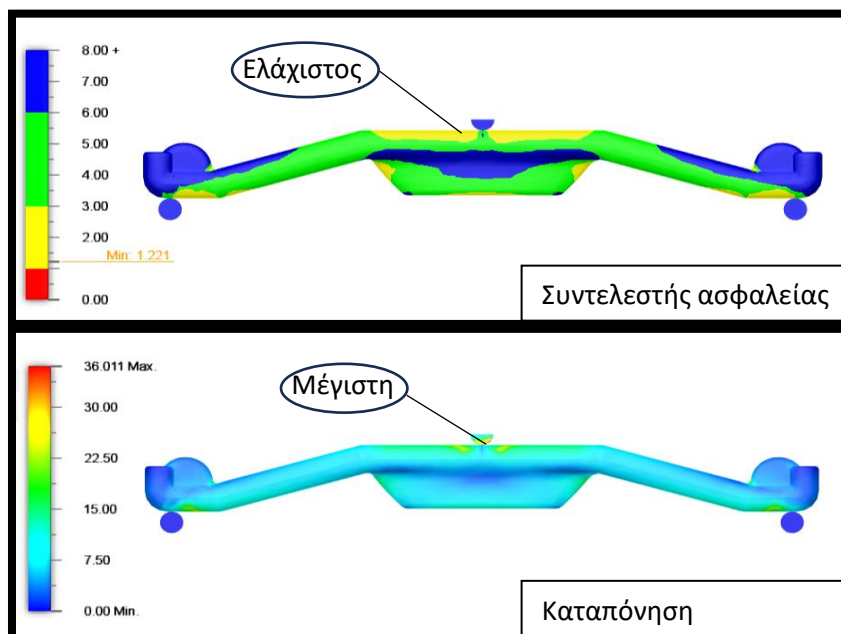
Το Generative Design στη κάμψη παρουσίασε επίσης χαμηλό ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας, ο οποίος είχε τιμή 0,144, σε κάποιες περιοχές μεμονωμένα. Πραγματοποιήθηκε σε πρώτο στάδιο έρευνα του λόγου που συμβαίνει αυτό, ώστε να πραγματοποιηθεί περαιτέρω επεξεργασία του μοντέλου και να εξαλειφθούν οι περιοχές χαμηλού ελάχιστου συντελεστής ασφαλείας.

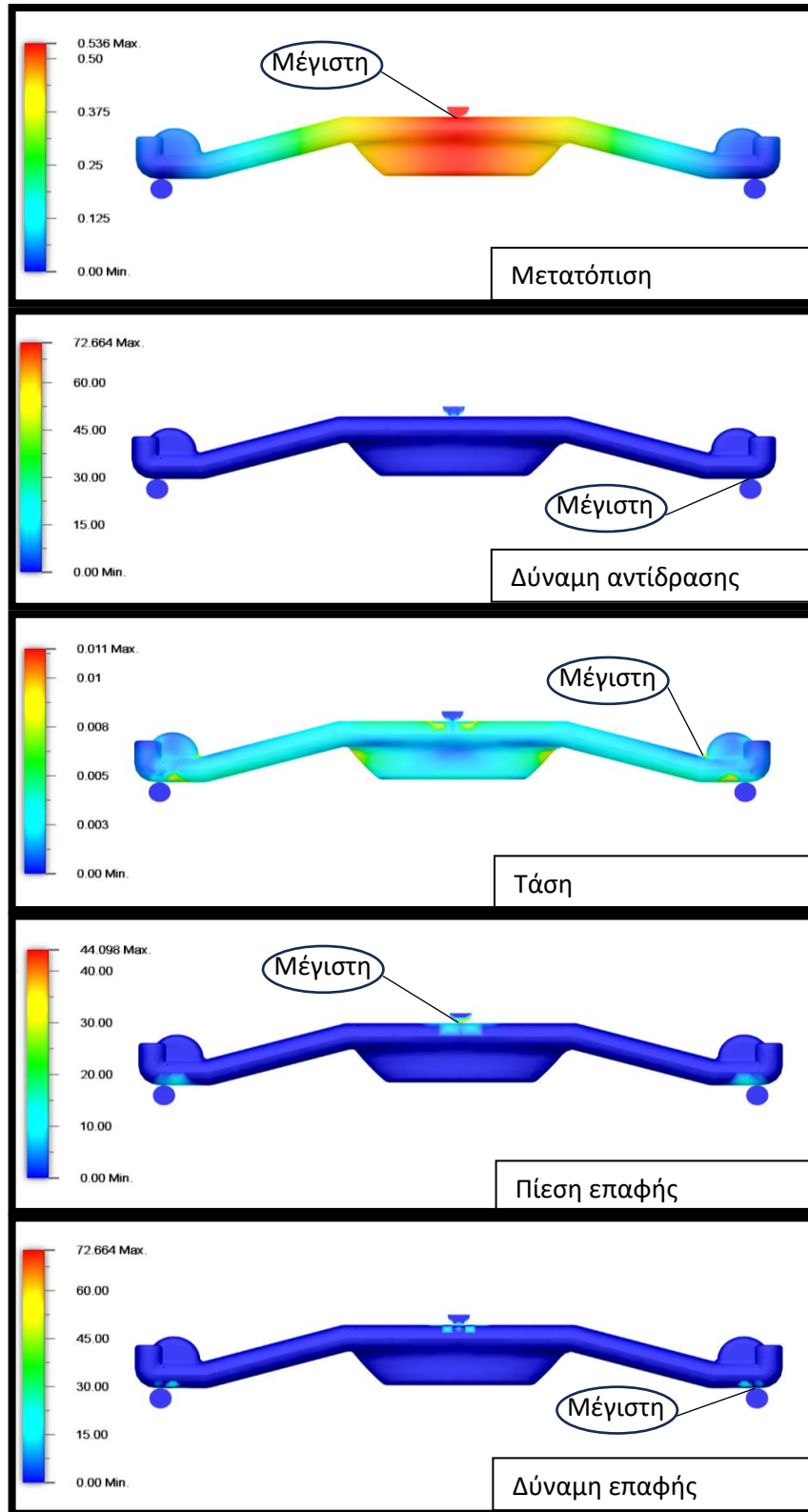




Εικόνα Δ: Σημεία χαμηλού συντελεστή ασφαλείας και επιλεκτική μεγέθυνση των σημείων.

Στην **Εικόνα Δ** παρουσιάζονται διαδοχικά ο συντελεστής ασφαλείας του μοντέλου που παράχθηκε με Generative Design και έπειτα απομονώνονται οι περιοχές στις οποίες ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος του ένα. Παρατηρείται ότι υπάρχουν κάποιες περιοχές, (Α, Β και Γ) στις οποίες το μοντέλο παρουσιάζει απότομη αλλαγή γεωμετρίας, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ακμές που συσσωρεύουν τάσεις. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να διορθωθούν αυτές οι περιοχές ώστε να αυξηθεί ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας. Κατόπιν της επανασχεδίασης το ανανεωμένο μοντέλο υπόκειται σε στατική μελέτη καταπόνησης και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:





Εικόνα Ε: Αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, επαναληπτική επιβεβαίωση Generative Design – 120N.

Από την **Εικόνα Ε** φαίνεται ότι η μέγιστη καταπόνηση είναι στα 36,011 MPa, η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 0,536 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 72,664 N, η μέγιστη τάση έχει τιμή 0,011, η μέγιστη πίεση επαφής είναι 44,098 MPa και τέλος η μέγιστη δύναμη επαφής είναι 72,664 N. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκε το 42,37% της αρχικής μάζας, δηλαδή η συνολική μάζα μειώθηκε κατά 57,63%. Στον **Πίνακα Β'** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης.

| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|-------------|------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.221 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 36.011 MPa |
| 1st Principal | -16.119 MPa | 23.747 MPa |
| 3rd Principal | -54.385 MPa | 2.799 MPa |
| Normal XX | -25.419 MPa | 15.699 MPa |
| Normal YY | -21.157 MPa | 4.093 MPa |
| Normal ZZ | -49.351 MPa | 16.92 MPa |
| Shear XY | -2.882 MPa | 3.451 MPa |
| Shear YZ | -12.873 MPa | 11.147 MPa |
| Shear ZX | -10.732 MPa | 11.496 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.536 mm |
| X | -0.08 mm | 0.08 mm |
| Y | -0.004 mm | 0.005 mm |
| Z | -0.536 mm | 0.013 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 72.664 N |
| X | -63.166 N | 34.39 N |
| Y | -23.716 N | 23.266 N |
| Z | -3.58 N | 35.18 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.011 |
| 1st Principal | -4.249E-05 | 0.013 |
| 3rd Principal | -0.012 | 0.00 |
| Normal XX | -0.009 | 0.005 |
| Normal YY | -9.554E-04 | 0.002 |
| Normal ZZ | -0.004 | 0.005 |
| Shear XY | -0.002 | 0.003 |
| Shear YZ | -0.003 | 0.003 |
| Shear ZX | -0.009 | 0.009 |
| Contact Pressure | | |
| Total | 0.00 MPa | 44.098 MPa |
| X | -14.069 MPa | 8.918 MPa |
| Y | -8.004 MPa | 9.117 MPa |
| Z | -8.187 MPa | 43.199 MPa |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 72.664 N |
| X | -63.166 N | 48.998 N |
| Y | -17.218 N | 16.926 N |
| Z | -31.054 N | 35.18 N |

Πίνακας Β': Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, Επαναληπτική επιβεβαίωση Generative Design – 120N.

4.1.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων.

1^η Περίπτωση

Το σχέδιο που προέκυψε με Generative Design (GD) παράχθηκε με το 21,68 % της αρχικής μάζας, ενώ το σχέδιο που προέκυψε με Topology Optimization (TO), διατήρησε το 26,85 % της αρχικής μάζας. Σε πρώτη φάση παρατηρείται ότι **το GD κατάφερε να μειώσει αποτελεσματικότερα την συνολική μάζα και όγκο.**

Ο συντελεστής ασφαλείας, όπως προαναφέρθηκε, ήταν ιδιαίτερα χαμηλός, επομένως έγινε αναγωγή στην μονάδα ώστε να αναδειχθεί η γεωμετρία που θα άντεχε την μεγαλύτερη δύναμη. **Το σχέδιο που παράχθηκε με GD δέχθηκε 18,892 N ενώ το σχέδιο που παράχθηκε με TO 16,673 N.** Καθίσταται σαφές ότι το σχέδιο που παράχθηκε με GD αναδεικνύεται ανώτερο και σε αυτόν τον τομέα.

Όσον αφορά την παραμόρφωση, GD σχέδιο καταφέρνει να μειώσει πιο αποτελεσματικά την μετατόπιση στον κάθετο άξονα κατά 0,177 mm, ενώ το TO σχέδιο κατά 0,219 mm. Επιπρόσθετα, οι δυνάμεις αντίδρασης για GD βρίσκουν μέγιστη τιμή στα 4,342 N, ενώ με TO, στα 6,917 N, γεγονός που καθιστά το GD σχέδιο για άλλη μια φορά ανώτερο αφού με μικρότερες δυνάμεις αντίδρασης, το μοντέλο είναι πιο σταθερό.

Συνολικά λοιπόν το μοντέλο που παράχθηκε με μελέτη μέσω GD κατάφερε να βελτιώσει καλύτερα τις μηχανικές ιδιότητες και να μειώσει παραπάνω την μάζα συγκριτικά με το μοντέλο το οποίο παράχθηκε με TO.

2^η Περίπτωση

Το GD μοντέλο, παράχθηκε διατηρώντας το 18,6 % της αρχικής μάζας, ενώ το TO μοντέλο διατήρησε το 26,37 % της αρχικής μάζας. **Το GD κατάφερε αποτελεσματικότερα λοιπόν να μειώσει την μάζα.**

Και σε αυτή τη περίπτωση και τα δύο σχέδια παρουσίασαν εξαιρετικά χαμηλό συντελεστή ασφαλείας, επομένως η σύγκριση των δύο έγινε αναφορικά με την δύναμη που θα μπορούσαν να δεχτούν όταν γινόταν αναγωγή του συντελεστή ασφαλείας στην μονάδα. **Το GD σχέδιο δέχθηκε 17,287 N, ανώτερο δηλαδή από το TO μοντέλο που δέχθηκε μόλις 5,4 N.**

Το TO μοντέλο κατάφερε να μειώσει την μετατόπιση αποτελεσματικότερα, στα 0,077 mm, ενώ το GD μοντέλο στα 0,183 mm. Το ίδιο δεν ισχύει όμως στις δυνάμεις αντίδρασης, όπου το GD μοντέλο τις κρατάει στα 3,874, ανώτερο του TO μοντέλου που έχουν τιμή 11,152 N.

Συνολικά το μοντέλο που παράχθηκε με GD κατάφερε να βελτιώσει καλύτερα τις μηχανικές ιδιότητες και να μειώσει παραπάνω την μάζα συγκριτικά με το μοντέλο που παράχθηκε με TO.

Επαναληπτική επιβεβαίωση 2^{ης} Περίπτωσης

Στην επαναληπτική επιβεβαίωση πραγματοποιήθηκε ανακατασκευή των μοντέλων για ΤΟ και GD, με σκοπό την εξομάλυνση των επιφανειών και την εξάλειψη των περιοχών συγκέντρωσης τάσεων.

Κατά τη διαδικασία, το GD μοντέλο διατήρησε το 32,55% της αρχικής μάζας, μειώνοντας την κατά 67,45% σε αντίθεση με το **ΤΟ μοντέλο που διατήρησε το 42,37%, μειώνοντας την μάζα κατά 57,63%**. Προκύπτει λοιπόν ότι το **ΤΟ μοντέλο μείωσε αποτελεσματικότερα την μάζα συγκριτικά με το GD μοντέλο**.

Το **ΤΟ μοντέλο παρουσίασε υψηλότερο ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας, 1,431** ενώ το GD μοντέλο είχε χαμηλότερο ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας 1,221.

Το **ΤΟ μοντέλο μείωσε αποτελεσματικότερα την μετατόπιση με 0,347 mm, ενώ το GD με 0,536 mm** και διατήρησε την μέγιστη καταπόνηση στα 36,011 MPa, ενώ το **ΤΟ στα 86,305 MPa**.

Συνολικά λοιπόν, το **ΤΟ μοντέλο, κατόπιν της επεξεργασίας, παρουσίασε καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και μείωσε παραπάνω την μάζα, συγκριτικά με το GD μοντέλο**.

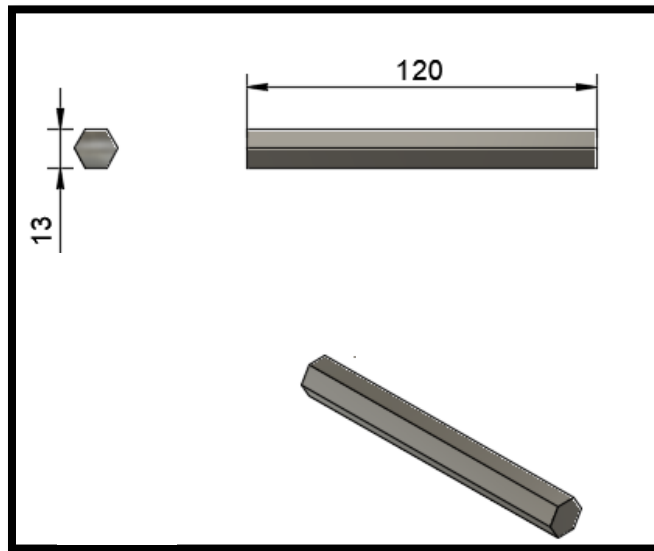
4.2 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του πρώτου δοκιμίου στρέψης και της μοντελοποίησης αυτού.

Στα πλαίσια του κεφαλαίου θα πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της στρέψης ενός δοκιμίου εξαγωνικής διατομής. Το συγκεκριμένο δοκίμιο θα συγκρατείται από την μία πλευρά του ενώ από την άλλη θα δέχεται στρεπτικές δυνάμεις ροπής. Η μηχανή δοκιμής στρέψης, βοηθάει στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του δοκιμίου όταν αυτό δέχεται στρεπτικές δυνάμεις. Το ένα μέρος αυτής είναι σταθερό ενώ το άλλο μέρος κινείται περιστροφικά.



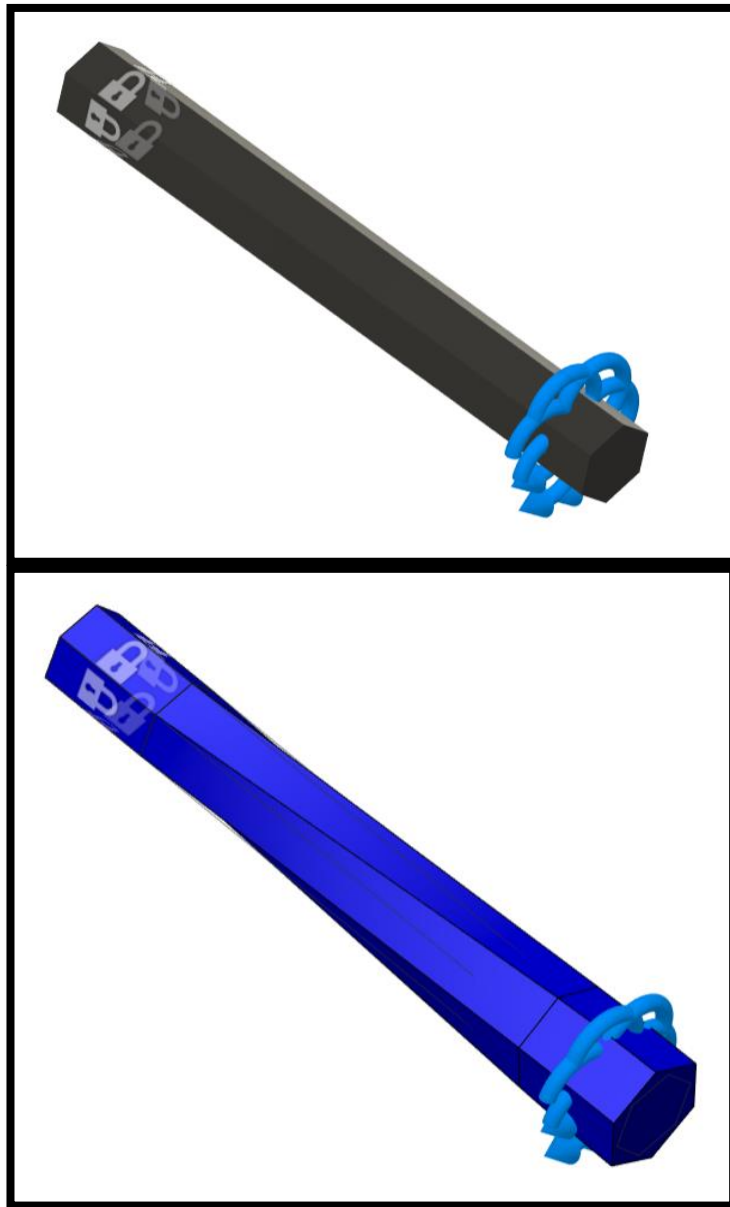
Εικόνα 47: Μηχανή δοκιμής στρέψης TM201 – Torsion Testing Machine, 30 Nm. (<https://labts.co.id/product/torsion-testing-machine-30-n-m/>, n.d.)

Το δοκίμιο στρέψης που θα χρησιμοποιηθεί έχει μήκος 120 mm και εξαγωνική διατομή με 13 mm απόσταση ανάμεσα στις πλευρές. Το δοκίμιο θα συγκρατείται δεξιά και αριστερά από εξαγωνικές υποδοχές, οι οποίες θα το συγκρατούν σε βάθος 20 mm από την κάθε πλευρά του. Οι διαστάσεις του φαίνονται αναλυτικότερα στην παρακάτω **Εικόνα 48**.

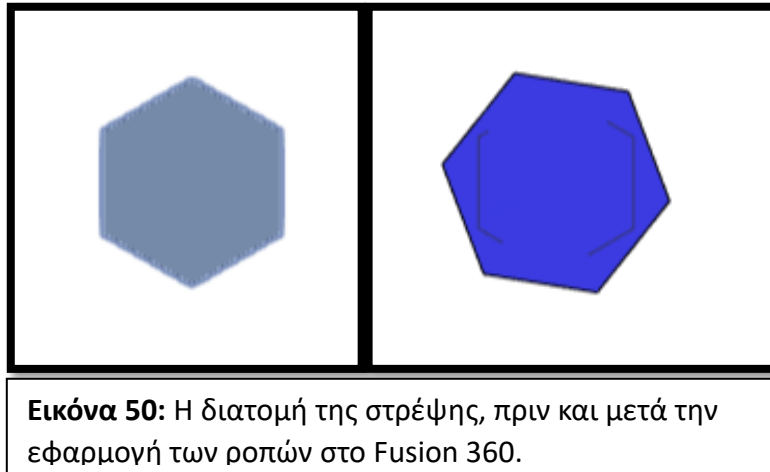


Εικόνα 48: Διαστάσεις του εξαγωνικού δοκιμίου στρέψης.

Σε επόμενο βήμα, κρίνεται απαραίτητο πριν ξεκινήσουν οι μελέτες βελτιστοποίησης, να πραγματοποιηθεί στο δοκίμιο μία μελέτη στατικής καταπόνησης ώστε να βεβαιωθούν οι σωστές οριακές συνθήκες και ότι η συμπεριφορά του είναι σωστή με βάση την καταπόνηση στρέψης. Για τον σκοπό αυτό το δοκίμιο θα συγκρατηθεί με πακτώσεις στις έξι πλευρές του από την μία μεριά και σε βάθος 20 mm. Από την άλλη μεριά θα εφαρμοστούν δυνάμεις ροπής σε κάθε μία από τις έξι πλευρές του, πάλι σε βάθος των 20 mm. Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης στο περιβάλλον του Fusion 360, πρέπει πρώτα το δοκίμιο να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία, καθώς αν καταβληθεί προσπάθεια εφαρμογής δυνάμεων και στηρίξεων αυτές θα εφαρμόζονται σε όλη την πλευρά και όχι στα 20 mm που είναι και το επιθυμητό. Με την χρήση της εντολής Split Faces, θα χρησιμοποιηθούν 2 Planes, τα οποία θα απέχουν 20 mm από την κάθε πλευρά και θα διατελέσουν ρόλο διαχωρισμού των όψεων του δοκιμίου. Με αυτό τον τρόπο πλέον μπορεί να συνεχίσει η μοντελοποίηση. Σε αντίθεση με την μοντελοποίηση κάμψης, σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν επαφές μεταξύ σωμάτων, επομένως δεν χρειάζεται κάποια περαιτέρω ρύθμιση σε αυτό το κομμάτι. Όσον αφορά το πλέγμα, μένει σταθερό με βάση την προεπιλογή του προγράμματος στο 10%.



Εικόνα 49: Μοντελοποίηση στρέψης, πριν και μετά την εφαρμογή των ροπών, στο Fusion 360.



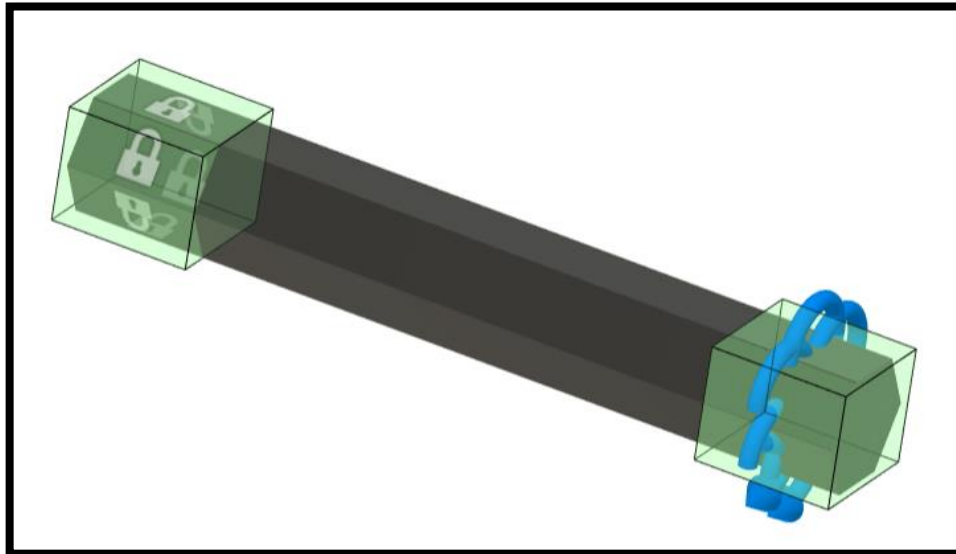
Εικόνα 50: Η διατομή της στρέψης, πριν και μετά την εφαρμογή των ροπών στο Fusion 360.

Με βάση την στατική μελέτη καταπόνησης, παρατηρείται ότι η γεωμετρία μοντελοποιείται σωστά και δεν παρουσιάζεται κάτι διαφορετικό του κανονικού. Με άλλα λόγια το δοκίμιο συμπεριφέρεται όπως είναι το αναμενόμενο, η στρέψη βαίνει ομαλά και σε αυτά τα πλαίσια μπορεί να πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση τοπολογίας.

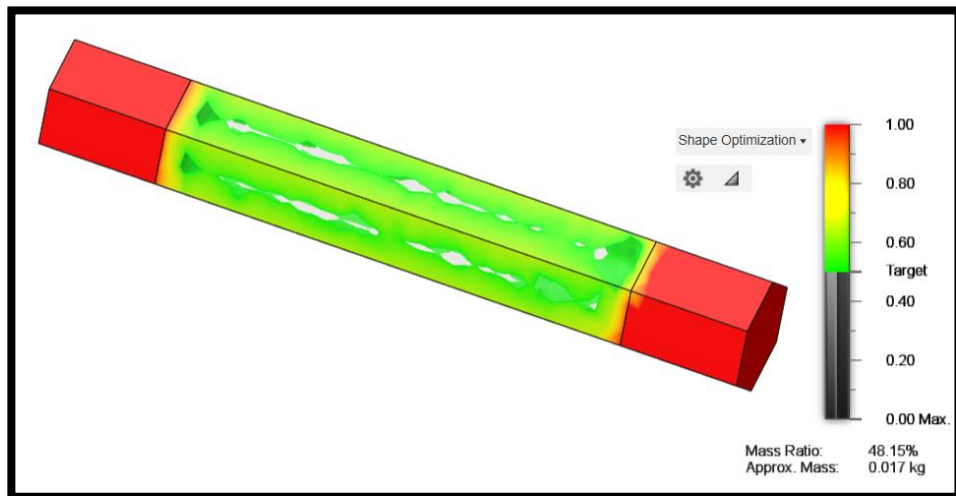
4.2.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Topology Optimization.

Αφού είναι πλέον βέβαιο πως η στρέψη μοντελοποιείται σωστά, σε επόμενο στάδιο πραγματοποιούμε μελέτη βελτιστοποίησης τοπολογίας. Αναλυτικότερα, θέτουμε στα ίδια σημεία τις φορτίσεις και τις στηρίξεις όπως στην μελέτη στατικής καταπόνησης. Για τις ανάγκες της διπλωματικής θα πραγματοποιηθούν μελέτες για δύο διαφορετικές φορτίσεις και συγκεκριμένα μία για 30 Nmm και μία για 40 Nmm.

Αρχικά, επιλέγονται στο σώμα από τις δύο μεριές και σε βάθος 20 mm από την κάθε πλευρά, οι περιοχές της γεωμετρίας οι οποίες θα παραμείνουν εκτός της βελτιστοποίησης, καθώς εκεί είναι τα σημεία που ασκούνται οι φορτίσεις και οι στηρίξεις. Αυτές συμβολίζονται με ένα πράσινο περίγραμμα. Έπειτα, επιλέγεται το σώμα σαν στόχος βελτιστοποίησης. Φυσικά ως υλικό, επιλέγεται το PA - 12 – Nylon. Οι στόχοι της βελτιστοποίησης, τίθενται ως εξής: μείωση της μάζας τουλάχιστον στο 57% της αρχικής και μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Δεν υπάρχουν επαφές στην προκειμένη περίπτωση, επομένως δεν πραγματοποιείται κάποια περαιτέρω ρύθμιση. Σαν τελευταίο βήμα παράγεται το πλέγμα με βάση την προεπιλογή του προγράμματος στο 10% και λύνεται η μελέτη.

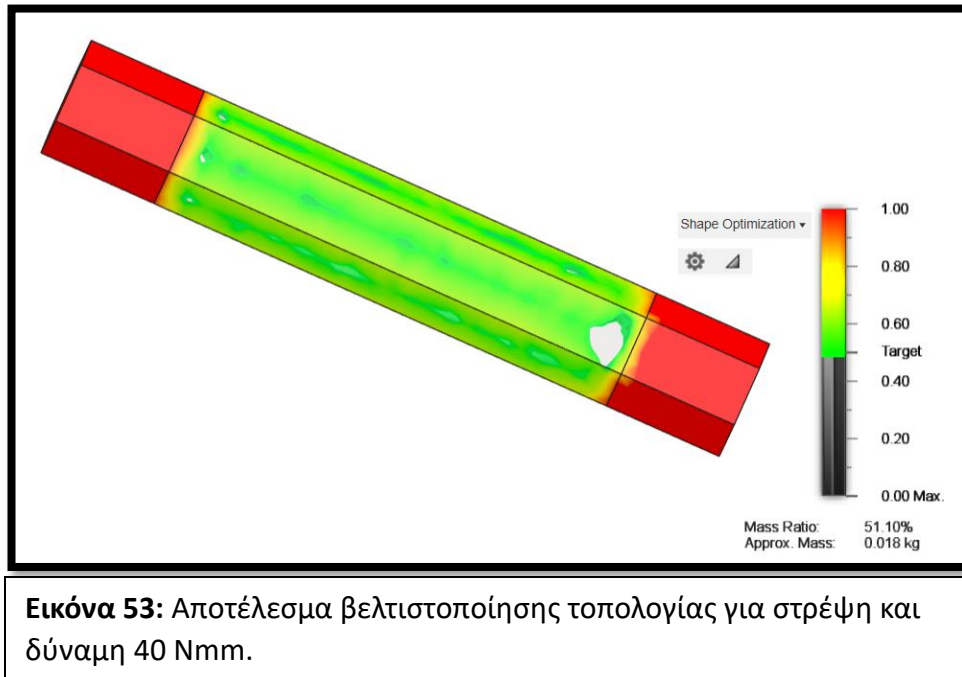


Εικόνα 51: Μοντελοποίηση της στρέψης για βελτιστοποίηση



Εικόνα 52: Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης τοπολογίας για στρέψη και ροπή 30 Nmm.

Στην πρώτη περίπτωση λοιπόν, για δύναμη 30 Nmm αλλά και τις οριακές συνθήκες που προαναφέρονται, το πρόγραμμα κατάφερε να μειώσει την μάζα στο 48,15 % της αρχικής.



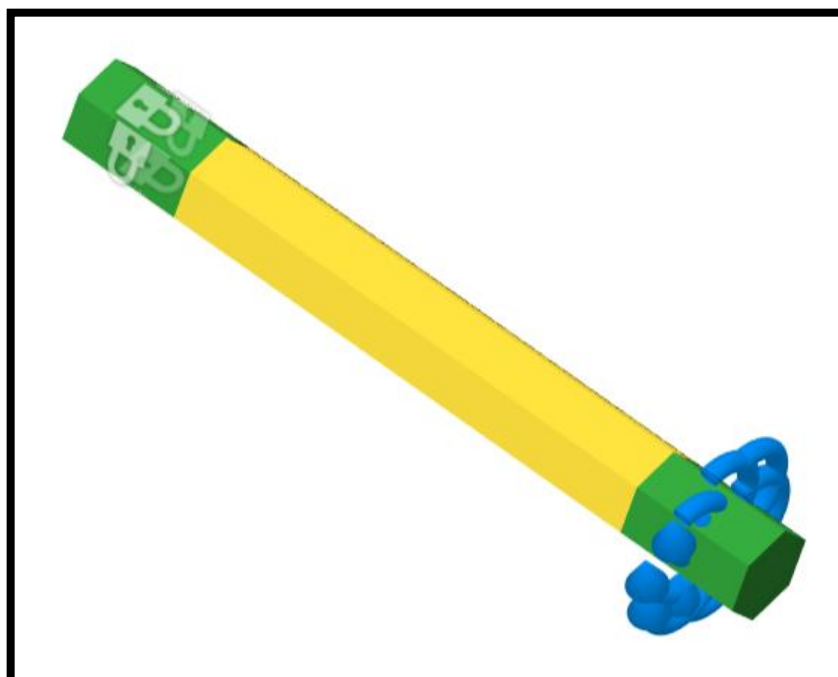
Στην δεύτερη περίπτωση και για δύναμη 40 Nmm, το πρόγραμμα κατάφερε να μειώσει την συνολική μάζα του δοκιμίου στο 51,10 % της αρχικής.

4.2.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Generative Design.

Η μοντελοποίηση για Generative Design πραγματοποιήθηκε με τις ίδιες οριακές συνθήκες που πραγματοποιήθηκε το Topology Optimization. Ωστόσο, για τις ιδιαίτερες ανάγκες του Generative Design, έγινε μια προεπεξεργασία, παρόμοια με αυτή που πραγματοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση τοπολογίας με την εντολή Split Faces. Αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκε η εντολή Split Body για να χωρίσει το δοκίμιο στα επιθυμητά μέρη, καθώς σε αντίθεση με τη βελτιστοποίηση τοπολογίας, οι διατηρητέες περιοχές σε αυτή την περίπτωση επιλέγονται ως σώματα, επομένως απλώς με την δημιουργία διαφορετικών πλευρών δεν θα επιτρεπόταν οι επιλογή των δύο άκρων ώστε να μην συμμετέχουν στην βελτιστοποίηση.

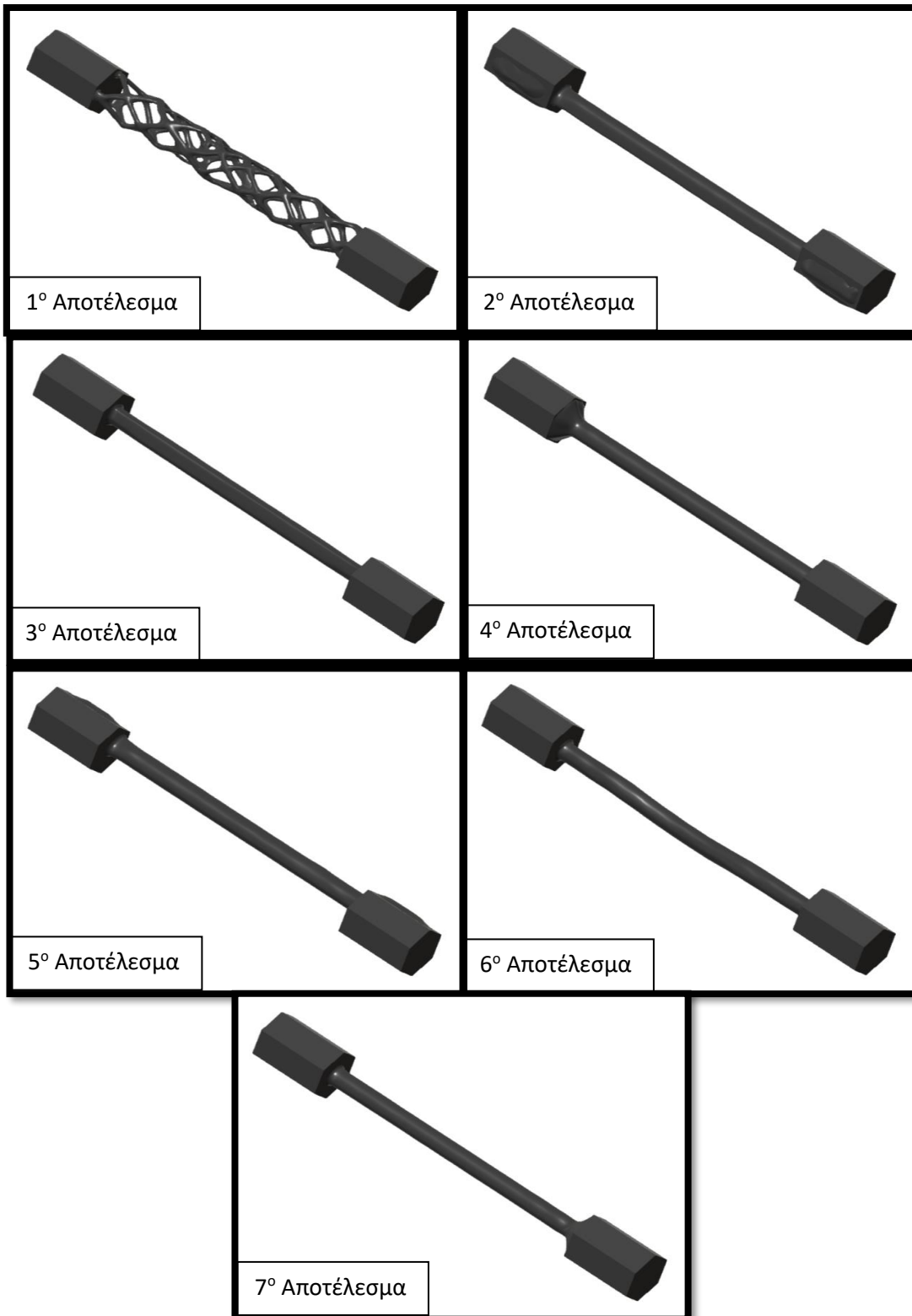
Κατόπιν της επεξεργασίας, επιλέχτηκε ως σώμα βελτιστοποίησης το κεντρικό σώμα, το οποίο συμβολίζεται με κίτρινο χρώμα, ενώ τα δύο ακριανά σώματα επιλέχτηκαν ως διατηρητέες

περιοχές και συμβολίζονται με πράσινο χρώμα. Ως υλικό επιλέχτηκε το PA - 12 - Nylon ενώ σαν στόχος η μεγαλύτερη δυνατή μείωση της μάζας για συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2, που ήταν και η προεπιλογή του προγράμματος. Οι τρόποι παραγωγής του δοκιμίου που επιλέχτηκαν είναι ακριβώς ίδιοι με το παράδειγμα της κάμψης και συγκεκριμένα η προσθετική κατασκευή και η κατασκευή χωρίς περιορισμούς παραγωγικής διαδικασίας. Πραγματοποιήθηκαν πάλι δύο περιπτώσεις, όπως και στην βελτιστοποίηση τοπολογίας, μία για ροπή 30 Nmm και μία για ροπή 40 Nmm. Οι στηρίξεις τοποθετήθηκαν με τον ίδιο τρόπο.

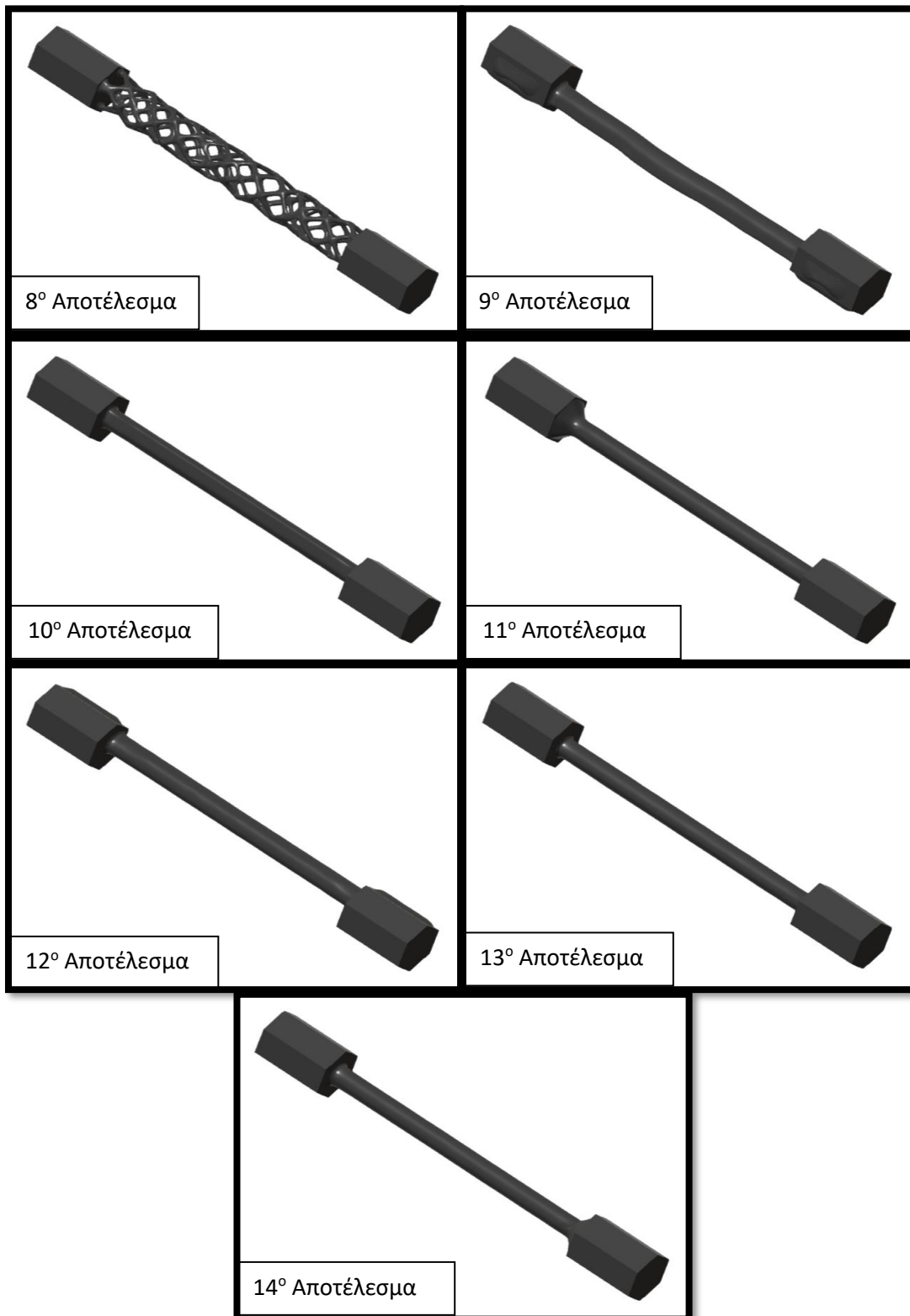


Εικόνα 54: Μοντελοποίηση του δοκιμίου στρέψης για Generative Design.

Κατόπιν της μοντελοποίησης λύθηκαν οι μελέτες στο πρόγραμμα και παράχθηκαν 14 συνολικά αποτελέσματα, 7 για κάθε μελέτη και ένα για κάθε επιλεγμένο τρόπο παραγωγής. Όπως αναλύθηκε και στο 4.1.2 ως τρόποι κατασκευής επιλέχθηκαν οι 6 άξονες τις προσθετικής κατασκευής και ένας τρόπος χωρίς παραγωγικούς περιορισμούς.



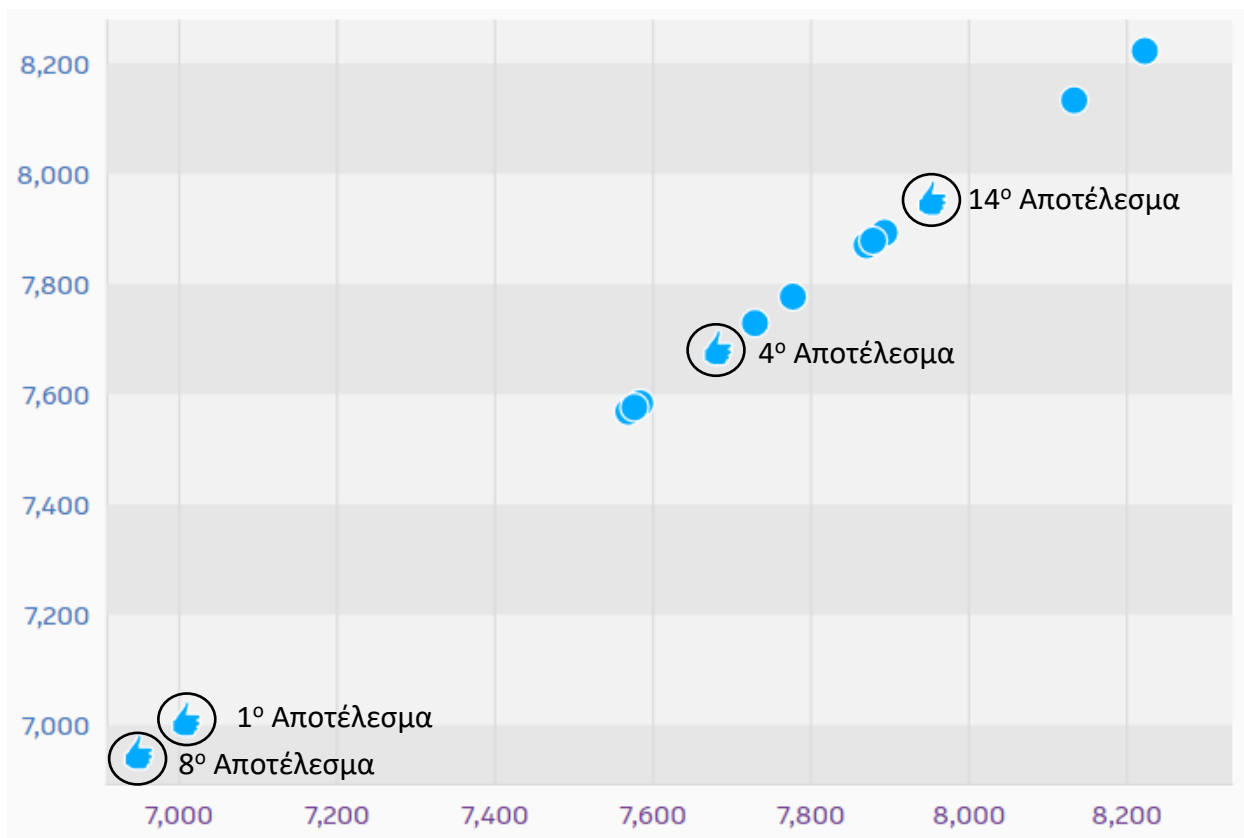
Εικόνα 55: Αποτέλεσμα 1^{ης} μελέτης για ροπή 30 Nmm.



Εικόνα 56: Αποτελέσματα 2^{ης} μελέτης για ροπή 40 Nmm.

| A/A | Τρόπος Παραγωγής | Συμμετρικό | Προτείνεται | Ποσοστό της αρχικής μάζας (%) |
|-----------------------------|------------------|------------|-------------|-------------------------------|
| 1^η Μελέτη | | | | |
| 1 ^ο Αποτέλεσμα | Unrestricted | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 39,90% |
| 2 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 44,01% |
| 3 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 43,14% |
| 4 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z+) | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 43,51% |
| 5 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 44,28% |
| 6 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 43,18% |
| 7 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 43,10% |
| 2^η Μελέτη | | | | |
| 8 ^ο Αποτέλεσμα | Unrestricted | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 39,56% |
| 9 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 46,82% |
| 10 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 44,86% |
| 11 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 44,94% |
| 12 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 46,31% |
| 13 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 44,81% |
| 14 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z-) | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 45,28% |

Πίνακας 6: Περίληψη αποτελεσμάτων Generative Design για στρέψη.



Γράφημα 2: Χάρτης αποτελεσμάτων Generative Design.

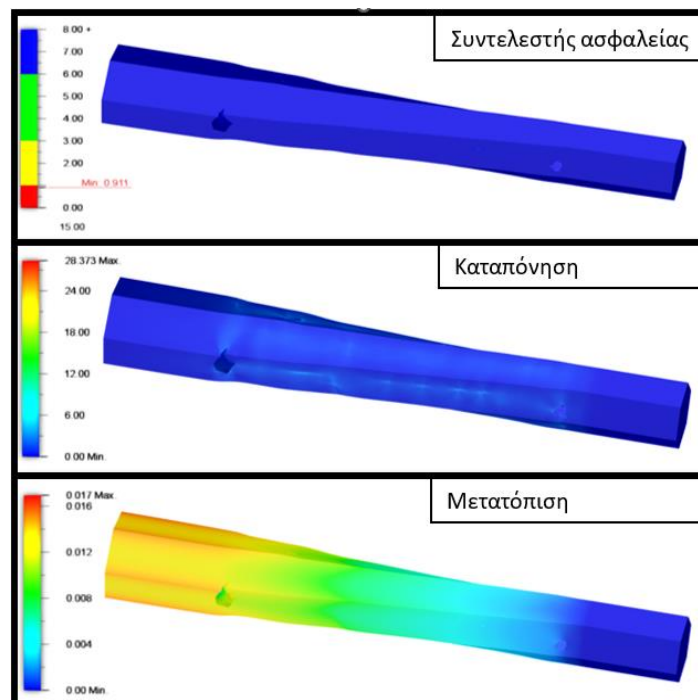
Στο **Γράφημα 2** παρουσιάζονται τα 14 συνολικά αποτελέσματα που προέκυψαν με Generative Design. Στους άξονες y και x αναπαρίστανται οι όγκοι των μοντέλων, επομένως όσο πιο αριστερά στο γράφημα βρίσκεται ένα αποτέλεσμα, τόσο περισσότερο κατάφερε να μειώσει τον συνολικό όγκο. Κάθε ένα από αυτά τα αποτελέσματα αντιστοιχεί και σε έναν διαφορετικό τρόπο παραγωγής όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 6**. Όλα τα αποτελέσματα απεικονίζονται με μπλε τελείες, ενώ αυτά τα αποτελέσματα των οποίων την τελευταία επανάληψη προτείνει το πρόγραμμα απεικονίζονται με το χεράκι με σηκωμένο αντίχειρα.

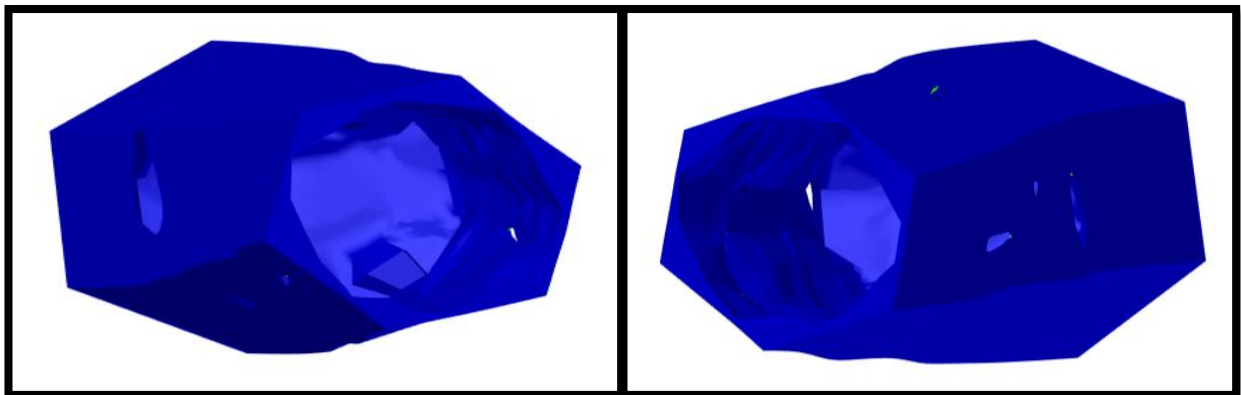
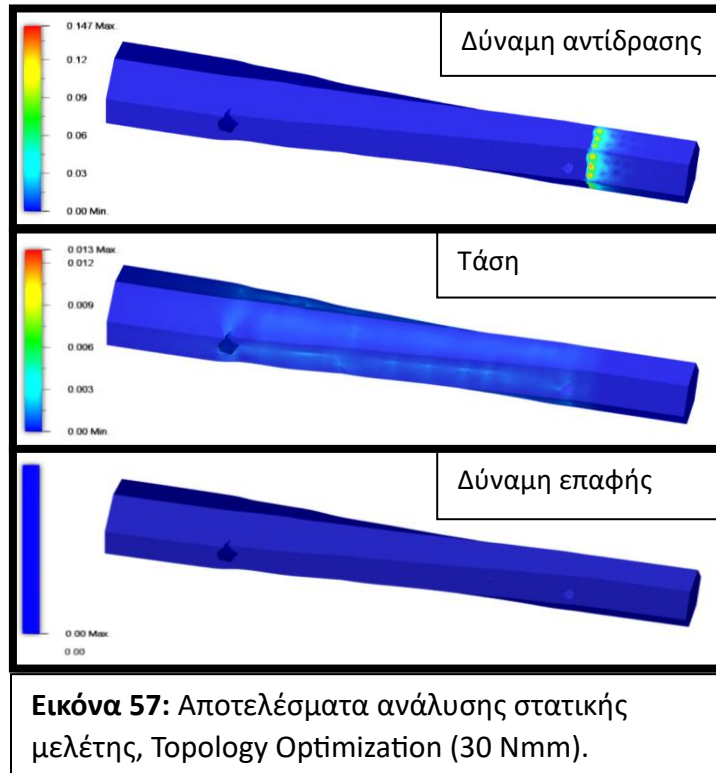
4.2.3 Μοντελοποίηση των βελτιστοποιημένων γεωμετριών για μελέτη στατικής καταπόνησης.

Σε αυτό το στάδιο, θα εισαχθούν οι βελτιστοποιημένες γεωμετρίες στα CAE για να αναδειχθεί ποιος προγραμματιστικός τρόπος παράγει τις πιο αποτελεσματικές γεωμετρίες όσον αφορά τις δοθείσες οριακές συνθήκες. Σε πρώτο στάδιο θα ακολουθήσει η ανάλυση της πρώτης περίπτωσης, που αφορά ροπή 30 Nmm. Αρχικά θα παρουσιαστεί το βελτιστοποιημένο τοπολογικά σχέδιο και έπειτα το βελτιστοποιημένο με γεννητικό σχεδιασμό. Έπειτα θα ακολουθήσει η δεύτερη περίπτωση, που αφορά ροπή 40 Nmm.

1^η Περίπτωση (30 Nmm) – Topology Optimization

Αρχικά έγινε προσπάθεια εισαγωγής της βελτιστοποιημένης τοπολογικά γεωμετρίας η οποία είχε διατηρήσει ποσοστό της αρχικής μάζας στο 48,15 %. Παρουσιάστηκαν σοβαρά προβλήματα όσον αφορά το πλέγμα, τα οποία αποτελούσαν εμπόδια στην επίλυση της μελέτης στατικής καταπόνησης. Πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος, δημιουργώντας πιο λεπτομερές πλέγμα, ακόμα και με τοπικό έλεγχο. Το πρόβλημα συνέχιζε να υπάρχει, οπότε έγινε εισαγωγή γεωμετρίας με ελάχιστα μεγαλύτερο ποσοστό μάζας, συγκεκριμένα στο 52,51 %. Μετά από αυτό το βήμα δεν παρουσιάστηκαν περαιτέρω προβλήματα οπότε λύθηκε η μελέτη.





Εικόνα 58: Τομή της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, ακριβώς στην μέση του δοκιμίου.

Το δοκίμιο παρατηρείται να έχει κάποιες σπές εξωτερικά και κάποιες ασυνέχειες, ωστόσο δημιουργώντας μια τομή στο εσωτερικό του, παρατηρείται ότι το περισσότερο υλικό έχει αφαιρεθεί από εκεί. Η τομή λοιπόν πραγματοποιήθηκε ώστε να φανεί καθαρά στην **Εικόνα 58** ότι έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη αφαίρεση υλικού από το εσωτερικό του μοντέλου.

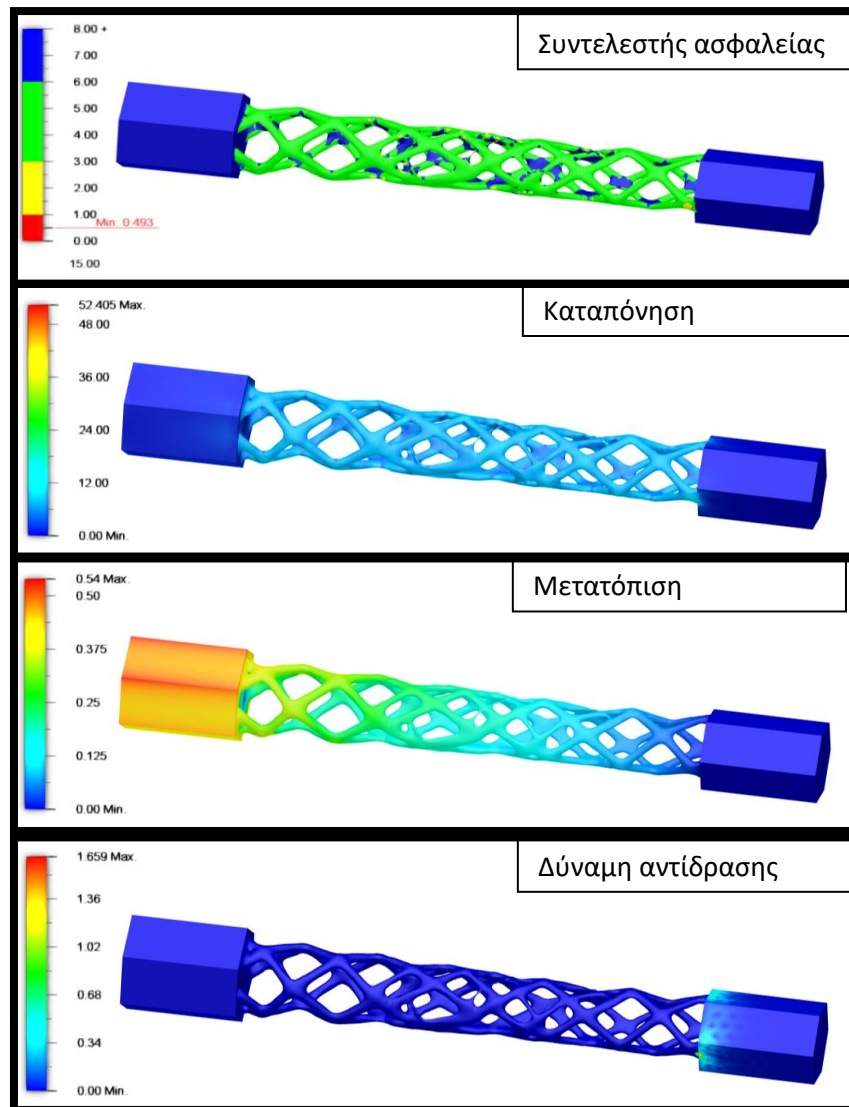
Παρατηρείται από την **Εικόνα 57** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 28,373 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 0,017 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 0,147 N και μέγιστη τάση 0,013. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 0,911.

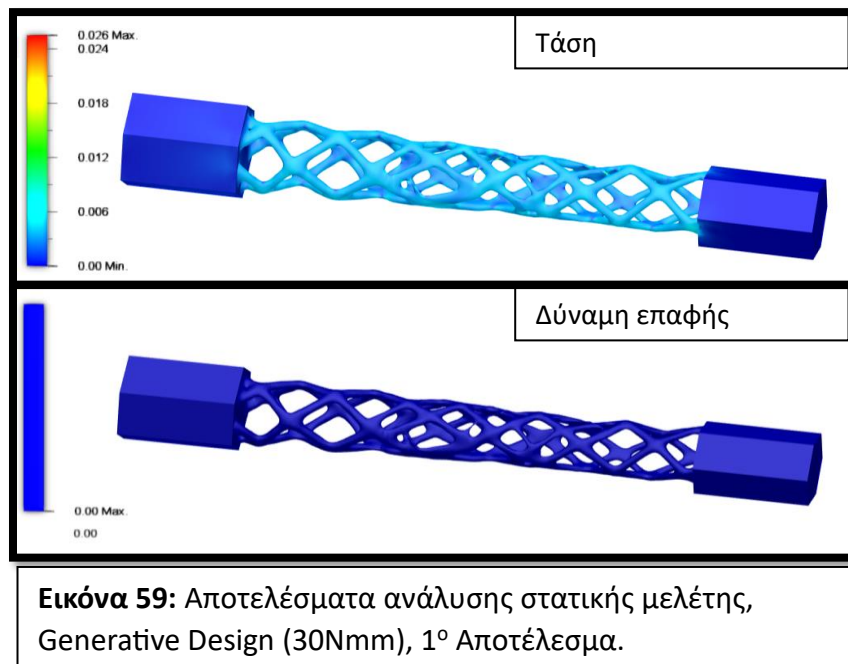
| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 0.911 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 1.070E-05 MPa | 28.373 MPa |
| 1st Principal | -0.412 MPa | 30.561 MPa |
| 3rd Principal | -14.266 MPa | 1.628 MPa |
| Normal XX | -4.701 MPa | 7.18 MPa |
| Normal YY | -2.747 MPa | 4.741 MPa |
| Normal ZZ | -8.762 MPa | 24.911 MPa |
| Shear XY | -5.008 MPa | 2.97 MPa |
| Shear YZ | -4.314 MPa | 5.331 MPa |
| Shear ZX | -11.799 MPa | 10.035 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.017 mm |
| X | -0.016 mm | 0.016 mm |
| Y | -0.015 mm | 0.013 mm |
| Z | -0.001 mm | 9.237E-04 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.147 N |
| X | -0.118 N | 0.123 N |
| Y | -0.119 N | 0.119 N |
| Z | -0.076 N | 0.085 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 3.701E-09 | 0.013 |
| 1st Principal | 1.444E-09 | 0.015 |
| 3rd Principal | -0.01 | -1.009E-09 |
| Normal XX | -0.001 | 0.002 |
| Normal YY | -9.815E-04 | 8.299E-04 |
| Normal ZZ | -0.003 | 0.008 |
| Shear XY | -0.004 | 0.002 |
| Shear YZ | -0.004 | 0.004 |
| Shear ZX | -0.01 | 0.008 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 7: Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης στατικής μελέτης, Topology Optimization (30 Nmm).

1^η Περίπτωση (30Nmm) - Generative Design - 1^ο Αποτέλεσμα

Σε αυτό το σημείο, θα εισαχθεί σε περιβάλλον μελέτης στατικής καταπόνησης το 1^ο αποτέλεσμα που προέκυψε από τον γεννητικό σχεδιασμό, με τις ίδιες ακριβώς οριακές συνθήκες που τέθηκαν στην αντίστοιχη βελτιστοποιημένη τοπολογικά γεωμετρία. Πρόκειται για το δοκίμιο που κατάφερε να μειώσει την συνολική μάζα στο 43,51 % της αρχικής.





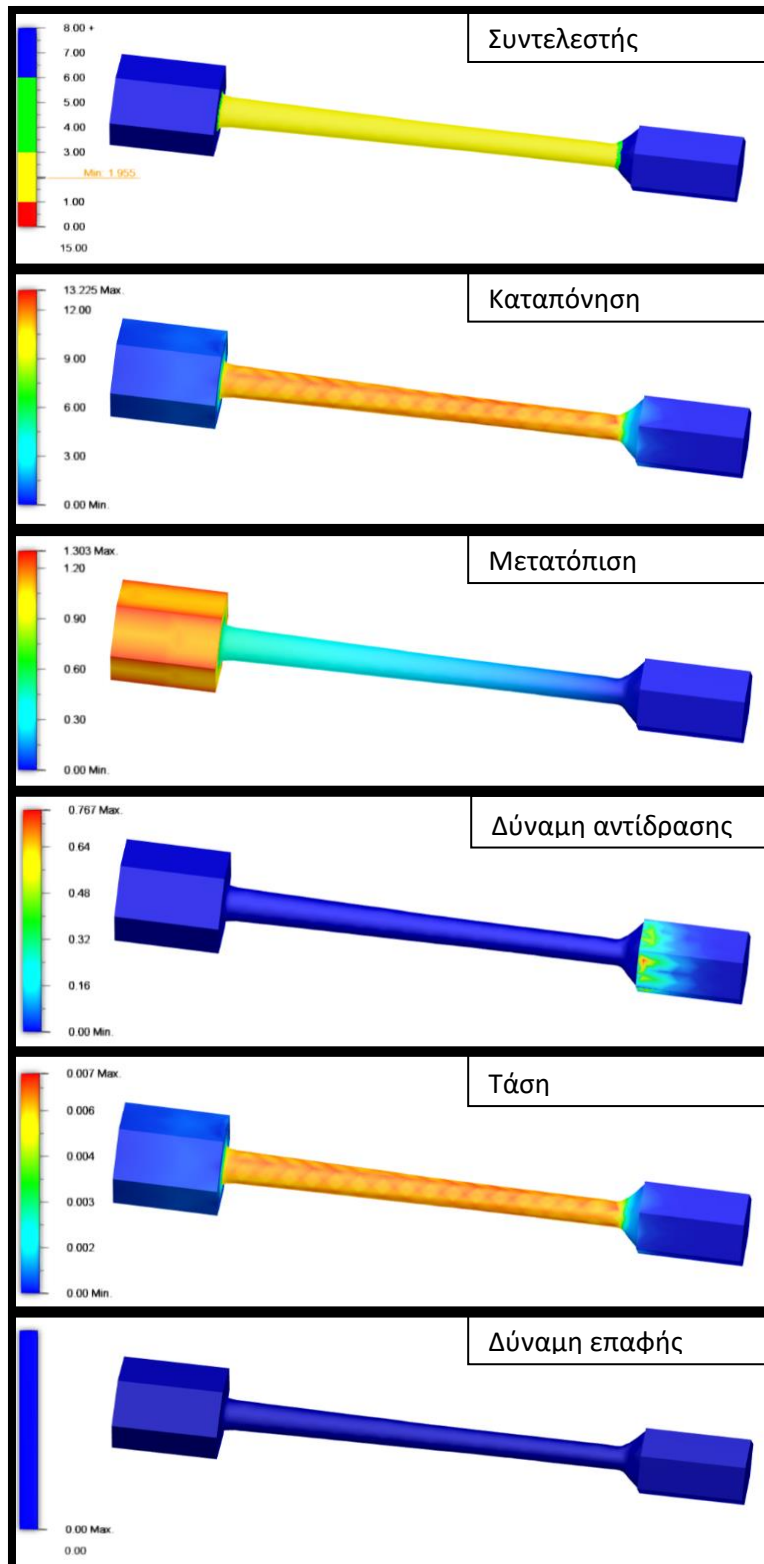
Εικόνα 59: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικής μελέτης, Generative Design (30Nmm), 1^ο Αποτέλεσμα.

Παρατηρείται από την **Εικόνα 59** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 52,405 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 0,54 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 1,659 N και μέγιστη τάση 0,026. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 0,493.

| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|-------------|------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 0.493 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 52.405 MPa |
| 1st Principal | -1.976 MPa | 53.808 MPa |
| 3rd Principal | -38.818 MPa | 4.111 MPa |
| Normal XX | -10.599 MPa | 9.535 MPa |
| Normal YY | -20.227 MPa | 37.678 MPa |
| Normal ZZ | -22.699 MPa | 25.885 MPa |
| Shear XY | -9.159 MPa | 11.419 MPa |
| Shear YZ | -23.57 MPa | 14.251 MPa |
| Shear ZX | -13.077 MPa | 8.292 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.54 mm |
| X | -0.385 mm | 0.452 mm |
| Y | -0.442 mm | 0.537 mm |
| Z | -0.008 mm | 0.015 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 1.659 N |
| X | -0.521 N | 1.554 N |
| Y | -0.476 N | 0.567 N |
| Z | -0.689 N | 0.438 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.026 |
| 1st Principal | 0.00 | 0.029 |
| 3rd Principal | -0.022 | 0.00 |
| Normal XX | -0.003 | 0.003 |
| Normal YY | -0.006 | 0.013 |
| Normal ZZ | -0.007 | 0.008 |
| Shear XY | -0.008 | 0.009 |
| Shear YZ | -0.019 | 0.012 |
| Shear ZX | -0.011 | 0.007 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 8: Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design. (30Nmm), 1^ο Αποτέλεσμα.

1^η Περίπτωση (30Nmm) - Generative Design - 4^ο Αποτέλεσμα



Εικόνα 60: Αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design. (30Nmm) 4^ο Αποτέλεσμα.

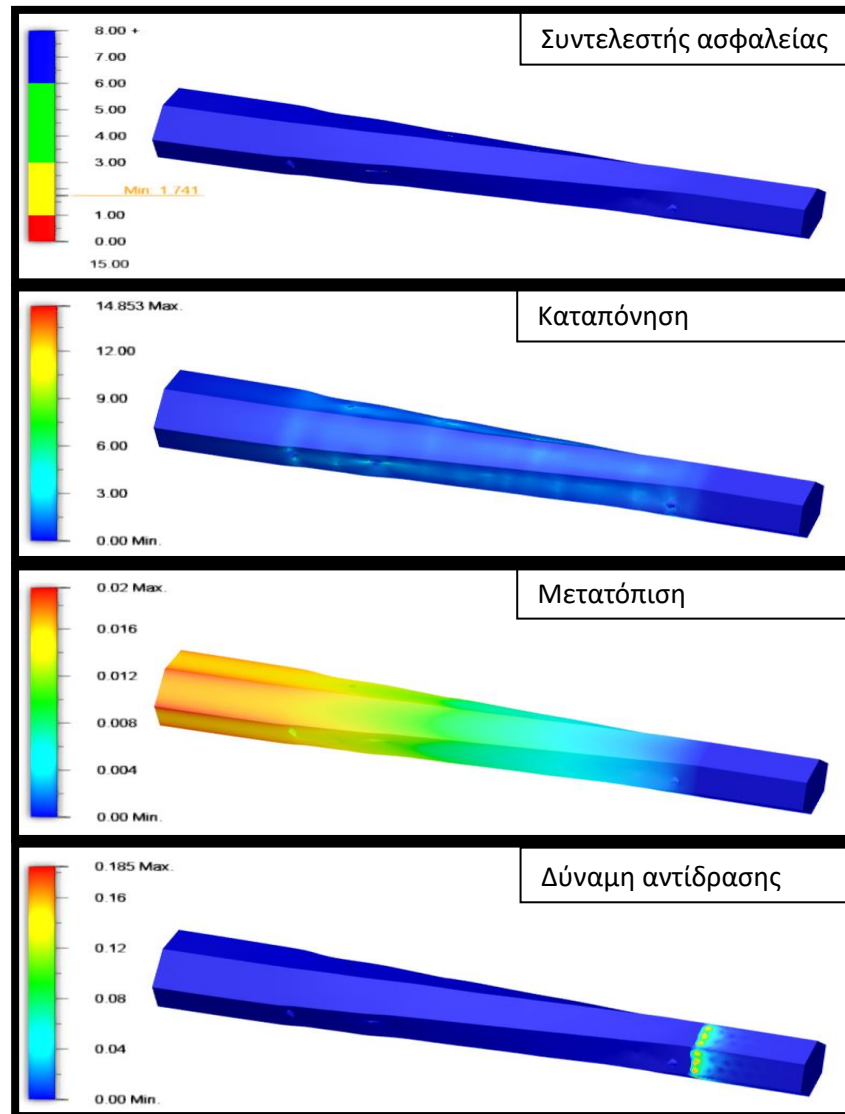
Παρατηρείται από την **Εικόνα 60** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 13,225 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 1,303 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 0,767 N και μέγιστη τάση 0,007. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 1,955.

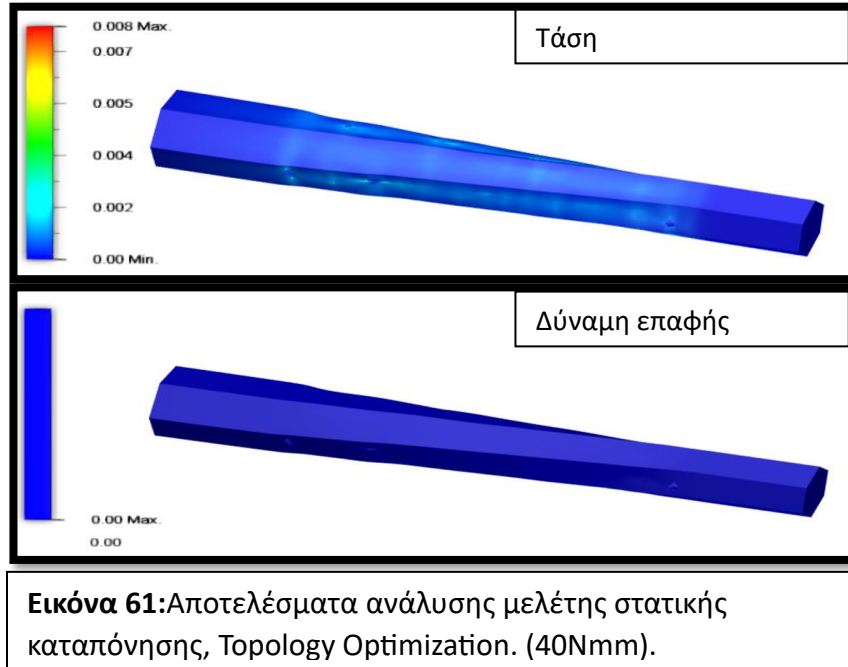
| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|----------------|---------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.955 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 13.225 MPa |
| 1st Principal | -6.273E-06 MPa | 8.259 MPa |
| 3rd Principal | -8.096 MPa | 1.737E-07 MPa |
| Normal XX | -3.362 MPa | 2.935 MPa |
| Normal YY | -3.302 MPa | 4.178 MPa |
| Normal ZZ | -0.879 MPa | 0.775 MPa |
| Shear XY | -4.172 MPa | 3.26 MPa |
| Shear YZ | -7.02 MPa | 7.068 MPa |
| Shear ZX | -7.356 MPa | 7.268 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 1.303 mm |
| X | -1.124 mm | 1.123 mm |
| Y | -1.303 mm | 1.291 mm |
| Z | -7.038E-04 mm | 7.288E-04 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.767 N |
| X | -0.424 N | 0.462 N |
| Y | -0.756 N | 0.258 N |
| Z | -0.08 N | 0.065 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.007 |
| 1st Principal | 0.00 | 0.006 |
| 3rd Principal | -0.006 | 0.00 |
| Normal XX | -0.001 | 0.001 |
| Normal YY | -0.001 | 0.002 |
| Normal ZZ | -2.088E-04 | 2.971E-04 |
| Shear XY | -0.003 | 0.003 |
| Shear YZ | -0.006 | 0.006 |
| Shear ZX | -0.006 | 0.006 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 9: Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design. (30Nmm) 4^ο Αποτέλεσμα.

2^η Περίπτωση (40Nmm) - Topology Optimization

Αρχικά, το ποσοστό το οποίο έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ήταν στο 51,10% της αρχικής μάζας. Ωστόσο, με πραγματοποίηση μελέτης στατικής καταπόνησης, ο συντελεστής ασφαλείας βγαίνει μικρότερος της μονάδας, επομένως θα χρησιμοποιηθεί ελαφρώς μεγαλύτερη αναλογία μάζας, στο 52,59 %. Σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες αλλάζουν, με την μόνη διαφορά ότι οι ροπές που θα ασκούνται στα άκρα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας θα είναι ίσες με 40 Nmm.





Εικόνα 61: Αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Topology Optimization. (40Nmm).

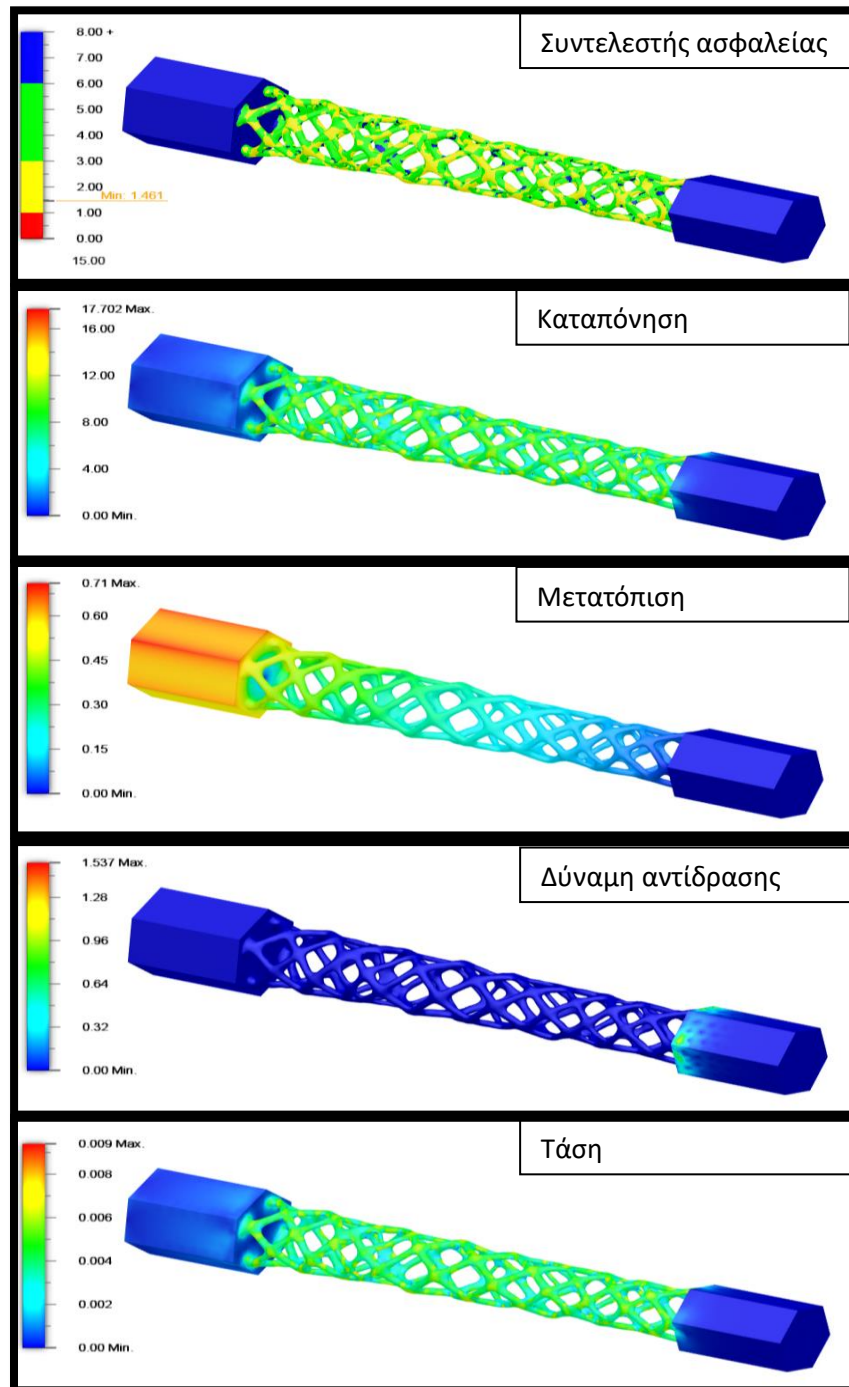
Παρατηρείται από την **Εικόνα 61** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 14,853 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 0,02 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 0,185 N και μέγιστη τάση 0,008. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 1,741.

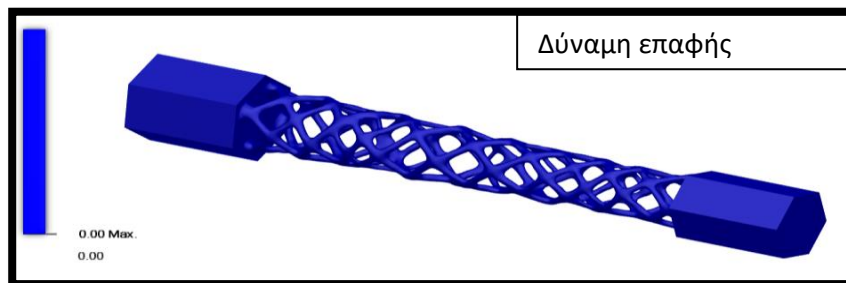
| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.741 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 14.853 MPa |
| 1st Principal | -0.35 MPa | 9.904 MPa |
| 3rd Principal | -10.389 MPa | 0.425 MPa |
| Normal XX | -3.887 MPa | 3.194 MPa |
| Normal YY | -1.282 MPa | 1.303 MPa |
| Normal ZZ | -8.104 MPa | 6.644 MPa |
| Shear XY | -1.767 MPa | 1.169 MPa |
| Shear YZ | -3.987 MPa | 4.216 MPa |
| Shear ZX | -6.235 MPa | 7.954 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.02 mm |
| X | -0.018 mm | 0.019 mm |
| Y | -0.017 mm | 0.015 mm |
| Z | -9.810E-04 mm | 9.464E-04 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.185 N |
| X | -0.157 N | 0.15 N |
| Y | -0.162 N | 0.166 N |
| Z | -0.095 N | 0.096 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.008 |
| 1st Principal | 0.00 | 0.007 |
| 3rd Principal | -0.007 | 0.00 |
| Normal XX | -0.001 | 9.768E-04 |
| Normal YY | -3.884E-04 | 3.603E-04 |
| Normal ZZ | -0.003 | 0.002 |
| Shear XY | -0.001 | 9.580E-04 |
| Shear YZ | -0.003 | 0.003 |
| Shear ZX | -0.005 | 0.007 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 10: Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Topology Optimization. (40Nmm).

2^η Περίπτωση (40Nmm) - Generative Design - 8^ο Αποτέλεσμα

Εισάχθηκε και το 8^ο αποτέλεσμα που παράγει η μελέτη του Generative Design. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες οριακές συνθήκες με αυτές του Topology Optimization ώστε να γίνει επιτυχώς η σύγκριση.





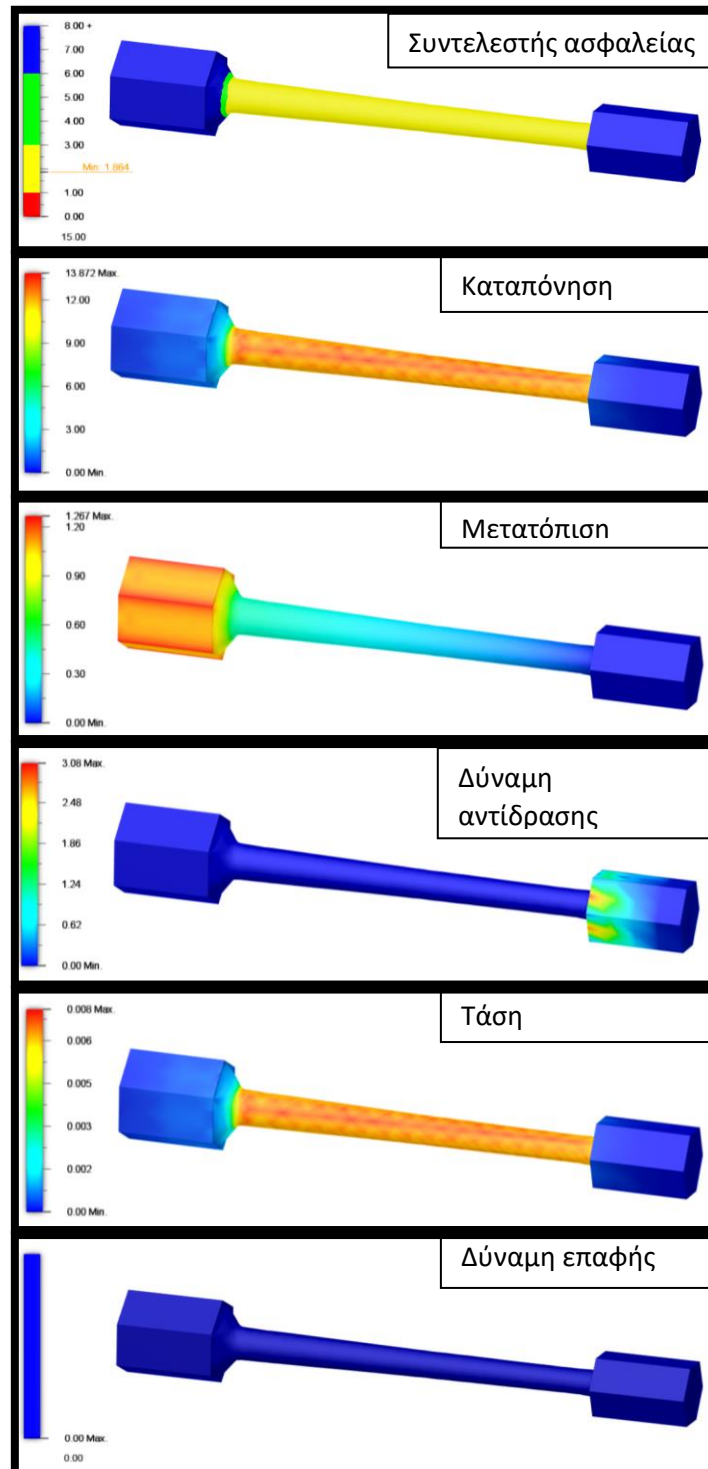
Εικόνα 62: Αποτελέσματα ανάλυσης στατικής μελέτης καταπόνησης, Generative Design. (40Nmm) 8^ο Αποτέλεσμα.

Παρατηρείται από την **Εικόνα 62** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 17,702 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 0,71 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 1,537 N και μέγιστη τάση 0,009. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 1,461.

| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|-------------|------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.461 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 17.702 MPa |
| 1st Principal | -1.379 MPa | 16.969 MPa |
| 3rd Principal | -18.525 MPa | 1.079 MPa |
| Normal XX | -11.33 MPa | 9.624 MPa |
| Normal YY | -10.444 MPa | 12.083 MPa |
| Normal ZZ | -14.865 MPa | 12.965 MPa |
| Shear XY | -5.531 MPa | 6.175 MPa |
| Shear YZ | -6.959 MPa | 7.339 MPa |
| Shear ZX | -7.775 MPa | 7.31 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.71 mm |
| X | -0.523 mm | 0.584 mm |
| Y | -0.577 mm | 0.71 mm |
| Z | -0.009 mm | 0.017 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 1.537 N |
| X | -0.87 N | 0.793 N |
| Y | -0.62 N | 0.764 N |
| Z | -1.105 N | 0.827 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.009 |
| 1st Principal | 0.00 | 0.009 |
| 3rd Principal | -0.011 | 0.00 |
| Normal XX | -0.004 | 0.003 |
| Normal YY | -0.004 | 0.004 |
| Normal ZZ | -0.005 | 0.004 |
| Shear XY | -0.005 | 0.005 |
| Shear YZ | -0.006 | 0.006 |
| Shear ZX | -0.006 | 0.006 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 11: Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design. (40Nmm) 8° Αποτέλεσμα.

2^η Περίπτωση (40Nmm) - Generative Design - 14^ο Αποτέλεσμα



Εικόνα 63: Αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design. (40Nmm) 14^ο Αποτέλεσμα.

Παρατηρείται από την **Εικόνα 63** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 13,872 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 1,267 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 3,08 N και μέγιστη τάση 0,008. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 1,864.

| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 1.864 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 13.872 MPa |
| 1st Principal | -0.012 MPa | 8.653 MPa |
| 3rd Principal | -8.136 MPa | 0.009 MPa |
| Normal XX | -3.429 MPa | 3.513 MPa |
| Normal YY | -2.955 MPa | 3.274 MPa |
| Normal ZZ | -1.025 MPa | 0.951 MPa |
| Shear XY | -3.189 MPa | 3.282 MPa |
| Shear YZ | -7.879 MPa | 7.829 MPa |
| Shear ZX | -7.433 MPa | 7.536 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 1.267 mm |
| X | -1.097 mm | 1.097 mm |
| Y | -1.267 mm | 1.266 mm |
| Z | -5.761E-04 mm | 6.421E-04 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 3.08 N |
| X | -2.879 N | 1.91 N |
| Y | -2.168 N | 2.422 N |
| Z | -0.137 N | 0.246 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.008 |
| 1st Principal | 0.00 | 0.007 |
| 3rd Principal | -0.007 | 0.00 |
| Normal XX | -0.001 | 0.001 |
| Normal YY | -0.001 | 0.001 |
| Normal ZZ | -3.259E-04 | 2.843E-04 |
| Shear XY | -0.003 | 0.003 |
| Shear YZ | -0.006 | 0.006 |
| Shear ZX | -0.006 | 0.006 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 12: Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design. (40Nmm) 14^ο Αποτέλεσμα.

4.2.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων.

1^η Περίπτωση (30Nmm)

Στην πρώτη χρησιμοποιήθηκε ένα δοκίμιο TO και δύο δοκίμια GD, τα οποία πρότεινε το πρόγραμμα, συγκεκριμένα το 1^ο και το 4^ο. Και τα τρία τέθηκαν επιτυχώς σε μελέτη στατικής καταπόνησης και τα αποτελέσματα τους παρουσιάστηκαν αναλυτικά.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, το TO δοκίμιο παρουσίασε ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ίσο με 0,911, ενώ το 1^ο GD αποτέλεσμα 0,493 και το 4^ο GD αποτέλεσμα 1,955. **Καθίσταται σαφές ότι το 4^ο GD αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν πολύ ανώτερο και από τις δύο άλλες βελτιστοποιημένες γεωμετρίες.**

Η TO γεωμετρία, δέχτηκε 28,373 MPa καταπόνηση, το 1^ο GD αποτέλεσμα 52,405 MPa και το 4^ο GD αποτέλεσμα 13,225 MPa. **Φαίνεται και από τον χρωματισμό των σχημάτων ότι το 4^ο GD αποτέλεσμα κατάφερε να μοιράσει τις τάσεις πιο αποτελεσματικά και ομαλά γι' αυτό και η μέγιστη καταπόνηση που εμφανίζεται σε αυτό είναι αρκετά μικρότερη και από τις δύο άλλες βελτιστοποιημένες γεωμετρίες.**

Η μετατόπιση στην TO γεωμετρία παρουσιάστηκε μέγιστη στα 0,017 mm. Το 1^ο GD αποτέλεσμα στα 0,54 mm ενώ το 4^ο GD αποτέλεσμα στα 1,303 mm. **Καθίσταται σαφές ότι η βελτιστοποιημένη τοπολογικά γεωμετρία κατάφερε να μειώσει αποτελεσματικότερα την μετατόπιση.**

Τέλος, το 4^ο GD αποτέλεσμα μείωσε την μάζα στο **43,51%**, το 1^ο GD στο **39,90%** και η **TO γεωμετρία στο 52,51%** της αρχικής μάζας Av και και το 1^ο GD κατάφερε πιο αποτελεσματικά να μειώσει την μάζα, ο χαμηλός συντελεστής ασφαλείας του, σε συνδυασμό με την όχι τόσο ομαλή κατανομή των δυνάμεων δεν το καθιστά επιτυχημένο. **Και σε αυτόν λοιπόν τον τομέα αλλά και συνολικά, το 4^ο GD αποτέλεσμα ήταν και το πιο αποδοτικό.**

2^η Περίπτωση (40Nmm)

Σε αυτή τη περίπτωση, συγκρίνονται μία βελτιστοποιημένη τοπολογικά γεωμετρία, και το 8^ο και 14^ο αποτέλεσμα του γεννητικού σχεδιασμού.

Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας ήταν στο 1,741 στην TO γεωμετρία, στο 8^ο GD αποτέλεσμα σε 1,461 και το 14^ο GD αποτέλεσμα σε 1,864. **Άρα σε αυτή τη κατηγορία ήταν πιο αποτελεσματικό το 14^ο GD αποτέλεσμα.**

Όσον αφορά την μέγιστη καταπόνηση που εμφανίζεται, η TO γεωμετρία είχε μέγιστη τιμή τα 14,853 MPa, το 8^ο GD 17,702 MPa και το 14^ο GD 13,872 MPa. **Βλέποντας και τον χρωματισμό του σχήματος το 14^ο GD είχε πιο ομαλή κατανομή δυνάμεων καθώς και την μικρότερη μέγιστη καταπόνηση.**

Όσον αφορά την μετατόπιση, η ΤΟ γεωμετρία την κράτησε στα 0,02 mm, το 8^ο GD 0,71 mm και το 14^ο GD 1,267 mm.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, η μάζα για την **ΤΟ μειώθηκε στο 52,59%**, η μάζα του **8^{ου} GD στο 39,56%** και του **14^{ου} GD στο 45,28%**. Συγκεντρωτικά λοιπόν το **14^ο GD αναδείχθηκε ανώτερο στις κατηγορίες.**

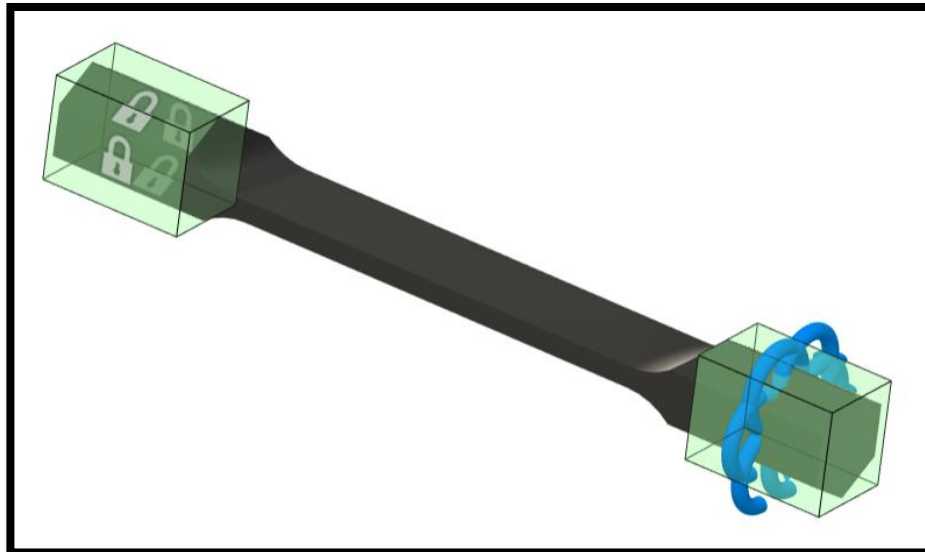
4.3 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του δεύτερου δοκιμίου στρέψης και της μοντελοποίησης αυτού.

Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί πάλι προσομοίωση στρέψης με τις φορτίσεις και τις στηρίξεις τοποθετημένες στα ίδια σημεία με αυτές του πρώτου δοκιμίου στρέψης. Το δοκίμιο πρόκειται να συγκρατηθεί ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που συγκρατήθηκε και το πρώτο δοκίμιο στην στρέψης και συγκεκριμένα σε βάθος 20 mm από την κάθε του πλευρά. Η ειδοποιός διαφορά του δεύτερου δοκιμίου στρέψης έγκειται στο γεγονός ότι το σώμα ενδιάμεσα από τις συγκρατήσεις του έχει πιο στενή διατομή. Οι διαστάσεις του φαίνονται πιο αναλυτικά στην **Εικόνα 64**.

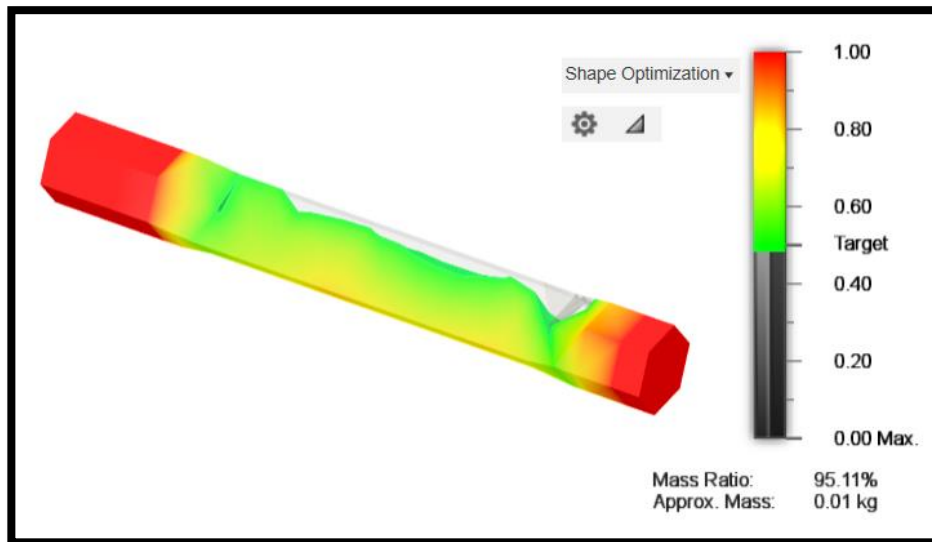


4.3.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Topology Optimization.

Σε αυτήν την περίπτωση, όπως προαναφέρθηκε, έχει πραγματοποιηθεί ήδη καταπόνηση στρέψης επομένως θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες οριακές συνθήκες. Θα τοποθετηθούν οι στηρίξεις στις 6 πλευρές της μιας μεριάς του δοκιμίου και οι ροπές στις 6 πλευρές της άλλης πλευράς του δοκιμίου, στα 5 Nm. Το υλικό θα είναι το ίδιο όπως και με όλες τις υπόλοιπες καταπονήσεις ήτοι PA - 12 - Nylon, ενώ σαν πλέγμα θα επιλεγεί πάλι η προεπιλογή του προγράμματος στο 10%. Οι διατηρητέες περιοχές ορίζονται πάλι στα 20 mm από την κάθε πλευρά του δοκιμίου και εν τέλει επιλέγεται ως σώμα βελτιστοποίησης το δοκίμιο. Στο πρόγραμμα τίθεται σαν επιλογή η μείωση της μάζας σε λιγότερο από το 85% της αρχικής και η μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Με αυτές τις συνθήκες λύνεται η μελέτη.



Εικόνα 65: Μοντελοποίηση του δεύτερου δοκιμίου στρέψης για βελτιστοποίηση τοπολογίας.



Εικόνα 66: Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης τοπολογίας για δύναμη 5 Nmm.

Παρατηρείται ότι η μείωση της μάζας είναι στο 95,11% της αρχικής.

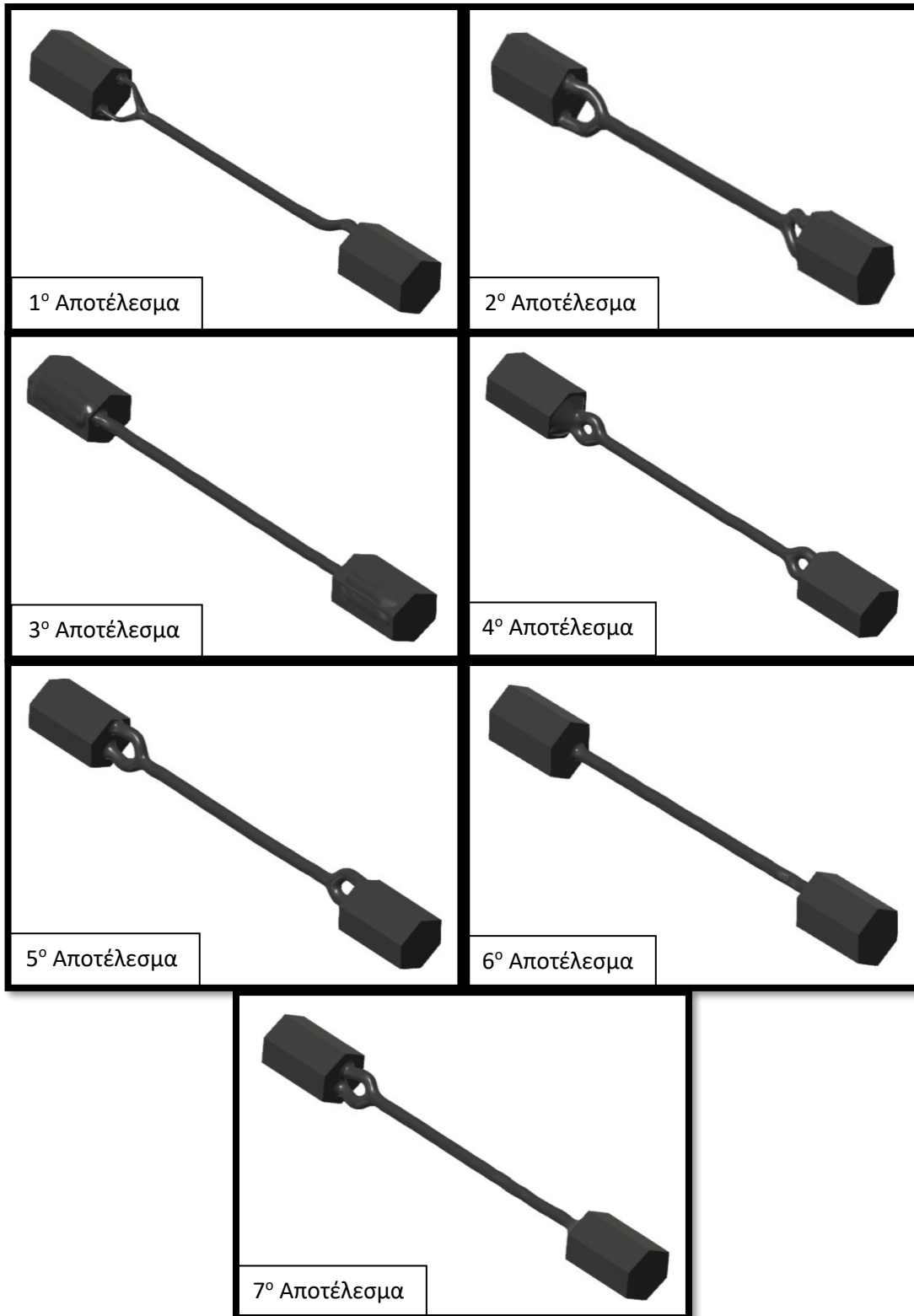
4.3.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών για Generative Design.

Και σε αυτό το δοκίμιο, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση για Generative Design με τις ίδιες οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο Topology Optimization. Παρόμοια με το προηγούμενο δοκίμιο στρέψης, πραγματοποιήθηκε μια προεπεξεργασία, λόγω της ιδιαιτερότητας του Generative Design να επιλέγει σώματα και όχι όψεις. Αναλυτικότερα, με την εντολή Split Body και την βοήθεια 2 επιπέδων (Planes) στον χώρο, χωρίστηκε το σώμα βελτιστοποίησης από τα διατηρητέα σώματα τα οποία επιλέχτηκαν με κίτρινο και πράσινο χρώμα αντιστοίχως. Ως δυνατοί τρόποι παραγωγής του δοκιμίου τέθηκαν ένας χωρίς περιορισμούς και οι έξι δυνατοί άξονες της προσθετικής κατασκευής. Το υλικό PA - 12 - Nylon. Η μοντελοποίηση έγινε ως εξής:



Εικόνα 67: Μοντελοποίηση του δεύτερου δοκιμίου στρέψης για Generative Design.

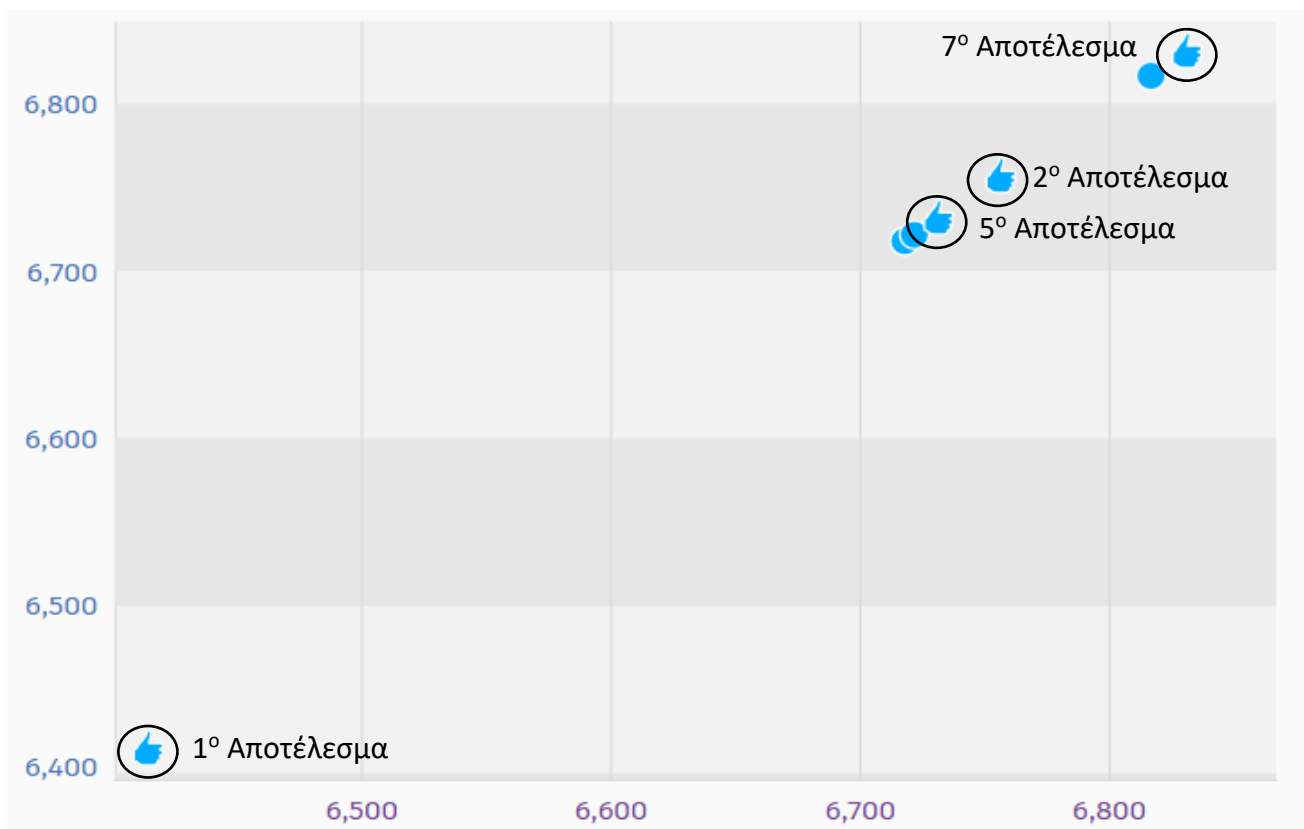
Κατόπιν της μοντελοποίησης λύθηκε η μελέτη στο πρόγραμμα και παράχθηκαν 7 συνολικά αποτελέσματα, για κάθε ένα τρόπο παραγωγής.



Εικόνα 68: Αποτελέσματα μελέτης δεύτερου δοκιμίου στρέψης, για 5 Nm.

| A/A | Τρόπος Παραγωγής | Συμμετρικό | Προτείνεται | Ποσοστό της αρχικής μάζας (%) |
|-----------------------------|------------------|------------|-------------|-------------------------------|
| 1^η Μελέτη | | | | |
| 1 ^ο Αποτέλεσμα | Unrestricted | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 66,34% |
| 2 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X+) | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 69,87% |
| 3 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 69,52% |
| 4 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z+) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 70,56% |
| 5 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (X-) | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 69,62% |
| 6 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Y-) | ΟΧΙ | ΟΧΙ | 69,48% |
| 7 ^ο Αποτέλεσμα | Additive (Z-) | ΟΧΙ | ΝΑΙ | 70,65% |

Πίνακας 13: Περίληψη αποτελεσμάτων Generative Design για πρώτο δοκίμιο στρέψης.



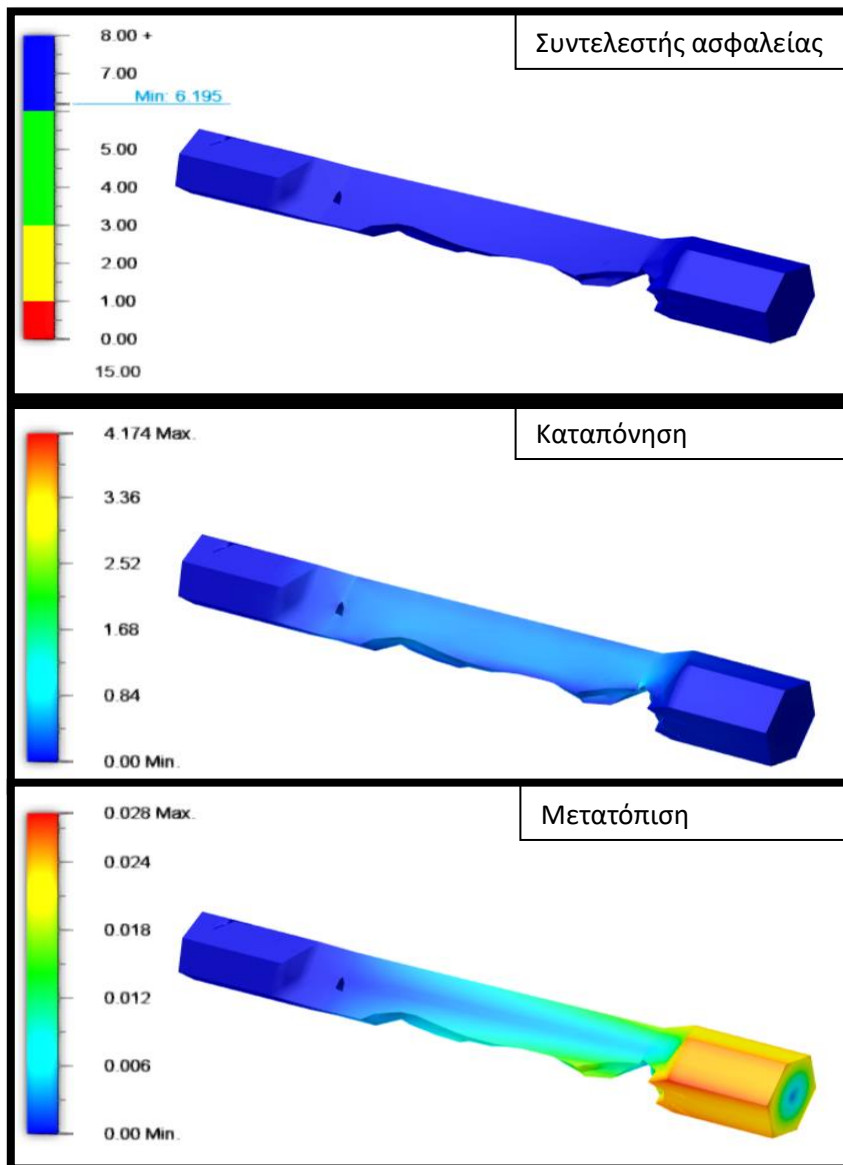
Γράφημα 3: Χάρτης αποτελεσμάτων Generative Design.

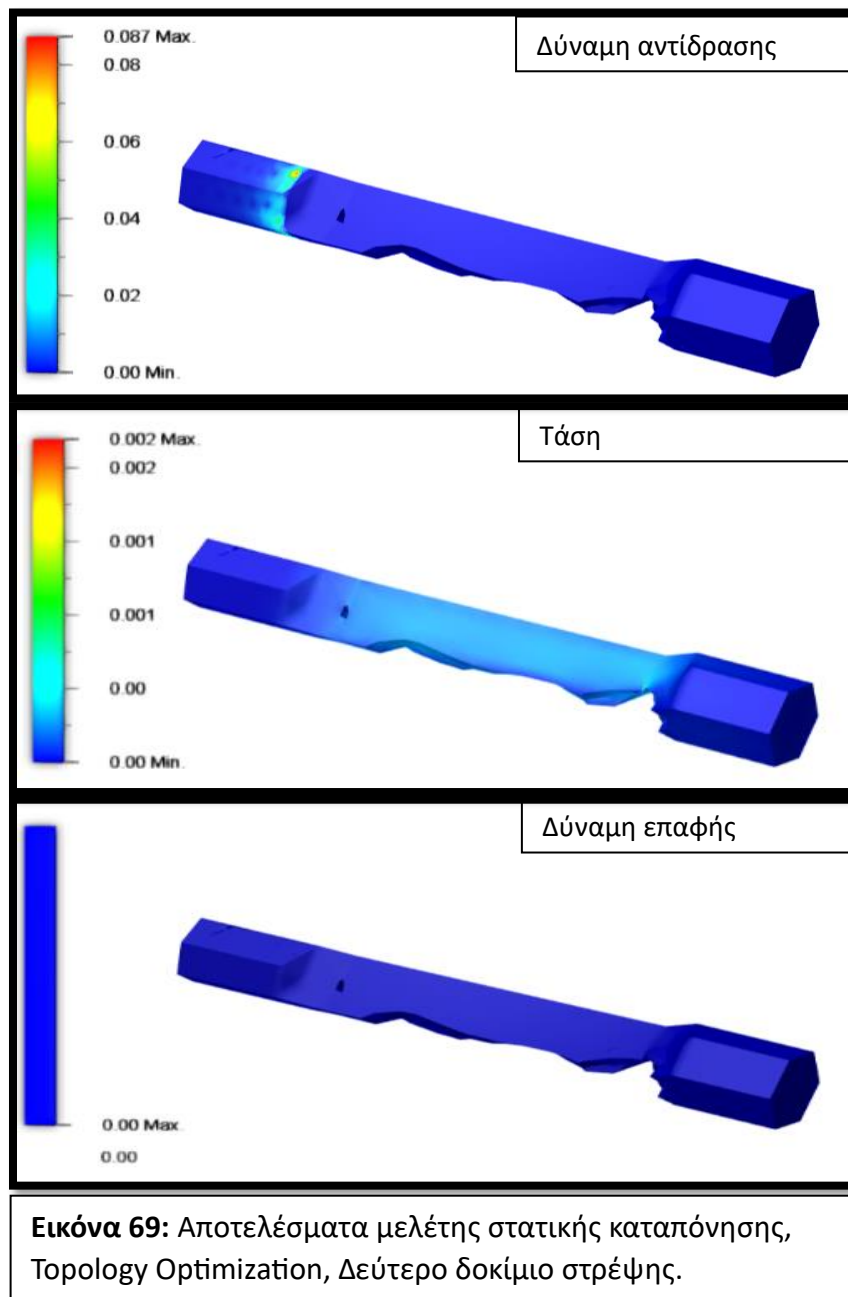
Στο **Γράφημα 3** παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα που προέκυψαν με Generative Design. Στους άξονες y και x αναπαρίστανται οι όγκοι των μοντέλων, επομένως όσο πιο αριστερά στο γράφημα βρίσκεται ένα αποτέλεσμα, τόσο περισσότερο κατάφερε να μειώσει τον συνολικό όγκο. Κάθε ένα από αυτά τα αποτελέσματα αντιστοιχεί και σε έναν διαφορετικό τρόπο παραγωγής όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 13**. Όλα τα αποτελέσματα απεικονίζονται με μπλε τελείες, ενώ αυτά τα αποτελέσματα των οποίων την τελευταία επανάληψη προτείνει το πρόγραμμα απεικονίζονται με το χεράκι με σηκωμένο αντίχειρα.

4.3.3 Μοντελοποίηση των βελτιστοποιημένων γεωμετριών για μελέτη στατικής καταπόνησης. Σε αυτό το στάδιο θα εισαχθούν οι βελτιστοποιημένες γεωμετρίες στα CAE, αρχικά αυτή που βελτιστοποιήθηκε τοπολογικά και έπειτα αυτή που βελτιστοποιήθηκε με γεννητικό σχεδιασμό.

Topology Optimization

Αρχικά η μάζα της γεωμετρίας είχε καταφέρει να μειωθεί στο 93%. Ωστόσο, παρουσιάζονταν σοβαρά προβλήματα στο πλέγμα τα οποία δεν επέτρεπαν την λύση της μελέτης του CAE, επομένως έπρεπε να επιλεγεί ένα μεγαλύτερο ποσοστό μάζας στο οποίο δεν θα εμφανιζόντουσαν τέτοιου είδους προβλήματα, γι' αυτό επιλέχτηκε το 95,11%. Με τις ίδιες οριακές συνθήκες λοιπόν και αυτό το ποσοστό μάζας, λύθηκε η μελέτη στατικής καταπόνησης.





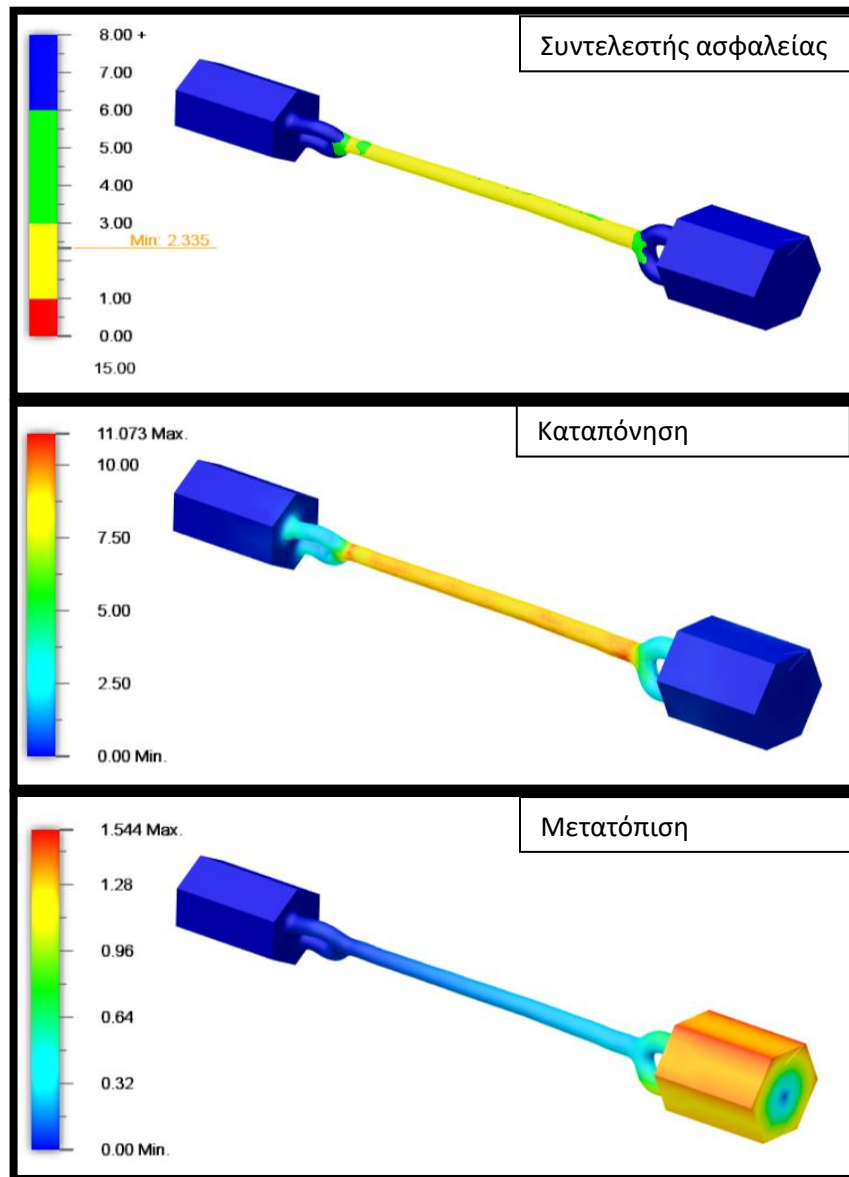
Παρατηρείται από την **Εικόνα 69** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 4,174 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 0,028 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 0,087 N και μέγιστη τάση 0,002. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 6,195.

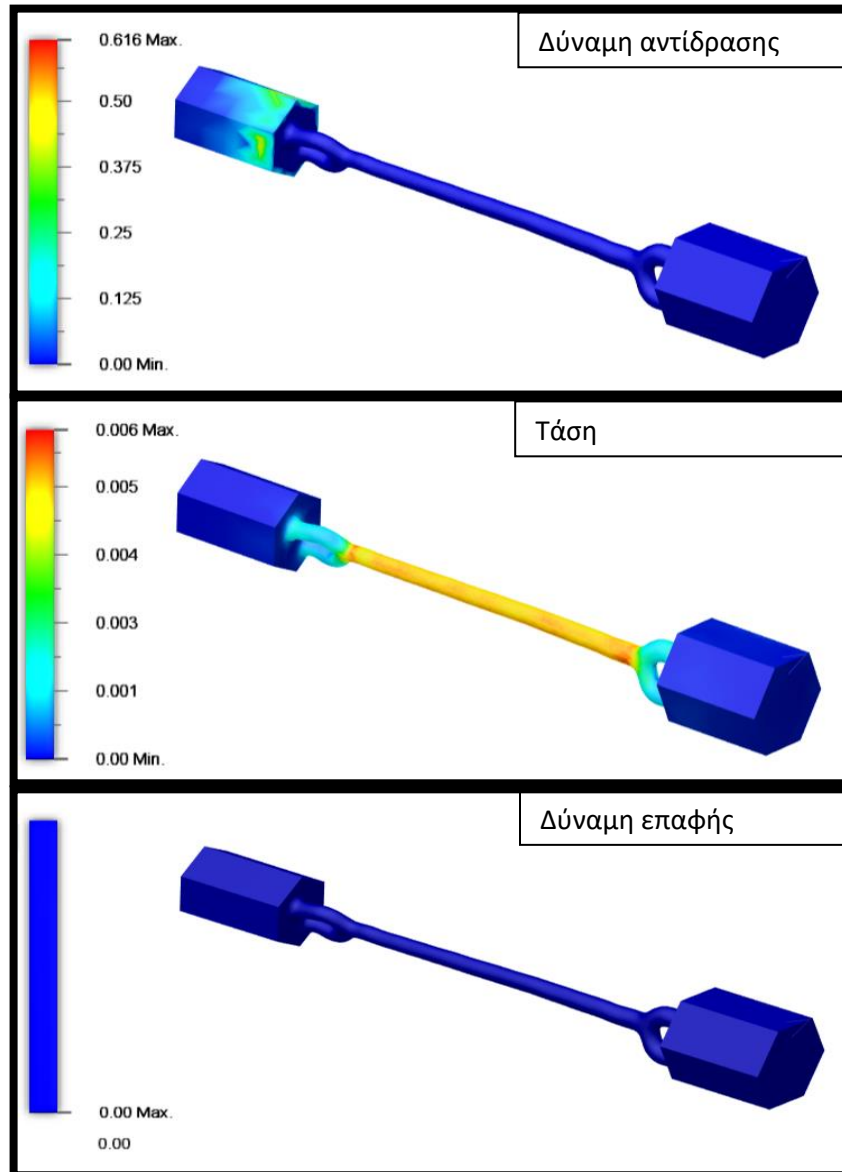
| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 6.195 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 8.974E-06 MPa | 4.174 MPa |
| 1st Principal | -0.503 MPa | 2.769 MPa |
| 3rd Principal | -3.748 MPa | 0.504 MPa |
| Normal XX | -0.817 MPa | 1.099 MPa |
| Normal YY | -3.227 MPa | 2.051 MPa |
| Normal ZZ | -1.077 MPa | 1.256 MPa |
| Shear XY | -1.106 MPa | 1.53 MPa |
| Shear YZ | -1.061 MPa | 1.066 MPa |
| Shear ZX | -0.688 MPa | 0.333 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 0.028 mm |
| X | -0.024 mm | 0.026 mm |
| Y | -0.025 mm | 0.02 mm |
| Z | -4.555E-04 mm | 5.704E-04 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.087 N |
| X | -0.038 N | 0.03 N |
| Y | -0.032 N | 0.028 N |
| Z | -0.048 N | 0.072 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 3.561E-09 | 0.002 |
| 1st Principal | 2.507E-09 | 0.002 |
| 3rd Principal | -0.002 | -1.150E-09 |
| Normal XX | -1.279E-04 | 2.952E-04 |
| Normal YY | -0.001 | 6.711E-04 |
| Normal ZZ | -2.032E-04 | 3.956E-04 |
| Shear XY | -9.057E-04 | 0.001 |
| Shear YZ | -8.690E-04 | 8.729E-04 |
| Shear ZX | -5.636E-04 | 2.729E-04 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 14: Αναλυτικά αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης, Topology Optimization, δεύτερο δοκίμιο στρέψης.

Generative Design – 5^ο Αποτέλεσμα

Θα εισαχθεί σε μελέτη στατικής καταπόνησης το 5^ο αποτέλεσμα του GD καθώς αυτό είναι ένα από τα τρία προτεινόμενα του προγράμματος και αυτό κατάφερε να μειώσει την μάζα αποτελεσματικότερα εκ των τριών. Χρησιμοποιούνται λοιπόν οι ίδιες οριακές συνθήκες με το ΤΟ.





Εικόνα 70: Αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design, 5^ο Αποτέλεσμα.

Παρατηρείται από την **Εικόνα 70** ότι η μέγιστη καταπόνηση που παρουσιάζει το βελτιστοποιημένο μοντέλο είναι στα 11,073 MPa, η μέγιστη μετατόπιση στα 1,544 mm, η μέγιστη δύναμη αντίδρασης στα 0,616 N και μέγιστη τάση 0,006. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 2,335.

| Name | Minimum | Maximum |
|--------------------------|------------|------------|
| Safety Factor | | |
| Safety Factor (Per Body) | 2.335 | 15.00 |
| Stress | | |
| von Mises | 0.00 MPa | 11.073 MPa |
| 1st Principal | -0.279 MPa | 7.43 MPa |
| 3rd Principal | -6.853 MPa | 0.256 MPa |
| Normal XX | -3.387 MPa | 3.237 MPa |
| Normal YY | -1.275 MPa | 1.136 MPa |
| Normal ZZ | -3.648 MPa | 3.642 MPa |
| Shear XY | -1.215 MPa | 1.255 MPa |
| Shear YZ | -5.344 MPa | 5.86 MPa |
| Shear ZX | -5.821 MPa | 6.094 MPa |
| Displacement | | |
| Total | 0.00 mm | 1.544 mm |
| X | -1.434 mm | 1.472 mm |
| Y | -1.345 mm | 1.111 mm |
| Z | -0.004 mm | 0.005 mm |
| Reaction Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.616 N |
| X | -0.138 N | 0.168 N |
| Y | -0.325 N | 0.302 N |
| Z | -0.365 N | 0.508 N |
| Strain | | |
| Equivalent | 0.00 | 0.006 |
| 1st Principal | 0.00 | 0.006 |
| 3rd Principal | -0.005 | 0.00 |
| Normal XX | -0.001 | 0.001 |
| Normal YY | -4.670E-04 | 4.434E-04 |
| Normal ZZ | -0.001 | 0.001 |
| Shear XY | -9.951E-04 | 0.001 |
| Shear YZ | -0.004 | 0.005 |
| Shear ZX | -0.005 | 0.005 |
| Contact Force | | |
| Total | 0.00 N | 0.00 N |
| X | 0.00 N | 0.00 N |
| Y | 0.00 N | 0.00 N |
| Z | 0.00 N | 0.00 N |

Πίνακας 15: Αναλυτικά αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης, Generative Design, 5^ο Αποτέλεσμα.

4.3.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η πρώτη και βασική διαφορά μεταξύ των σχεδίων είναι η μείωση της μάζας. Η **ΤΟ γεωμετρία διατήρησε το 95,11% της αρχικής μάζας, σε αντίθεση με την ανώτερη GD γεωμετρία που διατήρησε μόλις το 69,62% της αρχικής μάζας.**

Όσον αφορά τον συντελεστή ασφαλείας η **ΤΟ γεωμετρία εμφάνισε ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας 6,195 μεγαλύτερο δηλαδή της GD γεωμετρίας η οποία παρουσίασε 2,335.**

Η μέγιστη καταπόνηση που εμφανίστηκε στην **ΤΟ γεωμετρία ήταν 4,174 MPa, ενώ στην GD γεωμετρία ήταν 11,073 MPa.**

Τέλος η μετατόπιση για την **GD γεωμετρία ήταν στα 1,544 mm και για την ΤΟ γεωμετρία αρκετά χαμηλότερα στα 0,028 mm.**

4.4 Περιγραφή της διαδικασίας δημιουργίας ορθοτροπικού υλικού.

Στο βιβλιογραφικό μέρος της διπλωματικής αναλύθηκε η ανισοτροπία που παρουσιάζουν τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της στρώμα προς στρώμα εκτύπωσης, χαρακτηρίζονται ως ανισοτροπικά με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να προσομοιωθούν σε υπολογιστικό περιβάλλον μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμο να βρεθεί ένας τρόπος ώστε να μπορεί να προσομοιωθεί αυτό το υλικό και να μπορούν να προβλεφθούν τα αποτελέσματα των μηχανικών του ιδιοτήτων όταν αυτό υπόκειται σε μηχανικές καταπονήσεις. Για τις ανάγκες λοιπόν αυτές, προτείνεται η δημιουργία ορθοτροπικού υλικού ώστε να μπορέσει να προσεγγιστεί η ανισοτροπία όσο το δυνατόν γίνεται. Μέχρι πρότεινως, χρησιμοποιούταν ιστροπικό υλικό γι' αυτές τις μελέτες, θέτοντας ως τιμή για όλους τους άξονες, την μικρότερη που τίθεται σε ορθοτροπικό υλικό. Σε δεύτερο στάδιο το υλικό αυτό θα ανατεθεί στα δοκίμια κάμψης και στρέψης και θα ακολουθήσει η τοπολογική βελτιστοποίηση αυτών και τέλος η ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η χρήση ενός προγράμματος, το οποίο θα μπορεί να δημιουργήσει ορθοτροπικό υλικό, που θα επιτρέπει δηλαδή στον χρήστη να θέτει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες κατά μήκος των τριών αξόνων του επιπέδου. Το Fusion 360 δεν διαθέτει την δυνατότητα τοπολογικής βελτιστοποίησης δοκιμίων που έχουν ορθοτροπικές ιδιότητες, αλλά και δύναται να βελτιστοποιήσει με γεννητικό σχεδιασμό. Τις ανάγκες λοιπόν αυτές θα τις καλύψει το Ansys Workbench σε συνεργασία με το Ansys Spaceclaim που θα αποτελέσει αρωγό στο σχεδιασμό των δοκιμίων αλλά και με το Ansys Mechanical που θα επιτρέψει την βελτιστοποίηση και την μελέτη καταπόνησης των δοκιμίων.

Σε πρώτο στάδιο γίνεται η χρήση του Ansys Workbench και επιλέγεται η μελέτη στατικής καταπόνησης. Η διαδικασία της αποτελείται από 7 στάδια, τα οποία θα αναλυθούν πλήρως στο επόμενο κεφάλαιο. Το σημείο ενδιαφέροντος γι' αυτό το κεφάλαιο είναι το δεύτερο βήμα της στατικής μελέτης καταπόνησης το οποίο αναφέρεται στα μηχανικά δεδομένα (engineering data), δηλαδή το υλικό από το οποίο θα αποτελείται το δοκίμιο. Κατόπιν της επιλογής αυτού, ο χρήστης οδηγείται στην λίστα των υλικών, όπου και επιλέγεται η δημιουργία προσαρμοσμένου υλικού.

Σε δεύτερο στάδιο επιλέγονται οι μηχανικές ιδιότητες που θα έχει αυτό το υλικό. Αρχικά, επιλέγεται η **πυκνότητα (density)** η οποία τίθεται ίση με 1020 kg/m^3 (Matmatch, n.d.). Επιπλέον επιλέχτηκε το **διάγραμμα $\sigma - N$ (τάσης - κύκλων κόπωσης) (S-N Curve)**, το οποίο θα επιτρέψει σε μετέπειτα στάδιο την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας των βελτιστοποιημένων γεωμετριών. Το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι επίσης γνωστό ως καμπύλη Wöhler, πρόκειται για μια γραφική αναπαράσταση των δεδομένων κόπωσης. Χρησιμοποιείται στην επιστήμη των υλικών και τη μηχανική για να απεικονίσει τη σχέση μεταξύ της κυκλικής τάσης (S) και του αριθμού των κύκλων μέχρι την αστοχία (N) για ένα συγκεκριμένο υλικό. Στην ανάλυση κόπωσης, τα υλικά υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση και αποφόρτιση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία ακόμη και αν η εφαρμοζόμενη τάση είναι κάτω από τη στατική αντοχή του υλικού. Η καμπύλη S-N βοηθά τους μηχανικούς να κατανοήσουν πώς συμπεριφέρονται τα υλικά υπό συνθήκες κυκλικής φόρτισης. Η καμπύλη ξεκινά συνήθως από

ένα υψηλό επίπεδο τάσης, όπου απαιτείται μόνο ένας μικρός αριθμός κύκλων για την αστοχία. Καθώς η τάση μειώνεται, ο αριθμός των κύκλων μέχρι την αστοχία αυξάνεται. Η σχέση είναι συχνά λογαριθμική και η καμπύλη τελικά εξισώνεται σε μια περιοχή όπου απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός κύκλων για να προκληθεί αστοχία. Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν την καμπύλη S-N για να εκτιμήσουν τη διάρκεια ζωής σε κόπωση των υλικών υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, βοηθώντας τους να σχεδιάσουν κατασκευές και εξαρτήματα που μπορούν να αντέξουν την κυκλική φόρτιση χωρίς πρόωρη αστοχία. Με την χρήση λοιπόν δεδομένων για το πολυαμίδιο πραγματοποιήθηκε η καμπύλη του διαγράμματος στον **Πίνακα 16**.

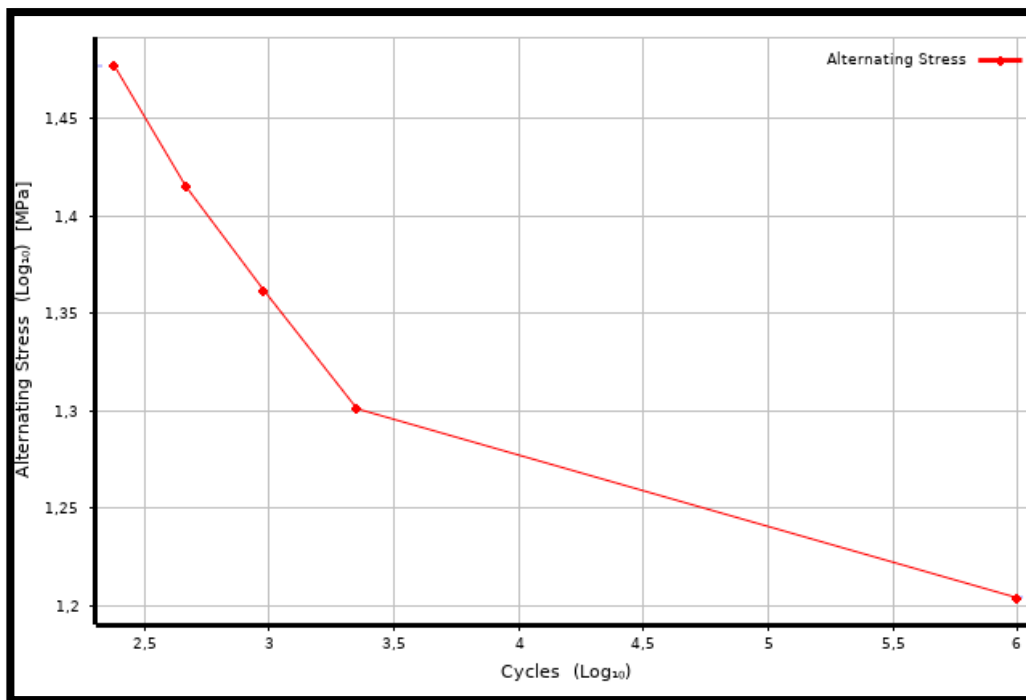
| Sample | Load (N) | Max Stress (MPa) | Average number of cycles to failure |
|--------|----------|------------------|-------------------------------------|
| #17 | 1200 | 30 | 236 |
| #23 | | | 259 |
| #50 | | | 223 |
| #14 | 1050 | 26 | 440 |
| #26 | | | 524 |
| #80 | | | 428 |
| #20 | 900 | 23 | 1026 |
| #38 | | | 878 |
| #47 | | | 954 |
| #35 | 800 | 20 | 2152 |
| #41 | | | 2353 |
| #71 | | | 2251 |
| #77 | 650 | 16 | >10 ⁶ |
| #5 | | | >10 ⁶ |

Πίνακας 16: Πίνακας σχέσης κυκλικής τάσης και κύκλων κόπωσης για πολυαμίδιο. (Amel, 2015).

Με την βοήθεια λοιπόν του συγκεκριμένου πίνακα και κατόπιν υπολογισμού του μέσου όρου των κύκλων κόπωσης, καθιστώντας μοναδικό αριθμό για την εκάστοτε φόρτιση, δημιουργήθηκε ο **Πίνακας 17** αλλά και η αντίστοιχη συνάρτηση στο Ansys Workbench

| | A | B |
|---|--------|--------------------------|
| 1 | Cycles | Alternating Stress (MPa) |
| 2 | 239 | 30 |
| 3 | 464 | 26 |
| 4 | 953 | 23 |
| 5 | 2252 | 20 |
| 6 | 1E+06 | 16 |

Πίνακας 17: Πίνακας Cycles – Alternating Stress (Κύκλων κόπωσης – Τάσης) για πολυαμίδιο, στο Ansys.



Εικόνα 71: Συνάρτηση κυκλικής τάσης και κύκλων κόπωσης για πολυαμίδιο, στο Ansys.

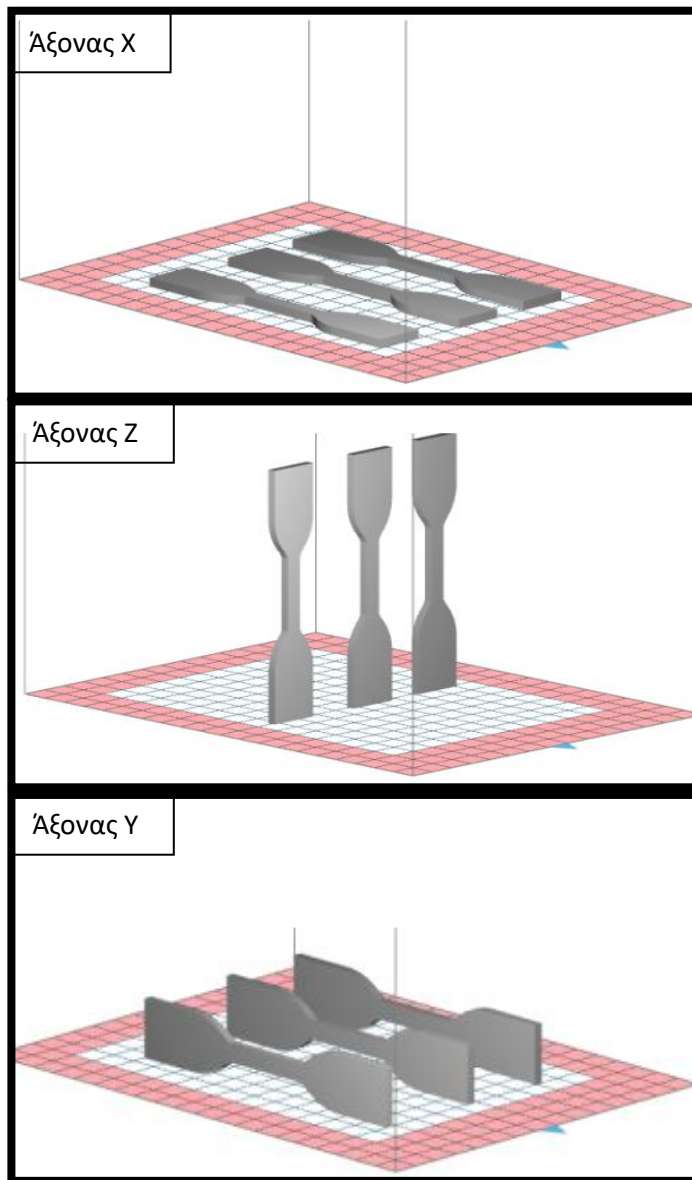
Σε τρίτο και τελευταίο στάδιο για την δημιουργία ορθοτροπικού υλικού επιλέγεται και η ορθοτροπική ελαστικότητα (orthotropic elasticity). Η συγκεκριμένη ιδιότητα εμπεριέχει την αναλογία Poisson (Poisson's Ratio), το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) και το μέτρο διάτμησης (Shear Modulus). Όπως είναι φυσικό, επειδή πρόκειται για την δημιουργία ορθοτροπικού υλικού, κάθε μία από τις προαναφερθείσες ιδιότητες θα προσδιοριστεί τρεις φορές, μία δηλαδή για τον κάθε άξονα.

Αρχικά, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας για κάθε ένα από τους τρεις άξονες. Βάση προηγούμενων πειραμάτων, θα δημιουργηθούν δύο διαφορετικά υλικά, με την ειδοποιό διαφορά τους να είναι σε πρωταρχικό στάδιο το μέτρο ελαστικότητας.

1^ο Υλικό.

Πρόκειται για εκτυπωμένα με πολυαμίδιο δοκίμια εφελκυσμου. Αυτά στο παρελθόν εκτυπώθηκαν σε διαφορετικές θέσεις και κλίσεις. Για κάθε ξεχωριστή θέση και κλίση, πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα. Με την χρήση λοιπόν των ιδιοτήτων σε αυτές τις διαφορετικές θέσεις των δοκιμίων δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας ανά άξονα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ως **άξονας X** θα ληφθεί το δοκίμιο το οποίο εκτυπώθηκε με την μεγάλη επιφάνεια του να εφάπτεται στο κρεβάτι του εκτυπωτή, με 0°

κλίση, όπως είναι φυσικό. Ως **άξονας Y** θα ληφθεί το δοκίμιο του οποίου κατά την εκτύπωση η μικρή επιφάνεια εφάπτεται στο κρεβάτι του εκτυπωτή και έχει 0° κλίση. Τέλος, ως **άξονας Z** θα ληφθεί το δοκίμιο το οποίο βρίσκεται σε κλίση 90° με την μικρή επιφάνεια της διατομής του να εφάπτεται στο κρεβάτι του εκτυπωτή. Στις εικόνες φαίνεται ο προσανατολισμός του κάθε δοκιμίου και ο άξονας που αντιπροσωπεύει.



Εικόνα 72: Άξονες και προσανατολισμός για το πρώτο ορθοτροπικό υλικό.

| Άξονας | Μέτρο ελαστικότητας E(MPa) |
|--------|----------------------------|
| X | 641,00 |
| | 637,00 |
| | 593,00 |
| | Μέση τιμή: 623,67 |
| Y | 748,00 |
| | 697,00 |
| | 800,00 |
| | Μέση τιμή: 748,33 |
| Z | 368,00 |
| | 499,00 |
| | 391,00 |
| | Μέση τιμή: 419,33 |

Πίνακας 18: Πίνακας μέτρων ελαστικότητας για τον εκάστοτε άξονα, 1^ο υλικό.

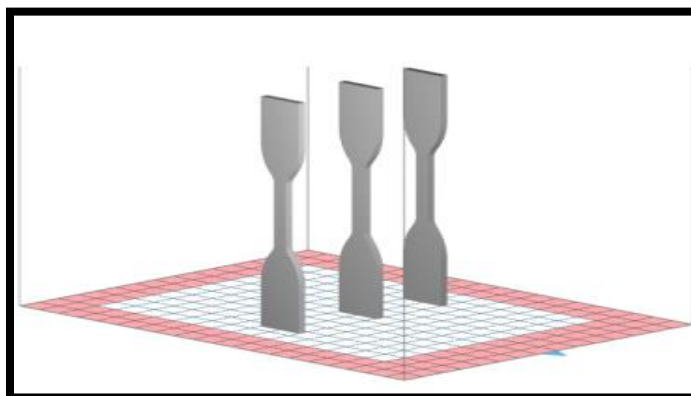
Με βάση τους μέσους όρους λοιπόν, τέθηκαν τα συγκεκριμένα μέτρα ελαστικότητας στον κάθε άξονα που συνδέονται. Σε επόμενο βήμα έπρεπε να υπολογιστεί η αναλογία του Poisson. Οι τιμές αυτές βρέθηκαν έτοιμες από επιστημονικό άρθρο το οποίο έδινε την κάθε αναλογία Poisson αναλόγως τον τρόπο που εκτυπώθηκε το δοκίμιο, σε ορθή στάση (Upright) (βλ. άξονα Z), με την μεγάλη του επιφάνεια να εφάπτεται στο επίπεδο (Flatwise) (βλ. άξονα X) και τέλος με την μικρή του επιφάνεια να εφάπτεται στο επίπεδο και σε μηδενική κλίση (Edgewise) (βλ. άξονα Y). Τέλος, με την βοήθεια των μέτρων ελαστικότητας και Poisson υπολογίστηκαν τα μέτρα διάτμησης.

| Άξονας | XY | YZ | XZ |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Αναλογία Poisson | 0,3950 | 0,3541 | 0,3495 |
| Μέτρο διάτμησης (MPa) | 223,54 | 154,84 | 277,26 |

Πίνακας 19: Αναλογία Poisson και μέτρα διάτμησης, σε σχέση με το επίπεδο, 1^ο Υλικό.

2^ο Υλικό

Για το δεύτερο υλικό, οι άξονες X και Y παρέμειναν ίδιοι, ωστόσο άλλαξε ο άξονας Z. Αναλυτικότερα, η νέα θέση του εκτυπωμένου δοκιμίου που επιλέχτηκε για τον άξονα είναι με την μικρή του επιφάνεια να εφάπτεται στο επίπεδο, όταν αυτό βρίσκεται σε κλίση 90° (Upright) και είναι 90° στριμμένο στο επίπεδο, αναφορικά με το δοκίμιο του άξονα που αναπληρώνει.



Εικόνα 73: Ο άξονας Z, 2^ο Υλικό.

Δεδομένου ότι οι αναλογίες Poisson παραμένουν ίδιες, το μόνο που θα αλλάξει στο 2^ο υλικό συγκριτικά με το πρώτο, είναι το μέτρο ελαστικότητας, το οποίο με την σειρά του θα επηρεάσει το μέτρο διάτμησης. Παραδίδονται οι ανανεωμένοι πίνακες.

| Άξονας | Μέτρο ελαστικότητας E(MPa) |
|--------|----------------------------|
| X | 641,00 |
| | 637,00 |
| | 593,00 |
| | Μέση τιμή: 623,67 |
| Y | 748,00 |
| | 697,00 |
| | 800,00 |
| | Μέση τιμή: 748,33 |
| Z | 326,00 |
| | 406,00 |
| | 354,00 |
| | Μέση τιμή: 362,00 |

Πίνακας 20: Πίνακας μέτρων ελαστικότητας για τον εκάστοτε άξονα, 2^ο υλικό.

| Άξονας | XY | YZ | XZ |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| Αναλογία Poisson | 0,3950 | 0,3541 | 0,3495 |
| Μέτρο διάτμησης (MPa) | 223,54 | 133,67 | 277,26 |

Πίνακας 21: Αναλογία Poisson και μέτρα διάτμησης, σε σχέση με το επίπεδο, 2^ο Υλικό.

Κλείνοντας το κεφάλαιο κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί, ότι η πυκνότητα και το διάγραμμα Wohler θα είναι κοινό και για τα δύο υλικά, οι διαφορετικές τιμές τους θα κυμαίνονται στα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης.

4.5 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής των δοκιμών και μοντελοποίησης αυτών.

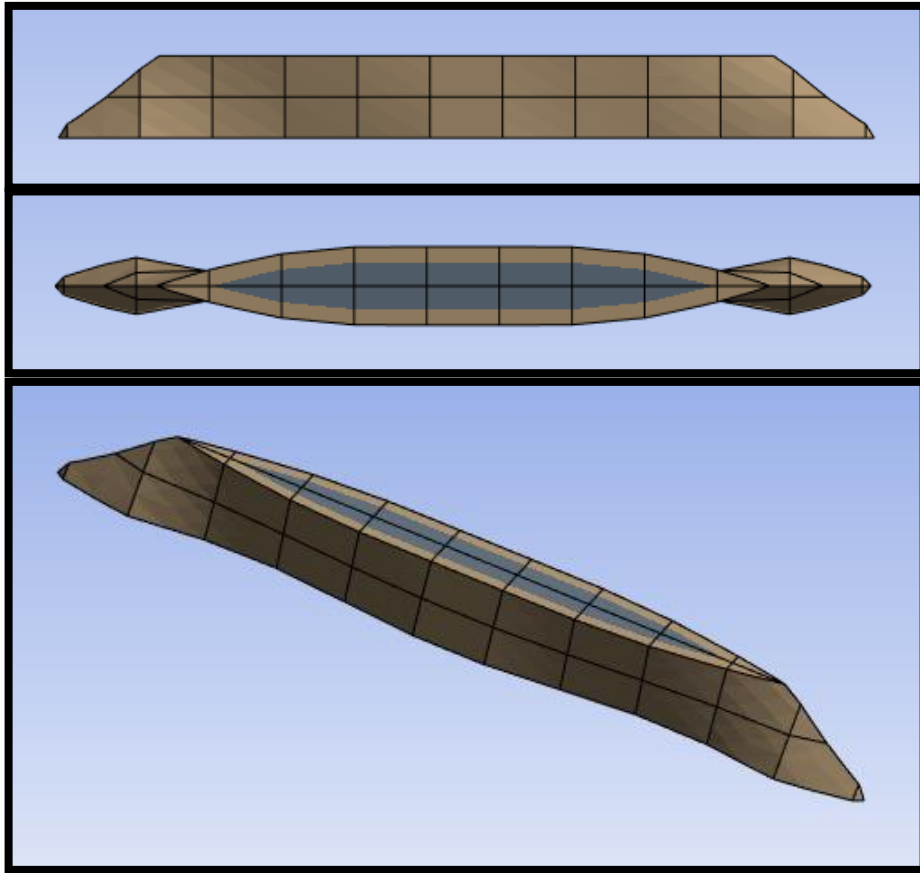
4.5.1 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών του δοκιμίου κάμψης.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής, η μοντελοποίηση του Topology Optimization στο Ansys πραγματοποιήθηκε με τις ίδιες οριακές συνθήκες που πραγματοποιήθηκε και στο Fusion 360. Ξεκινώντας λοιπόν την διαδικασία, στο περιβάλλον του Ansys Workbench επιλέχτηκε η στατική μελέτη (Static Structural). Σε δεύτερο βήμα εισάχθηκε το υλικό (engineering Data), ακριβώς όπως ειπώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο τρίτο βήμα, υπήρξε μεταφορά στο Ansys Spaceclaim, όπου σχεδιάστηκε το δοκίμιο κάμψης μαζί με τις δοκούς, σε ίδιες ακριβώς διαστάσεις με αυτές του Fusion 360 (Geometry). Σε τέταρτο βήμα έγινε εισαγωγή στο Ansys Mechanical, στο οποίο πραγματοποιήθηκε μεταφορά της γεωμετρίας από το Ansys Spaceclaim και ξεκίνησε η μοντελοποίηση της στατικής μελέτης της κάμψης (Model). Ακριβώς όπως και στο Fusion 360, στις δύο κάτω δοκούς τοποθετήθηκαν στηρίξεις περιορίζοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας (Fixed Constraints) ενώ στην πάνω δοκό όπου θα ασκείται και η δύναμη (135 N), αφέθηκε ελεύθερη μόνο η κάθετη μετατόπιση (displacement Constraints). Σε 5^ο βήμα, ακολούθησε το σετάρισμα (Set Up) της στατικής μελέτης και των λύσεων που θα παράξει. Σε αυτό το βήμα επιλέχθηκαν να δοθούν σαν λύσεις η συνολική παραμόρφωση (Total Deformation) και η συνολική καταπόνηση (Equivalent Stress). Σε 6^ο βήμα πραγματοποιήθηκε η λύση της μελέτης και στο 7^ο βήμα παρακολουθήθηκαν τα αποτελέσματα. Η κάμψη επιβεβαιώνεται πως μοντελοποιείται σωστά, κρίνοντας από την συνολική παραμόρφωση.

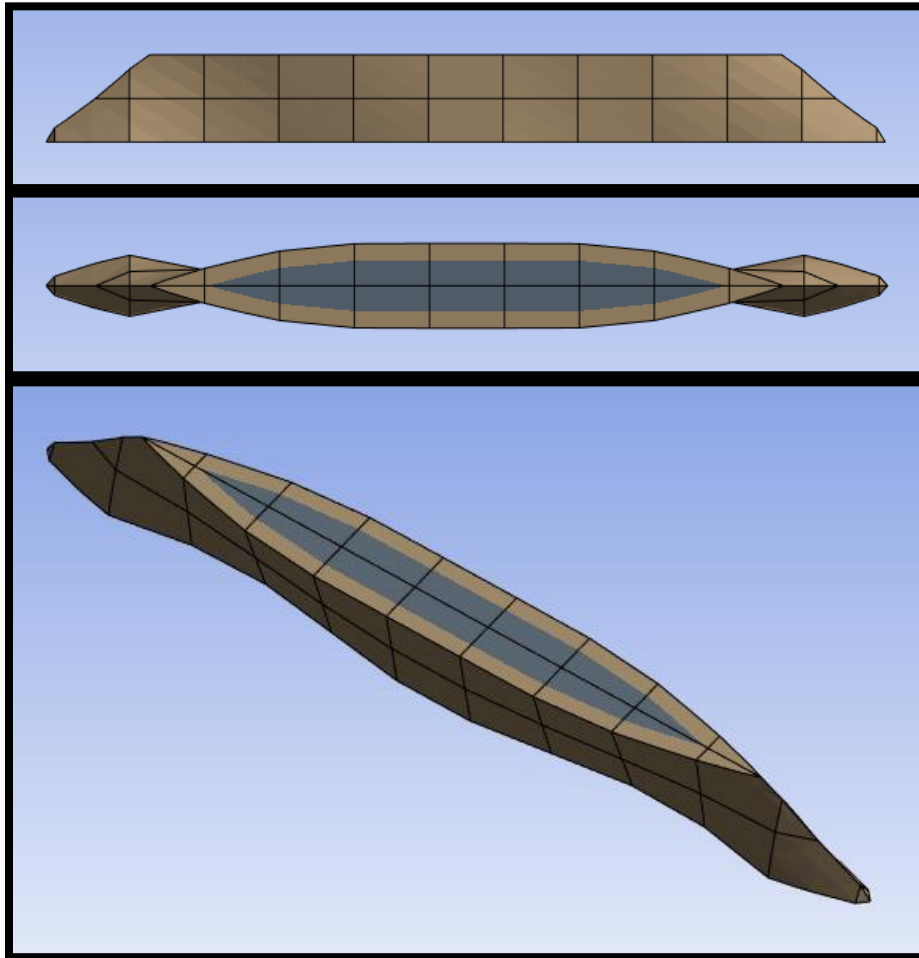
Σε κάθε περίπτωση, η μοντελοποίηση της κάμψης έχει πραγματοποιηθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί η μελέτη βελτιστοποίησης τοπολογίας στο Ansys, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να προηγηθεί η μελέτη στατικής καταπόνησης. Πιο συγκεκριμένα, στο περιβάλλον του Ansys Workbench επιλέγεται η βελτιστοποίηση τοπολογίας και τοποθετείται στο 4^ο βήμα της στατικής μελέτης. Αυτό έχει ως σκοπό την μεταφορά των δεδομένων της μοντελοποίησης της κάμψης και της γεωμετρίας αυτής. Με αυτόν τον τρόπο βελτιστοποίηση τοπολογίας που αποτελείται και αυτή από 7 βήματα, έχει έτοιμα από το 1^ο μέχρι και το 4^ο. Ακολουθεί λοιπόν το σετάρισμα της.

Αρχικά, επιλέγεται το σώμα που θα βελτιστοποιηθεί, δηλαδή το δοκίμιο της κάμψης. Σε αυτό το πεδίο επιλέγονται οι περιοχές της γεωμετρίας οι οποίες θα μείνουν εκτός της βελτιστοποίησης, δηλαδή όλοι οι δοκοί, με την εντολή Exclusion Regions. Τέλος, ορίζεται σαν στόχος η ελαχιστοποίηση της μάζας στο 60% της αρχικής. Τέλος, στην λύση προστίθεται η ενότητα της εμφάνισης της βελτιστοποιημένης τοπολογίας και ακολουθεί η λύση της μελέτης.

Εν τέλει, το πρόγραμμα καταφέρνει να μειώσει την μάζα για το 1^ο υλικό και για το 2^ο υλικό στο 58,82% της αρχικής σε 14 επαναλήψεις.



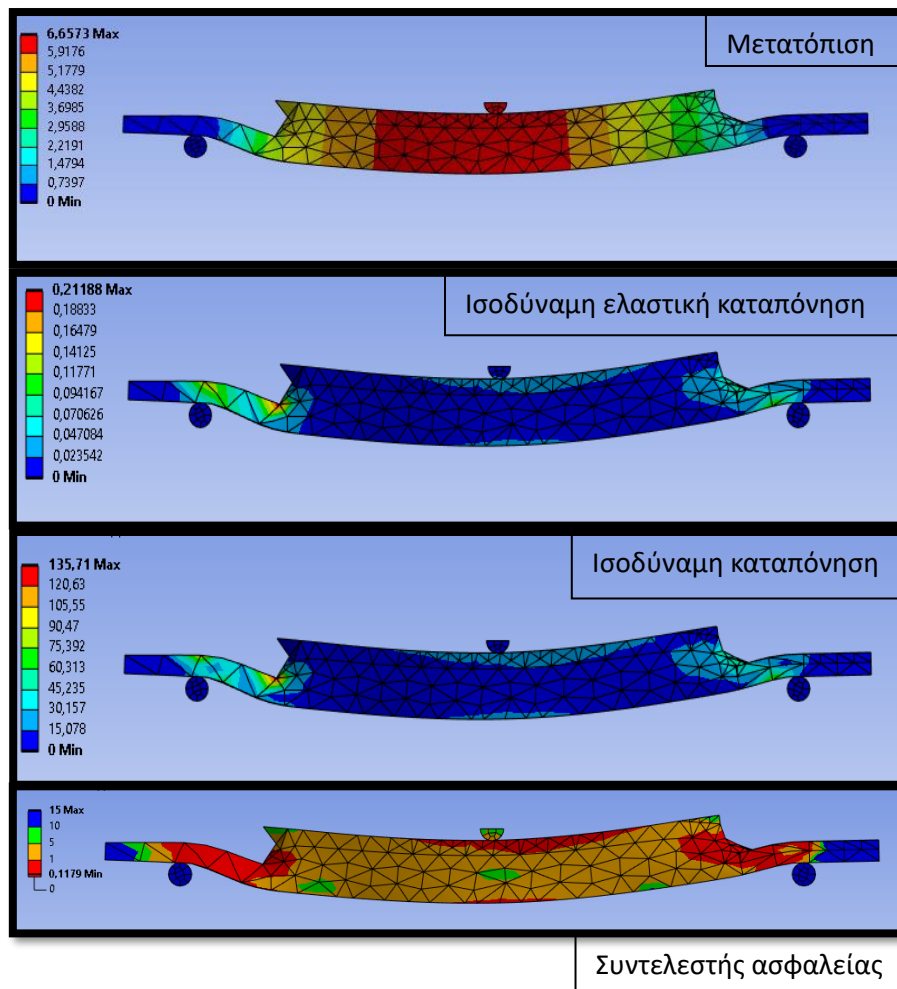
Εικόνα 74: Βελτιστοποίηση τοπολογίας για 1^ο υλικό, Ansys Workbench.



Εικόνα 75: Βελτιστοποίηση τοπολογίας για το 2^ο υλικό, Ansys Workbench.

Σε επόμενο βήμα, ακολούθησε η εισαγωγή των δύο βελτιστοποιημένων γεωμετριών στα CAE του Ansys, ώστε να αναλυθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Σημειώνεται πως οι βελτιστοποιημένες γεωμετρίες που προέκυψαν, είχαν σημαντική μείωση στο συνολικό τους μήκος. Πιο συγκεκριμένα, το αρχικό μήκος της ράβδου ήταν στα 120 mm. Κατόπιν της βελτιστοποίησης και για τα δύο υλικά το συνολικό μήκος της ράβδου ήταν λίγο μικρότερο από τα 80 mm. Πραγματοποιήθηκαν λοιπόν μικρές προεκτάσεις στα άκρα των δοκιμίων ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στα σωστά σημεία οι δοκοί για να πραγματοποιηθεί η μελέτη στατικής καταπόνησης. Σε κάθε περίπτωση καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε οι προεκτάσεις να συνεχιστούν με όσο πιο φυσικό για την γεωμετρία γίνεται τρόπο, οπότε διέφεραν για τα δύο υλικά. Κατόπιν λοιπόν αυτής της επεξεργασίας, τέθηκαν οι ίδιες οριακές συνθήκες με το Fusion 360 και για δύναμη 135N και λύθηκαν οι μελέτες.

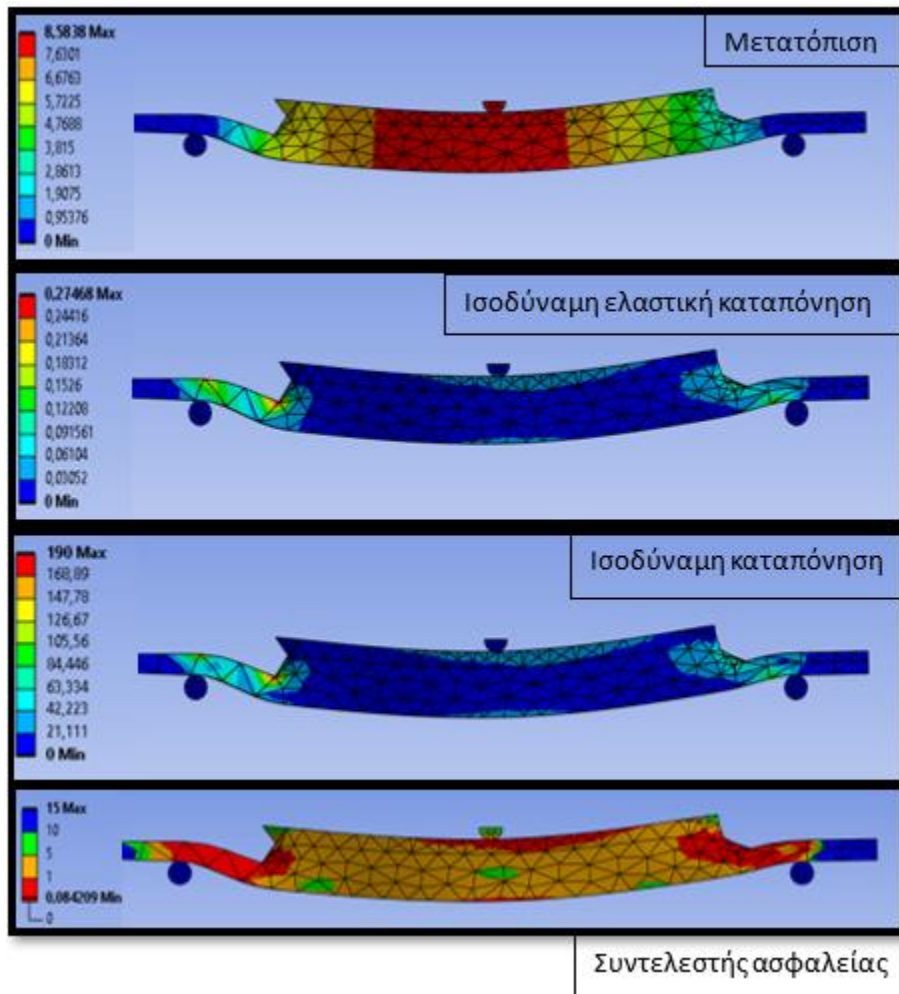
1^ο Υλικό



Εικόνα 76: Αποτελέσματα μελέτη στατικής καταπόνησης, 1^ο Υλικό, Ansys Workbench.

Στην **Εικόνα 76** φαίνεται πως η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 6,6573 mm, η ισοδύναμη ελαστική καταπόνηση στα 0,21188 MPa και η ισοδύναμη καταπόνηση στα 135,71 MPa.

2^ο Υλικό



Εικόνα 77: Αποτελέσματα μελέτη στατικής καταπόνησης, 2^ο Υλικό, Ansys Workbench.

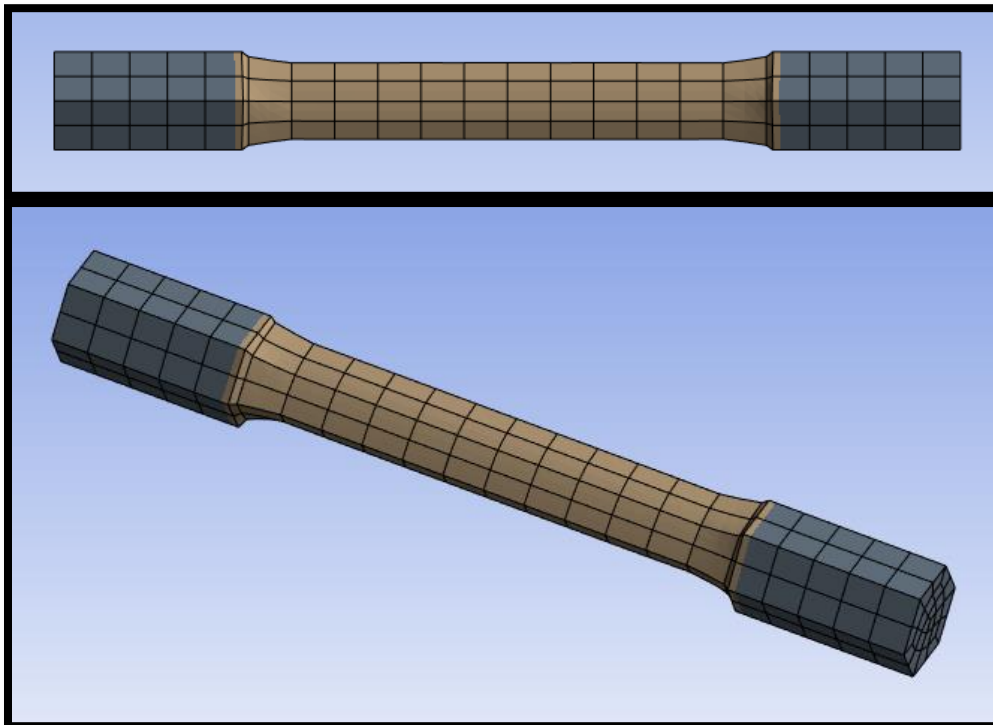
Στην **Εικόνα 77** φαίνεται πως η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 8,5838 mm, η ισοδύναμη ελαστική καταπόνηση στα 0,27468 MPa και η ισοδύναμη καταπόνηση στα 190 MPa.

4.5.2 Μοντελοποίηση και εισαγωγή οριακών συνθηκών του πρώτου δοκιμίου στρέψης.

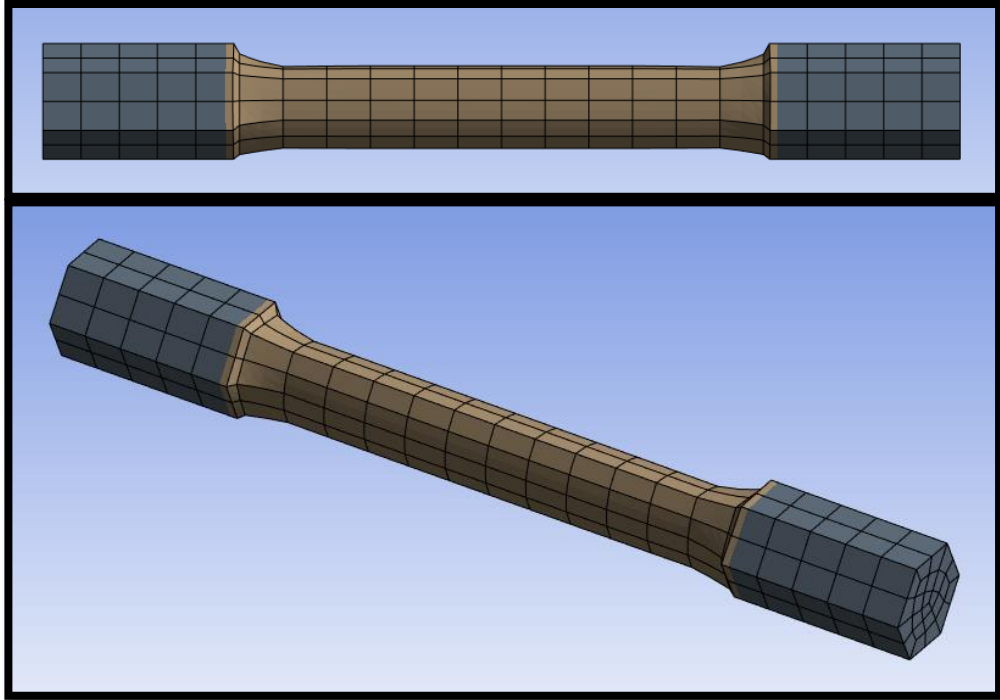
Η μοντελοποίηση του πρώτου δοκιμίου στρέψης θα πραγματοποιηθεί σε παρόμοιο πνεύμα με την μοντελοποίηση της κάμψης. Αναλυτικότερα, θα πραγματοποιηθεί αρχικά η μελέτη στατικής καταπόνησης. Θα επιλεγθούν λοιπόν στηρίξεις με περιορισμένους όλους τους βαθμούς ελευθερίας στις έξι πλευρές της μίας πλευράς του δοκιμίου. Έπειτα, στις άλλες έξι πλευρές του δοκιμίου και για βάθος 20mm θα τοποθετηθούν ροπές 40 Nmm, ακριβώς δηλαδή όπως και στην μοντελοποίηση του Fusion 360.

Σε επόμενο βήμα, θα ξεκινήσει η βελτιστοποίηση τοπολογίας χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της στατικής μελέτης. Οι περιοχές σε βάθος 20 mm από την κάθε πλευρά του δοκιμίου θα διατηρηθούν με την εντολή Exclusion Region, ενώ σαν σώμα βελτιστοποίησης θα επιλεγθεί το ενδιάμεσο σώμα του κυλίνδρου, ακριβώς όπως στο Fusion 360.

Πραγματοποιείται η λύση της μελέτης και το πρόγραμμα καταφέρνει να διατηρήσει το 69,15% της αρχικής μάζας και για τα δύο υλικά, σε 13 επαναλήψεις.



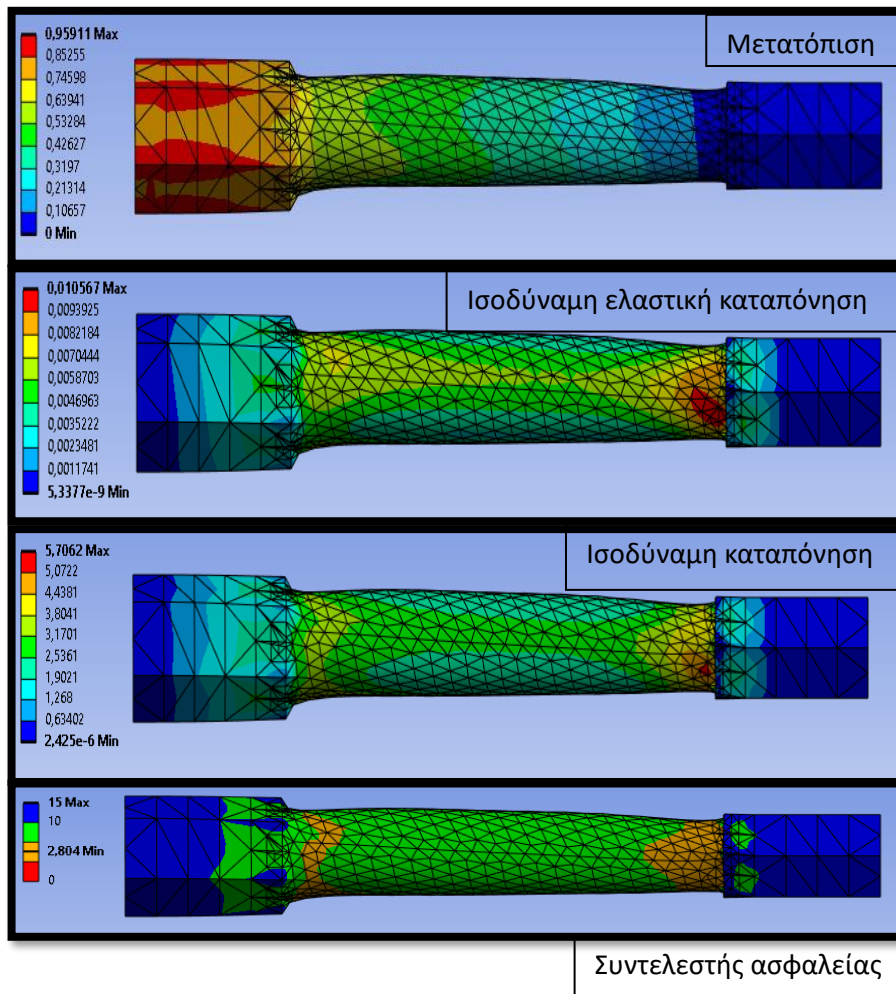
Εικόνα 78: Βελτιστοποίηση για το 1^ο υλικό, Ansys Workbench.



Εικόνα 79: Βελτιστοποίηση για το 2^ο υλικό, Ansys Workbench.

Σε επόμενο βήμα οι γεωμετρίες αυτές θα εισαχθούν στο CAE του Ansys για να συγκριθούν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Οι οριακές συνθήκες διατηρήθηκαν ακριβώς ίδιες με αυτές που είχαν χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση τοπολογίας.

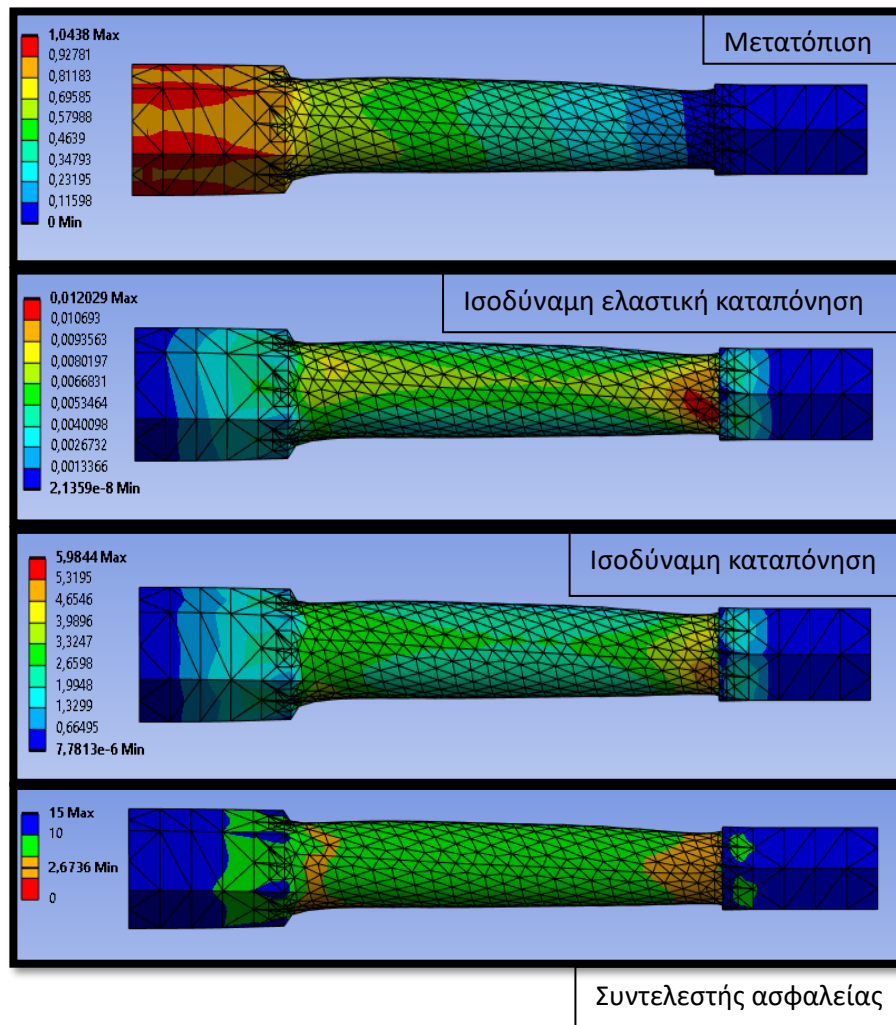
1^ο Υλικό



Εικόνα 80: Αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης για 1^ο υλικό, Ansys Workbench.

Στην **Εικόνα 80** φαίνεται πως η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 0,95911 mm, η ισοδύναμη ελαστική καταπόνηση στα 0,010567 MPa και η ισοδύναμη καταπόνηση στα 5,7062 MPa και ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας 2,804.

2^ο Υλικό



Εικόνα 81: Αποτελέσματα μελέτης στατικής καταπόνησης για 2^ο υλικό, Ansys Workbench.

Στην **Εικόνα 81** φαίνεται πως η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 1,0438 mm, η ισοδύναμη ελαστική καταπόνηση στα 0,012029 MPa και η ισοδύναμη καταπόνηση στα 5,9844 MPa και ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας 2,6736.

4.5.3 Σύγκριση των αποτελεσμάτων

| Κάμψη | 1 ^ο Υλικό | 2 ^ο Υλικό |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|
| Μετατόπιση (mm) | 0 – 6,66 | 0 – 8,58 |
| Ισοδύναμη ελαστική καταπόνηση | 0 – 0,212 | 0 – 0,275 |
| Ισοδύναμη καταπόνηση (MPa) | 0 – 135,71 | 0 – 190 |
| Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας | 0,1179 | 0,0842 |

Πίνακας 22: Πίνακας σύγκρισης μηχανικών ιδιοτήτων 1^{ου} και 2^{ου} υλικού για κάμψη.

Το 1^ο υλικό κατάφερε να κρατήσει χαμηλότερα την μετατόπιση, να επιτύχει καλύτερο συντελεστή ασφαλείας και να διατηρήσει τις καταπονήσεις μικρότερες, συγκριτικά με το 2^ο υλικό.

| Στρέψη | 1 ^ο Υλικό | 2 ^ο Υλικό |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Μετατόπιση (mm) | 0 – 0,96 | 0 – 1,04 |
| Ισοδύναμη ελαστική καταπόνηση | $5,3 \cdot 10^{-9} - 0,0105$ | $2,1 \cdot 10^{-8} - 0,0120$ |
| Ισοδύναμη καταπόνηση (MPa) | $2,4 \cdot 10^{-6} - 5,71$ | $7,8 \cdot 10^{-6} - 5,98$ |
| Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας | 2,804 | 2,674 |

Πίνακας 23: Πίνακας σύγκρισης μηχανικών ιδιοτήτων 1^{ου} και 2^{ου} υλικού για στρέψη.

Το 1^ο υλικό κατάφερε να διατηρήσει την μετατόπιση χαμηλότερα, τον συντελεστή ασφαλείας ψηλότερα και τις καταπονήσεις χαμηλότερα συγκριτικά με το 2^ο υλικό και στην στρέψη.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το 1^ο υλικό παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και για τις 2 καταπονήσεις.

5 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 Περίληψη της μελέτης

Στο βιβλιογραφικό μέρος της μελέτης παρουσιάστηκαν εκτενώς οι **προσθετικές κατασκευές**, το ιστορικό τους, οι παροντικές εφαρμογές καθώς και οι προοπτικές αυτών αλλά και τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται. Σε δεύτερο χρόνο, αναλύθηκε το **Generative Design** και συνοψίστηκαν οι φάσεις στις οποίες αυτό πραγματοποιείται. Παρουσιάστηκαν οι **εφαρμογές** του, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τα πλαίσια θέσεων της Toyota, το ηλεκτρικό Concept Bus της Volkswagen, τους βραχίονες καθισμάτων αυτοκινήτου της General Motors, το μηχανισμό σεληνιακής προσεδάφησης της NASA και τους βραχίονες μοτοσυκλέτας της Lightning Motorcycles. Οι **αλγόριθμοι του Generative Design** χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Στους **αλγόριθμους αντικατάστασης**: Shape Grammars, Lindenmayer-systems. Στους **αλγόριθμους εξέλιξης**: Genetic Algorithms, Autodesk's slime mold and mammal bones algorithms. Στους **αλγόριθμους αλληλεπίδρασης**: Cellular Automata, Swarm Intelligence and multi-agent societies. **Οι αλγόριθμοι αυτοί συγκρίθηκαν** σε τεχνικά, σχεδιαστικά, αλλά και σε επίπεδο ανάπτυξης συστήματος. Σε τελευταίο βήμα, αναλύθηκε **ο ρόλος του AI και του Machine learning** στο Generative Design και τα παραγωγικά μοντέλα VAE και GAN.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανάλυση του **Topology Optimization** και αναλύθηκαν οι προσεγγίσεις αυτού, που αποτελούνται από τις μικρο-προσεγγίσεις και τις μακρο-προσεγγίσεις. Αναλύθηκαν περαιτέρω οι **μέθοδοι του Topology Optimization**, που ομαδοποιούνται σε Evolutionary Based Algorithms, Solid Isotropic Microstructure with Penalization, Evolutionary Structural Optimization, Soft Kill Option και Level set Methods. Σε επόμενο βήμα αναλύθηκαν οι **αντικειμενικές δυσκολίες που παρουσιάζει το Topology Optimization**, οι οποίες αφορούν την ανάλυση πλέγματος, τους περιορισμούς της παραγωγικής διαδικασίας και την επεξεργασία που χρειάζεται το μοντέλο κατόπιν της βελτιστοποίησης για την εξομάλυνση των επιφανειών και την εξάλειψη των περιοχών συγκέντρωσης τάσεων. Παρά τις δυσκολίες διαθέτει κάποιες **προοπτικές εξέλιξης** στις οποίες περιλαμβάνονται, η λεπτινση και η εξάλειψη της ανάγκης των δομών στήριξης και η βελτιστοποίηση της πλήρωσης. Το κεφάλαιο έκλεισε μελετώντας τις **εφαρμογές** που συνδυάζουν το **Topology Optimization** με τη **Προσθετική Κατασκευή**. Αυτές αφορούν μία βάση στήριξης καλωδίων στην μπροστινή δοκό του κατακόρυφου σταθεροποιητή ενός Airbus A350 XWB, τον βραχίονα κεραίας δορυφόρου της RUAG και έναν αεροδιαστημικό βραχίονα που αναπτύχθηκε στο CAISIC του NWPU.

Ακολούθησε η **βιβλιογραφική σύγκριση των δύο τεχνολογιών**. Οι διαφορές τους εντοπίστηκαν στο ότι το Topology Optimization επιλέγει τα μέγιστα όρια ενός σώματος, βελτιστοποιεί για ένα μόνο υλικό ανά μελέτη και δεν λαμβάνει υπόψιν τρόπους κατασκευής του τελικού μοντέλου. Παράγει ένα και μοναδικό βελτιστοποιημένο μοντέλο, η μελέτη παραγωγής του οποίου διαρκεί λίγα λεπτά και συνήθως χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία η οποία αποσκοπεί στην εξομάλυνση των επιφανειών του και στην εξάλειψη των περιοχών συγκέντρωσης τάσεων. Από την άλλη μεριά το Generative Design βελτιστοποιεί έναν όγκο μέσα σε μία συνδεσμολογία στην οποία ορίζονται οι περιοχές που θα συμπεριλαμβάνονται στο τελικό μοντέλο καθώς και οι

περιοχές που πρέπει να αποφύγει η βελτιστοποίηση. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα συμπερίληψης πολλαπλών υλικών ανά μελέτη και πολλαπλών τρόπων κατασκευής του τελικού μοντέλου. Σημειώνεται πως αν και η μελέτη του Generative Design μπορεί να διαρκέσει πολλές ώρες, τα αποτελέσματα που παράγονται δεν χρειάζονται πάντα περαιτέρω επεξεργασία. Τέλος, το Topology Optimization βασίζεται κυρίως σε μεθόδους βελτιστοποίησης που εξαρτώνται από το πλέγμα, όπως SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization), ενώ το Generative Design σε Level Set Methods.

Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύθηκε η **ανισοτροπία που παρουσιάζουν τα προϊόντα προσθετικής κατασκευής**, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες αυτών, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με τον προσανατολισμό και την θέση της εκτύπωσης. Τέλος, πραγματοποιείται αναφορά στους πόρους, ως ατέλειες και λειτουργικές δομές καθώς και στην επίδραση τους στην αντοχή, την δυσκαμψία και την ανθεκτικότητα.

Η βιβλιογραφική αναφορά κλείνει με την **ανάλυση τριών Συγκριτικών μελετών Generative Design και Topology Optimization**. Η πρώτη αναλυθείσα μελέτη πραγματοποιήθηκε σε πλαίσιο μοτοσυκλέτας. Σε αυτή το Generative Design κατάφερε να μειώσει αποτελεσματικότερα την μάζα και την κατανομή των τάσεων, ενώ το μοντέλο που προέκυψε ήταν αισθητικά όμορφο. Η δεύτερη συγκριτική μελέτη αφορούσε ανάρτηση αυτοκινήτου. Το Generative Design κατάφερε να μειώσει αποτελεσματικότερα την μάζα και να βελτιώσει αποδοτικότερα τις μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με το Topology Optimization. Τέλος, η Τρίτη συγκριτική μελέτη αφορούσε το Rocker ανάρτησης στην οποία το Topology Optimization πέτυχε αποτελεσματικότερη μείωση της μάζας για το επιλεγμένο δοκίμιο, βελτιστοποιώντας παράλληλα αποδοτικότερα τις μηχανικές ιδιότητες.


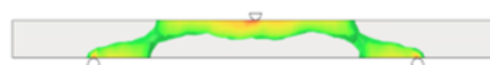

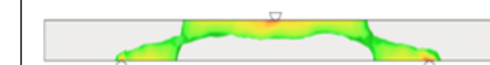
Εν συνεχεία, **πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη στα πλαίσια της διπλωματικής**. Για τις ανάγκες αυτές χρησιμοποιείται **ένα δοκίμιο κάμψης και δύο δοκίμια στρέψης**. Σε αυτά **γίνονται μελέτες Generative Design και Topology Optimization με τις ίδιες οριακές συνθήκες**, για διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης έτσι ώστε να συγκριθούν αντικειμενικά οι δύο αυτές τεχνολογίες και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα.

Αρχικά, **πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση σε δοκίμιο κάμψης για δύο περιπτώσεις φόρτισης**. Και για τις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες οριακές συνθήκες και για τις δύο τεχνολογίες. Σε κάθε περίπτωση το Generative Design μείωσε την μάζα αποτελεσματικότερα και δημιούργησε πιο ανθεκτικά μοντέλα. **Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε περαιτέρω επεξεργασία στα δοκίμια της κάμψης ώστε να εξομαλυνθούν οι επιφάνειες τους και να εξαλειφθούν οι περιοχές στις οποίες παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων**. Τα μοντέλα αυτά, **κατόπιν της επεξεργασίας παρουσίασαν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και υψηλότερο ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας**. Σε δεύτερο στάδιο ακολούθησε **βελτιστοποίηση του πρώτου δοκιμίου στρέψης με Topology Optimization και Generative Design**. Πραγματοποιήθηκαν δύο περιπτώσεις φόρτισης, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά οι ίδιες οριακές συνθήκες μεταξύ των δύο τεχνολογιών. Σε αυτή τη περίπτωση επίσης, το Generative Design κατάφερε να κατανέμει τις τάσεις ομαλότερα, να μειώσει την μάζα πιο αποτελεσματικά ενώ τα μοντέλα του

ήταν πιο ανθεκτικά. Στην τελευταία περίπτωση, που αφορά το δεύτερο δοκίμιο στρέψης, το Generative Design κατάφερε να μειώσει αποτελεσματικότερα την μάζα κατά 33,66%, διατηρώντας ωστόσο χαμηλότερο ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας και λιγότερο ομαλή κατανομή των τάσεων. Από την άλλη μεριά το Topology Optimization δεν κατάφερε να μειώσει σημαντικά την μάζα, μόλις 5%. Γι' αυτό το λόγο παρόλο που το Topology Optimization παρουσίασε καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το Generative Design, κρίνεται πως το Generative Design, χρησιμοποίησε αποδοτικότερα τον χώρο βελτιστοποίησης, πετυχαίνοντας καλές μηχανικές ιδιότητες σε συνδυασμό με μεγαλύτερη μείωση της μάζας.




Στο δεύτερο σκέλος της ανάλυσης και των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε ορθοτροπικό υλικό στο Ansys, με τη χρήση δεδομένων εκτύπωσης από προηγούμενο πείραμα εντός του εργαστηρίου. Η δημιουργία αυτού του υλικού αποσκοπεί στην ορθότερη προσέγγιση των ιδιοτήτων των προϊόντων προσθετικής κατασκευής. Με βάση τα δεδομένα αυτά, προέκυψαν δύο διαφορετικά υλικά. Για κάθε πραγματοποιήθηκαν μελέτες Topology Optimization στο δοκίμιο της κάμψης αλλά και στο πρώτο δοκίμιο στρέψης.

Στους Πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων.



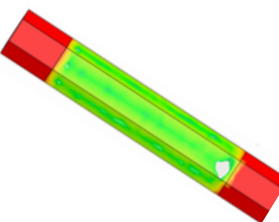
| ΚΑΜΨΗ | Α ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ | |
|------------------------------|---|--|
| | 1 ^ο Αποτέλεσμα | ΤΟ |
| |  |  |
| ΜΕΙΩΣΗ ΜΑΖΑΣ (%) | 78,32 | 73,15 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ (N) (FoS = 1) | 18,892 | 16,673 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (MPa) | 25,865 | 25,864 |
| ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm) | 0,177 | 0,219 |
| ΚΑΜΨΗ | Β ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ | |
| | 8 ^ο Αποτέλεσμα | ΤΟ |
| |  |  |
| ΜΕΙΩΣΗ ΜΑΖΑΣ (%) | 81,4 | 73,63 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ (N) (FoS = 1) | 17,287 | 5,4 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (MPa) | 25,858 | 25,847 |
| ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm) | 0,183 | 0,077 |

| ΚΑΜΨΗ | ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ Β ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ | |
|--------------------------|---|--|
| |  | ΤΟ  |
| ΜΕΙΩΣΗ ΜΑΖΑΣ (%) | 57,63 | 67,45 |
| ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ | 1,221 | 1,431 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (MPa) | 36,011 | 86,305 |
| ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm) | 0,536 | 0,347 |


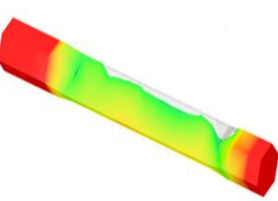
Πίνακας 24: Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης στατικής καταπόνησης για κάμψη.

| ΣΤΡΕΨΗ (Α) | Α ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ | | |
|--------------------------|--|--|--|
| | 1 ^ο Αποτέλεσμα - GD  | 4 ^ο Αποτέλεσμα  | ΤΟ  |
| ΜΕΙΩΣΗ ΜΑΖΑΣ (%) | 60,10 | 56,49 | 47,49 |
| ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ | 0,493 | 1,955 | 0,911 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (MPa) | 52,405 | 13,225 | 28,373 |
| ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm) | 0,54 | 1,303 | 0,017 |

Πίνακας 25: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης στατικής καταπόνησης για στρέψη, πρώτου δοκιμίου (Α Περίπτωση).

| ΣΤΡΕΨΗ (Α) | Β ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ | | |
|--------------------------|---|--|---|
| | 8° Αποτέλεσμα - GD | 14° Αποτέλεσμα - GD | ΤΟ |
| |  |  |  |
| ΜΕΙΩΣΗ ΜΑΖΑΣ (%) | 60,44 | 54,72 | 47,41 |
| ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ | 1,461 | 1,864 | 1,741 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (MPa) | 17,702 | 13,872 | 14,853 |
| ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm) | 0,71 | 1,267 | 0,02 |

Πίνακας 26: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης στατικής καταπόνησης για στρέψη, πρώτου δοκιμίου (Β Περίπτωση).

| ΣΤΡΕΨΗ (Β) | | |
|--------------------------|---|--|
| | 5° Αποτέλεσμα - GD | ΤΟ |
| |  |  |
| ΜΕΙΩΣΗ ΜΑΖΑΣ (%) | 30,38 | 4,89 |
| ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ | 2,335 | 6,195 |
| ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (MPa) | 11,073 | 4,174 |
| ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm) | 1,544 | 0,028 |

Πίνακας 27: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης στατικής καταπόνησης για στρέψη, δεύτερου δοκιμίου.

5.2 Περιορισμοί / δυσκολίες της μελέτης

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκαν κάποιες αντικειμενικές δυσκολίες οι οποίες χρήζουν σχολιασμού. Αρχικά, στα περισσότερα λογισμικά το Generative Design και το Topology Optimization δεν έχουν διακριτό ρόλο, παρουσιάζονται σαν μία τεχνολογία, επομένως δεν υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ τους. Οι εταιρείες που διαχωρίζουν τις δύο αυτές τεχνολογίες, δεν παρέχουν δωρεάν πρόσβαση στις πλήρεις δυνατότητες του Generative Design με εξαίρεση την Autodesk που διαθέτει δωρεάν σε φοιτητές το Fusion 360, το οποίο συμπεριλαμβάνει και τις δύο αναλυθείσες τεχνολογίες. Γι' αυτό το λόγο η συγκριτική μελέτη των δύο τεχνολογιών μεταξύ διαφορετικών CAD προγραμμάτων είναι δύσκολη. Επιπρόσθετα, το Generative Design στο περιβάλλον του Fusion 360, παρουσίαζε κάποιες δυσκολίες όσον αφορά το δοκίμιο της κάμψης. Πιο συγκεκριμένα, για να οριστούν δυνάμεις και στηρίξεις στη μοντελοποίηση της κάμψης τριών σημείων, έπρεπε να οριστούν οι περιοχές διατηρητέας γεωμετρίας, καθώς μόνο σε αυτές δίνεται η δυνατότητα ορισμού φόρτισης ή στήριξης. Αυτές οι περιοχές διατηρητέας γεωμετρίας θα έπρεπε αναγκαστικά να συμπεριλαμβάνονται στο τελικό βελτιστοποιημένο μοντέλο, δημιουργώντας λοιπόν ένα τελικό και ενιαίο σώμα στο οποίο οι δύο δοκοί που το στηρίζουν καθώς και η δοκός που ασκεί τη δύναμη σε αυτό ενώνονται με το τελικό μοντέλο. Όπως είναι φυσικό κάτι τέτοιο δεν θα ήταν επιθυμητό. Επιπρόσθετα, τα μοντέλα τα οποία υπόκεινται σε κάμψη χρειάστηκε να υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να εξομαλυνθούν οι επιφάνειες τους και να εξαλειφθούν οι περιοχές οι οποίες παρουσίαζαν υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Ως αποτέλεσμα τα μοντέλα παρουσίασαν υψηλότερο ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τέλος, το Generative Design και το Topology Optimization του Fusion 360 δεν έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιήσουν μελέτες βελτιστοποίησης για ορθοτροπικό υλικό. Οι μελέτες αυτές συντελούνται μόνο για ισοτροπικά υλικά. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε το Ansys. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει δυνατότητα πραγματοποίησης μελετών Topology Optimization για Ορθοτροπικό υλικό.

5.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η διπλωματική σύγκρισε δύο τεχνολογίες βελτιστοποίησης (Generative Design, Topology Optimization) των οποίων στόχος είναι η δημιουργία ανθεκτικών και ελαφρύτερων προϊόντων. Πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των δύο αυτών τεχνολογιών για τις ίδιες οριακές συνθήκες. Τα αποτελέσματα για το δοκίμιο της κάμψης και το πρώτο δοκίμιο στρέψης έδειξαν ότι το Generative Design μειώνει αποτελεσματικότερα την μάζα και δημιουργεί δοκίμια με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και υψηλότερο συντελεστή ασφαλείας. Παράλληλα, καταφέρνει να βελτιστοποιήσει την κατανομή των υλικών αποτελεσματικότερα καθώς και να κατανέμει τις τάσεις ομαλότερα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του δεύτερου δοκιμίου στρέψης. Σε αυτή τη περίπτωση το Topology Optimization επιτυγχάνει υψηλότερο ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας και ανθεκτικότερο μοντέλο, ωστόσο, η μάζα του δεν καταφέρνει να μειωθεί σημαντικά και συγκεκριμένα κατά 5%, σε αντίθεση με το Generative Design το οποίο μειώνει την μάζα του αρχικού μοντέλου κατά 30,38%, πετυχαίνοντας κατώτερες μηχανικές ιδιότητες, σε αποδεκτά ωστόσο πλαίσια. Φαίνεται λοιπόν πως όταν η διατομή του δοκιμίου παρουσιάζει

στένωση, το Topology Optimization δεν μπορεί να πετύχει σημαντική μείωση της μάζας. Αναλυτικότερα, όσο ο δείκτης μάζας μειωνότανε, δημιουργούνταν ασυνέχειες στο υλικό και δεν πρόκυπτε ενωμένο σώμα. Με άλλα λόγια, το αποτέλεσμα δεν ήταν αποδεκτό ούτε ενιαίο. Παρόλα αυτά, τα μοντέλα που παράχθηκαν με Topology Optimization κατάφεραν κάθε φορά να μειώνουν την μετατόπιση αποτελεσματικότερα.

Το Topology Optimization για την παραγωγή μοντέλων απαιτούσε μόλις λίγα λεπτά. Επιπλέον, παρείχε την δυνατότητα ορισμού δυνάμεων και στηρίξεων και σε περιοχές που δεν θα συμπεριλαμβάνονταν στο τελικό μοντέλο, σε αντίθεση με το Generative Design. Παρόλα αυτά, μπορούσε να επεξεργαστεί μόνο ένα υλικό ανά μελέτη, δεν λάμβανε υπόψιν τον τρόπο κατασκευής του μοντέλου και παρήγαγε ένα μοναδικό βελτιστοποιημένο μοντέλο. Το σοβαρότερο πρόβλημα της συγκεκριμένης μεθόδου είχε να κάνει με το πλέγμα. Τα μοντέλα που πρόκυπταν έπρεπε να αποθηκευτούν σαν πλέγμα (mesh) σε μορφή STL ή OBJ αρχείου. Σε επόμενο βήμα έπρεπε να εισαχθούν σε μελέτη στατικής καταπόνησης στα CAE αφού πρώτα μετατραπούν σε στερεό σώμα (Solid). Κατά την μελέτη στατικής καταπόνησης παρουσιάζαν διάφορα προβλήματα σχετικά με το πλέγμα όπως ασυνέχειες στην δομή, επιφάνειες μηδενικού πάχους και διασταυρωμένες ακμές. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έπρεπε να αυξηθεί σημαντικά η ανάλυση του πλέγματος, σε όλο το μοντέλο αλλά και σε ορισμένες περιοχές τοπικά, γεγονός που οδηγούσε σε μεγαλύτερους χρόνους ανάλυσης.

Από την άλλη πλευρά, το Generative Design, παράγει παραπάνω από ένα βελτιστοποιημένα μοντέλα, δέχεται παραπάνω από ένα υλικά και λαμβάνει υπόψιν τους τρόπους κατασκευής του τελικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη είναι στερεά σώματα και δεν παρουσιάζουν θέματα με το πλέγμα. Στα αρνητικά, απαιτείται μεγάλη υπολογιστική δύναμη και η παραγωγή των τελικών μοντέλων αργεί σημαντικά παραπάνω από την μελέτη για Topology Optimization.

Και οι δύο τεχνολογίες οδηγούν σε μεγάλη εξοικονόμηση υλικού, χρόνου και κόστους. Ωστόσο, στο πεδίο εφαρμογών της προσθετικής κατασκευής, το Generative Design είναι η ιδανική επιλογή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Generative Design παράγει οργανικά και πολύπλοκα μοντέλα, η γεωμετρία των οποίων κατασκευάζεται ευκολότερα με αρωγό την προσθετική κατασκευή, η οποία επιτρέπει ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών και δομών που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του Generative Design. Επιπλέον, το Generative Design εξοικονομεί παραπάνω υλικό από το Topology Optimization, το οποίο οφείλεται κυρίως στην δυνατότητα έλλειψης ενός αρχικού σχεδίου στο Generative Design, που επιτρέπει στα τελικά μοντέλα να ανταποκρίνονται με οργανικό τρόπο στους περιορισμούς της εκάστοτε μοντελοποίησης. Το γεγονός αυτό αφήνει το Generative Design στην πρώτη γραμμή της έρευνας εφόσον έχει λιγότερους περιορισμούς και μπορεί να επιτύχει με φυσικό τρόπο το βέλτιστο σχεδιασμό, όταν οι κατάλληλες συνθήκες έχουν εφαρμοστεί.

5.4 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα διπλωματική μπορούν να αποτελέσουν την βάση για μελλοντική έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η περαιτέρω πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Οι μελέτες πραγματοποιήθηκαν για πολυαμίδιο και κατασκευή σε SLS εκτυπωτή. Συνίσταται λοιπόν η εκτύπωση των εν λόγω βελτιστοποιημένων μοντέλων και η μετέπειτα καταπόνηση τους στις αντίστοιχες μηχανές στρέψης και κάμψης. Με τα δεδομένα που θα εξαχθούν, θα δοθεί δυνατότητα περαιτέρω σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, προτείνεται η παραγωγή βελτιστοποιημένων μοντέλων και σε άλλα CAE συστήματα με σκοπό τη σύγκρισή τους.

Σε επόμενο βήμα, προτείνεται η πραγματοποίηση μελετών βελτιστοποίησης τοπολογίας για ορθοτροπικό υλικό και σε άλλα CAE συστήματα, ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ των μοντέλων. Σε δεύτερο χρόνο, κρίνεται απαραίτητη η εκτύπωση αυτών των μοντέλων και η καταπόνηση τους στις αντίστοιχες μηχανές. **Θα πραγματοποιηθεί λοιπόν πειραματική επαλήθευση και θα αποδειχθεί αν αυτή η προσέγγιση, με ορθοτροπικό υλικό, πλησίασε την πραγματικότητα αποδοτικότερα, σε σχέση με τη χρήση ισοτροπικού υλικού.**

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ahmad Y Al-Maharma, Sandeep P Patil, Bernd Markert, 2020. Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: a critical review. *Materials Research Express*, 2 December, p. 28.
2. Amel, H., 2015. *Investigating the Cyclic Performance of*. Sheffield: University of Sheffield.
3. Anon., 2020. Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: a critical review. *Materials Research Express*, p. 28.
4. Anon., χ.χ. Autodesk. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.autodesk.com/customer-stories/airbus> [Πρόσβαση 2024].
5. ASTM, 1994. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. s.l. Ευρεσιτεχνία Αρ. Designation: F2792 – 12a.
6. Behbahani, Ning Gu and Peiman Amini, 2021. Shape Grammars: A Key Generative Design. 15 August, p. 21.
7. Cem C. Tutum, Etienne Vouga, Supawit Chockchowwat, Risto Miikkulainen, 2018. Functional generative design. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 02 07, p. 8.
8. Christiane M. Herr, Thomas Kvan, 2005. Adapting cellular automata to support the architectural design process. *Automation in Construction*, p. 9.
9. Collins, C., 2018. Autodesk. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://adsknews.autodesk.com/en-gb/news/nasas-jet-propulsion-lab-teams-autodesk-explore-new-approaches-designing-interplanetary-lander/> [Πρόσβαση 09 January 2024].
10. D. Brackett, I. Ashcroft, R. Hague, 2011. TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING. 17 August, p. 15.
11. D. Vlah , R. Žavbi and N. Vukašinović, 2020. EVALUATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION AND GENERATIVE DESIGN TOOLS AS SUPPORT FOR CONCEPTUAL DESIGN. *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE*, p. 10.
12. Danon, B., 2018. Autodesk. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://adsknews.autodesk.com/en/news/gm-autodesk-using-generative-design-vehicles-future/> [Πρόσβαση 09 January 2024].
13. Deepak Nagaraj, Dirk Werth, 2020. Towards a Generalized System for Generative Engineering. *APPIS*, 7 January, p. 6.
14. Deplazes, R., 2019. Autodesk. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://adsknews.autodesk.com/de/news/autodesk-volkswagen-generative-design->

electric-showcase-vehicle/

[Πρόσβαση 09 January 2024].

15. Feifei Yang, Navid Zobeiry, Ramulu Mamidala, Xu Chen, 2023. A review of aging, degradation, and reusability of PA12 powders in selective laser sintering additive manufacturing. *Materials Today Communications*, March, p. 19.
16. Feifei Yang, Navid Zobeiry, Ramulu Mamidala, Xu Chen, 2023. A review of aging, degradation, and reusability of PA12 powders in selective laser sintering additive manufacturing. *Materials Today Communications*, 28 December, p. 19.
17. Hans A Eschenauer, Niels Olhoff, 2001. Topology optimization of continuum structures: A review*. *ASME*, 4 July, p. 60.
18. <https://labts.co.id/product/torsion-testing-machine-30-n-m/>, χ.χ. *Torsion labts*. [Ηλεκτρονικό].
19. ISMAIL, János LÓGÓ, Hussein, 2020. Milestones in the 150-Year History of Topology. 26 August, p. 36.
20. James COULTHARD, Chang Jiang WANG, 2022. Generative Design and Topology Optimisation of Products for Additive Manufacturing. p. 6.
21. Jihong ZHU, Han ZHOU, Chuang WANG, Lu ZHOU, Shangqin YUAN, Weihong ZHANG, 2020. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 13 October, p. 20.
22. Jikai Liu¹ & Andrew T. Gaynor² & Shikui Chen³ & Zhan Kang⁴ & Krishnan Suresh⁵ & Akihiro Takezawa⁶ & Lei Li⁷ &, 2018. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 03 May, p. 27.
23. Kumar, S., 2003. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach. *JOM*, October, p. 5.
24. Martin Pollák, Jozef Török, 2022. Use of Generative Design Tools in the Production of Design Products using 3D Printing Technology. *TEM*, February, p. 8.
25. Matmatch, χ.χ. *Matmatch*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://matmatch.com/materials/mbas032-polyamide-12-pa12->
[Πρόσβαση 23 02 2024].
26. Matsunaka, Y., 2023. *Autodesk*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.autodesk.com/design-make/articles/generative-design-seat-frame>
[Πρόσβαση 09 January 2024].
27. McCormack, J., 2004. *GENERATIVE MODELLING WITH TIMED L-SYSTEMS*. Cambridge, First International Conference on Design, Computing and Cognition.
28. McKnight, M., 2017. *Generative Design: What it is? How is it Being Used? Why it's a Game Changer!*. Australia, Autodesk.

29. N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, 2019. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, p. 11.
30. P. V. (Sundar) Balakrishnan, Varghese S. Jacob, 1996. Genetic Algorithms for Product Design. *Management Science*, p. 14.
31. Razvan CAZACU, Lucian GRAMA, 2014. OVERVIEW OF STRUCTURAL TOPOLOGY OPTIMIZATION METHODS FOR PLANE AND SOLID STRUCTURES. *Fascicle of Management and Technological Engineering*, December, p. 6.
32. Rozvany, G. I. N., 2007. A critical review of established methods of structural topology optimization. *Struct Multidisc Optim*, 22 November, p. 21.
33. Shayaan Ahmed, Manoj Kumar Gupta, 2021. Investigations on motorbike frame material and comparative analysis using generative design and topology optimization. *Materials Today: Proceedings*, 23 December, p. 7.
34. Sheikh, Sunil C. Joshi & Abdullah A., 2015. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, 27 November, p. 12.
35. Singh, V., 2011. Design Studies. *Towards an integrated generative design framework*, p. 23.
36. Stiny, G., 1980. Introduction to shape and shape grammars. *Environment and Planning volume 7*, p. 9.
37. Terry Wohlers, Tim Gornet, Noah Mostow, Ian Campbell, Olaf Diegel, Joseph Kowen, Ray Huff, Brent Stucker, Ismail Fidan, 2016. History of Additive Manufacturing. *Wohlers Report 2016-2022*, 29 April, p. 38.
38. Tristan Briard, Frédéric Segonds, Nicolo Zamariola, 2020. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). *G-DfAM: a methodological proposal of generative design for additive manufacturing in the automotive industry*, 03 August, p. 12.
39. Xiaodong Huang, Yi-Min Xie, 2010. A further review of ESO type methods for topology optimization. *Struct Multidisc Optim*, 06 March, p. 13.
40. Zwick Roell, χ.χ. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/3-point-flexure-test-iso-178/>
[Πρόσβαση 12 2 2024].