



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Συγκριτική μελέτη βελτιστοποίησης τοπολογίας εξαρτημάτων με κριτήριο την κατασκευασιμότητά τους σε προσθετικές κατασκευές

Συγγραφέας

Δράκος Μάριος

46147717

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Σαγιάς Βασίλειος

Στεργίου Κωνσταντίνος

Αθήνα, Ιούλιος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Diploma Thesis

**Comparative study of Topology Optimization on parts with criterion the manufacturability
on additive manufacturing**

Student name and surname:

Drakos Marios

Registration Number: 46147717

Supervisors:

Sagias Vasileios

Stergiou Konstantinos

Athens, July 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Συγκριτική μελέτη βελτιστοποίησης τοπολογίας εξαρτημάτων με κριτήριο την κατασκευασιμότητά τους σε προσθετικές κατασκευές

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/A	ΟΜΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Στεργίου Κωνσταντίνος	
2	Ρώσης Κυριάκος	
3	Σαγιάς Βασίλειος	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δράκος Μάριος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 46147717 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας της της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Της, οι όποιες πηγές από της οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό της, με πλήρη αναφορά της συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Της, 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».

Ο Δήλων

ΔΡΑΚΟΣ ΜΑΡΙΟΣ



Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω το υπεύθυνο καθηγητή μου κύριο Σαγιά, ο οποίος που έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα το οποίο με ενδιαφέρει και με το οποίο ελπίζω να ασχοληθώ επαγγελματικά στο μέλλον.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου, οι οποίοι μου στάθηκαν καθ' όλη την διάρκεια την φοίτησης μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί έναν καινοτόμο τρόπο αυτοματοποιημένου σχεδιασμού εξαρτημάτων με μικρότερη μάζα και ίδιες μηχανικές ιδιότητες από τον αρχικό τους σχεδιασμό. Η κατασκευασσιμότητά τους ήταν δύσκολη, έως και ακατόρθωτη, με τους συμβατικούς τρόπους κατασκευής, λόγω των περίπλοκων γεωμετριών, αλλά πλέον οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν επιτρέψει την κατασκευή αυτών των περίπλοκων εξαρτημάτων.

Αρχικά, στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται στο θεωρητικό μέρος οι τρόποι βελτιστοποίησης εξαρτημάτων με έμφαση στην βελτιστοποίηση τοπολογίας. Έπειτα παρουσιάζονται τα προγράμματα που επιλέχθηκαν για σύγκριση και τύπος βελτιστοποίησης τοπολογίας που χρησιμοποιούν τα λογισμικά τους. Εν συνεχεία αναφέρονται και οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που υπάρχουν διαθέσιμες στη βιομηχανία. Τέλος παρουσιάζεται η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί και τα βήματα για την πειραματική διαδικασία.

Για την πειραματική διαδικασία πραγματοποιούνται οι μελέτες τοπολογικής βελτιστοποίησης με ίδια δεδομένα και στα τρία λογισμικά για να είναι παρόμοιες οι μελέτες. Αφότου πραγματοποιηθούν οι μελέτες και γίνει η εξαγωγή των τελικών σχεδίων, εκτυπώνονται τα δοκίμια και γίνονται τα πειράματα κάμψης.

Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων και συζήτηση για την ανασκόπηση της εργασίας. Επίσης αναγράφονται τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν όπως και οι μελλοντικές έρευνες που μπορούν να πραγματοποιηθούν στο τομέα της βελτιστοποίησης τοπολογίας και των προσθετικών κατασκευών.

Λέξεις Κλειδιά :Τρισδιάστατη Εκτύπωση, Προσθετικές Κατασκευές, Βελτιστοποίηση Τοπολογίας,

ABSTRACT

Topological optimization is an innovative way of automated design of parts with less mass and same mechanical properties than their original design. Their manufacturability was difficult, even impossible, with conventional manufacturing methods, due to the complex geometries, but now 3D printing technologies have made it possible to manufacture these complex parts.

Initially, in this thesis, the methods of component optimization are presented in the theoretical part with an emphasis on topology optimization. The programs selected for comparison and the type of topology optimization their software uses are then presented. Then the 3D printing technologies available in the industry are mentioned. Finally, the methodology to be followed and the steps for the experimental process are presented.

For the experimental process, the topological optimization studies are carried out with the same data in all three software to make the studies similar. After the studies are done and the final designs are exported, the test pieces are printed and the bending tests are done.

Finally, a comparison of the results and a discussion of the review of the work are carried out. Also listed are the problems presented as well as future research that can be carried out in the field of topology optimization and additive manufacturing.

Keywords : 3D Printing, Additive Manufacturing, Topology Optimization, Inventor, Solidworks, Fusion 360

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ (CAE).....	11
Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA)	12
ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	13
Διαδικασία Τοπολογικής Βελτιστοποίησης	14
Βελτιστοποίηση τοπολογίας με κριτήριο τις προσθετικές κατασκευές	16
Μέθοδος Τοπολογικής Βελτιστοποίησης SIMP	18
Ανάλυση Μεθόδου SIMP	18
Στόχος Μεγιστοποίησης Δυσκαμψίας	21
Ανάλυση Ευαισθησίας	22
Πλέγμα.....	24
ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ (CAD/CAE)	26
Inventor	26
Solidworks	27
Fusion 360	27
ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	28
Τι είναι η προσθετική κατασκευή	28
Πως δουλεύει η προσθετική κατασκευή	28
Λογισμικό	28
Υλικά	28
Κατηγορίες Προσθετικών Κατασκευών	30
Πολυμερή	30
Μέταλλα	30
Σύνθετα υλικά	31
Κεραμικά	31
Τεχνολογίες Προσθετικών Κατασκευών	32
Fused Deposition Modelling.....	32
Selective laser sintering.....	33
Stereolithography	34
Binder Jetting.....	35
Direct Energy Deposition.....	36
Material Jetting	37

Sheet Lamination.....	38
ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	39
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	41
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	42
Εξοπλισμός και διεξαγωγή πειραμάτων	42
Δοκίμιο	42
Μηχανή Κάμψης	43
Εκτυπωτής	44
Slicer	45
Υλικό	46
Παράμετροι Πειραμάτων	47
Επίπεδο συμμετρίας.....	47
Μείωση μάζας και μεγιστοποίηση δυσκαμψίας	47
Hardware Υπολογιστή	47
Μελέτη Inventor.....	48
Μελέτη Solidworks.....	52
Μελέτη Fusion 360.....	54
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	59
Εκτύπωση	59
ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΜΨΗΣ	61
Πείραμα 1.....	63
Πείραμα 2.....	64
Πείραμα 3.....	65
Πείραμα 4.....	66
Πείραμα 5.....	67
Πείραμα 6.....	68
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	71
Προβλήματα	71
Αποτελέσματα.....	72
Μελλοντικές Εφαρμογές.....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	77

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

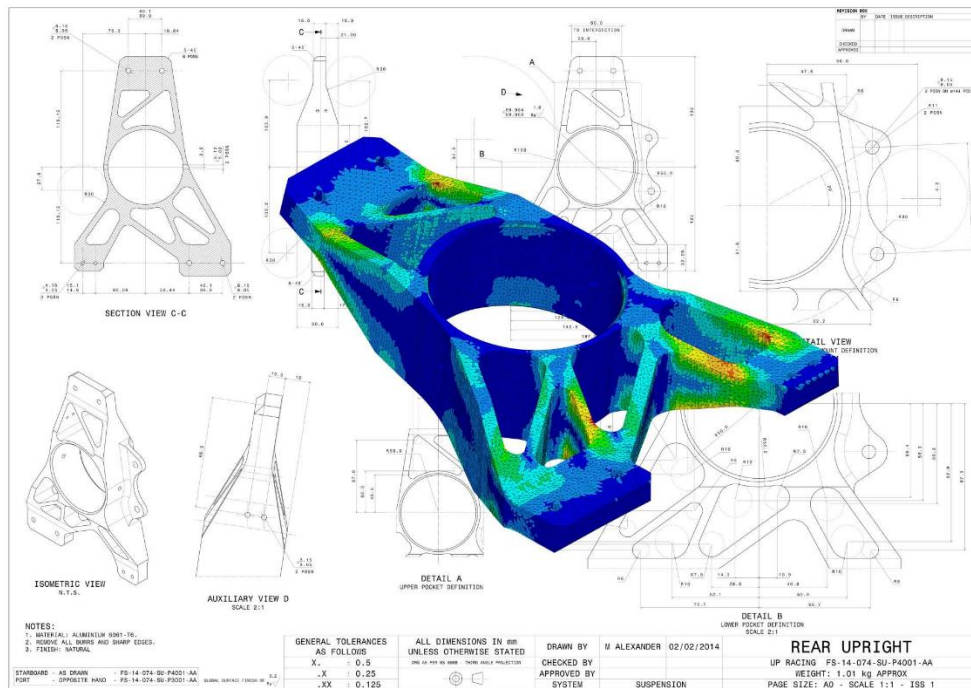
Στο τοπίο της σύγχρονης μηχανικής και κατασκευής, η σύγκλιση προηγμένων υπολογιστικών εργαλείων και τεχνικών κατασκευής αιχμής έχει εγκαινιάσει μια νέα εποχή σχεδιαστικών δυνατοτήτων. Μεταξύ αυτών των μετασχηματιστικών προσεγγίσεων, η "βελτιστοποίηση τοπολογίας" ξεχωρίζει ως βασικός διεκδικητής, προσφέροντας απaráμιλλες δυνατότητες να αναδιαμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζουμε και κατασκευάζουμε περίπλοκα εξαρτήματα. Ειδικότερα, η σφαίρα της προσθετικής κατασκευής, μια ανατρεπτική διαδικασία που κατασκευάζει αντικείμενα στρώμα προς στρώμα από ψηφιακά μοντέλα, έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή για την ικανότητά της να δημιουργεί εξαιρετικά πολύπλοκες γεωμετρίες με ελάχιστη σπατάλη υλικών. Καθώς η προσθετική κατασκευή συνεχίζει να φέρνει επανάσταση στις βιομηχανίες, τίθεται ένα κρίσιμο ζήτημα: πώς μπορεί να αξιοποιηθεί η βελτιστοποίηση της τοπολογίας για να βελτιωθεί όχι μόνο η δομική απόδοση αλλά και η κατασκευασιμότητα των εξαρτημάτων σε αυτό το δυναμικό τοπίο παραγωγής;

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ (CAE)

Το CAE, που είναι τα αρχικά των λέξεων Computer-Aided Engineering, αφορά τη συνολική διαδικασία της μηχανικής προϊόντων. Καλύπτει τα πάντα, από τον σχεδιασμό και τις προηγμένες εικονικές δοκιμές με τη χρήση αλγορίθμων ανάλυσης έως τον προγραμματισμό της διαδικασίας κατασκευής.

Η μηχανική με τη χρήση υπολογιστή έχει γίνει πλέον κανόνας σε κάθε βιομηχανία που εφαρμόζει λογισμικό σχεδιασμού για την ανάπτυξη προϊόντων. Αποτελεί την εξέλιξη πέρα από τον σχεδιασμό προϊόντων και περιλαμβάνει το σύνολο της ροής εργασίας της μηχανικής. Η εν λόγω προσέγγιση επιτρέπει τη διενέργεια δοκιμών και προσομοιώσεων για την εκτίμηση των φυσικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος δίχως την ανάγκη ενός φυσικού πρωτοτύπου. Στη ζώνη του CAE, οι κατεχοχόν τύποι προσομοιώσεων που επικρατούν, περιλαμβάνουν (SIMSCALE, 2023):

- Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων
- Υπολογιστική ρευστοδυναμική
- Θερμική ανάλυση
- Δυναμική πολλαπλών σωμάτων
- Βελτιστοποίηση προϊόντων ή σχεδίων



Εικόνα 1 : Computer-Aided Engineering (kus-usa.com)

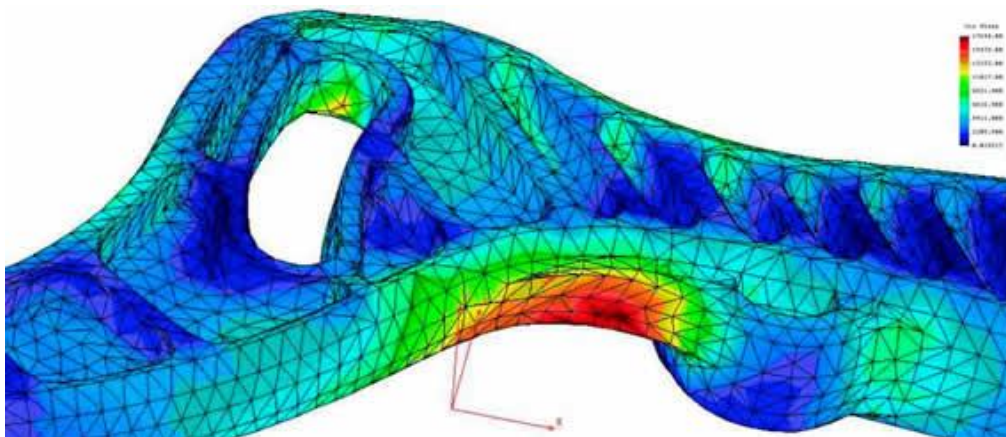
Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA)

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) περιλαμβάνει την αναπαράσταση της απόδοσης ενός εξαρτήματος ή συγκροτήματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες, επιτρέποντας την αξιολόγηση μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Οι μηχανικοί αξιοποιούν τη FEA για τη μοντελοποίηση φυσικών συμπεριφορών, περιορίζοντας έτσι στο ελάχιστο την απαίτηση για απτές πρωτότυπες κατασκευές, δίνοντάς τους διευκόλυνση της βελτιστοποίησης εξαρτημάτων στο πλαίσιο του σχεδιασμού έργων.

Η FEA εφαρμόζει μαθηματικά μοντέλα για την αντιληψιμότητα και τη μέτρηση των επιπτώσεων των πραγματικών περιβαλλοντικών καταστάσεων σε ένα εξάρτημα ή συγκρότημα. Αυτές οι προσομοιώσεις, που διενεργούνται με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού, δίνουν τη δυνατότητα στους μηχανικούς να εντοπίζουν πιθανά ζητήματα σχεδίασης, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών έντασης και των ευάλωτων σημείων. Τα μαθηματικά βοηθούν στην κατανόηση και την ποσοτική εκτίμηση φαινομένων όπως η δομική δυναμική ή η δυναμική των ρευστών, η θερμική μεταφορά, η διάδοση των κυμάτων και πολλά άλλα.

Ενώ οι περισσότερες διαδικασίες μπορούν να προσδιοριστούν με τη χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDEs), η λύση αυτών των περίπλοκων εξισώσεων είναι σημαντική για την προσέγγιση παραμέτρων όπως οι ρυθμοί τάσεων και παραμορφώσεις. Η FEA παρέχει μια κατά προσέγγιση επίλυση αυτών των δυσκολιών. Η FEA αποτελεί το υπόβαθρο του μοντέρνου λογισμικού προσομοίωσης, το οποίο συνήθως παρουσιάζει τα αποτελέσματα με τη χρήση χρωματικών κλιμάκων που παράγονται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Αν και ορισμένες θεωρίες υποστηρίζουν ότι η FEA έχει τις ρίζες της στο έργο του Euler του 16ου αιώνα, τα πρώτα μαθηματικά κείμενα που οριοθετούν ρητά την τεχνική χρονολογούνται από τις συνεισφορές του Schellbach το 1851. Μηχανικοί από διάφορους κλάδους παγκοσμίως προήγαγαν περαιτέρω τη FEA για να αντιμετωπίσουν ένα πλήθος από προκλήσεις της δομικής μηχανικής, ιδίως στον τομέα της πολιτικής μηχανικής και της αεροδιαστημικής. Οι αρχικές εφαρμογές της FEA στον πραγματικό κόσμο αναδύθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1950 και γνώρισαν συνεχή ανάπτυξη κατά τις επόμενες δεκαετίες (TWI-Global, 2023).



Εικόνα 2 : Finite Element Analysis (enginsoftusa.com)

ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

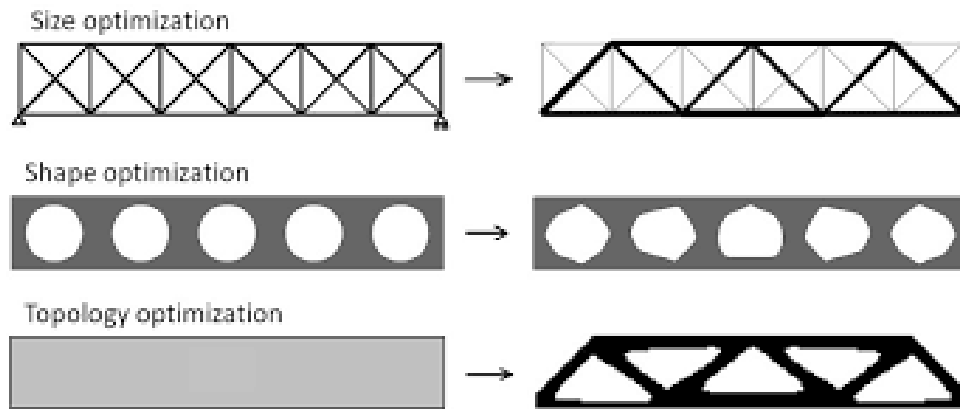
Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν ως σκοπό την βελτίωση του σχεδιασμού ενός εξαρτήματος ή μηχανισμού, προκειμένου να πλησιάσουν ή να πέτυχουν τους επιθυμητούς στόχους που έχουν τεθεί από το χρήστη ενός λογισμικού βελτιστοποίησης. Τέτοιοι στόχοι μπορεί να είναι η μείωση της μάζας ενός εξαρτήματος, η εύρεση της στιβαρότερης γεωμετρίας ή η συμπεριφορά ενός ρευστού πάνω σε μια γεωμετρία. Υπάρχει μια ποικιλία προσεγγίσεων και μεθοδολογιών για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο τύπος της προσέγγισης και της μεθοδολογίας που θα εφαρμοστεί θα εξαρτηθεί από τις απαιτήσεις και τον τομέα εφαρμογής.

Μια τέτοια κατηγορία είναι και η δομική βελτιστοποίηση. Στόχος της δομικής βελτιστοποίησης είναι η αυτοματοποιημένη σχεδίαση ενός εξαρτήματος με σκοπό την βέλτιστη δομική απόδοση του. Διάφορες τεχνικές δομικής βελτιστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τις μεταβλητές σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της γεωμετρίας. Οι βασικές κατηγορίες δομικής βελτιστοποίησης είναι :

- Βελτιστοποίηση μεγέθους (Size Optimization)
- Βελτιστοποίηση σχήματος (Shape Optimization)
- Βελτιστοποίηση τοπολογίας (Topology Optimization)

Η βελτιστοποίηση μεγέθους περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαστάσεων των δομικών στοιχείων διατηρώντας σταθερή τη διάταξη. Η βελτιστοποίηση σχήματος επιτρέπει τη μεταβολή των εξωτερικών και εσωτερικών ορίων για την επίτευξη του καλύτερου σχεδιασμού. Από την άλλη πλευρά, η βελτιστοποίηση τοπολογίας υπερβαίνει τη βελτιστοποίηση σχήματος, διερευνώντας διάφορες κατανομές υλικού εντός του πεδίου σχεδιασμού.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας, η οποία εισήχθη από τους Bendsoe και Kikuchi και τον Rozvany, έχει κερδίσει σημαντική προσοχή τόσο σε ακαδημαϊκούς όσο και σε βιομηχανικούς κύκλους. Βρίσκει εφαρμογή στο σχεδιασμό δομικών και υλικών, μηχανισμών, στο σχεδιασμό μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) και σε άλλα. Η "μέθοδος κατανομής υλικών" είναι μια κοινή προσέγγιση στη βελτιστοποίηση τοπολογίας, όπου οι ιδιότητες των υλικών αποδίδονται σε ένα διακριτοποιημένο μοντέλο (π.χ. πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων) για τη βελτιστοποίηση της δομικής ιδιότητας ενδιαφέροντος, όπως η συμμόρφωση ή η δυσκαμψία. Αυτή η τεχνική οδηγεί σε καινοτόμους και ελαφρούς σχεδιασμούς, προωθώντας την αποδοτικότητα των υλικών και του κόστους, και χρησιμοποιείται σε ποικίλους τομείς της μηχανικής, όπως οι πολυστρωματικές σύνθετες δομές, η μεταφορά θερμότητας, τα ρευστά, η ακουστική, ο ηλεκτρομαγνητισμός και η φωτονική (Lee, 1999) (Huang & Xie, 2010).



Εικόνα 3 : Μέθοδοι Δομικής Βελτιστοποίησης (researchgate.net)

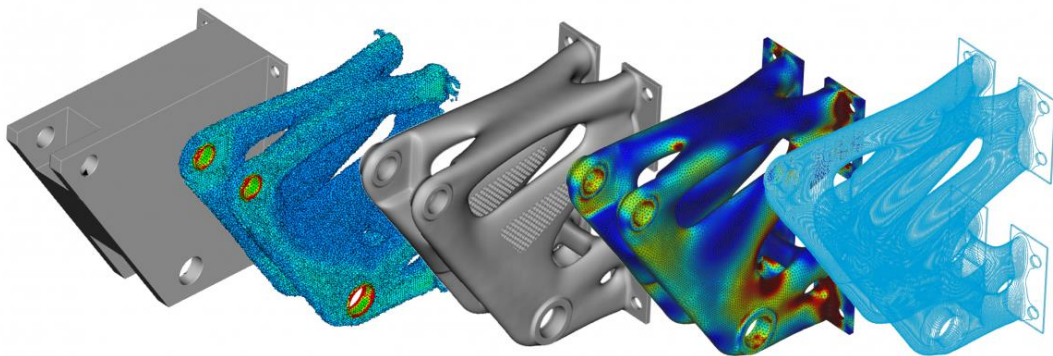
Διαδικασία Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι μια από τις τεχνικές δομικής βελτιστοποίησης που βελτιστοποιεί την κατανομή του υλικού εντός ενός καθορισμένου χώρου σχεδιασμού για μια δεδομένη φόρτιση και οριακές συνθήκες ενώ πληρούνται οι απαιτήσεις απόδοσης του προϊόντος. Οι περισσότερες από τις τεχνικές βελτιστοποίησης τοπολογίας πραγματοποιούνται με συλλογική χρήση σχεδιαστικών προγραμμάτων Computer Aided Design (CAD), ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και διαφορετικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές τεχνικές κατασκευής. Η χρήση του CAD στη βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι να δημιουργηθεί ένα πρόχειρο/αρχικό μοντέλο του προϊόντος που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί, ενώ το FEA χρησιμοποιείται για τη διανομή των τάσεων και των μετατοπίσεων σε όλο το προϊόν. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας εκτελείται για αφαίρεση οι περιοχές του τμήματος που δεν αντέχουν επαρκώς τα εφαρμοζόμενα φορτία και δεν υφίστανται σημαντικά παραμόρφωση και επομένως δεν συμβάλλει στη συνολική απόδοση του εξαρτήματος.

Με βάση την απαίτηση του προβλήματος σχεδιασμού, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για την αφαίρεση του τμήματος του υλικού στο προϊόν που δεν υποστηρίζει το εφαρμοζόμενο φορτίο. Επιπλέον, η τοπολογική βελτιστοποίηση γίνεται για να ικανοποιηθούν ορισμένοι σχεδιαστικοί στόχοι και να διατηρηθούν οι περιορισμοί του σχεδιασμού. Βασισμένο στο πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε, οι στόχοι μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση της συμμόρφωσης του εξαρτήματος, δηλαδή η μεγιστοποίηση η ακαμψία του εξαρτήματος, καθώς η συμμόρφωση είναι το αντίστροφο της ακαμψίας. οι περιορισμοί θα μπορούσαν να είναι οι μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση, το μέγιστο κλάσμα μάζας και ούτω καθεξής. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας τα εργαλεία δημιουργούν ένα περίπλοκο φυσικό σχήμα που δείχνει την αφαίρεση υλικών με βάση τους στόχους και τους περιορισμούς που τίθενται στο πρόβλημα σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός στη συνέχεια οριστικοποιείται σε λογισμικό CAD για να παραχθεί ένα ομαλό, ως προς τις επιφάνειες, και κατασκευαστικό εξάρτημα ακολουθώντας το σχήμα που δημιουργείται από τη διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογίας. Εν τέλη, ο τελικός βελτιστοποιημένος σχεδιασμός επικυρώνεται με τη χρήση εργαλείων FEA για την ικανοποίηση των απαιτήσεων σχεδιασμού, έτσι ώστε το προϊόν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του σχεδιαστή/μηχανικού (Bendsøe & Sigmund, 2003).

Η δομική βελτιστοποίηση, γενικά, έχει τεράστια πιθανά οφέλη κατά την διαδικασία ανάπτυξης νέων προϊόντων. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει τα ακόλουθα οφέλη στη διαδικασία σχεδιασμού :

- Δημιουργία ελαφρών δομών
- Δημιουργία σχεδίου έτοιμου προς κατασκευή
- Μείωση του χρόνου διάθεσης στην αγορά
- Εξοικονόμηση τεράστιας ποσότητας υλικού
- Μείωση της φυσικής δοκιμασίας
- Εξοικονόμηση μεγάλης ποσότητας ενέργειας επεξεργασίας
- Μείωση της φυσικής κατασκευής πρωτοτύπων



Εικόνα 4 : Στάδια Τοπολογικής Βελτιστοποίησης (formlabs.com)

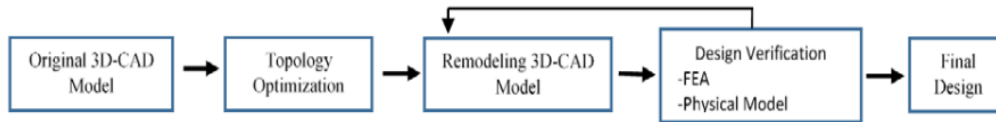
Βελτιστοποίηση τοπολογίας με κριτήριο τις προσθετικές κατασκευές

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει αναδειχθεί ως μια αποτελεσματική προσέγγιση σχεδιασμού για επιχειρήσεις που επιδιώκουν να εξοικονομήσουν χρόνο, ενέργεια και κόστος υλικών. Όταν εξερευνηθεί πλήρως με τη βοήθεια των προσθετικών κατασκευών, μπορεί να προσφέρει πλεονεκτήματα που δεν είναι διαθέσιμα από καμία άλλη διαδικασία παραγωγής. Η Additive Manufacturing Technology, αλλιώς γνωστή ως 3D printing, αναδύεται ως μια ισχυρή εναλλακτική λύση στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Έχει τη δυνατότητα να υπερκεράσει ή ακόμα και να αντικαταστήσει τις υπάρχουσες διαδικασίες παραγωγής. Το Additive Manufacturing (AM) είναι ένας τύπος διαδικασίας παραγωγής που συγκεντρώνει στοιχεία από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων για να σχηματίσει ένα αντικείμενο, που κατασκευάζεται σε διαδοχικά επίπεδα (layers) σε αντίθεση με τις αφαιρετικές μεθόδους. Η τεχνολογία προσθετικών κατασκευών έχει μοναδικές δυνατότητες. πολυπλοκότητα σχήματος (παράγει οποιοδήποτε σχήμα που μπορεί να σχεδιαστεί), πολυπλοκότητα υλικών (διεργασίες πολυυλικών προϊόντων), ιεραρχική πολυπλοκότητα (εσωτερική δομή προϊόντων που κυμαίνεται από μεσοκλίμακα έως μακροκλίμακα) και λειτουργική πολυπλοκότητα (παράγει πολλαπλά μέρη ως ένα ενιαίο λειτουργικό προϊόν). Η βελτιστοποίηση τοπολογίας παραδοσιακά βασίζεται σε υπάρχουσες μεθόδους κατασκευής. Ωστόσο, αυτές οι παραδοσιακές προσεγγίσεις δεν έχουν αξιοποιήσει στο έπακρο αυτήν την προσέγγιση σχεδίασης δεδομένων των περιορισμών στην κατασκευή για βελτιστοποιημένα σχέδια. Η βελτιστοποιημένη γεωμετρία δεν μπορεί να παραχθεί, καθώς υπάρχουν περιορισμοί στη γεωμετρική πολυπλοκότητα για την παραγωγή του με τις υπάρχουσες τεχνικές κατασκευής.

Ο ελαφρύς σχεδιασμός είναι ιδιαίτερα ωφέλιμος για την ανάπτυξη προϊόντων, καθώς συμβάλλει στη μείωση της δαπάνης υλικών και ενέργειας, καθώς και στην απλοποίηση της παραγωγής. Η μείωση του βάρους του προϊόντος μπορεί να επιτευχθεί μέσω βελτιστοποίησης τοπολογίας σε συνδυασμό με μεθόδους προσθετικών κατασκευών. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο τόσο για το σχεδιασμό από την αρχή όσο και για τη βελτίωση των υφιστάμενων σχεδίων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία προϊόντων με χαμηλότερη μάζα, ενώ εξακολουθεί να πληροί τον σκοπό και τις απαιτήσεις τους. Χρησιμοποιώντας τοπολογική βελτιστοποίηση, είναι δυνατό να δημιουργηθούν γεωμετρίες σχεδιασμένες με ποικιλία υλικών και εσωτερικών δομών, συμπεριλαμβανομένων συμπαγών και κυψελωτών δομών.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη διαδικασία σχεδιασμού βελτιστοποιημένης τοπολογίας. Αρχικά, το σχέδιο CAD δημιουργείται σε ένα λογισμικό μοντελοποίησης 3D CAD. Εν συνεχεία, ο σχεδιασμός υποβάλλεται σε δομική ανάλυση υπό καθορισμένες συνθήκες φόρτισης και χαρτογραφούνται οι προκύπτουσες μετατοπίσεις και τάσεις. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι μια μέθοδος αφαίρεσης υλικού από περιοχές που δεν επηρεάζονται έντονα από την τάση και τη μετατόπιση λόγω των εφαρμοζόμενων φορτίων. Αυτό θα βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση του βάρους του κατασκευασμένου αντικείμενου, ενώ θα εξακολουθεί να πληροί όλες τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός του εξαρτήματος τροποποιείται σε πρόγραμμα CAD σύμφωνα με το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης τοπολογίας. Μετά τη δημιουργία του μοντέλου CAD, διενεργείται ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για να διασφαλιστεί ότι μπορεί να αντέξει τα εκχωρημένα φορτία και να πληροί όλα τα κριτήρια

σχεδιασμού. Εάν το μοντέλο περάσει την αξιολόγηση, η επαλήθευση του φυσικού μοντέλου πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μία από τις τεχνικές φυσικών πρωτοτύπων. Εάν η επαναδιαμόρφωση δεν πληροί τα κριτήρια, επαναλαμβάνεται μέχρι να επαληθευτεί η ορθότητα του. Τέλος, χρησιμοποιείται ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής για την κατασκευή του τελικού σχεδίου (Gebisa & Lemu, 2023).



Εικόνα 5 : Βήματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Μέθοδος Τοπολογικής Βελτιστοποίησης SIMP

Ανάλυση Μεθόδου SIMP

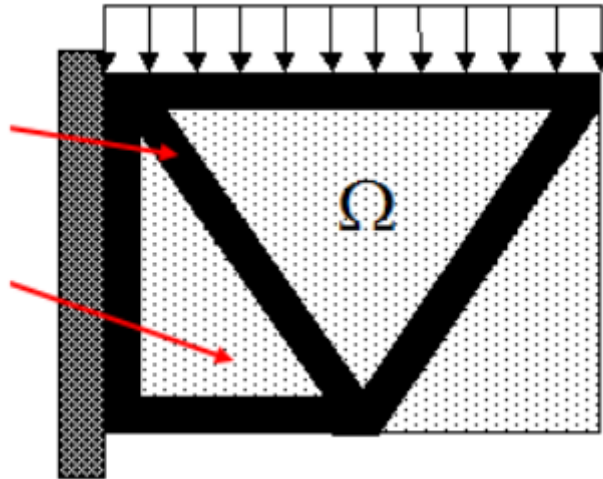
Η σύγχρονη βιομηχανία απαιτεί τη βελτιστοποίηση των προϊόντων για την επίτευξη βέλτιστων επιδόσεων και αποτελεσμάτων. Ταυτόχρονα, η έννοια της βελτιστοποίησης έχει γίνει αντικείμενο μεγάλης περιέργειας για πολλούς στον επιστημονικό κόσμο, με την τοπολογική βελτιστοποίηση να είναι ιδιαίτερα σημαντική. Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, η έρευνα στον ακαδημαϊκό χώρο και στα τμήματα βιομηχανικής έρευνας και ανάπτυξης έχουν δημιουργήσει πολυάριθμες τεχνικές για την επίλυση προβλημάτων τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Η πλέον διαδεδομένη μαθηματική τεχνική για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι το Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP), το οποίο αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τους Bendsoe και Kikuchi το 1988 και Rozvany και Zhou το 1992. Η τεχνική SIMP (Simplified Isotropic Material Performance) βοηθά στον προσδιορισμό του υλικού που είναι το καταλληλότερο για ένα συγκεκριμένο σχέδιο, ανάλογα με τις συνθήκες φορτίου, τις οριακές απαιτήσεις, τις παραμέτρους κατασκευής και τους στόχους απόδοσης.

Ο Bendsoe (1989) δήλωσε ότι για να πέτυχει η βελτιστοποίηση σχήματος, είναι απαραίτητο να ληφθούν λεπτομερείς πληροφορίες για κάθε σημείο στο χώρο αναφοράς, προσδιορίζοντας την ύπαρξη υλικού ή μη στο δεδομένο σημείο. Παραδοσιακά, η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει επιτευχθεί με διαίρεση ενός τομέα σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, γνωστά ως ισότροπες στερεές μικροδομές. Κάθε στοιχείο είναι πληρωμένο με υλικό για τις περιοχές που χρειάζεται υλικό, ή χωρίς υλικό για τις περιοχές όπου μπορεί να αφαιρεθεί (ή που αντιπροσωπεύουν κενά). Σε ένα τομέα σχεδίασης, η κατανομή πυκνότητας υλικού, ρ , είναι διακριτή και παίρνει μια δυαδική τιμή σε κάθε στοιχείο:

- $\rho(e) = 1$ όπου απαιτείται υλικό (μαύρο)
- $\rho(e) = 0$ όπου αφαιρείται υλικό (άσπρο)

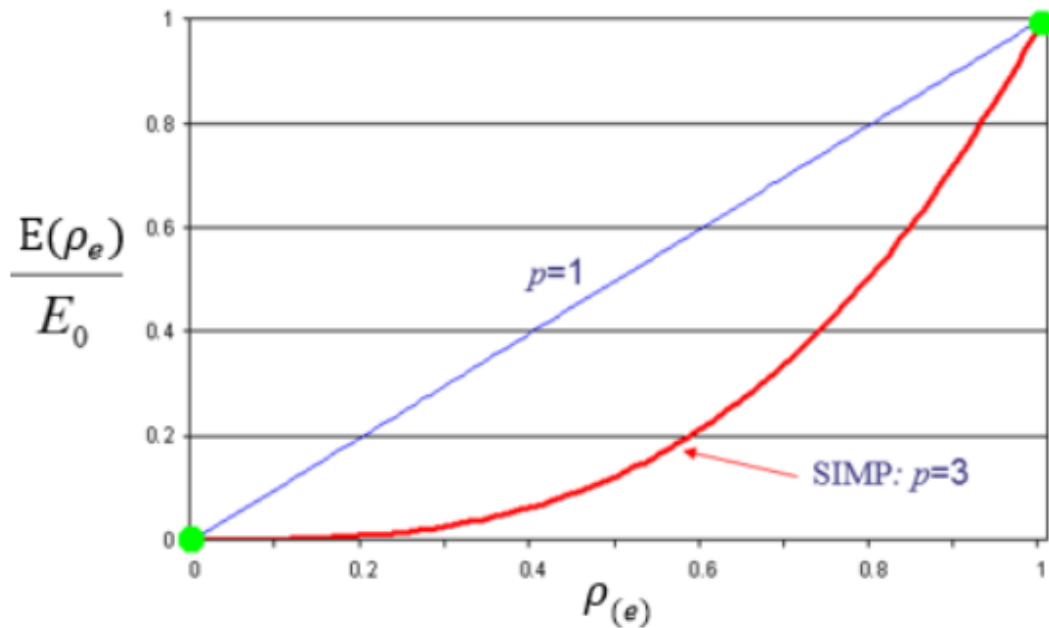
Το παρακάτω σχήμα φαίνεται η βελτιστοποιημένη γεωμετρία του υλικού μιας φορτισμένης δοκού. Όλα τα μαύρα στοιχεία παριστάνουν τα στερεά στοιχεία με $\rho(e) = 1$, τα δε κενά στοιχεία με $\rho(e) = 0$ έχουν απομακρυνθεί.



Η ενσωμάτωση μιας συνεχούς κατανομής σχετικής πυκνότητας εξαλείφει τις αντιξοότητες που δημιουργεί η δυαδική, on-off φύση του προβλήματος. Για στοιχεία, η σχετική πυκνότητα που εκχωρείται μπορεί να κυμαίνεται από ρ_{\min} έως 1. Αυτό παρέχει την ευκαιρία να οριστεί μια ενδιάμεση πυκνότητα για εξαρτήματα που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως πορώδη. Η σχετική πυκνότητα, που συμβολίζεται ως ρ_{\min} , ορίζει την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή για όλα τα κενά στοιχεία μεγαλύτερα από το μηδέν. Η τιμή αυτή έχει ως στόχο την διασφάλιση της σταθερότητας ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων.

Λόγω της πιθανότητας αλλαγής της σχετικής πυκνότητας υλικού, είναι δυνατό να μεταβληθεί ο συντελεστής του Young σε κάθε στοιχείο. Η μεταξύ σχέση του συντελεστή σχετικής πυκνότητας υλικού ρ_e και του συντελεστή ελαστικότητας του Young του εκχωρημένου μοντέλου ιστροπικού υλικού E_0 για κάθε στοιχείο e προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο :

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



Ο συντελεστής ποινής (p) χρησιμοποιείται για τη μείωση της συνεισφοράς ακαμψίας από στοιχεία ενδιάμεσων πυκνοτήτων (γκρίζα στοιχεία). Αυτό οδηγεί σε μια λύση που τυπικά περιλαμβάνει είτε πλήρως συμπαγή μαύρα ($\rho_e = 1$) είτε κοίλα λευκά ($\rho_e = \rho_{min}$) στοιχεία. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών δοκιμών υποδηλώνουν ότι η καταλληλή τιμή του συντελεστή ποινής p είναι ίση με 3.

Η μείωση του μέτρου ελαστικότητας του στοιχείου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας των στοιχείων. Κατά τη μέθοδο SIMP, η συνολική δυσκαμψία προσαρμόζεται σύμφωνα με :

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

K_e : Μήτρα δυσκαμψίας στοιχείων

ρ_{min} : Ελάχιστη σχετική πυκνότητα

ρ_e : Σχετική πυκνότητα στοιχείου

p : Παράγοντας ποινής

N : Αριθμός στοιχείων στον τομέα σχεδίασης

Στόχος Μεγιστοποίησης Δυσκαμψίας

Ένας συχνά χρησιμοποιούμενος στόχος τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της ακαμψίας μιας κατασκευής ή η μείωση της ολκιμότητας της αφαιρώντας μέρος της μάζας της. Η ολκιμότητα είναι μια ένδειξη του πόσο εύπλαστο είναι ένα αντικείμενο ή υλικό και είναι το αντίθετο της ακαμψίας. Δείχνει πόσο μπορεί να λυγίσει μια κατασκευή χωρίς καμία αξιοσημείωτη αλλαγή στο σχήμα και το μέγεθός της. Η ποσότητα της ολκιμότητας είναι ισοδύναμη με το άθροισμα της ενέργειας παραμόρφωσης για κάθε στοιχείο. Ο στόχος για μεγιστοποίηση της συνολικής ακαμψίας μπορεί να επιτευχθεί ελαχιστοποιώντας τη συνολική ολκιμότητα, C . Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί μια επαναληπτική προσέγγιση για να εντοπίσει τις βέλτιστες πυκνότητες στοιχείων που θα ελαχιστοποιούσαν τη συνολική ολκιμότητα της δομής.

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

U_e : Διάνυσμα μετατόπισης στοιχείου e

K_e : Η δυσκαμψία στοιχείου e

ρ : Οι σχετικές πυκνότητες των στοιχείων ρ_e

Κάθε φορά που εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης, πρέπει να επιτυγχάνονται ορισμένα κριτήρια όπως η προδιαγραφή της μάζας στόχου, μια ικανοποιητική ισορροπία μεταξύ δύναμης και δυσκαμψίας και των απαραίτητων λειτουργικών συνθηκών.

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

V_e : Όγκος στοιχείων

M_{target} : Μάζα στόχος της βελτιστοποίησης

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

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

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

Ο προαναφερόμενος τύπος περιλαμβάνει ορισμένους περιορισμούς απόκρισης σχεδιασμού όπως περιορισμούς στις τάσεις, μετατοπίσεις, ιδιοσυχνότητες κ.λπ.

Ανάλυση Ευαισθησίας

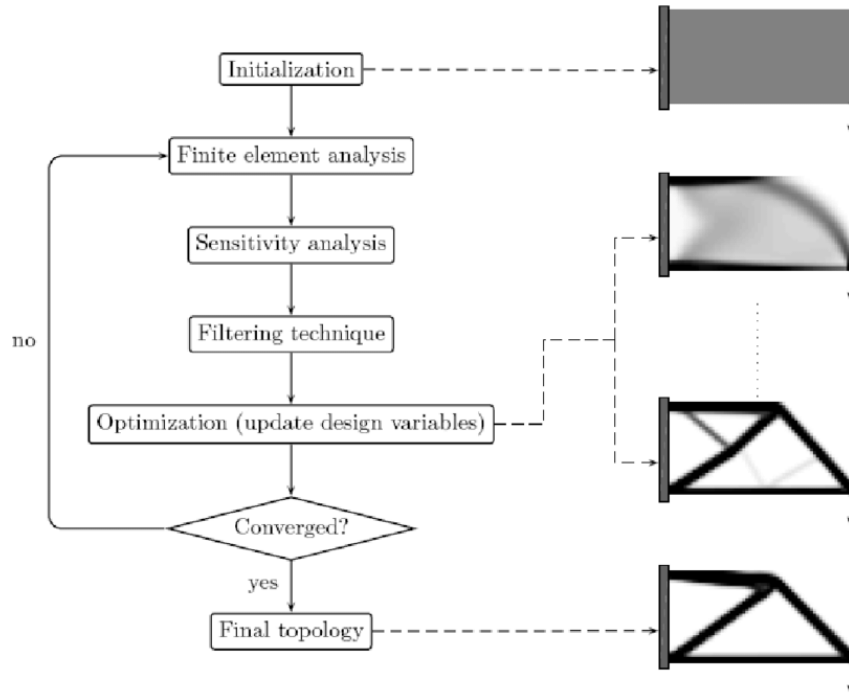
Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αξιολογεί συνεχώς την επίδραση των αλλαγών στην πυκνότητα του υλικού στα αποτελέσματα μεγιστοποίησης της ακαμψίας, μέσω μιας ανάλυσης ευαισθησίας, κατά τη διάρκεια κάθε βήματος της ακολουθίας του. Μαθηματικά, η ανάλυση ευαισθησίας είναι ο υπολογισμός της παραγώγου της συνάρτησης σε σχέση με τις πυκνότητες του υλικού.

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

Κατά τη διάρκεια μιας ανάλυσης ευαισθησίας, στοιχεία που διαθέτουν χαμηλούς συντελεστές πυκνότητας υλικού αφαιρούνται τελικά από τις επόμενες επαναλήψεις λόγω έλλειψης της δομικής τους υπόστασης.

Η αγνόηση της συνδεσιμότητας μεταξύ των στοιχείων κατά τον υπολογισμό ευαισθησίας για κάθε στοιχείο μπορεί να προκαλέσει την ασυνέχεια υλικού και μεμονωμένους όγκους που δεν είναι συνδεδεμένοι με την κύρια γεωμετρία, γεγονός που αναφέρεται ως φαινόμενο σκακιέρας. Με σκοπό τη μείωση του φαινομένου της σκακιέρας, ένα σύστημα φίλτρων χρησιμοποιεί μια ακτίνα επιρροής στοιχείου και φροντίζει ώστε κάθε στοιχείο εντός του εύρους του να ισορροπεί στο επίπεδο ευαισθησίας.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης συνεχίζεται έως ότου οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης συγκλίνουν και πληρούν τα καθορισμένα κριτήρια (Dassault Systemes, 2019).



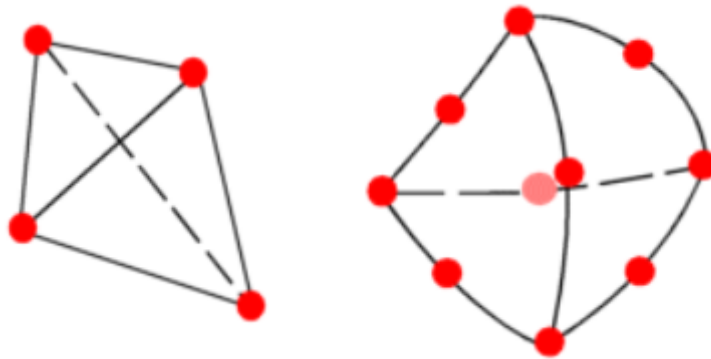
Εικόνα 6 : Γενικό σχήμα βελτιστοποίησης τοπολογίας με χρήση SIMP

Πλέγμα

Κατά την δικτύωση ενός εξαρτήματος ή ενός συγκροτήματος με συμπαγή στοιχεία, το λογισμικό δημιουργεί έναν από τους ακόλουθους τύπους στοιχείων με βάση τις επιλογές ενεργού πλέγματος για τη μελέτη:

- Draft quality mesh. Το αυτόματο πλέγμα δημιουργεί γραμμικά τετραεδρικά συμπαγή στοιχεία.
- High quality mesh. Το αυτόματο πλέγμα παράγει παραβολικά τετραεδρικά στερεά στοιχεία.

Τα γραμμικά στοιχεία ονομάζονται επίσης στοιχεία πρώτης τάξης ή κατώτερης τάξης. Τα παραβολικά στοιχεία ονομάζονται επίσης στοιχεία δεύτερης τάξης ή ανώτερης τάξης. Ένα γραμμικό τετραεδρικό στοιχείο ορίζεται από τέσσερις γωνιακούς κόμβους που συνδέονται με έξι ευθείες ακμές. Ένα παραβολικό τετραεδρικό στοιχείο ορίζεται από τέσσερις γωνιακούς κόμβους, έξι κόμβους μεσαίας πλευράς και έξι ακμές. Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν σχηματικά σχέδια γραμμικών και παραβολικών τετραεδρικών στερεών στοιχείων.

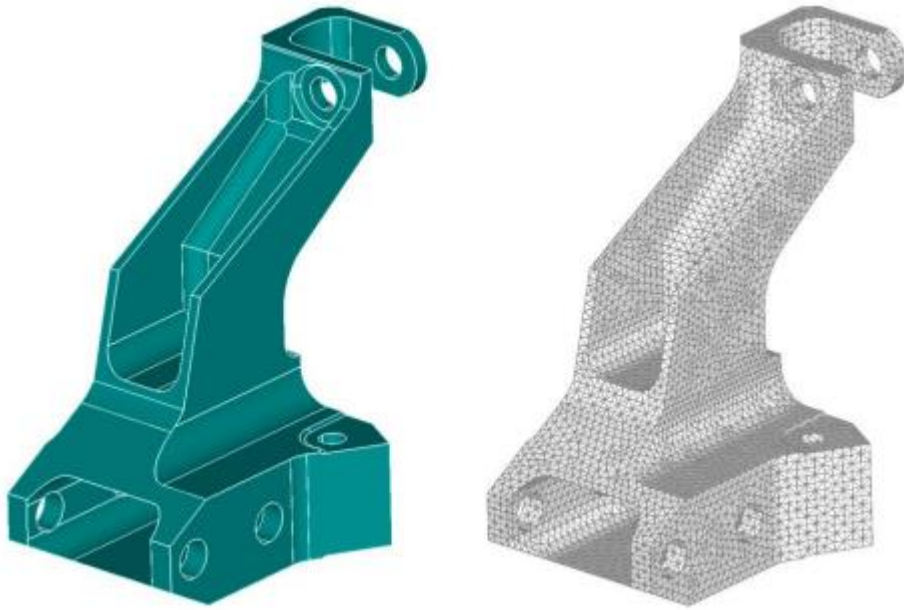


Εικόνα 7 : Αριστερά εικονίζεται το μοντέλο του γραμμικού στοιχείου και δεξιά του παραβολικού

Γενικά, για την ίδια πυκνότητα πλέγματος (αριθμός στοιχείων), τα παραβολικά στοιχεία αποδίδουν καλύτερα αποτελέσματα από τα γραμμικά στοιχεία επειδή:

- 1)** αντιπροσωπεύουν τα καμπύλα όρια με μεγαλύτερη ακρίβεια και
- 2)** παράγουν καλύτερες μαθηματικές προσεγγίσεις. Ωστόσο, τα παραβολικά στοιχεία απαιτούν μεγαλύτερους υπολογιστικούς πόρους από τα γραμμικά στοιχεία.

Για δομικά προβλήματα, κάθε κόμβος σε ένα συμπαγές στοιχείο έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας που αντιπροσωπεύουν τις μεταφράσεις σε τρεις ορθογώνιες κατευθύνσεις. Το λογισμικό χρησιμοποιεί τις κατευθύνσεις X, Y και Z του παγκόσμιου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων για τη διατύπωση του προβλήματος (Dassault Systemes, 2012).



Εικόνα 8 : Αριστερά εικονίζεται ένα σχέδιο cad και δεξιά το ίδιο πλεγματοποιημένο

ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ (CAD/CAE)

Τα λογισμικά CAD είναι εργαλεία τα οποία επιτρέπουν στον χρήστη την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων δίνοντας τους την δυνατότητα να μετατρέψουν μια αρχική για ένα εξάρτημα ή προϊόν σε τρισδιάστατο μοντέλο με γνώμονα τις πραγματικές του ιδιότητες όπως διαστάσεις, υλικό, μάζα κ.α.. Τρία από τα δημοφιλέστερα προγράμματα σχεδίασης και τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη των πειραμάτων είναι το Fusion 360, το Inventor και το Solidworks.

Inventor

Το Inventor είναι ένα προηγμένο και ισχυρό λογισμικό για μηχανικό σχεδιασμό το οποίο επίσης προέρχεται από την Autodesk. Επιτρέπει στον χρήστη την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων αλλά και προσομοιώσεων αυτών όπως στατικές μελέτες. Το Inventor είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό παραμετρικών, άμεσων, ελεύθερης μορφής και λειτουργιών σχεδίασης βάσει κανόνων και παρέχει στον χρήστη ενσωματωμένα εργαλεία για σχεδιασμό λαμαρίνας, πλαισίου, σωλήνων και ισχύος. Διαθέτει περισσότερα από 200 νέα χαρακτηριστικά και βελτιώσεις που είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τις ανάγκες βιομηχανικών μηχανημάτων και ηλεκτρονικών εφαρμογών. Λειτουργίες όπως εργαλεία δρομολόγησης και συγκολλήσεις έχουν προστεθεί σε αυτήν την ενημέρωση προκειμένου να βελτιωθούν σε αυτούς τους συγκεκριμένους τομείς εργασίας (Autodesk, n.d.).



Εικόνα 9 : Λόγγο προγράμματος Inventor (smartinwi.com)

Solidworks

Το Solidworks, από την Dassault Systèmes, είναι ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται κυρίως από επαγγελματίες μηχανικούς σχεδίασης. Το πρόγραμμα προσφέρει μια σειρά από χαρακτηριστικά, όπως εργαλεία επικύρωσης σχεδιασμού και αντίστροφη μηχανική. Παράγει πολύ ακριβή σχέδια που είναι εύκολο να αλλάξουν το μέγεθος. Χρησιμοποιεί επίσης διαστατική σκιαγράφιση, η οποία εξαλείφει την ανάγκη για μοντελοποίηση πολυγώνων. Επίσης διαθέτει μια ποικιλία χαρακτηριστικών που επιτρέπουν στους χρήστες να σχεδιάζουν, να προσομοιώνουν και να αναπτύσσουν εύκολα τα προϊόντα τους (Dassault Systemes, n.d.).



Εικόνα 10 : Λόγγο προγράμματος Solidworks (1000logos.net)

Fusion 360

Τέλος το Fusion 360 είναι μια πλατφόρμα λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης, από την εταιρεία Autodesk , με βάση το cloud service. Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη την σχεδίαση προϊόντων όπως και την μελέτη τους μέσα από μια πληθώρα λογισμικών CAE με όλη τους την δουλειά να αποθηκεύεται σε servers της amazon στους οποίους μπορούν να τρέξουν και μελέτες. Επίσης, στο Fusion 360 είναι δυνατή προγραμματισμός αρχείων μοντελοποίησης για την κατασκευή τους σε διάφορες μηχανές παραγωγής (CNC , Additive Manufacturing , Laser-cut) (Autodesk, n.d.).



Εικόνα 11 : Λόγγο προγράμματος Fusion 360 (autodesk.com)

ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία αναφέρεται επίσης ως προσθετική κατασκευή, είναι μια τεχνική κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων με την προσθήκη υλικού στρώμα προς στρώμα με βάση ένα σχέδιο που δημιουργείται από υπολογιστή. Η διαδικασία αυτή είναι προσθετική στη φύση της, όπου εναποτίθενται διαδοχικά στρώματα υλικού για να σχηματιστεί ένα πλήρες τρισδιάστατο εξάρτημα.

Τι είναι η προσθετική κατασκευή

Η προσθετική κατασκευή προβλέπει την κατασκευή ενός αντικειμένου στρώμα προς στρώμα, σε σύγκριση με την αφαιρετική κατασκευή, όπου ένα αντικείμενο κατασκευάζεται με την αφαίρεση υλικού από ένα στερεό μπλοκ μέχρι να επιτευχθεί το ζητούμενο σχήμα.

Με μια γενικότερη έννοια, η προσθετική κατασκευή καλύπτει διαδικασίες όπως η χύτευση, όπου κατασκευάζονται προϊόντα, ωστόσο συνήθως αναφέρεται στην 3D εκτύπωση.

Στη δεκαετία του 1980, η κατασκευή προσθετικών ειδών εφαρμόστηκε για πρώτη φορά για πρωτότυπα, αν και αυτά τα πρωτότυπα συχνά δεν είχαν καμία λειτουργικότητα. Η αποκαλούμενη ταχεία πρωτοτυποποίηση επέτρεψε την ταχεία κατασκευή μοντέλων κλίμακας χωρίς τον συνήθη χρόνο εγκατάστασης και το κόστος που συνδέεται με την κατασκευή πρωτοτύπων. Με την πρόοδο, η προσθετική κατασκευή επεκτάθηκε στην ταχεία κατασκευή εργαλείων για τη δημιουργία καλουπιών για τελικά προϊόντα. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, άρχισαν να αναδύονται λειτουργικά προϊόντα από την προσθετική κατασκευή. Πιο προσφάτως, μεγάλες εταιρείες όπως η Boeing και η General Electric ενέταξαν την προσθετική κατασκευή στις κυριότερες επιχειρηματικές δραστηριότητές τους (MIT Management, 2017).

Πως δουλεύει η προσθετική κατασκευή

Λογισμικό

Μόλις ο χρήστης αποκτήσει ή κατασκευάσει ένα ψηφιακό αρχείο CAD του εξαρτήματός του, θα προβεί στην εξαγωγή του σχεδίου σε μορφοποιημένο αρχείο .STL (Standard Tessellation Language). Αυτή η μορφή αρχείου, STL, κατέχει την ιδιότητα ενός παγκόσμιου βιομηχανικού προτύπου για την τρισδιάστατη εκτύπωση. Μέσα στο αρχείο STL, το εξάρτημα παρουσιάζεται ως στερεό σώμα, μια απεικόνιση που μπορεί να εκληφθεί από το λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης για τη λήψη των απαραίτητων οδηγιών εκτύπωσης.

Εν συνεχεία, ο χρήστης εισάγει το σχέδιο του εξαρτήματος με τη χρήση ενός αρχείου STL σε ένα εργαλείο λογισμικού που αποκαλείται προσθετικός "τεμαχιστής". Αυτός ο τεμαχιστής λογισμικού συνεκτιμά τις καθορισμένες διαμορφώσεις του εξαρτήματος και της εκτύπωσης του χρήστη. Στη συνέχεια, μετατρέπει το αρχείο STL σε ένα σύνολο ακριβών οδηγιών μηχανής κατάλληλων για τη λειτουργία του τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Υλικά

Σε διεργασίες όπως η κατεργασία, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι μια σαφώς καθορισμένη οντότητα. Ένα εξάρτημα ξεκινά ως ένα συμπαγές μπλοκ υλικού ή μπορεί να προέρχεται από σφυρηλάτηση ή χύτευση. Ενώ το σχήμα του μετασχηματίζεται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, τα εγγενή χαρακτηριστικά του υλικού του παραμένουν σταθερά.

Ωστόσο, στον τομέα της προσθετικής κατασκευής, ο καθορισμός των ιδιοτήτων του υλικού πραγματοποιείται ταυτόχρονα με τη δημιουργία της γεωμετρίας του εξαρτήματος. Η ακατέργαστη κατάσταση του υλικού έχει επίδραση στο αποτέλεσμα, συμπεριλαμβανομένων πτυχών όπως η χημική σύνθεση του πολυμερούς ή το μέγεθος και η διάταξη των σωματιδίων της μεταλλικής σκόνης. Εντούτοις, οι ίδιες οι παράμετροι της διαδικασίας συνεισφέρουν σε μεταβλητές όπως η αντοχή, η ολκιμότητα, το πορώδες και η επιφανειακή υφή του τελικού προϊόντος. Αυτό θέτει νέες προκλήσεις ειδικά για την προσθετική κατασκευή, αλλά ανοίγει επίσης πόρτες σε νέες δυνατότητες. Με τον συγχρονισμό των ιδιοτήτων του υλικού και του καθορισμού της γεωμετρίας, καθίσταται δυνατός ο εσκεμμένος και ακριβής έλεγχος αυτών των ιδιοτήτων σε διακριτές περιοχές του εξαρτήματος. Αυτό καθιστά ευκολότερη την εισαγωγή χαρακτηριστικών όπως το πορώδες, η ακαμψία ή η ευκαμψία σε στοχευμένες περιοχές του εξαρτήματος.

Κατηγορίες Προσθετικών Κατασκευών

Οι κύριες κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στην προσθετική κατασκευή περιλαμβάνουν:

Πολυμερή

Η καινοτόμα διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης, η στερεολιθογραφία, δημιουργήθηκε ως μια εκδοχή του πολυμερισμού δεξαμενής. Η τεχνική αυτή προβλέπει τη στερεοποίηση ρητίνης για την κατασκευή πολυμερών εξαρτημάτων. Παρόλο που τα πολυμερή παραμένουν μια διαδεδομένη κατηγορία υλικών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση, έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο από τις πρώτες, εύθραυστες επαναλήψεις τους. Η σύγχρονη τρισδιάστατη εκτύπωση πολυμερών περιλαμβάνει μια σειρά υλικών. Αξιόλογα μεταξύ αυτών είναι τα θερμοπλαστικά, όπως το PLA και το ABS, τα οποία κατά κόρον χρησιμοποιούνται σε συστήματα με νήματα. Ωστόσο, οι επιλογές υψηλής απόδοσης, όπως το PEEK και το PEKK, αποκτούν επίσης όλο και μεγαλύτερη έλξη σε αυτόν τον τομέα. Το νάιλον και το TPU έχουν βρει εφαρμογή σε διαδικασίες που βασίζονται στη σύντηξη σε κλίνη σκόνης. Τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά, που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται στον πολυμερισμό με δεξαμενή, εισέρχονται τώρα σε πεδία όπως η εξώθηση και η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ. Τα πολυμερή υλικά είναι διαθέσιμα σε διάφορες μορφές, όπως στερεά νήματα, σφαιρίδια, υγρές ρητίνες ή σκόνες.

Μέταλλα

Στον τομέα των μετάλλων, τα πιο δημοφιλή υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι το αλουμίνιο, το τιτάνιο, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το Inconel και το χρώμιο κοβαλτίου. Αν και στο παρελθόν ο χαλκός αποτελούσε πρόκληση για την τρισδιάστατη εκτύπωση με συστήματα που βασίζονται σε λέιζερ, εξελίξεις όπως τα λέιζερ μπλε φωτός έχουν υπερνικήσει αυτά τα εμπόδια, καθιστώντας τον χαλκό εκτυπώσιμο. Τα ανακλαστικά μέταλλα, όπως ο χαλκός, μπορεί να είναι ευκολότερα συμβατά με εναλλακτικές τεχνικές, όπως η εκτόξευση συνδετικού υλικού. Συγκεκριμένα, ένα κράμα κατάλληλο για μια συγκεκριμένη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης μετάλλων ενδέχεται να μην είναι εξίσου κατάλληλο για όλες τις μεθόδους του τομέα.

Τα μέταλλα που προορίζονται για την προσθετική κατασκευή είναι προσβάσιμα κυρίως με τη μορφή σύρματος ή σκόνης. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα ανάμειξης μετάλλων με άλλα υλικά. Τα αναδυόμενα συστήματα "δεσμευμένης εναπόθεσης μετάλλων" (BMD) περιλαμβάνουν νήματα ή ράβδους που περιλαμβάνουν μεταλλική σκόνη ενσωματωμένη σε πολυμερή μήτρα. Τα συστήματα αυτά παράγουν "πράσινα" εξαρτήματα, τα οποία στη συνέχεια αποκτούν τις τελικές τους διαστάσεις και τις μεταλλικές τους ιδιότητες με τη διαδικασία έψησης σε κλίβανο, παρόμοια με τις αρχές της χύτευσης με έγχυση μετάλλων (MIM). Η μεταλλική σκόνη δύναται εναλλακτικά να ενσωματωθεί σε ρητίνη ή να παραδίδεται σε μορφή πάστας για διεργασίες αυτής της φύσης.

Σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά που συνδυάζουν διαφορετικούς τύπους υλικών κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτά τα σύνθετα υλικά μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της ίδιας της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης ή να ξεκινήσουν με υλικά που έχουν ήδη ενσωματωθεί με πρόσθετα.

Τα πολυμερή που είναι ενισχυμένα με τεμαχισμένες ίνες άνθρακα και γυαλιού βρίσκουν διάφορες εφαρμογές, από καλούπια έγχυσης μικρής παραγωγής μέχρι σύνθετα εργαλεία διαστρωμάτωσης και ακόμη και εξαρτήματα για τελική χρήση. Αυτή η κατηγορία προσφέρει μια ενδιαμέση λύση μεταξύ ακατέργαστων πλαστικών και ακριβότερων μετάλλων. Μερικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές επιτρέπουν την ταυτόχρονη ή διακεκομμένη τοποθέτηση συνεχούς οπλισμού ινών ταυτόχρονα με την τρισδιάστατα εκτυπωμένη δομή, ενώ άλλοι ενσωματώνουν φύλλα ενισχυτικού υλικού που έχουν συγχωνευτεί με στρώματα πολυμερούς. Τα σύνθετα πολυμερή αυτής της φύσης δύνανται να καταφέρουν να επιτύχουν επίπεδα αντοχής που τα καθιστούν σε ορισμένα σενάρια υποκατάστατο των μετάλλων, συχνά συνοδεύονται από σημαντική μείωση του βάρους.

Κεραμικά

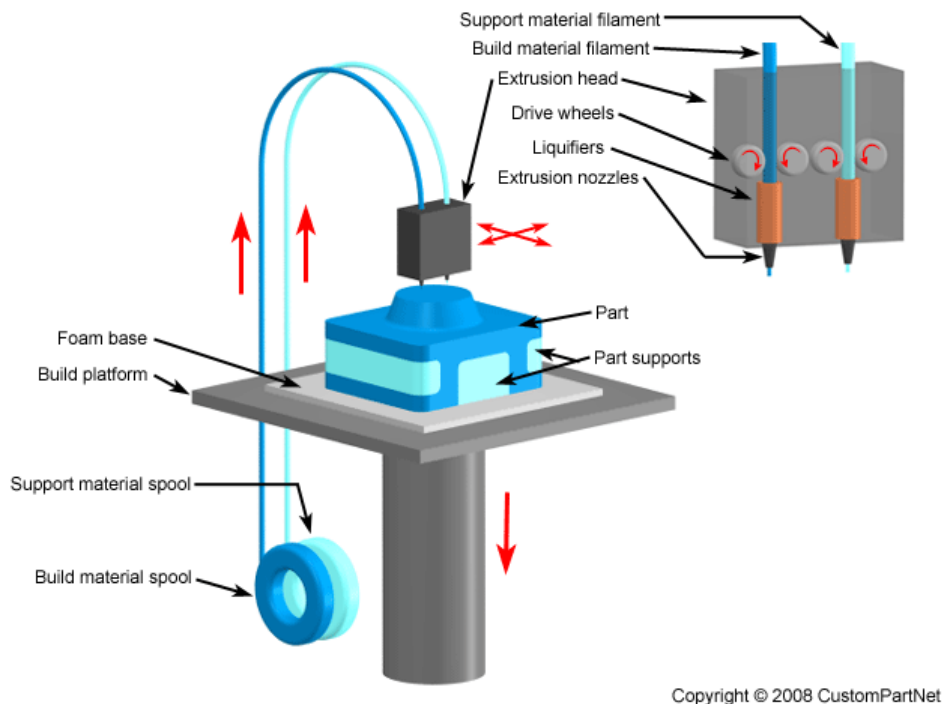
Τα κεραμικά θέτουν νέες δυσκολίες όσον αφορά τη χαμηλή απορρόφηση και τη συμβατότητά τους με συστήματα που βασίζονται σε λέιζερ. Εντούτοις, έχουν δημιουργηθεί εναλλακτικές λύσεις που βασίζονται σε τεχνικές εξώθησης, εκτόξευσης υλικού και φωτοπολυμερισμού για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια. Σε ορισμένες εφαρμογές, η διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνει τη χρήση ενός κεραμικού πολτού ή ενός μείγματος υλικών για την κατασκευή μιας προκαταρκτικής μορφής, γνωστής ως "πράσινο" τεμάχιο. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται μια διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης, παρόμοια με τη μέθοδο που περιγράφηκε προηγουμένως για την εναπόθεση δεσμευμένων μετάλλων, για την οριστικοποίηση του εξαρτήματος. (Additive Manufacturing, n.d.).

Τεχνολογίες Προσθετικών Κατασκευών

Οι τύποι της προσθετικής κατασκευής μπορούν να χωριστούν ανάλογα με το τι παράγουν ή με το είδος του υλικού που χρησιμοποιούν, αλλά για να εφαρμοστεί δομή στην τεχνολογία παγκοσμίως, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) τους χώρισε σε επτά γενικούς τύπους:

Fused Deposition Modelling

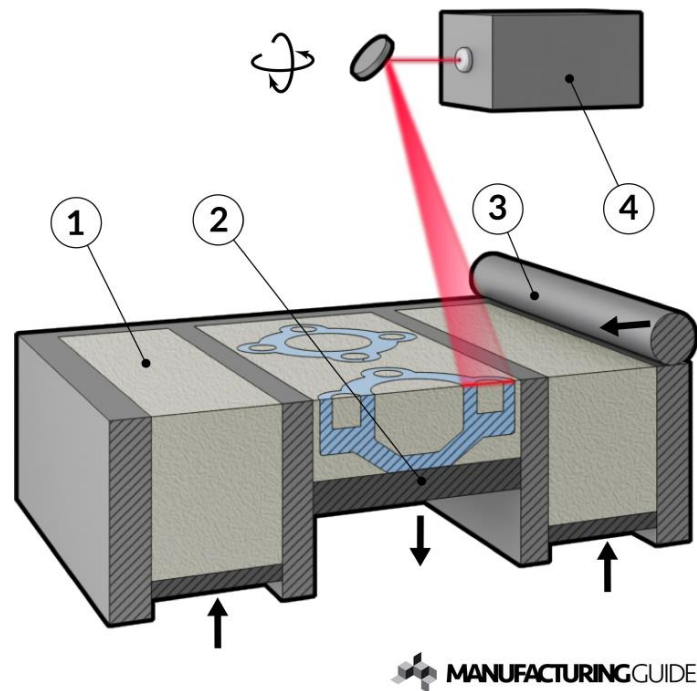
Η επικρατούσα τεχνολογία για την εξώθηση υλικών είναι γνωστή ως Fused Filament Fabrication (FFF), εναλλακτικά αναφερόμενη ως Fused Deposition Modeling (FDM), όρος που αποτελεί εμπορικό σήμα της Stratasys. Για τη λειτουργία του εκτυπωτή, ένα καρούλι νήματος εισάγεται και σπειρώνεται στην κεφαλή εξώθησης. Αφού φτάσει στην καθορισμένη θερμοκρασία, το ακροφύσιο του εκτυπωτή χρησιμοποιεί έναν κινητήρα για να ωθήσει το νήμα. Καθώς το υλικό ταξιδεύει μέσα από το θερμαινόμενο ακροφύσιο, υφίσταται τη διαδικασία τήξης. Στη συνέχεια, ο εκτυπωτής κινεί την κεφαλή εξώθησης για να εναποθέσει με ακρίβεια το λιωμένο υλικό σε μια συγκεκριμένη θέση. Μετά τη διανομή, το υλικό υφίσταται μια σταδιακή διαδικασία ψύξης και στερεοποίησης. Όταν ένα στρώμα σχηματιστεί πλήρως, η πλατφόρμα κατασκευής προχωρά προς τα κάτω, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία κατασκευής στρώματος προς στρώμα. Αυτή η τεχνική μπορεί να παρομοιαστεί με ένα εξαιρετικά ακριβές πιστόλι θερμής κόλλας (Plg Global, n.d.).



Εικόνα 12 : Fused Deposition Material (custompartnet.com)

Selective laser sintering

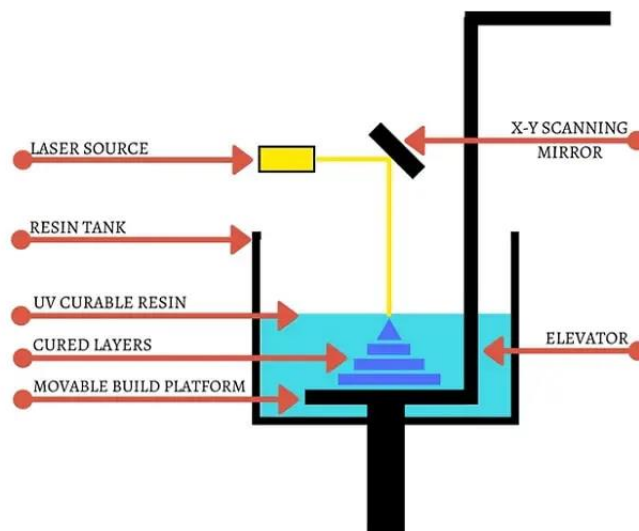
Η εκλεκτική πυροσυσσώματωση με λέιζερ (SLS) αντιπροσωπεύει μια τεχνική προσθετικής κατασκευής που κατατάσσεται στην οικογένεια της σύντηξης σε κλίνη σκόνης. Στην προσθετική κατασκευή SLS, ένα λέιζερ χρησιμοποιείται για την επιλεκτική σύντηξη σωματιδίων ενός κοκκώδους θερμοπλαστικού πολυμερούς, κατασκευάζοντας έτσι ένα τεμάχιο στρώμα προς στρώμα. Η μέθοδος αυτή προσφέρει πολυχρηστικότητα, ιδίως για όσους αναζητούν μια εναλλακτική λύση στη χύτευση με έγχυση, η οποία συνεπάγεται σημαντικά αρχικά έξοδα. Η SLS αποδεικνύεται μια οικονομικά αποδοτική επιλογή για την κατασκευή εξαιρετικών εξαρτημάτων σε μέτριες ποσότητες (κάτω των 1.000 μονάδων) για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός προϊόντος ή μιας τεχνολογίας πριν από την επένδυση σε δαπανηρά καλούπια και εργαλεία (MANUFACTURING GUIDE, n.d.).



Εικόνα 13 : Selective Laser Sintering (manufacturingguide.com)

Stereolithography

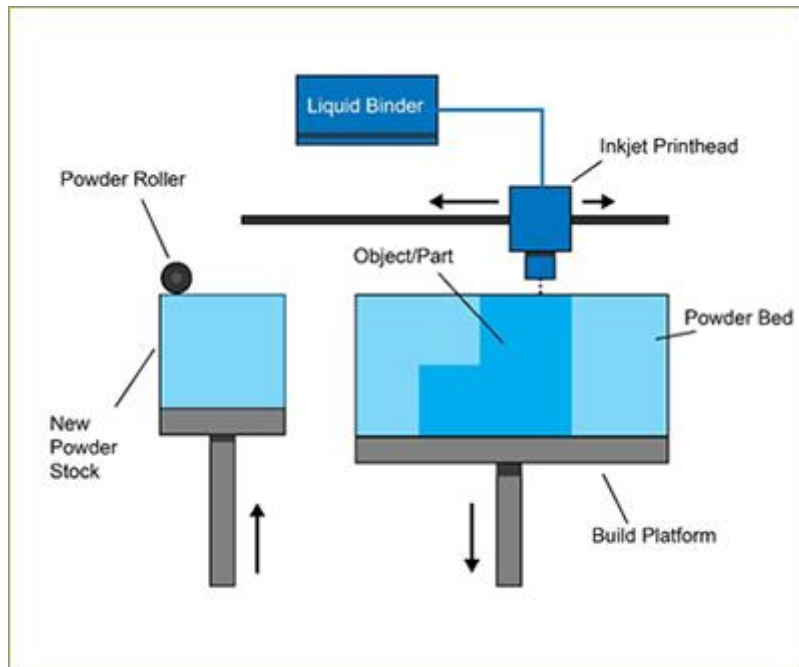
Η τεχνολογία γνωστή ως Στερεολιθογραφία (SLA) έχει αναγνωρισθεί ως η πρωτοποριακή μέθοδος για την προσθετική κατασκευή. Πήρε το όνομά της από τον Charles W. Hull, ο οποίος εφηύρε και κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αυτή την τεχνολογία το 1986. Ο Hull ίδρυσε επίσης την εταιρεία 3D Systems με στόχο την εμπορική αξιοποίηση της SLA. Η διαδικασία χρησιμοποιεί καθρέφτες, που αναφέρονται συγκεκριμένα ως γαλβανομέτρα ή γαλβος, τοποθετημένα τόσο στον άξονα x όσο και στον άξονα y. Αυτά τα κάτοπτρα προσαρμόζουν γρήγορα την τροχιά μιας δέσμης λέιζερ, επιτρέποντάς της να διασχίσει μια καθορισμένη περιοχή μέσα σε μια δεξαμενή. Καθώς το λέιζερ κινείται, σκληραίνει και στερεοποιεί τη ρητίνη. Κατά τη διαδικασία αυτή, το σχέδιο αποδομείται συστηματικά σε επιμέρους σημεία και γραμμές, τα οποία στη συνέχεια μεταφράζονται σε σύνολα συντεταγμένων για τα γαλβος. Τα λέιζερ στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούνται συνήθως από τις περισσότερες μηχανές SLA με σκοπό τη σκλήρυνση των εξαρτημάτων (Technology Student, 2019).



Εικόνα 14 : Stereolithography (manufactur3dmag.com)

Binder Jetting

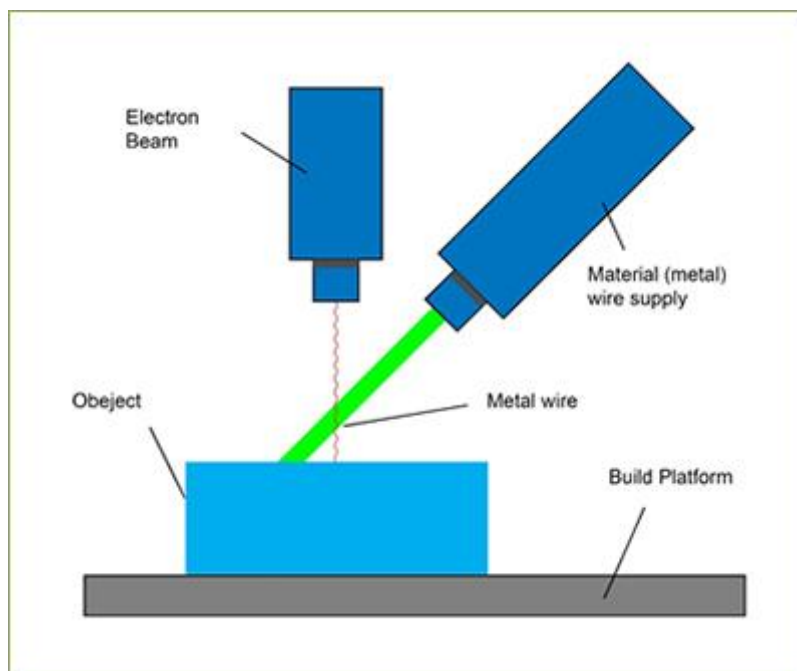
Η μέθοδος Binder Jetting χρησιμοποιεί μια παρόμοια μέθοδο εκτύπωσης με την SLS, όπου απαιτείται ένα αρχικό στρώμα σκόνης στην πλατφόρμα κατασκευής. Σε αντίθεση με την SLS, η οποία χρησιμοποιεί ένα λέιζερ για την πυροσυσσωμάτωση της σκόνης, η Binder Jetting χρησιμοποιεί μια κεφαλή εκτύπωσης που διασχίζει την επιφάνεια της σκόνης και εναποθέτει σταγονίδια συνδετικού υλικού (τυπικά με διάμετρο 80 μικρά). Αυτά τα σταγονίδια χρησιμεύουν για τη σύνδεση των σωματιδίων σκόνης μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι κάθε στρώμα του εξαρτήματος. Μετά την επιτυχή εκτύπωση ενός στρώματος, η κλίνη σκόνης χαμηλώνει και ένα νέο στρώμα σκόνης κατανέμεται ομοιόμορφα πάνω στο πρόσφατα εκτυπωμένο. Αυτή η διαδοχική διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς έως ότου προκύψει ένα πλήρως διαμορφωμένο και στερεό εξάρτημα. Στη συνέχεια, το εξάρτημα παραμένει εντός του περιβάλλοντος σκόνης για να υποστεί τη διαδικασία σκλήρυνσης προκειμένου να ενισχυθεί η αντοχή του. Στη συνέχεια, το εξάρτημα αποσπάται από την κλίνη σκόνης και τυχόν υπολείμματα μη δεσμευμένης σκόνης απομακρύνονται με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα (Loughborough University, n.d.).



Εικόνα 15 : Binder Jetting (lboro.ac.uk)

Direct Energy Deposition

Η κατευθυνόμενη ενεργειακή εναπόθεση (DED) είναι μια σύνθετη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιείται κυρίως για την επισκευή ή την προσθήκη υλικού σε υπάρχοντα εξαρτήματα, ιδίως σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η επιδιόρθωση κατεστραμμένων περυγίων τουρμπίνας ή προπέλας. Περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου με χρήση λογισμικού CAD, την τεμαχισμό του σε στρώματα και στη συνέχεια την εναπόθεση μεταλλικού υλικού μέσω ενός ακροφυσίου σε έναν βραχίονα πολλαπλών αξόνων (συνήθως 4 ή 5 αξόνων). Το μεταλλικό υλικό, που παρέχεται σε μορφή σκόνης ή σύρματος, λιώνει από μια πηγή θερμότητας, όπως λέιζερ, δέσμη ηλεκτρονίων ή τόξο πλάσματος, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εναπόθεσης. Αυτό συνεχίζεται στρώμα προς στρώμα έως ότου το αντικείμενο στερεοποιηθεί και δημιουργηθεί ή επισκευαστεί (Loughborough University, n.d.).

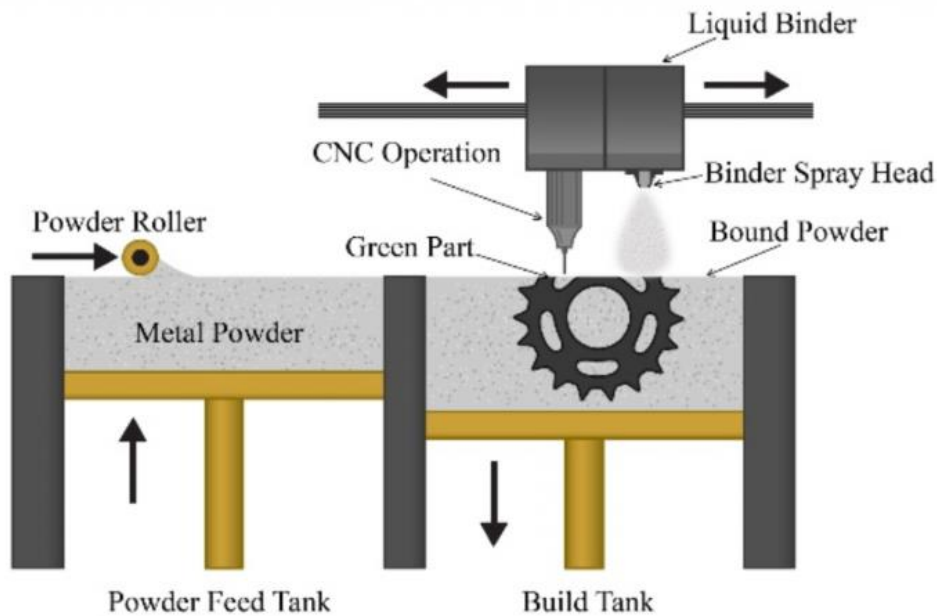


Εικόνα 16 : Direct Energy Deposition (lboro.ac.uk)

Material Jetting

Η εκτόξευση υλικού (Material Jetting), που μοιάζει με έναν δισδιάστατο εκτυπωτή inkjet, κατασκευάζει αντικείμενα εκτοξεύοντας υλικό σε μια πλατφόρμα κατασκευής με συνεχείς μεθόδους ή μεθόδους Drop on Demand (DOD). Το υλικό εναποτίθεται από ένα ακροφύσιο, το οποίο κινείται οριζόντια για να κατασκευάσει το μοντέλο στρώμα προς στρώμα στην επιφάνεια κατασκευής. Οι μηχανές διαφέρουν ως προς την πολυπλοκότητα και τον τρόπο με τον οποίο ελέγχουν την εναπόθεση υλικού. Τα στρώματα υλικού σκληρύνονται ή σκληραίνουν στη συνέχεια με τη χρήση υπεριώδους (UV) φωτός.

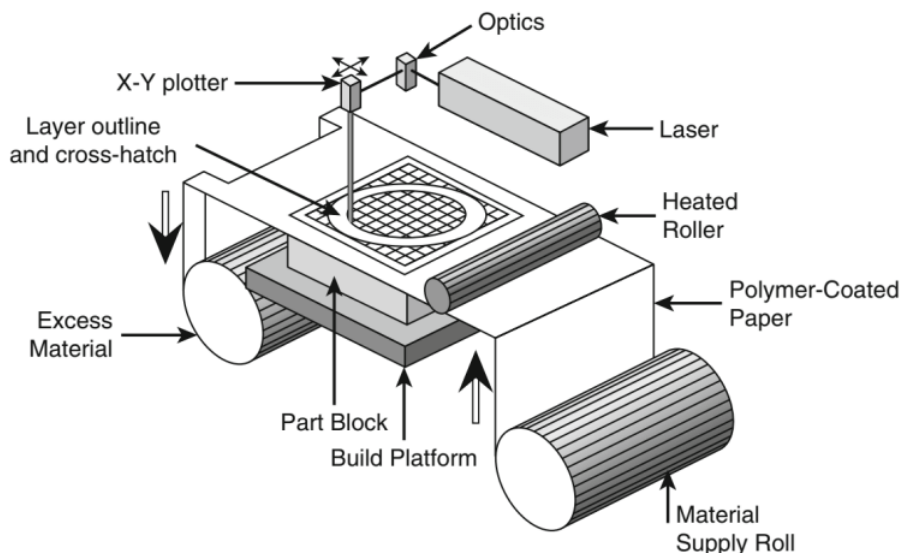
Δεδομένου ότι το υλικό πρέπει να εναποτίθεται σε σταγόνες, το φάσμα των διαθέσιμων υλικών είναι κάπως περιορισμένο. Τα πολυμερή και τα κεριά, λόγω της ιξώδους φύσης τους και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες, χρησιμοποιούνται συνήθως και είναι κατάλληλα για τη διαδικασία αυτή (Loughborough University, n.d.).



Εικόνα 17 : Material Jetting (amfg.ai)

Sheet Lamination

Οι διεργασίες πλαστικοποίησης φύλλων περιλαμβάνουν την πρόσθετη κατασκευή με υπερήχους (UAM) και την κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων (LOM). Στη διαδικασία της προσθετικής κατασκευής με υπερήχους, χρησιμοποιούνται μεταλλικά φύλλα ή ταινίες και ενώνονται μεταξύ τους μέσω της εφαρμογής συγκόλλησης με υπερήχους. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία, απαιτείται πρόσθετη κατεργασία CNC και η αφαίρεση μη δεσμευμένου μετάλλου, που συνήθως γίνεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία κατασκευής αντικειμένων με απανωτές στρώσεις (Laminated Object Manufacturing, LOM) χρησιμοποιεί μια παρόμοια τεχνική στρώμα προς στρώμα, αλλά χρησιμοποιεί χαρτί ως υλικό και κόλλα αντί για συγκόλληση. Η διαδικασία LOM εφαρμόζει μια μέθοδο εγκάρσιας χάραξης κατά τη διαδικασία εκτύπωσης για να επιτρέψει την εύκολη απομάκρυνση μετά την κατασκευή. Τα πλαστικοποιημένα αντικείμενα χρησιμεύουν συχνά για αισθητικά και οπτικά μοντέλα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δομική χρήση. Η UAM χρησιμοποιεί μέταλλα και περιλαμβάνει αλουμίνιο, χαλκό, ανοξείδωτο χάλυβα και τιτάνιο (Ultrasonic Additive Manufacturing Overview, 2014). Η διαδικασία είναι χαμηλής θερμοκρασίας και επιτρέπει τη δημιουργία εσωτερικών γεωμετριών. Η διαδικασία μπορεί να συνδέσει διαφορετικά υλικά και απαιτεί σχετικά λίγη ενέργεια, καθώς το μέταλλο δεν λιώνει (Engineering Product Design, n.d.).



Εικόνα 18 : Sheet Lamination (engineeringproductdesign.com)

ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Η δοκιμή καθαρής κάμψης είναι μια θεμελιώδης μηχανική δοκιμή που εκτελείται τόσο σε μεταλλικά όσο και σε μη μεταλλικά υλικά. Στη δοκιμή αυτή, η φορτισμένη δοκός υποβάλλεται σε ροπές κάμψης χωρίς αξονικά φορτία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τάσεις κάμψης, γνωστές και ως ορθές τάσεις κάμψης. Ο όρος "καθαρή" χρησιμοποιείται για να τονίσει την απουσία αξονικών φορτίων, εξασφαλίζοντας ότι η ανάπτυξη τάσεων οφείλεται αποκλειστικά σε καμπτικές ροπές.

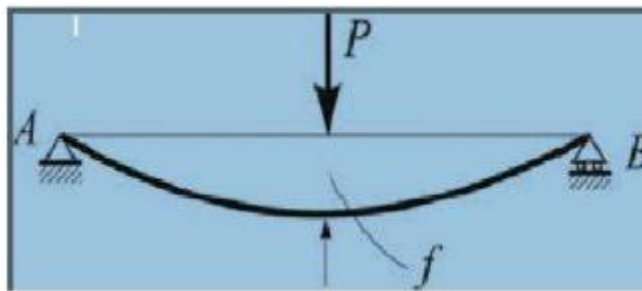
Η δοκιμή καθαρής κάμψης περιλαμβάνει την υποβολή μιας δοκού σε κάμψη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία τάσεων κάμψης κάθετα στον ουδέτερο άξονα. Οι τάσεις αυτές προέρχονται από την εσωτερική αντίσταση του υλικού στις εφαρμοζόμενες ροπές κάμψης, χωρίς να υπάρχουν αξονικά φορτία. Για να επιτευχθούν καθαρές συνθήκες κάμψης στη δοκό, πρέπει να πληρούνται ορισμένες απαιτήσεις:

$$\sum F_x = 0$$

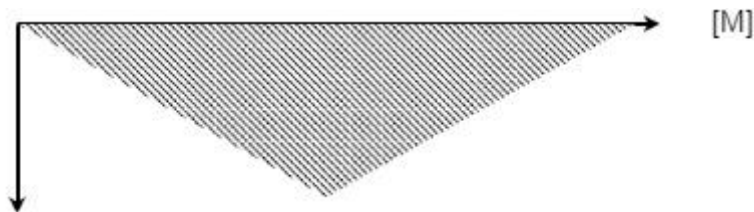
$$\sum F_y = 0$$

$$\sum M_k \neq 0$$

$$\sum M_t = 0$$



Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η δοκιμή της κάμψης τριών σημείων (3 point bending test), κατά την οποία η δοκός στηρίζεται αμφιέριστα ή ως αμφιπροέχουσα και φέρει στο μέσον της σημειακό φορτίο P. Κατά την ανωτέρω φόρτιση και από την επίλυση των στερεοστατικών εξισώσεων ισορροπίας καθώς και από τον προσδιορισμό και τον σχεδιασμό του διαγράμματος καμπτικών ροπών, προκύπτουν τα ακόλουθα:



$$M_{\max} = \frac{P \cdot L}{4}$$

Οι βασικές παραδοχές της καθαρής κάμψης είναι οι ακόλουθες:

1. Το ύψος h της διατομής της δοκού υπολείπεται του μισού του ανοίγματος A ($h < A/2$).
2. Υφίσταται ένας τουλάχιστον άξονας συμμετρίας.
3. Ο ουδέτερος άξονας της δοκού (διαμήκης), ο οποίος περνά από τα κέντρα βάρους των διατομών, είναι ευθύγραμμος κατά την αφόρτιστη κατάσταση της δοκού.
4. Τα εξωτερικά φορτία βρίσκονται κάθετα στον άξονα της δοκού και βρίσκονται στο επίπεδο φόρτισης είτε στο καμπύλο επίπεδο, το οποίο ταυτίζεται με το επίπεδο συμμετρίας της δοκού (διαφορετικά θα είχαμε μια σύνθετη κατάσταση).
5. Η δοκός είναι κατασκευασμένη από υλικό με το ίδιο μέτρο ελαστικότητας (E) σε εφελκυσμό και θλίψη και οι αναπτύσσουσες τάσεις είναι μικρότερες από το όριο αναλογίας του υλικού, οπότε ισχύει ο νόμος του Hooke.
6. Οι διατομές (διατομές κάθετα στον άξονα) παραμένουν επίπεδες όταν η δοκός είναι απαραμόρφωτη και παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον άξονα και μετά τη φόρτιση, ακόμα και όταν ο άξονας καμπυλώνεται (υπόθεση Bernoulli-Navier).

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας ήταν η εξής. Αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική μελέτη για την εύρεση επιστημονικών άρθρων σχετικά με την τοπολογική βελτιστοποίηση με κριτήριο την κατασκευασιμότητάς τους χρησιμοποιώντας τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.

Κάθε άρθρο επιστημονικής έρευνας βασίζεται σε συγκεκριμένες μεθόδους και προδιαγραφές για την εύλογη διεξαγωγή των πειραμάτων. Συνεπώς, στην προκειμένη περίπτωση, με βάση την παρούσα βιβλιογραφία θα προκύπτει ένα πρότυπο με βάση τις προδιαγραφές που ορίζουν τα διεθνή πρότυπα. Βάσει αυτών των προτύπων, τον εξοπλισμός και τις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου και με βάση την ανασκόπηση θα γίνει σχεδιασμός των πειραμάτων. Από τον σχεδιασμό αυτό και με βάση τα διεθνή πρότυπα θα προκύψουν οι μηχανικές και γεωμετρικές προδιαγραφές του δοκιμίου.

Έπειτα γίνεται εύρεση για λογισμικά βελτιστοποίησης τοπολογίας τα οποία θα γίνουν και οι απαραίτητες μελέτες, προωθώντας να επιτευχθούν παρόμοιες μελέτες μεταξύ των λογισμικών, για της ανάγκες της διπλωματικής εργασίας. Με τη ολοκλήρωση των μελετών θα γίνει η εξαγωγή των τελικών γεωμετριών σε STL αρχείο και στη συνέχεια η μετατροπή των αρχείων αυτών σε Geode, έτσι ώστε να βρίσκονται σε θέση προς εκτύπωση. Αφού γίνει η κατασκευή των δοκιμίων και γίνει ο απαραίτητος διαστασιολογικός έλεγχος, τα δοκίμια πρόκειται να υποστούν μηχανική καταπόνηση. Εφόσον ολοκληρωθούν τα πειράματα της μηχανικής καταπόνησης των δοκιμίων, συλλέγονται οι απαραίτητες μετρήσεις από τα αποτελέσματα των πειραμάτων και στη συνέχεια σχεδιάζονται τα καταλληλά διαγράμματα. Από τα διαγράμματα θα γίνει ο απαραίτητος σχολιασμός των αποτελεσμάτων και με βάση αυτών θα πραγματοποιηθεί συζήτηση για την εν λόγο διπλωματική εργασία και για τις μελλοντικές εφαρμογές που μπορούν να γίνουν βασισμένες σε αυτήν.

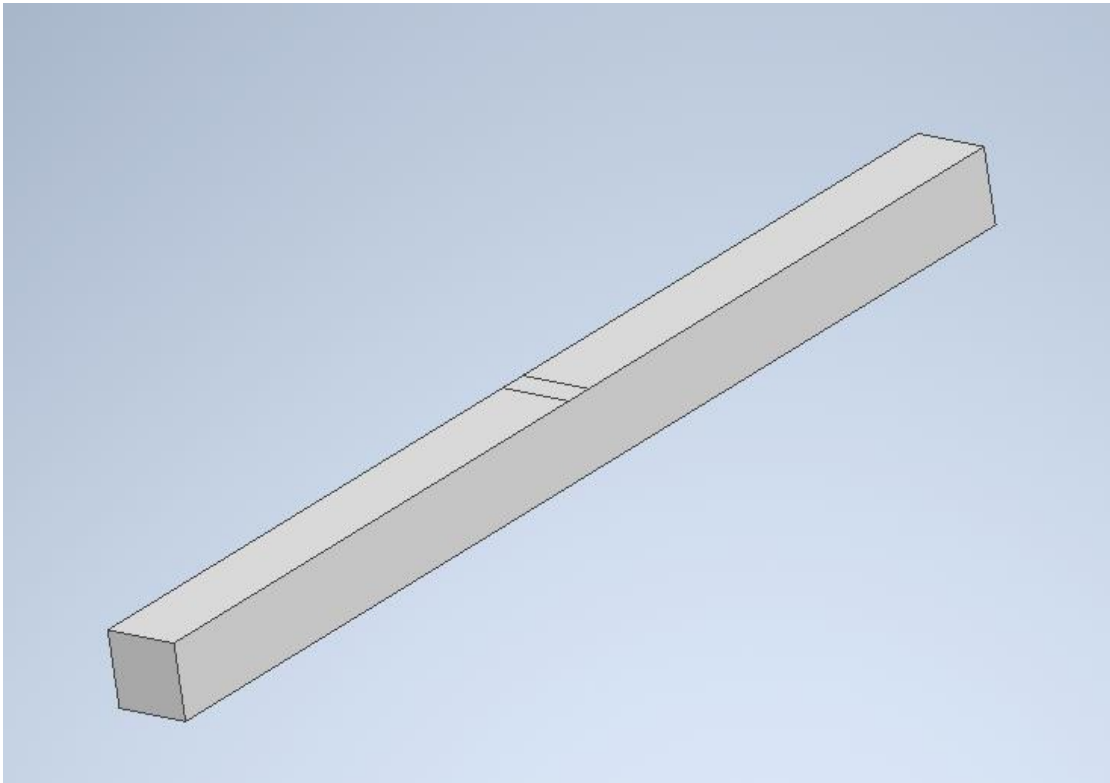
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Εξοπλισμός και διεξαγωγή πειραμάτων

Δοκίμιο

Μια από τις πιο κρίσιμες διαδικασίες του πειραματικού μέρους είναι η διαδικασία επιλογής δοκιμίου. Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας και για το πείραμα της δομικής κάμψης τριών σημείων, θα επιλεγθεί το πρότυπο ASTM-3039 το οποίο εφαρμόζεται για την εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας. Με βάση αυτό το πρότυπο θα σχεδιαστεί το δοκίμιο με το οποίο θα διεξαχθούν οι μελέτες τοπολογικής βελτιστοποίησης και στη συνέχεια τα πειράματα κάμψης.

Το δοκίμιο που επιλέχθηκε προς μελέτη τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι μια δοκός 8x8x120 mm.



Εικόνα 19 : Δοκός 8x8x120 mm σχεδιασμένη στο Inventor Professional 2023

Μηχανή Κάμψης

Για τα πειράματα κάμψης θα χρησιμοποιηθεί η μηχανή Instron 4411 η οποία έχει χωρητικότητα 5 kn (1125 lb) με εύρος ταχύτητας μεταξύ 0,5-500 mm/min.



Εικόνα 20 : Μηχανή Κάμψης Instron 441

Εκτυπωτής

Ο εκτυπωτής που θα επιλεγεί για την κατασκευή των δοκιμών είναι ο Ender 3 Pro της εταιρείας Creality. Πρόκειται για ένα από τα διασημότερα μοντέλα της εταιρείας και από τα πιο αξιόπιστα στην τιμή του.



Εικόνα 21 : Ender 3 Pro εκτυπωτής

Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι :

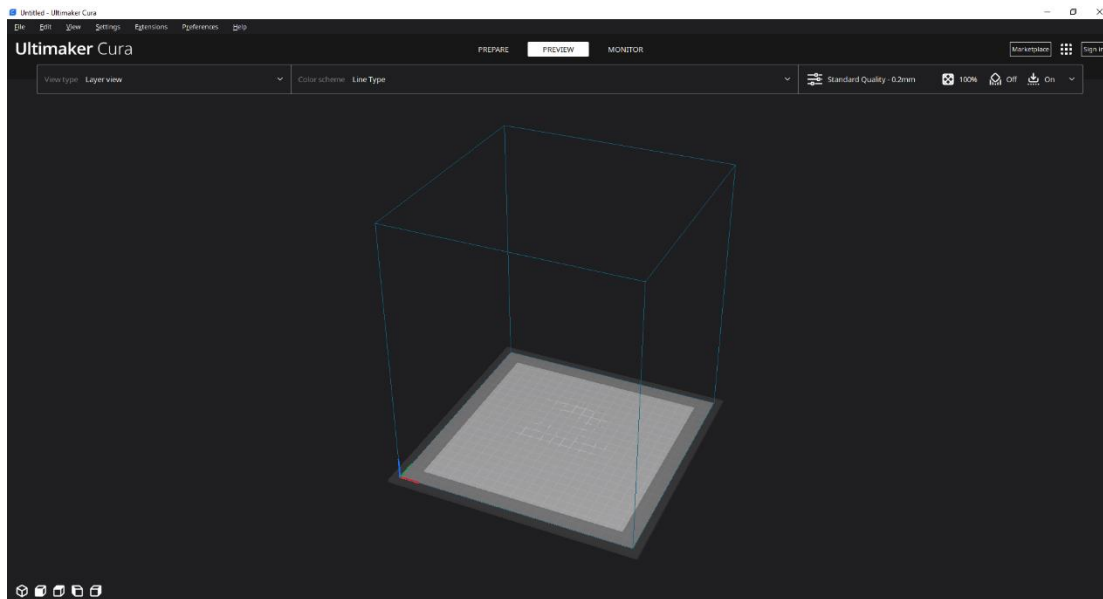
- Μέγεθος εκτύπωσης : 220x220x250 mm
- Διάμετρος ακροφυσίου : 0.4 mm
- Μέγιστη θερμοκρασία ακροφυσίου : 250 ° C
- Θερμοκρασία τράπεζας : ≤110°C

Slicer

Ο τεμαχιστής (slicer) είναι ένα πρόγραμμα που μετατρέπει τα ψηφιακά τρισδιάστατα μοντέλα σε οδηγίες εκτύπωσης για έναν συγκεκριμένο τρισδιάστατο εκτυπωτή για την κατασκευή ενός αντικειμένου. Εκτός από το ίδιο το μοντέλο, οι οδηγίες περιέχουν τις παραμέτρους τρισδιάστατης εκτύπωσης που εισάγει ο χρήστης, όπως το ύψος στρώματος, η ταχύτητα και οι ρυθμίσεις της δομής στήριξης.

Κάθε τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης δημιουργεί τρισδιάστατα αντικείμενα προσθέτοντας υλικό στρώμα προς στρώμα. Επομένως, το λογισμικό Slicer έχει το κατάλληλο όνομα, επειδή ουσιαστικά "κόβει" τα τρισδιάστατα μοντέλα σε πολλά οριζόντια 2D στρώματα που θα εκτυπωθούν αργότερα, ένα κάθε φορά.

Το Cura, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή του Gcode, είναι μια εφαρμογή φέτες ανοιχτού κώδικα για τρισδιάστατους εκτυπωτές. Δημιουργήθηκε από τον David Braam, ο οποίος αργότερα προσλήφθηκε από την Ultimaker, μια εταιρεία κατασκευής τρισδιάστατων εκτυπωτών, για να συντηρεί το λογισμικό. Το Cura είναι διαθέσιμο υπό την άδεια LGPLv3. Το Cura κυκλοφόρησε αρχικά υπό την έκδοση 3 της Affero General Public License ανοιχτού κώδικα, αλλά στις 28 Σεπτεμβρίου 2017 η άδεια άλλαξε σε LGPLv3. Αυτή η αλλαγή επέτρεψε μεγαλύτερη ενσωμάτωση με εφαρμογές CAD. Η ανάπτυξη φιλοξενείται στο GitHub. Είναι το προτιμώμενο λογισμικό τρισδιάστατης εκτύπωσης για τους τρισδιάστατους εκτυπωτές Ultimaker, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με άλλους εκτυπωτές όπως τον Ender 3 Pro ο οποίος είναι αυτός που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των δοκιμών.



Εικόνα 22 : Λογισμικό τεμαχιστή Ultimaker Cura

Υλικό

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για τις μελέτες αλλά και για τις εκτυπώσεις είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Το πολυγαλακτικό οξύ, γνωστό και ως PLA, είναι ένα θερμοπλαστικό μονομερές που προέρχεται από ανανεώσιμες, οργανικές πηγές όπως το άμυλο αραβοσίτου ή το ζαχαροκάλαμο. Η χρήση πόρων βιομάζας κάνει την παραγωγή PLA διαφορετική από τα περισσότερα πλαστικά, τα οποία παράγονται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων μέσω της απόσταξης και του πολυμερισμού του πετρελαίου.

Παρά τις διαφορές στην πρώτη ύλη, το PLA μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας τον ίδιο εξοπλισμό με τα πετροχημικά πλαστικά, καθιστώντας τις διαδικασίες παραγωγής PLA σχετικά αποδοτικές. Το PLA είναι το δεύτερο πιο παραγόμενο βιοπλαστικό (μετά το θερμοπλαστικό άμυλο) και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυαιθυλένιο (PE) ή το πολυστυρένιο (PS), καθώς και βιοαποικοδομήσιμο.

Παρακάτω παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του πολυγαλακτικού οξέος (PLA).

Αντοχή σε εφελκυσμό	(15.5–72.2)MPa
Αντοχή σε κάμψη	(52–115.1) MPa
Μέτρο εφελκυσμού	(2.020–3.550)GPa
Μέτρο κάμψης	(2.392–4.930)GPa
Επιμήκυνση κατά τη θραύση	(0.5–9.2)%

Η εκτύπωση θα γίνει χρησιμοποιώντας το CR-PLA της Creality. Η διάμετρος του νήματος είναι 1,75 mm και η θερμοκρασία τήξης κυμαίνεται από 195 – 220 °C.



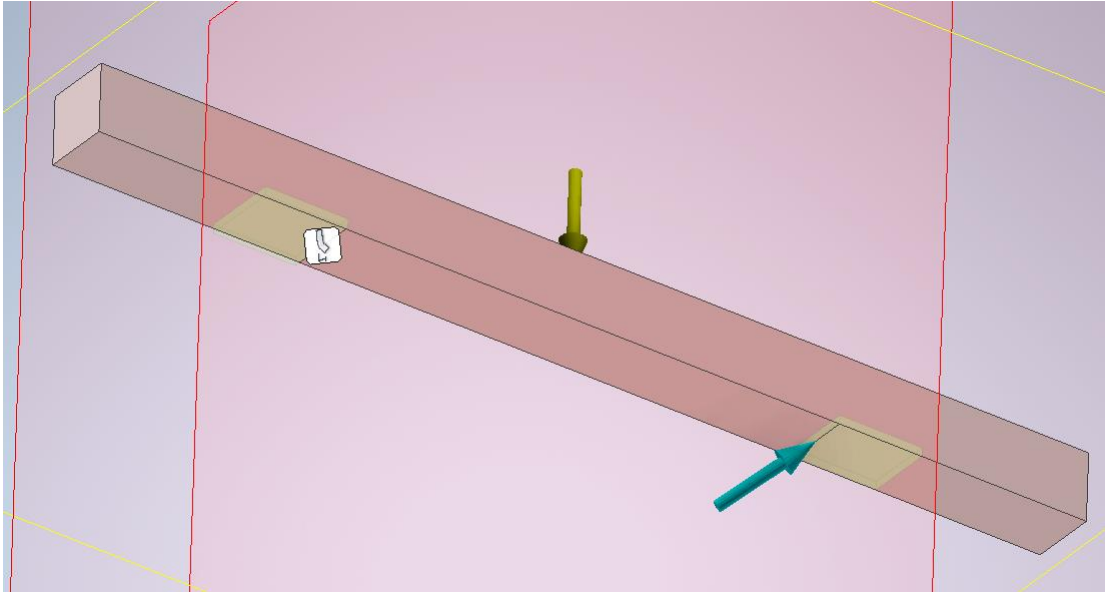
Εικόνα 23 : Creality CR-PLA Filament - 1.75mm 1kg Black (robotronics.com)

Παράμετροι Πειραμάτων

Για τις μελέτες στα λογισμικά CAE θα επιλεγθούν ορισμένες κοινές παράμετροι ώστε να είναι κατά το δυνατόν παραπλήσιες.

Επίπεδο συμμετρίας

Ένα επίπεδο συμμετρίας χρησιμοποιείται για να αναγκάσει τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία να είναι συμμετρική ως προς το καθορισμένο επίπεδο. Μπορούν να ενεργοποιηθούν έως και τρία επίπεδα συμμετρίας στο μοντέλο, καθένα από τα οποία βασίζεται στην ίδια όψη του μοντέλου. Για τις ανάγκες των μελετών χρησιμοποιήθηκαν, και στα τρία λογισμικά, δυο επίπεδα, το YZ και το ZX.



Εικόνα 24 : Με κόκκινα τα επίπεδα συμμετρίας στο Inventor Professional

Μείωση μάζας και μεγιστοποίηση δυσκαμψίας

Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, στόχος της βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι η μείωση της περιττής μάζας του εξαρτήματος. Για τις μελέτες θα επιλεγθεί η μείωση μάζας στην περίπτωση της δοκού με τα 80 mm απόσταση των περιορισμών να είναι 50% και η μείωση μάζας της δοκού με τα 60 mm να είναι 70%. Ταυτόχρονα θα τεθεί η δυσκαμψία των δοκιμίων να είναι μέγιστη με σκοπό να διατηρηθούν, όσο το δυνατόν γίνεται, οι αρχικές μηχανικές ιδιότητες της δοκού.

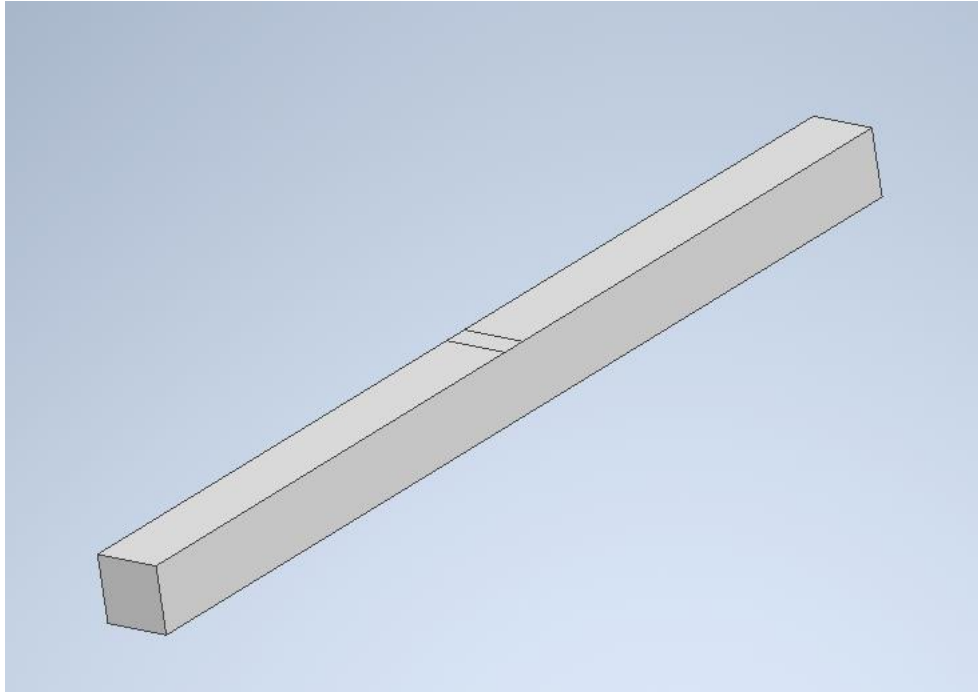
Hardware Υπολογιστή

Όλες οι μελέτες θα πραγματοποιηθούν στην ίδια υπολογιστική μονάδα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

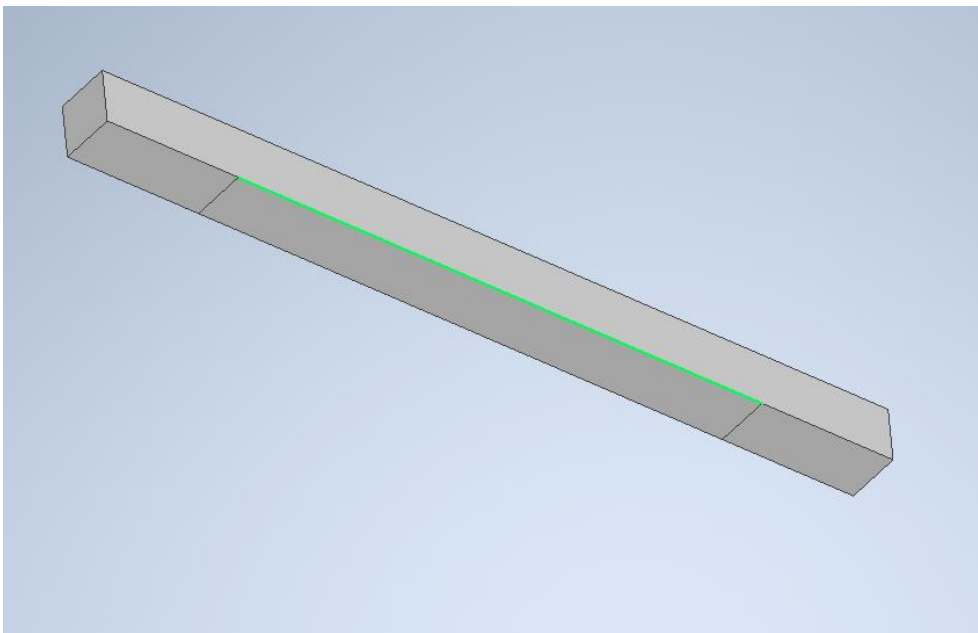
- Intel Core i5-7400 στα 3.00 GHz
- RAM 8GB
- SSD 124GB
- Nvidia 1050 2GB

Μελέτη Inventor

Αρχικά έγινε η μελέτη στο Inventor Professional 2023. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης το λογισμικό τυπολογικής βελτιστοποίησης ονομάζεται shape optimization. Το Inventor επιτρέπει την μελέτη μόνο σε ένα σώμα. Επομένως κατά την διάρκεια της σχεδίασης χρειάστηκε να σχεδιαστούν οι επιφάνειες όπου θα ασκηθούν οι δυνάμεις και οι περιορισμοί για την πραγματοποίηση της μελέτης.

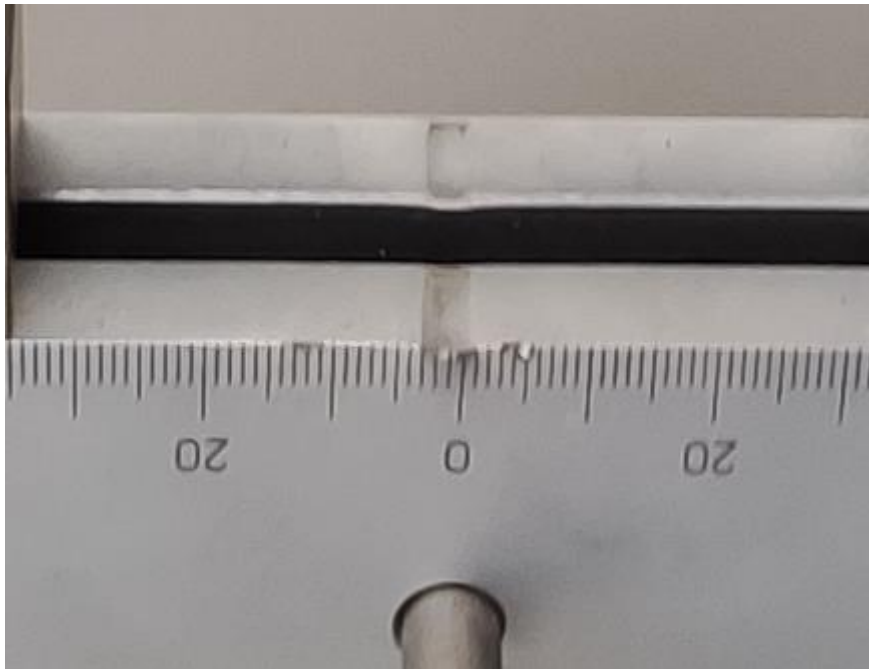


Εικόνα 25 : Άνω όψη της δοκού στο Inventor Professional 2023



Εικόνα 26 : Κάτω όψη της δοκού στο Inventor Professional 2023

Στην πάνω όψη η μικρή επιφάνεια στο κέντρο της δοκού έχει πλάτος 3 mm, όσο και το αποτύπωμα που έχει αφήνει η μηχανή κάμψης πάνω στον κεντρικό άξονα.



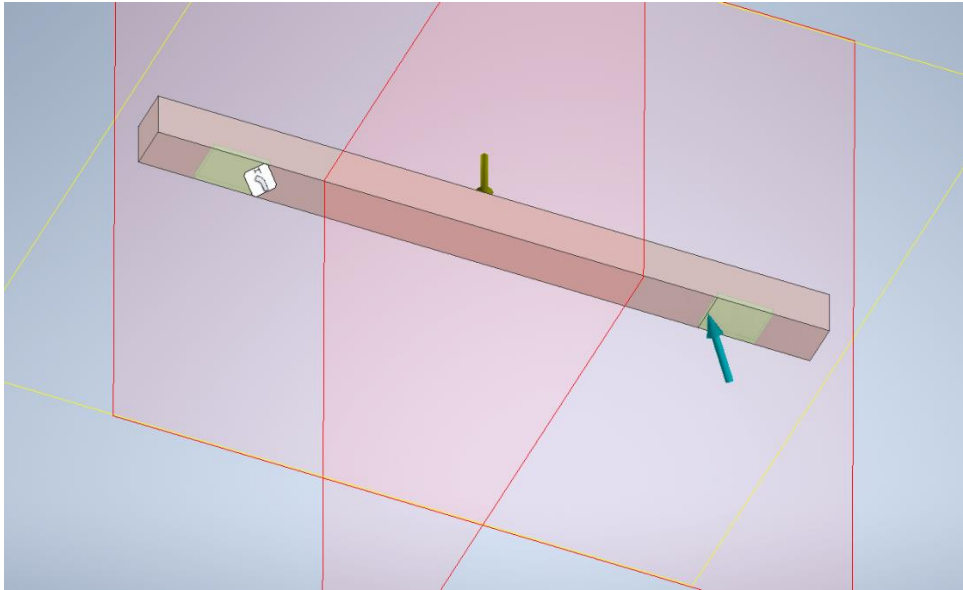
Εικόνα 27 : Αποτύπωμα μονάχης κάμψης

Έπειτα σχεδιάστηκαν δυο κάθετες γραμμές, απόστασης 80 mm, όπου θα τοποθετηθούν οι περιορισμοί.

Οι δυνάμεις, οι περιορισμοί και οι υπόλοιποι παράμετροι επιλέχθηκαν για τη δοκό όπως φαίνεται παρακατω:

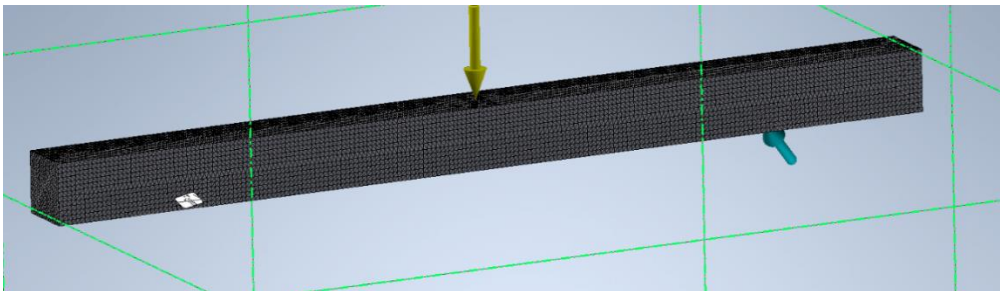
- Δύναμη κάθετα στην επιφάνεια στο άνω μέρος της δοκού
- Περιορισμοί: Πάκτωση στην αριστερή γραμμή και κύλιση ως προς τον άξονα παράλληλα της δοκού στην δεξιά γραμμή
- Υλικό PLA
- Επίπεδο συμμετρίας YZ,ZX
- Μείωση μάζας 50% για την δοκό των 80mm και 70% για αυτή των 60mm
- Μεγιστοποίηση δυσκαμψίας
- Διατήρηση γεωμετρίας δεξιά και αριστερά των γραμμών 10x8x1 mm

Η τιμή της δύναμης δεν έχει σημασία διότι στόχος του λογισμικού είναι η εύρεση της βέλτιστης δομικής γεωμετρίας της δοκού. Όσο αφορά τους περιορισμούς, στην αριστερή γραμμή επιλέχθηκε πάκτωση ενώ στην δεξιά κύλιση μόνο ως προς τον άξονα Z ο οποίος είναι παράλληλος της δοκού, με σκοπό να προσομοιωθεί το πείραμα της κάμψης των τριών σημείων στον λογισμικό. Τα πράσινα τετράγωνα είναι τα μέρη της δοκού όπου θα μείνουν άθικτα από τους υπολογισμούς της μελέτης με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα να γλιστρήσει η δοκός κατά την διάρκεια των πειραμάτων, με διαστάσεις 10x8x1 mm. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω τα επίπεδα συμμετρίας είναι τα YZ και ZX.



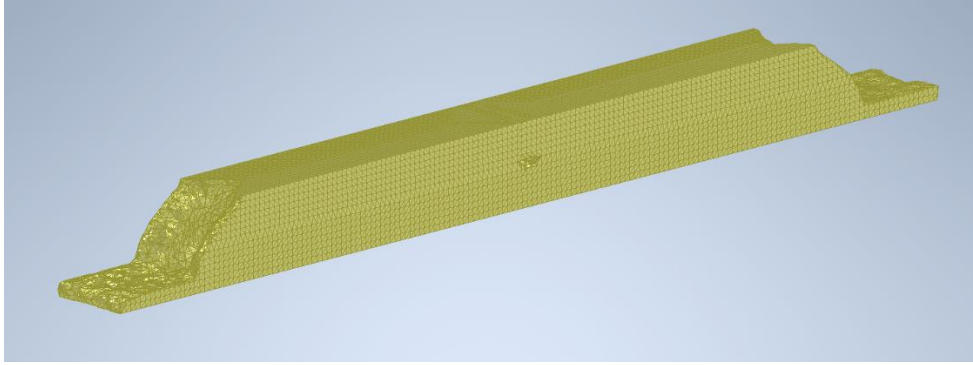
Εικόνα 28 : Παράμετροι μελέτης στον Inventor Professional 2023

Τελευταίο βήμα είναι η επιλογή πλέγματος για την δοκό. Στο Inventor δίνεται η μόνο η επιλογή του γραμμικού πλέγματος το οποίο όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος παράγει υποδεέστερης ποιότητας αποτελέσματα από το παραβολικό πλέγμα. Το μέγεθος του κάθε στοιχείου επιλέχθηκε 0,65 mm και ο αριθμός των στοιχείων είναι 184.780

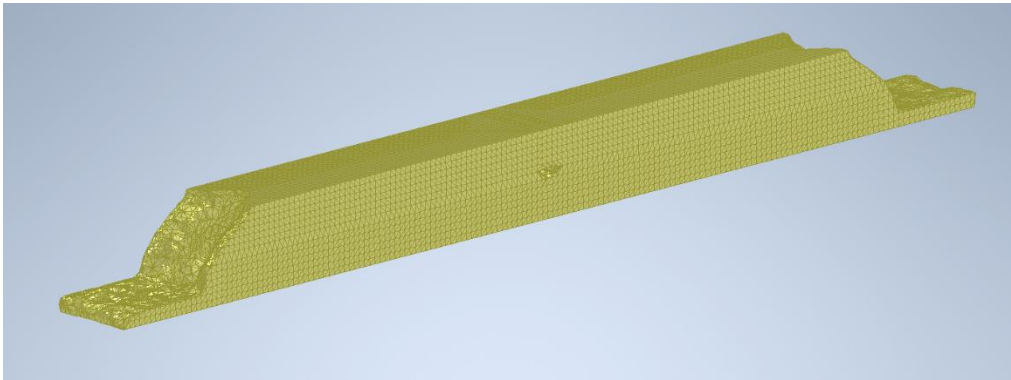


Εικόνα 29 : Πλέγμα δοκού στο Inventor Professional 2023

Οι ίδιες παράμετροι επιλέχθηκαν και για την περίπτωση των 60 mm με την μελέτη των 80 mm να ολοκληρώνεται μετά από 7 λεπτά και η μελέτη των 60 mm μετά από 11 λεπτά.



Εικόνα 30 : Γεωμετρία μελέτης 80 mm Inventor Professional 2023



Εικόνα 31 : Γεωμετρία μελέτης 60 mm Inventor Professional 2023

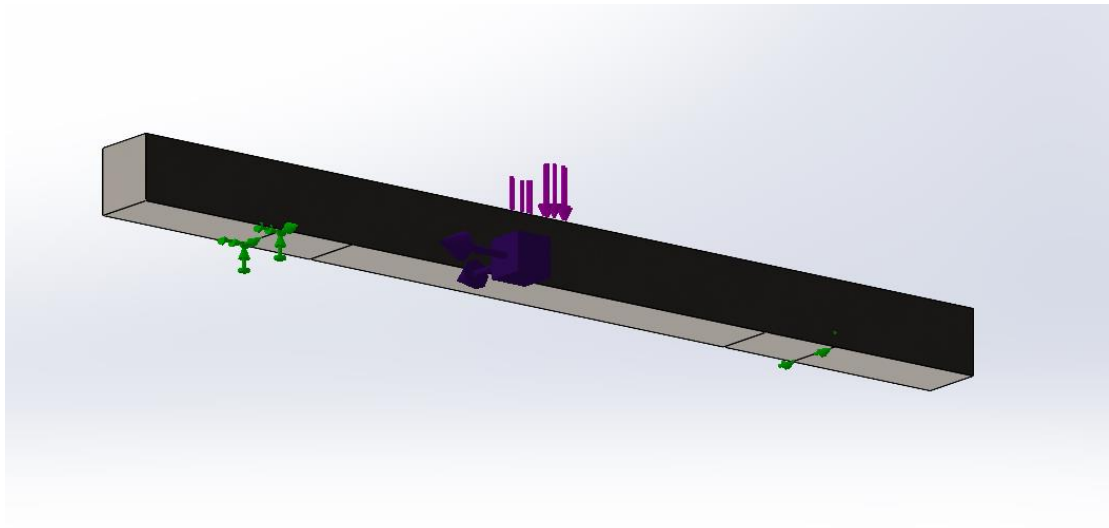
Οι μικρές διαφορές των τελικών γεωμετριών οφείλονται στον ίδιο λόγο για τον οποίο οι μελέτες διήρκησαν το μικρό χρονικό διάστημα. Το γραμμικό πλέγμα σε σχέση με το παραβολικό δεν έχει τις ίδιες απαιτήσεις υπολογιστής δύναμης με αποτέλεσμα οι μελέτες να διαρκούν λιγότερο, η οποία διαφορά θα φανεί παρακάτω στις μελέτες του Solidworks και του Fusion 360. Η τελική μάζα των δοκιμών είναι 5.3 γραμμάρια για την περίπτωση των 80mm και 3.1 για την περίπτωση των 60mm.

Μελέτη Solidworks

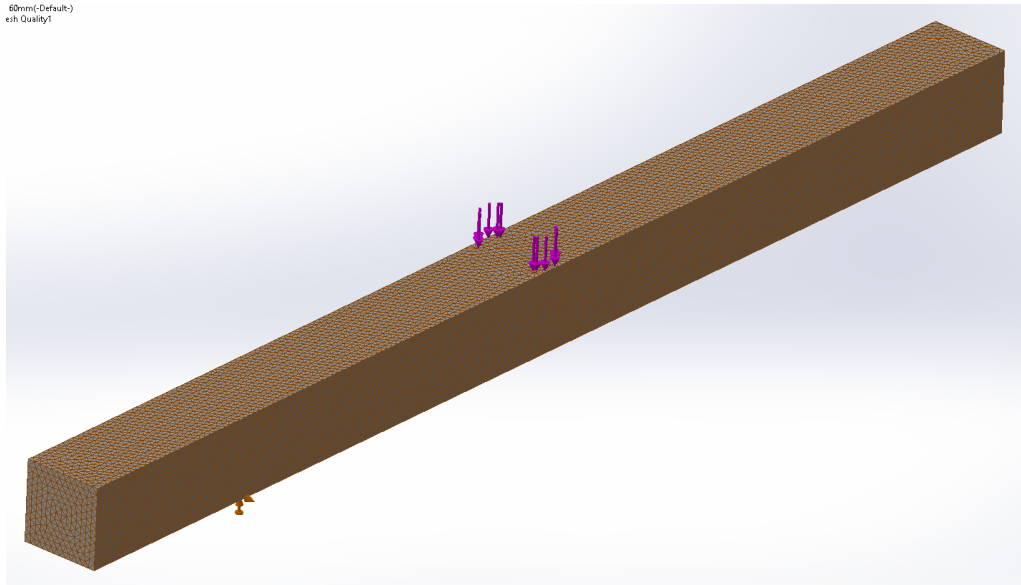
Έπειτα πραγματοποιήθηκε η μελέτη στο πρόγραμμα της Dassault Systèmes , Solidworks. Η διαδικασία είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθήθηκε για τις μελέτες του Inventor. Τόσο η σχεδίαση αλλά και οι παράμετροι είναι ίδιες.

Πιο αναλυτικά :

- Δύναμη κάθετα στην επιφάνεια στο άνω μέρος της δοκού
- Περιορισμοί: Πάκτωση στην αριστερή γραμμή και κύλιση ως προς τον άξονα παράλληλα της δοκού στην δεξιά γραμμή.
- Υλικό PLA
- Επίπεδο συμμετρίας YZ,ZX
- Μείωση μάζας 50% για την δοκό των 80mm και 70% για αυτή των 60mm
- Μεγιστοποίηση δυσκαμψίας
- Διατήρηση γεωμετρίας δεξιά και αριστερά των γραμμών 10x8x1 mm



Εικόνα 32 : Παράμετροι μελέτης στον Solidworks 2022

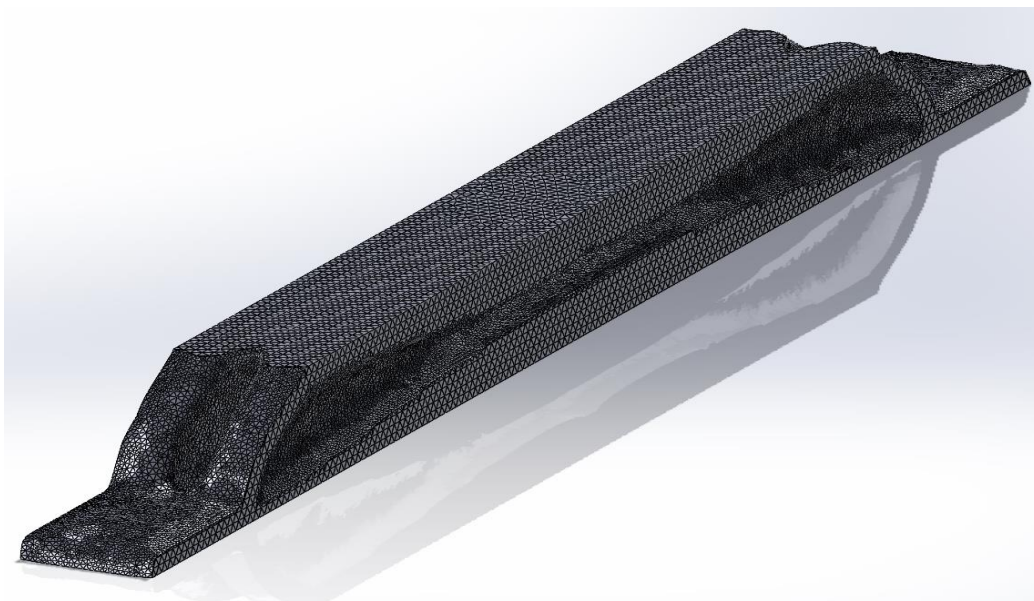


Εικόνα 33 : Πλέγμα δοκού στο Solidworks 2022

Η διαφοροποίηση με το σχέδιο του Inventor είναι ότι η δοκός που σχεδιάστηκε στο Solidworks έχει τις ακμές για τους περιορισμούς τόσο για την περίπτωση των 80 mm όσο και για την περίπτωση των 60 mm για την εξοικονόμηση χρόνου.

Για την πλεγματοποίηση της δοκού, στο λογισμικό του Solidworks 2022 υπάρχει η επιλογή mixed. Η Dassault Systèmes προγραμμάτισε ένα είδος πλέγματος κατά το οποίο οι εξωτερικές επιφάνειες επικαλύπτονται με γραμμικό πλέγμα ενώ οι εσωτερικές με παραβολικό. Το μέγεθος του κάθε στοιχείου στα 0,65 mm παρήγαγε 199.223 στοιχεία σε όλη την δοκό.

Οι ίδιες παράμετροι επιλέχθηκαν και για την περίπτωση των 60 mm με την μελέτη των 80 mm να ολοκληρώνεται μετά από 26 λεπτά και η μελέτη των 60 mm μετά από 34 λεπτά.



Εικόνα 34 : Γεωμετρία μελέτης 80 mm Solidworks 2022



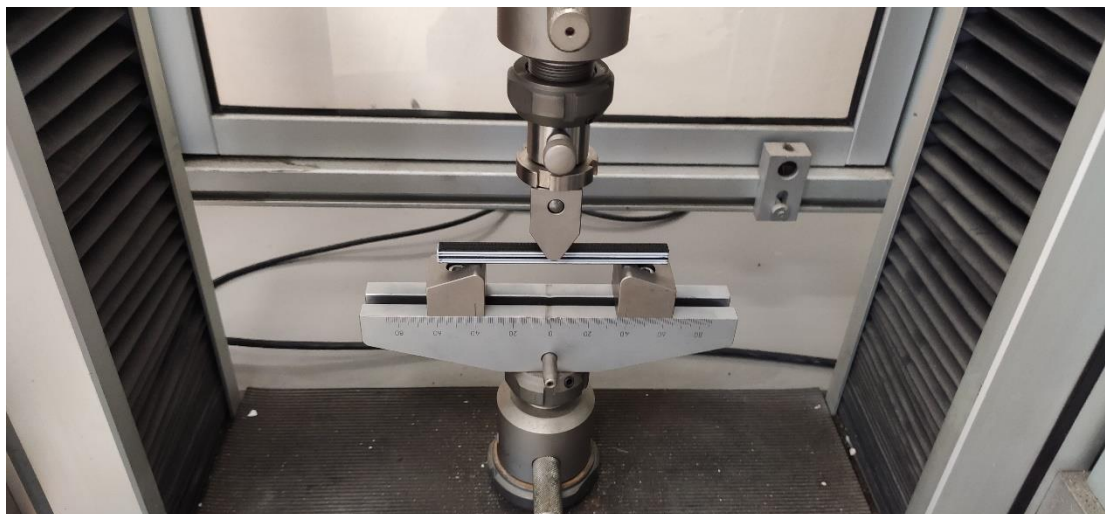
Εικόνα 35 : Γεωμετρία μελέτης 60 mm Solidworks 2022

Η τελική μάζα των δοκιμών είναι 5 γραμμάρια για την περίπτωση των 80mm και 3 γραμμάρια για την περίπτωση των 60mm.

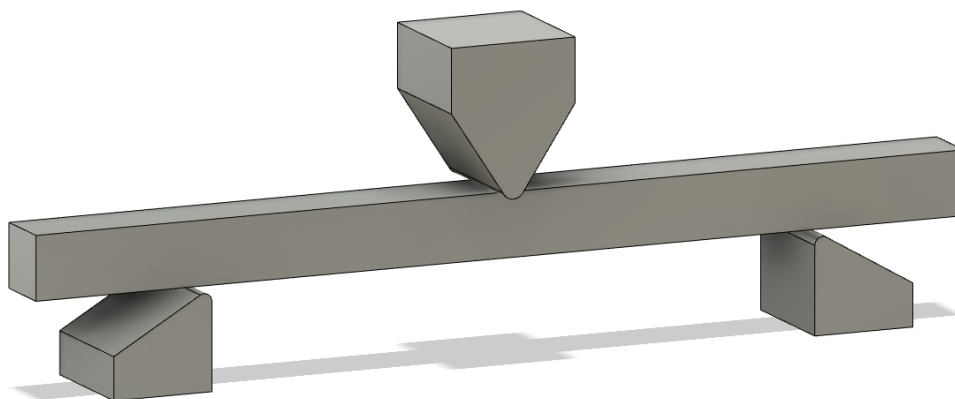
Μελέτη Fusion 360

Τέλος γίνεται η μελέτη στο Fusion 360. Στο Fusion 360 δίνεται η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί η μελέτη με περισσότερα από ένα σώματα. Αρχικά σχεδιαστικέ η δοκός

και τα βασικά εξαρτήματα από την μηχανής κάμψης του πανεπιστήμιου. Πάρθηκαν οι απαραίτητες διαστάσεις με σκοπό την λεπτομερή σχεδίαση της μηχανής και η δοκός σχεδιάστηκε εφαπτομενικά των καμπυλών της μηχανής όπως φαίνεται παρακάτω.

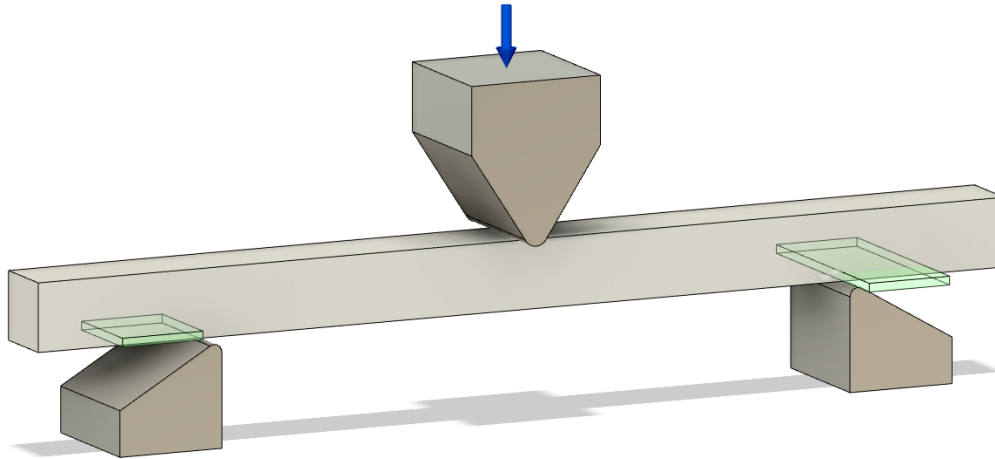


Εικόνα 36 : Μηχανή κάμψης τριών σημείων στο πανεπιστήμιο δυτικής αττικής.



Εικόνα 37 : Σχέδιο μηχανής κάμψης και δοκούς στα 80 mm

Έπειτα επιλέχθηκε η δοκός ως σώμα προς μελέτη για τυπολογική βελτιστοποίηση. Το επόμενο βήμα ήταν να επιλεχθούν τα υλικά για κάθε σώμα. Για την δοκό επιλέχθηκε το υλικό με το οποίο θα γίνει η εκτύπωση και για τα μέρη της μηχανής κάμψης επιλέχθηκε τιτάνιο.



Εικόνα 38 : Σχέδιο μηχανής κάμψης και δοκού

Η δύναμη επιλέχθηκε στο ανώτερο μέρος στο πάνω τριγωνικό σχέδιο και οι περιορισμοί στις καμπύλες των δυο κάτω τριγωνικών σχεδίων. Η τιμή της δύναμης δεν έχει σημασία διότι στόχος του λογισμικού είναι η εύρεση της βέλτιστης δομικής γεωμετρίας της δοκού. Όσο αφορά τους περιορισμούς, στην αριστερή καμπύλη επιλέχθηκε πάκτωση ενώ στην δεξιά κύλιση μόνο ως προς τον άξονα Z ο οποίος είναι παράλληλος της δοκού. Οι επαφές μεταξύ των επιφανειών είναι οι έξεις:

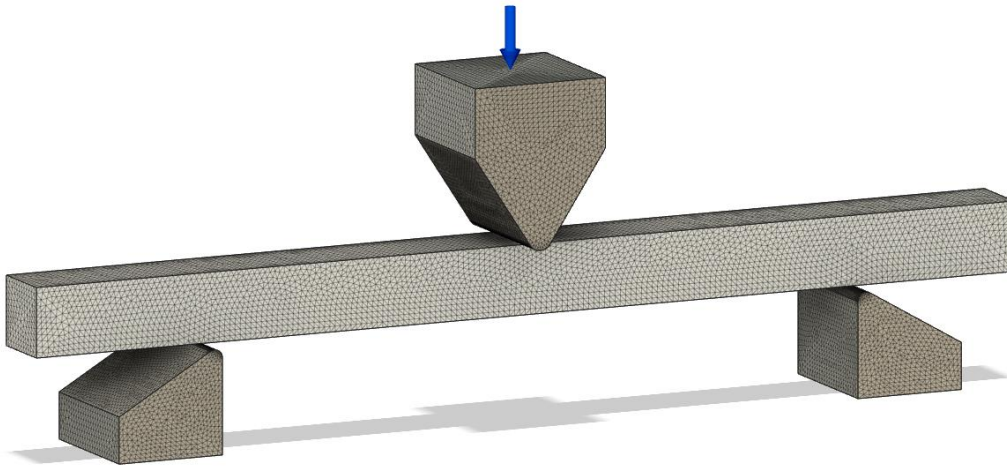
Contact Set	Contact Type	Penetration Type	Bodies	Entities
> Bonded3	Bonded	Symmetric		
> Rough1	Rough	Symmetric		
> Rough2	Rough	Symmetric		

Εικόνα 39 : Επαφές μεταξύ των επιφανειών

Η ένδειξη 'Bonded' δηλώνει πως οι επιφάνειες δεν μπορούν να αποκολληθούν ή να κυλίσουν ενώ η ένδειξη 'Rough' επιτρέπει μόνο την κύλιση. Τα πράσινα τετράγωνα είναι τα μέρη της δοκού όπου θα μείνουν άθικτα από τους υπολογισμούς της μελέτης με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα να γλιστρήσει η δοκός κατά την διάρκεια των πειραμάτων, με διαστάσεις 10x8x1 mm. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω τα επίπεδα συμμετρίας είναι τα YZ και ZX.

Ως τελευταίο βήμα έμεινε η πλεγματοποίηση του σχεδίου. Για το πλέγμα επιλέχθηκε το μέγεθος κάθε στοιχείου να είναι 0,65 mm και παραβολικό. Με αυτές τις παραμέτρους επιτευχθεί ένα πυκνό πλέγμα το οποίο είναι υπεύθυνο για μια ομοιόμορφη και αποδεκτή κατανομή στοιχείων σε όλο το σχέδιο με σκοπό την παραγωγή ακριβέστερων

αποτελεσμάτων. Τα συνολικά στοιχεία είναι 441.589 με την δοκό να αποτελείται από 196.836 στοιχεία.



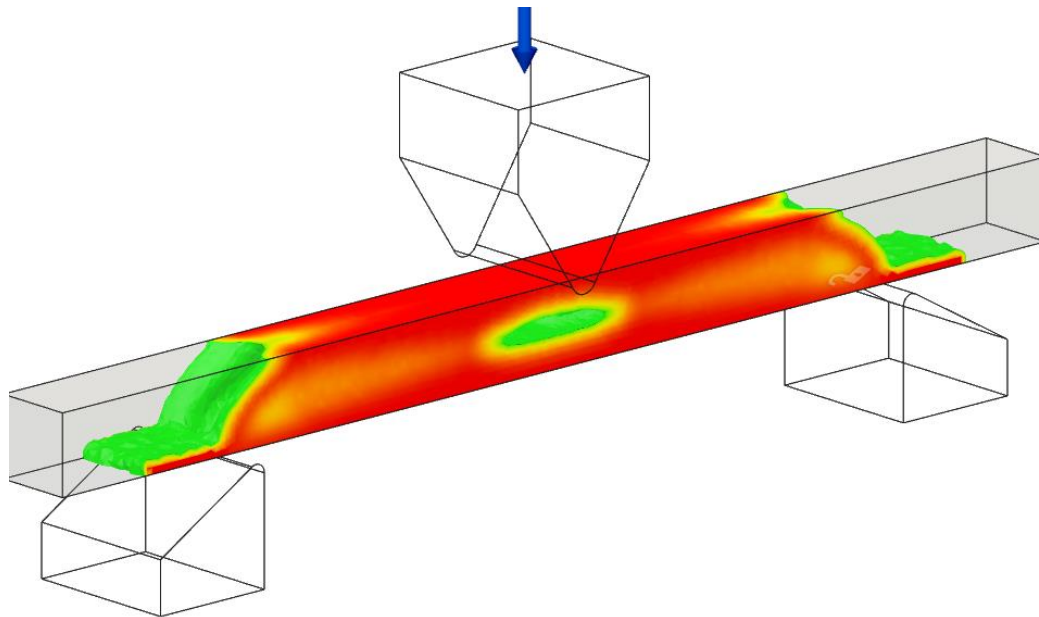
Εικόνα 40 : Πλέγμα σχεδίου στο Fusion 360

Οι ίδιες παράμετροι επιλέχθηκαν τόσο για τη μελέτη των 80mm όσο και για αυτή των 60 mm, απόσταση μεταξύ των κάτω τριγωνικών βάσεων.

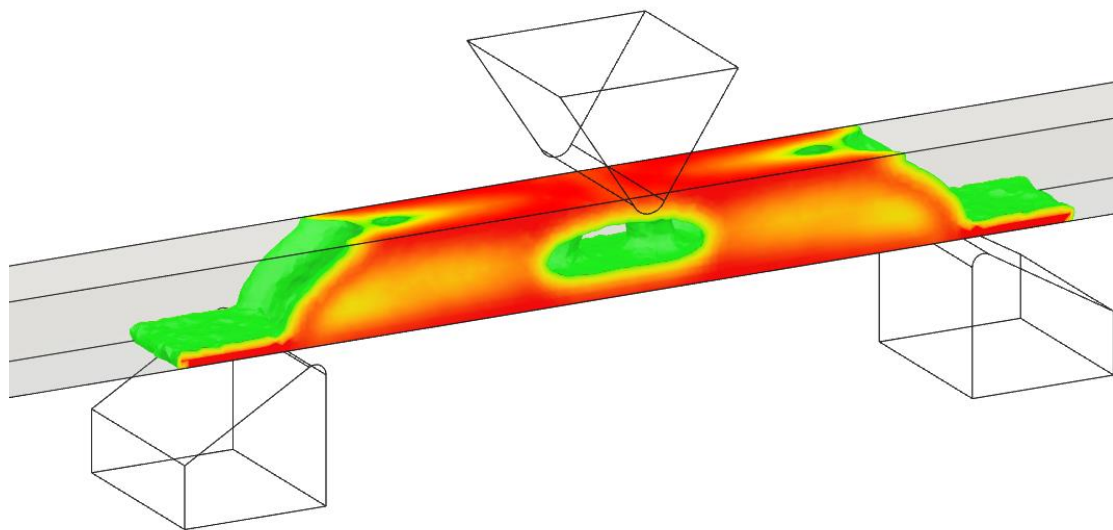
Πιο αναλυτικά :

- Δύναμη κάθετα στην επιφάνεια στο άνω μέρος του εμβόλου.
- Περιορισμοί: Πάκτωση στην κάτω πλευρά της αριστερής βάσης και κύλιση ως προς τον άξονα παράλληλα της δοκού στην κάτω πλευρά της δεξιάς βάσης .
- Υλικό PLA
- Επίπεδο συμμετρίας YZ,ZX
- Μείωση μάζας 50% για την δοκό των 80mm και 70% για αυτή των 60mm
- Μεγιστοποίηση δυσκαμψίας
- Διατήρηση γεωμετρίας δεξιά και αριστερά των σημείων επαφής βάσεων – δοκούς 10x8x1 mm

Οι χρόνος ολοκλήρωσης της μελέτης των 80mm ήταν 36 λεπτά, ενώ για την μελέτη των 60mm ήταν 48 λεπτά. Η διαφορά στους χρόνους οφείλεται στο ότι στην περίπτωση των 60mm χρειάστηκε να αφαιρεθεί περισσότερη μάζα. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μελετών.



Εικόνα 41 : Γεωμετρία μελέτης 80 mm Fusion 360



Εικόνα 42 : Γεωμετρία μελέτης 60 mm Fusion 360

Η τελική μάζα των δοκιμών είναι 5 γραμμάρια για την περίπτωση των 80mm και 3 γραμμάρια για την περίπτωση των 60mm.

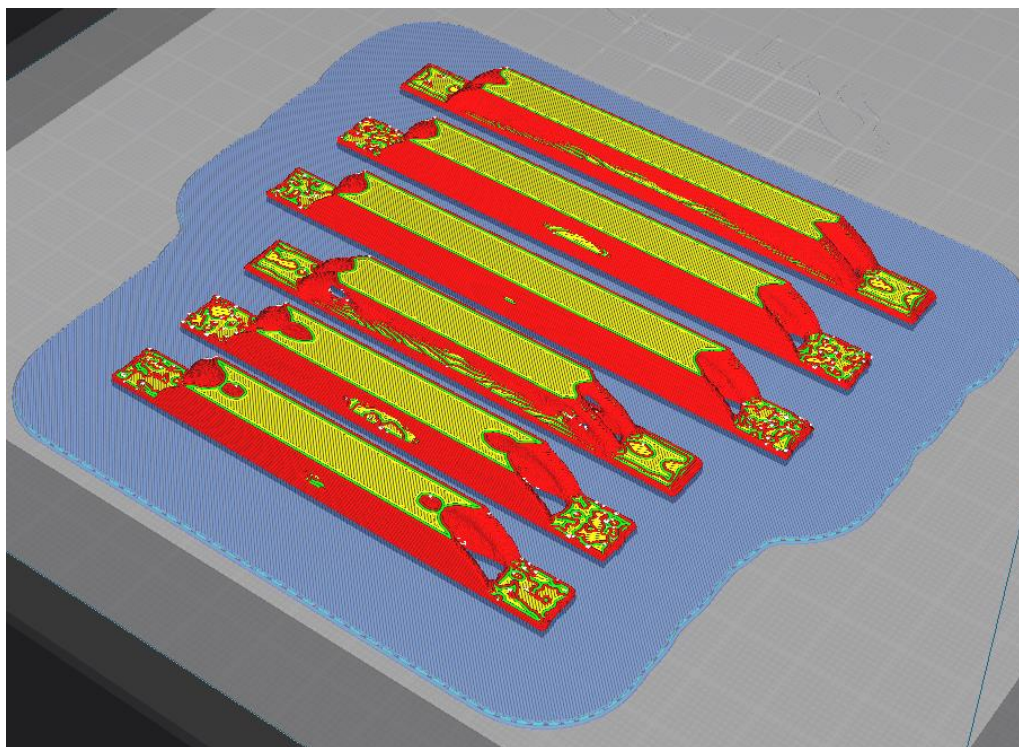
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Εφόσον ολοκληρωθήκαν οι μελέτες και έγινε η εξαγωγή των τελικών σχεδίων, σειρά έχει η κατασκευή τους. Αυτή θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια προσθετικών κατασκευών και πιο συγκεκριμένα με ένα εκτυπωτή τύπου FDM.

Εκτύπωση

Για την εκτύπωση των δοκιμών αρχικά τοποθετούνται τα αρχεία STL των δοκιμών στον λογισμικό του Slicer. Έπειτα τοποθετούνται τα απαραίτητα δεδομένα για την διαδικασία της εκτύπωσης και τέλος γίνεται η εξαγωγή του gcode σε μια microSD μνήμη. Εν συνέχεια η μνήμη με τον κώδικα τοποθετείται στον εκτυπωτή και μέσω της μικρής κονσόλας του εκτυπωτή επιλέγεται να αρχίσει η εκτύπωση. Παρακάτω δίνονται τα δεδομένα της εκτύπωσης:

Πάχος Στρωμάτων	0,2 mm
Πυκνότητα Πλήρωσης	100%
Θερμοκρασία Ακροφύσιου	210 °C
Θερμοκρασία Τράπεζας	60 °C
Ταχύτητα Πλήρωσης	50 mm/s
Ταχύτητα Τοιχωμάτων	25 mm/s
Υποστηρίξεις	Καμία
Πλακά Κατασκευής	Σχεδία (Raft)



Εικόνα 43 : Τα δοκίμια στον τεμαχιστή όπως θα εκτυπωθούν

Ο τρόπος με τον οποίο τοποθετήθηκαν τα δοκίμια στην τράπεζα του εκτυπωτή είναι τέτοιος ώστε να είναι πιο εύκολη η εκτύπωση των περίπλοκων γεωμετριών.

Η εκτύπωση έγινε χρησιμοποιώντας το CR-PLA της Creality. Η διάμετρος του νήματος είναι 1,75 mm και η θερμοκρασία τήξης κυμαίνεται από 195 – 220 °C. Η εκτύπωση ολοκληρώθηκε μετά από 5 ώρες και 21 λεπτά και το νήμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 38 γραμμάρια και 12,68 μετρά.

Τέλος έγινε ο απαραίτητος διαστασιολογικός έλεγχος για την επιβεβαίωση των απαραίτητων διαστάσεων στα δοκίμια.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΜΨΗΣ

Για την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων στο εργαστήριο Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής από τον Κ. Παπαγεωργίου Δημήτρη. Το δοκίμιο τοποθετείται πάνω στα δυο στηρίγματα της μηχανής κάμψης και το έμβολο ασκεί φορτίο πάνω στο δοκίμιο. Για την σωστή ορθή πραγματοποίηση των πειραμάτων, αρχικά βεβαιώνεται η σωστή θέση του δοκιμίου πάνω στα στηρίγματα με σκοπό το έμβολο να ασκήσει φορτίο στην μέση του δοκιμίου. Εφόσον επιβεβαιωθεί η συμμετρία, τοποθετείται το έμβολο με τέτοιο τρόπο πάνω στο δοκίμιο ώστε να το ακουμπάει χωρίς να του ασκεί κάποιο φορτίο. Τέλος ρυθμίζεται η ταχύτητα του εμβόλου και ξεκινάει η διαδικασία.



Εικόνα 44 : Μηχανή κάμψης τριών σημείων με τοποθετημένο το δοκίμιο

Στη συνέχεια, αφού ληφθούν οι μετρήσεις από τα πειράματα, σχεδιάζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (Stress-Strain). Η μηχανή κάμψης παρέχει δύο τιμές. Η πρώτη είναι το φορτίο (Load) του εμβόλου σε kg και η δεύτερη είναι η παραμόρφωση (Deflection) σε mm. Για να μετατραπούν σε τάσεις και παραμορφώσεις αντίστοιχα, πρέπει να εκτελεστούν οι ακόλουθες πράξεις :

$$\mathbf{Stress} = \frac{Load (N)}{Area (mm^2)} = \frac{275,3N}{8 \cdot 8mm^2} = 4.302 \frac{N}{mm^2} \text{ ή } MPa$$

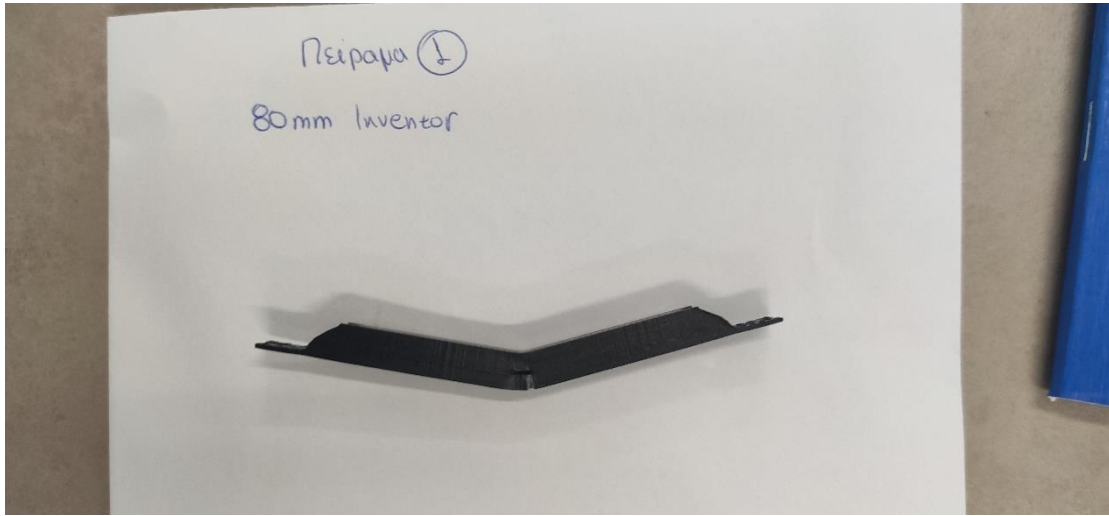
$$\mathbf{Strain} = \frac{Deflection (mm)}{Length (mm)} \times 100 = \frac{6.97 mm}{80 mm} \times 100 = 8.71\%$$

- Load=Φορτίο (N)
- Deflection=Παραμόρφωση (mm)
- Stress=Τάση (N/mm²)
- Strain=Παραμόρφωση (%)
- Area=Διατομή (mm²)
- Length=Μήκος στήριξης (mm)

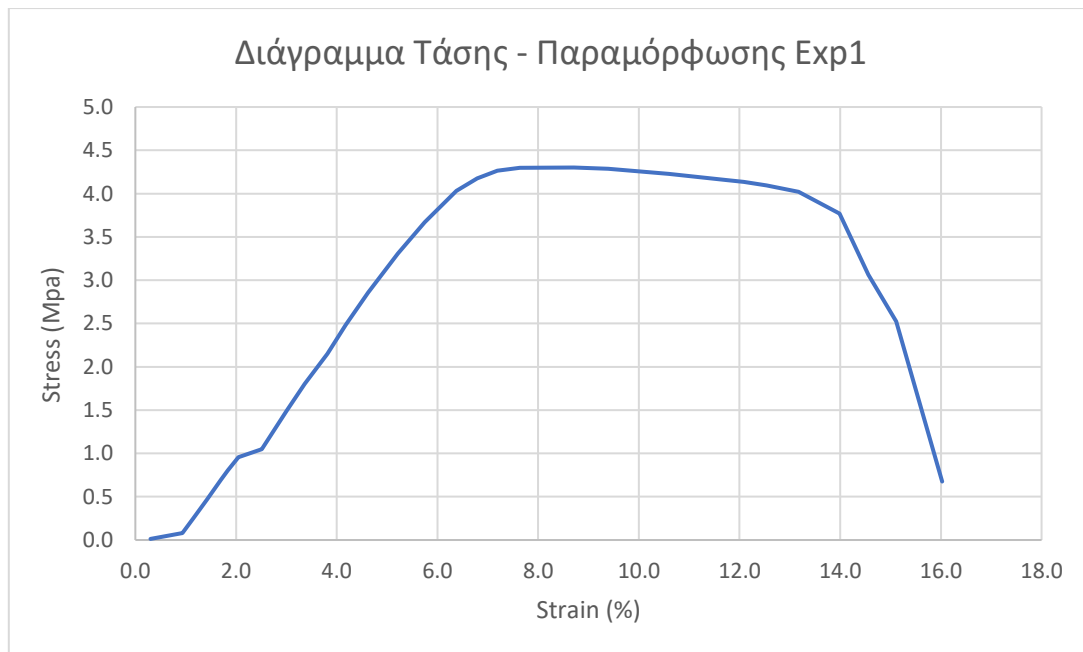
Με τον παραπάνω τρόπο υπολογίσθηκαν όλες οι μετρήσεις των πειραμάτων. Για τις μετρήσεις των 60 mm, για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης, στο παρονομαστή του κλάσματος εισάγεται ο αριθμός 60.

Πείραμα 1

Το πρώτο πείραμα έγινε στο δοκίμιο του Inventor με μήκος 80 mm.



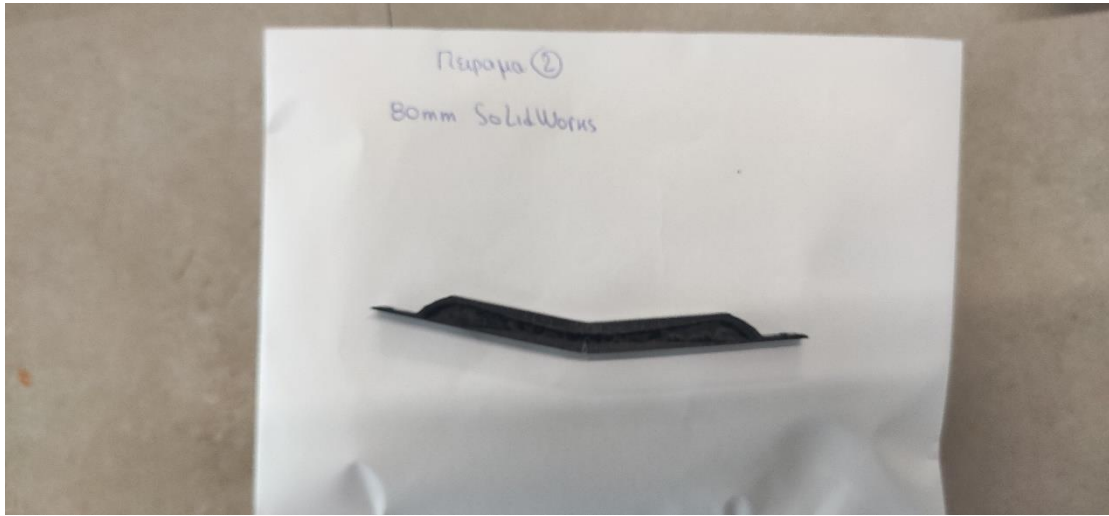
Εικόνα 45 : Δοκίμιο Inventor 80 mm.



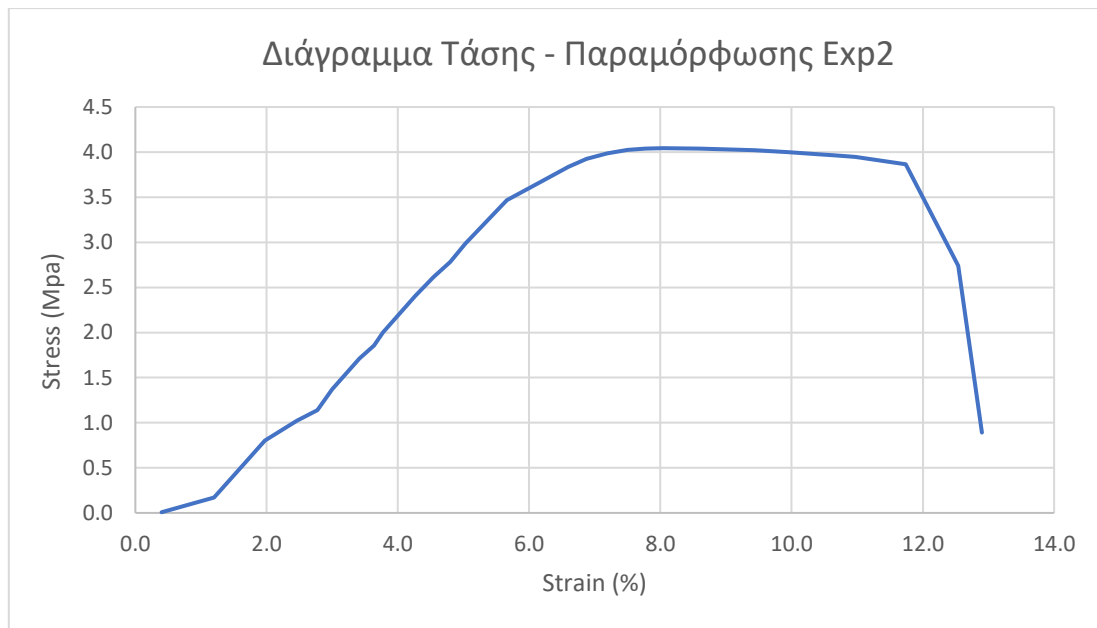
Το δοκίμιο για την περίπτωση του Inventor στα 80mm παρουσίασε μέγιστη τάση 4.30 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 16%.

Πείραμα 2

Το δεύτερο πείραμα έγινε στο δοκίμιο του Solidworks με μήκος 80 mm.



Εικόνα 46 : Δοκίμιο Solidworks 80 mm.



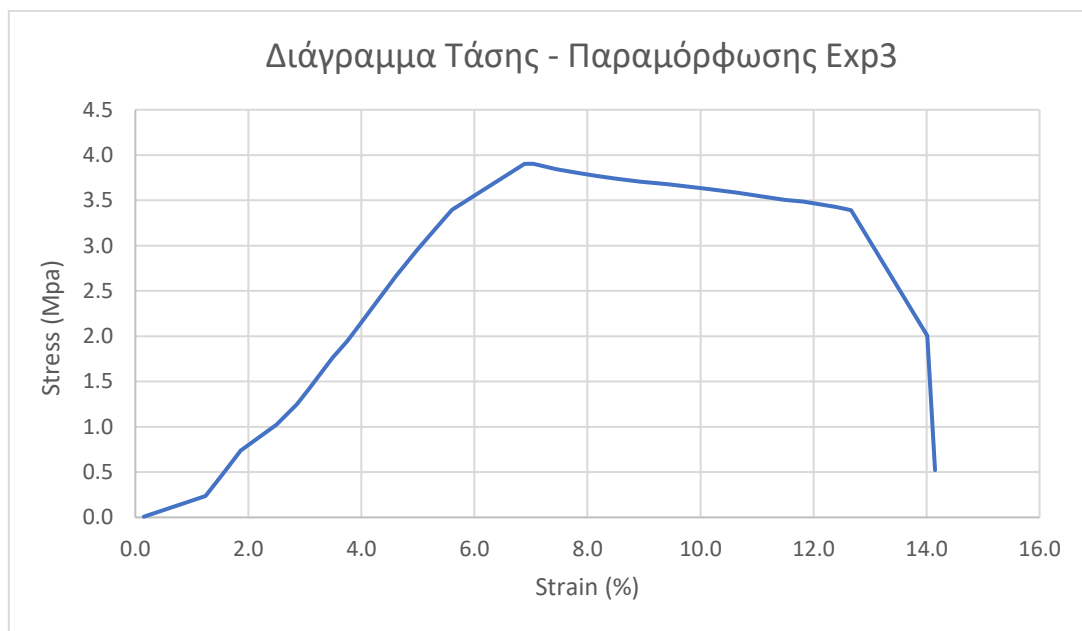
Το δοκίμιο για την περίπτωση του Solidworks στα 80mm παρουσίασε μέγιστη τάση 4.04 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 12.9%.

Πείραμα 3

Το τρίτο πείραμα έγινε στο δοκίμιο του Fusion 360 με μήκος 80mm.



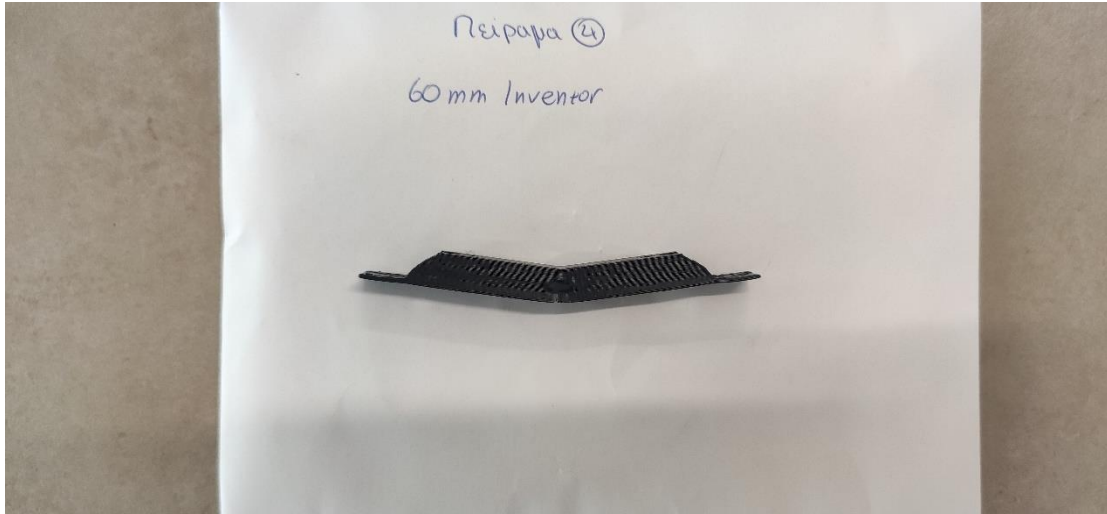
Εικόνα 47 : Δοκίμιο Fusion 360 80 mm.



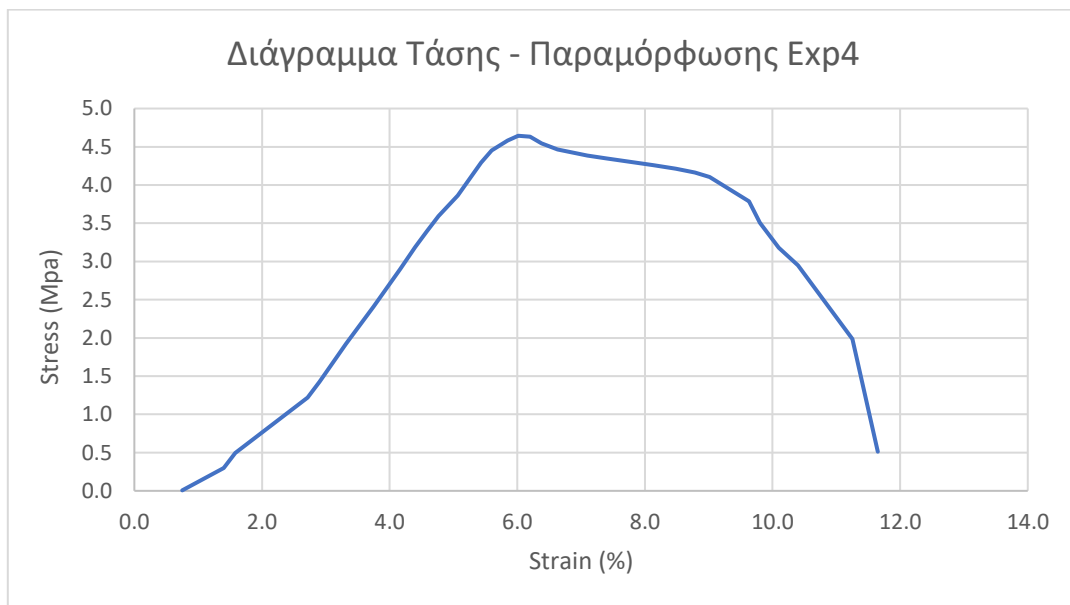
Το δοκίμιο για την περίπτωση του Fusion 360 στα 80mm παρουσίασε μέγιστη τάση 3.9 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 14.2%.

Πείραμα 4

Το τέταρτο πείραμα έγινε στο δοκίμιο του Inventor με μήκος 60mm.



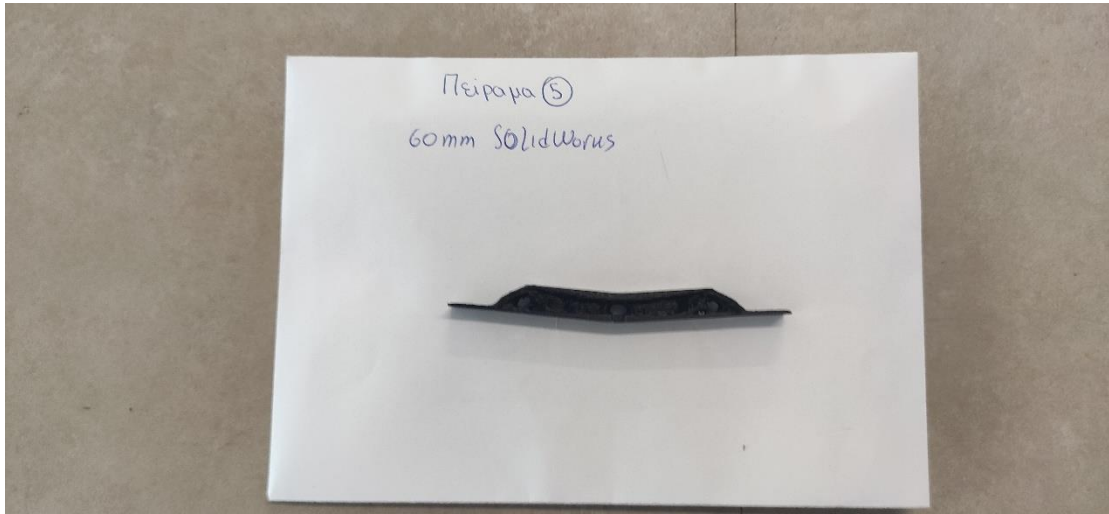
Εικόνα 48 : Δοκίμιο Inventor 60 mm.



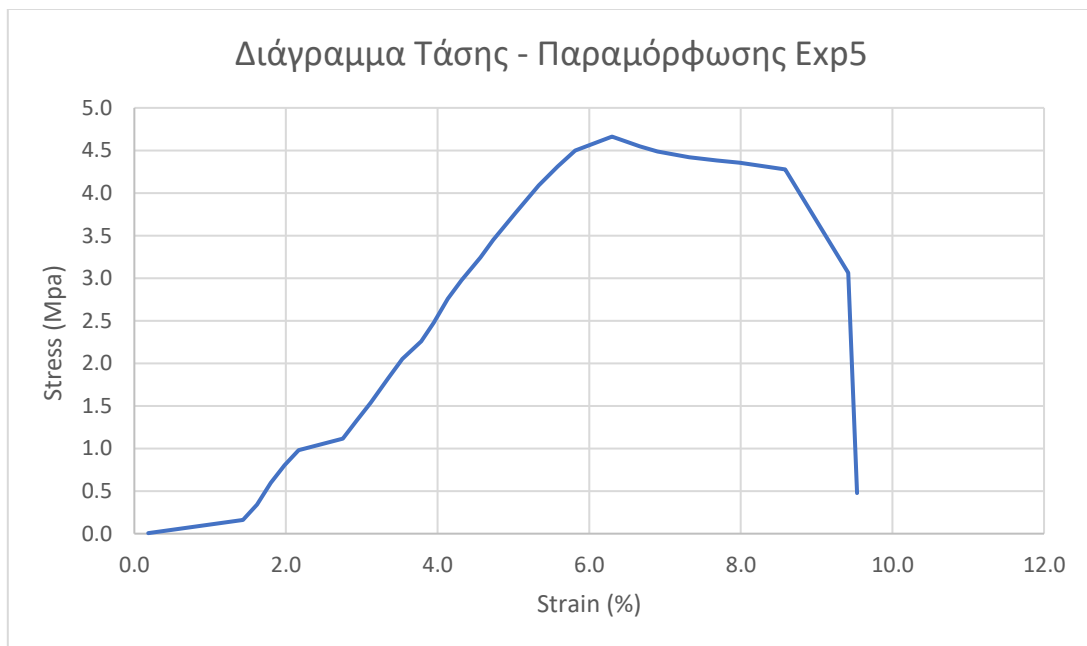
Το δοκίμιο για την περίπτωση του Inventor στα 60mm παρουσίασε μέγιστη τάση 4.64 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 11.7%.

Πείραμα 5

Το πέμπτο πείραμα έγινε στο δοκίμιο του Solidworks με μήκος 60mm.



Εικόνα 49 : Δοκίμιο Solidworks 60 mm.



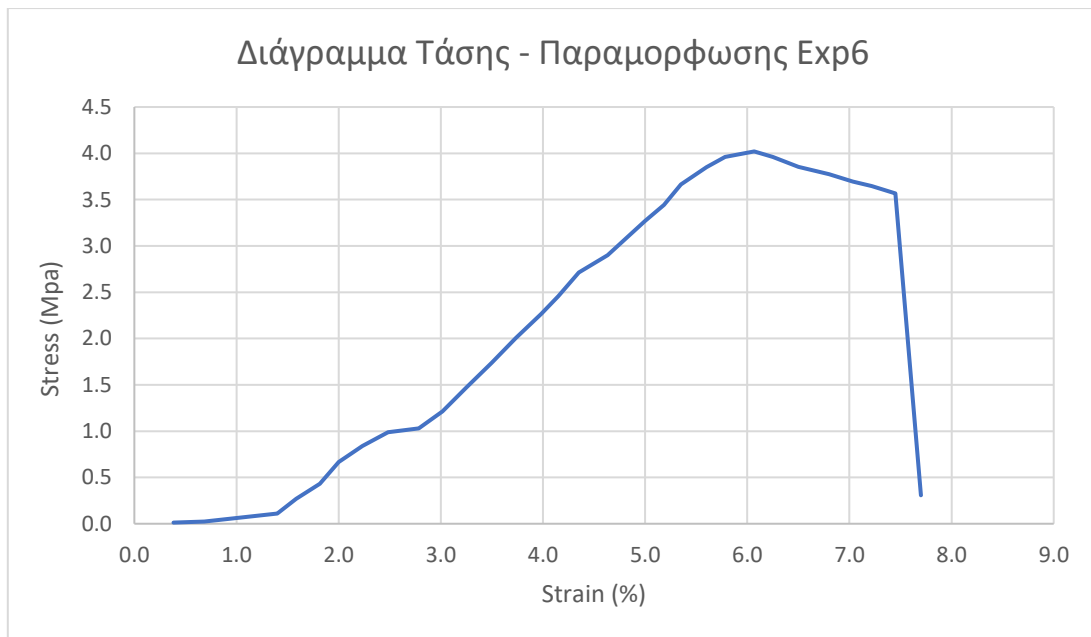
Το δοκίμιο για την περίπτωση του Solidworks στα 80mm παρουσίασε μέγιστη τάση 4.66 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 9.5%.

Πείραμα 6

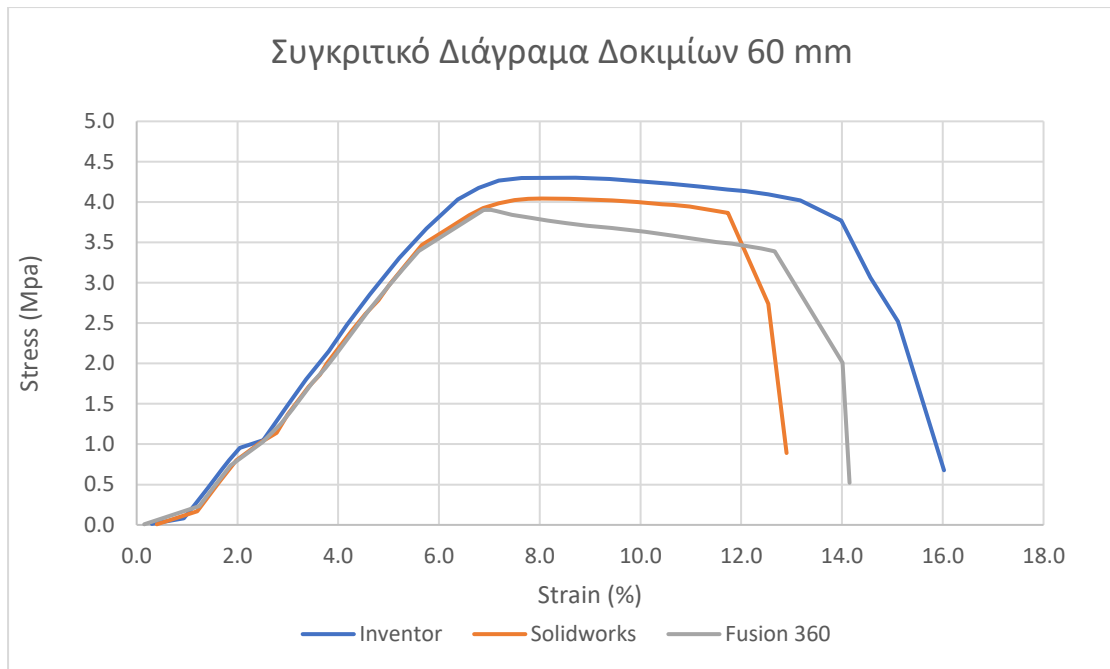
Το έκτο πείραμα έγινε στο δοκίμιο του Fusion 360 με μήκος 60mm.



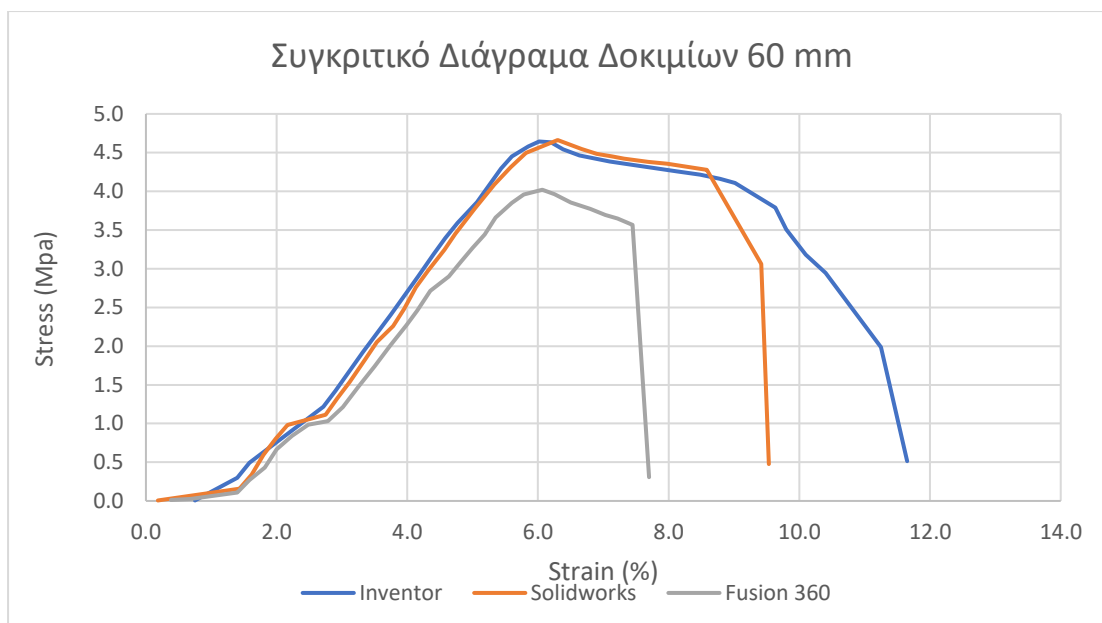
Εικόνα 50 : Δοκίμιο Fusion 360 60 mm.



Το δοκίμιο για την περίπτωση του Fusion360 στα 60mm παρουσίασε μέγιστη τάση 4.02 MPa και μέγιστη παραμόρφωση 7.7%.



Από το παραπάνω διάγραμμα αρχικά φαίνεται ότι το δοκίμιο του Inventor έχει παρουσιάσει τα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό όμως οφείλεται στην περισσότερη μάζα που διαθέτει, της τάξης του 3%, εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα δυο δοκίμια. Ωστόσο το δοκίμιο του Solidworks, παρατηρείται ότι έχει τα καλύτερα αποτελέσματα με UTS = 4 MPa και Strain = 12.9%. Αντιθέτως, το δοκίμιο του Inventor παρουσίασε UTS = 4.3 MPa αλλά Strain = 16%. Όσο αναφορά την περίπτωση του Fusion 360, παρόλο που παρουσίασε σχεδόν ίδιο UTS με το δοκίμιο του Solidworks, δεν είχε την ίδια δυσκαμψία.



Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται το εξής. Αρχικά τα δοκίμια των Inventor και Solidworks παρουσίασαν σχεδόν ίδιες τάσεις με την περίπτωση του Solidworks να παρουσιάζει UTS = 4.66 MPa και UTS = 4.64 MPa η περίπτωση του Inventor. Όπως και στο προηγούμενο διάγραμμα, η παραμόρφωση του Solidworks είναι μικρότερη από αυτή του Inventor και πιο συγκεκριμένα, 9.7% και 11.7% αντίστοιχα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η μάζα στο δοκίμιο του Inventor ήταν κατά 1% μεγαλύτερη από αυτήν των δυο άλλων δοκιμών. Τέλος, το δοκίμιο του Fusion 360 παρόλο που είναι την μεγαλύτερη δυσκαμψία από τα άλλα δυο δοκίμια, είχε επίσης και την μικρότερη μέγιστη τάση.

Πείραμα	Δοκίμιο	UTS	Max Strain
Exp01	Inventor 80 mm	4.30 MPa	16.0%
Exp02	Solidworks 80 mm	4.04 MPa	12.9%
Exp03	Fusion 360 80 mm	3.90 MPa	14.2%
Exp04	Inventor 60 mm	4.64 MPa	11.7%
Exp05	Solidworks 60 mm	4.66 MPa	9.5%
Exp06	Fusion 360 60 mm	4.02 MPa	7.7%

Στον παραπάνω πίνακα αναγράφονται οι μέγιστες τιμές τάσεις και οι μέγιστη μετατόπιση κάθε δοκιμίου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε πειραματική έρευνα για την εύρεση του καλύτερου λογισμικού τοπολογικής βελτιστοποίησης. Σκοπός της εργασίας ήταν οι πραγματοποίηση παρόμοιων μελετών στα προγράμματα προς σύγκριση και η κατασκευή των τελικών γεωμετριών με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έπειτα σειρά είχαν τα πειράματα κάμψης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η εν λόγω πειραματική διαδικασία και έρευνα εκτελέστηκε με επιτυχία με αποτέλεσμα την εύρεση του καλύτερου λογισμικού.

Προβλήματα

Στην παρακάτω ενότητα θα παρουσιαστούν προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας καθώς και τρόποι αντιμετώπισης προς αποφυγή τους.

Κατά την διάρκεια των μελετών και συγκεκριμένα αυτών των Solidworks και Fusion 360 παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά την διάρκεια της επίλυσης των μελετών.

Αρχικά κατά την διάρκεια των μελετών με την χρήση του λογισμικού του Solidworks, παρουσίαζε σφάλμα η μελέτη, οδηγώντας σε ακύρωση της μελέτης. Το Solidworks είναι ένα αρκετά βαρύ πρόγραμμα σχεδίασης και ο υπολογιστής στον οποίο έγιναν οι μελέτες δεν είχε αρκετή υπολογιστή ισχύ για την επίλυση των μελετών. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, πριν την έναρξη της μελέτης, τερματίστηκαν όλες οι εφαρμογές και τα προγράμματα που έτρεχαν αυτόματα στον υπολογιστή, με σκοπό ο υπολογιστής να αφιέρωση όλη του την ισχύ για την επίλυση των μελετών.

Στην περίπτωση του Fusion 360 παρουσιάστηκε παρόμοιο πρόβλημα. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, το Fusion είναι μια cloud-based πλατφόρμα. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι μελέτες χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα της Autodesk, γίνονται σε servers. Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν κατά την διάρκεια των μελετών. Πιο συγκεκριμένα η επίλυση των μελετών χωρίζεται σε τρία στάδια. Αρχικά στέλνεται η μελέτη στους servers, έπειτα γίνεται η επίλυση και τέλος στέλνονται πίσω τα αποτελέσματα. Υπήρξαν φορές που υπολειπορούσαν οι servers με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σφάλματα είτε κατά την διάρκεια της επίλυσης είτε κατά την διάρκεια της λήψης των αποτελεσμάτων. Η μόνη λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν να γίνουν οι απαραίτητες αναβαθμίσεις από την Autodesk με σκοπό την επίλυση του προβλήματος.

Αποτελέσματα

Στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα, από τα πειράματα που υλοποιήθηκαν, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον προς ανάλυση.

Αρχικά, από τα διαγράμματα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι στο δοκίμιο των 80mm στην περίπτωση του Inventor φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από τα υπόλοιπα δοκίμια. Παρόλο που παρουσίασε την μεγαλύτερη τάση (4.3 MPa) το λογισμικό του Inventor πέτυχε μόνο 47% μείωση μάζας, αντί για 50% που του είχε τεθεί ως στόχος, ενώ είχε και την μικρότερη δυσκαμψία από τις δυο υπόλοιπες περιπτώσεις. Επίσης στην περίπτωση των 60 mm η μείωση της μάζας ήταν κατά 68% αντί για 70% και παρουσίασε πάλι την μικρότερη δυσκαμψία. Το μεγαλύτερο βάρος των δοκών είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχει περισσότερη μάζα στα δομικά σημεία της δοκού, ενισχύοντας έτσι τις δομικές του ιδιότητες. Επιπλέον το εν λόγω δοκίμιο παρουσίασε την μικρότερη δυσκαμψία από τα τρία δοκίμια. Εν κατακλείδι το λογισμικό του Inventor δεν ήταν σε θέση να φέρει εις πέρας τους στόχους που του τέθηκαν, το οποίο οφείλεται στην χαμηλότερης ποιότητας πλέγματος που διαθέτει, από τα άλλα δυο λογισμικά, και μάλλον στον υποδεέστερης ποιότητας κώδικα που χρησιμοποιεί για τις μελέτες.

Στη συνέχεια, στην περίπτωση του Solidworks και συγκεκριμένα στο δοκίμιο των 80mm, παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση δεν ήταν σημαντικά μικρότερη από αυτήν του Inventor. Αντιθέτως η δοκός των 60mm παρουσιάζει ελάχιστα μεγαλύτερη μέγιστη τάση σε σχέση με αυτή του Inventor. Αξίζει να σημειωθεί πως και στις δυο περιπτώσεις, τα δοκίμια του Solidworks παρουσίασαν μεγαλύτερη δυσκαμψία και από τις δυο δοκούς των 80mm, αλλά μικρότερη δυσκαμψία μόνο από το δοκίμιο του Fusion 360 των 60mm. Τέλος το Solidworks κατάφερε να πέτυχει τους στόχους που του τέθηκαν, όσο αναφορά την μείωση της μάζας αλλά και την μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας των δοκών.

Συνεχίζοντας τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση του Fusion 360 τα δοκίμια είχαν την μικρότερη μέγιστη τάση σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια τόσο των 80 mm (3.9 MPa) όσο και των 60 mm (4.02 MPa). Τέλος στην περίπτωση την 60 mm το δοκίμιο του εν λόγω προγράμματος παρουσίασε την μεγαλύτερη δυσκαμψία αλλά με την μικρότερη μέγιστη τάση από τα άλλα δυο δοκίμια.

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι διάφορες επί τις εκατό των δοκιμίων με γνώμονα την μάζα της μέγιστη τάση και την παραμόρφωση:

A/A	Δοκίμια 80mm	Δοκίμια 60 mm
Μάζα	Inv. ↑ κατά 3% από όλα τα δοκίμια	Inv. ↑ κατά 1% από όλα τα δοκίμια
UTS	Inv. ↑ κατά 6% από SW Inv. ↑ κατά 9.3% από Fus. SW ↑ κατά 3.5% από Fus.	SW ↑ κατά 0.4% από SW SW ↑ κατά 13.7% από Fus. Inv. ↑ κατά 13.4% από Fus.
Strain	SW ↓ κατά 19.4% Inv. SW ↓ κατά 9.2% Fus. Fus. ↓ κατά 11.3% Inv.	Fus. ↓ κατά 34.2% Inv. Fus. ↓ κατά 18.9% SW SW ↓ κατά 18.8% Inv.

Εν κατακλείδι, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα πειράματα κάμψης, παρατηρείται το πρόγραμμα του Solidworks είχε τα καλύτερα αποτελέσματα όσο αναφορά την μέγιστη τάση αλλά και την μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Στην περίπτωση του Fusion 360 παρόλο που πέτυχε την μέγιστη δυσκαμψία στα δοκίμια των 60mm, παρουσίασε την μικρότερη τάση. Εν συνεχεία, συγκρίνοντας τους χρόνους που χρειάστηκαν για να ολοκληρωθούν οι μελέτες, το Inventor είχε τους μικρότερους, από τα άλλα δυο προγράμματα CAD, αλλά δεν ήταν αξιόπιστο ως προς την επίτευξη των στόχων για την βελτιστοποίηση της τοπολογίας των δοκών. Το Fusion 360 χρειάστηκε 10 λεπτά περισσότερο, για την ολοκλήρωση για κάθε μελέτης, παράγοντας γεωμετρικές υποδεέστερες από αυτές του Solidworks, κάνοντας την εταιρεία της Dassault Systems να διαθέτει το αποδοτικότερο λογισμικό βελτιστοποίησης τοπολογίας από τα προγράμματα της Autodesk.

Μελλοντικές Εφαρμογές

Η επιτυχημένη ολοκλήρωση των πειραμάτων θέτει καλά θεμέλια στην εκπόνηση εγχειρημάτων, εφόσον δεν υπάρχουν παρόμοιες μελέτες στην βιβλιογραφία. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι ένας τρόπος σχεδίασης ελαφρυτέρων εξαρτημάτων και χάρις της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η κατασκευή αυτών το δοκιμίων είναι πλέον εφικτή. Μελλοντικά μπορούν να πραγματοποιηθούν μελέτες με διαφορετικά υλικά, διαφορετικές τεχνολογίες εκτύπωσης αλλά και διαφορετικών λογισμικών βελτιστοποίησης τοπολογίας από άλλες εταιρείες στον χώρο της σχεδίασης από υπολογιστή και των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. (2020). *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 27(02).

<https://doi.org/10.56042/ijems.v27i2.45920>

Atakok, G., Kam, M., & Koc, H. B. (2022). Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1542–1554.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.013>

Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology optimization: Theory, methods, and applications*. Springer.

Brown, B., Hmeidat, N. S., Jia, X., Wilt, J., Roberts, M., Compton, B. G., & Vermaak, N. (2022). Experimental investigations of the effectiveness of simultaneous topology/orientation optimization via SOMP and principal stress directions. *Materials & Design*, 217, 110647.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110647>

Chen, X., Yang, Q., Qu, L., Wang, Y., Wang, F., & Li, D. (2022). Stress-concentration reduction and mechanical performance improvement of Cf/SiC composite-to-superalloy joints by using topology optimization. *Materials & Design*, 216, 110537.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110537>

Dass, A., & Moridi, A. (2019). State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings*, 9(7), 418.

<https://doi.org/10.3390/coatings9070418>

Day, J. (n.d.). *Freudenberg-NOK CEO takes early retirement*.

Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2017). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 276, 012026.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/276/1/012026>

Geramizadeh, H., Dariushi, S., & Salami, S. J. (2022). Optimal face sheet thickness of 3D printed polymeric hexagonal and re-entrant honeycomb sandwich beams subjected to three-point bending. *Composite Structures*, 291, 115618.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115618>

Grinde, S. (n.d.). *TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING USING SIMP METHOD*.

Gülcan, O., Günaydın, K., & Tamer, A. (2021). The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review. *Polymers*, 13(16), 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>

Huang, X., & Xie, Y. M. (2010). *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470689486>

Keon Aristech Boozarjomehri (28 April 2016). *3D Printing at School and Makerspaces: Project Learning with 3D Printing*. Cavendish Square. [ISBN 978-1-6804-5016-3](https://doi.org/10.1002/9781119111111).

Liza Wallach Kloski, Nick Kloski (2016). *Getting Started with 3D Printing: A Hands-on Guide to the Hardware, Software, and Services Behind the New Manufacturing Revolution*. Maker Media, Inc. [ISBN 978-1-6804-5020-0](https://doi.org/10.1002/9781119111111).

Lores, A., Azurmendi, N., Agote, I., & Zuza, E. (2019). A review on recent developments in binder jetting metal additive manufacturing: Materials and process characteristics. *Powder Metallurgy*, 62(5), 267–296. <https://doi.org/10.1080/00325899.2019.1669299>

Martín-Montal, J., Pernas-Sánchez, J., & Varas, D. (2021). Experimental Characterization Framework for SLA Additive Manufacturing Materials. *Polymers*, 13(7), 1147. <https://doi.org/10.3390/polym13071147>

Miki, T., & Yamada, T. (2021). Topology optimization considering the distortion in additive manufacturing. *Finite Elements in Analysis and Design*, 193, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2021.103558>

Querin, O. M. (2017). *Topology design methods for structural optimization*. Elsevier ; Academic Press, an imprint of Elsevier.

Redwood, B., Schöffner, F., & Garret, B. (n.d.). *The 3D Printing Handbokk*.

Rouhi, M., & Rais-Rohani, M. (2008, April 7). Topology Optimization of Continuum Structures Using Element Exchange Method. *49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference
 16th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference
 10t. 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference
 16th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference
 10t, Schaumburg, IL. <https://doi.org/10.2514/6.2008-1707>*

Satya Hanush, S., & Manjaiah, M. (2022). Topology optimization of aerospace part to enhance the performance by additive manufacturing process. *Materials Today: Proceedings*, 62, 7373–7378. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.074>

Sharma, S., & Mehta, K. (2022). Topology optimization and hybrid deposition technique for additive manufacturing of a brake caliper. *Materials Today: Proceedings*, 62, 7224–7230. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.606>

Song, J., Tang, Q., Feng, Q., Ma, S., Guo, F., & Han, Q. (2021). Investigation on the modelling approach for variable-density lattice structures fabricated using selective laser melting. *Materials & Design*, 212, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110236>

Tagliaferri, V., Trovalusci, F., Guarino, S., & Venettacci, S. (2019). Environmental and Economic Analysis of FDM, SLS and MJF Additive Manufacturing Technologies. *Materials*, 12(24), 4161. <https://doi.org/10.3390/ma12244161>

Wang, W., Roubier, N., Puel, G., Allain, J.-M., Infante, I., Attal, J.-P., & Vennat, E. (2015). A New Method Combining Finite Element Analysis and Digital Image Correlation to Assess Macroscopic Mechanical Properties of Dentin. *Materials*, 8(2), 535–550. <https://doi.org/10.3390/ma8020535>

Weinberg, D. (n.d.). *Topology Optimization in Autodesk Nastran In-CAD*.

Yamada, T., & Noguchi, Y. (2022). Topology optimization with a closed cavity exclusion constraint for additive manufacturing based on the fictitious physical model approach. *Additive Manufacturing*, 52, 102630. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102630>

Yang, Z., Fu, K., Zhang, Z., Zhang, J., & Li, Y. (2022). Topology optimization of 3D-printed continuous fiber-reinforced composites considering manufacturability. *Composites Science and Technology*, 230, 109727. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109727>

Zhang, C., Xu, S., Liu, J., & Ma, Y. (2022). Comprehensive clustering-based topology optimization for connectable multi-scale additive manufacturing structures. *Additive Manufacturing*, 54, 102786. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102786>

Zhang, J., & Yanagimoto, J. (2021). Density-based topology optimization integrated with genetic algorithm for optimizing formability and bending stiffness of 3D printed CFRP core sandwich sheets. *Composites Part B: Engineering*, 225, 109248. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109248>

Zhang, J., & Yanagimoto, J. (2022). Design of bendable sandwich sheets with 3D printed CFRP cores via multi-stage topology optimization. *Composite Structures*, 287, 115372. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115372>

Zuo, T., Han, H., & Liu, Z. (2023). Explicit Tunnels and Cavities Control Using SIMP and MMA in Structural Topology Optimization. *Computer-Aided Design*, 158, 103482. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2023.103482> (N.d.).

Ι.Γιαννακόπουλος, Δ. Κ., 2011. *Σημειώσεις Πειραματικής Αντοχής υλικών*, Αθήνα: s.n

ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Additive Manufacturing, χ.χ. *Additive Manufacturing Materials*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/am-materials>

Autodesk, χ.χ. *Autodesk Fusion 360: More than CAD, it's the future of design and manufacturing*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?us_oa=dotcom-us&us_si=455cae35-86e6-4a9b-8659-3695c0eaaf73&us_st=Fusion%20360&us_pt=NINVFUS&term=1-YEAR&tab=subscription&plc=F360

Autodesk, χ.χ. *Autodesk Inventor: Mechanical design software for ambitious ideas*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://www.autodesk.com/products/inventor/overview?us_oa=dotcom-us&us_si=7ea2e988-4dfc-4db3-a81d-96935403f3ad&us_st=Inventor&us_pt=INVNTOR&term=1-YEAR&tab=subscription&plc=INVPROSA

Bendsøe, M. & Sigmund, O., 2003. *TOPOLOGY OPTIMIZATION Theory, Methods and Applications*. s.l.:s.n.

Dassault Systemes, 2012. *Solid Mesh*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://help.solidworks.com/2012/english/solidworks/cworks/id_solid_mesh.htm

Dassault Systemes, 2019. *SIMP Method for Topology Optimization*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://help.solidworks.com/2019/english/solidworks/cworks/c_simp_method_topology.htm

Dassault Systemes, χ.χ. *Solidworks*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.3ds.com/products/solidworks>
[Πρόσβαση 5 July 2021].

Engineering Product Design, χ.χ. *Sheet Lamination*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>

Gebisa, A. W. , & Lemu, . H. G., 2023. *A case study on topology optimized design for additive manufacturing*, s.l.: Materials Science and Engineering.

Huang, X. & Xie, Y., 2010. *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures*. s.l.:s.n.

Lee, K., 1999. *CAD/CAM/CAE*. s.l.:Κλειδάριθμος.

Loughborough University, χ.χ. *Binder Jetting*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>

Loughborough University, χ.χ. *Directed Energy Deposition*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>

Loughborough University, χ.χ. *Material Jetting*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>

MANUFACTURING GUIDE, χ.χ. *Selective Laser Sintering*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>

Markforged, 2022. *What is Additive Manufacturing? Understanding the Technology and its Impact*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://markforged.com/resources/blog/additive-manufacturing-101-guide-the-basics>

MIT Management , 2017. *Additive manufacturing, explained*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>

Plg Global, χ.χ. *Fused Deposition Modeling*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.plgglobal.co.uk/technologies/fused-deposition-modelling-fdm>

SIMSCALE, 2023. *What is CAE | Computer-Aided Engineering?*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/general/what-is-cae-computer-aided-engineering/>

Technology Student, 2019. *Stereolithography*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: https://www.technologystudent.com/despro_3/stereo1.html

TWI-Global, 2023. *What is Finite Element Analysis (FEA)?*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/finite-element-analysis>