



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΜΗΧΑΝΩΝ**

ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΟΠΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΔΟΜΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗΣ ΤΗΞΗΣ ΜΕ
LASER**

ΔΕΣΠΟΙΝΑ ΚΑΛΥΒΑ

1059755

ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ _ Αναπληρωτής καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, Ιούνιος/2023

Στην παρούσα εργασία, κύριος στόχος είναι η σύγκριση ενός συμβατικά κατασκευασμένου στοιχείου με ένα στοιχείο κατασκευασμένο από τρισδιάστατη εκτύπωση. Η προσθετική παραγωγή (Additive Manufacturing) ή αλλιώς τρισδιάστατη εκτύπωση, αποκτά όλο ένα και μεγαλύτερη αξία στο χώρο της βιομηχανίας. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι το μεγάλο πλήθος πλεονεκτημάτων που έχει να προσφέρει. Κάποια από αυτά είναι η ελευθερία στην κατασκευή γεωμετρίας, η ταχύρρυθμη παραγωγή, η φιλικότερη κατασκευή προς το περιβάλλον, καθώς συχνά και το μικρότερο κόστος. Παρ' όλ' αυτά εμφανίζει και κάποιους περιορισμούς ως προς τα υλικά που μπορούν να επεξεργαστούν ή της μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες βρίσκονται ακόμη υπό έρευνα. Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό τυποποίησης American Society for Testing and Material (ASTM), οι βασικές επτά διεργασίες προσθετικής μηχανικής, είναι η μέθοδος φωτοπολυμερισμού, η μέθοδος ψεκασμού του υλικού, η συνδετική μέθοδος μέσω ακροφυσίου, η μέθοδος εξώθησης του υλικού, η μέθοδος σύντηξης στρώματος σκόνης, η μέθοδος συγκόλλησης φύλλων υλικού και η μέθοδος κατευθυνόμενης εναπόθεσης. Κάθε μία από αυτές, συνδέεται με ποικίλες εφαρμογές. Όλες οι προαναφερθείσες τεχνικές ακολουθούν με κάποιες αλλαγές, την αρχή της στρωματοποίησης στην κατασκευή του αντικειμένου.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις τεχνικές προσθετικής μηχανικής, μπορεί να είναι κεραμικά, πολυμερή, μέταλλα ή ρητίνες. Το κάθε ένα από αυτά φέρει και τις δικές του ιδιότητες. Αρχικά τα κεραμικά έχουν ανθεκτικότητα και θερμοκρασιακή σταθερότητα. Τα πολυμερή αποτελούν το πιο προσιτό υλικό για αυτές τις κατεργασίες λόγω του χαμηλούς τους κόστους. Επιπλέον, απαιτούν πιο εύκολα χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, χωρίς πολλά εξειδικευμένα εξαρτήματα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οικιακή χρήση είτε για την κατασκευή βιομηχανικών αντικειμένων. Όσον αφορά τα μεταλλικά υλικά, συνήθως η χρήση τους αποτελείται από πρόσμιξη παραπάνω του ενός μετάλλου μεταξύ τους. Καθώς τα μέταλλα αποτελούν το πρωταρχικό υλικό για την κατασκευή στοιχείων μηχανών, η αντίστοιχες βιομηχανίες έχουν επωφεληθεί αρκετά. Επιτρέπουν τη δημιουργία τόσο ολόκληρων εξαρτημάτων, αλλά φαίνονται χρήσιμα και σε πιο ιδιαίτερες εφαρμογές, όπως κανάλια ψύξης και διατήρησης της θερμοκρασίας. Οι ρητίνες από την άλλη, έχουν περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες και κατηγοριοποιούνται σε είδη ρητινών ανάλογα με την αντοχή τους και άλλα χαρακτηριστικά. Ο τρόπος τροφοδοσίας του κάθε υλικού στις μηχανές προσθετικής

παραγωγής, ποικίλει ανάμεσα σε τύπου νήμα διαφοροποιημένο όταν πρόκειται για μέταλλα ή για πολυμερή, φύλλα υλικού και πούδρα. Για μεταλλικά υλικά κυρίως χρησιμοποιείται η μορφή πούδρας. Χαρακτηριστικό του νήματος είναι η λιγότερη απώλεια υλικού, λόγω της ελεγχόμενης εναπόθεσης και τα φύλλα υλικού πραγματοποιούν την διαμόρφωση του εξαρτήματος με μεθόδους σύντηξης, εφαρμογής δύναμης, θέρμανσης ή άλλων μεθόδων ανάλογα με το υλικό.

Την τελευταία περίοδο ιδιαίτερη εντύπωση έχει κάνει μια τεχνική που ανήκει στη μέθοδο σύντηξης με στρώμα σκόνης, η διαδικασία επιλεκτικής τήξης με laser (SLM). Τα βήματα που ακολουθούνται είναι αρχικά η εναπόθεση ενός λεπτού στρώματος σκόνης στην πλατφόρμα που δημιουργείται το αντικείμενο και έπειτα η επιλεκτική τήξη του μετάλλου σε μορφή πούδρας με χρήση πηγής laser. Έτσι γίνεται η δημιουργία του πρώτου στρώματος του αντικειμένου. Ύστερα η πλατφόρμα χαμηλώνει και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το στοιχείο. Είναι μια διαδικασία που απευθύνεται στην παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων. Όσον αφορά την κόπωση, συχνά χρησιμοποιούνται επιπλέον κατεργασίες αφότου ολοκληρωθεί η εκτύπωση του εξαρτήματος ή προθέρμανση για να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής του και την ποιότητά του. Επίσης, σημαντικό ρόλο κατέχουν και οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εκτύπωσή του, όπως τρόπος κίνησης του laser, πάχος στρώματος και μέγεθος κόκκου σκόνης. Όποια διεργασία βελτίωσης και αν επιλεγθεί, οι αρνητικές και οι θετικές επιπτώσεις της οφείλουν να καταλογιστούν. Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί και για να μετρήσουν την θερμοκρασιακή επιρροή της μεθόδου SLM σε ένα προϊόν. Γενικά, καθώς κινείται η πηγή laser δημιουργείται μια περιοχή λιωμένου υλικού, όπου οι αλλαγές φάσης του υλικού είναι διακριτές και από τα χαρακτηριστικά της, εξαρτάται και η ποιότητα (σωστή ένωση στρωμάτων) του τελικού αντικειμένου. Κατά την υλοποίηση της διεργασίας, η μεταφορά θερμότητας στο αντικείμενο γίνεται μέσω αγωγής και υπάρχουν απώλειες λόγω συναγωγής και ακτινοβολίας. Η πηγή laser, μπορεί να ακολουθήσει ποικίλες τεχνικές σάρωσης. Όπως τεχνική που αποτελείται από ρίγες, σκάκι, καθώς και παραλλαγές αυτών των ειδών. Η στρατηγική σάρωσης, φυσικά εξαρτάται και από άλλα μεγέθη που αφορούν την κατεύθυνση (μονοκατευθυντική, εναλλαγή κατεύθυνσης) κλπ. Η διαδικασία επιλεκτικής τήξης με laser τέλος, μπορεί να εφαρμοστεί σε αρκετούς τομείς όπως αυτοκινητοβιομηχανίες, εμβιομηχανική, ιατρική αεροναυπηγική κλπ.

Για την σύγκριση μεταξύ του συμβατικού και του τρισδιάστατου κατασκευασμένου μοντέλου σε αυτήν την έρευνα, αρχικά μελετάται μια απλή γεωμετρία, μια πρόβος

δοκός και στη συνέχεια μια πιο πολύπλοκη, με πιο σύνθετα φορτία, ένα πιστόνι. Το πιστόνι κατέχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στις μηχανές εσωτερική καύσης, διότι μετατρέπει θερμική ενέργεια σε μηχανική και αντίστροφα. Οι εμβολοφόρες μηχανές ανάλογα με τον αριθμό διαδρομών που διανύει το έμβολο για την ολοκλήρωση ενός πλήρους κύκλου χωρίζονται σε δίχρονες και τετράχρονες. Τα κύρια μέρη ενός πιστονιού αποτελούν η κεφαλή του εμβόλου, τα ελατήρια του εμβόλου, ο πείρος που το συνδέει με τον διωστήρα και η ποδιά του εμβόλου. Για τη θερμική ανάλυση ενός πιστονιού, χρειάζονται οι συνοριακές συνθήκες που αντιστοιχούν στην περιοχή των δαχτυλιδιών, στην ποδιά, στην πλευρική περιοχή ανάμεσα στην κεφαλή και τα δαχτυλίδια, στην εσωτερική κοιλότητα του εμβόλου και στο πάνω μέρος του πιστονιού όπου λαμβάνει χώρα η καύση. Για την πλευρική περιοχή, χρησιμοποιείται ένα δίκτυο θερμικής αντίστασης, που αποτελείται από την αντίσταση του κυλίνδρου και του ψυκτικού υγρού. Οι υπόλοιπες αντιστάσεις αγνοούνται είτε λόγω μεγέθους είτε λόγω πολυπλοκότητας. Έτσι βρίσκεται ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή για την περιοχή των δαχτυλιδιών, της ποδιάς και της εναπομένουσας πλευρικής επιφάνειας.

$$h_{total} = \frac{1}{\frac{L_{liner}}{k_{liner}} + \frac{1}{h_{water}}}$$

Για την εσωτερική επιφάνεια του εμβόλου, απαραίτητη είναι η διάκριση της περιοχής σε δύο τμήματα. Το πρώτο αφορά την περιοχή όπου το σύστημα ψεκασμού λαδιού εκτοξεύει το υγρό απευθείας στην επιφάνεια και το δεύτερο είναι η εναπομένουσα εσωτερική περιοχή, όπου το λάδι ρέει. Κατάλληλοι τύποι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας αυτής της περιοχής, με ορισμένες υποθέσεις, όπως οι χρήση μέσων όρων δύο ακραίων τιμών, καθώς και την υπόθεση πως η περιοχή ψεκασμού είναι κυκλική. Έπειτα, για την επιφάνεια της καύσης, ακολουθείται η αρχή της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.

$$\dot{Q}_{f/cycle} = h_{comb} \times A_c (T_s - T_\infty)$$

Συνεχίζοντας με τη μελέτη του εμβόλου σε κόπωση, δείχνεται η ιδιαιτερότητα του αλουμινίου και των κραμάτων του που δεν έχουν ένα ξεκάθαρο όριο αντοχής σε κόπωση, παρόλα αυτά επιλέγεται το όριο στους 10^6 κύκλους φόρτισης. Τα φορτία που συναντώνται, είναι η πίεση στο άνω μέρος του πιστονιού και η δύναμη αδράνειας. Η θεωρία της κόπωσης, κλείνει με μια σύντομη αναφορά της θεωρίας ως προς τα κριτήρια αστοχίας Soderberg, Gerber, Goodman.

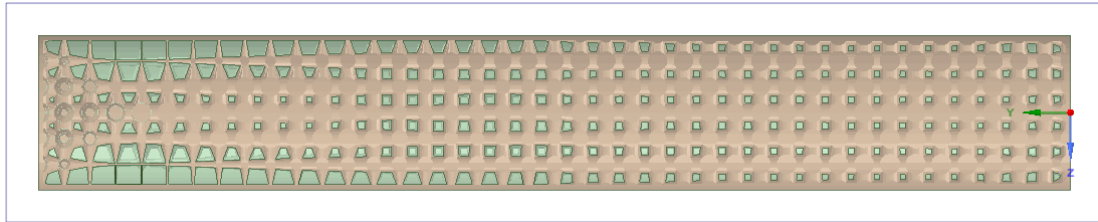
Με σκοπό την προσομοίωση των τρισδιάστατων μοντέλων, στο εσωτερικό της γεωμετρίας δημιουργήθηκε δομή πλέγματος. Η ζήτηση για δομές πλέγματος, αυξήθηκε διότι προσφέρουν τη δυνατότητα κατασκευής ελαφρύτερων εξαρτημάτων που βοηθούν στην διατήρηση της ενέργειας σε ποικίλες εφαρμογές. Λόγω αυτής της ιδιότητας οι δομές πλέγματος είναι ιδιαίτερα ελκυστικές στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική και άλλους τομείς. Ο τρόπος κατασκευής αυτών των δομών, αποτελείται από διάταξη κελίων με ακμές και επιφάνειες. Διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως η διαφύλαξη υλικού, σωστότερη κατανομή θερμοκρασίας αλλά ανάμεσα σε άλλα, βελτιώνουν και τις μηχανικές ιδιότητες αρκετών κομματιών. Η προσθετική κατασκευή κατέστησε δυνατή την υλοποίηση δομών πλέγματος, εξαιτίας της ελεγχόμενης εναπόθεσης υλικού, της γενικότερης ικανότητας σχηματισμού περίπλοκων γεωμετριών και της δυνατότητας πρόβλεψης και ελέγχου του σχεδίου πριν αυτό εκτυπωθεί. Μολονότι παρέχουν πρωτόγνωρες και σημαντικές δυνατότητες στις κατασκευές, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο κατασκευής τους, επειδή αρκετές φορές η χρήση στηριγμάτων είναι αναγκαία. Κάθε τύπος δομής πλέγματος φέρει τα δικά του χαρακτηριστικά, αλλά για την εν λόγω εργασία, θα χρησιμοποιηθεί η cubic, crossed, diagonal και crossed μορφή. Τα cubic πλέγματα είναι τα πιο ευκόλως χρησιμοποιούμενα, λόγω της απλότητάς τους και της καλής αντοχής τους. Τα gyroid πλέγματα, μέσω πειραμάτων και προσομοιώσεων θεωρούνται αυτά τα οποία με τη σωστή παραμετροποίηση, οδηγούν σε καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και λόγω των επιφανειών που τα αποτελούν, έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερη συγκέντρωση τάσεων. Η διαδικασία επιλεκτικής τήξης με laser, θεωρείται η καταλληλότερη για κατασκευή δομών πλέγματος σε μεταλλικά υλικά. Φέρει ιδιαίτερα ελεγχόμενη κατασκευή γεωμετρίας, που πρέπει να συνδυάζεται από προσοχή όλων των επιμέρους παραμέτρων, όπως μέγεθος κόκκου πούδρας. Εκτός από την κατάληψη εσωτερικών γεωμετριών, οι δομές πλέγματος αρκετές φορές λαμβάνουν και τον ρόλο στηριγμάτων, τα οποία στο τέλος της διαδικασίας οφείλουν να αφαιρεθούν.

Εκτός από τον χειροκίνητο σχηματισμό δομών πλέγματος, δηλαδή ομοιόμορφη πυκνότητα, δοκιμάστηκε και η χρήση αυτόματου αλγορίθμου για την βελτιστοποίησή του. Η βελτιστοποίηση δομής πλέγματος, έχει ως αποτέλεσμα, τη δημιουργία ενός πλέγματος μεταβλητής πυκνότητας ανάλογα με την κατανομή των τάσεων. Πιο συγκεκριμένα, όπου εμφανίζεται υψηλή τάση η πυκνότητα αυξάνεται ενώ σε περιοχές με χαμηλή συγκέντρωση τάσεων, είναι πιο αραιή η κατανομή του. Ακολούθησε τοπολογική βελτιστοποίηση. Η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι μια τεχνική που ως

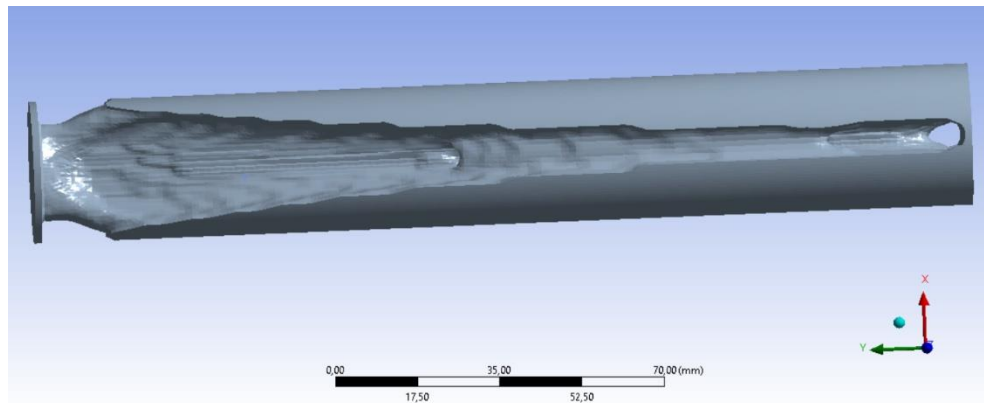
σκοπό έχει την πραγματοποίηση ιδανικών σχεδίων βελτιστοποιώντας κάποια παράμετρο (μάζα, όγκο, κλπ.) , αλλά παράλληλα διατηρώντας και βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες του εξαρτήματος. Από την βελτιστοποίηση μπορούν να αφαιρεθούν ορισμένες επιλεγμένες περιοχές , οι οποίες συνήθως φέρουν φορτία ή στηρίξεις και είναι αναγκαίες για την λειτουργικότητα του εξαρτήματος, συνεπώς πρέπει να παραμείνουν αυτούσιες. Έπειτα από την βελτιστοποίηση, η τελική γεωμετρία επιβεβαιώνεται από μια επαναληπτική ανάλυση, ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά της.

Η αρχική απλή γεωμετρία που επιλέγεται να εξεταστεί, η πρόβολος κυλινδρική δοκός, έχει $D=30\text{mm}$ και μήκος 200mm , και της ασκείται μια δύναμη 600 N στο ελεύθερο άκρο της με κατεύθυνση παράλληλη στην ελεύθερη επιφάνεια. Αρχικά, εξετάζεται το κατάλληλο πλέγμα (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί, με βάση το οποίο θα γίνουν οι αναλύσεις. Ο τύπος πεπερασμένων στοιχείων επιλέγεται να είναι τετράεδρα με ενδιάμεσους κόμβους, ώστε να εφάπτονται πιο ορθά στη γεωμετρία. Έπειτα, πραγματοποιείται ένας έλεγχος ανεξαρτησίας πλέγματος. Δηλαδή, μέσω διαφόρων παραμετρικών δοκιμών, επιλέγεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, στο οποίο η λύση συγκλίνει ή δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη περαιτέρω απόκλιση. Δύο τρόποι εφαρμόζονται για αυτόν τον έλεγχο. Πρώτα υπάρχει, παραμετρικά, αλλαγή στον αριθμό των τμημάτων τα οποία χωρίζουν τις ακμές, αλλάζοντας κάθε φορά και το συνολικό πλέγμα της δοκού. Έπειτα, παραμετρικά, μειώνεται το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Λαμβάνεται η τιμή της ισοδύναμης τάσης Von-Mises στο κέντρο της γεωμετρίας για να αποφευχθεί οποιαδήποτε γεωμετρική ασυνέχεια. Σε κάθε τρόπο, φαίνεται η λύση να συγκλίνει στην ίδια τιμή των $22,654\text{ MPa}$, με τη διαφορά πως για τη δεύτερη περίπτωση, το πλήθος πεπερασμένων στοιχείων είναι μικρότερο. Συνεπώς, επιλέγεται μέγεθος στοιχείου $1,5\text{ mm}$. Αφού η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στη δοκό ολοκληρώνεται, ακολουθεί η καταγραφή τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων. Όλες οι μετρήσεις λαμβάνονται σε γεωμετρική επιφάνεια στο μέσο της δοκού, δηλαδή $y=100\text{mm}$. Η μέγιστη ολική μετατόπιση βρίσκεται $0,065708\text{mm}$ στα σημεία $d=15\text{mm}$ και $d=-15\text{mm}$, όπως αναμενόταν και από θεωρία. Αντίστοιχα στα ίδια σημεία έχουμε και τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, με τιμή $0,00011327\text{mm/mm}$. Όσον αφορά την τάση, παρατηρείται η μέγιστη να είναι $22,654\text{MPa}$, ξανά στο άνω και κάτω σημείο της διατομής, στην φορά άσκησης της δύναμης. Υπολογίζοντας αναλυτικά την ισοδύναμη τάση Von-Mises, το αποτέλεσμα δεν αποκλίνει σημαντικά από την τιμή που κατέληξε η προσομοίωση. Η απόκλιση υπολογίζεται ίση με $2,4\%$. Οδηγούμενοι στο

συμπέρασμα, πως τα αποτελέσματα είναι ορθά. Στη συνέχεια, προσομοιώνεται η τρισδιάστατη εκτυπωμένη δοκός. Εξετάστηκαν οι τιμές παραμόρφωσης, τάσης και μετατόπισης που έφερε η δοκός όταν αποτελείται από τις αναφερόμενες δομές πλέγματος με ίδιες παραμέτρους πλέγματος κάθε φορά. Στην περίπτωση του cubic παρατηρήθηκαν οι χαμηλότερες τιμές σε τάση και μετατόπιση, ενώ στην περίπτωση του gyroid, σε παραμόρφωση. Λόγω επερχόμενης αδυναμίας βελτιστοποίησης του gyroid πλέγματος, έγινε μια προσπάθεια υποκειμενικής βελτιστοποίησης του, και όντως τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν. Σε επόμενο βήμα, επιλέγονται δύο τύποι δομής πλέγματος, cubic και diagonal και βελτιστοποιούνται με τη χρήση αλγορίθμου. Για την επίτευξη αυτής της βελτιστοποίησης, τέθηκαν ως αρχικές παράμετροι η μέγιστη και η ελάχιστη πυκνότητα, το μέγεθος του κελίου, το επιθυμητό ποσοστό μάζας που θα παραμείνει και η μέγιστη ισοδύναμη τάση Von-Mises. Οι τιμές τους ήταν αντίστοιχα, 0,05-0,8 , 5mm, 70% και 40MPa. Ο τρόπος επιλογής αυτών οφείλεται στο γεγονός ότι προτιμάται ένα μέγεθος κελίου ικανοποιητικού μεγέθους που θα φροντίζει για την αποφυγή περιοχών με ελλιπή στήριξη αλλά θα σέβεται και τους περιορισμούς κατασκευής της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Όσο για την πυκνότητα μια πολύ χαμηλή τιμή δε θα έδινε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Έπειτα από βελτιστοποίηση και των δύο τύπων δομής πλέγματος, αναμενόμενα, στην στήριξη, όπου δημιουργείται η υψηλότερη τάση, υπάρχει πυκνότερη δομή πλέγματος ενώ σε άλλα σημεία πιο αραιή. Για την cubic δομή, η μετατόπιση βρέθηκε 0,095366mm , η παραμόρφωση 0,00019141 mm/mm και η τάση 38,279 MPa. Στην περίπτωση του diagonal, η μετατόπιση βρέθηκε 0,1132mm, παραμόρφωση 0,00026338 mm/mm και η τάση 50,19MPa. Αδιαμφισβήτητα τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν σε σχέση με την αυθαίρετη επιλογή παραμέτρων σε προηγούμενο βήμα. Όσο για την τοπολογική βελτιστοποίηση, επιλέχθηκε να αφαιρεθεί 30% από την αρχική μάζα και τα αποτελέσματα ήταν τα εξής. Η μέγιστη μετατόπιση βρέθηκε 0,0674221mm , η μέγιστη παραμόρφωση 0,00011821 mm/mm και η μέγιστη ισοδύναμη τάση 23,642 MPa. Εμφανίζεται μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού σε σημεία όπου η τάση λαμβάνει μικρότερη τιμή και όχι στην πάκτωση όπου υπάρχει η μέγιστη τάση. Τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν αρκετά από τα αρχικά με αποτέλεσμα να θεωρηθεί ικανοποιητική και ωφέλιμη η συγκεκριμένη μείωση μάζας. Πιο αναλυτικά, η μετατόπιση αυξήθηκε κατά 2%, η παραμόρφωση κατά 4% και η τάση κατά 4,1%. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται η γεωμετρία της δοκού με το πλέγμα που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα και την τοπολογική βελτιστοποίηση.

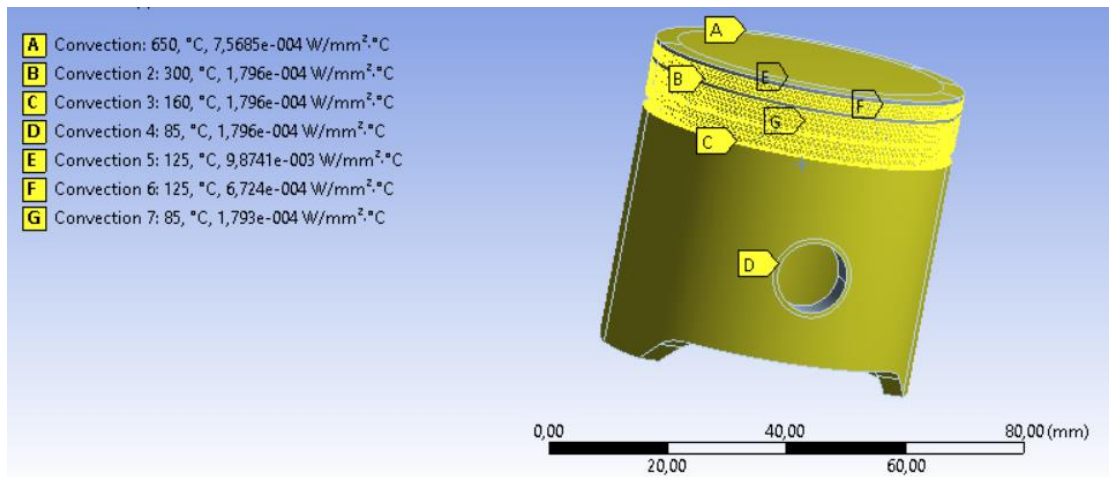


Εικόνα 1: Βελτιστοποίηση δομής πλέγματος με τύπο κελίου cubic.



Εικόνα 2: Τοπολογική βελτιστοποίηση δοκού.

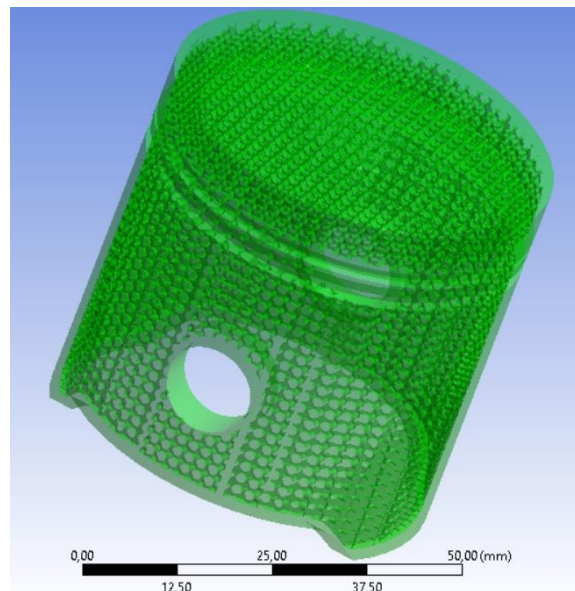
Ακολουθώς, γίνεται η ανάλυση του πιστονιού. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η εξωτερική του διάμετρος ίση με 52,7 mm, το συνολικό μήκος του ίσο με 40 mm, το οποίο για λόγους υπολογιστικής ισχύς, επιλέχθηκε να γίνει 45 mm. Η κεφαλή του είναι επίπεδου σχήματος και η ποδιά του έχει αφαίρεση υλικού. Ο πείρος είναι ελεύθερος στους ομφαλούς του εμβόλου και ελεύθερος στην μπιέλα. Επίσης, έχει δύο δαχτυλίδια συμπίεσης και ένα δαχτυλίδι λαδιού. Το υλικό του είναι κράμα αλουμινίου και η ισχύς που μπορεί να δώσει είναι 5,21 kW. Αρχικά, πραγματοποιείται ξεχωριστά μόνο η θερμική ανάλυση, υπολογίζοντας τους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο και παίρνοντας τις θερμοκρασίες που επικρατούν σε κάθε σημείο από προϋπάρχουσα έρευνα. Παρακάτω απεικονίζονται οι συνοριακές συνθήκες του πιστονιού.



Εικόνα 3: Συνοριακές συνθήκες για θερμική ανάλυση πιστονιού.

Μέσω τεστ ευαισθησίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, βρέθηκε ότι το μέγεθος του στοιχείου όπου η λύση σύγκλινε, ήταν 1 mm, οπότε και επιλέχθηκε το μέγεθος με το οποίο προχώρησε η ανάλυση. Βρέθηκε πως κανένα σημείο δεν ξεπέρασε το 66,6% του σημείου τήξης του υλικού, η μέγιστη θερμοκρασία έφτασε τους 283,25 °C στην μεριά της καύσης όπως αναμενόταν και στην περιοχή όπου το σύστημα ψεκάζει απευθείας το λάδι ψύξης, η επιρροή ήταν αισθητή. Κατόπιν, έγινε η στατική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις δυσμενέστερες συνθήκες φόρτισης. Για να απλοποιηθεί το πρόβλημα. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο η τάση στο άνω μέρος του πιστονιού ίση με 3,4 MPa. Για στήριξη, στην ρεαλιστική λειτουργία του πιστονιού αντιστοιχεί η κυλινδρική στήριξη στις τρύπες του πείρου με περιορισμένες την ακτινική και αξονική μετατόπιση και ελεύθερη την εφαπτομενική. Και κυλινδρική στήριξη στην ποδιά του πιστονιού με μόνο ελεύθερο τον αξονικό βαθμό κίνησης. Παρ' όλ' αυτά, επειδή η επόμενη ανάλυση που θα γίνει με πιστόνι που περιέχει πλέγμα, δεν υποστήριζε αυτές τις στηρίξεις, επιλέχθηκε μια απλή στήριξη πάκτωσης στις τρύπες του πείρου, ώστε να περιοριστούν οι βαθμοί ελευθερίας χωρίς πολυπλοκότητες. Στη συνέχεια το θερμικό φορτίο εισήχθη στην στατική ανάλυση και επιλύθηκε ο συνδυασμός τους. Αρχικά, λόγω του ότι στην περιοχή της πάκτωσης αναπτυσσόταν πολύ υψηλή τάση, διερευνήθηκε με βελτιστοποίηση αύξηση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και βρέθηκε πως η συγκεκριμένη περιοχή αποτελεί γεωμετρική μοναδικότητα όπου αναπτύσσονται τεχνητές τάσεις, καθώς επίσης οι πάκτωση περιορίζει την διαστολή λόγω θερμότητας. Έτσι, οι τιμές ελήφθησαν απομακρυσμένες από εκείνη την ακμή. Τα αποτελέσματα έδειξαν μέγιστη τάση στο πάνω μέρος της τρύπας για τον πείρο (262,32 MPa) και η παραμόρφωση βρέθηκε μέσα στο όρια

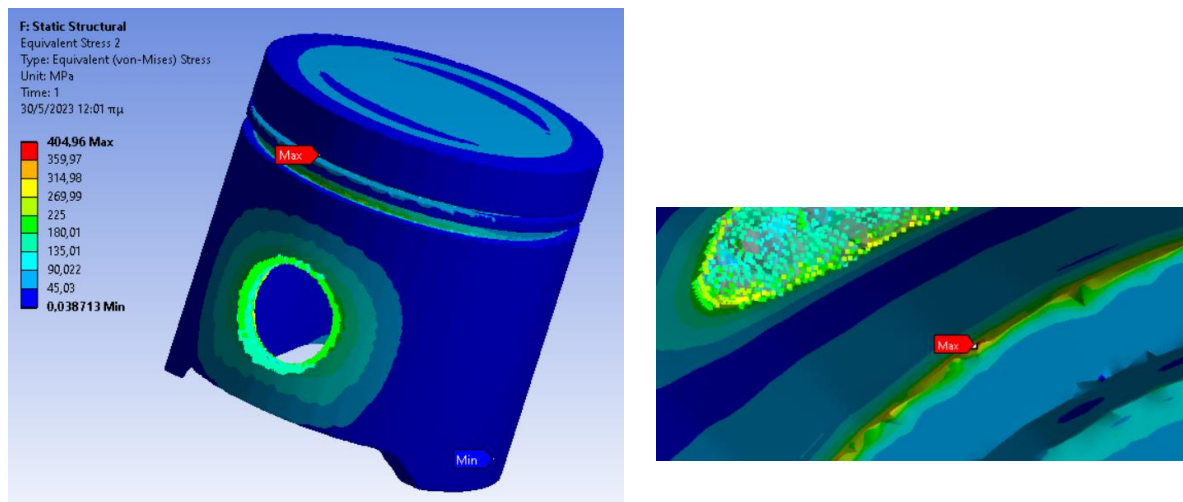
ανοχής μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου, ίση με 0,21 mm. Έπειτα, το φορτίο μέσω του λογισμικού μετατράπηκε σε δυναμική φόρτιση, από 0 μέχρι μέγιστο φορτίο και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το κριτήριο του Soderberg και του Goodman. Η διάρκεια ζωής και με τα δύο κριτήρια ξεπερνούσε τους 10^6 κύκλους, ο συντελεστής ασφαλείας ήταν πάνω από ένα και η καταστροφή του εξαρτήματος κάτω από 1. Οπότε η λειτουργία του κρίθηκε ασφαλής. Σαφώς, όπως αναμενόταν το κριτήριο του Soderberg έδωσε πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Επειδή από την δοκό, τα αποτελέσματα έδειξαν ως προτιμητέο μοντέλο αυτό που είχε δημιουργηθεί με βελτιστοποίηση πλέγματος τύπου cubic, αυτό θα χρησιμοποιηθεί και σε αυτήν την πιο σύνθετη γεωμετρία. Με τις ίδιες παραμέτρους και με μέγεθος κελίου 1,8 mm, σχηματίζεται το πιστόνι που εικονίζεται παρακάτω.



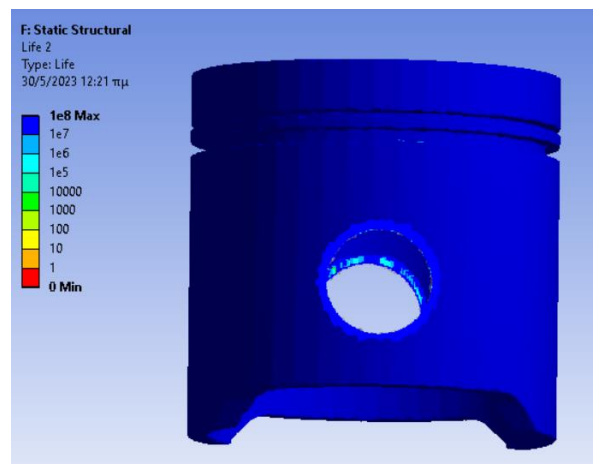
Εικόνα 4: SLM πιστόνι.

Μετά την παραγωγή ορθού πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, γίνονται οι ίδιες αναλύσεις που έγιναν και στο συμβατικό. Συνεπώς, η συνδυασμένη θερμομηχανική ανάλυση έδωσε τα εξής αποτελέσματα. Μικρότερη μέγιστη παραμόρφωση κατά 3%, ίση με 0,20698 mm. Παράλληλα, η τάση και η μετατόπιση αυξήθηκαν. 404,94 MPa και 0,006 mm/mm αντίστοιχα. Η μέγιστη τάση εμφανίστηκε σε ακμή, και θεωρήθηκε ύστερα από μελέτη ως σημείο συγκέντρωσης τάσης, οπότε και μπορεί να αγνοηθεί. Άρα, η μέγιστη τάση πραγματικά αγγίζει τα 300-350 MPa. Η ανάλυση κόπωσης, ομοίως με το συμβατικό πιστόνι, για το τρισδιάστατο εκτυπωμένο, η διάρκεια ζωής του ξεπερνά του 10^6 κύκλους και ο λόγος της απαιτούμενης διάρκειας ζωής προς την διάρκεια ζωής που πραγματικά έχει, είναι κάτω του 1 και για τα δύο κριτήρια στοχίας.

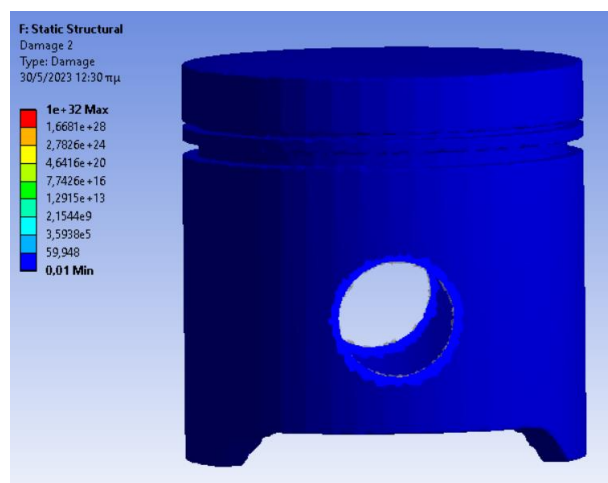
Η μόνη μη επιθυμητή τιμή, είναι ο δυντελεστής ασφαλείας, που σε κάποια σημεία στις οπές του πείρου, βρίσκεται κάτω από 1, αλλά σε κοντινές τιμές του. Παρακάτω δίνονται δειγματικά κάποιες εικόνες με τα αποτελέσματα του SLM πιστονιού.



Εικόνα 5: Ισοδύναμη τάση Von-Mises για τρισδιάστατο εκτυπωμένο πιστόνι.

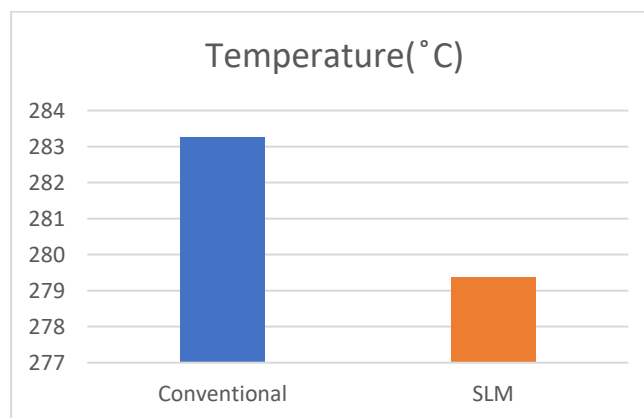


Εικόνα 6: Διάρκεια ζωής για SLM πιστόνι (κύκλοι).

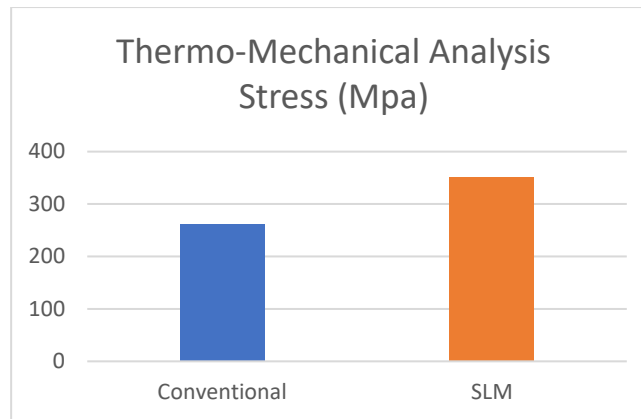


Εικόνα 7: Ποσοστό καταστροφής SLM πιστονιού υπό την επήρεια δυναμικών φορτίων.

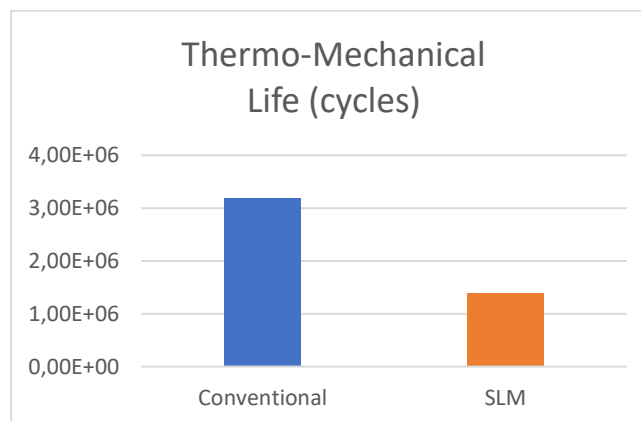
Συνοψίζοντας, έπειτα από σύγκριση μιας συμβατικά κατασκευασμένης και μια τρισδιάστατης εκτυπωμένης δοκού, συμπεραίνεται πώς η τρισδιάστατη εκτύπωση επέφερε αύξηση σε όλα τα μεγέθη. Όμως, υπήρχαν και αρκετά πλεονεκτήματα που δεν μπορούν να αγνοηθούν, όπως η μείωση του βάρους. Η βελτιστοποίηση των δομών πλέγματος οδήγησε σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα, καθιστώντας την προτιμότερη λύση σε περίπτωση τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η τοπολογική βελτιστοποίηση κατέληξε σε αρκετά παρόμοια αποτελέσματα με την αρχική γεωμετρία, γεγονός που την καθιστά μια επίσης καλή επιλογή για δημιουργία γεωμετρίας που θα εκτυπωθεί με προσθετική μηχανική. Με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης δομών πλέγματος, προσομοιώθηκε και το SLM μοντέλο της πιο σύνθετης γεωμετρίας που αναλύθηκε, το πιστόνι. Οι φορτίσεις στις οποίες ελέγχθηκε το πιστόνι, ήταν θερμοκρασιακές, μηχανικές, και συνδυαστικά με επιπλέον υπολογισμούς κόπωσης. Στην συγκεκριμένη σύγκριση η θερμοκρασία μειώθηκε στην περίπτωση του τρισδιάστατου εκτυπωμένου πιστονιού, ενώ τα μεγέθη στην στατική ανάλυση αυξήθηκαν. Όταν ολοκληρώθηκε η θερμομηχανική ανάλυση και για τα δύο μοντέλα, τα αποτελέσματα παρουσίασαν μείωση της παραμόρφωσης όσον αφορά το SLM έμβολο και αύξηση των υπόλοιπων τιμών. Επιπλέον, η φόρτιση σε δυναμικά φορτία, έδειξε ασφαλή λειτουργία υπό κόπωση και για τα δύο πιστόνια. Ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 8 : Αποτελέσματα από θερμοκρασιακή ανάλυση πιστονιού.



Εικόνα 9: Αποτελέσματα από θερμομηχανική ανάλυση μοντέλων πιστονιού.



Εικόνα 10: Αποτελέσματα από θερμομηχανική ανάλυση μοντέλων πιστονιού (συνέχεια).

Για ακόμη πιο ολοκληρωμένη άποψη, είναι αναγκαία περαιτέρω έρευνα στις μηχανικές ιδιότητες των δομών πλέγματος. Ακόμη, ωφέλιμη θα ήταν η προσομοίωση και της δομής gyroid αλλά και επιπλέον βελτιστοποίηση στις περιπτώσεις των υπόλοιπων τύπων δομών. Επίσης, τα φυσικά πειράματα, απαιτούν περισσότερους πόρους και χρόνο, αλλά μπορούν να συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση αυτών των γεωμετριών. Η χρησιμοποίηση λογισμικού που επιτρέπει εφαρμογή στήριξης σε έμβολο οι οποίες ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, δηλαδή κυλινδρικές στηρίξεις, μπορεί να δώσει πιο ρεαλιστικές τιμές. Επιπλέον, μια ανάλυση όπου το θερμοκρασιακό φορτίο εναλλάσσεται με το χρόνο, επίσης συμβάλλει σε περισσότερες ακριβείς πληροφορίες. Τέλος, είναι ευρέως αποδεκτό πως η προσθετική μηχανική είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με τις δομές πλέγματος επηρεάζει θετικά το χώρο της βιομηχανίας και παραγωγής ενώ ταυτόχρονα σέβεται και το περιβάλλον. Έτσι με διαρκή επιτήρηση, έρευνα και έλεγχο της αντοχής και συμπεριφοράς τρισδιάστατων εξαρτημάτων, εξελίσσεται η δημιουργία ιδανικών σχεδίων.

Πίνακας με επεξηγήσεις Ορολογίας

Ορολογία	Σημασία
Additive Manufacturing (AM)	Προσθετική Κατασκευή: συνένωση στρωμάτων υλικών για την παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων
American Society for Testing and Material (ASTM)	Ονομασία Παγκόσμιου οργανισμού τυποποίησης
Body-Centered cubic (BCC)	Χωροκεντρωμένη κυβική μορφή κελίου
Bottom Center (BC)	Κάτω νεκρό σημείο
Binder Jetting (BJ)	Μέθοδος με πίεση ακροφυσίου
Computer Aided Design (CAD)	Σχέδιο με τη βοήθεια υπολογιστή
Crossed lattice structure	Κυβική μορφή κελίου με επιπλέον πλάγιες στηρίξεις σε όλες τις έδρες του κύβου
Cubic lattice structure	Κυβική μορφή κελίου
Directed Energy Deposition (DED)	Άμεση εναπόθεση ενέργειας
Digital light Processing (DLP)	Μέθοδος επεξεργασίας με ψηφιακό φως
Electron Beam Melting (EBM)	Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων
Fused Deposition Modelling (FDM)	Εναπόθεση τηγμένου υλικού
Finite Element Method (FEM)	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
Gyroid lattice structure	Είδος πλέγματος με επιφάνειες
High Cycle Life (HCF)	Υψηλός κύκλος ζωής
Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Μέθοδος όπου με χρήση laser δημιουργείται μια περιοχή

	λιωμένου υλικού και εκεί σχηματίζεται το αντικείμενο με στρωματοποίηση
Lamination Object Manufacturing (Sheet Lamination) (LOM)	Μέθοδος κατασκευής αντικειμένου με χρήση φύλλων υλικού
Lattice optimization	Βελτιστοποίηση δομής πλέγματος
Lattice structure	Δομή πλέγματος που χρησιμοποιείται στην προσθετική μηχανική
Material Extrusion (ME)	Μέθοδος εξώθησης υλικού
Material Jetting (MJ)	Μέθοδος ψεκασμού υλικού
Meshing	Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία
Powder Bed Fusion (PBF)	Μέθοδος σύντηξης στρώματος σκόνης
Polycarbonate (PC)	Πολυανθρακικό πολυμερές
Polylactic Acid (PLA)	Πολυγαλακτικό οξύ
Polyvinyl Alcohol (PVA)	Πολυβινυλική αλκοόλη
Stereolithography (SLA)	Στερεολιθογραφία
Selective Laser Melting (SLM)	Μέθοδος επιλεκτικής τήξης με laser
Selective Laser Sintering (SLS)	Επιλεκτική σύντηξη με laser
Top Center (TC)	Άνω νεκρό σημείο
Topology Optimization (TO)	Τοπολογική βελτιστοποίηση
Ultraviolet (UV)	Υπεριώδης
Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)	Χρήση υπερήχων για την ένωση φύλλων μετάλλου
Ultrasonic Consolidation (UC)	Ενοποίηση με υπερήχους