ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΛΕΓΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ

ΟΝΟΜΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ: ΚΟΥΚΑΚΗ ΡΑΦΑΕΛΑ
Ιδιότητα Συγγραφέα: Φοιτήτρια Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών
Αριθμός Μητρώου: ΤΜ20259

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ
Ιωάννης Ντιντάκης (PhD, Msc, BEng)
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό έτος 2025-2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται κυρίως στην μελέτη και στην αξιολόγηση πλεγματικών δομών, οι οποίες αποτελούν μία από τις πιο βασικές εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής. Τα τελευταία χρόνια οι δομές πλέγματος έχουν αποτελέσει αντικείμενο ερευνητικού αλλά και βιομηχανικού ενδιαφέροντος, λόγω των πλεονεκτημάτων που μπορούν να προσφέρουν σε μία εφαρμογή. Συγκεκριμένα, η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, η ελεγχόμενη κατανομή υλικού στο εσωτερικό ενός αντικειμένου και η απορρόφηση ενέργειας είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά που καθιστούν τις πλεγματικές δομές ιδανικές σε τομείς όπως η ιατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική κ.ο.κ.

Στο πλαίσιο της εργασίας, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός και μελέτη δοκιμίων εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ASTM, στα οποία ενσωματώθηκαν δομές πλέγματος διαφορετικής τοπολογίας. Οι δομές που επιλέχθηκαν είναι οι Split-P, Gyroid, Diamond οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των TPMS γεωμετριών, δηλαδή στις τριπλά περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες. Με σκοπό την αξιολόγηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς, πραγματοποιήθηκαν τόσο αριθμητικές αναλύσεις μέσω προσομοιώσεων, όσο και πειραματικές διαδικασίες μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης και δοκιμών. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν από υλικό PLA με την μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM, με σταθερές παραμέτρους εκτύπωσης και στην συνέχεια υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης. Οι διαδικασίες αυτές πραγματοποιήθηκαν με στόχο να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά διαφορετικών πλεγματικών δομών υπό διαφορετικά σενάρια φόρτισης, καθώς και να αναλυθεί πως η επιλογή της κάθε τοπολογίας επηρεάζει την κατανομή τάσεων/παραμορφώσεων και την συνολική απόκριση των δοκιμίων.

Λέξεις κλειδιά: Προσθετική κατασκευή (AM), πλεγματικές δομές, TPMS(Triply Periodic Minimal Surfaces), πρότυπα δοκίμια ASTM,τρισδιάστατη εκτύπωση FDM, PLA, n-topology, προσομοίωση FEA, μηχανική αξιολόγηση, εφελκυσμός, κάμψη, κρούση

Abstract

This thesis in mainly based on the study and evaluation of lattice structures, which are one of the most basic applications of additive manufacturing. In recent years, lattice structures have been the subject of research and industrial interest, due to the advantages they can offer in an application. Specifically, the high strength-to-weight ratio, the controlled distribution of material inside an object, energy absorption are some of the characteristics that make lattice structures ideal in sectors such as medicine, the automotive industry, aerospace et al.

In this study, tensile, bending and impact specimens were designed and studied according to international ASTM standards, in which lattice structures of different topologies were incorporated. The structures chosen are Split-P, Gyroid and Diamond, which belong to the category of TPMS geometries, that is, triply periodic minimal surfaces. In order to evaluate their mechanical behavior, both numerical analyses through simulations and experimental procedures through 3D printing and testing were carried out. Specifically, the specimens were designed and manufactured from PLA material, using the FDM 3D printing method, with fixed printing parameters and then subjected to tensile, bending and impact tests.

These procedures were carried out with the aim of obtaining useful information about the behavior of different lattice structures under different loading conditions, as well as to analyse how the choice of each topology affects the stress/strain distribution and overall response of the specimens.

Keywords: Additive Manufacturing (AM), lattice structures, TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces), ASTM standard specimens, 3D printing FDM, PLA, n-topology, FEA simulation, mechanical evaluation, tensile, bending, impact

Περιεχόμενα

Περίληψη 2
Abstract 3
Περιεχόμενα 4
Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων 7
Εισαγωγή 8
Κεφάλαιο 1: Προσθετική Κατασκευή 9
1.1 Ορισμός 9
1.2 Ιστορική αναδρομή 10
1.3 Τρόπος λειτουργίας-Διάγραμμα κατεργασίας 13
1.4 Εφαρμογές AM 14
1.5 Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής 17
1.5.1 Μοντελοποίηση με σύντηξη εναπόθεσης (Fused Deposition Mondeling-FDM) 18
1.5.2 Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SLA) 21
1.5.3 Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS) 24
1.5.4 Άμεση σύντηξη με λέιζερ μετάλλου (Direct Metal Laser Sintering-DMLS) 27
1.5.5 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting) 30
1.3 Μελλοντικές τάσεις προσθετικής κατασκευής 33
Κεφάλαιο 2: Πλεγματικές δομές 33
2.1 Εισαγωγή στις πλεγματικές δομές-Ορισμός 33
2.2 Κατηγοριοποίηση πλεγματικών δομών 34
2.2.1 Κατάταξη με βάση τη μηχανική συμπεριφορά 34
2.2.2 Κατάταξη με βάση την τοπολογία και την γεωμετρία 35
2.2.3 Ανάλυση Κανονικών Τοπολογιών 36
2.2.4 Ανάλυση Δομών TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces) 50
2.2.5 Δομές πλέγματος κελύφους 77
2.2.6 Ανάλυση Στοχαστικών και Ακανόνιστων Δομών 77
2.2.7 Ανάλυση Τοπολογικά Βελτιστοποιημένων Δομών 79
2.3 Μηχανικές Ιδιότητες Πλεγματικών Δομών 81
2.3.1 Μηχανική συμπεριφορά υπό φόρτιση 81
2.3.2 Σχετική πυκνότητα 81
2.3.3 Απορρόφηση ενέργειας και τρόποι αστοχίας 82
2.3.4 Παράγοντες επηρεασμού των μηχανικών ιδιοτήτων 82
2.4 Πεδία εφαρμογής 82
2.5 Σύγκριση με συμπαγείς δομές-Πλεονεκτήματα και περιορισμοί 88

2.6 Προσθετική κατασκευή και πλεγματικές δομές 89
Κεφάλαιο 3: Αρχές και Μεθοδολογία Σχεδιασμού Δοκιμίων 91
3.1 Πρότυπα Δοκιμών 91
3.1.1 Πρότυπο ASTM D638 – δοκιμή εφελκυσμού 91
3.1.2 Πρότυπο ASTM D790 – Δοκίμιο κάμψης 94
3.1.3 Πρότυπο ASTM D6110-Δοκιμή κρούσης Charpy 96
3.2 Σχεδιασμός δοκιμίων-Fusion 360 101
3.2.1 Δοκίμιο εφελκυσμού ASTM D638 102
3.2.2 Δοκίμιο κάμψης ASTM D790 103
3.2.3 Δοκίμιο κρούσης ASTM D6110 104
3.3 Ορισμός περιοχών εφαρμογής φορτίων και συνοριακών συνθηκών 105
3.3.1 Δοκίμιο εφελκυσμού - Ορισμός συνοριακών συνθηκών 106
3.3.2 Δοκίμιο κάμψης - Ορισμός συνοριακών συνθηκών 107
3.3.3 Δοκίμιο κρούσης - Ορισμός συνοριακών συνθηκών 107
3.4 Ενσωμάτωση πλεγματικών δομών στο εσωτερικό δοκιμίων 108
3.4.1 Βήματα ενσωμάτωσης πλεγματικών δομών σε δοκίμιο εφελκυσμού 108
3.4.2 Βήματα ενσωμάτωσης πλεγματικών δομών σε δοκίμιο κάμψης 111
3.4.3 Βήματα ενσωμάτωσης πλεγματικών δομών σε δοκίμιο κρούσης 113
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση 116
4.1 Προσομοίωση δοκιμίου εφελκυσμού 116
4.2 Προσομοίωση δοκιμίου κάμψης 124
4.3 Προσομοίωση δοκιμίου κρούσης 130
4.4 Συμπεράσματα προσομοίωσης 137
4.4.1 Συμπεράσματα προσομοίωσης δοκιμίων εφελκυσμού 137
4.4.2 Συμπεράσματα προσομοίωσης δοκιμίων κάμψης 138
4.4.3 Συμπεράσματα προσομοίωσης δοκιμίων κρούσης 138
Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διαδικασία 139
5.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση δοκιμίων 139
5.1.1 Προετοιμασία πριν την εκτύπωση 140
5.1.2 Παράμετροι εκτύπωσης 142
5.1.3 Παραγόμενα δοκίμια 143
5.1.3.1 Δοκίμια εφελκυσμού 143
5.1.3.2 Δοκίμια κάμψης 144
5.1.3.3 Δοκίμια κρούσης 145
5.1.3.4 Συμπαγή δοκίμια 146
5.2 Πειραματικές δοκιμές 147

5.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού 147
5.2.2 Δοκιμές κάμψης 148
5.2.3 Δοκιμές κρούσης 149
5.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών 151
5.3.1 Αποτελέσματα εφελκυσμού 151
5.3.2 Αποτελέσματα κάμψης 153
5.3.3 Αποτελέσματα κρούσης 156
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα 157
Βιβλιογραφία/Αναφορές 159

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer-Aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
TPMS	Triply Periodic Minimal Surfaces
PLA	Polylactic Acid
FEA	Finite Element Analysis

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing-AM) έχει σημειώσει ραγδαία πρόοδο και αποτελεί πλέον μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες για την βιομηχανική παραγωγή. Λόγω της ικανότητάς της να κατασκευάζει εξαρτήματα με υψηλή γεωμετρική πολυπλοκότητα μέσω ψηφιακών μοντέλων, χωρίς την ανάγκη καλουπιών ή αφαιρετικών κατεργασιών, έχει καταστεί απαραίτητη για την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων σε βασικούς τομείς της σημερινής εποχής, όπως για παράδειγμα στην αεροδιαστημική, στην ιατρική και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η εν λόγω τεχνολογία βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με προσθήκη υλικού σε στρώσεις, γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή εξαρτημάτων με μειωμένο βάρος και υλικό, υψηλή αντοχή και λειτουργικότητα και εξαρτημάτων τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν σε εξατομικευμένες ανάγκες. Η προσθετική κατασκευή, δομείται από ένα σύνολο διαφορετικών τεχνολογιών (π.χ. FDM, SLA, SLS), οι οποίες μπορούν να καλύψουν ποικίλες ανάγκες παραγωγής και σχεδίασης.

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής είναι η δυνατότητα της να αναπτύσσει και να υλοποιεί πλεγματικές δομές. Οι πλεγματικές δομές (lattice structures) είναι τρισδιάστατα μορφολογικά πρότυπα με επαναλαμβανόμενες γεωμετρικές μονάδες, οι οποίες ενσωματώνονται σε αντικείμενα που κατασκευάζονται μέσω της προσθετικής κατασκευής. Ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής (π.χ. δυσκαμψία, μειωμένο βάρος), επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος πλεγματικών δομών. Η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση την γεωμετρία και την τοπολογία τους.

Στην συγκεκριμένη μελέτη, επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές δομές πλέγματος, οι Split-p, Gyroid και Diamond, οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των τριπλά περιοδικών ελάχιστων επιφανειών (TPMS). Οι δομές αυτές είναι γνωστές για τα μοναδικά χαρακτηριστικά τους και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν ιδίως στον σχεδιασμό υλικών μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Οι TPMS δομές χαρακτηρίζονται από συνεχή (μη διακοπτόμενη) επιφάνεια, υψηλή αναλογία επιφάνειας/όγκου και αυξημένη ισοτροπία, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για μηχανολογικές και βιομιμητικές εφαρμογές.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των δομών TPMS που επιλέχθηκαν. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν τρία πρότυπα δοκίμια μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης, στα οποία ενσωματώθηκαν οι πλεγματικές δομές. Τα δοκίμια επιλέχθηκαν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ASTM και σχεδιάστηκαν με βάση την γεωμετρία και τις διαστάσεις που αναλύονται στην βιβλιογραφία. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ενσωμάτωση των δομών στο εσωτερικό των δοκιμίων, ακολουθώντας κοινή μεθοδολογία και σταθερές γεωμετρικές παραμέτρους, ώστε η σύγκριση να βασίζεται στην διαφορετική τοπολογία των δομών.

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση (προσομοίωση) σε κάθε δοκίμιο, έτσι ώστε να αποτυπωθεί η κατανομή τάσεων/παραμορφώσεων στο εσωτερικό και να εντοπιστούν τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων και αστοχίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αποτέλεσαν μία πρώτη ερμηνεία της μηχανικής συμπεριφοράς των πλεγματικών δομών υπό διαφορετικούς τύπους φόρτισης.

Τελευταίο στάδιο της εργασίας, αποτέλεσε η πειραματική διαδικασία, κατά την οποία παράχθηκαν τα δοκίμια μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης (FDM) και υποβλήθηκαν σε μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης. Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα και τα πειραματικά δεδομένα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των TPMS δομών, και προέκυψαν συμπεράσματα για την επίδραση της γεωμετρίας τους στην συνολική απόκριση και καταπόνηση των δοκιμίων.

Κεφάλαιο 1: Προσθετική Κατασκευή

1.1 Ορισμός

Η προσθετική κατασκευή (AM), είναι όρος που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια, καθώς η αρχική ονομασία ήταν ταχεία πρωτοτυποποιήση (rapid prototyping). Η προσθετική κατασκευή γνωστή και ως τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία σύγχρονη τεχνολογία που βασίζεται στην δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με προσθήκη υλικού κατά στρώσεις. Στην ουσία, πρόκειται για μία μέθοδο κατασκευής κατά την οποία το τελικό αντικείμενο δεν σχηματίζεται με αφαίρεση ή διαμόρφωση υλικού αλλά χτίζεται σταδιακά βάσει ενός ψηφιακού μοντέλου CAD (Computer Aided Design). Σε αντίθεση με τις αφαιρετικές κατασκευές όπου γίνεται αφαίρεση υλικού από μία αρχική μάζα (π.χ. τόρνος ή φρέζα), στην προσθετική κατασκευή κατασκευάζονται αντικείμενα εκ του μηδενός, επιτρέποντας την δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1.1 κατά την παραδοσιακή κατασκευή ακολουθείται μία πορεία η οποία περιλαμβάνει προμήθεια υλικών, κατασκευή, συναρμολόγηση και διανομή. Αντιθέτως, με την τρισδιάστατη εκτύπωση η κατασκευή βασίζεται σε ψηφιακό σχεδιασμό και άμεση παραγωγή, χωρίς να υπάρχουν ενδιάμεσα στάδια όπως είναι η συναρμολόγηση.



Σχήμα 1.1.1 *Σύγκριση μεταξύ της παραδοσιακής κατασκευής και της προσθετικής κατασκευής*

Η προσθετική κατασκευή δίνει την δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων με ιδιαίτερη και σύνθετη μορφολογία, καθώς βασίζεται στην αθροιστική εναπόθεση υλικού σε καθορισμένα σημεία. Σκοπός της τεχνολογίας αυτής είναι η δημιουργία σύνθετων γεωμετριών ή ειδικών εσωτερικών δομών, οι οποίες θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να δημιουργηθούν με άλλες συμβατικές τεχνολογίες. Η πολυστρωματική εναπόθεση υλικού προσδίδει ένα

σημαντικό αριθμό πλεονεκτημάτων, συμπεριλαμβανομένης και της ελευθερίας σχηματισμού πολύπλοκων δομών, τη χρήση σχεδόν 100% του υλικού και το μικρό χρόνο παραμονής.

Με την τεχνολογία ΑΜ μπορούν να παραχθούν τόσο συμπαγή εξαρτήματα όσο και κυψελοειδείς δομές ή δομές πλέγματος, οι οποίες είναι ιδανικές σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό βάρος και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Επίσης, η ΑΜ εξυπηρετεί την παραγωγή κατά παραγγελία καθώς και την εξατομίκευση γεγονός που την καθιστά χρήσιμη στην ανάπτυξη και την έρευνα.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3DP), η άμεση ψηφιακή κατασκευή (DMM), η ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων (RP), η ταχεία κατασκευή (RM) και η σταθερά ελεύθερη κατασκευή (SFF), είναι ορολογίες που μπορούν χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή διαδικασιών ΑΜ. Η προσθετική κατασκευή μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί ως μία τεχνική ανάμειξης υλικών είτε με στερεοποίηση υλικών όπως σκόνες και υγρή ρητίνη είτε με σύντηξη ή σύνδεση.

Συμπερασματικά, η ευελιξία που προσφέρει η προσθετική κατασκευή στον σχεδιασμό, ο ελάχιστος χρόνος πρωτοτυποποίησης αλλά και η δυνατότητα προσωποποιημένης παραγωγής, την καθιστούν επαναστατική στην σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή. Η μέθοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ένας σύγχρονος τρόπος υλοποίησης ιδεών σε πραγματικά αντικείμενα ενώ έχει δώσει την δυνατότητα μεταφοράς της παραγωγής από την βιομηχανία στον χρήστη, με την χρήση ενός σχεδίου και του κατάλληλου εκτυπωτή.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η ΑΜ έκανε την εμφάνιση της την δεκαετία του 1980, μία περίοδο που η τεχνολογία είχε ραγδαία ανάπτυξη και η ανάγκη για νέους και αποδοτικότερους τρόπους παραγωγής ήταν εμφανής. Τότε, άρχισε να αναπτύσσεται η ιδέα για παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω υπολογιστικών μοντέλων, χωρίς την χρήση καλουπιών ή άλλων παραδοσιακών μεθόδων κατεργασίας.

Για την ακρίβεια, η πρώτη επίσημη γραπτή αναφορά προσθετικής κατασκευής με τρισδιάστατη εκτύπωση τοποθετείται στο 1971, από τον Johannes F. Gottwald[1]. Στην αναφορά, παρουσιάστηκε μία συσκευή η οποία θα τοποθετούσε σε στρώσεις λιωμένο μέταλλο, με σκοπό την δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Παρότι, η προσέγγιση αυτή δεν υλοποιήθηκε εμπορικά, ο Gottwald κατάφερε να θεμελιώσει θεωρητικά την βάση της προσθετικής κατασκευής με τρισδιάστατη εκτύπωση.

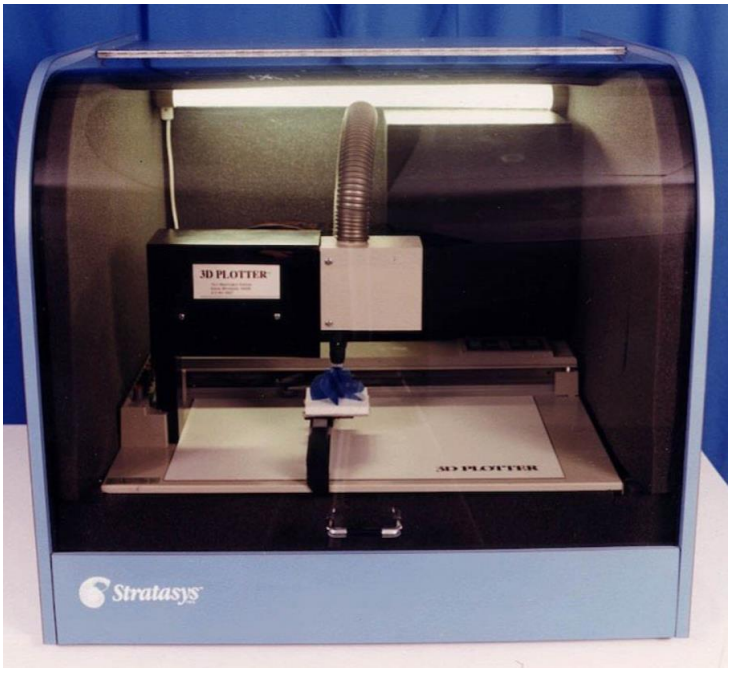
Η πρώτη πρακτική εφαρμογή προσθετικής κατασκευής καταγράφηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1986 από τον Charles Hull [2], ο οποίος επινόησε για πρώτη φορά την ιδέα το 1983, όταν χρησιμοποίησε υπεριώδη ακτινοβολία για να σκληρύνει επιστρώσεις επιτραπέζιων επιφανειών. Ο ίδιος κατάφερε εκείνη την περίοδο να ιδρύσει την εταιρεία 3D Systems και να παρουσιάσει στην αγορά τον πρώτο εμπορικό εκτυπωτή με όνομα SLA-1 (σχήμα 1.2.1).



Σχήμα 1.2.1 *Πρώτος εκτυπωτής SLA (SLA-1)*

Την ίδια δεκαετία και συγκεκριμένα το 1987 ο φοιτητής Carl Deckard με την βοήθεια του καθηγητή του Joe Beaman, στο πανεπιστήμιο του Τέξας ανέπτυξαν την τεχνολογία επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS), με στόχο τη σύντηξη κονιοποιημένων υλικών με χρήση λέιζερ [3]. Την ίδια περίοδο, πήρε άδεια χρήσης της τεχνολογίας από το UT Austin και συνίδρυσε την Desk Top Manufacturing (DTM) για εμπορική ανάπτυξη [4].

Ένα χρόνο μετά, το 1989 ακολουθεί η μοντελοποίηση με σύντηξη εναπόθεσης (FDM) από τον Scott Crump [5], ο οποίος χρησιμοποιεί θερμοπλαστικό για να κατασκευάσει ένα παιχνίδι για την κόρη του. Ο Crump κατάφερε μέσα σε ένα χρόνο να ιδρύσει μαζί με την σύζυγό του την Stratasys Inc. και να κατοχυρώσει την ιδέα, ενώ το 1991 κυκλοφορεί τον πρώτο της εκτυπωτή με βάση την FDM τεχνολογία (σχήμα 1.2.2).



Σχήμα 1.2.2 *Πρώτος εκτυπωτής FDM της εταιρείας Stratasys Inc.*

Το 1997 εμφανίζεται ένας νέος τύπος προσθετικής κατασκευής, η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM) η οποία εντάσσεται στις τεχνολογίες με βάση την κλίνη σκόνης και κυκλοφόρησε στην αγορά από την Arcam AB Corporation [6]. Σχεδόν ένα χρόνο μετά, το 1998 ιδρύεται η Objet Geometries από τους Rami Bonen et al.[7] στο Ισραήλ, η οποία θα εισαγάγει την τεχνολογία εκτύπωσης PolyJet 3D.

Με την πάροδο των χρόνων, η προσθετική κατασκευή άρχισε να αποκτά μεγάλη απήχηση κυρίως στην βιομηχανία. Η δεκαετία του 2000 ήταν μία περίοδος που η έρευνα επεκτάθηκε σημαντικά, και αναπτύχθηκαν νέα υλικά εκτύπωσης, γεγονός που έδωσε την δυνατότητα παραγωγής λειτουργικών εξαρτημάτων.

Παράλληλα, έκαναν την εμφάνισή τους στην αγορά εκτυπωτές με χαμηλότερο κόστος οι οποίοι ήταν κατάλληλοι για προσωπική χρήση και μικρά εργαστήρια. Το 2000 η MCP HEK GmbH στην Γερμανία εισήγαγε την τεχνολογία της επιλεκτικής τήξης με λέιζερ SLM (Selective laser melting). Τον Απρίλιο του 2001 η 3D Systems κάνει μια μεγάλη επενδυτική κίνηση αγοράζοντας έναντι 45 εκατομμυρίων δολαρίων την DTM Inc. Η 3D Systems γίνεται η εταιρία η οποία κατέχει πλέον τις δύο διαφορετικές τεχνολογίες της ΤΕ, την SLA και SLS και αναλαμβάνει ηγετική θέση στο χώρο.

Σημαντικό ρόλο στην ιστορία της προσθετικής κατασκευής έχει το ακαδημαϊκό έργο του Adrian Bowyler, ο οποίος το 2005 ίδρυσε το RepRap (Replicating Rapid Prototyper) [8] . Το RepRap είναι ένα αυτοαναπαραγόμενο σύστημα κατασκευής, το οποίο έχει την ικανότητα να κατασκευάζει μόνο του τα εξαρτήματά του και θεωρείται μία από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις στον τομέα της προσθετικής κατασκευής με τρισδιάστατη εκτύπωση. Επίσης, την ίδια χρονιά η Z Corporation κυκλοφόρησε το Spectrum Z510 (σχήμα 1.2.3), τον πρώτο υψηλής ποιότητας έγχρωμο τρισδιάστατο εκτυπωτή [9].



Σχήμα 1.2.3 *Πρώτος έγχρωμος τρισδιάστατος εκτυπωτής υψηλής ευκρίνειας*

Το 2009, ιδρύεται η MakerBot Industries από τους Pettis et al. [10], η οποία εντάσσει στην αγορά τον MakerBot Cupcake CNC ένας φιλικός προς το περιβάλλον εκτυπωτής βασισμένος στην τεχνολογία FDM. Δύο χρόνια αργότερα η Formlabs παρουσιάζει τον πρώτο μικρού μεγέθους επιτραπέζιο εκτυπωτή στερεολιθογραφίας, με ονομασία Form 1 καταρρίπτοντας την θεωρία ότι η SLA είναι για βιομηχανική χρήση [11].

Η εξέλιξη της προσθετικής κατασκευής μέσα στις δεκαετίες υπήρξε ραγδαία και πολυεπίπεδη. Από τις πρώτες τεχνολογικές εφαρμογές της τη δεκαετία του 1980, έως τη μαζική εμπορική της διάδοση μετά το 2005, η προσθετική κατασκευή κατάφερε να μετατραπεί από μια εξειδικευμένη μέθοδο πρωτοτυποποίησης σε βασικό εργαλείο παραγωγής για δεκάδες κλάδους. Η ανάπτυξη επιτραπέζιων εκτυπωτών, η πρόοδος σε υλικά και λογισμικό, καθώς και η εμπλοκή μεγάλων εταιρειών, συνέβαλαν αποφασιστικά στην εξάπλωσή της.

Σήμερα, η τεχνολογία αυτή δεν περιορίζεται μόνο σε βιομηχανικές ή μηχανολογικές εφαρμογές· έχει φτάσει στο σημείο να χρησιμοποιείται ακόμη και στον τομέα της ιατρικής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη βιοεκτύπωση ανθρώπινων ιστών, ανοίγοντας νέους δρόμους για το μέλλον της εξατομικευμένης υγειονομικής περίθαλψης. Η προσθετική κατασκευή εξελίσσεται διαρκώς, καθιστώντας την μία από τις πλέον καινοτόμες και επαναστατικές τεχνολογίες της σύγχρονης εποχής.

1.3 Τρόπος λειτουργίας-Διάγραμμα κατεργασίας

Η προσθετική κατασκευή ανεξαρτήτως της τεχνολογίας που πρόκειται να εφαρμοστεί, ακολουθεί μία συγκεκριμένη διαδικασία η οποία αποτελείται από προκαθορισμένα στάδια. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά στάδια:

1. **Σχεδίαση ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου**

Το πρώτο βήμα για την παραγωγή ενός αντικειμένου με προσθετική κατασκευή είναι η τρισδιάστατη σχεδίασή του μέσω ενός λογισμικού σχεδίασης CAD (Computer Aided Design). Στο σχέδιο αυτό θα πρέπει να καθοριστεί το ακριβές σχήμα, οι εσωτερικές δομές, οι διαστάσεις, οι ανοχές ενώ παράλληλα είναι βασικό να μην υπάρχουν σφάλματα καθώς θα επηρεάσουν το τελικό προϊόν που πρόκειται να εκτυπωθεί.

2. **Εισαγωγή αρχείου STL σε σχετικό λογισμικό (slicer)**

Εφόσον το αντικείμενο σχεδιαστεί στο κατάλληλο πρόγραμμα, θα πρέπει το ψηφιακό μοντέλο να μετατραπεί σε αρχείο STL (Standard Template Library), δηλαδή να γίνει περιγραφή του μοντέλου με τριγωνικά πλέγματα και να παραλειφθούν τα μη απαραίτητα στοιχεία (χρώματα, υφές κ.ο.κ). Κατόπιν, ακολουθεί η εισαγωγή του αρχείου σε σχετικό λογισμικό τεμαχισμού (slicer), όπου το μοντέλο αναλύεται σε στρώσεις

3. **Επεξεργασία αρχείου-επιλογές ρυθμίσεων**

Κατόπιν, ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει τις κατάλληλες παραμέτρους ώστε να μην δημιουργηθεί κάποιο λάθος κατά την εκτύπωση. Οι πιο βασικές παράμετροι είναι η ταχύτητα και η θερμοκρασία εκτύπωσης, το πάχος στρώσης (layer height), η ροή αέρα, το ποσοστό πλήρωσης μοντέλου (infill), καθώς και η δημιουργία στηριγμάτων (supports).

4. **Δημιουργία κώδικα G-code-Επικοινωνία με εκτυπωτή**

Στην συνέχεια, το αρχείο εξάγεται σε μορφή G-κώδικα (G-Code), δηλαδή σε ένα σύνολο εντολών, οι οποίες θα καθοδηγήσουν την κίνηση του εκτυπωτή και θα ρυθμίσουν τις λειτουργίες του. Αφού γίνει εξαγωγή G-κώδικα, το επόμενο βήμα είναι η επικοινωνία με τον εκτυπωτή (3D printer), μέσω USB, κάρτας SD ή δικτύου.

5. **Εκτύπωση**

Έπειτα, ξεκινάει η διαδικασία της εκτύπωσης η οποία πραγματοποιείται με απόθεση υλικού σε στρώσεις. Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την τεχνολογία που θα επιλέξει ο χρήστης και κατ' επέκταση τον εκτυπωτή που θα εκτελέσει την διαδικασία. Η ταχύτητα εκτύπωσης εξαρτάται από τις παραμέτρους που έχουν οριστεί σε προηγούμενο στάδιο, δηλαδή από το πάχος στρώσης, το υλικό, την θερμοκρασία κ.λπ. Ενώ, η διάρκεια εκτύπωσης είναι ανάλογη με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, τις δυνατότητες του εκτυπωτή, το υλικό. Ο χρόνος εκτύπωσης, είναι μία λεπτομέρεια την οποία ο χρήστης μπορεί να γνωρίζει πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας, από το λογισμικό τεμαχισμού που αναφέρθηκε σε προηγούμενο στάδιο.

6. **Επεξεργασία μοντέλου**

Μετά την εκτύπωση ακολουθεί ένα εξίσου σημαντικό στάδιο που αφορά την επεξεργασία του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει καθαρισμό υπολειμμάτων, αφαίρεση υποστηρίξεων χειρωνακτικά ή με την βοήθεια κατάλληλων εργαλείων, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί θερμική επεξεργασία για την βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του αντικειμένου. Επίσης, το τελικό αντικείμενο μπορεί να υποβληθεί σε

τεχνικές φινιρίσματος (λείανση, βαφή, επίστρωση με κατάλληλα υλικά), ενώ κάποιες εφαρμογές απαιτούν ποιοτικό ή διαστασιολογικό έλεγχο, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το τεμάχιο πληροί τις προδιαγραφές.

7. Έτοιμο προϊόν

Με την ολοκλήρωση των προηγούμενων σταδίων, το αντικείμενο είναι πλέον δυνατό να χαρακτηριστεί ως έτοιμο προϊόν. Αυτό σημαίνει έχει ολοκληρωθεί μορφολογικά, λειτουργικά και μηχανικά και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό τον οποίο κατασκευάστηκε.

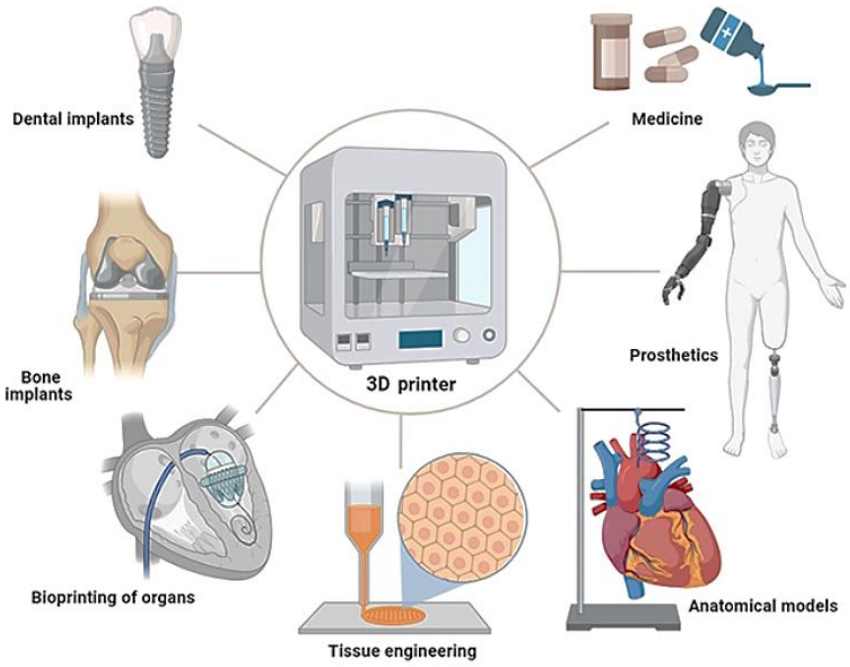
Η προσθετική κατασκευή είναι μια διαδικασία που περνάει από διάφορα βήματα, ξεκινώντας από την ψηφιακή σχεδίαση του αντικειμένου και φτάνοντας στην παραγωγή ενός έτοιμου προϊόντος. Κάθε βήμα είναι σημαντικό για το τελικό αποτέλεσμα, τόσο στην ποιότητα όσο και στη λειτουργία. Καθώς οι τεχνολογίες προχωρούν, αυτή η διαδικασία συνεχώς βελτιώνεται, κάνοντάς την πιο ακριβή και γρήγορη, αλλά και ικανή να φτιάχνει πιο περίπλοκα αντικείμενα. Αν κατανοήσουμε αυτή την αλυσίδα, μπορούμε να εκτιμήσουμε καλύτερα πού μπορεί να εφαρμοστεί η προσθετική κατασκευή σε διάφορους τομείς.

1.4 Εφαρμογές AM

Στην σημερινή εποχή, η προσθετική κατασκευή αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στον κλάδο της βιομηχανίας και της επιστήμης καθώς έχει την δυνατότητα να κατασκευάζει σύνθετες γεωμετρίες χωρίς να καταναλώνει μεγάλη ποσότητα υλικού. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι σχεδόν αναγκαία σε τομείς όπως η ιατρική και η βιοϊατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η αεροναυπηγική κ.ο.κ. Συγκεκριμένα:

1. Ιατρική και βιοϊτρική

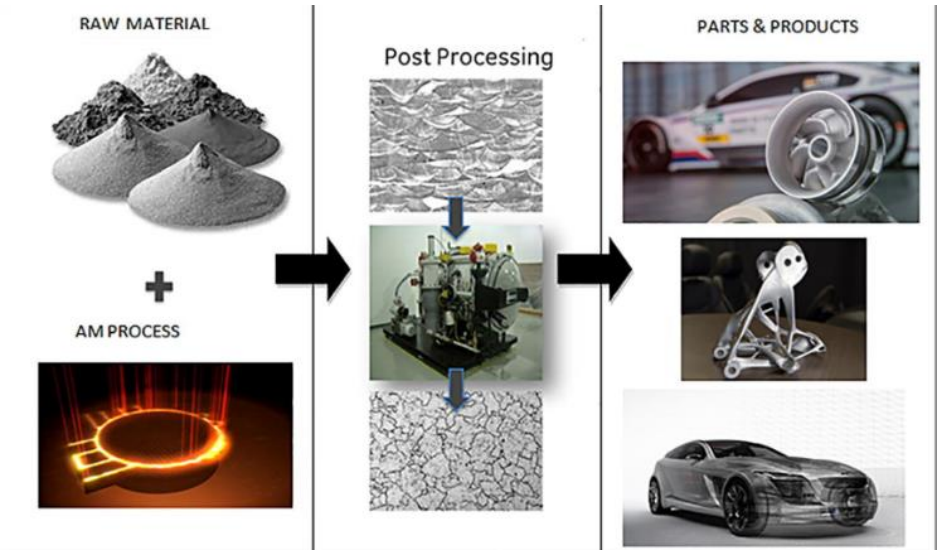
Με την προσθετική κατασκευή μπορούν να κατασκευαστούν προσθετικά μέλη, οδοντιατρικά εμφυτεύματα καθώς και ορθοπεδικά υποστηρίγματα με την βοήθεια εικόνων αξονικής τομογραφίας για την καλύτερη απεικόνιση συγκεκριμένων ανατομιών. Είναι επίσης χρήσιμη στον προεγχειρητικό σχεδιασμό γεγονός που βοηθάει τους γιατρούς και τους εκπαιδευόμενους να αναπαραστήσουν χειρουργικές επεμβάσεις και να επιλύσουν κάθε πιθανό πρόβλημα πριν από την επέμβαση του ασθενούς. Παράλληλα, έχει αναπτυχθεί και η βιοεκτύπωση στην οποία χρησιμοποιούνται ζωντανά κύτταρα και βιοϋλικά, με σκοπό την παραγωγή ιστών και οργάνων. Η ανάπτυξη αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει δώσει την δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων υγείας που μέχρι πρότινος θεωρούνταν αδύνατον να επιλυθούν.



Σχήμα 1.4.1 *Εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής στον κλάδο της βιοϊατρικής [12]*

2. Αυτοκινητοβιομηχανία

Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς επιτρέπει την παραγωγή ελαφρύτερων και πιο αποδοτικών εξαρτημάτων, επομένως βοηθάει στην μείωση βάρους των τελικών οχημάτων. Κατά αυτόν τον τρόπο, βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση και ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές ρύπων. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για την δημιουργία πρωτοτύπων, άρα επιτρέπει την ταχύτερη εξέλιξη σχεδίων και επομένως την γρήγορη είσοδο τους στην αγορά. Τέλος, η τρισδιάστατη εκτύπωση μέσω της συνεχούς εξέλιξής της δίνει την δυνατότητα κατασκευής ανθεκτικών κινητήρων και εξαρτημάτων μετάδοσης, και ταυτόχρονα βελτιώνει την απόδοση και την ασφάλεια με τα βελτιστοποιημένα σχέδια.



Σχήμα 1.4.2 *Εφαρμογή της προσθετικής κατασκευής στην αυτοκινητοβιομηχανία [13]*

3. Αεροδιαστημική και αεροναυπηγική

Επίσης, η προσθετική κατασκευή επηρεάζει σημαντικά τον κλάδο της αεροδιαστημικής και της αεροναυπηγικής βιομηχανίας καθώς είναι ιδανική για την κατασκευή ανθεκτικών και ελαφριών εξαρτημάτων, τα οποία μπορούν να αντέξουν σε σκληρές συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες κ.λπ). Με την δυνατότητα σχεδιασμού πολύπλοκων γεωμετριών αλλά και την ικανότητα κατασκευής μεταλλικών μερών (π.χ. τιτάνιο), μπορούν να παραχθούν σωλήνες, πτερύγια αεροκινητήρων καθώς και υποσυστήματα που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους. Επιπρόσθετα, η μείωση βάρους σημαίνει μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και καλύτερη απόδοση. Σύμφωνα με τους Raja et al. [14] αποδείχθηκε ότι οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής μπορούν να αυξήσουν την παραγωγικότητα του αεροδιαστημικού τομέα με διάφορους τρόπους. Συγκεκριμένα:

- Μείωση του χρόνου παραγωγής προϊόντων κατά 30%-70%
- Μείωση του κόστους παραγωγής κατά 30%-35% για εξαρτήματα χαμηλού όγκου παραγωγής
- Μείωση των μη επαναλαμβανόμενων εξόδων παραγωγής(κόστος σχεδιασμού, ανάπτυξη πρωτοτύπων, δημιουργία καλουπιών κ.ο.κ.) έως και 45%



Σχήμα 1.4.3 *Τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στον τομέα της αεροδιαστημικής [15]*

4. Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική είναι επίσης ένας κλάδος στον οποίο χρησιμεύει η τρισδιάστατη εκτύπωση. Τα αρχιτεκτονικά μοντέλα απαιτούν χειροκίνητη προσπάθεια και χρόνο λόγω των περίπλοκων γεωμετριών που απαιτούνται για την υλοποίηση ιδεών σε φυσική μορφή. Με την προσθετική κατασκευή διευκολύνεται η κατασκευή μακετών, καλουπιών καθώς και ολόκληρων δομικών στοιχείων γεγονός που δίνει λύση στην ανάγκη για ταχύτερη και πιο ακριβή απεικόνιση αρχιτεκτονικών σχεδίων.



Σχήμα 1.4.4 *Τρισδιάστατη εκτύπωση μακέτας με σκοπό την απεικόνιση αρχιτεκτονικού σχεδίου [16]*

5. Κοσμηματοποιία

Η προσθετική κατασκευή έχει ενταχθεί και στον τομέα της κοσμηματοποιίας, προσφέροντας την δυνατότητα σχεδιασμού και παραγωγής ιδιαίτερων κοσμημάτων. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι πλέον εφικτό να παραχθούν πολύπλοκα και λεπτομερή τεμάχια τα οποία θα ήταν δύσκολο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές τεχνικές. Επίσης, η διαδικασία αυτή επιτρέπει την εξατομίκευση σχεδίων καλύπτοντας τις ανάγκες και τις προτιμήσεις του πελάτη. Τέλος, με την διαδικασία αυτή παρατηρείται μείωση του χρόνου και του κόστους

παραγωγής ενώ παράλληλα ελαχιστοποιείται και το υλικό καθώς χρησιμοποιείται μόνο η απαραίτητη ποσότητα μετάλλου ή ρητίνης.



Σχήμα 1.4.5 *Παραγωγή κοσμημάτων με την μέθοδο προσθετικής κατασκευής [17]*

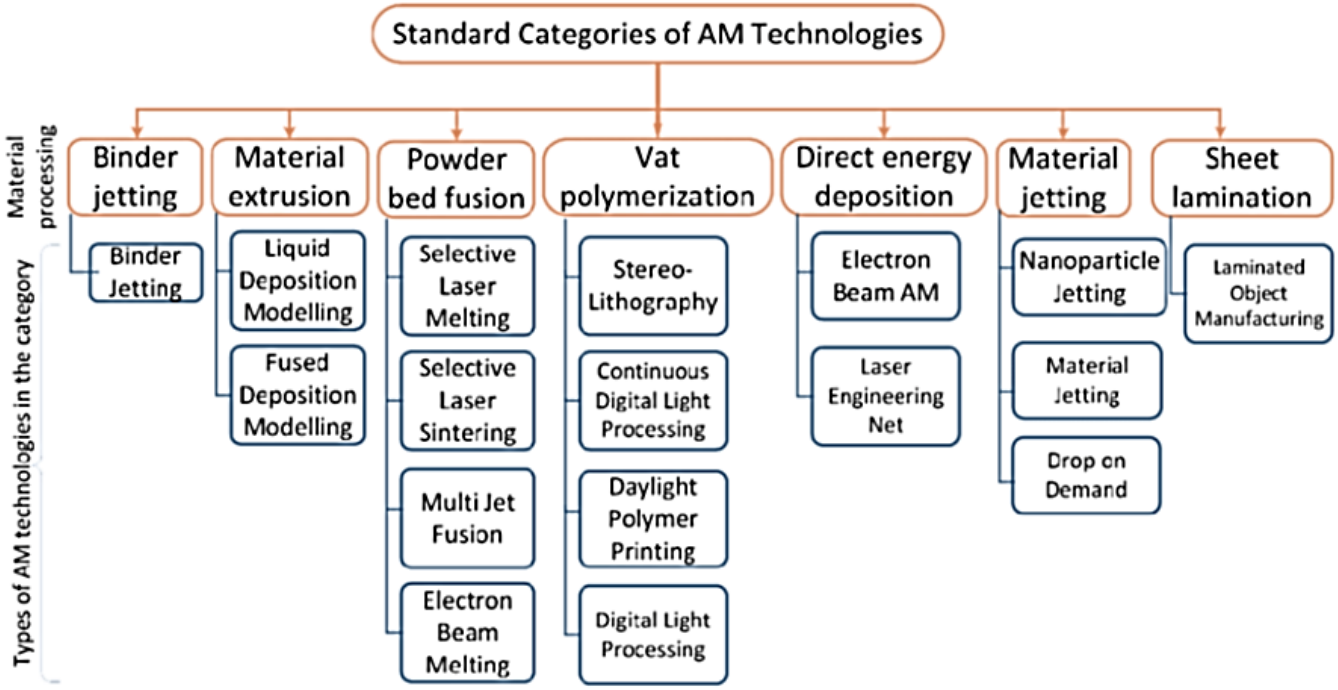
6. Εκπαίδευση και έρευνα

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει προσφέρει πολλά και στον τομέα της εκπαίδευσης και της έρευνας. Είναι μία διαδικασία που χρησιμοποιείται αρκετά πλέον στα πανεπιστήμια και τα ερευνητικά κέντρα καθώς οι φοιτητές έχουν την ανάγκη να υλοποιήσουν τις ιδέες τους και να κατασκευάσουν πραγματικά μοντέλα. Επιπλέον, είναι χρήσιμη για την παραγωγή πρωτοτύπων και νέων υλικών, γεγονός που διευκολύνει την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών με μειωμένο κόστος και χρόνο.

Η γρήγορη εξάπλωση της 3D εκτύπωσης σε πολλές βιομηχανίες και τομείς δείχνει πόσο προσαρμοστική είναι και πώς συνεχώς εξελίσσεται. Από την υγειονομική περίθαλψη μέχρι την αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική, η δυνατότητα να σχεδιάζουμε και να φτιάχνουμε περίπλοκα κομμάτια με ακρίβεια και ταχύτητα, και χωρίς πολλά απόβλητα, την κάνει έναν σημαντικό παράγοντα στη σύγχρονη παραγωγή. Καθώς η καινοτομία προχωρά και τα κόστη για τον εξοπλισμό μειώνονται, σίγουρα η 3D εκτύπωση θα βρει ακόμα περισσότερες εφαρμογές, προσφέροντας λύσεις σε υπάρχοντα προβλήματα αλλά και σε νέες προκλήσεις του μέλλοντος.

1.5 Τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής

Η προσθετική κατασκευή αποτελείται από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, οι οποίες διαφοροποιούνται με βάση το υλικό και τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται οι στρώσεις κατά την εκτύπωση. Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO/ASTM 52900 [18], οι τεχνολογίες χωρίζονται σε επτά κύριες κατηγορίες (σχήμα 1.5.1): εξώθηση υλικού (Material Extrusion), φωτοπολυμερισμός δεξαμενής (Vat Photopolymerization), σύντηξη κλίνης σκόνης (Powder Bed Fusion), εκτόξευση υλικού (Material Jetting), εκτόξευση συνδετικού υλικού (Binder Jetting), κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition) και επικόλληση φύλλων (Sheet Lamination). Η κάθε τεχνολογία χρησιμοποιεί ξεχωριστό μηχανισμό τροφοδοσίας και εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς και ανάγκες σε επίπεδο υλικών, εφαρμογών και κόστους.



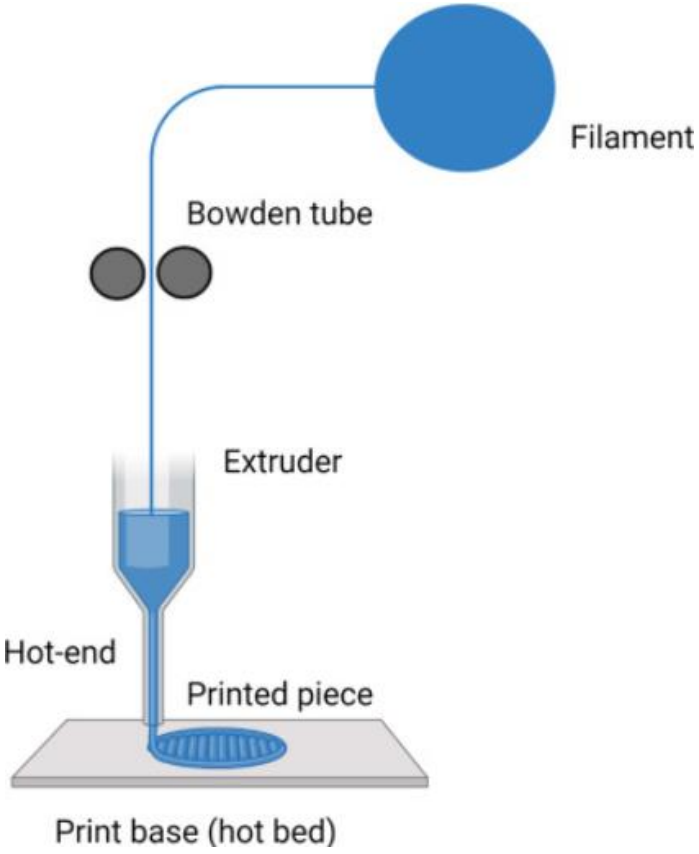
Σχήμα 1.5.1 *Κατηγορίες τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής*

Παρά το γεγονός, ότι κάθε τεχνολογία βασίζεται στην κατασκευή ενός αντικειμένου με προσθήκη υλικού σε στρώσεις, έχουν επινοηθεί και αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνολογίες ώστε να εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες σε κάθε επίπεδο. Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναλυθούν οι πιο σημαντικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, οι οποίες χρησιμοποιούνται παγκοσμίως στην βιομηχανία αλλά και στην έρευνα. Οι τεχνολογίες αυτές είναι η μοντελοποίηση με σύντηξη εναπόθεσης (FDM), η στερεολιθογραφία (SLA), η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), η άμεση σύντηξη με λέιζερ μετάλλου (DMLS), καθώς και η εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder jetting).

1.5.1 Μοντελοποίηση με σύντηξη εναπόθεσης (Fused Deposition Mondeling-FDM)

Η τεχνολογία FDM αποτελεί μία τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, και συγκεκριμένα συγκαταλλέγεται στην κατηγορία της θερμοπλαστικής εξώθησης. Στην πραγματικότητα, είναι μία διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης στην οποία χρησιμοποιείται ένα συνεχές νήμα θερμοπλαστικού υλικού ή ελαστομερούς. Η μέθοδος είναι η εξής:

1. Το υλικό τοποθετείται στον μηχανισμό εξώθησης. Το νήμα είναι σε στερεά μορφή καθώς βοηθά η ψύκτρα σε αυτό, έως το σημείο που είναι επιθυμητό να διαμορφωθεί.
2. Το υλικό αφού εισέλθει στο θερμαινόμενο ακροφύσιο το οποίο κινείται στο επίπεδο x-y περνάει στην ιξωδοελαστική του κατάσταση και εναποτίθεται στην τράπεζα της μηχανής σε λεπτές στρώσεις, αποτυπώνοντας την πρώτη διατομή.
3. Το υλικό στερεοποιείται αρκετά γρήγορα λόγω της θερμοκρασίας τράπεζας.
4. Στην συνέχεια η κεφαλή τοποθετεί την δεύτερη στρώση, και έτσι το αντικείμενο χτίζεται στρώση-στρώση με τυπικά πάχη 0.1–0.3 mm ανά στρώση.
5. Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή, η κεφαλή μετακινείται, η πλατφόρμα ψύχεται και το αντικείμενο αποκολλάται για επεξεργαστεί κατάλληλα.



Σχήμα 1.5.1.1 *Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας FDM [19]*

Υλικά FDM

Η επιλογή του σωστού υλικού για την τεχνολογία FDM, εξαρτάται από τις ανάγκες της εφαρμογής. Οι παράγοντες από τους οποίους καθορίζεται το υλικό, είναι κυρίως η αντοχή, η ανθεκτικότητα, η ευκαμψία, η ευκολία στην επεξεργασία καθώς και η χημική σύσταση. Συνήθως, επιλέγονται θερμοπλαστικά πολυμερή, τα οποία έχουν την ικανότητα να τήκονται και να στερεοποιούνται χωρίς να αλλάξει η δομή τους.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πιο κοινών υλικών που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία FDM:

Υλικό	**Ιδιότητες**	**Θερμοκρασία εκτύπωσης**
PLA	Βιοδιασπώμενο, εύκολο στην χρήση	190-220°C
ABS	Ανθεκτικό, υψηλή αντοχή	220-250°C
PETG	Καλή αντοχή και ευκαμψία, χημική αντοχή	220-245°C
TPU	Ευκαμψία, αντοχή σε κάμψη	220-240°C
PC	Θερμοκρασιακή αντοχή, δύσκολο στην εκτύπωση	250-280°C
Nylon	Αντοχή και εφελκυσμό, μικρός συντελεστής τριβής	240-260°C

Πίνακας 1.5.1.1 *Πίνακας υλικών που χρησιμοποιούνται στην FDM*

Εφαρμογές FDM

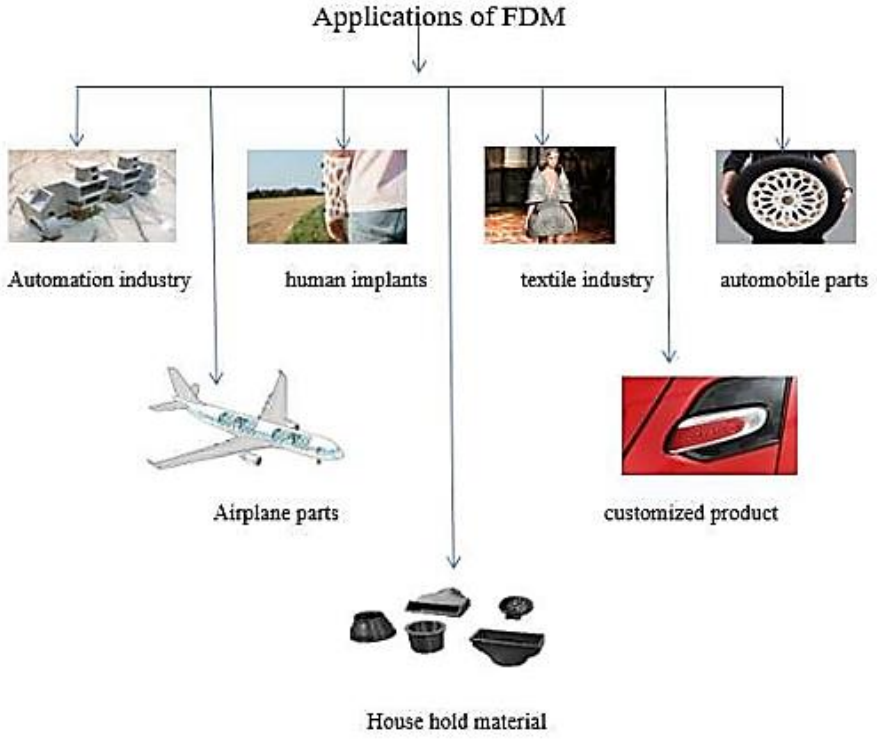
Η τεχνολογία FDM εφαρμόζεται σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, της ιατρικής και της αρχιτεκτονικής καθώς είναι εύκολη στην χρήση και το κόστος είναι χαμηλό. Αρχικά, χρησιμοποιείται στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, όπως η Formula 1 και η NASCAR με σκοπό την ανάπτυξη και την βελτιστοποίηση των οχημάτων τους. Είναι ιδανική για την ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων και εξαρτημάτων κατάλληλα για δοκιμές γεγονός

που ελαχιστοποιεί τον χρόνο και το κόστος ανάπτυξης. Επιπλέον, το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η κατασκευή ελαφριών και αεροδυναμικά αποδοτικών εξαρτημάτων, χαρακτηριστικά απαραίτητα για τον μηχανοκίνητο αθλητισμό.

Μία ακόμα βασική εφαρμογή της FDM είναι στον τομέα της αεροδιαστημικής καθώς έχει την δυνατότητα παραγωγής ελαφριών εξαρτημάτων με αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό βάρος και κατ' επέκταση να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση καυσίμου. Επιπρόσθετα, επιτρέπει την γρήγορη παραγωγή πρωτοτύπων στα οποία μπορούν να γίνεις άμεσες δοκιμές.

Στον κλάδο της ιατρικής η τεχνολογία FDM είναι κατάλληλη για την κατασκευή εξατομικευμένων προσθετικών μελών και άλλων ιατρικών βοηθημάτων τα οποία προσαρμόζονται πλήρως στην μορφολογία του κάθε ασθενούς. Η συγκεκριμένη τεχνολογία προτιμάται στην ιατρική καθώς συνδυάζει την ανθεκτικότητα, την ελαχιστοποίηση του βάρους, του κόστους και του χρόνου παραγωγής.

Η FDM είναι αναγκαία και στον κλάδο της αρχιτεκτονικής καθώς χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση των σχεδίων πριν την εφαρμογή των ιδεών σχεδιασμού. Προσφέρει την ικανότητα δημιουργίας σύνθετων γεωμετριών και τρισδιάστατων διακοσμητικών μοντέλων που θα ήταν δύσκολο να υλοποιηθούν με το χέρι (σκάλες, δέντρα κ.ο.κ). Επιπλέον, είναι ιδανική για παρουσιάσεις αρχιτεκτόνων σε πιθανούς πελάτες, καθώς η συγκεκριμένη τεχνολογία επιτρέπει την κατασκευή μακετών οι οποίες αναπαριστούν την πραγματική εικόνα του σχεδιαζόμενου έργου.



Σχήμα 1.5.1.2 *Εφαρμογές της τεχνολογίας FDM [20]*

Πλεονεκτήματα FDM

Η τεχνολογία FDM ξεχωρίζει κυρίως για την προσβασιμότητά της. Είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους 3D εκτύπωσης και υπάρχουν πολλές συσκευές διαθέσιμες για επαγγελματική και προσωπική χρήση.

Ο εξοπλισμός και τα υλικά είναι σε προσιτές τιμές, κάτι που την καθιστά ιδανική για μικρές επιχειρήσεις, εργαστήρια και σχολές. Έχει επίσης μεγάλη ποικιλία υλικών, καθώς μπορεί να χρησιμοποιήσει από τα απλά υλικά όπως PLA και ABS, μέχρι τα πιο τεχνικά όπως το Nylon και το TPU, ενώ χρησιμοποιούνται και σύνθετα νήματα με ίνες άνθρακα.

Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα εκτύπωσης σύνθετων σχημάτων με κατάλληλο infill και υποστηρικτικές δομές, γεγονός που δίνει περισσότερη ελευθερία στο σχεδιασμό. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή γεωμετριών που θα ήταν δύσκολο να δημιουργηθούν με συμβατικές μεθόδους.

Επίσης, η διαδικασία είναι εύκολη στην προσαρμογή, με παραμέτρους που ρυθμίζονται στο λογισμικό, επιτρέποντας στους χρήστες να πειραματίζονται και να βελτιώνουν τα αποτελέσματά τους. Έτσι, υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής της κάθε εκτύπωσης στις ανάγκες του εκάστοτε έργου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ποιότητα και η αποδοτικότητα.

Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία FDM έχει κάποια καλά σημεία, αλλά έχει και αρκετά προβλήματα. Η αντοχή των κομματιών δεν είναι πάντα καλή, επειδή η συγκόλληση των στρώσεων εξαρτάται από τη θερμότητα και δεν γίνονται 100% οι μοριακές ενώσεις. Αυτό κάνει τα αντικείμενα πιο ευάλωτα στον κατακόρυφο άξονα, που σημαίνει ότι δεν είναι ιδανικά για εφαρμογές με υψηλή μηχανική καταπόνηση.

Η ποιότητα της επιφάνειας επίσης δεν είναι τέλεια λόγω της διαδικασίας εκτύπωσης. Οι γραμμές από τις στρώσεις είναι εμφανείς και συνήθως χρειάζεται να γίνουν επιπλέον δουλειές, όπως λείανση ή επικάλυψη, για να φαίνονται καλύτερα ή να λειτουργούν σωστά.

Ένα άλλο ζήτημα είναι οι παραμορφώσεις από τη θερμότητα, ειδικά όταν εκτυπώνεις με υλικά σαν το ABS. Αυτές οι παραμορφώσεις, που λέγονται warping, μπορεί να προκαλέσουν αποκόλληση από την πλατφόρμα ή να παραμορφώσουν το σχήμα του αντικειμένου.

Επιπρόσθετα, η FDM παρουσιάζει συχνές βλάβες καθώς είναι συχνό φαινόμενο το φράξιμο των ακροφυσίων, με αποτέλεσμα ο εκτυπωτής να μένει εκτός λειτουργίας κατά την διάρκεια των επισκευών. Το διάστημα που παραμένει εκτός λειτουργίας ένα μηχάνημα λόγω βλάβης σημαίνει απώλεια χρόνου και παραγωγικότητας, αύξηση κόστους ή ακόμα και καθυστέρηση παραδόσεων ιδίως όταν συμβαίνει σε μία βιομηχανία.

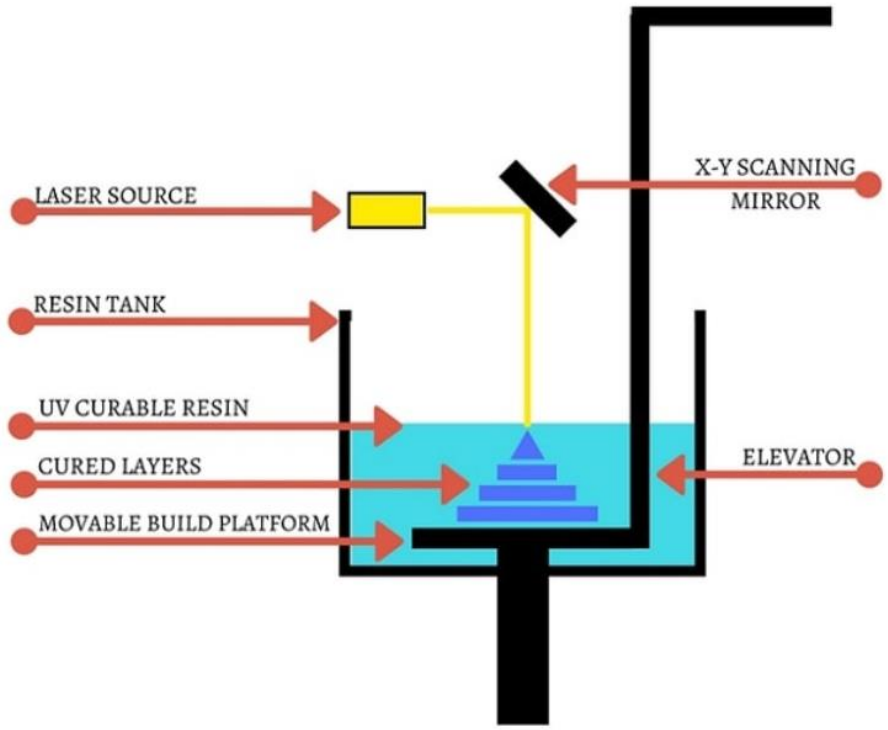
Τέλος, όταν οι σχεδιασμοί έχουν έντονες προεξοχές, χρειάζονται υποστηρικτικές δομές που μπορούν να κάνουν την εκτύπωση πιο ακριβή και χρονοβόρα, ενώ η αφαίρεσή τους πολλές φορές επηρεάζει την επιφάνεια του τελικού προϊόντος.

1.5.2 Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SLA)

Η στερεολιθογραφία ανήκει στην κατηγορία των τρισδιάστατων τεχνολογιών εκτύπωσης, γνωστή και ως φωτοπολυμερισμός. Όλοι οι εκτυπωτές SLA λειτουργούν με την ίδια αρχή, χρησιμοποιώντας μία πηγή φωτός (laser) για να σκληρύνουν την υγρή ρητίνη μετατρέποντάς την σε στερεό. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, ότι η τεχνολογία αυτή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες την **top-down SLA** κατά την οποία η τράπεζα βυθίζεται μέσα στην ρητίνη, και την **bottom-up SLA** όπου το αντικείμενο εκτυπώνεται ανάποδα καθώς ο εκτυπωτής στερεοποιεί την ρητίνη από κάτω προς τα πάνω με χρήση λέιζερ ή UV φωτός. Η διαδικασία εκτύπωσης είναι η εξής:

1. Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μία βάση η οποία βυθίζεται σε ένα δοχείο με υγρή εποξική ή ακρυλική ρητίνη.
2. Η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό, το οποίο είναι ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί.
3. Στην συνέχεια, ενεργοποιείται ένα λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) το οποίο προσπίπτει στο καθρέφτη σάρωσης. Η δέσμη λέιζερ κατευθύνεται στους άξονες x και y, διαγράφει το σχήμα της διατομής, φωτίζοντας και στερεοποιώντας τις αντίστοιχες περιοχές του στρώματος του πολυμερούς.
4. Μόλις ολοκληρωθεί η πρώτη στρώση, η βάση βυθίζεται μέσα στο υγρό πολυμερές κατά το πάχος της επόμενης διατομής, ενώ ένας κύλινδρος απλώνει και οριζοντιώνει το υγρό πάνω στο στερεοποιημένο τμήμα.
5. Στην συνέχεια, η κεφαλή λέιζερ χαράζει την νέα διατομή πάνω στην πρώτη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου.

6. Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο, καθαρίζεται και αφαιρούνται τα στηρίγματα του.
7. Τέλος, τοποθετείται σε ένα φούρνο υπεριωδών ακτινών για την τελική σκλήρυνση.



Σχήμα 1.5.2.1 *Διαδικασία παραγωγής αντικειμένου με την τεχνολογία SLA [21]*

Υλικά

Τύπος ρητίνης	**Ιδιότητες**
Flexible Resin	Ελαστικότητα, αντοχή σε θραύση
Durable Resin	Ανθεκτικότητα στην τριβή, αντοχή σε καταπονήσεις
Tough Resin	Αυξημένη αντίσταση σε κρούση και παραμόρφωση
Standard Resin	Υψηλή ακρίβεια, μέτρια μηχανική αντοχή και ελαστικότητα
High-Temp Resin	Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
Biocompatible Resin	Υψηλή βιοσυμβατότητα, χημική σταθερότητα
Castable Resin	Υψηλή ακρίβεια

Πίνακας 1.5.2.1 *Πίνακας υλικών που χρησιμοποιούνται στην SLA*

Εφαρμογές

Η στερεολιθογραφία είναι μία τεχνολογία η οποία χαρακτηρίζεται από την ακρίβεια αι την αξιοπιστία, καθώς έχει την δυνατότητα να παράγει αντικείμενα με πολύ καλή επιφανειακή ποιότητα και γεωμετρική λεπτομέρεια. Μπορεί να εφαρμοστεί σε επιστημονικούς, βιομηχανικούς ακόμα και σε καλλιτεχνικούς τομείς ενώ είναι ιδανική στην ιατρική, στην παραγωγή κοσμημάτων καθώς και στην δημιουργία σύνθετων μοντέλων μικρής κλίμακας.

Στην ιατρική, η στερεολιθογραφία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή διαγνωστικών μοντέλων και προσωποποιημένων χειρουργικών οδηγών. Κατά αυτόν τον τρόπο, όσοι εργάζονται στον ιατρικό τομέα μπορούν να προετοιμάζονται κατάλληλα για πολύπλοκες επεμβάσεις, με

την βοήθεια των τρισδιάστατα εκτυπωμένων οργάνων και οστικών δομών. Σημαντικό ρόλο στην κλάδο της ιατρικής και της οδοντιατρικής έχει η βιοσυμβατή ρητίνη, με την οποία εκτυπώνονται προσωποποιημένοι οδηγοί για εμφυτεύματα, νάρθηκες, προσωρινά καλούπια κ.ο.κ. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι ανοχές των δομών είναι της τάξης των μικρομέτρων, επομένως η SLA προσφέρει την ακρίβεια που απαιτείται.

Η κοσμηματοποιία είναι επίσης ένας τομέας στον οποίο έχει καθιερωθεί η στερεολιθογραφία, κυρίως λόγω της χρήσης ειδικών "καυσίμων" ρητινών, όπου υπόκεινται σε καθαρή καύση, επιτρέποντας έτσι την άμεση χύτευση σε μέταλλα όπως ασήμι και χρυσός. Μέσω της συγκεκριμένης τεχνολογίας, δίνεται επίσης η δυνατότητα εκτύπωσης κοσμημάτων με σύνθετη γεωμετρία και μικρά χαρακτηριστικά, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για παραγωγή μοντέλων υψηλής ακρίβειας.

Επιπρόσθετα, στη βιομηχανική σχεδίαση και την ανάπτυξη προϊόντων, η τεχνολογία SLA είναι χρήσιμη για εύκολη και γρήγορη κατασκευή πρωτοτύπων που χρειάζονται λεπτομέρεια και ακρίβεια στις διαστάσεις. Είναι επίσης, ιδανική για τη δοκιμή της εφαρμογής εξαρτημάτων, την αξιολόγηση εργονομίας και την προσομοίωση δομών σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Οι μηχανικές ρητίνες για παράδειγμα, επιτρέπουν την κατασκευή πιο ανθεκτικών εξαρτημάτων που μιμούνται τις ιδιότητες θερμοπλαστικών. Ενώ για, εφαρμογές που απαιτούν αντοχή στη θερμότητα, χρησιμοποιούνται ρητίνες οι οποίες αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες για τη παραγωγή εξαρτημάτων που υποβάλλονται σε δοκιμές, όπως χύτευση σιλικόνης.



Σχήμα 1.5.2.2 *Τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα με την μέθοδο της στερεολιθογραφίας*

Πλεονεκτήματα

Ένα από τα πιο βασικά πλεονεκτήματα της στερεολιθογραφίας είναι η μεγάλη ακρίβεια και η δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων γεωμετριών. Με τη βοήθεια ακτινών UV και της φωτοπολυμερισμού, αυτή η μέθοδος μας βοηθά να φτιάχνουμε αντικείμενα με πολύ λεπτές γεωμετρίες και ανοχές που φτάνουν μέχρι 25 μικρόμετρα.

Επίσης, εν αντιθέσει με άλλες κοινές τεχνολογίες όπως την FDM, η SLA δημιουργεί λείες επιφάνειες, γεγονός που ενισχύει την αισθητική καθώς και την λειτουργική αξία του εξαρτήματος και παράλληλα μειώνει την ανάγκη για επεξεργασία μετά την εκτύπωση.

Ένα ακόμα θετικό της SLA είναι ότι προσφέρει μεγάλη ποικιλία υλικών, καθώς υπάρχουν πολλές επιλογές από ρητίνες. Οι συγκεκριμένες ρητίνες που συνήθως χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν υλικά με σημαντικές ιδιότητες όπως ευκαμψία, ανθεκτικότητα, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, βιοσυμβατότητα, οι οποίες καλύπτουν ειδικές ανάγκες σε διάφορους τομείς.

Τέλος, η στερεολιθογραφία είναι κατάλληλη για να παράγει περίπλοκα σχέδια με εσωτερικές κοιλότητες, λεπτά τοιχώματα και πολύπλοκες μορφές, καθώς προσφέρει μεγάλη ακρίβεια και έλεγχο σε κάθε στρώση. Αυτό δίνει στους χρήστες τη δυνατότητα να αξιοποιήσουν την ελευθερία που προσφέρει η τρισδιάστατη εκτύπωση.

Μειονεκτήματα

Παρά τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, η στερεολιθογραφία παρουσιάζει και αρκετά μειονεκτήματα, τα οποία είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη στην περίπτωση επιλογής της.

Αρχικά, τα δοκίμια τα οποία εκτυπώνονται με την τεχνολογία SLA παρουσιάζουν μικρότερες μηχανικές ανοχές συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής που έχουν ως βάση τα θερμοπλαστικά (FDM,SLS). Οι ρητίνες φωτοπολυμερισμού, είναι αρκετά ευαίσθητες σε ρωγμές και παραμορφώσεις όταν δεχθούν υψηλή καταπόνηση ή επαναλαμβανόμενα φορτία. Επιπλέον, έχουν μικρή διάρκεια ζωής καθώς έχουν ευαισθησία στο φως και στην υγρασία, και είναι πολύ πιθανό να παρουσιάσουν φωτοχημική υποβάθμιση μακροπρόθεσμα.

Επίσης, οι φωτοπολυμερείς ρητίνες σε υγρή μορφή είναι αρκετά τοξικές και απαιτούν ιδιαίτερο χειρισμό κατά την χρήση. Οι περισσότερες εμπορικές ρητίνες περιέχουν χημικές ενώσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ερεθισμούς στο δέρμα, αναπνευστικά προβλήματα ενώ παράλληλα είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον. Επομένως, απαιτείται χρήση μέσων ατομικής προστασίας (γάντια, μάσκα), αλλά και καλός αερισμός του χώρου στην περίπτωση που το περιβάλλον εργασίας δεν περιλαμβάνει φίλτρο ενεργού άνθρακα.

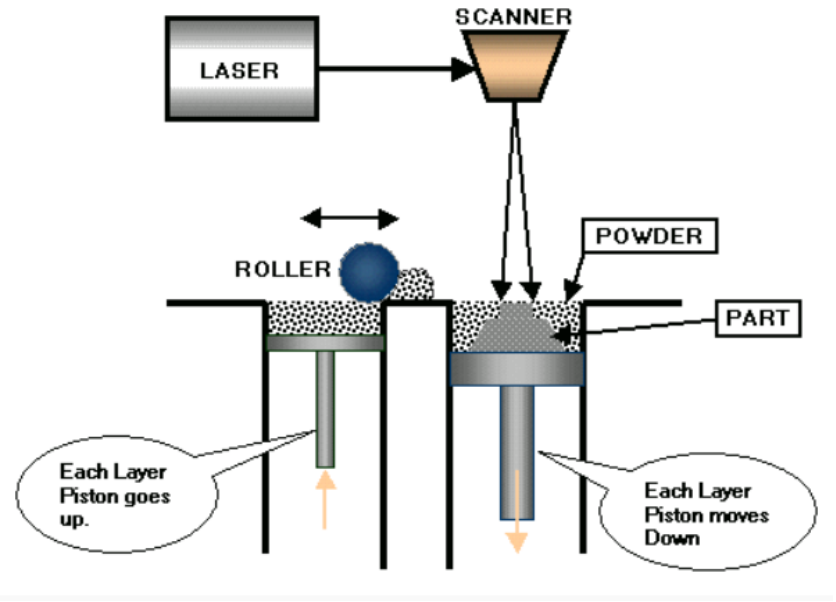
Ένα ακόμα μειονέκτημα της στερεολιθογραφίας, είναι η διαδικασία της επεξεργασίας του εκτυπωμένου μοντέλου. Μετά την εκτύπωση, το αντικείμενο πρέπει να πλυθεί με ισοπροπυλική αλκοόλη, να αφαιρεθούν τα τυχόν στηρίγματά του και να τοποθετηθεί σε φούρνο υπεριωδών ακτινών για την τελική σκλήρυνση. Η διαδικασία αυτή απαιτεί χρόνο και η παραγωγή καθίσταται πιο απαιτητική και σύνθετη.

Τέλος, η SLA σαν τεχνολογία είναι πιο ακριβή λόγω του εξοπλισμού της σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες όπως την FDM, γεγονός που συνήθως στερεί την δυνατότητα πρόσβασης για οικιακή ή μικρής κλίμακας χρήση.

1.5.3 Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (Selective Laser Sintering-SLS)

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ είναι μία διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης κατά την οποία χρησιμοποιείται λέιζερ CO2 υψηλής ισχύος για την σύντηξη λεπτώς κονιοποιημένου υλικού σε μία συμπαγή δομή. Αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής με στόχο την παραγωγή πολυμερών αντικειμένων με υψηλή μηχανική αντοχή. Η κατασκευή τεμαχίων με αυτή τη μέθοδο πραγματοποιείται με επαναληπτική απόθεση στρώσεων κόκκων πρώτης ύλης και την θέρμανσή τους με λέιζερ με σκοπό την συγκόλλησή τους. Συγκεκριμένα, η διαδικασία εκτύπωσης SLS είναι:

1. Ένας κύλινδρος στρώνει μία ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους πάνω στην επιφάνεια και μία κεφαλή λέιζερ διαμορφώνει την πρώτη διατομή, τήκοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά την σκόνη.
2. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου.
3. Η περισσευούμενη σκόνη λειτουργεί ως στήριγμα του αντικειμένου, επομένως δεν απαιτείται η τοποθέτηση στηριγμάτων πριν την εκτύπωση.
4. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται ψύξη για την αποφυγή θερμικών καταπονήσεων.
5. Τέλος, αφαιρείται η σκόνη που δεν έχει συγκολληθεί με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα και αν απαιτείται γίνεται επεξεργασία του μοντέλου.



Σχήμα 1.5.3.1 *Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας SLS [22]*

Υλικά

Η τεχνολογία SLS χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά πολυμερή με την μορφή λεπτής σκόνης. Τα πιο υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

Υλικά	**Ιδιότητες**
TPU (ελαστομερές)	Απόσβεση κραδασμών, ελαστικότητα
Nylon 12 (PA12)	Υψηλή αντοχή και ευκαμψία, χημική ανθεκτικότητα
Nylon 11 (PA11)	Ευκαμψία και ανθεκτικότητα στις κρούσεις
Nylon + Glass Fiber	Ακαμψία και θερμική σταθερότητα
Nylon + Garbon Fiber	Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, ακαμψία, μειωμένο βάρος

Πίνακας 1.5.3.1 *Πίνακας υλικών που χρησιμοποιούνται στην SLS*

Εφαρμογές

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ είναι χρήσιμη τόσο στην παραγωγή πρωτοτύπων όσο και στην δημιουργία τελικών προϊόντων. Στον κλάδο την μηχανολογικής βιομηχανίας η SLS είναι απαραίτητη στην παραγωγή γραναζιών, στηριγμάτων, αρθρώσεων, βάσεων καθώς και συνδέσμων.

Επίσης, στην αεροναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία, η SLS είναι απαραίτητη καθώς μπορεί να κατασκευάσει ελαφριά και ανθεκτικά εξαρτήματα. Μέσω της συγκεκριμένης τεχνολογίας, δίνεται η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων που δεν μπορούν να παραχθούν με αφαίρεση υλικού, όπως για παράδειγμα μέρη με περίπλοκη γεωμετρία, σωληνώσεις, εξαρτήματα με εσωτερικά κανάλια κ.ο.κ.

Τέλος, η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ είναι μία τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται και στον τομέα της ιατρικής. Έχει την ικανότητα να κατασκευάσει βιοϊατρικά εμφυτεύματα, προσθετικά μέρη, ορθοπεδικά εξαρτήματα, προστατευτικά καλύμματα καθώς και χειρουργικά βοηθήματα. Επιπρόσθετα, λόγω του υλικού TPU που μπορεί να χρησιμοποιήσει και της ευκαμψίας του, είναι χρήσιμη σε εφαρμογές που βασίζονται στην απορρόφηση δονήσεων.



Σχήμα 1.5.3.2 *Τρισδιάστατα εξαρτήματα κατασκευασμένα με την μέθοδο SLS [23]*

Πλεονεκτήματα

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας SLS, είναι η παραγωγή αντικειμένων με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με την συγκεκριμένη τεχνολογία, παρουσιάζουν αντοχή σε κάμψη, εφελκυσμό, πρόσκρουση ενώ παράλληλα η διαστασιακή τους σταθερότητα είναι υψηλή.

Επίσης, είναι πολύ βασικό το γεγονός ότι στην SLS οι υποστηρικτικές δομές δεν είναι απαραίτητες κατά την εκτύπωση και αυτό είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που την διαφοροποιεί από τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Η έλλειψη των υποστηριγμάτων επιτρέπει, την παραγωγή δύσκολων γεωμετριών, εξαρτημάτων με εσωτερικά κανάλια καθώς και δομών που δεν απαιτούν επιπλέον κατασκευαστική ή υπολογιστική επιβάρυνση. Με την SLS υπάρχει δυνατότητα σχεδιαστικής ελευθερίας, γεγονός που διευκολύνει την εφαρμογή βελτιστοποιημένων σχεδίων, όπως τοπολογική βελτιστοποίηση ή πλεγματικές δομές.

Επιπρόσθετα, η SLS είναι κατάλληλη για μικρής ή μεσαίας κλίμακας παραγωγές, χωρίς να είναι αναγκαία η κατασκευή καλουπιών ή ειδικών εργαλείων. Η ιδιότητα αυτή την καθιστά χρήσιμη σε εφαρμογές που απαιτείται άμεση σχεδιαστική προσαρμογή, όπως σε τμήματα έρευνας και ανάπτυξης. Είναι επίσης αξιοσημείωτο, το γεγονός ότι με την συγκεκριμένη τεχνολογία ελαχιστοποιείται ο χρόνος εκτύπωσης ανά τεμάχιο και βελτιώνεται η εκμετάλλευση του ωφέλιμου όγκου, καθώς υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης πολλών εξαρτημάτων σε μία κατασκευή.

Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και η ανθεκτικότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στην SLS. Τα πολυμερή τα οποία εφαρμόζονται στην παρούσα τεχνολογία, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, χημικές ουσίες καθώς και στην υγρασία. Οι παραπάνω ιδιότητες καθιστούν την SLS ιδανική για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως σε συστήματα αυτοματισμού ή στην αεροναυπηγική. Παράλληλη, με την χρήση σύνθετων υλικών (π.χ Nylon + Glass Fiber), μπορούν να παραχθούν αντικείμενα με θερμική σταθερότητα και βελτιωμένη ακαμψία.

Τέλος, τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με SLS παρουσιάζουν καλή επιφανειακή ποιότητα, χωρίς να εμφανίζουν ραβδώσεις ή σημαντικές ατέλειες. Παρά την ελαφρώς κοκκώδη υφή που αποκτούν οι επιφάνειες μετά την εκτύπωση, το αποτέλεσμα είναι επαρκές για πολλές εφαρμογές και είναι δυνατό να βελτιωθεί με περαιτέρω τεχνικές όπως λείανση ή χημική εξομάλυνση.

Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία SLS παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, παρουσιάζει και κάποια αξιοσημείωτα μειονεκτήματα, κυρίως στο επίπεδο κόστους αλλά και στην τεχνική διαχείριση. Αρχικά, το κόστος εξοπλισμού και υλικών είναι αρκετά υψηλό γεγονός που την καθιστά λιγότερο επιθυμητή σε πολλές εφαρμογές. Για την ακρίβεια, το κόστος αγοράς είναι πολλαπλάσιο συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες, καθώς οι εκτυπωτές SLS χρειάζονται περίπλοκο θερμικό και οπτικό εξοπλισμό, καθώς και ειδικό σύστημα διαχείρισης σκόνης υψηλής ακρίβειας. Επίσης, η σκόνη πολυμερούς που χρησιμοποιείται έχει υψηλό κόστος, και μάλιστα δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί απεριόριστα, καθώς σε κάθε εκτύπωση αλλοιώνονται οι ιδιότητες της.

Επιπλέον, λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται στην SLS, ισχύουν αυστηρές απαιτήσεις ασφαλείας. Η λεπτόκοκκη σκόνη, απαιτεί μεγάλη προσοχή κατά την χρήση της καθώς μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα στον χρήστη, εάν δεν τηρηθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Συνεπώς, επιβάλλεται η χρήση εξοπλισμού προστασίας (μάσκες, γάντια), ενώ στον χώρο εργασίας πρέπει να υπάρχουν βιομηχανικοί απορροφητήρες. Παράλληλα, είναι σημαντικό η σκόνη να αποθηκεύεται σε ξηρό και ελεγχόμενο μέρος καθώς η υγρασία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα του τελικού αντικειμένου. Το γεγονός αυτό, καθιστά δύσκολη την εφαρμογή της SLS σε μη επαγγελματικούς χώρους ή σε εκπαιδευτικά εργαστήρια.

Ένα ακόμα μειονέκτημα της εν λόγω τεχνολογίας, είναι η χρονική διάρκεια του post-processing. Εφόσον ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το εξάρτημα παραμένει καλυμμένο με σκόνη έως ότου γίνει η αφαίρεση της περίσσειας υλικού. Η διαδικασία αυτή απαιτεί χρόνο και ταυτόχρονα μεγάλη προσοχή καθώς είναι πιθανό να προκληθούν φθορές σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Στην επεξεργασία του τελικού προϊόντος εντάσσονται επίσης και οι διαδικασίες φινιρίσματος όπως λείανση ή βαφή, οι οποίες αυξάνουν τον συνολικό χρόνο αλλά και το κόστος παραγωγής.

Τέλος, η SLS παρά την υψηλή διαστασιακή ακρίβεια που προσφέρει, είναι πιθανό να παρουσιάσει εσωτερικές τάσεις ή συστολή, κυρίως σε αντικείμενα μεγάλου όγκου ή με μη ομοιόμορφή κατανομή μάζας. Επομένως, για να γίνουν αντιληπτές αυτές οι παραμορφώσεις πρέπει να γίνει προσομοίωση (π.χ. FEA) ή αντισταθμιστικός σχεδιασμός.

1.5.4 Άμεση σύντηξη με λέιζερ μετάλλου (Direct Metal Laser Sintering-DMLS)

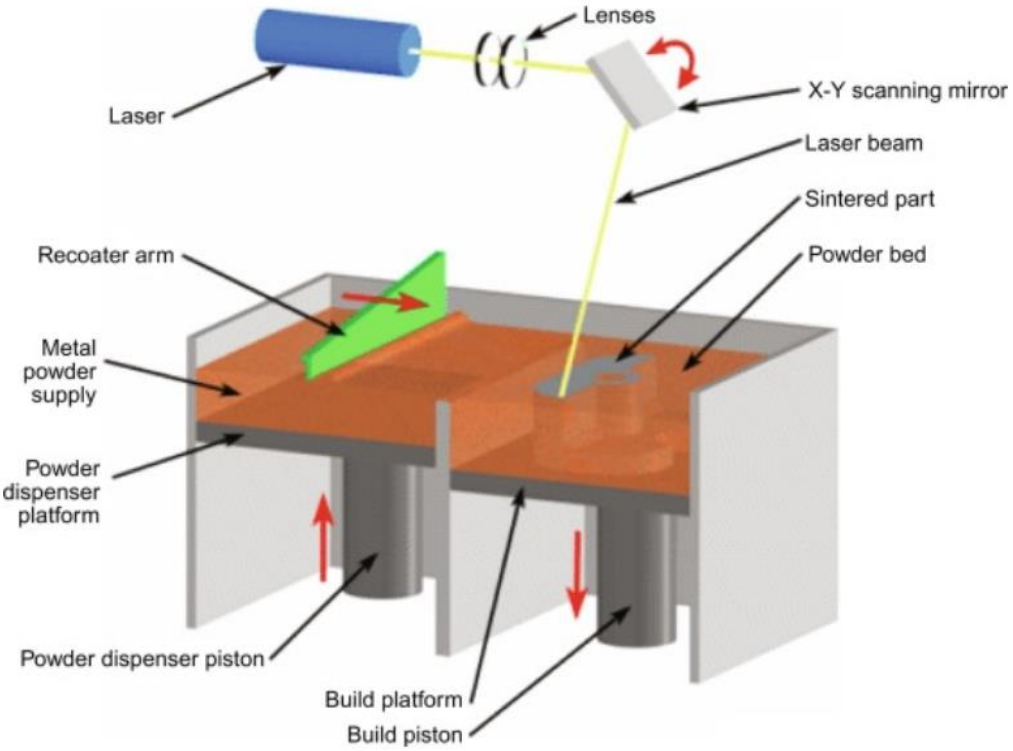
Η άμεση σύντηξη με λέιζερ μετάλλου είναι μία τεχνολογία που ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών συγκόλλησης με στρώσεις σκόνης, και αποτελεί εξέλιξη της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ. Στην DMLS χρησιμοποιείται λέιζερ υψηλής ισχύος με το οποίο γίνεται η σύντηξη της μεταλλικής σκόνης στρώση προς στρώση, με σκοπό την δημιουργία στερεών αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια και μηχανική αντοχή.

Στην DMLS η θερμοκρασία φτάνει κοντά στο σημείο τήξης του μετάλλου και έτσι πραγματοποιείται ολική ή μερική τήξη σωματιδίων, σε αντίθεση με την SLS όπου γίνεται απλή συγκόλληση της σκόνης. Για την αποφυγή της οξείδωσης η διαδικασία αυτή, εκτελείται σε θάλαμο με αδρανές αέριο (π.χ. άζωτο ή αργό).

Η άμεση σύντηξη με λέιζερ μετάλλου είναι ιδανική για την παραγωγή εξαρτημάτων περιπλοκότητα στην γεωμετρία τους και εσωτερικά κανάλια, τα οποία είναι δύσκολο ή αρκετά δαπανηρό να κατασκευαστούν με άλλες μεθόδους (π.χ. CNC). Επιπλέον, είναι εφικτό να παραχθούν αντικείμενα με ενσωματωμένες λειτουργίες , όπως δομές πλέγματος.

Διαδικασία εκτύπωσης:

1. Πλήρωση του θαλάμου εκτύπωσης με αδρανές αέριο.
2. Επίστρωση μεταλλικής σκόνης σε στρώση κατάλληλου πάχους (20–60 μm.)
3. Επιλεκτική τήξη και στερεοποίηση της μεταλλικής σκόνης με την χρήση λέιζερ και καθρέφτη σάρωσης, με σκοπό την διαμόρφωση της πρώτης διατομής.
4. Επικάλυψη με νέα στρώση σκόνης.
5. Επανάληψη της διαδικασίας έως την ολοκλήρωση του αντικειμένου**.**
6. Ψύξη του θαλάμου και αφαίρεση του αντικειμένου από τη σκόνη.
7. Μετεπεξεργασία αντικειμένου.



Σχήμα 1.5.4.1 *Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας εκτύπωσης με την τεχνολογία DMLS [24]*

Υλικά:

ΥΛΙΚΑ	**ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**
Αλουμίνιο	Καλή θερμική αγωγιμότητα, ελαφρύ
Τιτάνιο	Υψηλή αντοχή, βιοσυμβατότητα
Ανοξείδωτο ατσάλι	Υψηλή αντοχή σε διάβρωση, καλές μηχανικές ιδιότητες
Κοβάλτιο-Χρώμιο	Ανθεκτικότητα στην φθορά , βιοσυμβατότητα
Inconel 718	Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και στην οξείδωση

Πίνακας 1.5.4.1 *Πίνακας υλικών που χρησιμοποιούνται στην DMLS*

Εφαρμογές

Η DMLS είναι μία τεχνολογία που δίνει την δυνατότητα παραγωγής μεταλλικών εξαρτημάτων με υψηλή ακρίβεια, επομένως είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε τομείς όπου η αντοχή, η ανθεκτικότητα, οι περιπλοκές γεωμετρίες αλλά και η αξιοπιστία είναι αναγκαία κριτήρια.

Για παράδειγμα, στην ιατρική η DMLS χρησιμοποιείται για την κατασκευή εμφυτευμάτων από τιτάνιο ή χρώμιο-κοβάλτιο (π.χ. μεταλλικές πλάκες, κεφαλές ισχίου, γομφίοι). Λόγω της ακρίβειας που προσφέρει η εν λόγω τεχνολογία, τα εμφυτεύματα αυτά μπορούν να σχεδιαστούν με βάση το ανατομικό μοντέλου του κάθε ασθενούς και να αντικαταστήσουν με ασφάλεια το φυσικό μέρος που πάσχει. Επιπρόσθετα, με την DMLS υπάρχει δυνατότητα παραγωγής ιατρικών εργαλείων με περίπλοκη γεωμετρία και υψηλή καθαρότητα, ώστε να είναι κατάλληλα για χειρουργικές επεμβάσεις.

Επίσης, στην αεροδιαστημική βιομηχανία η DMLS είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατασκευή ελαφρών και περίπλοκων στηρίξεων, εξαρτημάτων τουρμπινών, υποσυστημάτων καυσίμου αλλά και εξαρτημάτων με ενσωματωμένα κανάλια ψύξης. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων με κοιλότητες ή εσωτερικά κενά, μειώνει το βάρος χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή τους.

Τέλος, η DMLS χρησιμοποιείται και στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή εξαρτημάτων με μικρό όγκο και υψηλή αντοχή, όπως για παράδειγμα ψυγεία λαδιού, συγκροτήματα στροβιλοσυμπιεστών ή

δομικά τμήματα κράματος. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδανική για ηλεκτρικά οχήματα και αγωνιστικές εφαρμογές καθώς μπορεί να κατασκευάσει πολύπλοκες γεωμετρίες χωρίς να υπάρχει ανάγκη χρήσης συμβατικών καλουπιών.



Σχήμα 1.5.4.2 *Τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα DMLS [25]*

Πλεονεκτήματα

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της DMLS είναι η ικανότητα της να κατασκευάζει μεταλλικά εξαρτήματα με ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από εκείνες που επιτυγχάνονται μέσω άλλων μεθόδων κατασκευής (π.χ. χύτευση, CNC). Τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με την εν λόγω τεχνολογία μπορούν να δεχθούν ισχυρά μηχανικά φορτία, υψηλές θερμοκρασίες και να αντέξουν σε καταπονήσεις και διαβρωτικές συνθήκες. Επίσης, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι δύσκολο να κατεργαστούν με ακρίβεια στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν σε παραδοσιακές μεθόδους κατεργασίας.

Επιπρόσθετα, σημαντικό είναι το γεγονός ότι μέσω της DMLS μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκες γεωμετρίες και εξαρτήματα με ενσωματωμένα εσωτερικά κανάλια, με πλεγματικές δομές και κοιλότητες. Αυτό προσφέρει ελευθερία στον σχεδιασμό με ενσωμάτωση διάφορων λειτουργιών στο ίδιο εξάρτημα, χωρίς την ανάγκη συναρμολόγησης, ελαχιστοποιώντας έτσι το βάρος, το κόστος αλλά και τον χρόνο παραγωγής.

Η DMLS είναι ιδανική και στον τομέα της ιατρικής και της οδοντιατρικής, καθώς μπορεί να κατασκευάσει εξατομικευμένα εξαρτήματα προσαρμοσμένα στο πρόβλημα του κάθε ασθενούς. Το μοντέλο CAD μπορεί να προσαρμοστεί σε δεδομένα απεικόνισης του προβλήματος (π.χ.CT/MRI) και έτσι να παραχθούν εμφυτεύματα, πλάκες οστών αλλά και χειρουργικά εργαλεία κατάλληλα σχεδιασμένα για την κάθε περίπτωση. Αυτό έχεις ως αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου επέμβασης και την περίπτωση ιατρικού λάθους.

Επίσης, προσφέρει ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής, κυρίως σε μικρής κλίμακας παραγωγές λειτουργικών εξαρτημάτων. Παράλληλα, μειώνει σημαντικά την σπατάλη υλικού, καθώς η σκόνη δίνει την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του μη συγκολλημένου υλικού. Αυτή η ιδιότητα της DMLS είναι εξαιρετικά σημαντική, ιδίως στην περίπτωση χρήσης ακριβών υλικών, όπως για παράδειγμα τιτάνιο ή Inconel, καθώς ελαχιστοποιούνται τα κόστη και η επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Μειονεκτήματα

Παρά τα θετικά χαρακτηριστικά της DMLS, η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει ορισμένους σημαντικούς περιορισμούς. Αρχικά, το κόστος εξοπλισμού είναι ιδιαίτερα υψηλό, δεδομένου ότι και οι εκτυπωτές αλλά και οι υποστηρικτικές υποδομές (π.χ. μονάδες ψύξης, συστήματα παροχής αδρανών αερίων) συνοδεύονται από μεγάλο κόστος. Το γεγονός αυτό, καθιστά την συγκεκριμένη τεχνολογία μη προσιτή σε μικρές επιχειρήσεις ή σε μη χρηματοδοτούμενα εργαστήρια.

Επιπλέον, λόγω του βάρους του μετάλλου αλλά και των υψηλών θερμοκρασιών, είναι πιθανό τα εκτυπωμένα εξαρτήματα να παρουσιάσουν παραμορφώσεις λόγω θερμικών τάσεων. Επίσης, οι στηρίξεις (supports) που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της εκτύπωσης για την σταθεροποίηση των εξαρτημάτων, αφαιρούνται συνήθως με ηλεκτροδιάβρωση ή με μηχανική κατεργασία, γεγονός που προσθέτει χρόνος και κόστος.

Επιπρόσθετα, λόγω του τρόπου σάρωσης και την φύση της μεταλλικής σκόνης που χρησιμοποιείται στην DMLS τεχνολογία, παράγονται αντικείμενα με υψηλή τραχύτητα. Επομένως, σε εφαρμογές που κρίνεται απαραίτητη η λεία επιφάνεια, καθίσταται αναγκαία η επιπλέον κατεργασία μέσω λείανσης, φινιρίσματος ή επιμετάλλωσης, γεγονός που επιμηκύνει το συνολικό κόστος και την διάρκεια παραγωγής.

Τέλος, οι περισσότεροι εκτυπωτές βιομηχανίας έχουν περιορισμό στον όγκο κατασκευής. Επομένως, εξαρτήματα μεγάλων διαστάσεων είτε είναι αδύνατο να εκτυπωθούν, είτε πρέπει να υποστούν κατεργασίες συναρμολόγησης ή κατακερματισμού. Αυτό, καθιστά την DMLS ανεπαρκή σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

1.5.5 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder Jetting)

Η Binder Jetting κατατάσσεται στην κατηγορία των τεχνικών προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούν κλίνη σκόνης. Η συγκεκριμένη τεχνολογία διαφέρει από τις υπόλοιπες καθώς χρησιμοποιεί δεσμευτικό υλικό (binder) το οποίο εναποτίθεται επιλεκτικά πάνω σε στρώσεις κονιοποιημένου υλικού. Η εκτύπωση πραγματοποιείται στρώση προς στρώση, με την σκόνη να τοποθετείται σε λεπτά επίπεδα και το δεσμευτικό υγρό να λειτουργεί ως ένωση των σωματιδίων στις απαραίτητες περιοχές. Δεν απαιτούνται υποστηρικτικές δομές καθώς η μη συγκολλημένη σκόνη λειτουργεί ως φυσική υποστήριξη. Η Binder Jetting δεν χρησιμοποιεί λέιζερ ή ακτίνες UV, όπως γίνεται στις τεχνολογίες SLS και SLA αντίστοιχα, αλλά διαθέτει έναν μηχανισμό εκτύπωσης με κεφαλές ψεκασμού (inkjet). Ο μηχανισμός αυτός, είναι υπεύθυνος για την επιλεκτική τοποθέτηση συνδετικού υγρού στις περιοχές που αντιστοιχούν στο στρώμα του τρισδιάστατου μοντέλου που πρόκειται να παραχθεί.

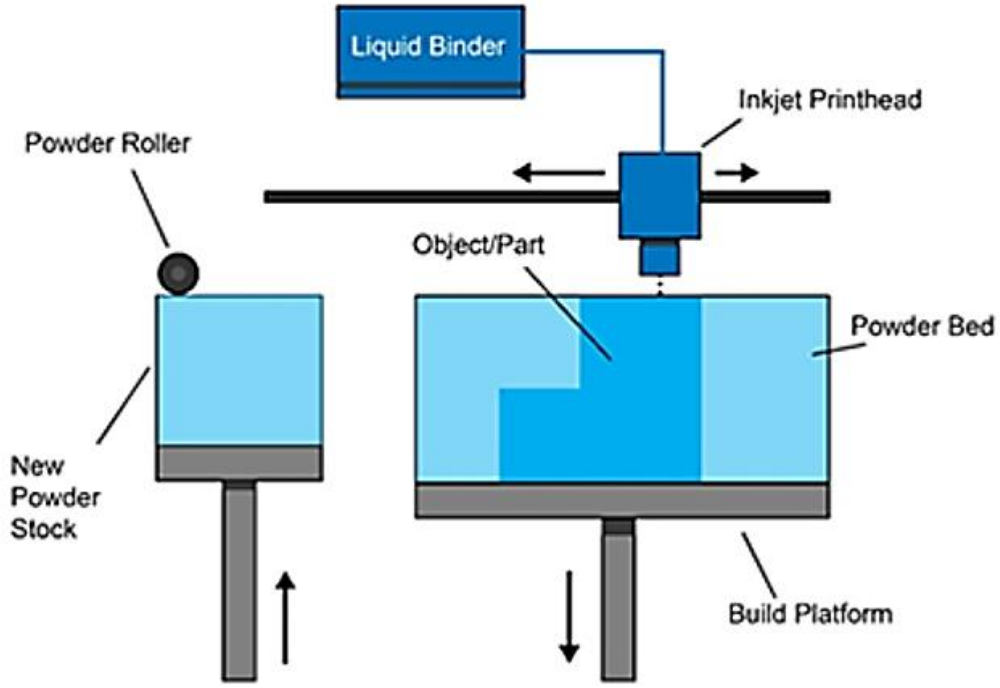
Συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες της προσθετικής κατασκευής (π.χ. SLS, DMLS) οι οποίες χρησιμοποιούν λέιζερ με σκοπό την σύντηξη σκόνης, η Binder Jetting παρουσιάζει χαμηλότερες θερμικές καταπονήσεις και μειωμένο κόστος εξοπλισμού. Επίσης, παρέχει αυξημένη ταχύτητα εκτύπωσης και είναι ιδανική για μαζική παραγωγή, παρόλο που τα εξαρτήματα χρειάζονται επιπλέον επεξεργασία μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσής τους.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην εν λόγω τεχνολογία δεν θεωρείται αναγκαία η θερμική πηγή κατά την εκτύπωση, γεγονός που μειώνει τις πιθανότητες θερμικής παραμόρφωσης αλλά και τις υπολειμματικές τάσεις. Παρόλα αυτά, η τελική επεξεργασία του μοντέλου είναι απαραίτητη τις περισσότερες φορές, ώστε το αντικείμενο να αποκτήσει τις τελικές μηχανικές ιδιότητες που χρειάζεται.

Διαδικασία εκτύπωσης:

1. Προετοιμασία υλικού (σκόνης) και τοποθέτησή του στο δοχείο κατασκευής.

2. Επίστρωση σκόνης μέσω κυλίνδρου και διαμόρφωση πρώτης στρώσης στην επιφάνεια κατασκευής.
3. Επιλεκτική εναπόθεση συνδετικού υγρού (binder) στις περιοχές που αντιστοιχούν στην διατομή του μοντέλου.
4. Μετακίνηση της πλατφόρμας κατασκευής προς τα κάτω, όσο είναι το πάχος
5. Επανάληψη διαδικασίας για κάθε στρώση έως ότου ολοκληρωθεί η επιθυμητή γεωμετρία του εξαρτήματος.
6. Αφαίρεση τεμαχίου από το δοχείο και καθαρισμός του από την περισσευούμενη μη συγκολλημένη σκόνη.
7. Θερμική επεξεργασία του μοντέλου για συμπύκνωση ή διήθηση με πρόσθετο υλικό για βελτίωση των μηχανικών του χαρακτηριστικών.



Σχήμα 1.5.5.1 *Ροή διεργασίας της μεθόδου Binder Jetting [26]*

Υλικά

Κατηγορία	**Υλικά**
Μέταλλα	Ανοξείδωτο ατσάλι, Inconel, Τιτάνιο, κράματα χαλκού
Κεραμικά	Αλουμίνιο, ζιρκονία, κεραμικές πάστες, πυριτικά υλικά
Πολυμερή	Γύψος, PMMA
Άμμος	Πυριτική άμμος, με ειδικά binders

Πίνακας 1.5.5.1 *Πίνακας υλικών που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία Binder Jetting*

Εφαρμογές

Η Binder Jetting είναι η ιδανική μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλης κλίμακας παραγωγές με χαμηλό κόστος και πολυπλοκότητα σχεδίου. Στην βιομηχανία ο χρόνος και το κόστος

παραγωγής είναι κρίσιμοι παράγοντες, επομένως η ταχύτητα εκτύπωσης και η δυνατότητα κατασκευής πολλών αντικειμένων ταυτόχρονα καθιστούν την Binder Jetting κατάλληλη για χρήση.

Επίσης, επιλέγεται και στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων χωρίς την ανάγκη χρήσης παραδοσιακών καλουπιών. Επιτρέπει, την παραγωγή σύνθετων αντικειμένων, όπως θερμικοί εναλλάκτες ή βραχίονες στήριξης, με ελάχιστο βάρος και βελτιστοποιημένη γεωμετρία.

Η Binder Jetting χρησιμοποιείται επίσης και στην αρχιτεκτονική καθώς έχει την δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων μακετών και καλουπιών. Η ικανότητα επεξεργασίας υλικών όπως κεραμική σκόνη ή άμμος, επιτρέπει την κατασκευή καλουπιών κατάλληλα για χύτευση, αντικαθιστώντας έτσι κάποιες από τις παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας. Παράλληλα, λόγω της δυνατότητας της να εκτυπώνει σε πλήρες χρώμα μπορεί να κατασκευάσει και προϊόντα τέχνης, αναμνηστικά ή ακόμα και προσωπικά αντικείμενα. Η ταχύτατη εκτύπωση και η ευελιξία υλικών την καθιστούν ιδανική για εξατομικευμένες κατασκευές σε συνδυασμό με ψηφιακά εργαλεία σχεδίασης.



Σχήμα 1.5.5.2 *Τρισδιάστατα εξαρτήματα διαφορετικού υλικού, κατασκευασμένα με την τεχνολογία Binder Jetting*

Πλεονεκτήματα

Ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά της Binder Jetting είναι η ταχεία παραγωγική διαδικασία συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Αυτό συμβαίνει καθώς η θερμική επεξεργασία δεν απαιτείται κατά την εκτύπωση, επομένως η κεφαλή ψεκασμού κινείται σε όλο το εύρος της επιφάνειας χωρίς να εστιάζει σε συγκεκριμένα σημεία όπως συμβαίνει με το λέιζερ. Η ιδιότητα αυτή της συγκεκριμένης τεχνολογίας επιτρέπει την παραγωγή πολλών εξαρτημάτων στον ίδιο χρόνο, γεγονός που την καθιστά ιδανική για κλίμακα βιομηχανικής παραγωγής.

Επιπλέον, η έλλειψη υποστηρικτικών δομών παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία και ελευθερία στον σχεδιασμό. Η σκόνη που δεν έχει συγκολληθεί στα εκτυπωμένα μέρη προσφέρει φυσική στήριξη, δίνοντας την δυνατότητα παραγωγής εξαρτημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία, αρνητικές γωνίες, λεπτά τοιχώματα και εσωτερικές κοιλότητες. Η μη συγκολλημένη σκόνη μπορεί επίσης να επαναχρησιμοποιηθεί, ελαχιστοποιώντας το κόστος παραγωγής και την περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Σημαντικό είναι επίσης και το γεγονός ότι με την Binder Jetting μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύχρωμη εκτύπωση σε αντικείμενα που δεν απαιτούν υψηλές μηχανικές ιδιότητες, όπως στην παραγωγή έργων τέχνης, πρωτοτύπων ή μοντέλων παρουσίασης. Επιπρόσθετα, μπορεί να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως μέταλλα, κεραμικά και άμμο, με αποτέλεσμα να μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές βιομηχανικές εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία Binder Jetting παρά τα θετικά χαρακτηριστικά της, παρουσιάζει και αρκετούς περιορισμούς. Ο πιο σημαντικός είναι ότι τα αντικείμενα που εκτυπώνονται δεν είναι έτοιμα για χρήση αμέσως μετά την κατασκευή. Το προϊόν αφού εκτυπωθεί έχει την μορφή ενός «πράσινου σώματος» (green part), το οποίο έχει μειωμένη μηχανική αντοχή και χρειάζεται μεταγενέστερη επεξεργασία (π.χ. σύντηξη, διείσδυση με υλικό πλήρωσης). Συνεπώς, αυξάνεται ο χρόνος παραγωγής και το κόστος εξοπλισμού.

Επίσης, τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με την συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζουν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με εξαρτήματα που παράγονται με άλλες τεχνολογίες (π.χ. SLS). Για την ακρίβεια, εμφανίζουν μειωμένη πυκνότητα και μηχανική αντοχή, ενώ συχνά παρουσιάζουν μικροπορώδη δομή, περιορίζοντας την χρήση των εξαρτημάτων αυτών σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή αντοχή σε καταπόνηση.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η τεχνολογία Binder Jetting δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, κυρίως όταν αφορούν μεταλλικά εξαρτήματα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην αεροδιαστημική ή στην ιατρική. Συνεπώς, λόγω της δυσκολίας επίτευξης πλήρους πυκνότητας και του περιορισμού στην πιστοποίηση των υλικών, η Binder Jetting βρίσκεται σε στάδιο εξέλιξης για ορισμένους τομείς.

1.3 Μελλοντικές τάσεις προσθετικής κατασκευής

Η ταχεία εξέλιξη της προσθετικής κατασκευής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό ένα πλήθος τεχνολογιών και τομέων. Μέσα στα επόμενα χρόνια προβλέπεται η ευρύτερη ένταξή της στην βιομηχανική παραγωγή μέσω της αυτοματοποίησης, της ψηφιοποίησης, καθώς και τον συνδυασμό τεχνολογιών όπως το IoT (Internet of Things) και την τεχνητή νοημοσύνη.

Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην ανάπτυξη νέων υλικών με υψηλό επίπεδο λειτουργικότητας, όπως υπερκράματα και σύνθετα υλικά, με τα οποία θα μπορούν να κατασκευάζονται εξαρτήματα με υψηλή αντοχή, θερμική σταθερότητα και αποδοτικότητα. Επιπρόσθετα, η αναβάθμιση σχεδιαστικών λογισμικών και των εργαλείων προσομοίωσης δίνει την δυνατότητα για τοπολογική βελτιστοποίηση και κατασκευή ελαφρύτερων και ανθεκτικότερων δομών.

Συνοψίζοντας, σημαντικό γεγονός αποτελεί και η προώθηση βιώσιμων τεχνολογιών, που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον και ενισχύουν την ανακύκλωση των υλικών που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση. Παράλληλα, η εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης προσφέρει όλο και περισσότερη αυτονομία και ακρίβεια στην προσθετική κατασκευή. Με την βοήθεια αλγορίθμων, η παραμετροποίηση μπορεί να γίνει σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας στην μείωση των απορριμμάτων, στον εντοπισμό σφαλμάτων κατά την εκτύπωση και στην βελτιστοποίηση της ποιότητας.

Κεφάλαιο 2: Πλεγματικές δομές

2.1 Εισαγωγή στις πλεγματικές δομές-Ορισμός

Οι δομές πλέγματος, αποτελούν γεωμετρικές διατάξεις οι οποίες επαναλαμβάνονται και η διαμόρφωσή τους βασίζεται σε εσωτερικές δικτυώσεις γραμμικών ή κυψελοειδών μορφών. Συγκεκριμένα, είναι επαναλαμβανόμενα μοτίβα που συμπληρώνουν έναν όγκο ή προσαρμόζονται σε μία επιφάνεια. Η αρχή των συγκεκριμένων δομών στηρίζεται στη χωρική οργάνωση περιοδικών ή μη περιοδικών μοτίβων, με σκοπό να ενισχύσει την κατασκευή με λειτουργικές και μηχανικές ιδιότητες.

Στην μηχανική οι πλεγματικές δομές, αποτελούν βασική παράμετρο στον σχεδιασμό ελαφρύτερων κατασκευών και εξαρτημάτων. Είναι μια τεχνική, που υπήρχε ανέκαθεν στην φύση από την εσωτερική δομή των οστών έως την κρυσταλλογραφία μετάλλων. Έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στην αρχιτεκτονική και μάλιστα σε μεγάλες κατασκευές όπως για παράδειγμα, στον πύργο του Άιφελ και στο έργο του Shigeru Ban για το μουσείο τέχνης Aspen, καθώς έχει την δυνατότητα να συνδυάσει την ελαχιστοποίηση του βάρους με την υψηλή

απόδοση υπό δυναμικές ή στατικές φορτίσεις. Έχουν επίσης, εξαιρετικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, όπως υψηλή ειδική αντοχή και ακαμψία, καθώς και θερμομόνωση, γεγονός που επιτρέπει στις δομές πλέγματος να προσελκύουν όλο και περισσότερη προσοχή και να έχουν ευρείες προοπτικές εφαρμογής στη βιομηχανία.

Οι πλεγματικές δομές, κατηγοριοποιούνται με βάση την τοπολογία τους σε κανονικές, ακανόνιστες, στοχαστικές και τοπολογικά βελτιστοποιημένες. Παράλληλα, η μορφολογία τους διαφέρει γεωμετρικά καθώς τα πλέγματα μπορεί να είναι απλές κυβικές διατάξεις ή τριπλές περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες (TPMS). Εσωτερικά είναι δομημένες, κυρίως από δοκούς, ράβδους ή επιφανειακά στοιχεία, δομές από τις οποίες μπορεί να καθοριστεί η μηχανική συμπεριφορά αλλά και ο βαθμός ισοτροπίας και ανισοτροπίας που εμφανίζεται στο εσωτερικό τους.

Στον τομέα της προσθετικής κατασκευής, οι δομές πλέγματος έχουν μεγάλη σημασία, καθώς η τρισδιάστατη εκτύπωση δίνει την δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετρικά διατάξεων, χωρίς να επηρεάζεται η ακεραιότητα του υλικού. Με τις δυνατότητες που προσφέρουν οι δομές αυτές, αξιοποιούνται αρκετά σε εφαρμογές, όπως ελεγχόμενες θερμικές ροές, ελαφρές δομές μεταφορών ή ορθοπεδικά εμφυτεύματα.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι οι πλεγματικές δομές προσφέρουν θερμική και ακουστική απόδοση καθώς διαθέτουν υψηλή αναλογία επιφάνειας-όγκου, γεγονός που συμβάλλει στην απαγωγή θερμότητας σε εφαρμογές θερμικής διαχείρισης. Επιπλέον, η περίπλοκη γεωμετρία τους μπορεί να οδηγήσει σε απορρόφηση ηχητικής ενέργειας αλλά και σε φαινόμενα διασποράς κυμάτων, καθιστώντας τις πλεγματικές δομές ιδανικές σε εφαρμογές κατάλληλες για μείωση θορύβου ή κραδασμών.

Επιπλέον, λόγω της δυνατότητας ελέγχου της τοπολογίας αλλά και της πυκνότητας μπορούν να κατασκευαστούν μεταϋλικά (metamaterials) με ιδιότητες που δεν συναντώνται στην φύση, όπως για παράδειγμα αρνητικός λόγος Poisson. Οι δομές τέτοιου τύπου εφαρμόζονται ήδη στην εμβιομηχανική, κυρίως σε οδοντικά εμφυτεύματα ή τεχνητά οστά με σταδιακά μεταβαλλόμενη δυσκαμψία. Συγκεκριμένα, οι δομές πλέγματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση ακαμψίας των μεταλλικών ιατρικών εμφυτευμάτων ώστε να είναι όσο πιο κοντά γίνεται σε αυτή του πραγματικού οστού. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή θωράκισης από την τάση ενώ παράλληλα επιτρέπει τη ροή του ρευστού λόγω του πορώδους τους, με αναλογία επιφάνειας προς όγκο για καλύτερη οστεοενσωμάτωση.

Η μελέτη των πλεγματικών δομών είναι ένα πεδίο, το οποίο ερευνάται συνεχώς με εργαλεία όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, η τοπολογική βελτιστοποίηση αλλά και η κατασκευή γεωμετριών βασισμένες σε πεδία τανυστών. Η ερευνητική κοινότητα έχει εστιάσει στον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι μηχανικές φορτίσεις, η γεωμετρία και τα φυσικά φαινόμενα όπως η θερμότητα ή ο μαγνητισμός, καθιστώντας τις δομές πλέγματος ένα πολλά υποσχόμενο κλάδο στην προηγμένη μηχανική.

2.2 Κατηγοριοποίηση πλεγματικών δομών

Η ταξινόμηση των δομών πλέγματος έχει άμεση σύνδεση με την λειτουργικότητα και την επίδοση τους και είναι βασική για την κατανόηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς αλλά και για την σωστή επιλογή ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής. Η κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση την μηχανική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι δομές, την γεωμετρία και την τοπολογία τους, την κατανομή κυττάρων καθώς και με βάση την μορφή των δομικών τους στοιχείων.

2.2.1 Κατάταξη με βάση τη μηχανική συμπεριφορά

Η μηχανική συμπεριφορά των πλεγματικών δομών καθορίζεται με βάση τον τρόπο που μεταφέρονται τα εφαρμοζόμενα φορτία. Οι δομές πλέγματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον μηχανισμό φόρτισης:

- **Stretch-dominated:** Η κύρια μορφή παραμόρφωσης των δομών αυτών είναι ο εφελκυσμός και η θλίψη, δηλαδή στην περίπτωση άσκησης αξονικής φόρτισης των ράβδων. Χαρακτηρίζονται από υψηλή ειδική ακαμψία και αντοχή, ενώ παρουσιάζουν μικρότερη παραμόρφωση υπό φορτίο. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η Octet Truss, η Tetrahedral Lattice και η Kagome Lattice, οι

οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροδιαστημική (π.χ. προστατευτικά κελύφη), όπου απαιτείται υψηλή ικανότητα ανά μονάδα μάζας.

- **Bending-dominated :** Στις δομές της συγκεκριμένης κατηγορίας, το φορτίο μεταφέρεται μέσω καμπτικών μηχανισμών, δηλαδή η μηχανική τους συμπεριφορά εξαρτάται από την ικανότητα των στοιχείων τους να παραμορφώνονται υπό κάμψη. Παρουσιάζουν χαμηλότερη δυσκαμψία, αντοχή, σταθερή παραμόρφωση αλλά και αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Από τις πιο βασικές γεωμετρίες είναι η Cubic lattice, η Kelvin foam και η Diamond lattice, οι οποίες είναι ιδανικές σε εφαρμογές συστημάτων απορρόφησης κραδασμών ή σε συσκευές προστασίας από κρούση.

2.2.2 Κατάταξη με βάση την τοπολογία και την γεωμετρία

Η τοπολογική κατηγοριοποίηση αφορά την μορφή και την κατανομή των μονάδων κυττάρου στον χώρο, ενώ η γεωμετρική αναφέρεται στο μέγεθος, το σχήμα και τις διαστάσεις των μονάδων αυτών. Συγκεκριμένα:

Τοπολογική κατηγοριοποίηση:

- **Κανονικές τοπολογίες (Regular lattices):** Περιλαμβάνουν επαναλαμβανόμενες γεωμετρικές διατάξεις με προκαθορισμένη γεωμετρία και ευκολία μοντελοποίησης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η Cubic, η BCC(Body Centered Cubic), η FCC(Face Centered Cubic),η Kelvin και η Octet Truss.
- **TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces)**: Δομές με συνεχή, μη-διακοπτόμενη επιφάνεια που ελαχιστοποιεί την καμπυλότητα. Χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αναλογία επιφάνειας-όγκου, υψηλή ισοτροπία και δυνατότητες βιομιμητικής προσαρμογής. Παραδείγματα: Gyroid, Diamond, Schwarz-P.
- **Στοχαστικά ή ακανόνιστα πλέγματα (Stochastic or Irregular lattices)**: Τυχαία ή ημιτυχαία κατανεμημένες μονάδες, όπως Voronoi πλέγματα, τα οποία μιμούνται φυσικές κατανομές, ιδανικές για προσέγγιση δομών οστού ή σπογγώδους ιστού.
- **Τοπολογικά βελτιστοποιημένα πλέγματα (Topologically optimized lattices**): Παράγονται μέσω αλγοριθμικών μεθόδων (π.χ. τοπολογική βελτιστοποίηση, γενετικοί αλγόριθμοι), προσαρμόζοντας το σχήμα και την τοπολογία σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και περιορισμών.

Γεωμετρική κατηγοριοποίηση:

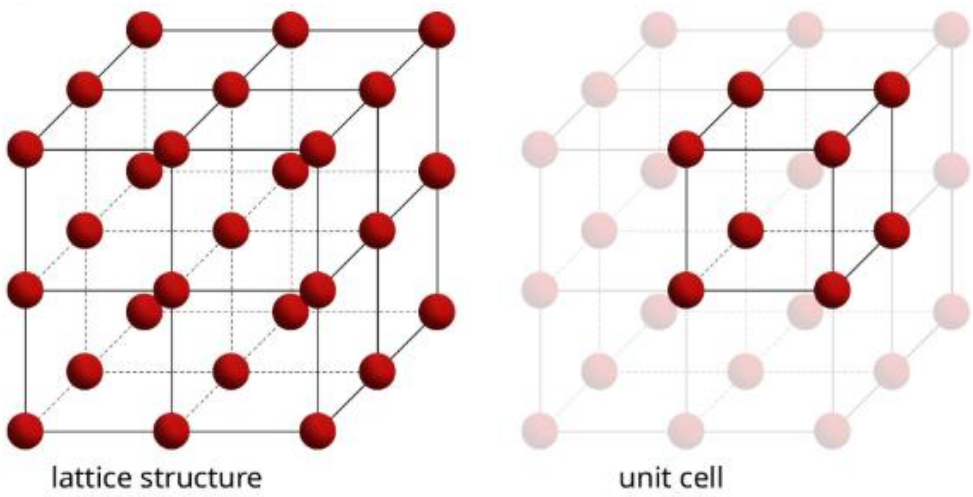
- **Beam-based:** Γεωμετρικές διατάξεις αποτελούμενες από ράβδους οι οποίοι ενώνονται σε κόμβους με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα τρισδιάστατο πλέγμα. Παρουσιάζουν εξαιρετική αναλογία αντοχής προς βάρος, ευκολία βελτιστοποίησης και είναι κατάλληλες σε δομικές εφαρμογές. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι δομές Cubic, Octet Truss, Tetrahedral, Kagome, BCC και FCC.
- **Shell-based:** Πλεγματικές δομές με συνεχείς και λεπτότοιχες επιφάνειες, μέσω των οποίων διαχωρίζεται ο χώρος σε συμπαγείς και πορώδεις περιοχές. Η διαφορά τους με τις beam-based είναι ότι το βασικό δομικό στοιχείο δεν είναι οι ράβδοι αλλά μία λεπτή και συνήθως καμπύλη επιφάνεια χωρίς αιχμές. Σε αυτή την περίπτωση ανήκουν οι TPMS δομές και συγκεκριμένα οι Gyroid, Diamond, Schwarz P και η Primitve.
- **Foam-like/cellular:** Δομές με κυψελοειδή ή άμορφη γεωμετρία βασισμένες σε φυσικές γεωμετρίες (κυψέλες μελισσών, αφροί μετάλλων κ.ο.κ.) με βασικό χαρακτηριστικό τα πολυεδρικά σχήματα. Οι δομές αυτές μπορεί να είναι είτε κανονικές είτε στοχαστικές και σε αυτές συγκαταλέγονται διάφορες γεωμετρίες όπως η Kelvin Cell, οι δομές Voronoi καθώς και Random Foam μία μη περιοδική γεωμετρία.

Η σωστή επιλογή τοπολογίας και γεωμετρίας εξαρτάται από το επιδιωκόμενο πεδίο εφαρμογής καθώς πρώτα πρέπει να ληφθούν υπόψιν παράγοντες όπως η ελαφρότητα, η ακαμψία, η απόσβεση πρόσκρουσης, η θερμική αγωγιμότητα ή η βιοσυμβατότητα.

2.2.3 Ανάλυση Κανονικών Τοπολογιών

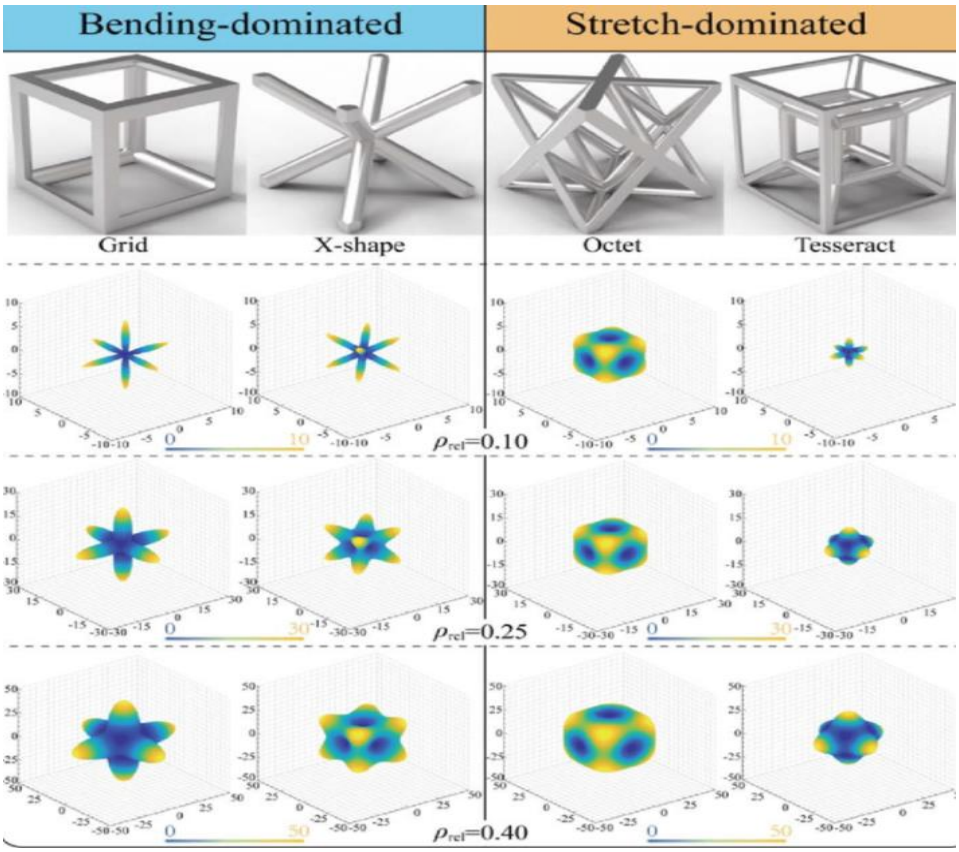
Οι κανονικές τοπολογίες (regular lattices) αντιπροσωπεύουν τις πιο διαδεδομένες και κατανοητές μορφές πλεγματικών δομών, λόγω της συμμετρίας, της ευκολίας παραμετροποίησης και της προβλέψιμης μηχανικής συμπεριφοράς τους. Η γεωμετρία τους είναι συνήθως κυβική ή πολυεδρική και οι μονάδες κυττάρου επαναλαμβάνονται σταθερά και με συγκεκριμένο τρόπο στον χώρο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι τύποι:

Cubic Lattice: Η κυβική διάταξη είναι από τις πιο απλές και βασικές γεωμετρίες των πλεγματικών δομών, καθώς αποτελείται από επαναλαμβανόμενους κύβους που απαρτίζονται από ράβδους. Οι συνδέσεις (δοκοί) ενώνουν κάθε κορυφή του κύβου με τις τρεις γειτονικές κορυφές και υπάρχουν έξι δοκοί ανά κόμβο.



Σχήμα 2.2.3.1 *Σχηματική απεικόνιση του κυβικού πλέγματος (cubic lattice structure) και της μοναδιαίας κυψελίδας (unit cell)*

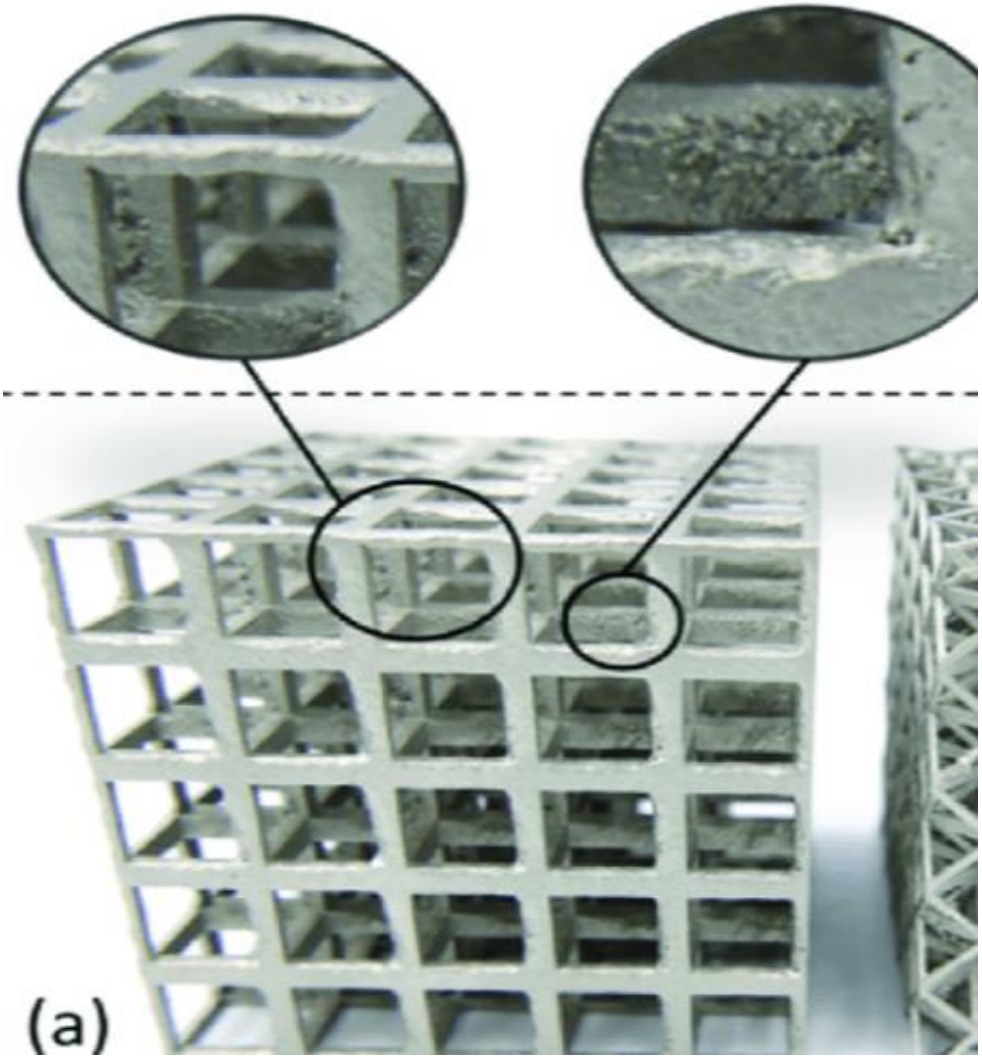
Η συγκεκριμένη δομή έχει καμπτοκρατούμενη συμπεριφορά, με την κύρια μεταφορά φορτίου να επιτελείται μέσω καμπτικών μηχανισμών. Η κυβική γεωμετρία δεν χαρακτηρίζεται από εφελκυσμό η θλίψη, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) και η αντοχή για δεδομένη μάζα υλικού. Αν και η μηχανική της απόδοση είναι περιορισμένη σε σύγκριση με άλλες τοπολογίες, προσφέρει μεγάλη ευκολία στην κατασκευή και τη μελέτη μέσω πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 2.2.3.2 *Διαφορετικοί τύποι δομών πλέγματος (Grid, X-Shape, Octet Truss, Tesseract) ταξινομημένοι με βάση τον μηχανισμό φόρτισης (bending-dominated, stretch-dominated) [27]*

Όπως φαίνεται στην αριστερή στήλη του σχήματος 2.2.3.2 στην οποία απεικονίζεται η παραμόρφωση της κυβικής δομής (grid) για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες, η δομή παρουσιάζει αντίσταση στην φόρτιση ανάλογα με την διεύθυνση την οποία ασκείται το φορτίο. Στα πολικά διαγράμματα αποδεικνύεται ότι η δομή εμφανίζει ακαμψία μόνο στις κύριες ορθοκανονικές διευθύνσεις (x,y,z). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι το φορτίο μεταφέρεται μέσω καμπιτικών μηχανισμών και όχι μέσω αξονικής φόρτισης, επομένως η κυβική διάταξη εντάσσεται στην κατηγορία των bending-dominated δομών.

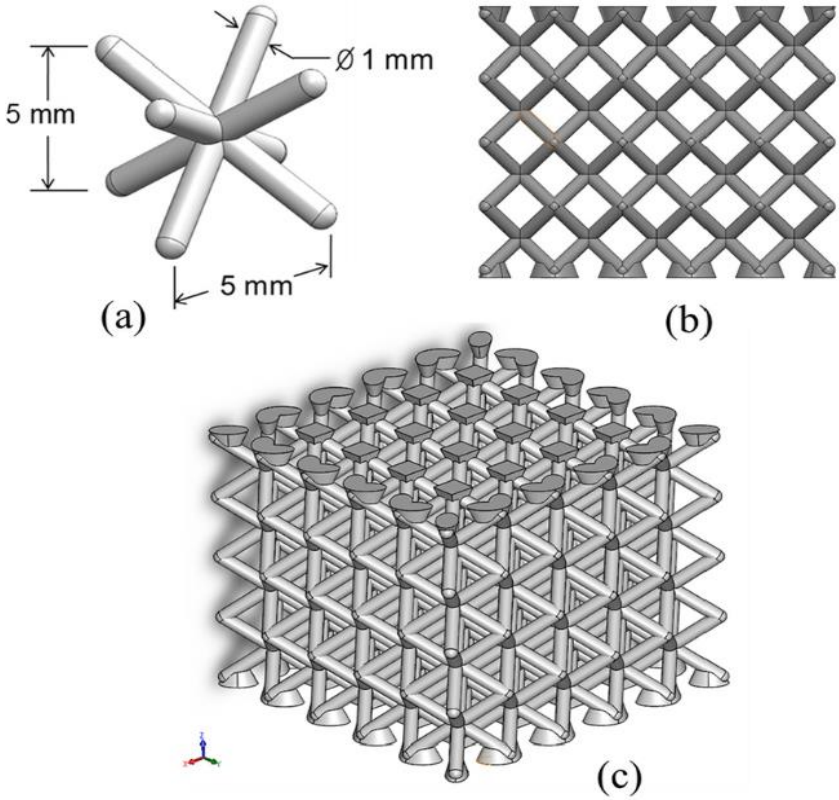
Η κυβική δομή χρησιμοποιείται συχνά ως σημείο αναφοράς σε πολλές μελέτες κυρίως για να γίνει έλεγχος απόδοσης ενός υλικού σε δομή με μικρή αποδοτικότητα φόρτισης. Επιπλέον, είναι κατάλληλη για εφαρμογές χαμηλής ή μέσης καταπόνησης και χρησιμοποιείται συχνά σε εκπαιδευτικές και πειραματικές εφαρμογές καθώς είναι εύκολη στην σχεδίαση και στην κατασκευή μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στο σχήμα 2.2.3.3 παρουσιάζεται μία κυβική διάταξη η οποία κατασκευάστηκε με την μέθοδο σύντηξης σε κλίνη σκόνης (PBF).



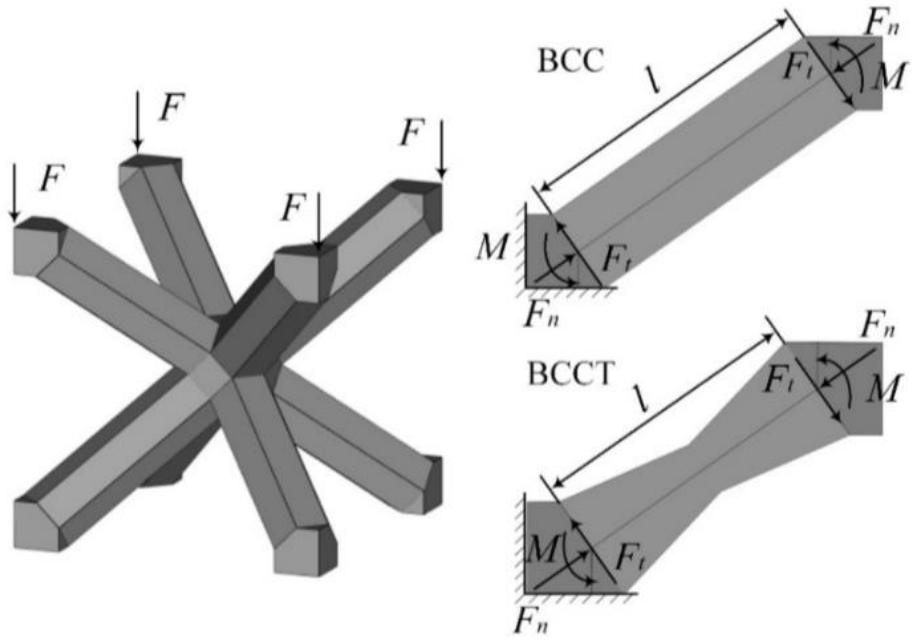
Σχήμα 2.2.3.3 *Παράδειγμα κυβικής δομής η οποία έχει κατασκευαστεί με την χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης, με την μέθοδο σύντηξης σε κλίνη σκόνης (PBF) [28]*

Body-Centered Cubic (BCC): Η BCC δομή αποτελεί τροποποίηση της κυβικής διάταξης, με την προσθήκη ενός επιπλέον κόμβου στο κέντρο του κύβου. Από τον κεντρικό αυτόν κόμβο εκτείνονται διαγώνιες ράβδοι προς όλες τις κορυφές, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία τρισδιάστατη γεωμετρία με υψηλό βαθμό συνδεσιμότητας. Το γεγονός που ενισχύει την ικανότητα του πλέγματος να μεταφέρει τα φορτία σε όλο τον όγκο του, προσδίδοντας έτσι μία πιο ομοιόμορφη κατανομή τάσεων συγκριτικά με την απλή κυβική γεωμετρία.

Η μορφολογία της BCC δομής εξαρτάται κυρίως από την διάμετρο και το μήκος των ράβδων καθώς και από την γωνία (κλίση) τους σε σχέση με την διεύθυνση φόρτισης (άξονας φόρτισης). Σε αρκετές περιπτώσεις και κυρίως σε εφαρμογές σχεδιασμού, αλλάζει η διατομή των ράβδων (tapered prism struts -BCCT) καθώς μεγαλώνει και η επιφάνεια των κόμβων ενώ υπάρχει και η δυνατότητα προσθήκης κάθετων στηρίξεων για την ενίσχυση της αξονικής φόρτισης. Οι διαφορές στην γεωμετρία των δύο δομών BCC και BCCT παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2.3.5. Οι αλλαγές αυτές ενισχύουν ιδιότητες όπως η απορρόφηση ενέργειας, η αντοχή και η μηχανική απόδοση.

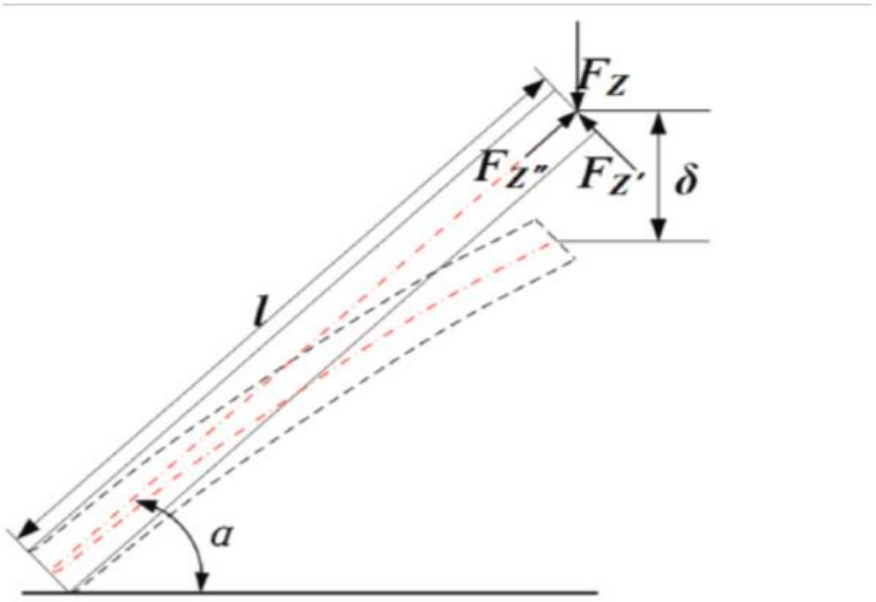


Σχήμα 2.2.3.4 *Δομή πλέγματος BCC (a)Μοναδιαία κυψελίδα με χαρακτηριστικές διαστάσεις, (b)κάτοψη της περιοδικής δομής(διάταξης) και (c) τρισδιάστατη απεικόνιση πλέγματος [29]*



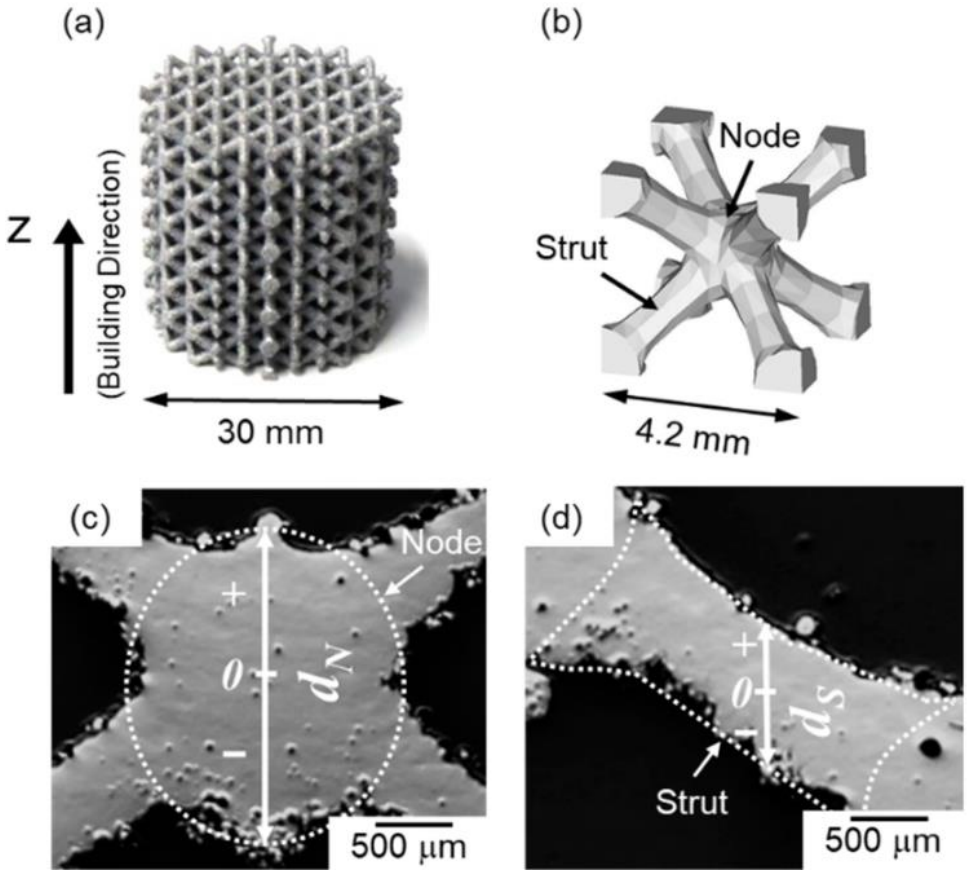
Σχήμα 2.2.3.5 *Σύγκριση της γεωμετρίας (διατομής) των δομών BCC και BCCT[30]*

Σύμφωνα με την μελέτη των Deshpande et al., 2001 [31] η οποία βασίζεται στην θεωρία δοκών Euler Bernoulli [32], η δομή BCC εμφανίζει κυρίως μηχανισμούς εφελκυσμού και κάμψης υπό φορτίο. Η κύριος μηχανισμός φόρτισης είναι η κάμψη και για τον λόγο αυτό κατατάσσεται στην κατηγορία των bending-dominated δομών. Οι ράβδοι που ενώνουν τον κεντρικό κόμβο με τις κορυφές του κύβου δέχονται καμπτική φόρτιση όταν η δομή υποβληθεί σε συμπίεση ή εφελκυσμό. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.3.6 μία δοκός πλέγματος BCC μήκους l δέχεται κατακόρυφη δύναμη Fz, η οποία αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Συγκεκριμένα, σε μία αξονική δύναμη Fz΄΄ κατά μήκος του άξονα η οποία προκαλεί εφελκυσμό της δοκού και μία κάθεται δύναμη Fz΄ που επιφέρει κάμψη στον φορέα.



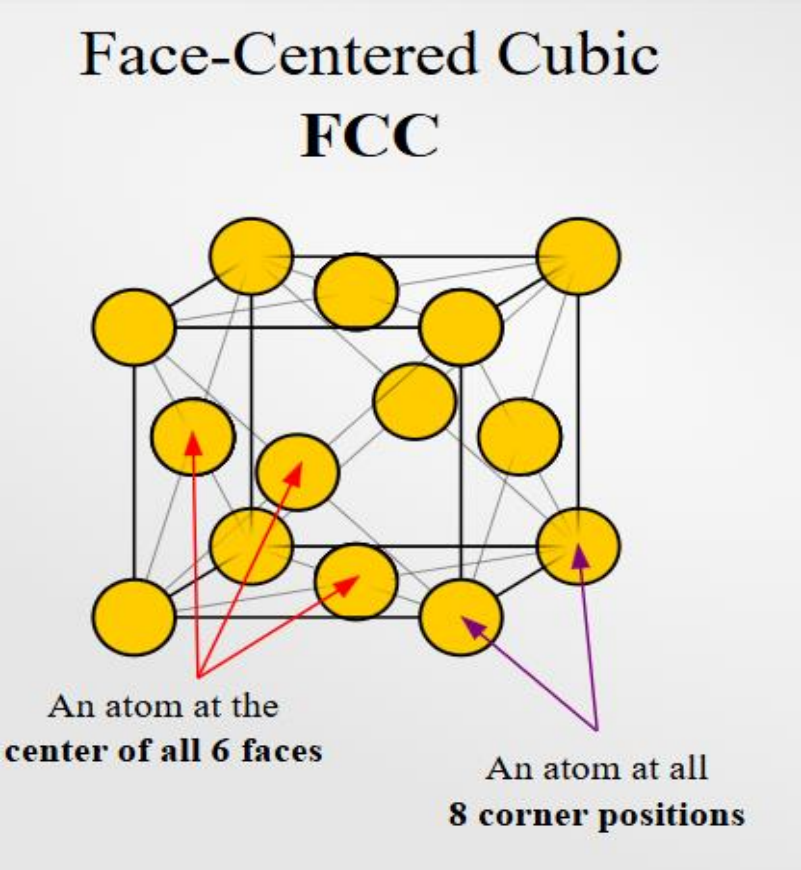
Σχήμα 2.2.3.6 *Ανάλυση κατακόρυφης δύναμης Fz η οποία ασκείται σε δοκό πλέγματος BCC [33]*

Η BCC δομή χρησιμοποιείται συχνά ως πλέγμα πλήρωσης (infill) σε μεταλλικές κατασκευές που παράγονται με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής και συγκεκριμένα με την μέθοδο της επιλεκτικής τήξης με λέιζερ (Selective Laser Melting-SLM) ή με τήξη σε κλίνη κονιοποιημένου μετάλλου (Poweder Bed Fusion-PBF). Είναι ιδανική για εφαρμογές υψηλής ενέργειας πρόσκρουσης όπως προστατευτικά υλικά και συστήματα απορρόφησης ενέργειας καθώς και για δομικά εξαρτήματα τα οποία απαιτούν υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος. Λόγω της απλής γεωμετρίας και της καλής μηχανικής απόκρισης της, η BCC δομή αποτελεί μία αξιόπιστη επιλογή στην μελέτη και εφαρμογή πλεγματικών τοπολογιών.

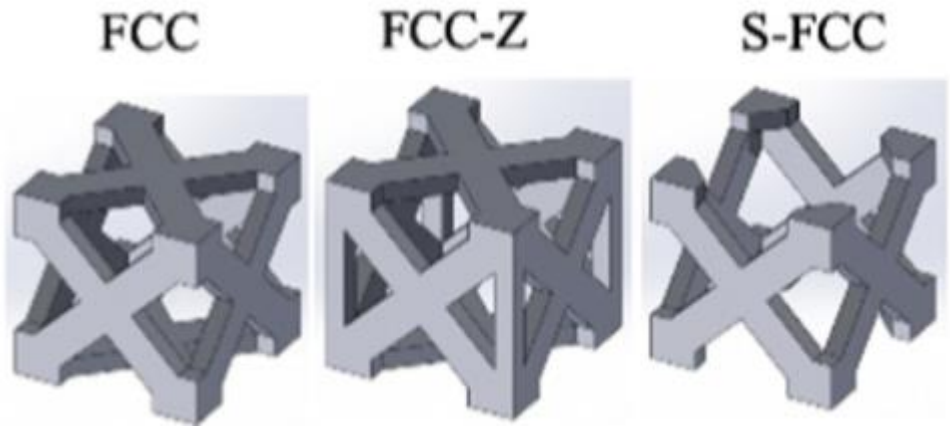


Σχήμα 2.2.3.7 *Δοκίμιο κυψελωτής δομής BCC κατασκευασμένο μέσω σύντηξης με λέιζερ σε κλίνη σκόνης (a)Κυλινδρικό δοκίμιο δομής BCC, (b)μοναδιαία κυψελίδα BCC. Μικρογραφίες οι οποίες παρουσιάζουν διατομές (c)του κόμβου (dN) και (d)της δοκού (dS) [34]*

Face-Centered Cubic (FCC): Η δομή FCC είναι μία από τις πιο συμμετρικές και πυκνές γεωμετρίες στην κατηγορία των κυψελωτών πλεγμάτων. Η γεωμετρία της είναι πιο περίπλοκη από την απλή κυβική και την BCC καθώς μία μονάδα αποτελείται από κόμβους και στις οκτώ κορυφές του κύβου αλλά και στο κέντρο κάθε μίας από τις έξι έδρες, οι οποίοι ενώνονται μέσω ράβδων (σχήμα 2.2.3.8). Λόγω της συμμετρίας της φέρει ισοτροπική μηχανική συμπεριφορά ενώ παράλληλα λόγω της υψηλής πυκνότητας της παρουσιάζει αυξημένη ακαμψία. Στην περίπτωση όμως που χρειαστεί σε κάποια εφαρμογή, βελτιστοποίηση της αντοχής σε θλίψη και της ακαμψίας κατασκευάζονται συχνά παραλλαγές της FCC δομής (π.χ. FCC-Z) μέσω της προσθετικής κατασκευής (σχήμα 2.2.3.9).

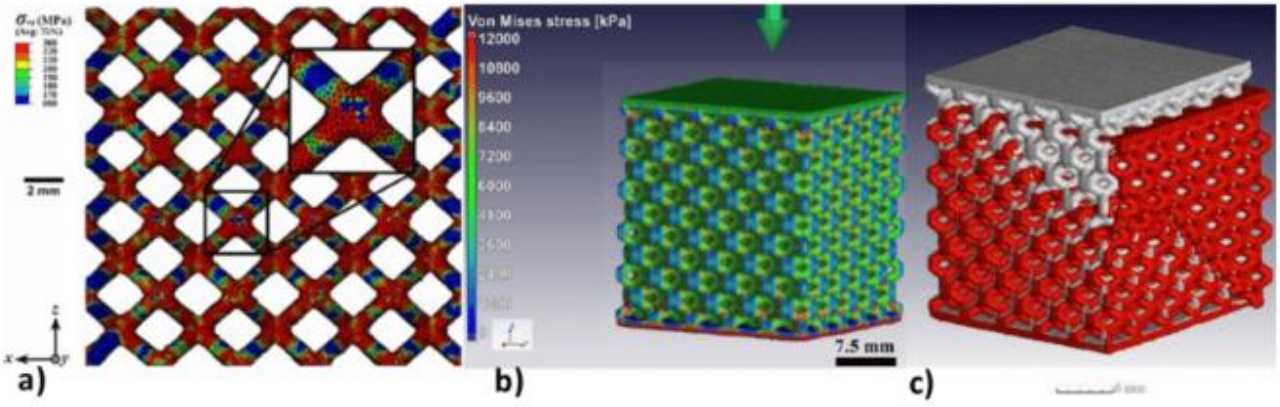


Σχήμα 2.2.3.8 *Μοναδιαία κυψελίδα FCC [35]*



Σχήμα 2.2.3.9 *Παραλλαγές της FCC κυψελωτής δομής [36]*

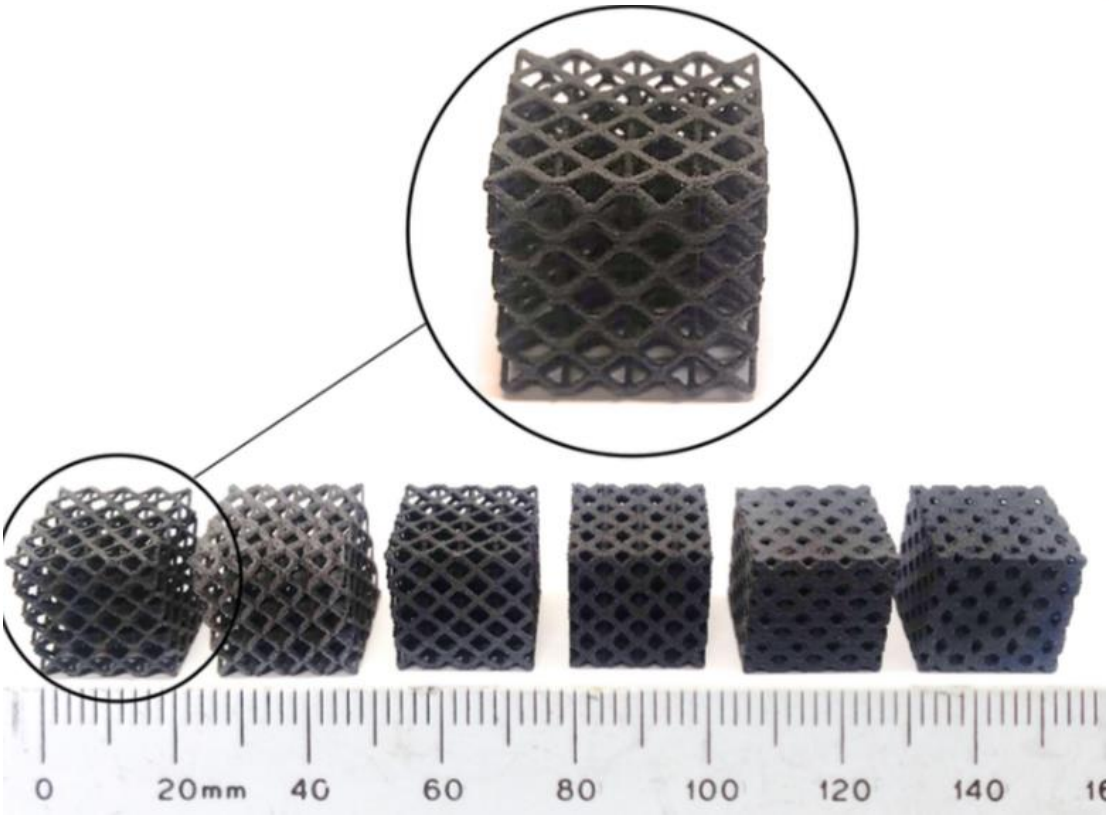
Οι ράβδοι της FCC δομής σε αντίθεση με τις δομές που αναλύθηκαν παραπάνω παρουσιάζουν αξονική φόρτιση και όχι κάμψη επομένως ανήκει στην κατηγορία των strech-dominated δομών. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας καθώς η αντοχή σε θλίψη. Παράλληλα, με την συμμετρία και τον υψηλό αριθμό κόμβων επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή φορτίου και παρουσιάζεται αντοχή σε λυγισμό.



Σχήμα 2.2.3.10 *Απεικόνιση της πλεγματικής δομής FCC και της μηχανικής της απόκρισης υπό φόρτιση (γεωμετρία, πεδίο τάσεων Von Mises και μηχανισμός παραμόρφωσης) [37]*

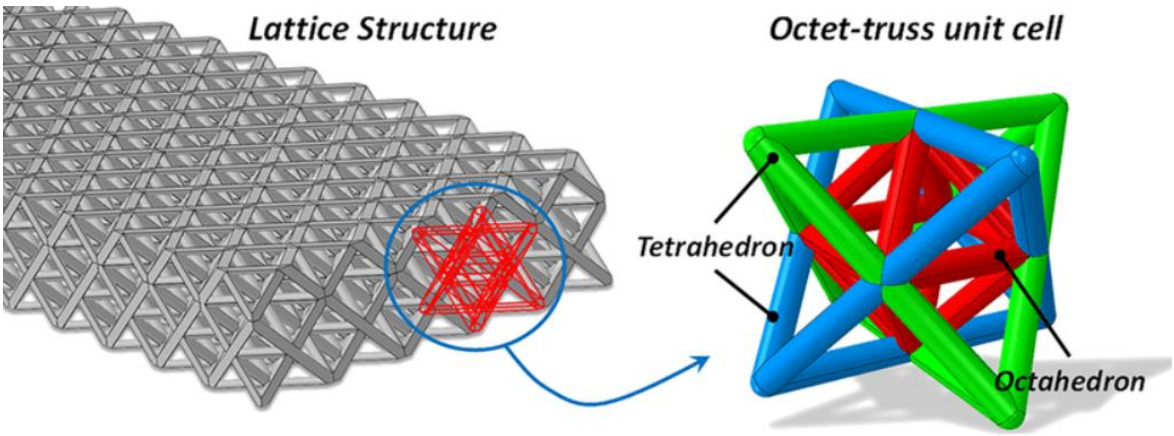
Ο Maxwell αναφέρει σε μία μελέτη του [38], ότι ο αριθμός ράβδων και κόμβων σε ένα πλέγμα συνδέεται άμεσα με την μηχανική του σταθερότητα. Η έρευνα αυτή σε συνδυασμό με το άρθρο των Deshpande et al. [39] το οποίο κατατάσσει τα πλέγματα σε stretch ή bending dominated, αποδεικνύεται ότι οι ράβδοι της FCC δομής φέρουν εφελκυστικά (αξονικά) φορτία. Παρόλα αυτά, σε ακραίες συνθήκες φόρτισης ή σε περίπτωση κατασκευαστικών ατελειών, η πλεγματική δομή μπορεί να παρουσιάσει καμπτική παραμόρφωση ιδίως στα άκρα των κόμβων ή σε σημεία που δεν έχει γίνει σωστή συγκόλληση των ράβδων.

Η FCC είναι μία δομή η οποία εφαρμόζεται κυρίως σε σύνθετες μεταλλικές κατασκευές, οι οποίες έχουν ανάγκη την αναλογία αντοχής προς βάρος. Συναντάται συχνά σε αεροδιαστημικές κατασκευές οι οποίες απαιτούν μεγάλη ακαμψία όπως κελύφη αεροπορικών στοιχείων ή στο εσωτερικό δομικών πάνελ. Επιπλέον, βρίσκει εφαρμογή στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας καθώς λειτουργεί ως απορροφητής ενέργειας σε οχήματα ή προστατευτικά συστήματα. Τέλος, ιδιαίτερα χρήσιμη έχει φανεί και στην βιοϊατρική και συγκεκριμένα σε εμφυτεύματα καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση οστού με πορώδη χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2.2.3.11 *Δείγματα FCC lattice δομών μεταβαλλόμενης πυκνότητας, κατασκευασμένα με τεχνολογία Laser Powder Bed Fusion (LPBF) [40]*

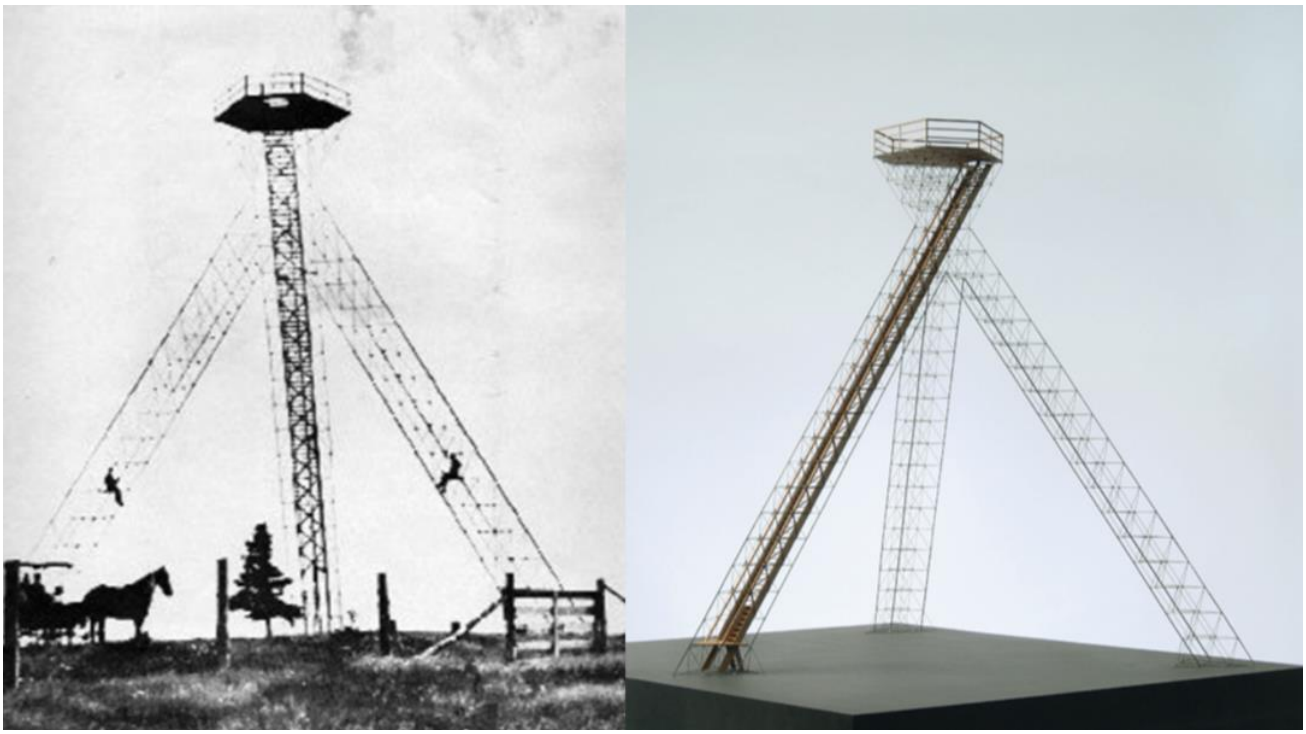
Octet Truss: Η δομή Octet Truss αποτελεί ένα από τα πιο διάσημα παραδείγματα δομών που κυριαρχούνται από εφελκυσμό. Αποτελείται από επαναλαμβανόμενα τετραεδρικά και οκταεδρικά στοιχεία τα οποία ενώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα ομοιόμορφο χωρικό πλέγμα. Κάθε κόμβος συνδέεται με δώδεκα ράβδους, οι οποίοι είναι προσανατολισμένοι διαγώνια προς τα κέντρα των τετράεδρων και οκτάεδρων, με αποτέλεσμα να προκύπτει τρισδιάστατη γεωμετρία σε όλες τις κατευθύνσεις.



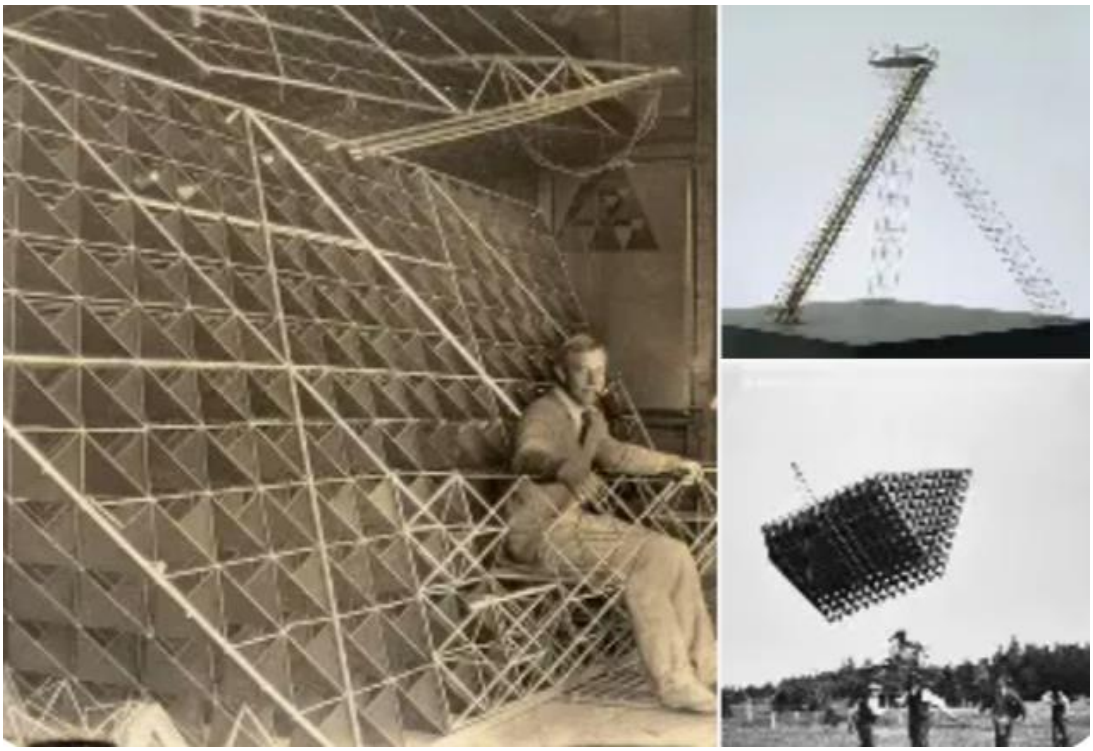
Σχήμα 2.2.3.12 *Σχηματική απεικόνιση της πλεγματικής δομής Octet Truss και η γεωμετρία της μοναδιαίας κυψελίδας της [41]*

Η Octet Truss δημιουργήθηκε για πρώτη φορά από τον Alexander G. Bell το 1903 [42] ως χωροδικτύωμα, με σκοπό την εφαρμογή της σε ελαφριές μεταλλικές κατασκευές. Έκανε συνεχώς πειράματα με τετραεδρικές

κατασκευές ώσπου κατάφερε να κατασκευάσει ένα πύργο παρατήρησης στο Beinn Bhereagh, ο οποίος αποτελούνταν από έξι τμήματα τεσσάρων ποδιών. Η κατασκευή είχε ως βάση έναν γαλβανισμένο σιδερένιο σωλήνα και τέσσερα συνδετικά παξιμάδια και το ύψος της ήταν σχεδόν είκοσι τέσσερα μέτρα.



Σχήμα 2.2.3.13 *Ιστορική και σύγχρονη απεικόνιση του πύργου παρατήρησης του Alexander G.Bell, στον οποίο εμφανίστηκε για πρώτη φορά η δομή Octet Truss. [43]*

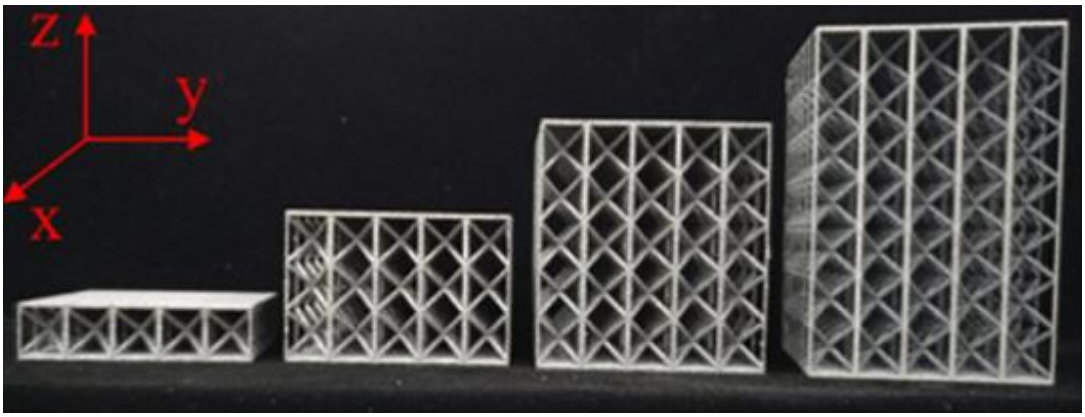


Σχήμα 2.2.3.14 *Κατασκευές με βάση την δομή Octet Truss του Alexander G.Bell [44]*

Η συγκεκριμένη δομή μελετήθηκε αρκετά χρόνια αργότερα και από τους Deshpande, Fleck και Ashby (Cambridge University, 2001) [45]. Στο συγκεκριμένο άρθρο αναφέρεται ότι η Octet Truss είναι μία δομή αποτελούμενη από τετραεδρικές και οκταεδρικές διατάξεις σε FCC συμμετρία, με τους κόμβους να συνδέονται με δώδεκα ράβδους (Z=12). Στην συνέχεια, ανέλυσαν την μηχανική συμπεριφορά της δομής επιβεβαιώνοντας ότι ανήκει στις strech-dominated γεωμετρίες ενώ επισήμαναν πως για να κυριαρχείται μία περιοδική δομή από τάση θα πρέπει το μοναδιαίο κελί της δομής να πληροί το κριτήριο του Maxwell για στατική σταθερότητα (2.2.3.1). Στην παρακάτω ανισότητα οι μεταβλητές b και j αντιπροσωπεύουν τον αριθμό ράβδων και κόμβων αντίστοιχα.

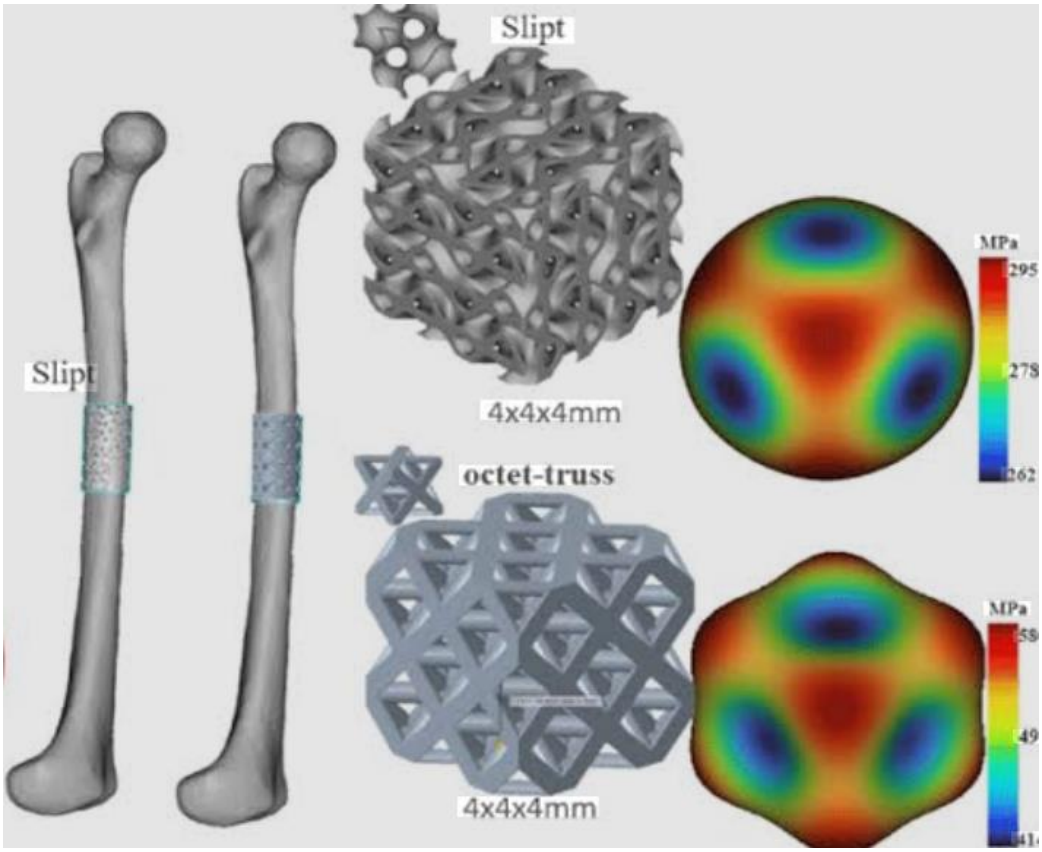
$$b - 3j + 6 \geq 0 \tag{2.2.3.1}$$

Η Octet Truss είναι μία δομή η οποία συναντάται συχνά σε διάφορους τομείς. Αρχικά, χρησιμοποιείται στην αεροδιαστημική λόγω της υψηλής αντοχής/ακαμψίας αναλογικά με το βάρος. Συγκεκριμένα, μπορεί να εφαρμοστεί σε αεροσκάφη και δορυφόρους ως εσωτερικός πυρήνας μεταξύ δύο λεπτών εξωτερικών επιφανειών (sandwich panels). Παράλληλα, είναι γνωστή και για την εφαρμογή της σε μικρό-αρχιτεκτονικά μεταλλικά πλέγματα, τα οποία κατασκευάζονται μέσω τεχνικών μικρο-κατασκεύης και φαίνεται να παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε δοκιμές παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό, καθιστά τις κατασκευές αυτές κατάλληλες για εφαρμογές σε δομικά στοιχεία αεροδιαστημικών συστημάτων. [46]



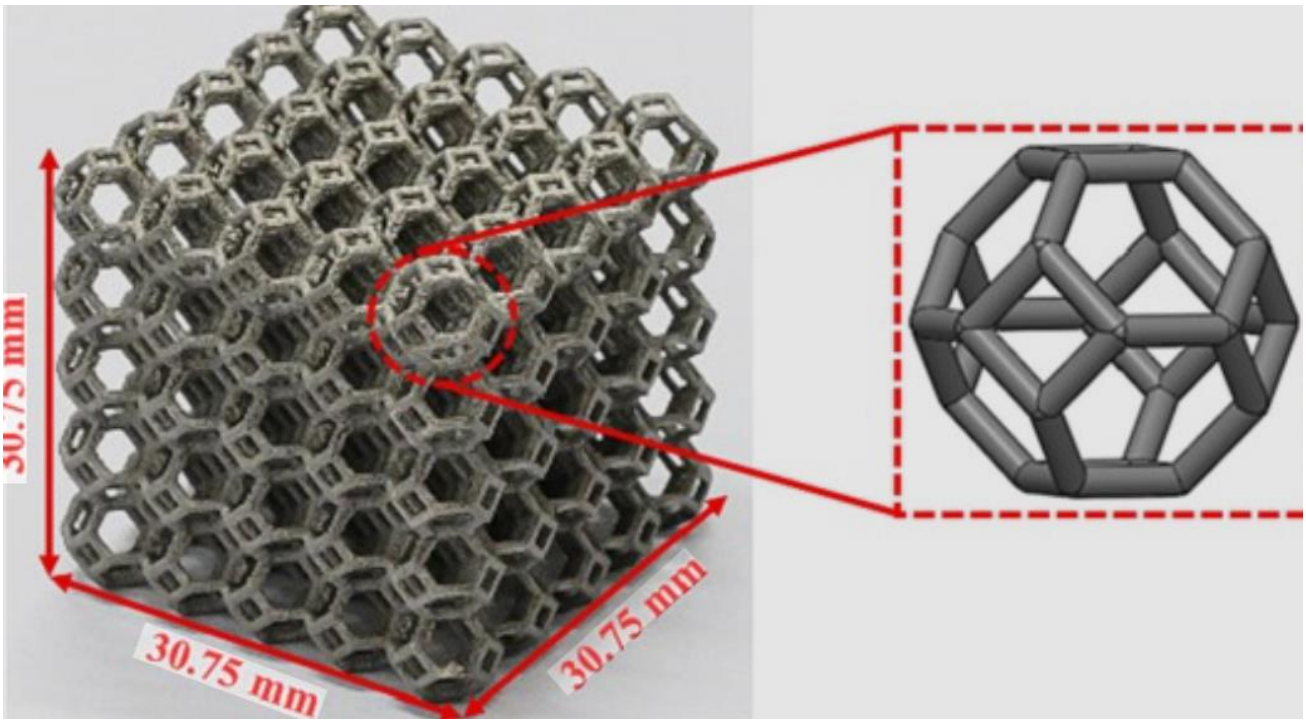
Σχήμα 2.2.3.15 *Sandwich panel με εσωτερικό πυρήνα δομής Octet Truss*

Επιπλέον, η δομή Octet Truss έχει χρησιμοποιηθεί και σε βιοϊατρικές και βιομιμητικές εφαρμογές, κυρίως ως πρότυπο για τη κατασκευή πορώδων εμφυτευμάτων και ικριωμάτων (scaffolds). Λόγω της γεωμετρίας της επιτρέπεται η διείσδυση οστικού ιστού και αγγείων, γεγονός που διευκολύνει την οστεοενσωμάτωση και την ομοιόμορφη κατανομή φορτίων στο περιβάλλον οστό. Επιπλέον, μέσω την προσθετικής κατασκευής μπορούν να υλοποιηθούν Octet Truss εμφυτεύματα από κράμα τιτανίου, τα οποία παρουσιάζουν αντοχή σε κόπωση και εξαιρετική μηχανική συμπεριφορά υπό κυκλική φόρτιση, δηλαδή ιδανικά για μακροχρόνια χρήση. [47]



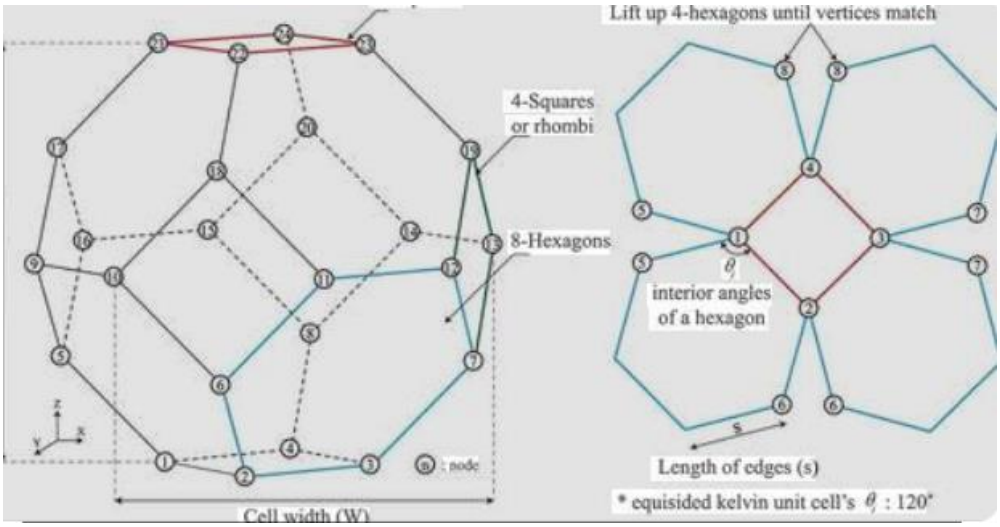
Σχήμα 2.2.3.16 *Σχεδιασμός πλεγμάτων για βιοϊατρικά ικριώματα*

Kelvin Lattice: Η δομή Kelvin αποτελεί ένα ισχυρό τρισδιάστατο γεωμετρικό πρότυπο πλήρωσης του χώρου, το οποίο βασίζεται στο τετρακαιδεκάεδρο (πολυεδρικό 14 όψεων), με εξαγωνικές και τετράγωνες όψεις. Η δομή αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1887 από τον William Thomson (Lord Kelvin), ο οποίος ήθελε να δώσει λύση στο πρόβλημα διαίρεσης του χώρου σε κελιά ίσου όγκου με την ελάχιστη επιφάνεια μεταξύ τους. Η ιδέα αυτή είναι βασισμένη σε μία ομοιόμορφη κυρτή κηρήθρα η οποία σχηματίζεται από ένα κυρτό πολύεδρο με 6 τετράγωνες έδρες και 8 εξαγωνικές έδρες.



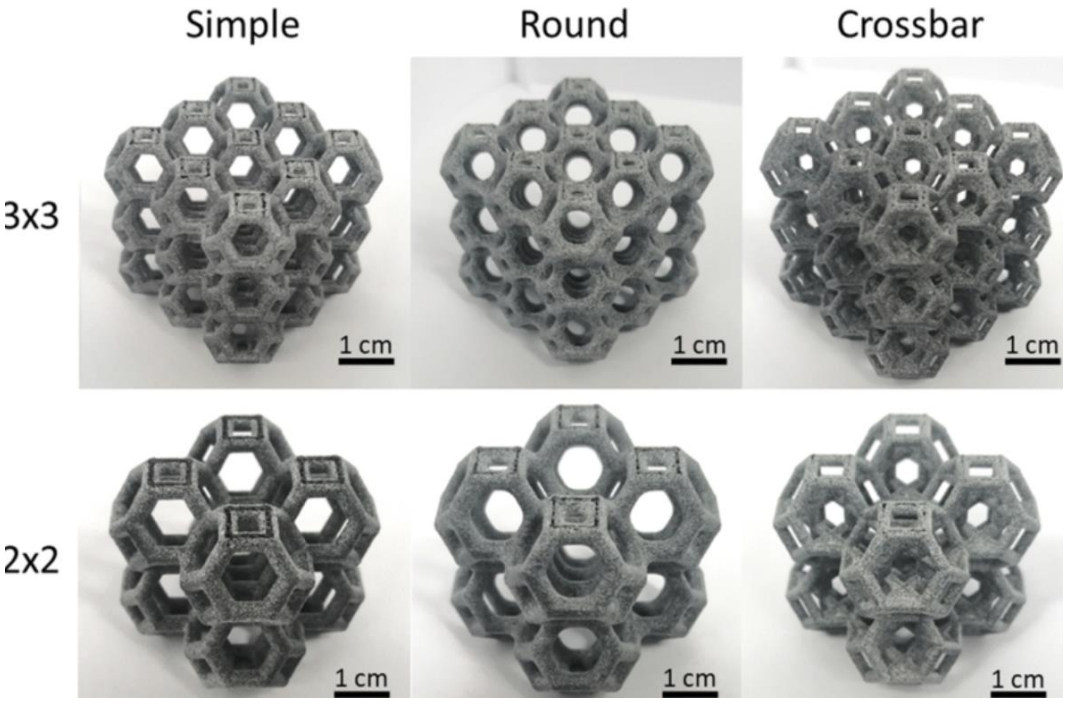
Σχήμα 2.2.3.17 *Παρουσίαση της δομής πλέγματος Kelvin με παράλληλη απεικόνιση της βασικής γεωμετρίας της μοναδιαίας κυψελίδας*

Ωστόσο, επειδή η κηρήθρα δεν ακολουθούσε τους νόμους του Plateau [48] χρησιμοποιήθηκαν καμπυλόγραμμες ακμές και ελαφρώς στρεβλωμένες ελάχιστες επιφάνειες για τις έδρες της. Κατά αυτό τον τρόπο, μειώνοντας την επιφάνεια της δομής κατά 0,2% κατάφερε οι επιφάνειες να συναντώνται ανά τριάδες ακμών με γωνία 120° και ανά τετράδες με γωνία περίπου 109,47° (νόμοι Plateau).



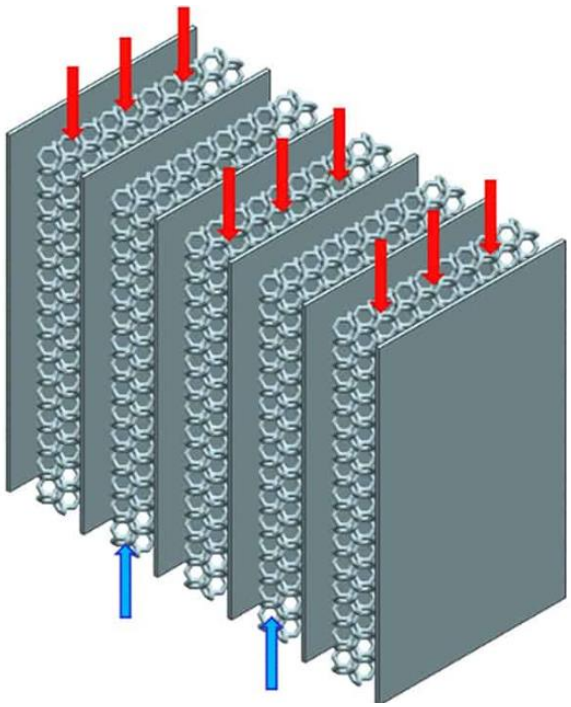
Σχήμα 2.2.3.18 *Απεικόνιση της κυψελίδας Kelvin με επισήμανση της διάταξης των χαρακτηριστικών γωνιών και εδρών συνάντησης σύμφωνα με του νόμους Plateau*

Η δομή Kelvin προσφέρει ισορροπημένη απόδοση μεταξύ κάμψης και αξονικής φόρτισης και αξιοποιείται κυρίως για εφαρμογές όπου επιθυμείται ισοτροπία. Χρησιμοποιείται συχνά σε κυψελωτές μηχανικές κατασκευές και μεταϋλικά. Αυτό συμβαίνει καθώς έχει αποδειχθεί σε μελέτες ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία παρουσιάζει αντοχή σε συμπιεστικά φορτία και έχει την δυνατότητα να απορροφά ένα ικανοποιητικό ποσοστό ενέργειας συγκριτικά με άλλες περιοδικές δομές.[49]



Σχήμα 2.2.3.19 *Δείγματα τρισδιάστατων εκτυπωμένων δομών Kelvin για δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων [49]*

Επιπλέον, είναι χρήσιμη και στον τομέα της μεταφοράς θερμότητας και ροής ρευστών. Λόγω της αυξημένης επιφάνειας επαφής και της ελεγχόμενης πτώσης πίεσης, η δομή Kelvin καθίσταται κατάλληλη για εναλλάκτες θερμότητας και συστήματα ψύξης [50]. Συνήθως, χρησιμοποιείται ως πρότυπο για προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) αλλά και σε μελέτες ανοικτών πορώδων μέσων.

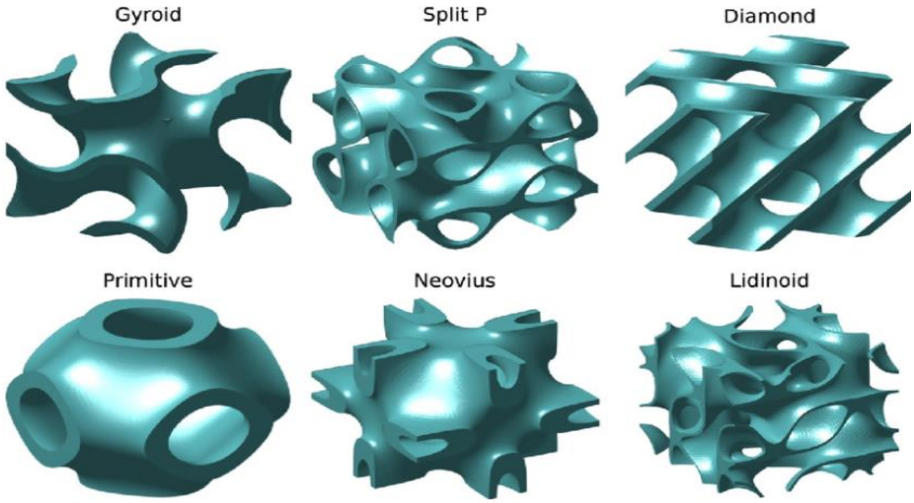


Σχήμα 2.2.3.20 *Προσομοίωση ροής και μεταφοράς θερμότητας σε δομή Kelvin [51]*

Παρά το γεγονός ότι η δομή Kelvin δεν αποτελεί την βέλτιστη λύση ελάχιστης επιφάνειας, είναι αρκετά χρήσιμη ως πρότυπο σχεδιασμού σε σύγχρονες μηχανικές εφαρμογές. Θεωρείται ένα θεμελιώδες γεωμετρικό μοντέλο με ιδιαίτερη σημασία σε τομείς όπως είναι η φυσική, τα μαθηματικά αλλά και η μηχανική.

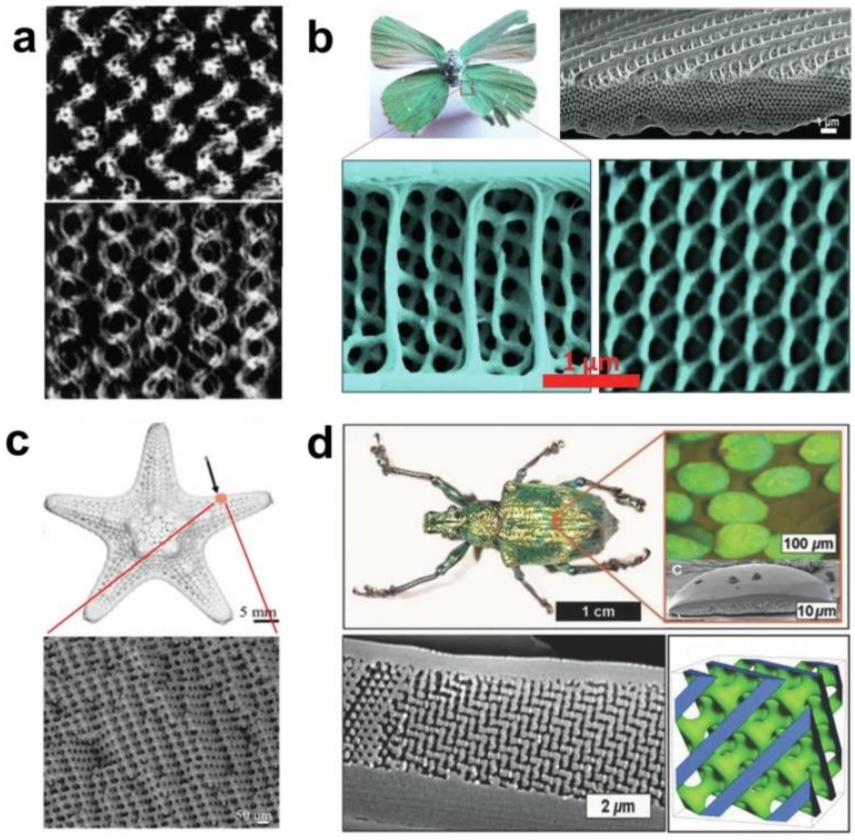
2.2.4 Ανάλυση Δομών TPMS (Triply Periodic Minimal Surfaces)

Οι TPMS δομές βασίζονται σε μαθηματικά καθορισμένες επιφάνειες που ελαχιστοποιούν την καμπυλότητά τους σε τρεις διαστάσεις, ενώ παραμένουν περιοδικές στον χώρο. Χαρακτηρίζονται από συνεχείς, μη-διακοπτόμενες επιφάνειες χωρίς αιχμηρές συνδέσεις, οι οποίες διαχωρίζουν τον χώρο σε δύο αλληλοσυνεχείς φάσεις. Αυτό τους προσδίδει ιδιαίτερα ευνοϊκές ιδιότητες, όπως υψηλή ειδική ακαμψία, ισοτροπία μηχανικής συμπεριφοράς, καθώς και αυξημένη επιφάνεια για θερμικές ή βιολογικές εφαρμογές. Η καμπυλότητα είναι παντού μηδενική μέση (mean curvature zero), γεγονός που τους προσδίδει φυσική σταθερότητα και αυξημένες δυνατότητες στην κατανομή τάσεων.



Σχήμα 2.2.4.1 *Έξι διαφορετικοί τύποι τριπλά περιοδικών ελάχιστων επιφανειών (TPMS)*

Η πρώτη αναφορά για τις δομές TPMS έγινε το 1865 από τον Hermann Schwarz [52] όπου μαζί με τον μαθητή του E.R. Neovius περιέγραψαν περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες. Οι επιφάνειες αυτές απασχόλησαν αργότερα τον Alan Schoen, ο οποίος τις ονόμασε στην πρωτοποριακή του έκθεση στην οποία περιέγραφε το γυροειδές (gyroid) και άλλες τριπλά περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες (TPMS) [53]. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι, οι TPMS δεν ανακαλύφθηκαν από τον Schwarz καθώς αποτυπωνόντουσαν ήδη σε φυσικά συστήματα όπως σε βιολογικές κυβικές μεμβράνες, φτερά πεταλούδας, εξωσκελετικούς σκαθαριών κ.ο.κ.



Σχήμα 2.2.4.2 *Φυσικά συστήματα που παρουσιάζουν δομές TPMS*

Οι TPMS δομές θεωρούνται ιδανικές για προσθετικές εφαρμογές λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας που μπορούν να υποστηρίξουν, της υψηλής ισοτροπίας στις μηχανικές τους ιδιότητες και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας. Επιπλέον, η φύση των TPMS επιτρέπει τον παραμετρικό έλεγχο της σχετικής πυκνότητας καθώς και τον έλεγχο της διαπερατότητας, καθιστώντας τες ιδανικές για εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας, ρευστού ή κυττάρων.

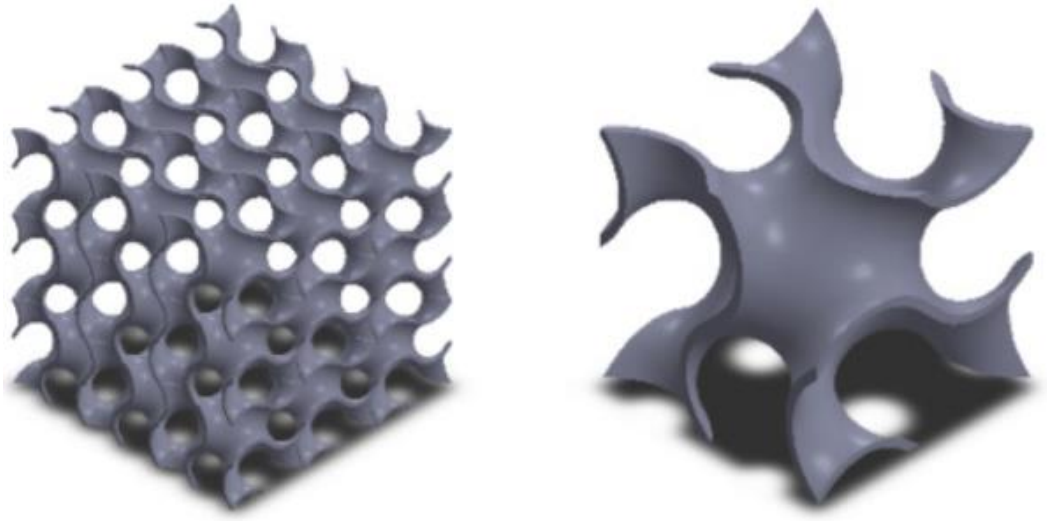
Επιπλέον, παρουσιάζουν εξαιρετική προσαρμοστικότητα στον σχεδιασμό και επιτρέπουν παραμετρική τροποποίηση της τοπολογίας ώστε να ανταποκρίνεται σε ειδικές απαιτήσεις εφαρμογής. Η καμπυλόμορφη φύση τους αποτρέπει τη συγκέντρωση τάσεων, προσδίδοντας σταθερότητα ακόμα και σε δυναμικά φορτιζόμενα περιβάλλοντα. Η παραγωγή τους είναι κατάλληλη για τεχνικές όπως SLS, SLA και DMLS, οι οποίες μπορούν να αποδώσουν με ακρίβεια τη γεωμετρική πολυπλοκότητα.

Οι TPMS δομές υπερτερούν σε σχέση με τις κυψελωτές δομές που βασίζονται σε δοκούς, καθώς παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την κατασκευασιμότητα μέσω επιλεκτικής τήξης με λέιζερ (SLM). Δεδομένου ότι, στις TPMS δομές η γωνία των κυταρρικών τοιχωμάτων μεταβάλλεται συνεχώς, δίνεται η δυνατότητα στα προηγούμενα στρώματα να υποστηρίξουν τα επόμενα και έτσι να βελτιωθεί η διαδικασία κατασκευής. Σύμφωνα με μελέτη των Maskery et al. (2017) οι δομές Gyroid που ανήκουν στην κατηγορία TPMS έχουν σχεδόν τριπλάσια ειδική απορρόφηση ενέργειας συγκριτικά με δομές τύπου BCC παρόμοιας πορώδους επιφάνειας. [54]

Βασικές γεωμετρίες:

Gyroid: Θεωρείται μία από τις πιο γνωστές TPMS γεωμετρίες. Χαρακτηρίζεται από μία συνεχή κυματοειδή και καμπυλόμορφη επιφάνεια χωρίς επίπεδες διατομές, ενώ εμφανίζει ομοιογενή κατανομή τάσεων και μεγάλη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου. Παρουσιάζει επίσης, αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό και κρούση. Η γυροειδής δομή δεν διαθέτει αιχμηρές ακμές ούτε επίπεδα συμμετρίας, γεγονός που αυξάνει την αποδοτικότητα της στην μηχανική κατανομή φορτίων και παράλληλα μειώνει την πιθανότητας συγκέντρωσης τάσεων.

Η γεωμετρία αυτή καταγράφηκε για πρώτη φορά από τον Alan H. Schoen την περίοδο όπου η NASA έκανε έρευνα για άπειρες περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες [55]. Ο Schoen κατάφερε να υπολογίσει την γωνία συσχέτισης και να κάνει μία επίδειξη εικόνων περίπλοκων πλαστικών μοντέλων. Ήταν ο ίδιος που ανέφερε, ότι γυροειδής δομή δεν περιέχει ευθείες γραμμές και επίπεδα συμμετρίας. Η έρευνα του όμως δεν ήταν ολοκληρωμένη και για αυτό το λόγο η δομή αυτή συνέχισε να μελετάται. Μάλιστα, το 1996 Große-Brauckmann και Wohlgemuth [56] απέδειξαν ότι το γυροειδές είναι ενσωματωμένο και έχει συνοδούς σταθερής μέσης καμπυλότητας.



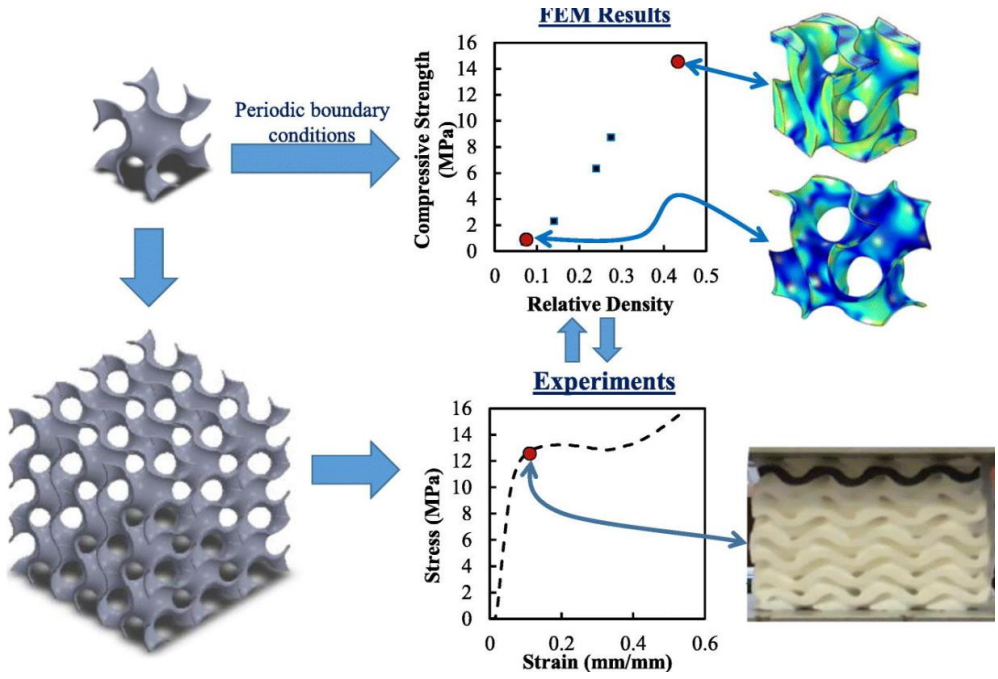
Σχήμα 2.2.4.3 *Γεωμετρία γυροειδούς δομής*

Η Gyroid μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά μέσω έμμεσων εξισώσεων (implicit), οι οποίες επιτρέπουν τον άμεσο παραμετρικό έλεγχο της γεωμετρίας της. Συγκεκριμένα, μπορεί να προσεγγιστεί τριγωνομετρικά από την παρακάτω εξίσωση:

$$sinx\ cosy + siny\ cosz + sinz\ cosx = C \tag{2.2.4.1}$$

Η εξίσωση αυτή παρουσιάζει το σύνολο των επιπέδων της ελάχιστης επιφάνειας. Η μεταβολή του δεξιού μέλους επιτρέπει την τροποποίηση του πορώδους και της σχετικής πυκνότητας της δομής, γεγονός που βοηθάει στον σχεδιασμό υλικών πλέγματος και εμφυτευμάτων. Παράλληλα, η κλιμάκωση των συντεταγμένων χρησιμοποιείται με σκοπό να οριστεί το πραγματικό μέγεθος κελιού στο μοντέλο CAD.

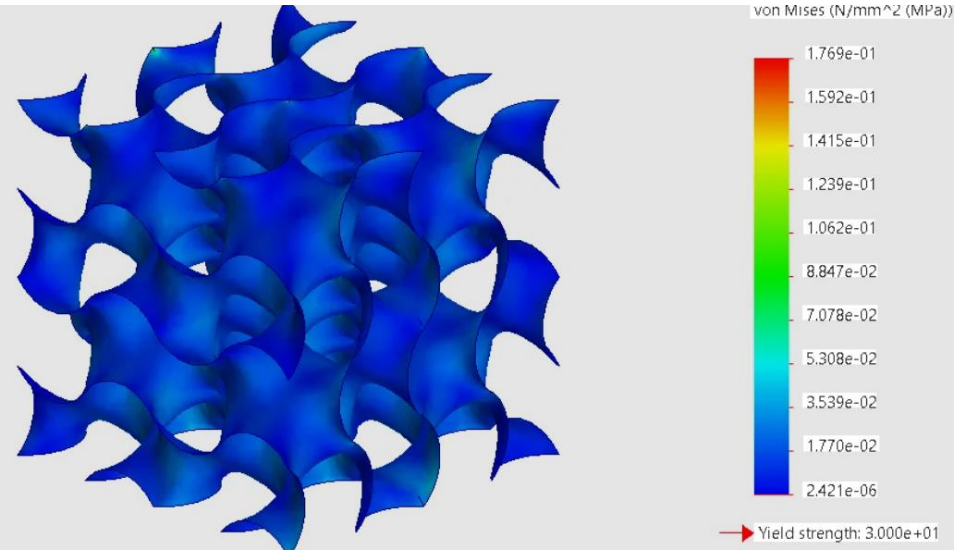
Λόγω της γεωμετρίας και της πυκνότητάς της η δομή γυροειδούς φαίνεται να παρουσιάζει καλή μηχανική συμπεριφορά και ιδιαίτερα υπό συμπιεστική φόρτιση. Αριθμητικές αναλύσεις οι οποίες έχουν προκύψει με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και έχουν εφαρμοστεί συνοριακές συνθήκες στην μοναδιαία κυψέλη, παρουσιάζουν την μη γραμμική αύξηση της αντοχής σε θλίψη ως συνάρτηση της σχετικής πυκνότητας [57].



Σχήμα 2.2.4.4 *Αριθμητική και πειραματική αξιολόγηση της δομής gyroid υπό συμπιεστική φόρτιση*

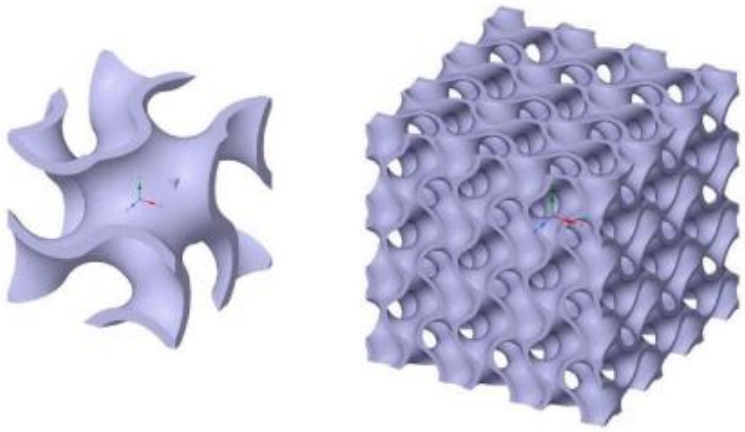
Στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.4.5 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη η οποία προκύπτει από την πειραματική διαδικασία εκτύπωσης δοκιμίου με gyroid γεωμετρία.. Τα αποτελέσματα δείχνουν την προοδευτική αστοχία καθώς και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, γεγονός που καθιστά την δομή ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν ελεγχόμενη μηχανική απόκριση.[58]

Μέσω ανάλυσης της κατανομής της ισοδύναμης τάσεις von Mises προκύπτει ότι, στην περίπτωση αυξανόμενης συμπιεστικής παραμόρφωσης, οι τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος της καμπύλης επιφάνειας της δομής, χωρίς να υπάρχουν έντονες τοπικές συγκεντρώσεις. Παρουσιάζεται σταδιακή ανάπτυξη της πλαστικής παραμόρφωσης, γεγονός που δεν συναντάται συνήθως σε πλεγματικές δομές που βασίζονται σε δοκούς.



Σχήμα 2.2.4.5 *Κατανομή της ισοδύναμης τάσης Von Mises σε γυροειδή δομή υπό συμπιεστική φόρτιση*

Diamond (Schwarz-D): Η Diamond είναι μία από τις πιο διαδεδομένες δομές που ανήκουν στην κατηγορία TPMS και αυτό λόγω της γεωμετρίας της και των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων της. Χαρακτηρίζεται, από μία συνεχή καμπυλόμορφη γεωμετρία (δίκτυο) χωρίς διακριτούς δοκούς. Όπως όλες οι δομές TPMS έτσι και η diamond διαχωρίζει τον χώρο σε δύο αλληλένδετες και ισσοδύναμες φάσεις, όπου κάθε μία σχηματίζει ένα δίκτυο πόρων με διαμαντοειδή (ρομβοειδή) τοπολογία. Παρουσιάζει κυβική συμμετρία, με ομαλές καμπυλότητες και όχι αιχμηρές γωνίες ή τοπικές ασυνέχειες.

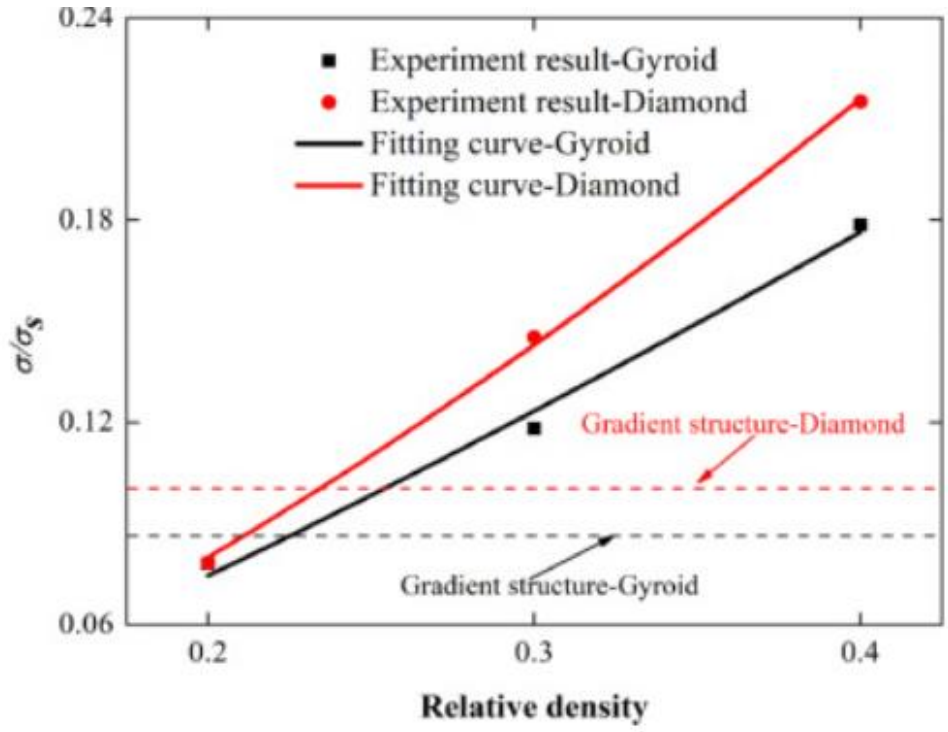


Σχήμα 2.2.4.6 *Μοναδιαία κυψέλη και περιοδική αναπαράσταση της Diamond δομής*

Η πρώτη αναφορά για την δομή diamond ήταν το 1865 από τον Hermann A.Schwarz [59], ο οποίος βάσει της μελέτης του για τις ελάχιστες επιφάνειες, ανακάλυψε και ανέλυσε την δομή αυτή. Συγκεκριμένα, ανέφερε ότι η επιφάνεια της διαμαντοειδούς δομής παρουσιάζει συμμετρία τύπου διαμαντιού ευθυγραμμισμένη με το κυβικό πλέγμα, με επίκεντρο την επιφάνεια και την ομάδα χώρου $Fd.\bar{3}m$ (Diamond cubic symmetry). Η μαθηματική προσέγγιση που δόθηκε παρουσιάζεται παρακάτω με την τριγωνομετρική εξίσωση ισοεπιφάνειας 2.2.4.2 :

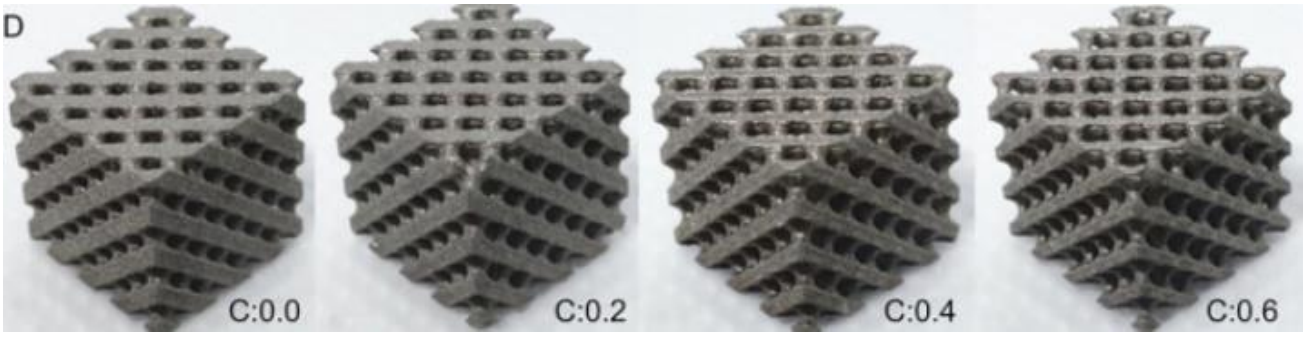
$$sinx\ cosy\ sinz + sinx\ cosy\ \ cosz + \mathrm{cos}x\ siny\ cosz + cosx\ cosy\ sinz = \mathrm{C} \tag{2.2.4.2}$$

Σύμφωνα με πειραματικές δοκιμές και αριθμητικές αναλύσεις [60] η δομή diamond παρουσιάζει αυξημένη αρχική ακαμψία και αντοχή συγκριτικά με άλλες TPMS δομές, όπως για παράδειγμα την γυροειδή. Η μηχανική της απόκριση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την κατανομή της πυκνότητας αλλά και από το είδος της φόρτισης, αν δηλαδή είναι στατική ή δυναμική. Εάν δέχεται δυναμική καταπόνηση, η δομή παρουσιάζει αυξημένη αντοχή ενώ στην περίπτωση που η πυκνότητα της δομής μεταβάλλεται χωρικά (graded) τότε υπάρχει αύξηση της ειδικής απορρόφησης ενέργειας και ελεγχόμενη παραμόρφωση συγκριτικά με της αντίστοιχες ομοιόμορφες δομές.



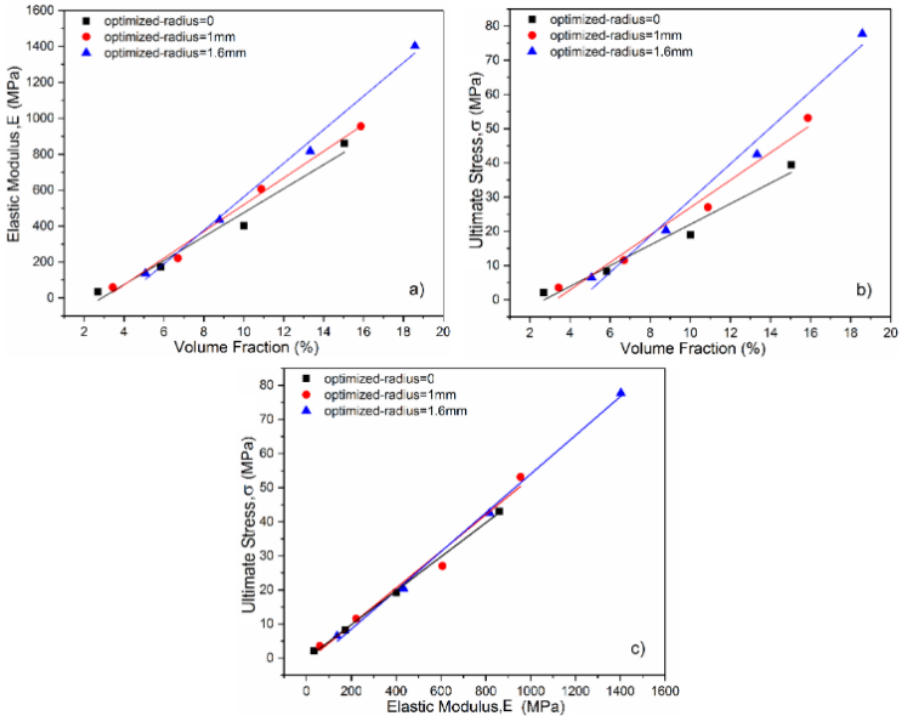
Σχήμα 2.2.4.7 *Σύγκριση κανονικοποιημένης αντοχής των δομών Diamond και Gyroid ως συνάρτηση της σχετικής πυκνότητας.*

Η δομή Diamond έχει μελετηθεί αρκετά για την χρήση της σε ικριώματα οστικής αναγέννησης και πορώδη εμφυτεύματα. Λόγω της καμπυλόμορφης γεωμετρίας της και της διασυνδεσιμότητας των πόρων της, παρουσιάζει ομοιότητα με τον φυσικό σπογγώδη οστικό ιστό, επομένως είναι ιδανική για τον βιομιμητικό σχεδιασμό.



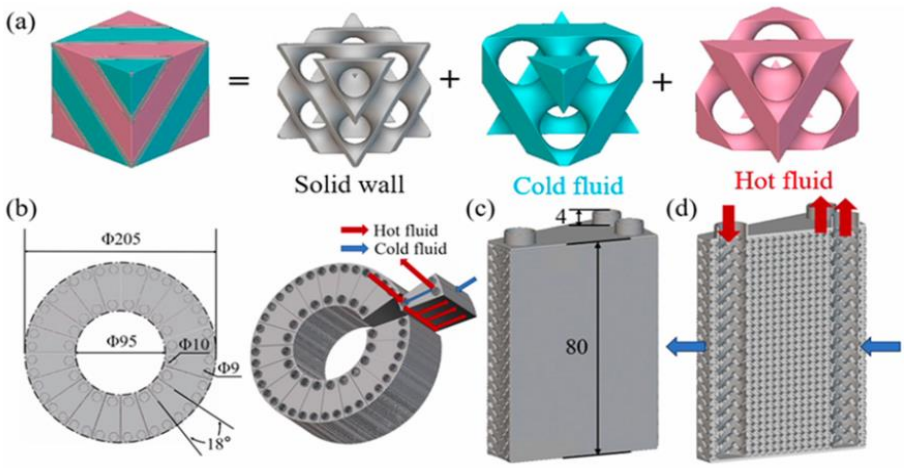
Σχήμα 2.2.4.8 *Παράδειγμα ικριώματος με diamond δομή σε διαφορετικά πάχη, με σκοπό την χρήση του σε επιδιορθώσεις οστικών ελαττωμάτων [61]*

Σύμφωνα με έρευνα των Liu et al. (2018) [62] αποδείχθηκε ότι οι diamond κυψελωτές δομές παρουσιάζουν καλές δυνατότητες όσον αφορά την μηχανική προσαρμογή τους για ικριώματα οστών. Συγκεκριμένα, μετά από πειραματικές διαδικασίες προέκυψε ότι η αντοχή σε θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας της δομής κυμαίνονται από 2-78 MPa και 34-1403 MPa αντίστοιχα, ποσά συγκρίσιμα με το δοκιδωτό οστό. Παράλληλα, όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.2.4.9 στο διάγραμμα (c), η αντοχή σε συμπίεση των βελτιστοποιημένων (optimized) δομών είναι ανώτερη από των μη βελτιστοποιημένων (non-optimized) δομών υπό τις ίδιες συνθήκες μέτρου ελαστικότητας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντοχή στην κόπωση για μακροχρόνια χρήση στο ανθρώπινο σώμα.



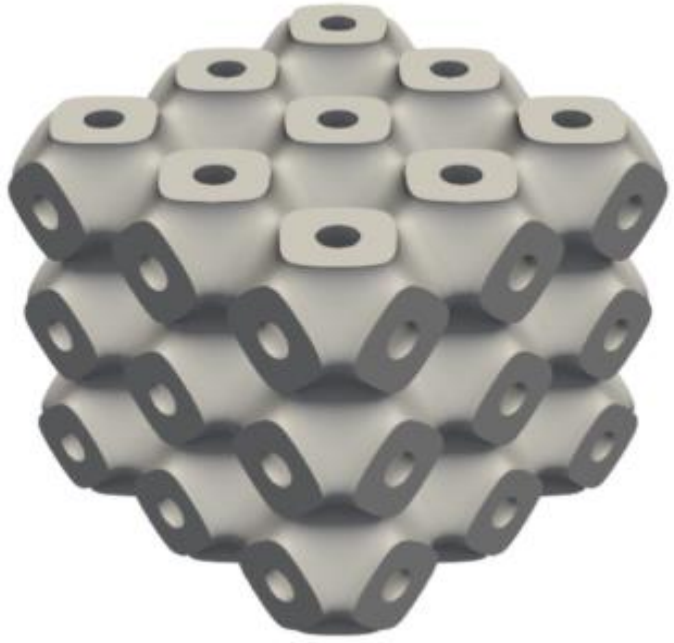
Σχήμα 2.2.4.9 *Μηχανικές ιδιότητες της διαμαντοειδούς δομής με διαφορετική βελτιστοποιημένη ακτίνα: (a) Μέτρο ελαστικότητας, (b) Τάση θραύσης και (c) Σχέση μέτρου ελαστικότητας-αντοχής σε θλίψη*

Επιπλέον, η δομή έχει χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές θερμικής διαχείρισης, και συγκεκριμένα ως εσωτερική δομή σε εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος εκτυπώθηκε με την τεχνολογία SLM με ανοξείδωτο ατσάλι [63]. Από την μελέτη αυτή, φάνηκε ότι η γεωμετρία της δομής δίνει την δυνατότητα διαχωρισμού του χώρου σε δύο κανάλια, επιτρέποντας την ροή θερμού και ψυχρού ρευστού σε διαφορετικές κατευθύνσεις όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.2.4.10.



Σχήμα 2.2.4.10 *Σύστημα δακτυλοειδή εναλλάκτη θερμότητας με diamond δομή, ο οποίος παρουσιάζει αντίθετη ροή θερμού και ψυχρού ρευστού*

Schwarz-P (Primitive): Η primitive είναι μία κατηγορία δομής η οποία ανήκει στις περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες Schwarz, και συγκεκριμένα είναι μία περιοδική και στους τρεις άξονες επιφάνεια με μηδενική μέση καμπυλότητα. Όπως ισχύει για όλες τις δομές Schwarz έτσι και η primitive έχει τοπολογικό γένος 3 (αριθμός οπών), το ελάχιστο γένος που θα μπορούσε να έχει μία τριπλά περιοδική ελάχιστη επιφάνεια TPMS. Η γεωμετρία της έχει αρκετά ισχυρή συμμετρία καθώς το μοτίβο ανοιγμάτων και καναλιών που παρουσιάζει είναι επαναλαμβανόμενο ανά μοναδιαίο κελί.



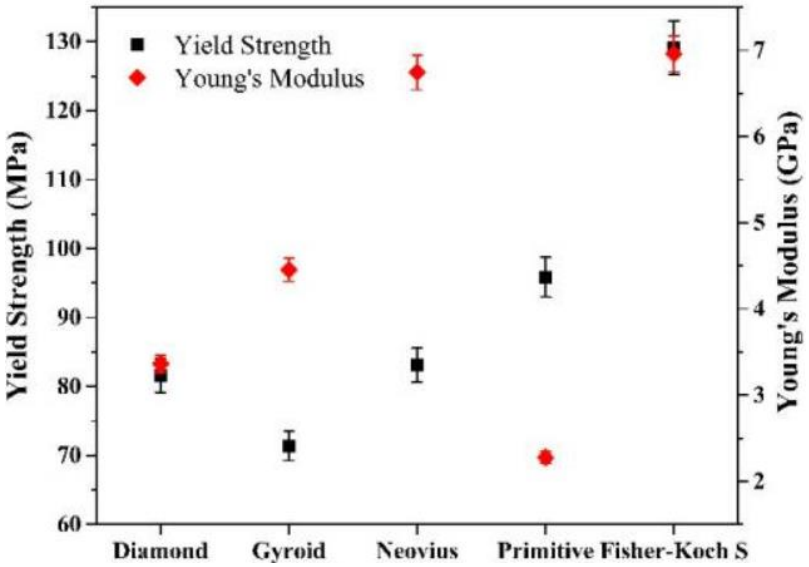
Σχήμα 2.2.4.11 *Απεικόνιση της δομής Schwarz-P*

Η δομή αυτή παρουσιάστηκε από τον Schoen ο οποίος την ονόμασε «Primitive» καθώς έχει δύο αλληλένδετους λαβύρινθους, οι οποίοι μοιάζουν με την διογκωμένη εκδοχή του απλού κυβικού πλέγματος. Η βασική περιγραφή της επιφάνειας schwarz-P δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

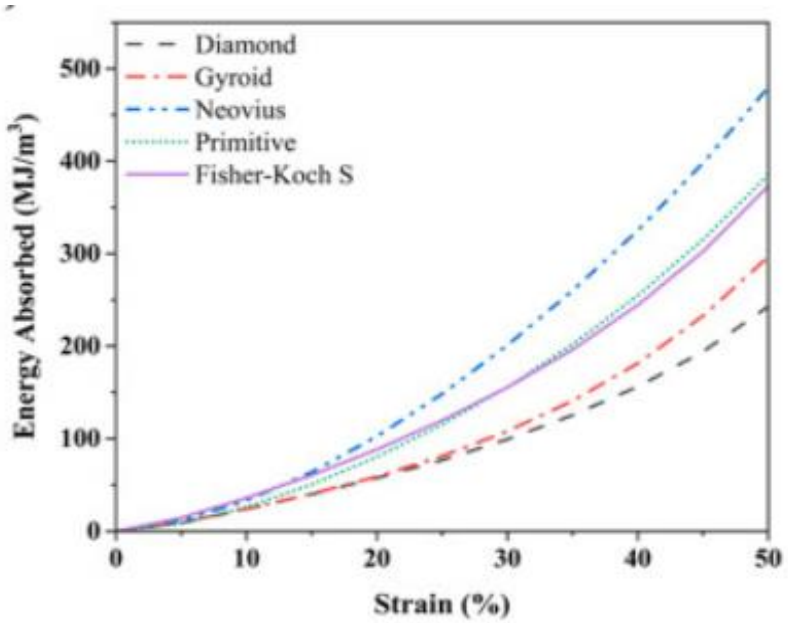
$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0$$

(2.2.4.3)

Σε έρευνα των Ravichander et al., σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν διαφορετικές διαβαθμισμένες κατασκευές πλέγματος από χάλυβα 316L με διαδικασία LPBF (SLS). Μία από αυτές τις κατηγορίες ήταν και η δομή schwarz-P, με σκοπό την σύγκριση της μορφολογίας της επιφάνειας, της στατικής πίεσης και τις δυνατότητες απορρόφησης ενέργειας της συγκριτικά με άλλα πλέγματα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αρχικά ήταν ότι τα βαθμολογημένα δείγματα είχαν περισσότερη ακαμψία και απορρόφηση ενέργειας από τα ομοιόμορφα. Σε σχέση όμως με κάποιες δομές όπως η Fisher-Koch S, η Neovius και η Diamond, παρουσιάζει χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας, ενώ το όριο διαρροής της είναι αρκετά υψηλό όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.4.12. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι τα δείγματα primitive παρουσίασαν αυξημένη απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα όγκου (384,95 MJ/m^3).

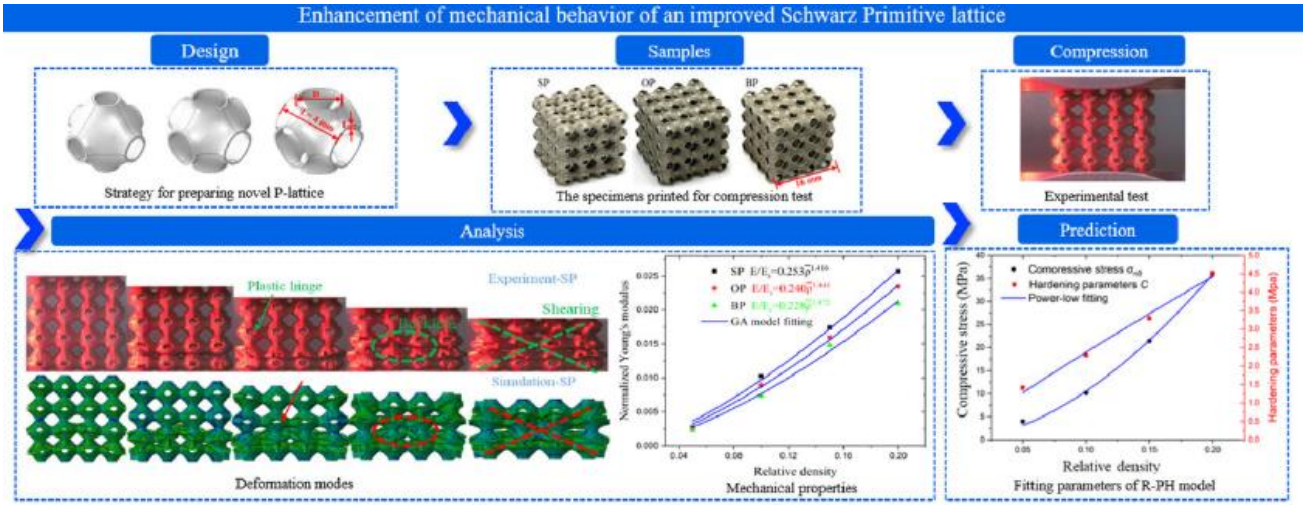


Σχήμα 2.2.4.12 *Τιμές μέτρου ελαστικότητας και ορίου διαρροής των διαφορετικών βαθμολογημένων δομών TPMS*



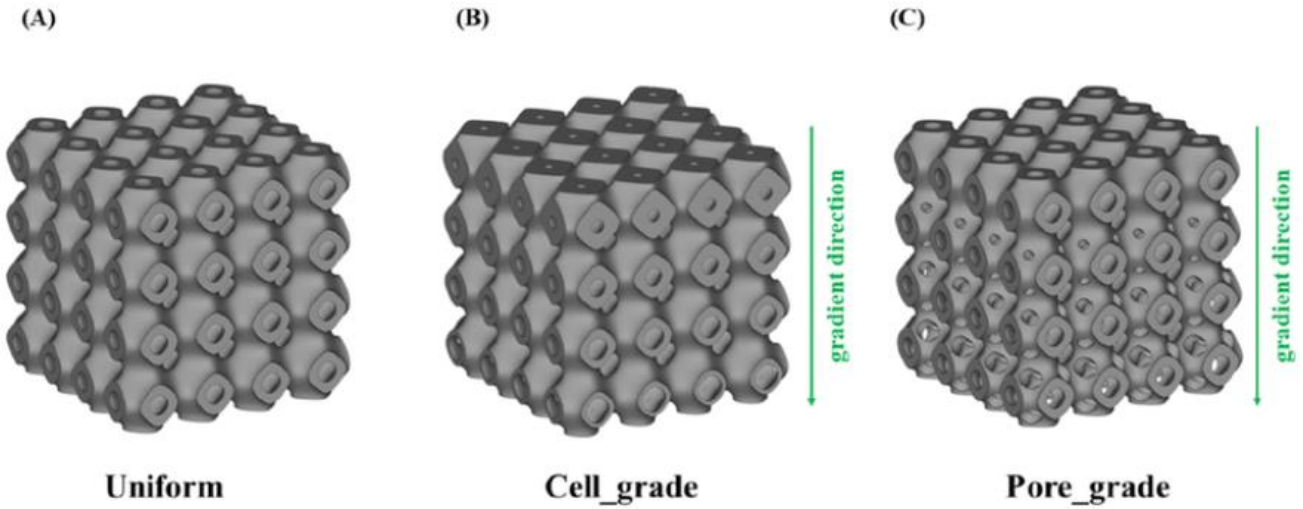
Σχήμα 2.2.4.13 *Καμπύλες απορρόφησης ενέργειας-παραμόρφωσης για διαφορετικά βαθμολογημένα πλέγματα TPMS από 0-50% παραμόρφωση.*

Επιπλέον, σύμφωνα με μελέτη για βελτιστοποιημένες γεωμετρίες Primitive των Guo et al. [64], προκύπτει ότι εάν διαφοροποιηθεί η γεωμετρία των ανοιγμάτων, τότε αυξάνεται σημαντικά η αντοχή σε θλίψη καθώς και η απορρόφηση ενέργειας.



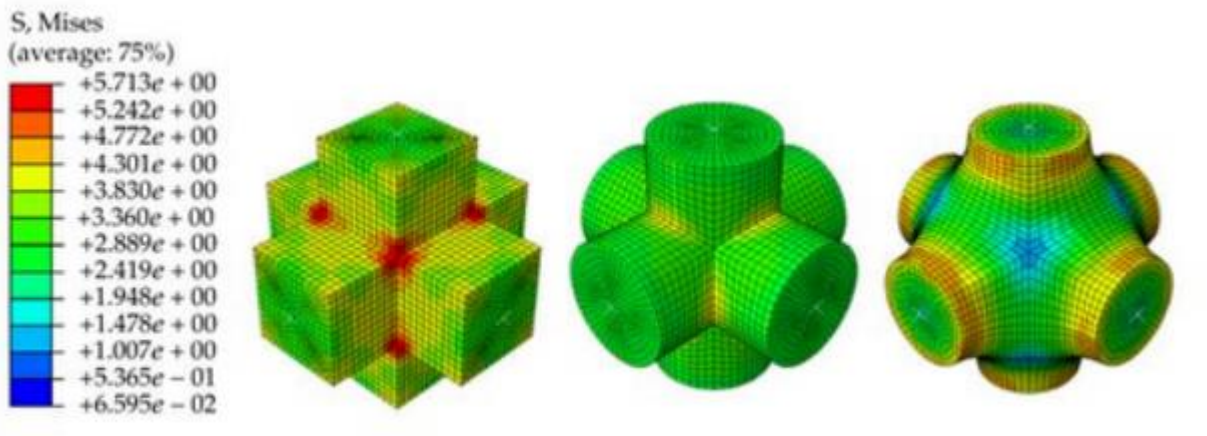
Σχήμα 2.2.4.14 *Σχεδιασμός, πειραματική αξιολόγηση και αριθμητική ανάλυση βελτιωμένης δομής Schwarz-P υπό συμπίεση*

Η δομή Schwarz-P φαίνεται να είναι χρήσιμη στον τομέα της βιοϊατρικής καθώς σύμφωνα με μελέτη των Shin et al. η γεωμετρία της είναι κατάλληλη για ικριώματα ιστών. Είναι γνωστό ότι σε τέτοιες εφαρμογές οι αιχμηρές γωνίες δημιουργούν προβλήματα στην κατεργασία και για αυτό τον λόγο προτείνονται καμπυλόμορφες επιφάνειες (σχήμα 2.2.4.15). Οι TPMS δομές και ιδίως η Schwarz-P ανήκουν στην κατηγορία των πλεγμάτων με κυκλικές διατομές σε όλη την έκτασή τους, με αποτέλεσμα να καθίστανται ιδανικές μορφολογικά για την κατασκευή ικριωμάτων. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η δομή αυτή έχει την μεγαλύτερη διαπερατότητα υγρών συγκριτικά με όλα τα τριπλά περιοδικά πορώδη μέσα [65].

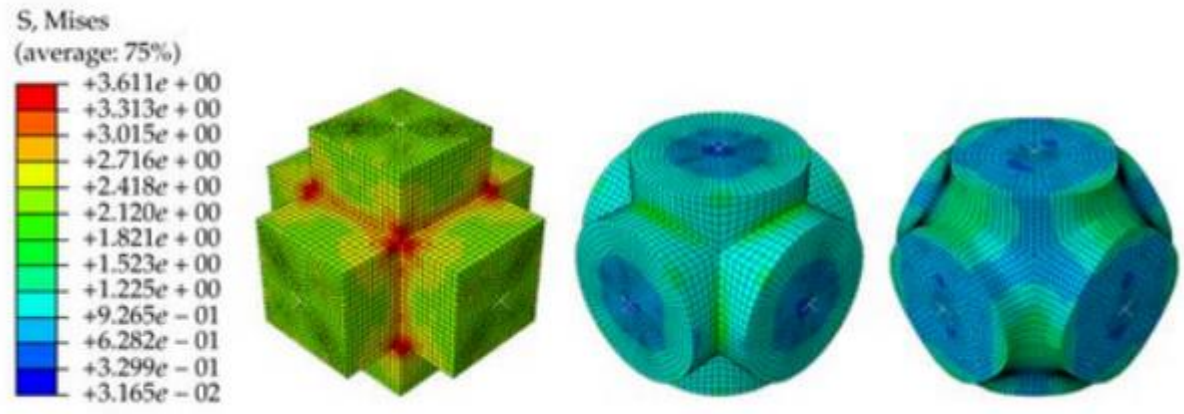


Σχήμα 2.2.4.15 *Τύποι οστικών ικριωμάτων Schwarz-P a) Ομοιόμορφο οστικό ικρίωμα με πορώδες 65%, b) Οστικό ικρίωμα με κυτταρική διαβάθμιση και πορώδες 65% και c) Πολυλειτουργικό οστικό ικρίωμα με πορώδες 65% [66]*

Με σκοπό την τεκμηρίωση της θεωρίας ότι η primitive δομή είναι κατάλληλη για εφαρμογή σε ικριώματα, πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση (FEA) σε τρία διαφορετικά μοναδιαία κελιά. Στις εικόνες 2.2.4.16 και 2.2.4.17 παρουσιάζεται το μέγεθος και η κατανομή της τάσης Von Mises επί της δύναμης φόρτισης 50N και με κλάσματα όγκου 40% και 70% αντίστοιχα. Φαίνεται ότι η συγκέντρωση τάσης κατά μήκος των αιχμηρών άκρων του κυβικού και του κυλινδρικού κελιού έχει αυξηθεί, ενώ στην Schwarz-P η τάση κατανέμεται πιο ομαλά και μάλιστα όσο αυξάνεται το κλάσμα όγκου η τάση Von Mises μειώνεται. Συμπερασματικά, η Schwarz-P δομή έχει καλή σταθερότητα, η οποία συνδυαστικά με την διαπερατότητα ρευστών δίνει την δυνατότητα κατασκευής ικριωμάτων που θα μπορέσουν να διευκολύνουν την αναγέννηση /καλλιέργεια ιστών.

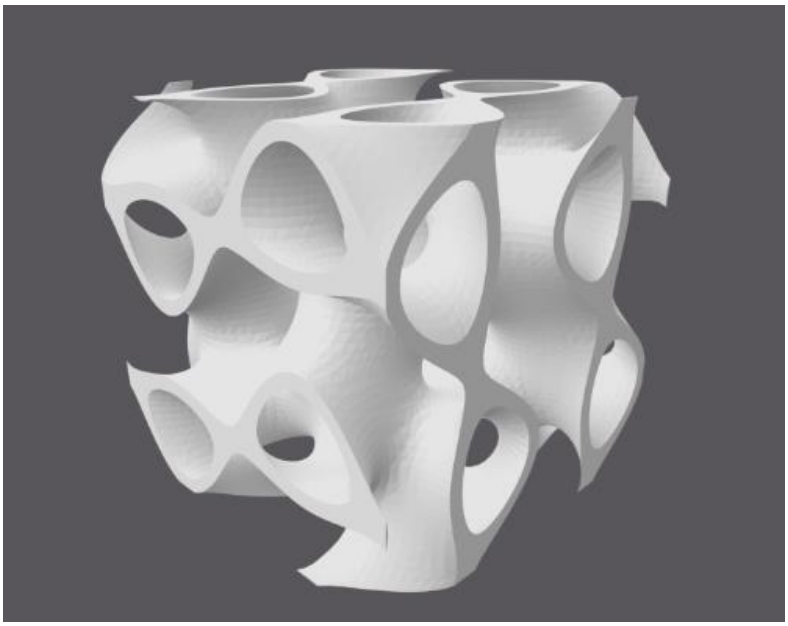


Σχήμα 2.2.4.16 *Σύγκριση κατανομής τάσεων Von Mises ενός τριπλά περιοδικού κύβου (αριστερά), τριπλά περιοδικού κυλίνδρου (μέση) και Schwarz-P (δεξιά) με κλάσμα όγκου 40%*



Σχήμα 2.2.4.17 *Σύγκριση κατανομής τάσεων Von Mises ενός τριπλά περιοδικού κύβου (αριστερά), τριπλά περιοδικού κυλίνδρου (μέση) και Schwarz-P (δεξιά) με κλάσμα όγκου 70%*

Split-P: Η δομή Split-P είναι μία παραλλαγή της δομής Schwarz-P που αναλύθηκε παραπάνω, με την διαφορά ότι η αρχική τοπολογία της Schwarz-P χωρίζεται σε πιο σύνθετα εσωτερικά κανάλια. Όπως σε όλες τις δομές TPMS έτσι και η Split-P πρόκειται για μία επαναλαμβανόμενη στις τρεις διευθύνσεις του χώρου επιφάνεια, με μηδενική μέση καμπυλότητα. Σε αντίθεση όμως με άλλες γεωμετρίες όπως η gyroid, χαρακτηρίζεται από πιο πυκνή τοπολογία, με μικρές διατομές καναλιών και μεγαλύτερη αναλογία επιφάνειας προς όγκο. Αυτό έχεις ως αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής επιφάνειας και την μείωση της διάστασης κελιών για ίδια σχετική πυκνότητα.



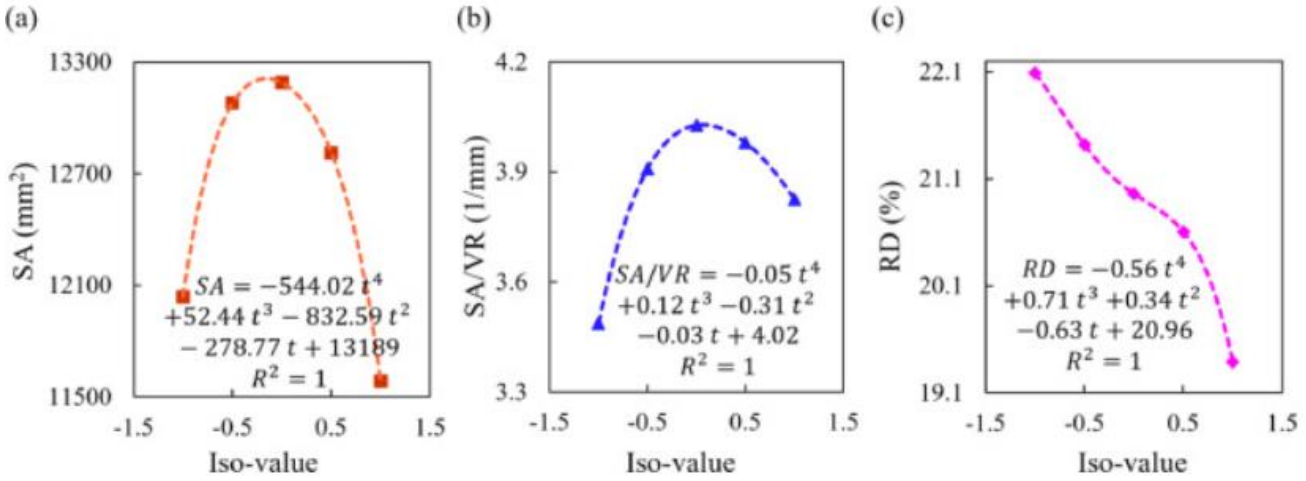
Σχήμα 2.2.4.18 *Απεικόνιση μίας μοναδιαίας κυψελίδας της δομής Split-P*

Η μαθηματική εξίσωση του πλέγματος Split-P δίνεται παρακάτω [67]:

$$\varphi = 1.1 \cdot [\sin(2x) \cdot \cos(y) \cdot \sin(z) + \sin(x) \cdot \sin(2y) \cdot \cos(z) + \cos(x) \cdot \sin(y) \cdot \sin(2z)] - 0.2 \cdot [\cos(2x) \cdot \cos(2y) + \cos(2y) \cdot \cos(2z) + \cos(2z) \cdot \cos(2x)] - 0.4 \cdot [\cos(2x) + \cos(2y) + \cos(2z)] - t \quad (2.2.4.3)$$

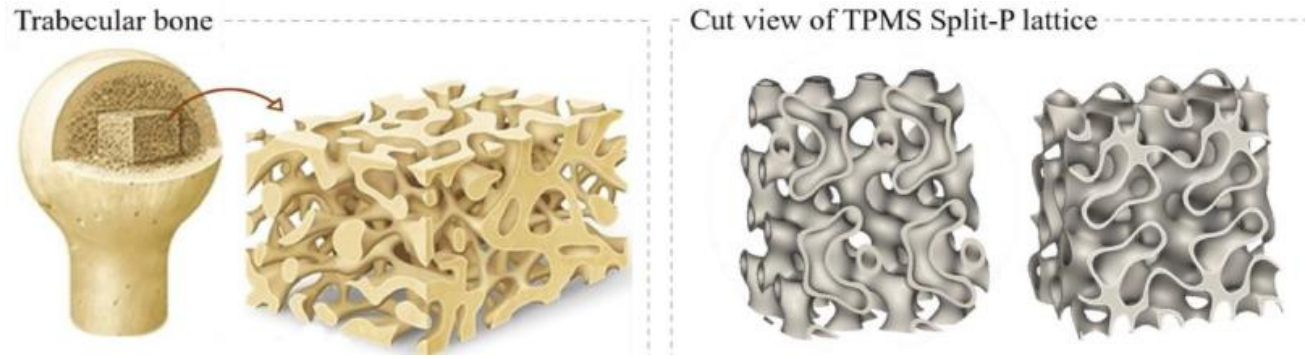
Η εξίσωση επιπέδου της Split-P δομής μπορεί να δημιουργηθεί με την χρήση του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων (X,Y,Z) στην καθορισμένη ισοτιμή t. Η ισοτιμή αυτή ελέγχει την επιφάνεια και την αναλογία επιφάνειας προς όγκο των πλεγμάτων που προκύπτουν, ενώ παράλληλα συμβάλλει στον έλεγχο των γεωμετρικών ιδιοτήτων και της μορφολογίας της δομής.

Στο σχήμα 2.2.4.19 φαίνεται η σχέση της ισοτιμής (Iso-Value) με τις γεωμετρικές παραμέτρους SA (επιφάνεια), SA/VR(λόγος επιφάνειας προς όγκο) και RD (σχετική πυκνότητα). Παρατηρείται ότι, η συνολική επιφάνεια και ο λόγος επιφάνειας προς όγκο φτάνουν την μέγιστη τιμή για ενδιάμεσες τιμές τις ισοτιμής, ενώ η σχετική πυκνότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η ισοτιμή. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με την ρύθμιση της ισοτιμής υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της σχετικής πυκνότητας και της επιφάνειας της δομής Split-P, το οποίο είναι πολύ σημαντικό κατά τον σχεδιασμό πειραματικών δοκιμιών.



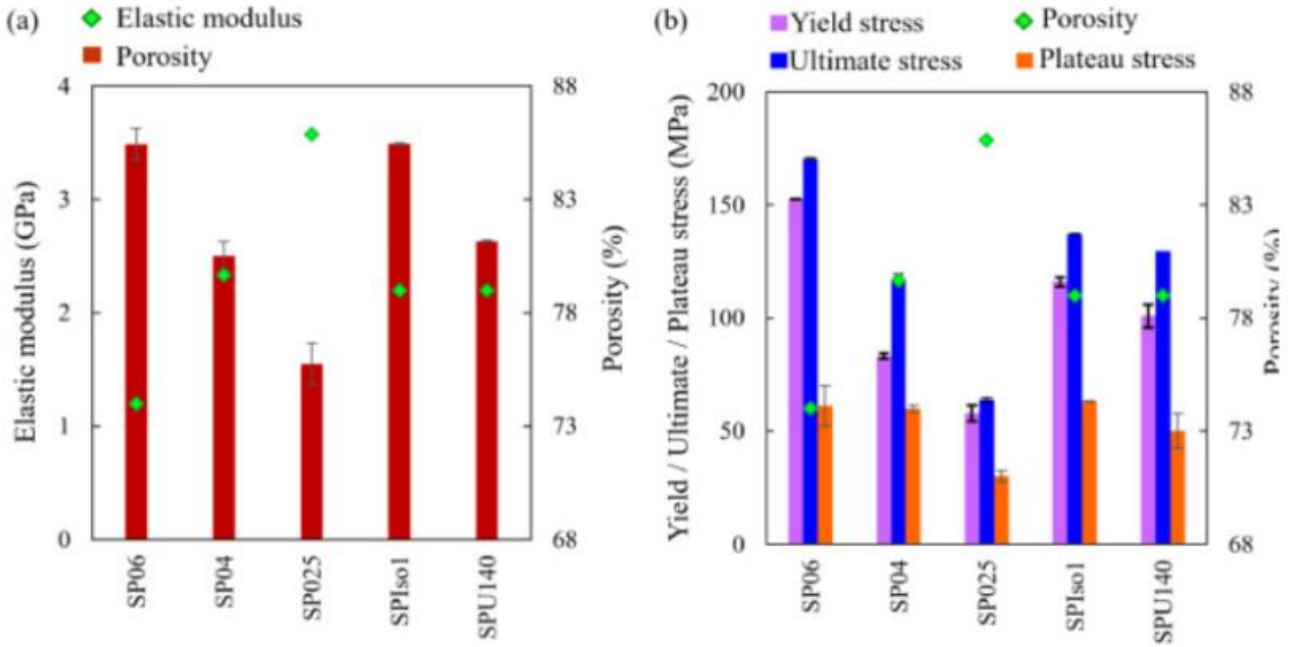
Σχήμα 2.2.4.19 *Η σχέση μεταξύ της ισοτιμής και γεωμετρικών παραμέτρων (a)SA, (b)SA/VR και (c)RD [68]*

Σε πειραματική μελέτη [68] από την οποία προέκυψαν και τα παραπάνω διαγράμματα (σχήμα 2.2.4.19), εξετάστηκαν Split-P δομές από Ti6Al4V (κράμα τιτανίου με υψηλή ειδική αντοχή και αντοχή στη διάβρωση), κατασκευασμένες με την τεχνολογία SLM. Η έρευνα αυτή είχε ως στόχο να παρουσιάσει την μηχανική απόκριση των δομών Split-P ώστε να ελεγχθεί η καταλληλότητα τους για οστικά εμφυτεύματα, καθώς οι περισσότερες έρευνες για ορθοπεδικές εφαρμογές χρησιμοποιούν τις δομές gyroid, diamond και Schwarz-P. Για πρώτη φορά, διερευνήθηκε πειραματικά και υπολογιστικά η μηχανική συμπεριφορά πλεγμάτων Split-P TPMS με διαφορετικές σχετικές πυκνότητες (RD) και κυτταρικές μορφολογίες (CM) για δοκιδωτά και φλοιώδη υποκατάστατα οστού. Παρατηρήθηκε, ότι τα πλέγματα τα οποία κατασκευάστηκαν έχουν μεγάλο SA/VR και υψηλές καμπυλότητες, χαρακτηριστικά που βοηθούν την ανάπτυξη των οστών.



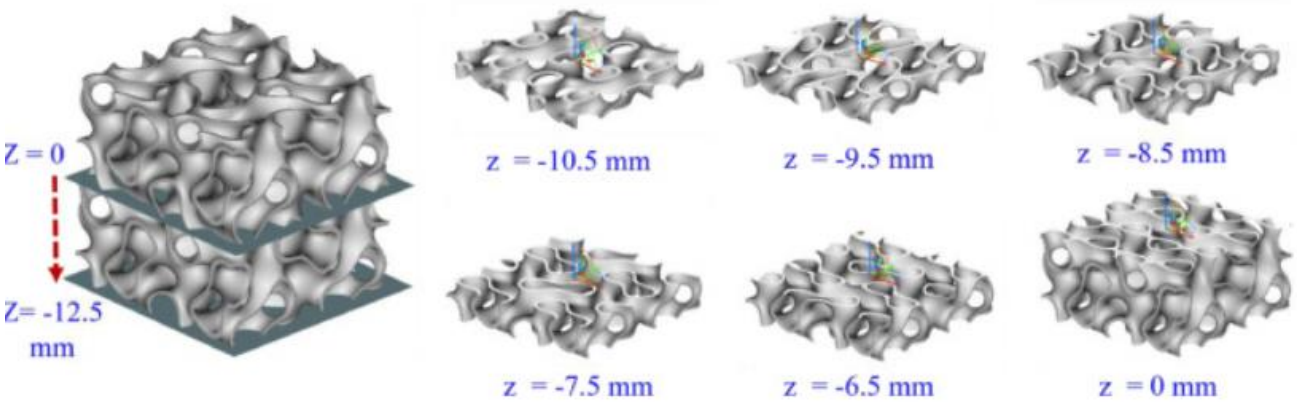
Σχήμα 2.2.4.20 *Αναπαράσταση της πορώδους κυτταρικής δομής του δοκιδωτού οστού συγκριτικά με την Split-P δομή*

Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας, είναι ότι τα εκτυπωμένα πλέγματα Ti6Al4V έχουν μέσο μέτρο ελαστικότητας 1,55-3,48 GPa, πιο κάτω από αυτά του ανθρώπινου φλοιώδες οστού και όρια διαρροής περίπου 57-152 MPa, τα οποία είναι αρκετά κοντά στις τιμές του οστού αυτού. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [69] το ανθρώπινο σπογγώδες οστό έχει μέτρο ελαστικότητας 0,1-4,5 GPa και όριο διαρροής 2-17 MPa ενώ το φλοιώδες οστό έχει 3-20 GPa και 33-193 MPa. Όλα σχεδόν τα εκτυπωμένα πλέγματα που κατασκευάστηκαν κατά την έρευνα είναι κατάλληλα για χρήση στο φλοιώδες οστό και στο φλοιώδες τμήμα του οστού ενός κρανίου, με εξαίρεση το πλέγμα SP025u125 το οποίο κρίθηκε κατάλληλο για το σπογγώδες οστό σύμφωνα με τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της τάσης διαρροής του.



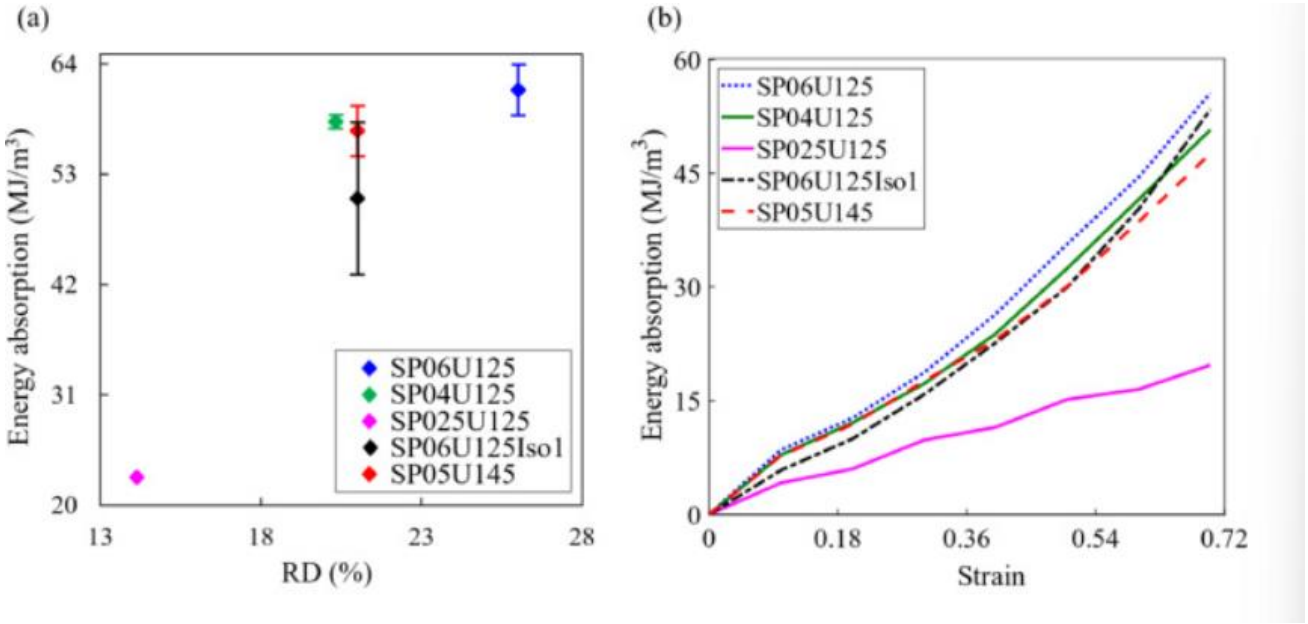
Σχήμα 2.2.4.21 *Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των πλεγμάτων Split-P που εκτυπώθηκαν (a) Μέτρο ελαστικότητας και (b) Τάση διαρροής, τάση ορίου και τάση plateau*

Επιπλέον, είναι γνωστό ότι οι μεγάλες επιφάνειες διευκολύνουν τον πολλαπλασιασμό και την προσκόλληση κυττάρων, ενώ το μεγάλο μέγεθος πόρων αυξάνει την διαπερατότητα του εμφυτεύματος, γεγονός που επηρεάζει την οστική ανάπτυξη. Για την ακρίβεια, το χαμηλό πορώδες μειώνει την οστική ανάπτυξη, ενώ το υψηλό την προάγει. Οι Split-P δομές έχουν μεγάλη επιφάνεια συγκριτικά με άλλες TPMS γεωμετρίες και παρουσιάζουν ποικιλία σχημάτων και μεγεθών πόρων.



Σχήμα 2.2.4.22 *Ποικιλία σχημάτων και μεγεθών πόρων του πλέγματος Split-P*

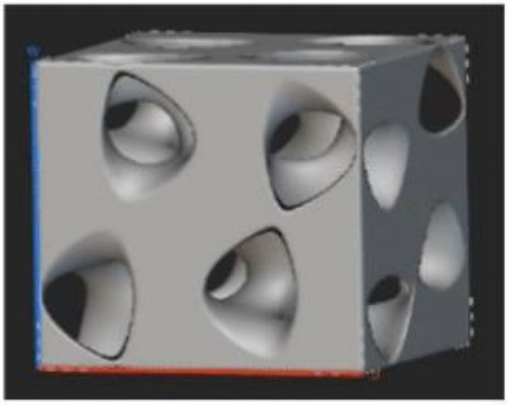
Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην μελέτη προέκυψαν και δεδομένα και για την απορρόφηση ενέργειας των πλεγμάτων Spllit-P. Σύμφωνα με το σχήμα 2.2.4.23 η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αυξάνεται με την αύξηση της RD. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα όλα τα πλέγματα που μελετήθηκαν παρουσιάζουν υψηλή απορρόφηση ενέργειας (22,82-61,41 MJ/mm^3) , επομένως έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας και ιδίως στον σχεδιασμό ορθοπεδικών κατασκευών. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από μελέτη των Mubasher et al. [70] αλλά και των Miralbes et al. [71] για την μηχανική συμπεριφορά διαφορετικών πολυμερικών πλεγμάτων, όπου παρουσιάζει ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και μάλιστα βρίσκεται σε υψηλή θέση συγκριτικά.



Σχήμα 2.2.4.23 *Διαγράμματα απορρόφησης ενέργειας πλεγμάτων Split-P που δέχονται φορτίο συμπίεσης σε διαφορετική RD και παραμορφώσεις έως την περιοχή συμπύκνωσης*

Σημαντικές πληροφορίες για τις δομές Split-P TPMS προέκυψαν και από την μελέτη των F.R. Claybrook et al. [72], οι οποίοι εξέτασαν την συμπεριφορά των Split-P δομών από TPU, που εκτυπώθηκαν με την τεχνολογία FFF. Σκοπός τους ήταν να ελέγξουν τις συμπιεστικές ιδιότητες της δομής για αλλαγές στο πορώδες της μοναδιαίας κυψελίδας με το μέγεθος σταθερό στα 10 mm. Εφόσον, έγινε μεταβολή του πάχους τοιχωμάτων με τρεις διαφορετικές τιμές (1, 1.6, 2.2 mm), κατασκεύασαν δοκίμια μεταβάλλοντας το πορώδες (43%, 58% και 74%).

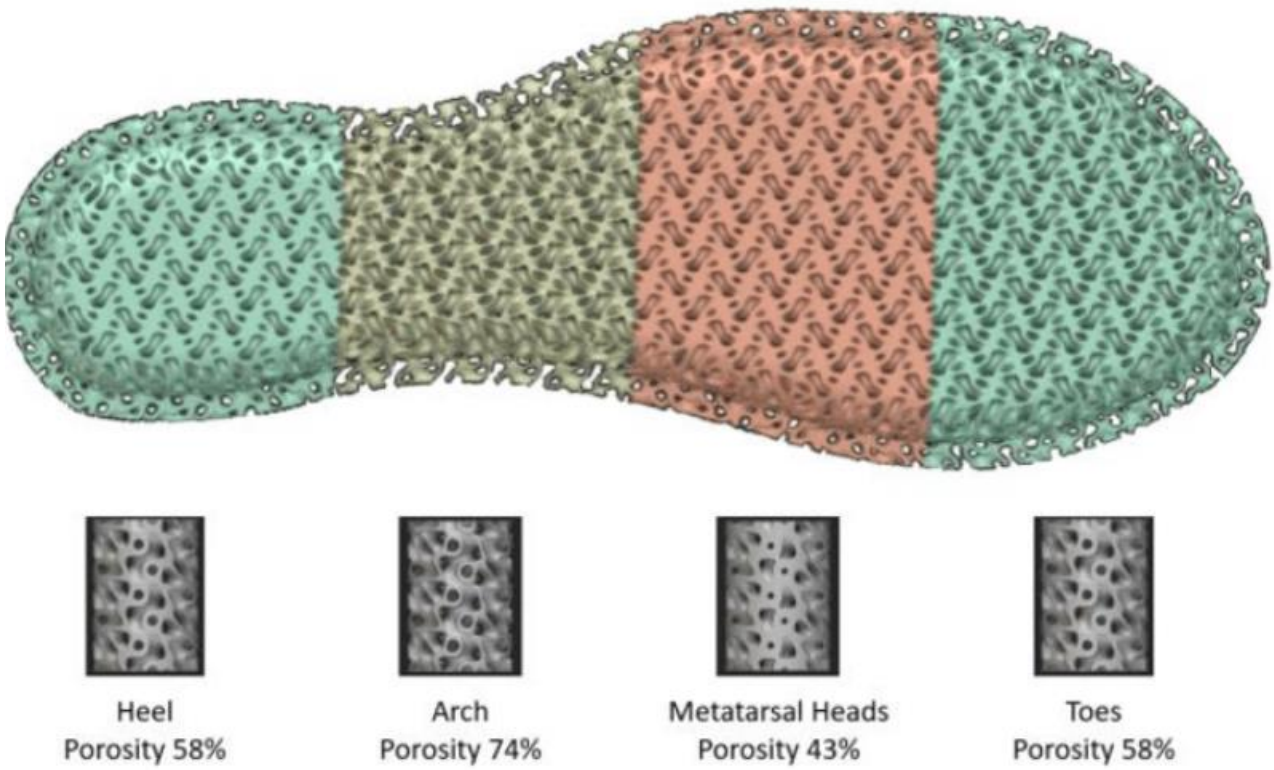
a i)



ii)

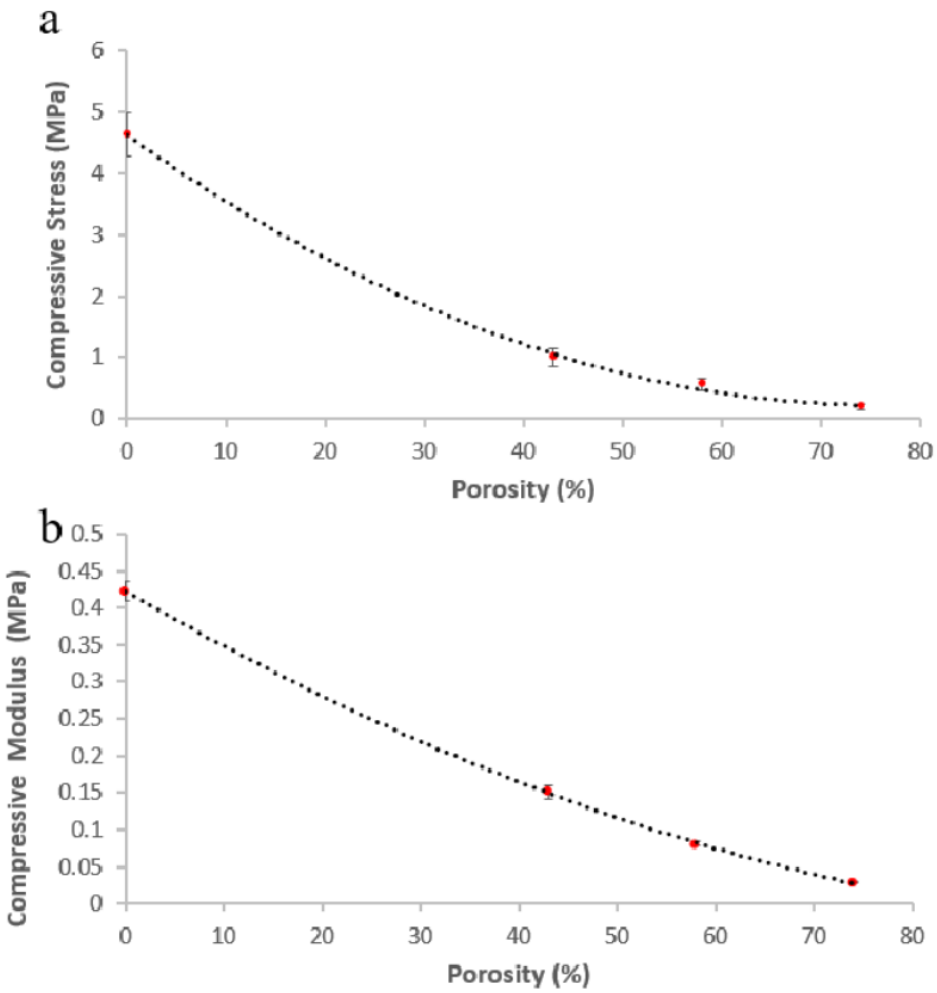
Thickness (mm)	Porosity (%)
1	74
1.6	58
2.2	43

Σχήμα 2.2.4.24 *(a) i) Μοναδιαία κυψελίδα Split-P δομής, ii) Πίνακας στο οποίο συσχετίζεται το πάχος τοιχωμάτων με το τελικό πορώδες*



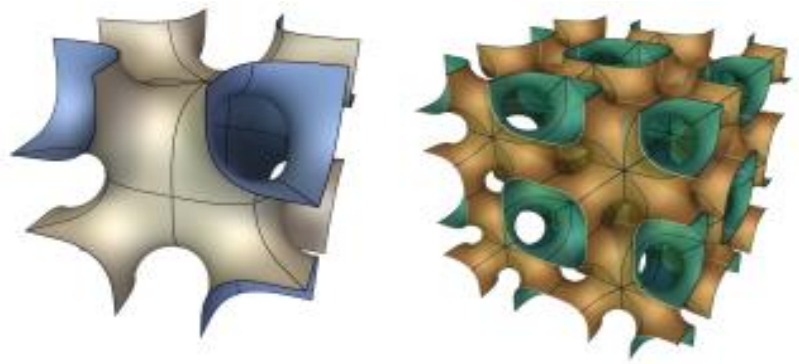
Σχήμα 2.2.4.25 *Αναπαράσταση σόλας παπουτσιού με διαφορετικά ποσοστά πορώδους*

Τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν υποβλήθηκαν σε δοκιμές συμπίεσης με σκοπό την σύγκρισή τους με ορθωτικά υποδήματα για διαβητικά άτομα. Τα αποτελέσματα ήταν ότι, όσο αυξάνεται το πορώδες τόσο μειώνονται η συμπιεστική τάση (MCS) και το μέτρο συμπίεσης (CM). Οι τιμές που προέκυψαν για την αντοχή σε συμπίεση βρίσκονται εντός των τιμών που έχουν παρατηρηθεί σε ιατρικού τύπου αφρούς (0,175-0,36 MPa), επομένως είναι πλήρως λειτουργικές για χρήση σε υποδήματα που χρησιμοποιούν άτομα με διαβήτη.



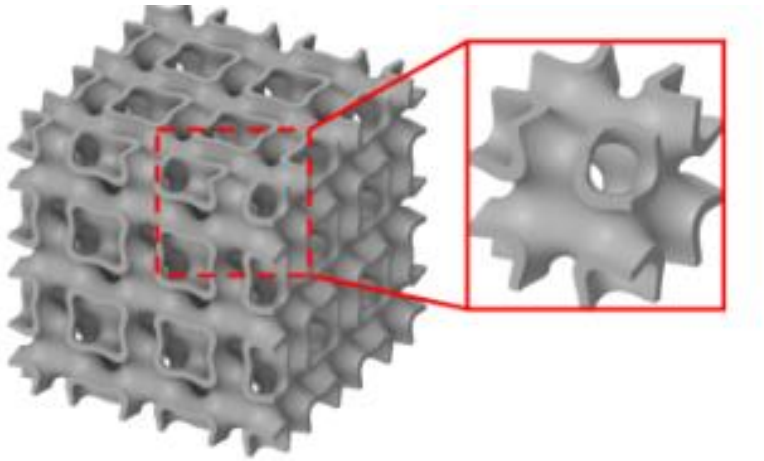
Σχήμα 2.2.4.26 *a) Μέγιστη θλιπτική τάση (MCS) των δομών Split-P για μεταβαλλόμενο πορώδες και b) Μέτρο θλίψης (CM)*

I-WP (Infinite-Periodic Wrapped Package): Η I-WP είναι μία τριπλά περιοδική ελάχιστη επιφάνεια επαναλαμβανόμενη στις κατευθύνσεις X,Y,Z και επομένως έχει μηδενική μέση καμπυλότητα. Γεωμετρικά μοιάζει με μία σφαίρα η οποία εκτείνει λαβές προς τις κορυφές ενός κύβου, και η επιφάνειά της είναι γένους 4 (4 οπές) με κυβικές συμμετρίες. Για την ακρίβεια η επιφάνεια παρουσιάζει γένος 7, ωστόσο το μισό κελί επαρκεί ως μεταφορικό θεμελιώδες πεδίο, επομένως το γένος της δομής μειώνεται στο 4.



Σχήμα 2.2.4.27 *Περιοδική δομή και μοναδιαία κυψελίδα τύπου I-WP*

Ανακαλύφθηκε το 1970 από τον Alan Schoen[73], στο πλαίσιο μίας εργασίας που έγραψε για την NASA. Ονομάστηκε έτσι καθώς βασίζεται σε δύο διαφορετικά είδη σκελετικών γραφημάτων, το I-graph και το Wrapped Package graph. Γεωμετρικά μοιάζει με μία σφαίρα η οποία εκτείνει λαβές προς τις κορυφές ενός κύβου.

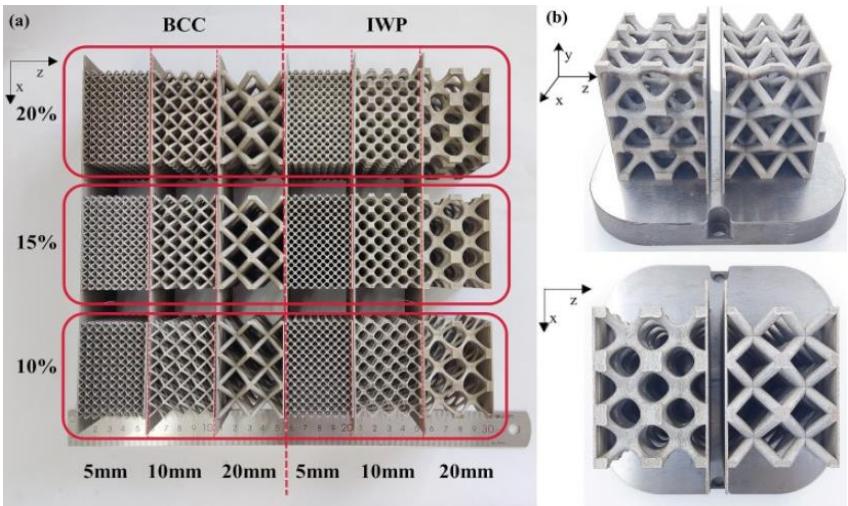


Σχήμα 2.2.4.28 *Αναπαράσταση I-WP δομής με ψηφίδες 3×3×3 και μία δομή μοναδιαίου κελιού*

Η μαθηματική εξίσωση που χαρακτηρίζει την δομή I-WP παρουσιάζεται παρακάτω:

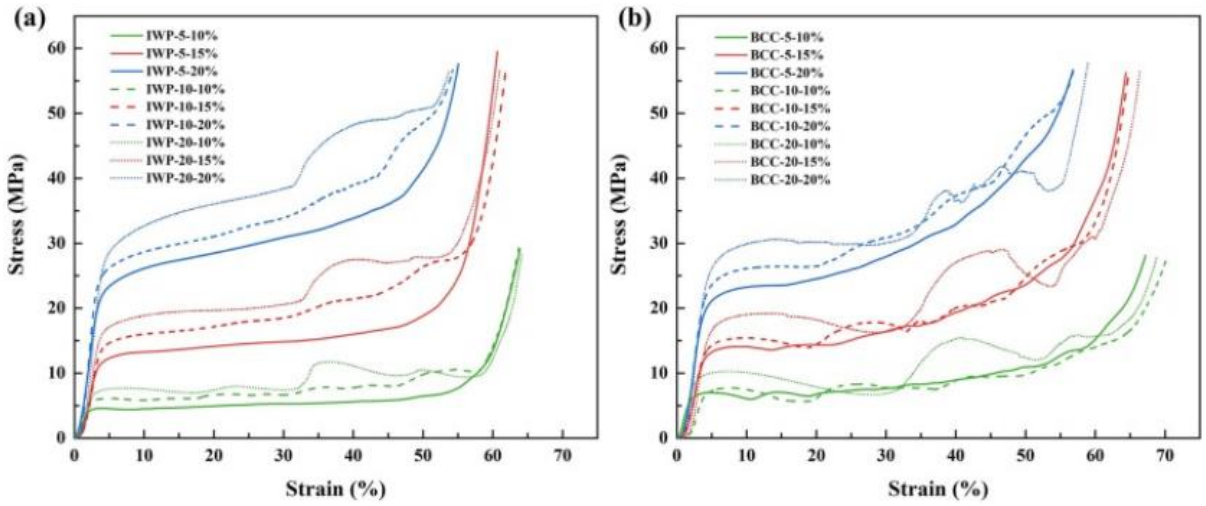
$$2(\cos(x) \times \cos(y) + \cos(y) \times \cos(z) + \cos(z) \times \cos(x)) - \cos(2x) - \cos(2y) - \cos(2z) = 0 \quad (2.2.4.4)$$

Λόγω της ιδιαίτερης μορφολογίας της, η συγκεκριμένη δομή εφαρμόζεται σε προηγμένες εφαρμογές που απαιτούν συνδυασμό ελαστικότητας και μηχανικής σταθερότητας. Σύμφωνα με έρευνα των Zhang et al. [74], προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι δομές πλέγματος τύπου I-WP έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και ιδιότητες απομόνωσης κραδασμών από τις συμβατικές δομές που βασίζονται σε δοκούς. Στην μελέτη αυτή έγινε σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων απόκρισης και δόνησης δομών I-WP και BCC με την ίδια τοπολογία. Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι μοναδιαίων κυψελών 5mm, 10mm και 20mm όπου για κάθε μέγεθος αντιστοιχούσε και διαφορετική αναλγία όγκου 10%, 15% και 20% όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.4.29.



Σχήμα 2.2.4.29 *Κατασκευασμένα με τεχνολογία SLM πλέγματα I-WP και BCC με διαφορετικό μέγεθος κυψελών και αναλογία όγκου*

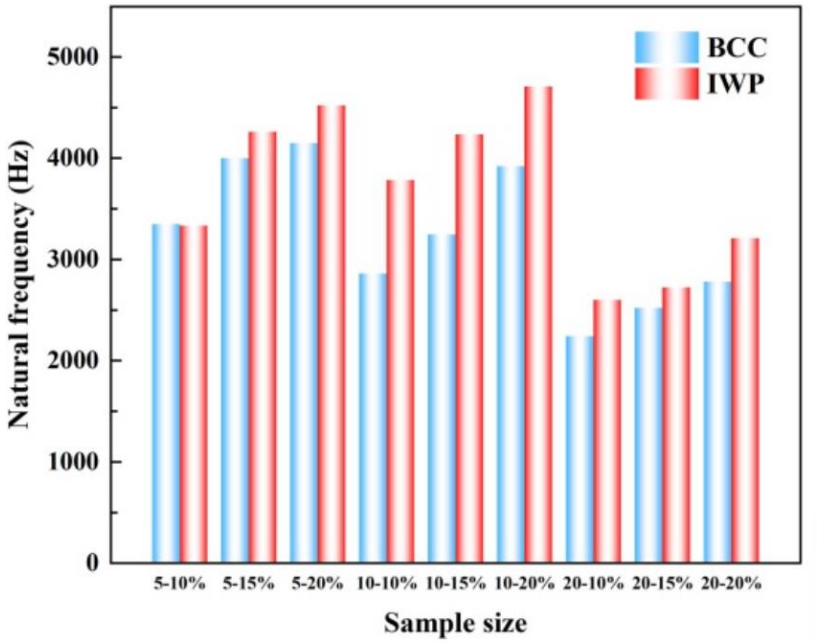
Στα δείγματα αυτά πραγματοποιήθηκε μονοαξονική συμπίεση, και έγινε σύγκριση των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης των δύο δομών. Φαίνεται ότι η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης των δομών I-WP είναι πιο ομαλή, ενώ οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δομών BCC παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, που σημαίνει ότι οι δομές IWP έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και πιο ομοιόμορφη καταπόνηση.



Σχήμα 2.2.4.30 *Διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης a) Δείγματα I-WP και b) Δείγματα BCC*

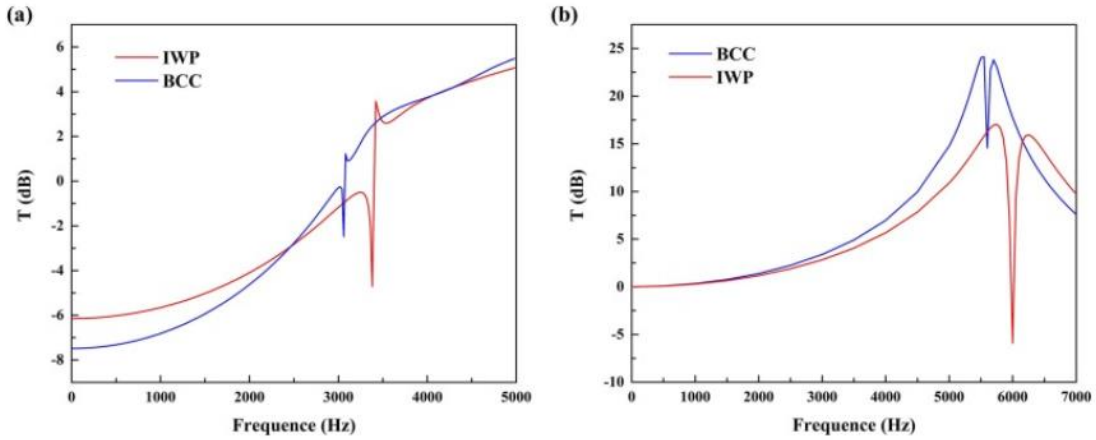
Επίσης, αναφέρεται ότι η ιδιοσυχνότητα είναι ανάλογη με την ακαμψία και αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος της μάζας. Ωστόσο, όσο αυξάνεται το κλάσμα όγκου, αυξάνεται και η μάζα του πλέγματος, επειδή όμως η συνιστώσα της ακαμψίας αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος συγκριτικά με την μάζα, η ιδιοσυχνότητα αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι, μεταβάλλοντας το κλάσμα όγκου και το μέγεθος της μοναδιαίας κυψέλης, μπορεί να ρυθμιστεί η μετατόπιση της ιδιοσυχνότητας και έτσι να αποφευχθεί το εύρος συντονισμού της συσκευής.

Ύστερα από σύγκριση των δομών I-WP και BCC, αποδείχθηκε ότι η I-WP έχει υψηλότερη φυσική συχνότητα από τις ίδιες συνθήκες κλάσματος όγκου και μεγέθους της μοναδιαίας κυψέλης, γεγονός που σημαίνει ότι η I-WP παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία (σχήμα 2.2.4.31).

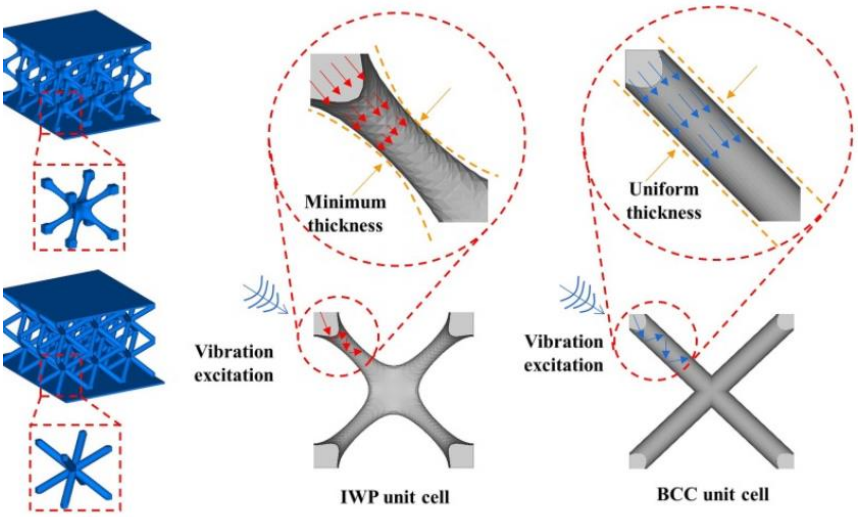


Σχήμα 2.2.4.31 *Σύγκριση φυσικών συχνοτήτων για τις δομές BCC και I-WP*

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η I-WP δομή έχει υψηλότερη συχνότητα συντονισμού λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας της και καλύτερη απόδοση απομόνωσης κραδασμών. Ο λόγος που εξηγεί τα αποτελέσματα αυτά είναι ότι οι αντηρίδες της δομής διαφέρουν από αυτές τις BCC, καθώς το πάχος των μεσαίων αντηρίδων είναι μικρότερο και οι δύο πλευρές έχουν μεγαλύτερο πάχος (σχήμα 2.2.4.33) και είναι γνωστό ότι η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται όταν η δόνηση μεταδίδεται από την μεγάλη διατομή στην μικρή.

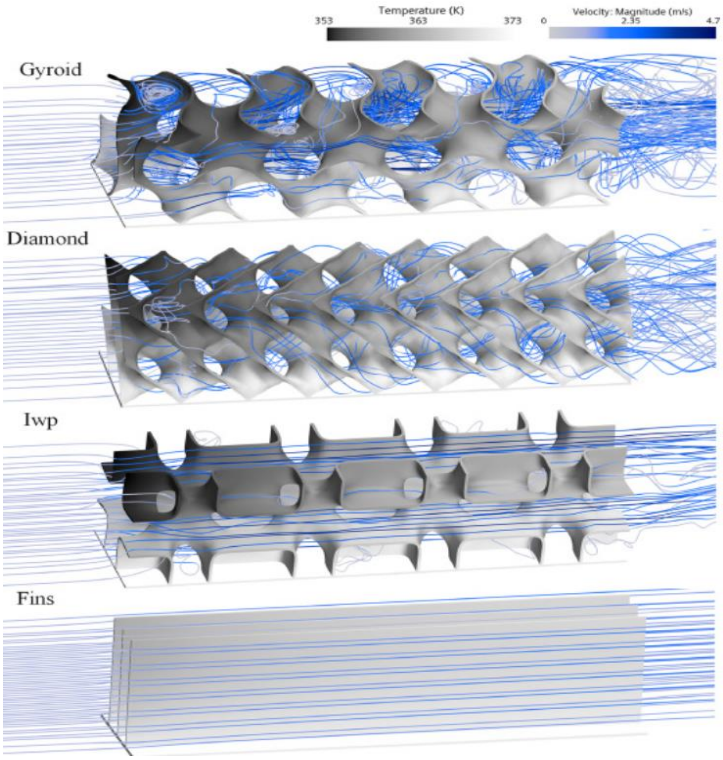


Σχήμα 2.2.4.32 *Καμπύλες μετάδοσης κραδασμών για δομές I-WP και BCC a)Δέσμευση και στις δύο πλευρές και b) Δέσμευση της κάτω επιφάνειας*



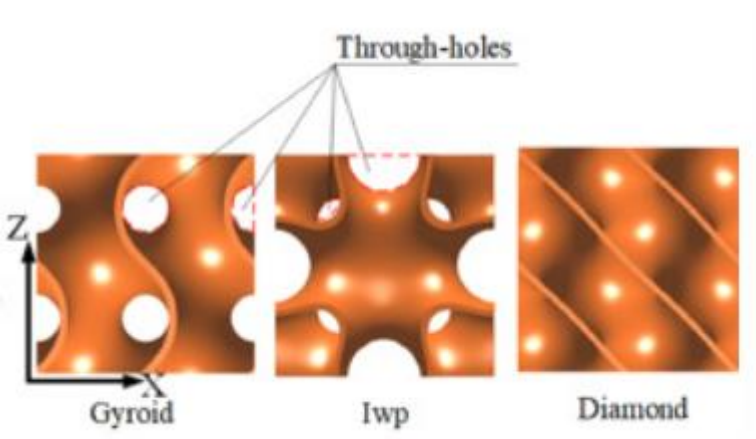
Σχήμα 2.2.4.33 *Αναπαράσταση μεταφοράς κραδασμών σε δομές πλέγματος I-WP και BCC*

Η δομή I-WP έχει αναφερθεί και στην έρευνα των Tang et al. [75] η οποία αφορούσε την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή και την διερεύνηση του μηχανισμού ανταλλαγής θερμότητας διαφορετικών δομών TPMS. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν τρεις ψύκτρες δομής gyroid, diamond, I-WP συγκριτικά με μία παραδοσιακή ψύκτρα Fins. Αρχικά αναλύθηκε η κατανομή θερμοκρασίας της στερεής επιφάνειας και οι γραμμές ροής του ρευστού που ρέει μέσω των τεσσάρων μοντέλων όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.4.34 Είναι προφανές ότι οι δομές diamond και gyroid παρουσιάζουν πιο σημαντική διαταραχή στο ρευστό ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις η ροή είναι πιο ομαλή.



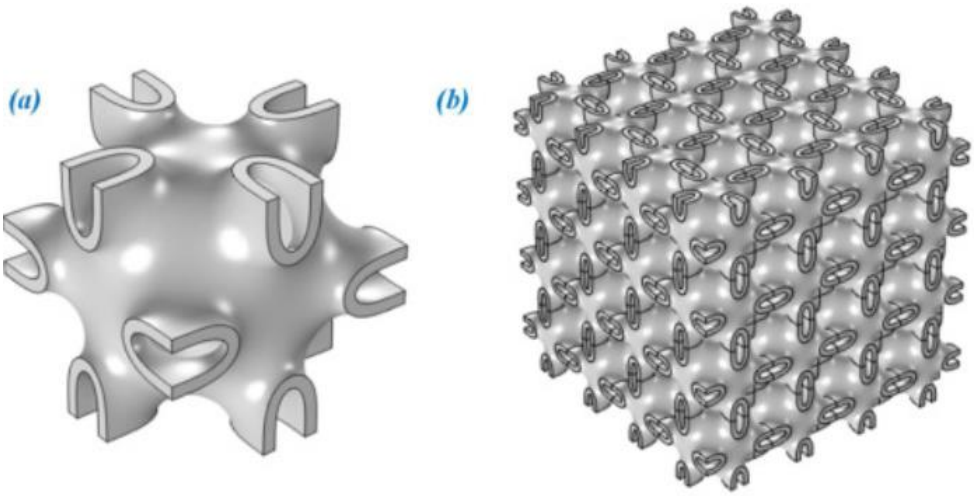
Σχήμα 2.2.4.34 *Αναπαράσταση των γραμμών ροής του ρευστού στις τέσσερις ψυκτικές συσκευές (ταχύτητα εισόδου 1 m/s)*

Επίσης, αναφέρεται ότι οι δομές gyroid και I-WP έχουν διαμπερή ροή, γεγονός που σημαίνει ότι το ρευστό ρέει με χαμηλή αντίσταση. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει μείωση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ στερεάς επιφάνειας και ρευστού και επομένως η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής δεν ευνοείται.



Σχήμα 2.2.4.35 *Πρόσοψη του τμήματος εισόδου σε ψύκτρες με δομές TPMS*

Neovius: Η επιφάνεια Neovius είναι μία λιγότερο γνωστή αλλά εξίσου σημαντικά TPMS δομή. Στις αναφορές του Schoen ονομάζεται επιφάνεια C(P), καθώς θεωρείται ως μία δομή που συμπληρώνει την Schwarz-P. Συγκεκριμένα, μπορεί να επεκταθεί με περισσότερες λαβές, συγκλίνοντας προς το κανονικό οκτάεδρο και έχει γένος 9 (9 οπές). Έχει κυβική περιοδικότητα και δικτυωτή τοπολογία, καθώς χωρίς τον χώρο σε δύο άπειρους μη ισοδύναμους λαβύρινθους.



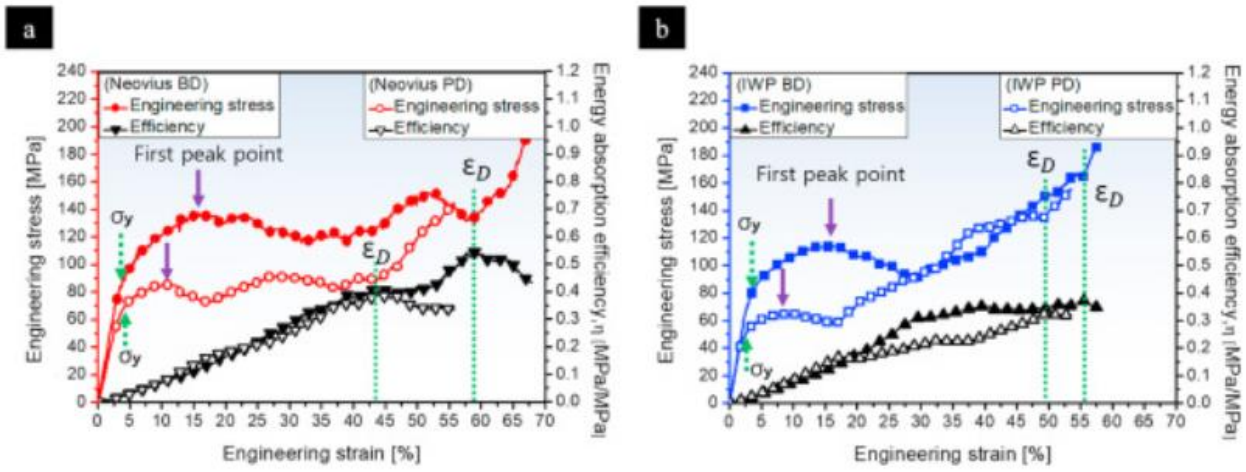
Σχήμα 2.2.4.36 *Δομή πλέγματος Neovius a) Μοναδιαία κυψέλη και b) Τρισδιάστατη δομή 4×4×4*

Η δομή Neovius ανακαλύφθηκε από τον Φινλανδό μαθηματικό Εντβαρντ Ρούντολφ Νεόβιους περίπου το 1883 και η μαθηματική εξίσωση που δόθηκε για την περιγραφή της γεωμετρίας της φαίνεται παρακάτω:

$$3(\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)) + 4\cos(x) \times \cos(y) \times \cos(z) \quad (2.2.4.5)$$

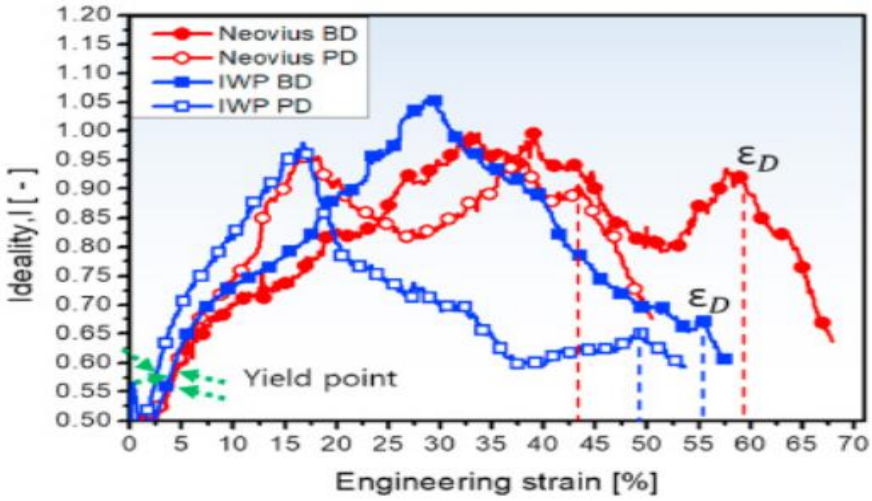
Με σκοπό να αναλυθούν οι μηχανικές ιδιότητες της δομής Neovius, έχουν διεξαχθεί κάποιες μελέτες μία εκ των οποίων είναι και εκείνη των Park et al. [76]. Στην συγκεκριμένη έρευνα διερευνήθηκε η συμπεριφορά συμπίεσης και τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας για δύο τοπολογίες TPMS, την Neovius και την I-

WP. Μετά από δοκιμές σε δύο κατευθύνσεις, κατεύθυνση κατασκευής και κάθετη στην κατεύθυνση κατασκευής (BD και PD) αποδείχθηκε ότι το πλέγμα Neovius έχει μεγαλύτερο όριο διαρροής. Παράλληλα από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των δύο πλεγμάτων , φαίνεται ότι καμία από τις δύο δεν παρουσιάζει πτώση τάσης. Επίσης, μετά από σύγκριση των δύο δομών προέκυψε ότι η Noevius παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με το πλέγμα I-WP.



Σχήμα 2.2.4.37 *Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και απόδοσης απορρόφησης ενέργειας a) Neovius και b) I-WP (όπου σy το όριο διαρροής και εD παραμόρφωση πύκνωσης)*

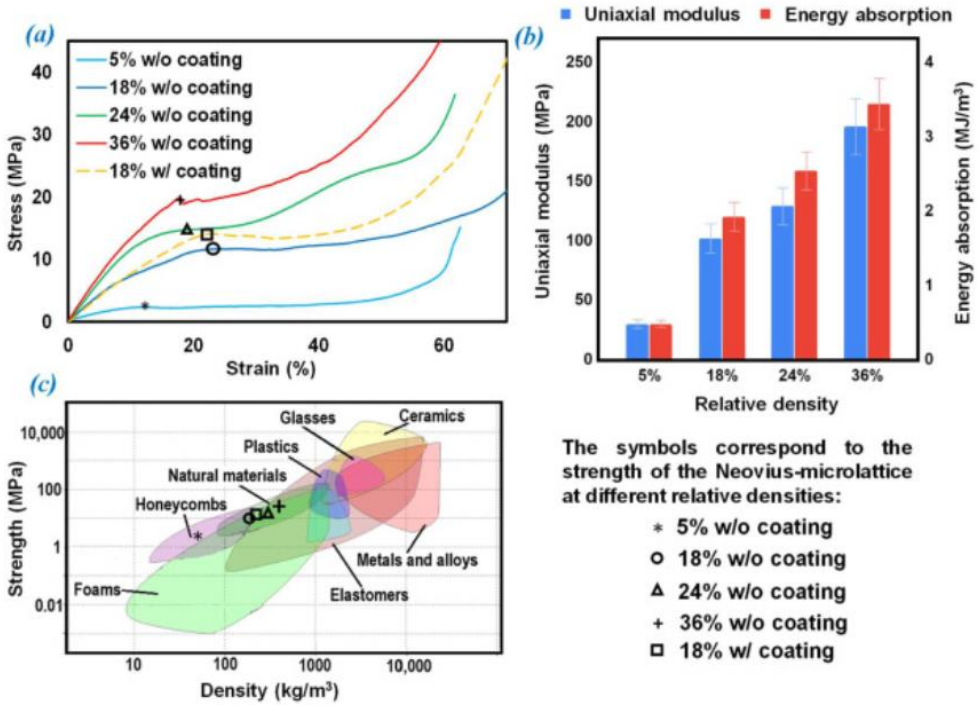
Επιπλέον, παρουσιάστηκαν και τα αποτελέσματα της ιδανικής απορρόφησης ενέργειας (I) ως συνάρτηση της παραμόρφωσης και για τις δύο δομές. Για να είναι ιδανικά τα χαρακτηριστικά της απορρόφησης ενέργειας, η τιμή του I θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στην τιμή 1. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, οι τιμές I για την Neovius δομή παραμένουν υψηλότερες από 0,80. Η I-WP παρουσιάζει υψηλότερη μέγιστη I τιμή, αλλά παρουσιάζει πτώση ιδίως στην περιοχή πριν την πυκνότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ότι η δομή Neovius παρουσιάζει μία πιο σταθερή και αποδοτική απορρόφηση ενέργειας.



Σχήμα 2.2.4.38 *Ιδανική απόδοση απορρόφησης ενέργειας των δομών Neovius και I-WP*

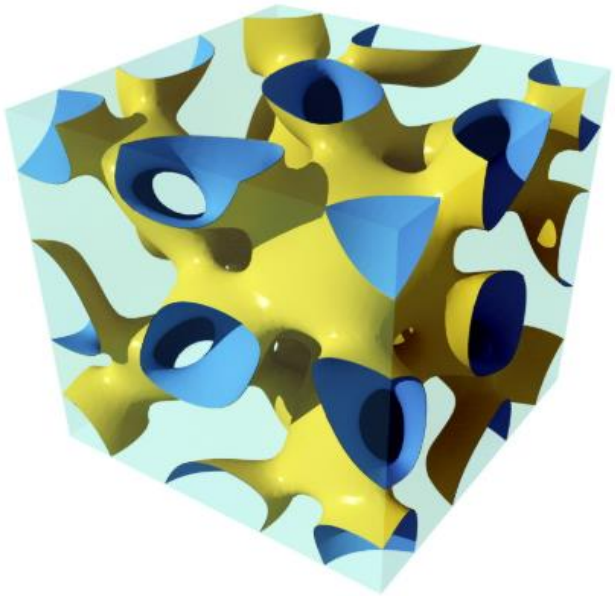
Σε μία ακόμα έρευνα των Abueidda et al. [77], αποδείχθηκε ότι το μικρόπλεγμα Neovius παρουσιάζει υψηλό μονοαξονικό μέτρο ελαστικότητας, απορρόφηση ενέργειας και αντοχή λόγω της γεωμετρίας του. Συγκεκριμένα, τα μικροπλέγματα κατασκευάστηκαν σε μικροκλίμακα με την μέθοδο της άμεσης γραφής με

λέιζερ (Direct Laser Writing-DLW) και δέχτηκαν θλιπτική φόρτιση, ώστε να διερευνηθούν οι παραμορφώσεις του πλέγματος, συμπεριλαμβανομένης της εκτός και εντός επιπέδου κάμψης. Στο σχήμα 2.2.3.58 παρουσιάζεται η μηχανική απόκριση σε θλίψη των μικροπλεγμάτων Neovius για διαφορετικές σχετικές πυκνότητες. Από τις καμπύλες τάσης παραμόρφωσης φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η σχετική πυκνότητα, αυξάνεται η τάση (a) και η απορρόφηση ενέργειας (b), επομένως μεγαλώνει η δυσκαμψία. Παράλληλα, μέσω του διαγράμματος Asby (c) (αντοχής-πυκνότητας), αποδεικνύεται ότι η Neovius έχει καλύτερη αντοχή ως προς την πυκνότητα από πολλά άλλα υλικά.



Σχήμα 2.2.4.39 *Αξιολόγηση μηχανικής απόκρισης του μικροπλέγματος Neovius (a) Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σε διαφορετικές σχετικές πυκνότητες, (b) Μονοαξονική ακαμψία και απορρόφηση ενέργειας και (c) Διάγραμμα Ashby αντοχής-πυκνότητας σε θλίψη με τις αντοχές του μικροπλέγματος*

Lidinoid: Η δομή Linoid είναι μία τριπλά ελάχιστη επιφάνεια, η οποία ανήκει στην κατηγορία των Schwarz-H (εξαγωνική δομή) δομών. Συγκαταλέγεται στην κρυσταλλογραφική ομάδα χώρου 230 (Ia-3d) μαζί με την δομή gyroid, γεγονός που περιγράφει ένα κυβικό πλέγμα με κέντρο το σώμα. Η δομή αυτή δεν περιέχει ευθείες γραμμές ή επίπεδες καμπύλες συμμετρίας, έχει λαβυρινθώδη γεωμετρία με υψηλή συμμετρία και ανήκει στις επιφάνειες γένους 3.



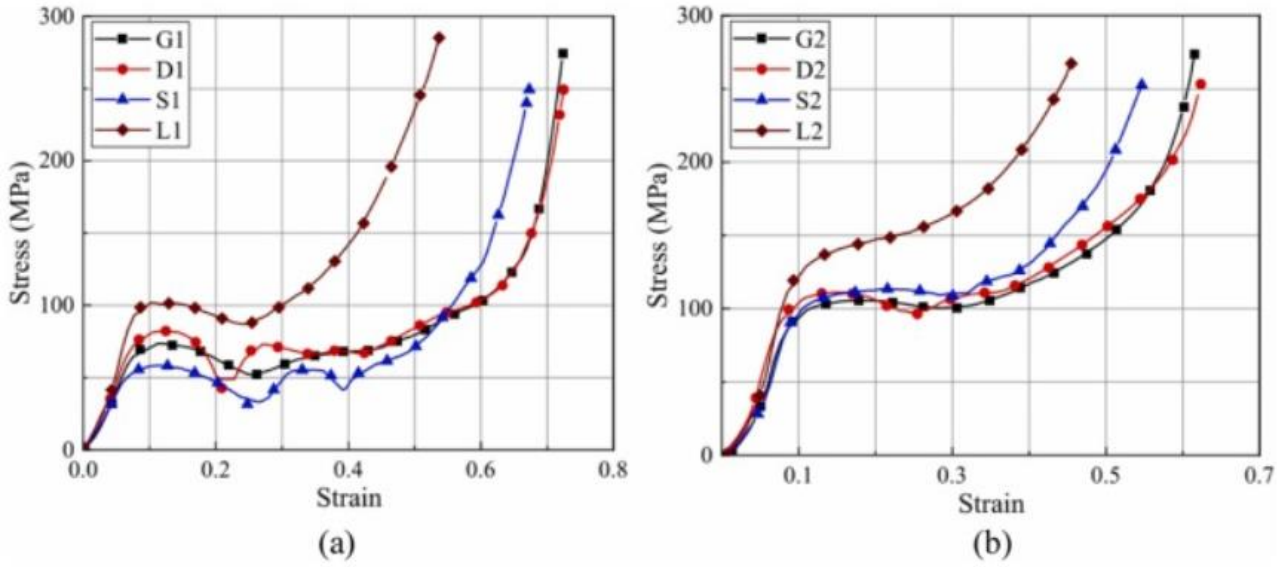
Σχήμα 2.2.4.40 *Δομή πλέγματος Lidinoid*

Η Lidinoid παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1990 από τους Σουηδούς επιστήμονες Sven Lidin και Stefan Larsson, στο πλαίσιο της μελέτης μετασχηματιστών Bonnet σε άπειρες περιοδικές ελάχιστες επιφάνειες με εξαγωνική συμμετρία. Αρχικά, ονομάστηκε HG λόγω της σχέσης της με την επιφάνεια Schwarz-H. και μετονομάστηκε σε Lidinoid στην μεταγενέστερη βιβλιογραφία ώστε να τιμηθεί ο Lidin.

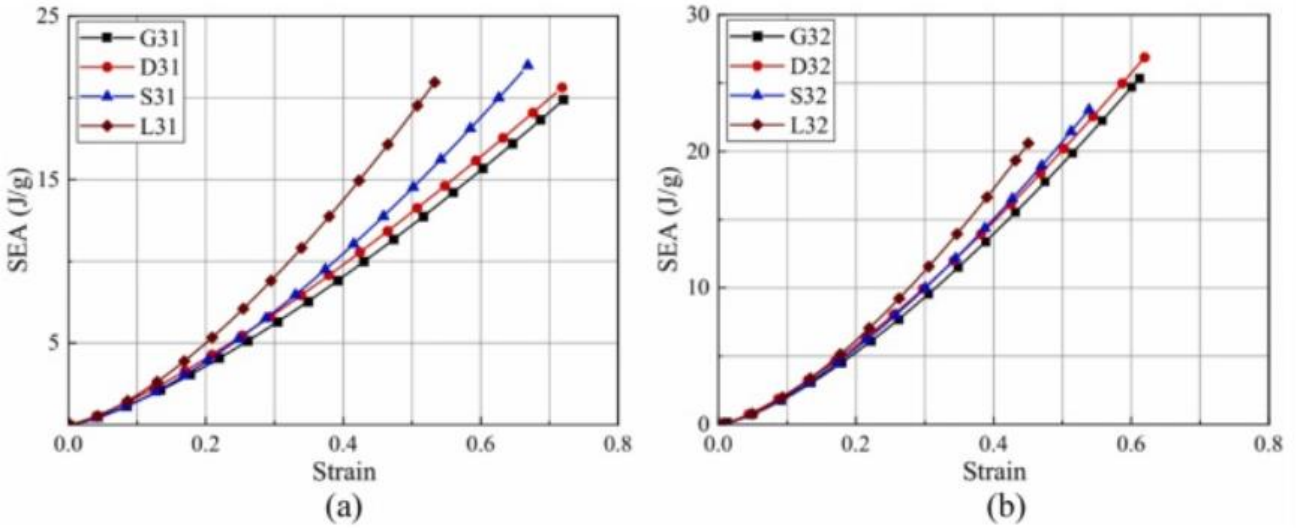
Το λιδινοειδές πλέγμα μπορεί να προσεγγιστεί ως σύνολο επιπέδων σύμφωνα με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$(1/2) \times [\sin(2x) \times \cos(y) \times \sin(z) + \sin(2y) \times \cos(z) \times \sin(x) + \sin(2z) \times \cos(x) \times \sin(y)\,] - (1/2)[\cos(2x) \times \cos(2y) + \cos(2y) \times \cos(2z) + \cos(2z) \times \cos(2x)\,] + 0.15 = 0 \quad (2.2.4.6)$$

Σύμφωνα με την έρευνα των Khanna et al. [78], μελετήθηκαν τέσσερις δομές TPMS (Diamond, Gyroid, Schwarz και Lidinoid), με σκοπό να αναλυθεί η συμπεριφορά τους υπό συμπίεση καθώς και η απορρόφηση ενέργειας. Τα δείγματα εκτυπώθηκαν με δύο διαφορετικές σχετικές πυκνότητες (30% και 50%) με την τεχνολογία SLM και συγκρίθηκαν ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, το λινοειδές έχει υψηλή αντοχή και μέτρο συμπίεσης καθώς και υψηλή απόδοση ενέργειας, συγκριτικά με άλλες δομές. Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των τεσσάρων δομών καθώς και οι καμπύλες ειδικής απορρόφησης ενέργειας-παραμόρφωσης συμπίεσης.

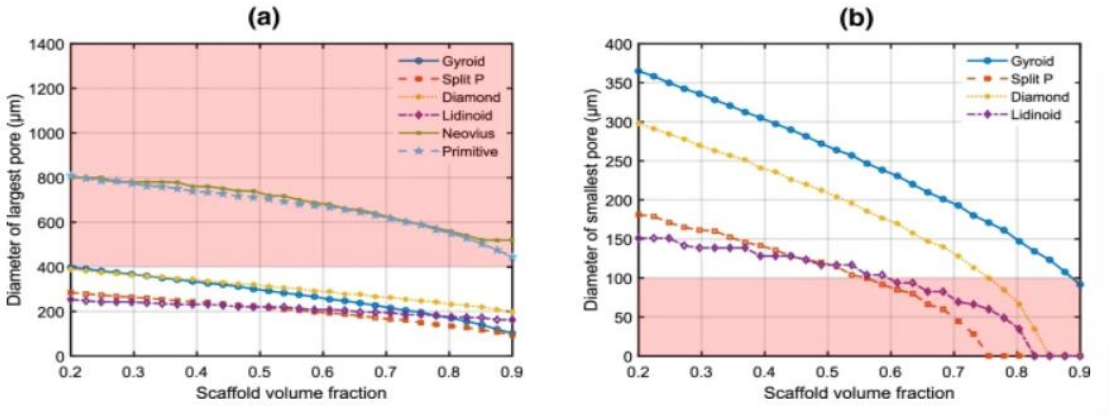


Σχήμα 2.2.4.41 *Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δειγμάτων TPMS με σχετική πυκνότητα (a) 30% και (b) 50%*



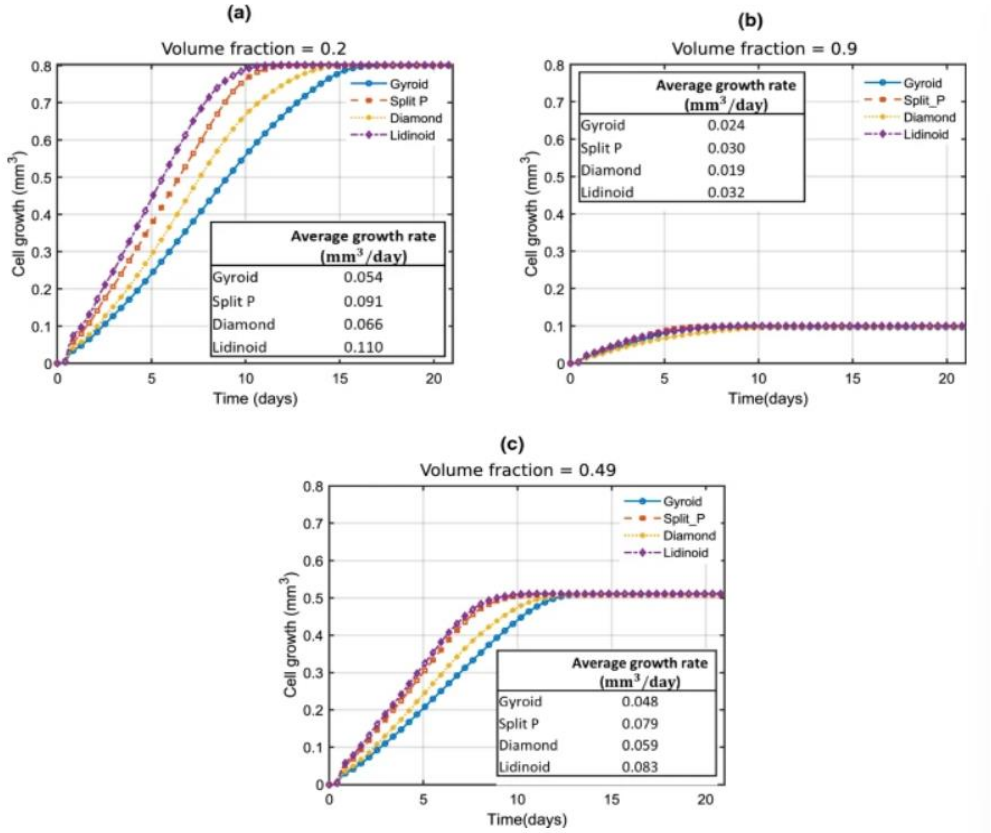
Σχήμα 2.2.4.42 *Καμπύλες ειδικής απορρόφησης ενέργειας- παραμόρφωσης συμπίεσης των δομών TPMS με σχετική πυκνότητα (a) 30% και (b) 50%*

Οι Lehder et al. σε μία μελέτη τους [79] εξέτασαν έξι τύπους TPMS (Primitive, Gyroid, Diamond, Split-P, Neovius και Lidinoid), με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως ικριώματα ανάπτυξης ιστών και να βρεθεί το ικρίωμα με την βέλτιστη κυτταρική ανάπτυξη. Παρατηρήθηκε ότι οι δομές Lidinoid, Split-P, Diamond και Gyroid έχουν μέγιστο μέγεθος πόρων κάτω από το όριο των 400 μm, ενώ οι δομές Primitive και Neovius δεν ικανοποίησαν αυτόν τον περιορισμό και απορρίφθηκαν από την έρευνα.

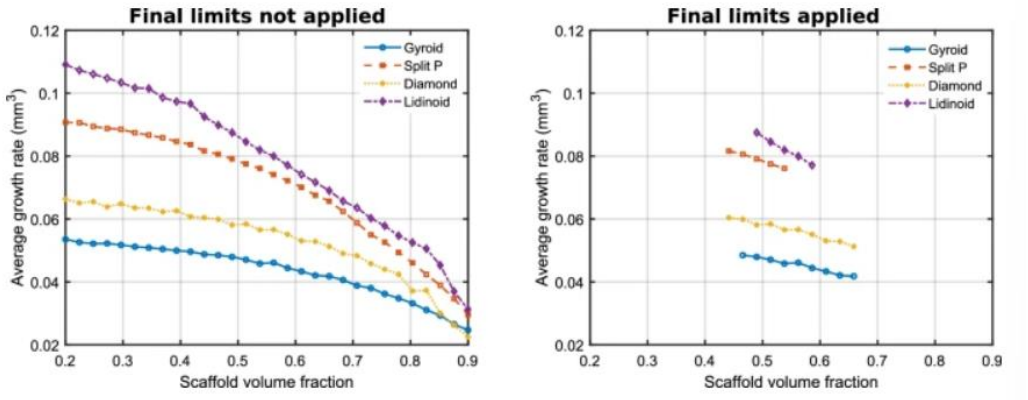


Σχήμα 2.2.4.43 *(a) Διάμετροι πόρων για όλους τους τύπους ικριωμάτων και (b) Διάμετροι πόρων των πέντε ικριωμάτων που ικανοποίησαν τον περιορισμό μέγιστου μεγέθους πόρων. Οι σκιασμένες περιοχές είναι εκτός του επιτρεπόμενου εύρους μεγεθών πόρων*

Παράλληλα από τα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται ξεκάθαρα ότι η δομή Lidinoid αποδίδει την ταχύτερη κυτταρική ανάπτυξη για ένα εύρος κλασμάτων όγκου (0,2-0,9). Σε όλα τα κλάσματα όγκου, το ικρίωμα Lidinoid παρουσιάζει τον μεγαλύτερο μέσο ρυθμό ανάπτυξης (0,0872 mm^3/ημέρα), με βέλτιστο κλάσμα όγκου 0,49. Συμπερασματικά, το ικρίωμα Lidinoid είχε την καλύτερη απόδοση με ρυθμό κυτταρικής ανάπτυξης, ο οποίος ήταν 110% μεγαλύτερος από το ικρίωμα με την χειρότερη απόδοση.



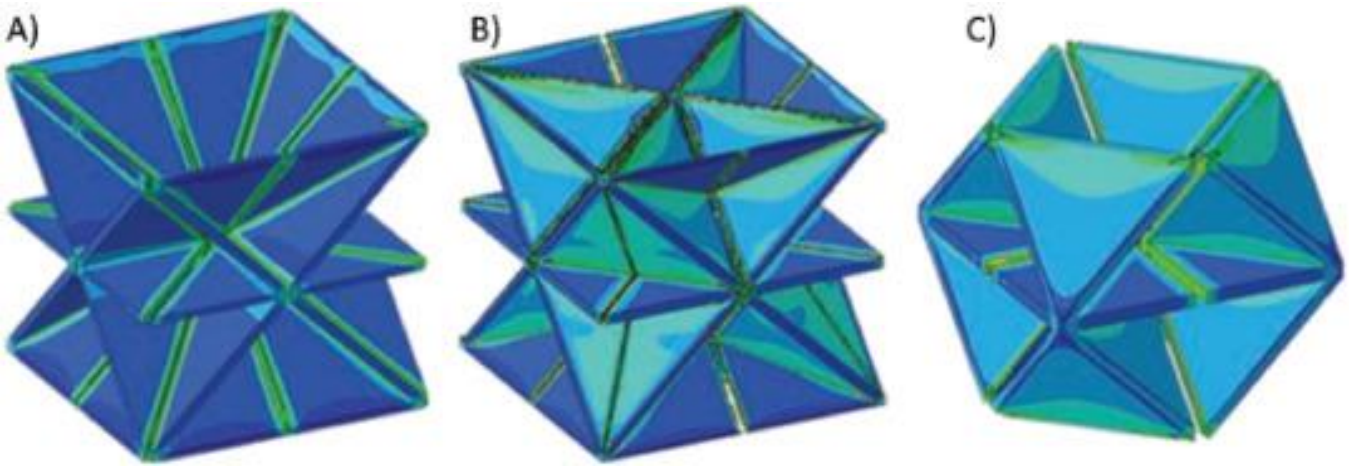
Σχήμα 2.2.4.44 *Ανάπτυξη κυττάρων μετά από 21 ημέρες για κλάσματα όγκου (a) 0,2 , (b) 0,9 και (c) 0,49*



Σχήμα 2.2.4.45 *Μέση ανάπτυξη κυττάρων μετά από οστεοβλαστική ανάπτυξη των ικριωμάτων TPMS*

2.2.5 Δομές πλέγματος κελύφους

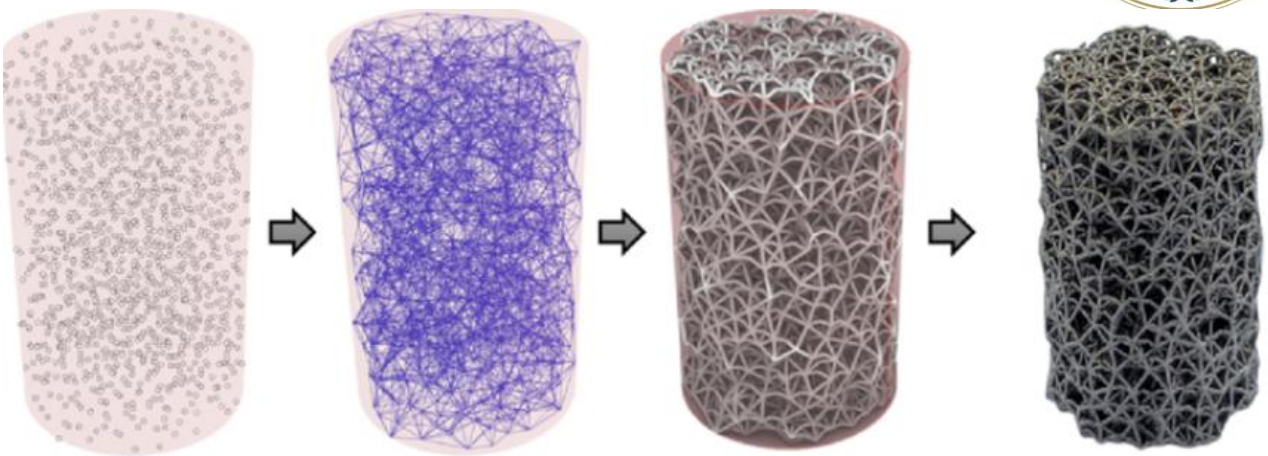
Η προσθετική τεχνολογία έχει επιτρέψει τον σχεδιασμό και την κατασκευή κυψελοειδών δομών των οποίων τα μοναδιαία κελιά αποτελούνται από πλάκες και όχι από δοκούς . Οι συγκεκριμένες δομές έχουν παρόμοια στοιχεία με τις TPMS που αναλύθηκαν παραπάνω και αναφέρονται ως πλέγματα κελύφους. Έχει αποδειχθεί ότι οι δομές με βάση πλάκες κλειστών κυψελών έχουν καλύτερες ελαστικές ιδιότητες, σε σύγκριση με τις δομές ανοιχτών κυψελών με βάση αντηρίδες με παρόμοια πυκνότητα. Παρά την ανώτερη αντοχή και ακαμψία που παρουσιάζουν οι δομές αυτές αντιμετωπίζουν πρόβλημα στα συστήματα AM που χρησιμοποιούν σκόνη (π.χ. SLS) λόγω της απαίτησης αφαίρεσής της.



Σχήμα 2.2.5.1 *: Μοναδιαίες κυψέλες πλέγματος αποτελούμενες από πλάκες τοποθετημένες στα επίπεδα κυβικών κρυστάλλων συνδυάζοντας απλές κυβικές δομές SC,BCC και FCC.*

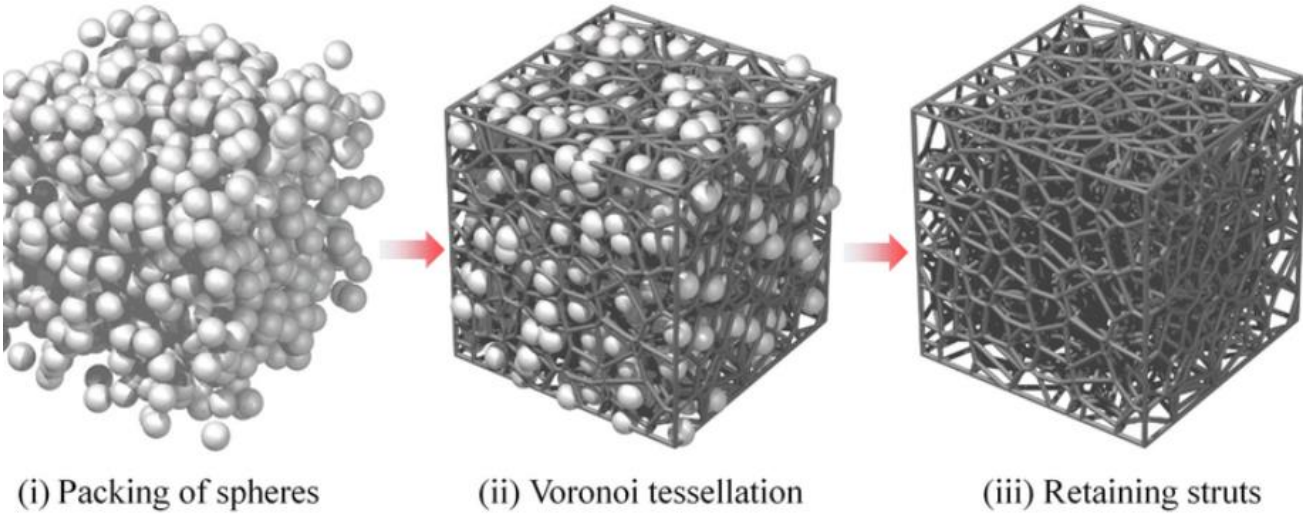
2.2.6 Ανάλυση Στοχαστικών και Ακανόνιστων Δομών

Οι στοχαστικές (stochastic) και ακανόνιστες (irregular) πλεγματικές δομές αποτελούν μία κατηγορία δομών που δεν βασίζονται σε αυστηρή γεωμετρική επανάληψη ή επαναλαμβανόμενη μοναδιαία κυψέλη, αλλά δημιουργούνται βάσει τυχαίων ή ημιτυχαίων κατανομών σημείων. Η έλλειψη συμμετρίας και περιοδικότητας των δομών αυτών προσεγγίζει κυρίως πορώδη συστήματα, όπως για παράδειγμα ο σπογγώδης ιστός, ο φλοιός των οστών ή τα πορώδη πετρώματα.



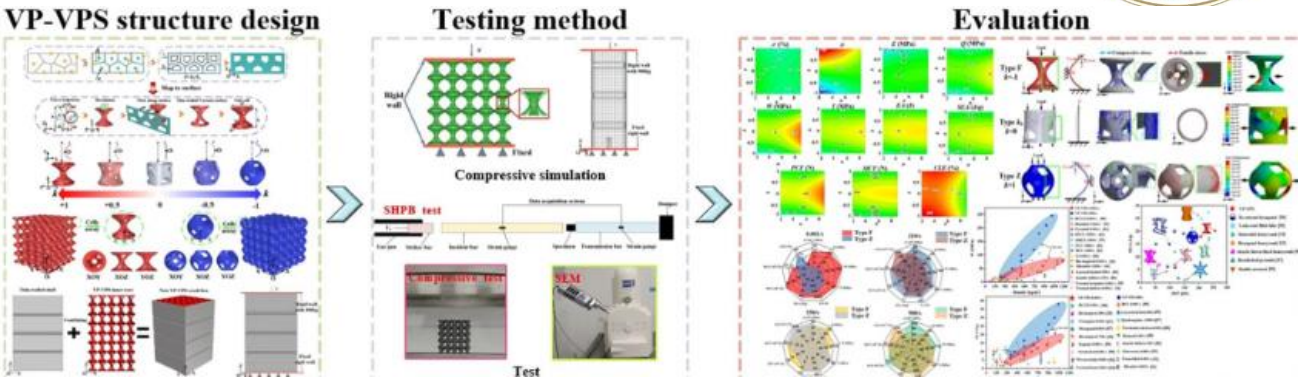
Σχήμα 2.2.6.1 *Διαδικασία δημιουργίας στοχαστικής πλεγματικής δομής*

Voronoi Lattice: Οι δομές τύπου Voronoi αποτελούν μία από τις πιο γνωστές κατηγορίες στοχαστικών δομών πλέγματος και βασίζονται στον διαχωρισμό χώρου γύρω από ένα σύνολο σημείων (seed points). Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει όλα τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά σε ένα δεδομένο σημείο αναφοράς, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα πλέγμα με ποικίλα σχήματα και μεγέθη, κατάλληλο για μοντελοποίηση φυσικών ιστών.



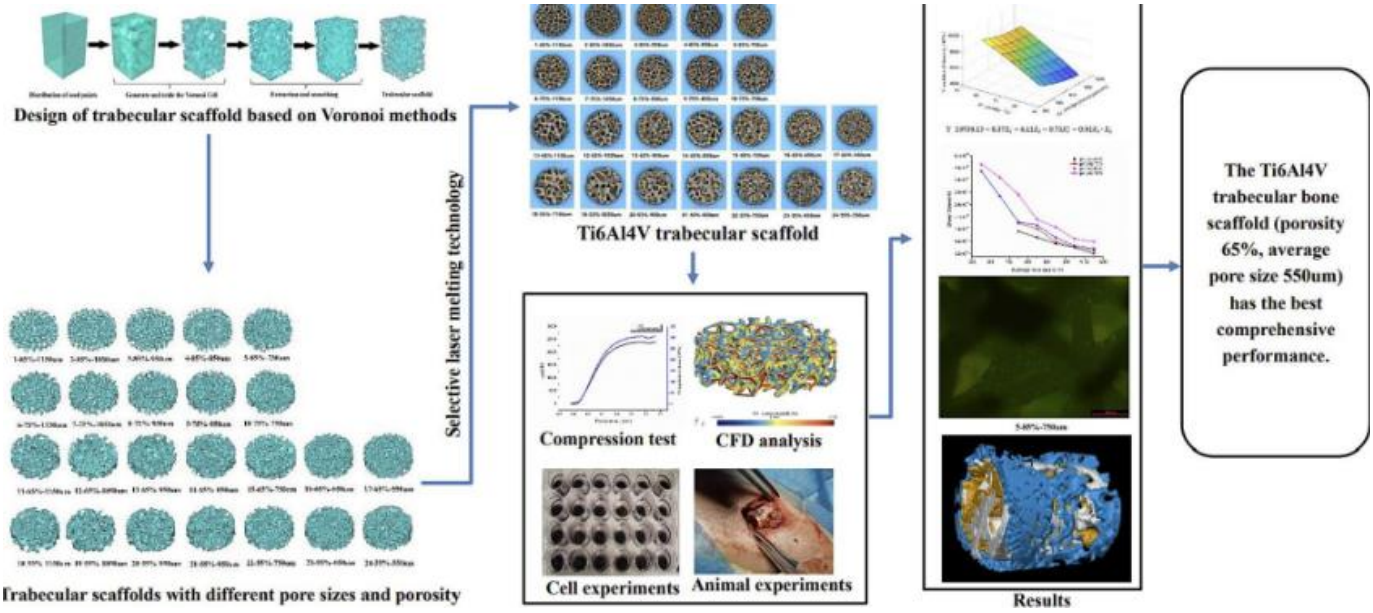
Σχήμα 2.2.6.2 *Στάδια δημιουργίας στοχαστικής πλεγματικής δομής τύπου Voronoi*

Η διαφορά των Voronoi δομών με της περιοδικές πλεγματικές δομές είναι ότι, δεν παρουσιάζουν απαραίτητα συμμετρία ή περιοδικότητα. Οι μηχανικές τους ιδιότητες(π.χ. ακαμψία και αντοχή) εξαρτώνται κυρίως από την πυκνότητα των κυττάρων και την αναλογία όγκου προς επιφάνεια. Παράλληλα, επιδεικνύουν εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ελεγχόμενης θραύσης, καθώς στην περίπτωση αυτή παρουσιάζουν σταδιακή εξάπλωση αστοχίας με αποτέλεσμα να μην δημιουργείται απότομη κατάρρευση της κατασκευής. Το γεγονός αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές αντικραδασμικής προστασίας, συστήματα πρόσκρουσης σε αυτόκινητα κ.ο.κ.[80]



Σχήμα 2.2.6.3 *Αριθμητική και πειραματική αξιολόγηση Voronoi δομών, με στόχο την βελτιστοποίηση της μηχανικής απόκρισης και της απορρόφησης ενέργειας υπό φόρτιση*

Επιπλέον, οι συγκεκριμένες δομές έχουν μελετηθεί αρκετά και στον τομέα της βιοϊατρικής μηχανικής, κυρίως για την χρήση της σε πορώδη ορθοπεδικά εμφυτεύματα και βιομιμητικά ικριώματα. Λόγω της ομοιότητας τους με τον σπογγώδη ιστό των οστών διευκολύνεται η κυτταρική προσκόλληση και η ανάπτυξη του οστικού ιστού, ενώ παράλληλα μειώνεται η πιθανότητα οστεοπενίας (μείωση πυκνότητας του οστού). [81]



Σχήμα 2.2.6.4 *Αξιολόγηση δοκιδωτών οστικών ικριωμάτων τύπου Voronoi από Ti6Al4V*

Η μοντελοποίησή τους προϋποθέτει χρήση στοχαστικών διαδικασιών ή προσεγγίσεων τύπου Monte Carlo, ενώ η κατασκευή τους καθίσταται εφικτή χάρη στις προσθετικές τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, τεχνολογίες όπως SLA, SLM, DMLS επιτρέπουν ελευθερία μορφολογίας χωρίς περιορισμούς εργαλείων. Ωστόσο, η πολύπλοκη γεωμετρία τους μπορεί να απαιτήσει μεγαλύτερη υπολογιστική ανάλυση και έλεγχο ποιότητας κατά την παραγωγή.

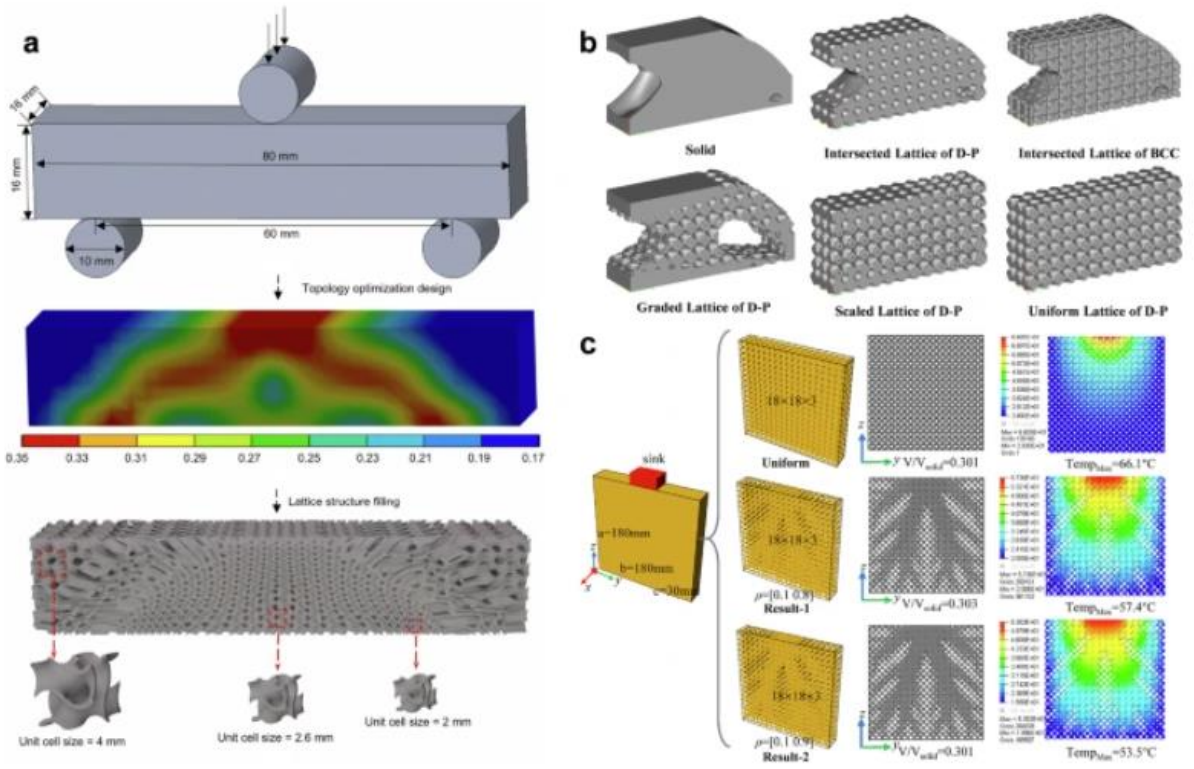
2.2.7 Ανάλυση Τοπολογικά Βελτιστοποιημένων Δομών

Η βελτιστοποίηση της τεχνολογίας αποτελεί μία σημαντική μεθοδολογία στον τομέα της βελτιστοποίησης των δομών, καθώς επιτρέπει την εξαγωγή βέλτιστων κατανομών πυκνότητας υλικού ανάλογα με τα φορτία που εφαρμόζονται και τους περιορισμούς που επιβάλλονται. Οι δομές πλέγματος TPMS που δημιουργούνται με

έμμεσες εξισώσεις,σε αντίθεση με τα συμπαγή υλικά, μπορούν να αντιστοιχιστούν σε πεδία πυκνότητας που λαμβάνονται μέσω την βελτιστοποίησης τοπολογίας.

Συγκεκριμένα, οι τοπολογικά βελτιστοποιημένες πλεγματικές δομές προκύπτουν από υπολογιστικές διαδικασίες που αποσκοπούν στη μέγιστη απόδοση μιας δομής σε συνθήκες συγκεκριμένων μηχανικών ή θερμικών περιορισμών. Χρησιμοποιώντας μεθόδους τοπολογικής βελτιστοποίησης (topology optimization), η κατανομή του υλικού μέσα σε έναν δεδομένο όγκο αναδιατάσσεται ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός δυσκαμψίας, αντοχής και βάρους, ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Οι Wang et al. [82], αναφέρουν ότι υπάρχει μία στρατηγική σχεδιασμού με στόχο την απόδοση δομών πλέγματος πολλαπλών κλιμάκων gyroid, όπου μία τοπολογικά βελτιστοποιημένη κατανομή πυκνότητας αντιστοιχίζεται στις διαστάσεις των μοναδιαίων κυψελών. Με βάση αυτή την θεωρία κατασκεύασαν μία δοκό κάμψης τριών σημείων η οποία συγκριτικά με μία ομοιόμορφη δοκό, παρουσίασε αύξηση 9,6% στην αντοχή σε κάμψη και βελτίωση 46,8% στην μετατόπιση κάμψης. Επίσης οι Paneser et al. [83], έκαναν μία σύγκριση μεταξύ σχεδίων τοπολογίας που χρησιμοποιούν διαφορετικές δομές πλέγματος, και συμπέραναν ότι ένα βαθμιδωτό TPMS που κατασκευάζεται μέσω αντιστοίχισης σχετικής πυκνότητας τον χάρτη πυκνότητας της τοπολογικής βελτιστοποίησης, αποτελεί αποδοτική λύση. Τέλος, οι Li et al. σε μία μελέτη τους [84], έκαναν βελτιστοποίηση στις κατανομές σχετικής πυκνότητας των TPMS δομών για την εφαρμογή τους σε ψύκτρες. Ανέφεραν ότι, για την ίδια αναλογία όγκου, η θερμοκρασία θα μπορούσε να μειωθεί από 66,1°C σε 57,4°C, συγκριτικά με τις ομοιόμορφες δομές TPMS. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μέσω της διαβάθμισης της πυκνότητας είναι εφικτή η βελτίωση της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 2.2.7.1 *Αποτελέσματα των ερευνών που διεξήχθησαν για την τοπολογική βελτιστοποίηση a) Δημιουργία πολλαπλών κλιμάκων τριών σημείων κάμψης, b)Σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών σχεδιασμού TPMS δομών και c) Τοπολογική βελτιστοποίηση ψύκτρας*

Η διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης αξιοποιεί προηγμένα υπολογιστικά εργαλεία, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEA) σε συνδυασμό με αλγόριθμους παραμετρικής βελτιστοποίησης (π.χ. SIMP, ESO, γενετικοί αλγόριθμοι). Το αποτέλεσμα είναι δομές μη προβλέψιμες με βάση την κλασική

γεωμετρική επανάληψη, με τοπικές μεταβολές πάχους, διακλαδώσεις, ή αλλαγές τοπολογίας, που αυξάνουν την απόδοση σε συγκεκριμένες περιοχές του εξαρτήματος.

Οι βελτιστοποιημένες αυτές δομές ενσωματώνουν συχνά χαρακτηριστικά graded density ή multi-scale αρχιτεκτονικής, προσαρμοσμένα σε πολύπλοκα πεδία τάσεων ή θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις. Χρησιμοποιούνται σε κρίσιμες εφαρμογές όπου το βάρος και η απόδοση είναι αποφασιστικά, όπως αεροδιαστημικές κατασκευές, ορθοπεδικά εμφυτεύματα με ειδικά ελεγχόμενη δυσκαμψία ή συστήματα ενέργειας υψηλής πυκνότητας.

Η χρήση τους ενισχύεται από την αυξανόμενη δυνατότητα παραμετρικού σχεδιασμού μέσω λογισμικών CAD και την ενσωμάτωσή τους σε additively manufactured parts, χωρίς τους περιορισμούς που είχαν παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής. Η έρευνα συνεχώς εξελίσσεται προς την κατεύθυνση της real-time τοπολογικής προσαρμογής με τεχνητή νοημοσύνη, γεγονός που καθιστά τις δομές αυτές κεντρικό πεδίο έρευνας στην έξυπνη μηχανική σχεδίαση.

2.3 Μηχανικές Ιδιότητες Πλεγματικών Δομών

Οι μηχανικές ιδιότητες των δομών πλέγματος βασίζουν την διαμόρφωση τους κυρίως στην τοπολογία του πλέγματος, την σχετική πυκνότητα, την γεωμετρία της μονάδας κυττάρου(unit cell), αλλά και στις ιδιότητες του υλικού κατασκευής τους. Παρακάτω, αναλύονται οι κύριες μηχανικές παράμετροι:

2.3.1 Μηχανική συμπεριφορά υπό φόρτιση

Οι δομές πλέγματος ανταποκρίνονται διαφορετικά στην περίπτωση θλιπτικής, εφελκυστικής ή καμπτικής καταπόνησης, αναλόγως τον μηχανισμό φόρτισης. Τα πλέγματα που φορτίζονται κυρίως με εφελκυσμό (stretch-dominated) παρουσιάζουν γραμμική, προβλέψιμη απόκριση με υψηλή δυσκαμψία, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για δομικά εξαρτήματα. Ενώ τα πλέγματα με καμπτική συμπεριφορά (bending-dominated) επιδεικνύουν δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας καθώς και αυξημένη παραμορφωσιμότητα, με αποτέλεσμα να είναι ιδανικά σε εφαρμογές που απαιτούν προστασία από κρούσεις (π.χ. κράνη, προσταυτικά εξαρτήματα).

2.3.2 Σχετική πυκνότητα

Η μηχανική απόδοση επηρεάζεται αρκετά από την σχετική πυκνότητα. Στην περίπτωση που οι δομές έχουν χαμηλή σχετική πυκνότητα τότε διαθέτουν μειωμένο βάρος αλλά αυξημένη ευκαμψία, ενώ όταν η πυκνότητα είναι υψηλή τότε έχουν μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή. Η σχέση της σχετικής πυκνότητας και των ιδιοτήτων των πλεγματικών δομών, περιγράφεται από πολλά μοντέλα, όπως του Gibson-Ashby [85]. Συγκεκριμένα, η εξίσωση 2.3.2.1 περιγράφει πόσο μειώνεται η δυσκαμψία όταν μειώνεται η πυκνότητα του πλέγματος, ενώ στη εξίσωση 2.3.2.2 εκφράζεται το ποσό μείωσης της αντοχής ενός πλέγματος όσο ελαχιστοποιείται η πυκνότητα του.

$$E^* = C_E \times E_s \times (\rho_{rel})^n \tag{2.3.2.1}$$

$$\sigma^* = C_\sigma \times \sigma_s \times (\rho_{rel})^m \tag{2.3.2.1}$$

Όπου:

- E^*, σ^*: ελαστική σταθερά και αντοχή του πλέγματος
- E_s, σ_s: ιδιότητες του συμπαγούς υλικού
- C_E, C_σ: εμπειρικοί συντελεστές (τυπικά 0.1–1)
- n, m: εκθέτες (τυπικά 1.5–2.0 για bend-dominated ~1.0 για stretch-dominated πλέγματα)

2.3.3 Απορρόφηση ενέργειας και τρόποι αστοχίας

Η απορρόφηση ενέργειας σε περιβάλλοντα με δυναμικά φορτία, όπως σεισμικές δονήσεις ή προσκρούσεις, καθιστά σημαντική την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας. Για παράδειγμα, πλέγματα όπως τα Voronoi και TPMS παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση στην περίπτωση σταδιακής παραμόρφωσης και δυνατότητα ελεγχόμενης αστοχίας, συγκριτικά με άλλες δομές οι οποίες αστοχούν λόγω καμπύλωσης ή θραύσης.

Επιπλέον, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας επηρεάζεται από τον μηχανισμό παραμόρφωσης της δομής, ο οποίος μπορεί να χαρακτηριστεί ως τοπικός, ολικός ή διαβαθμισμένος. Συγκεκριμένα, οι TPMS δομές που χαρακτηρίζονται από την ισοτροπική κατανομή φορτίων και την συνεχή επιφάνειά τους, έχουν την ικανότητα σταδιακής απορρόφησης ενέργειας και κατά αυτόν τον τρόπο αποτρέπουν τυχόν αστοχίες. Παράλληλα, ο συνδυασμός δομών του οποίου η τοπολογία και η πυκνότητα μεταβάλλονται, μπορεί να ενισχύσει την ενεργειακή τους ικανότητα και να προσδώσει μείωση της δυσκαμψίας κατά την απορρόφηση.

Μία ακόμη κατηγορία πλεγματικών δομών με αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας είναι οι αυξητικές δομές (auxetic lattice structure), οι οποίες χαρακτηρίζονται για τον αρνητικό λόγο Poisson. Οι δομές αυτές παρουσιάζουν βελτιωμένη συμπεριφορά υπό κρουστικά φορτία και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε εφαρμογές προστασίας και απορρόφησης κρούσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Ntintakis et al. [86], στην οποία χρησιμοποιήθηκαν αυξητικές δομές στον σχεδιασμό κράνους ποδηλάτου. Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των δομών υπό κρουστικά φορτία και διαπιστώθηκε ότι οι αυξητικές δομές παρουσιάζουν αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ομοιόμορφη κατανομή τάσεων συμβάλλοντας παράλληλα στην μείωση του συνολικού βάρους της κατασκευής.

2.3.4 Παράγοντες επηρεασμού των μηχανικών ιδιοτήτων

Οι μηχανικές ιδιότητες των πλεγματικών δομών επηρεάζονται από ένα σημαντικό αριθμό παραγόντων, μεταξύ των οποίων είναι η κατεύθυνση φόρτισης, η τοπολογία, το μέγεθος μονάδας κυττάρου, η μεταβαλλόμενη πυκνότητα καθώς και τα σφάλματα που μπορεί να παρουσιαστούν κατά την εκτύπωση. Με τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων (παραμετροποίηση), υπάρχει δυνατότητα σχεδιασμού πλεγμάτων κατάλληλων για εφαρμογές με συγκεκριμένες μηχανικές απαιτήσεις.

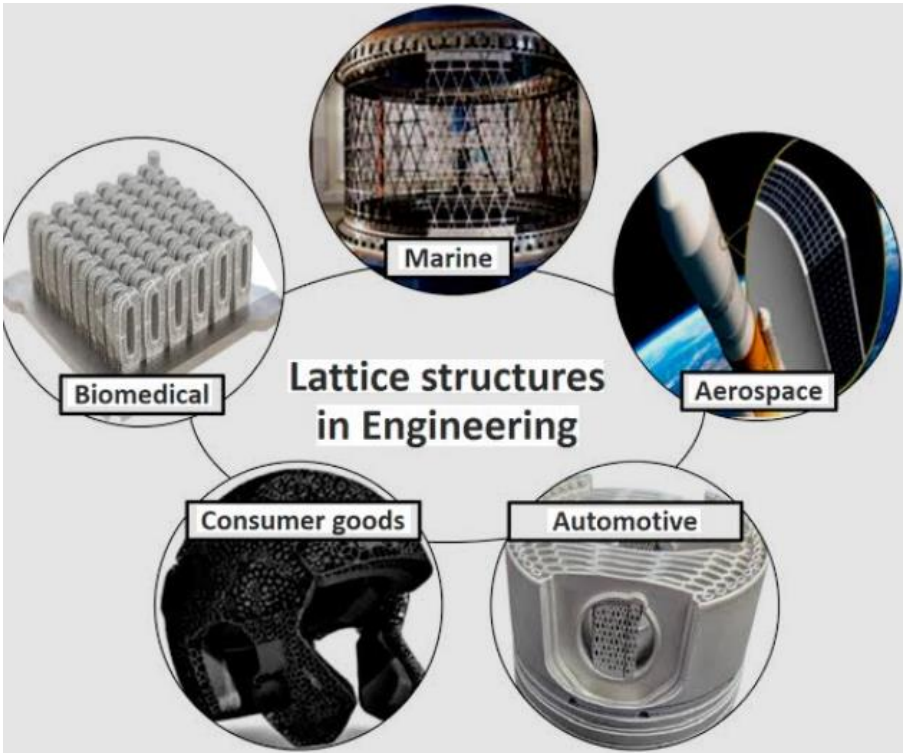
Η κατεύθυνση φόρτισης επηρεάζει την κατανομή των τάσεων καθώς και τον τρόπο με τον οποίο παραμορφώνεται η δομή, προσδιορίζοντας σε ποιο βαθμό επικρατεί καμπτική ή εφελκυστική απόκριση. Ενώ ή τοπολογία του πλέγματος συντελεί στην αλλαγή ισοτροπικής σε ανισοτροπική συμπεριφορά, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα σημαντική σε εφαρμογές που απαιτούν προβλέψιμη συμπεριφορά υπό πολύπλευρες φορτίσεις.

Παράλληλα, το μέγεθος της μονάδας κυττάρου αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα καθώς επηρεάζει την κατανομή και την μεταφορά των μηχανικών φορτίων εντός του υλικού. Στην περίπτωση που μονάδα κυττάρου είναι μικρή η απόκριση είναι πιο ομοιόμορφη, ενώ όταν είναι μεγαλύτερη ευνοούνται συγκεκριμένες ιδιότητες που σχετίζονται με την κατεύθυνση.

Συνεπώς, η μηχανική συμπεριφορά των πλεγματικών δομών εξαρτάται άμεσα από την εφαρμογή των φορτίων και από τις παραμέτρους που ορίζονται για την κατασκευή τους μέσω προσθετικής κατασκευής. Η παραμετροποίηση και ο έλεγχος των συγκεκριμένων παραγόντων αποτελεί βασική προϋπόθεση ώστε να σχεδιαστούν λειτουργικά και αξιόπιστα πλέγματα.

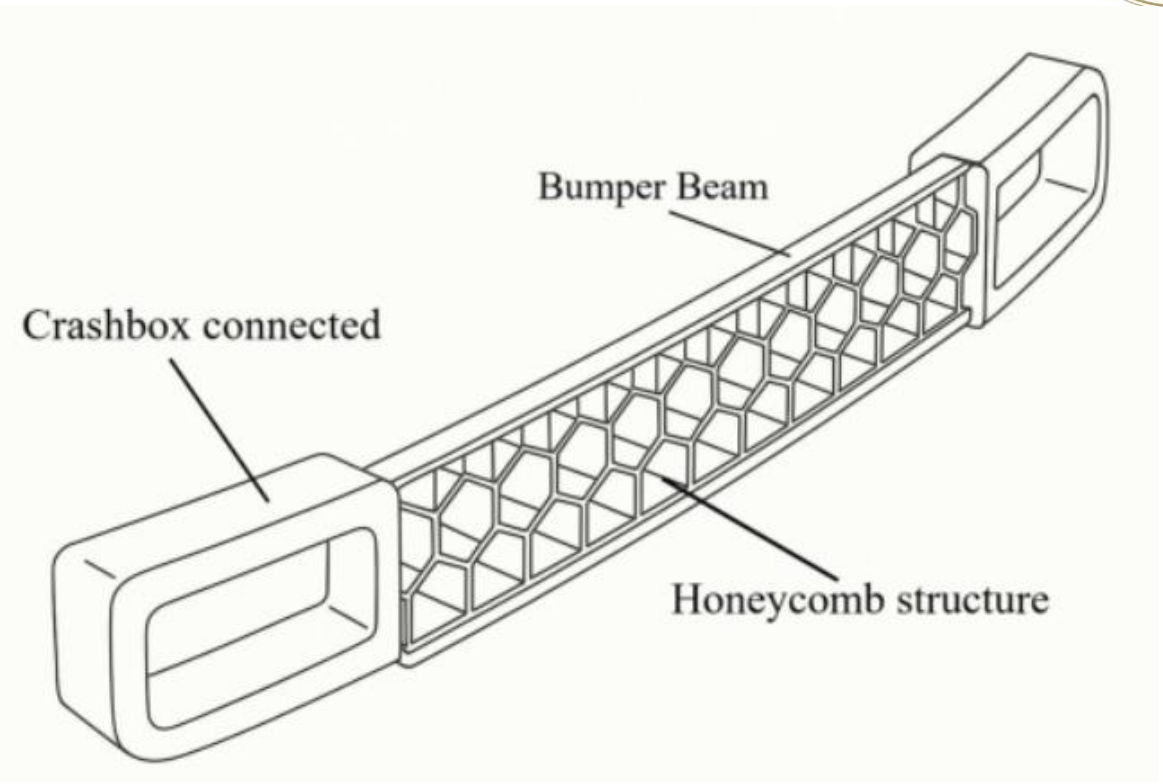
2.4 Πεδία εφαρμογής

Οι δομές πλέγματος χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικούς, βιοϊατρικούς και τεχνολογικούς τομείς, καθώς παρουσιάζουν εξαιρετική μηχανική, θερμική και λειτουργική συμπεριφορά. Μέσω της προσθετικής κατασκευής προσφέρεται στις πλεγματικές δομές η δυνατότητα παραμετρικού σχεδιασμού, η ελευθερία γεωμετρίας καθώς και προσαρμογή της σχετικής πυκνότητας, γεγονός που τις καθιστά απαραίτητες στις παρακάτω εφαρμογές:



Σχήμα 2.4.1 *Πεδία εφαρμογής των πλεγματικών δομών*

Αυτοκινητοβιομηχανία και Αεροναυπηγική: Οι δομές πλέγματος χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν ελαφρά εξαρτήματα τα οποία παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή και δυσκαμψία. Είναι ιδανικές σε κατασκευές που χρειάζονται βελτιστοποίηση βάρους, όπως αποσβεστήρες κραδασμών, εσωτερικές ενισχύσεις, ψύκτρες θερμότητας και εξαρτήματα της αεροδυναμικής δομής. Επίσης, καθίστανται ιδιαίτερα χρήσιμες σε κατασκευές που αφορούν την προστασία, λόγω της δυνατότητας που προσφέρουν για απορρόφηση ενέργειας. Εφαρμόζονται κυρίως σε συστήματα θωράκισης και απορρόφησης κρούσεων όπως για παράδειγμα σε κράνη, ζώνες παραμόρφωσης, μέρη αυτοκινήτου κ.ο.κ.



Σχήμα 2.4.2 *Κυψελοειδής δομή σε προφυλακτήρα αυτοκινήτου [87]*



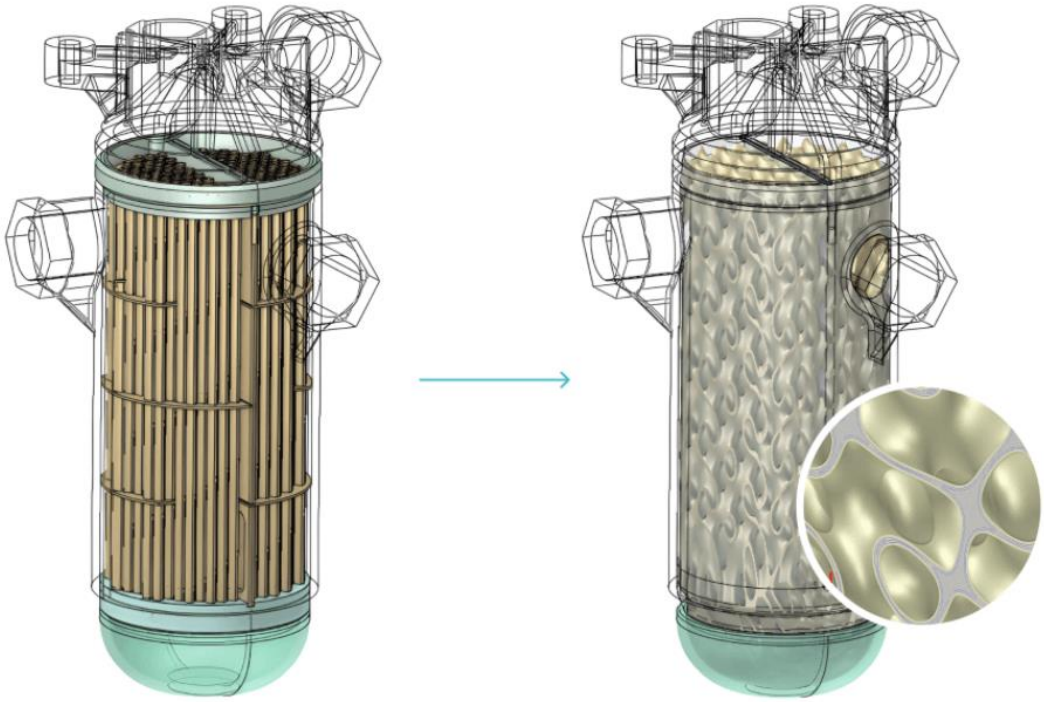
Σχήμα 2.4.3 *Προσαρμογή τετραεδρικού πλέγματος σε εξάρτημα για την χρήση του σε εμπορικό αεροσκάφος[88]*

Βιοϊατρική Τεχνολογία: Οι πλεγματικές δομές έχουν βρει εφαρμογή και στον τομέα της βιοϊατρικής καθώς χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εξατομικευμένων ορθοπεδικών εμφυτευμάτων, ιστικών υποκατάστατων αλλά οδοντικών εφαρμογών. Η βελτιστοποίηση της βιοσυμβατότητας και η δυνατότητα μηχανικής συμβατότητας με τον ανθρώπινο ιστό την καθιστούν ιδανική για αυτόν τον τομέα. Συγκεκριμένα, οι δομές TPMS, και ιδίως οι Gyroid και οι Diamond χρησιμοποιούνται στην δημιουργία νέων αιμοφόρων αγγείων και στην οστεοενσωμάτωση, ενώ η ικανότητα που κατέχουν για έλεγχο δυσκαμψίας μειώνει τον κίνδυνο για ατροφία ή εξασθένηση του ιστού.



Σχήμα 2.4.4 *Σχεδιασμός ενός τεχνητού κοτυλιαίου κυπέλλου, χρησιμοποιώντας δομές πλέγματος [89]*

Εφαρμογές ενέργειας: Η δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας ή μάζας αλλά και η μεγάλη επιφάνεια συγκριτικά με τον όγκου τους, τις καθιστά ιδανικές για χρήση σε εναλλάκτες θερμότητας, πορώδη φίλτρα ή σε συστήματα που διαχειρίζονται την ροή. Επίσης βασικό είναι το γεγονός ότι μέσω της τοπολογικής παραμετροποίησης μπορούν να σχεδιαστούν δομές με εξαιρετικές ιδιότητες αγωγιμότητας ή φιλτραρίσματος.



Σχήμα 2.4.5 *Σχεδιασμός εναλλάκτη θερμότητας FCOC με σωλήνες γυροειδούς δομής [90]*

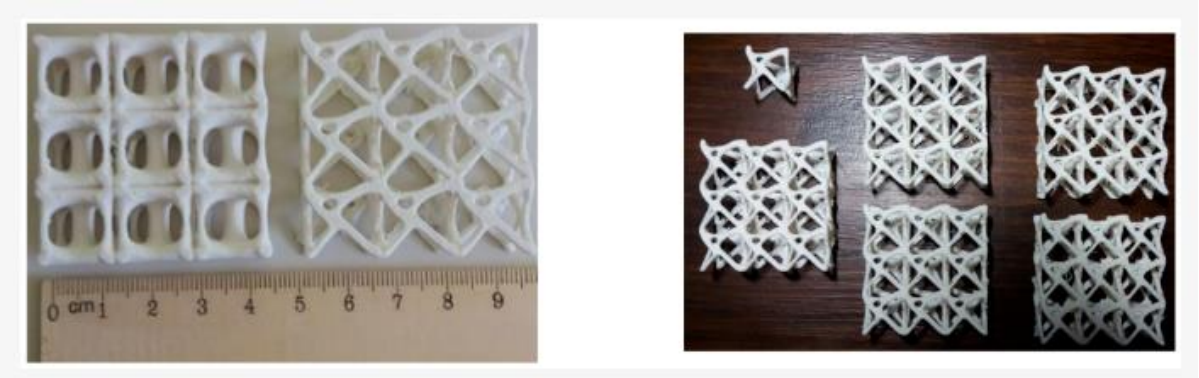
Αθλητικός και Καταναλωτικός Εξοπλισμός: Οι πλεγματικές δομές εφαρμόζονται και στον αθλητικό εξοπλισμό, κυρίως στα παπούτσια, στα καθίσματα ποδηλάτων, στα κράνη και στις επιγονατίδες, καθώς μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το βάρος και να αυξήσουν την απορρόφηση κραδασμών. Επιπλέον, με την δυνατότητα εξατομίκευσης που προσφέρουν υπάρχει ευελιξία στον σχεδιασμό και το προϊόν μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του χρήστη.



Σχήμα 2.4.6 *Παράδειγμα εκτυπωμένης σόλας παπουτσιού με πλεγματική δομή[91]*

Εκπαίδευση και Έρευνα: Οι πλεγματικές δομές έχουν ενταχθεί σημαντικά και στον τομέα της εκπαίδευση και της έρευνας, κυρίως λόγω της δυνατότητας που προσφέρουν για ανάπτυξη και αξιολόγηση νέων σχεδιαστικών και κατασκευαστικών μεθοδολογιών στην προσθετική κατασκευή. Είναι συχνό φαινόμενο να μελετάται η μηχανική απόκριση πολύπλοκων γεωμετριών και η ανάπτυξη βελτιστοποιημένων δομών χαμηλού βάρους σε πολλά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα. Παράλληλα, μέσω των πλεγματικών δομών δίνεται η δυνατότητα τοπολογικής βελτιστοποίησης και πειραματικών δοκιμών, γεγονός που τις καθιστά χρήσιμες σε διάφορες μελέτες.

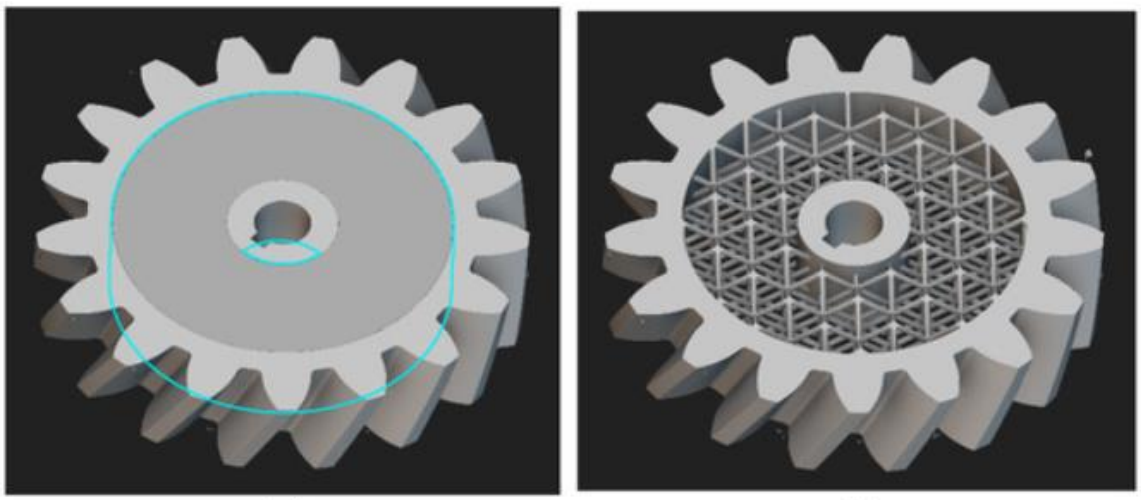
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Ntintakis et al. [92], στην οποία πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός και αξιολόγηση βελτιστοποιημένων πλεγματικών μικροδομών για εφαρμογές προσθετικής κατασκευής. Στην έρευνα αυτή, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης με σκοπό την δημιουργία εσωτερικών πλεγματικών δομών διαφορετικής σχετικής πυκνότητας με υψηλή μηχανική απόδοση. Η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων έγινε μέσω ανάλυσης ομογενοποίησης όπου υπολογίστηκε η δυσκαμψία και η ανισοτροπία των δομών. Επιπλέον, μελετήθηκε η επίδραση του προσανατολισμού των δομών στην μηχανική τους συμπεριφορά, ενώ πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης στα εκτυπωμένα δοκίμια για την αξιολόγηση της απόδοσής τους.



Σχήμα 2.4.7 *Πλεγματικές δομές διαφορετικής σχετικής πυκνότητας που προέκυψαν μέσω τοπολογικής βελτιστοποίησης και κατασκευάστηκαν με την μέθοδο προσθετικής κατασκευής FFF για μηχανική αξιολόγηση*

2.5 Σύγκριση με συμπαγείς δομές-Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Η επιλογή μεταξύ πλεγματικών και συμπαγών δομών είναι μία σημαντική απόφαση που πρέπει να παρθεί κατά τον σχεδιασμό μηχανολογικών κατασκευών. Οι συμπαγείς δομές επιλέγονται συνήθως λόγω της απλότητας τους κατά την κατασκευή, αλλά και για την σταθερή μηχανική τους συμπεριφορά. Με την εξέλιξη όμως της προσθετικής κατασκευής και των υπολογιστικών μεθόδων σχεδιασμού, οι πλεγματικές δομές έχουν την ικανότητα να βελτιστοποιούν την μηχανική συμπεριφορά μίας κατασκευής με μειωμένη μάζα.



Σχήμα 2.5.1 *Παράδειγμα σχεδιασμού ελικοειδούς οδοντωτού τροχού με (a) συμπαγή δομή και (b) εσωτερική πλεγματική δομή [93]*

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της κάθε κατηγορίας, αναφέροντας τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγεται η κάθε δομή.

Πλεονεκτήματα πλεγματικών δομών:

- Οι πλεγματικές δομές προσφέρουν μειωμένο βάρος σε σχέση με τα συμπαγή εξαρτήματα, χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή και η δυσκαμψία.
- Παρουσιάζουν εξαιρετική απορρόφηση ενέργειας λόγω της κυψελοειδούς δομής. Μπορούν να διαχειριστούν δυναμικές φορτίσεις και προσκρούσεις μέσω προοδευτικής αστοχίας, ώστε να αποφύγουν την θραύση.
- Έχουν πολύ καλές θερμικές και μαζικές ιδιότητες, καθώς οι μεγάλες επιφάνειες αναλογικά με τον όγκο επιτρέπουν καλύτερη απαγωγή θερμότητας ή μεταφορά μάζας.
- Μέσω του σχεδιασμού τους επιτρέπεται η παραμετροποίηση της γεωμετρίας και πυκνότητας, γεγονός που δίνει την δυνατότητα εξατομίκευσης κατασκευών.

Περιορισμοί πλεγματικών δομών:

- Η κατασκευή πλεγματικών δομών είναι σχεδόν αδύνατο να πραγματοποιηθεί με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής λόγω της πολυπλοκότητάς τους, επομένως απαιτεί τεχνολογίες ΑΜ υψηλής ακρίβειας.

- Χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εκτύπωση καθώς στην περίπτωση ατελειών (μικρορωγμών) είναι πιθανό ότι θα παρουσιάσουν πρόωρη αστοχία.
- Λόγω της πολυπλοκότητας στην γεωμετρία τους καθίσταται δύσκολος ο ποιοτικός έλεγχος, και πιθανόν να χρειαστούν προηγμένα εργαλεία όπως αξονική τομογραφία.
- Οι πλεγματικές δομές έχουν αυξημένο κόστος ανάλυσης και σχεδιασμού, καθώς απαιτούν λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων (FEA), τοπολογικής βελτιστοποίησης αλλά και αυξημένο χρόνο για την παραγωγή τους.

Πλεονεκτήματα συμπαγών δομών

- Δεν είναι επιρρεπείς σε γεωμετρικές ατέλειες καθώς έχουν πιο απλή μηχανική συμπεριφορά σε σχέση με τις πλεγματικές δομές
- Παρουσιάζουν ευκολία κατά τον σχεδιασμό αλλά και την παραγωγή
- Υπάρχει δυνατότητα κατασκευής με διάφορες συμβατικές τεχνικές παραγωγής
- Εξαιρετική αντοχή και ακαμψία λόγω της πλήρους κατανομής υλικού στον όγκο

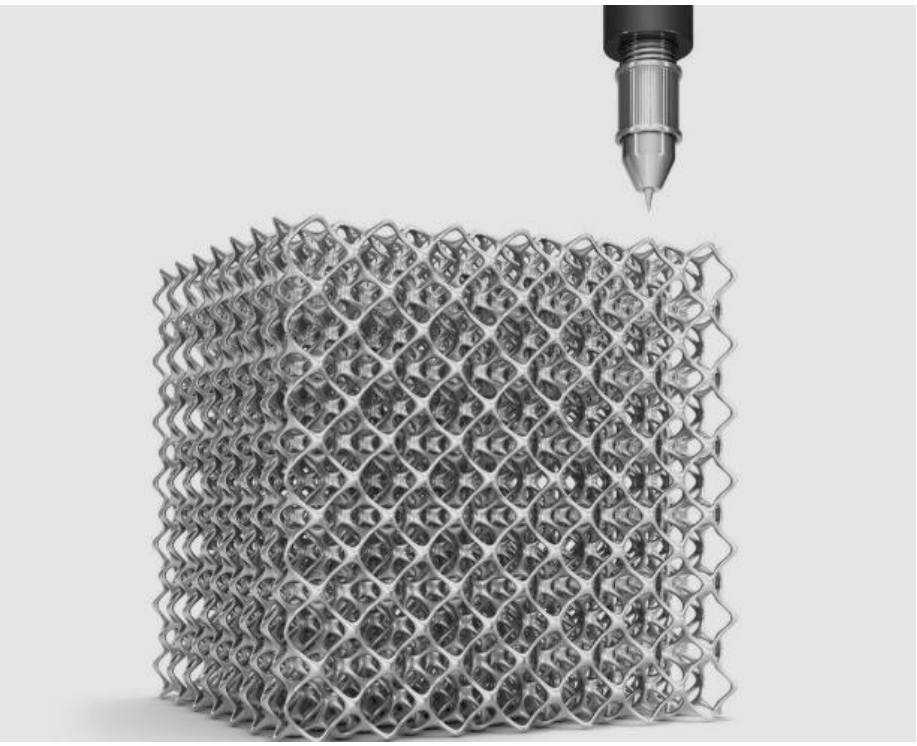
Περιορισμοί πλεγματικών δομών:

- Αυξημένη μάζα και επομένως υψηλή κατανάλωση υλικού.
- Υπάρχει πιθανότητα συγκέντρωσης τάσεων, ιδίως σε σημεία που υπάρχουν γεωμετρικές ασυνέχειες.
- Δεν είναι ιδανικές για ελαφριές κατασκευές και εφαρμογές που απαιτούν βελτιστοποιημένο βάρος.
- Μειωμένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, επομένως υπάρχει πιθανότητα αστοχίας.
- Δεν είναι λειτουργικές σε εφαρμογές που απαιτούν πορώδη δομή ή μεταφορά ρευστών.

Η επιλογή μεταξύ πλεγματικής ή συμπαγούς κατασκευής δεν είναι απόλυτη, αλλά εξαρτάται από το τεχνικό πρόβλημα, τις απαιτήσεις εφαρμογής, τα διαθέσιμα υλικά και την τεχνολογία παραγωγής.

2.6 Προσθετική κατασκευή και πλεγματικές δομές

Η προσθετική κατασκευή (ΑΜ) δίνει την δυνατότητα κατασκευής ισχυρών και ελαφρών δομών με γεωμετρία που είναι αδύνατη με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, συμπεριλαμβανομένων των σύνθετων δομών πλέγματος. Μάλιστα, οι δομές πλέγματος που έχουν δημιουργηθεί μέσω της προσθετικής κατασκευής υπερτερούν σημαντικά των κυψελοειδών δομών που παράγονται με άλλες μεθόδους, κυρίως λόγω του μεγαλύτερου ελέγχου στην γεωμετρία και την προβλεψιμότητα που παρέχει η ΑΜ.



Σχήμα 2.6.1 *Κυψελωτή δομή μεταλλικού δικτυώματος κατασκευασμένο με την χρήση προσθετικής κατασκευής*

Η απόδοση των πλεγματικών δομών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιείται. Η μέθοδος εκτύπωσης καθορίζει την ακρίβεια της γεωμετρίας που αναπαράγεται, την ομοιογένεια του υλικού καθώς και την επιφανειακή ποιότητα των παραγόμενων κόμβων και ράβδων. Η ακρίβεια στην δημιουργία κόμβων και ράβδων είναι πολύ σημαντική καθώς ακόμη και οι μικρές αποκλίσεις στην τραχύτητα, μπορούν να επηρεάσουν την μηχανική συμπεριφορά της πλεγματικής δομής.

Τεχνολογίες όπως η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) και η άμεση σύντηξη μετάλλων με λέιζερ (DMLS), προσφέρουν την δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών με υψηλή ανάλυση και διαστατική ακρίβεια χωρίς την χρήση υποστηρικτικών δομών (supports). Αυτό είναι καθοριστικό για την ακριβή κατασκευή TPMS ή Voronoi δομών που βασίζονται σε καμπυλόμορφες ή στοχαστικές μορφές. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM), έχει προσφέρει την δυνατότητα ανάπτυξης πλεγματικών δομών με εξαιρετικές ιδιότητες [94].

Αντίθετα, τεχνολογίες όπως η μοντελοποίηση με σύντηξη εναπόθεσης (FDM) παρουσιάζουν περιορισμούς όσον αφορά το πάχος του ακροφυσίου εκτύπωσης τα επίπεδα υποστήριξης. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να οδηγήσουν σε ανομοιογένειες στην δομή εσωτερικά, γεωμετρικές αποκλίσεις και κατ’επέκταση να μειωθεί η μηχανική απόδοση κυρίως σε πολύπλοκες διατάξεις.

Αντιθέτως, η στερεολιθογραφία (SLA) ως τεχνολογία AM προσφέρει υψηλή επιφανειακή ποιότητα και υψηλή ακρίβεια, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για λεπτομερείς πολυμερικές δομές. Αντίστοιχα, η τεχνολογία εναπόθεσης συνδετικού υγρού (Binder Jetting) επιτρέπει την κατασκευή πορώδων μεταλλικών ή κεραμικών δομών, οι οποίες μπορούν να μετα-επεξεργαστούν μέσω σύντηξης ή εμποτισμού.

Επιπλέον, η συμβατότητα του υλικού με την τεχνολογία εκτύπωσης παίζει καθοριστικό ρόλο. Για παράδειγμα, μέταλλα όπως Ti6Al4V είναι καταλληλότερα για DMLS, ενώ βιοσυμβατά πολυμερή για στερεολιθογραφία ή Binder Jetting. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της τεχνολογίας και της γεωμετρίας μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις, μειωμένη ακρίβεια ή ανάγκη για μετα-επεξεργασία.

Συνεπώς, για τη βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής, δεν αρκεί μόνο να σχεδιαστεί σωστά αλλά είναι απαραίτητο να συνεκτιμώνται οι ιδιότητες του υλικού που επιλέχθηκε, οι απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής καθώς και οι δυνατότητες της τεχνολογίας AM.

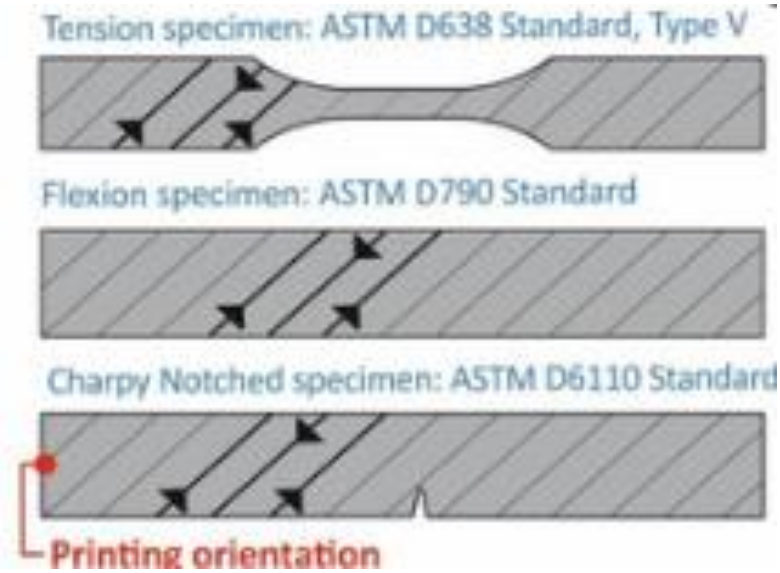
Κεφάλαιο 3: Αρχές και Μεθοδολογία Σχεδιασμού Δοκιμίων

3.1 Πρότυπα Δοκιμών

Η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών απαιτεί την εφαρμογή τυποποιημένων μεθόδων δοκιμών, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα και αξιόπιστα. Τα διεθνή πρότυπα ASTM (American Society for Testing and Materials) καθορίζουν με ακρίβεια τη γεωμετρία των δοκιμίων, τις συνθήκες δοκιμής, καθώς και τις μεθόδους υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων.

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζονται τρία ευρέως καθιερωμένα πρότυπα ASTM, στα οποία θα γίνουν δοκιμές για αντοχή σε εφελκυσμό, καμπτική δυσκαμψία και αντοχή σε κρουστική φόρτιση αντίστοιχα:

- ASTM D638
- ASTM D790
- ASTM D6110



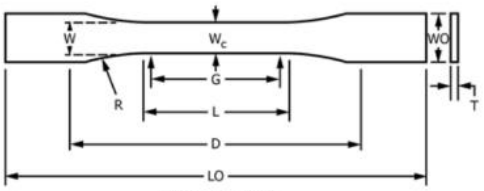
Σχήμα 3.1.1 *Πρότυπα δοκίμια εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης*

Τα πρότυπα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως για τον χαρακτηρισμό θερμοπλαστικών και σύνθετων υλικών που παράγονται με την χρήση προσθετική κατασκευής (FDM). Επιπλέον πλήθος μελετών έχουν διερευνήσει τη συμπεριφορά σύνθετων υλικών όπως PEEK ενισχυμένο με ίνες υπό εφελκυσμό, κάμψη και κρούση χρησιμοποιώντας τις προδιαγραφές των προτύπων που αναφέρθηκαν [95].

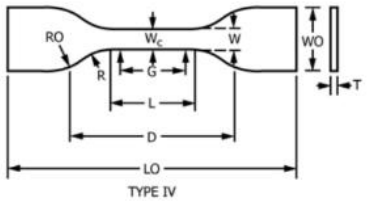
3.1.1 Πρότυπο ASTM D638 – δοκιμή εφελκυσμού

Το πρότυπο ASTM D638 καθορίζει τη διαδικασία μέτρησης των μηχανικών ιδιοτήτων ενός πολυμερούς υπό εφελκυσμό, όπως το όριο διαρροής, την μέγιστη αντοχή εφελκυσμού, την παραμόρφωση μέχρι θραύση και το μέτρο ελαστικότητας. Η μέθοδος περιλαμβάνει την εφαρμογή ελεγχόμενης δύναμης κατά μήκος του δείγματος, το οποίο έχει συγκεκριμένη γεωμετρία ανάλογα με το πάχος του υλικού.

Επιπλέον η μεθοδολογία βασίζεται στη χρήση τυποποιημένων δοκιμίων σχήματος ‘dog bone’, τα οποία διαφοροποιούνται σε πέντε τύπους (type I-V). Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκε το δοκίμιο τύπου V (Type V), κατάλληλο για μικρού πάχους εκτυπωμένα δείγματα. Τα βασικά χαρακτηριστικά του τύπου που επιλέχθηκε φαίνονται στο σχήμα 3.1.1.1και 3.1.1.2.



TYPES I, II, III & V

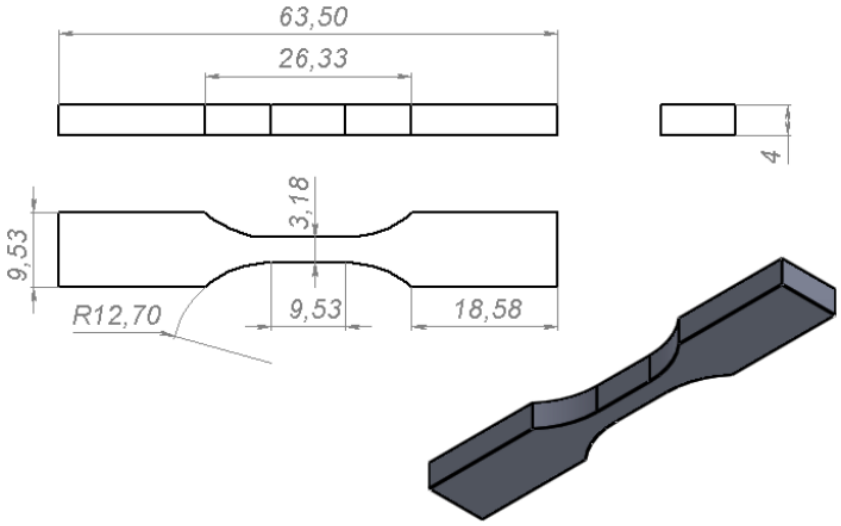


TYPE IV

Specimen Dimensions for Thickness, *T*, mm (in.)[A]

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV[B]	Type V[C,D]	
W—Width of narrow section[E,F]	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02)[B,C]
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02)[C]
WO—Width overall, min[G]	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO—Width overall, min[G]	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min[H]	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length[I]	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010)[C]
G—Gage length[I]	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5)[J]	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04)[C]
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Σχήμα 3.1.1.1 *Βασικά χαρακτηριστικά του πρότυπου δοκιμίου ASTM D638*



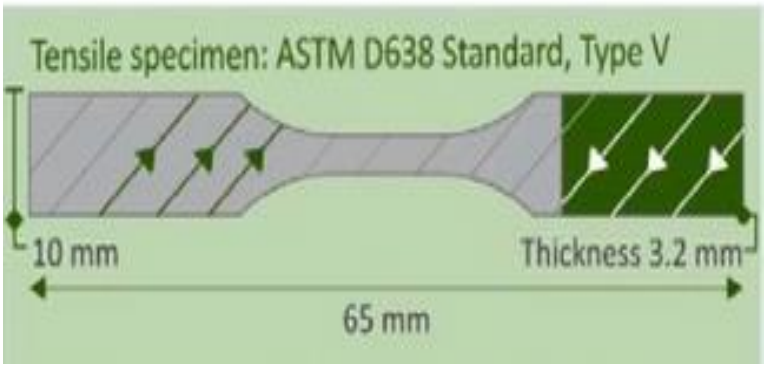
Σχήμα 3.1.1.2 *Πρότυπο δοκίμιο τύπου V, ASTM D638*

Στην παρούσα μελέτη οι διαστάσεις του δοκιμίου τροποποιήθηκαν ελάχιστα με σκοπό την ευκολότερη και γρηγορότερη εκτύπωση των δοκιμίων κατά την πειραματική διαδικασία χωρίς αυτό να σημαίνει ότι επηρεάστηκαν τα αποτελέσματα και οι μηχανικές ιδιότητες τους.

Οι βασικές διαστάσεις του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε αναφέρονται στον πίνακα 3.1.1.1 και στο σχήμα 3.1.1.3.

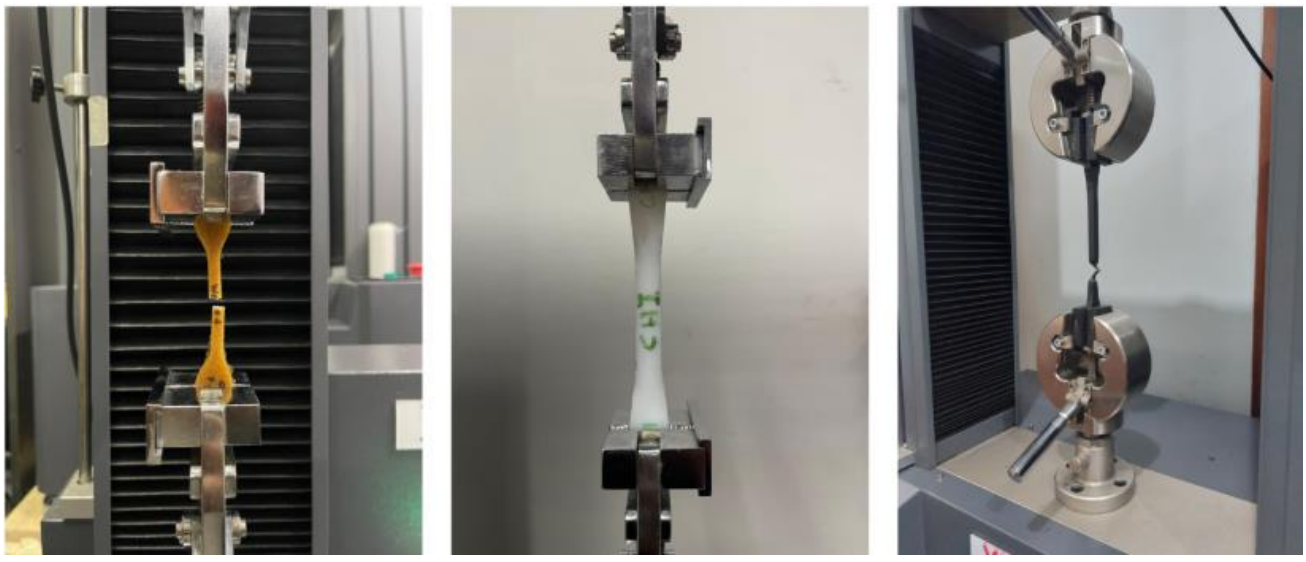
Παράμετρος	Τιμή (mm)
Συνολικό μήκος	65
Πλάτος στα άκρα	10
Πάχος	3.2
Πλάτος στο μέσο	3.18
Ακτίνα καμπυλότητας	12.7

Πίνακας 3.1.1.1 *Διαστάσεις δοκιμίου ASTM D638 για την παρούσα εργασία*



Σχήμα 3.1.1.3 *Διαστάσεις δοκιμίου ASTM D638 [96]*

Τέτοιου είδους δοκίμια ελέγχονται συνήθως σε επιτραπέζια μηχανή δοκιμών γενικής χρήσης ακολουθώντας τυποποιημένη και προκαθορισμένη διαδικασία, όπως ορίζεται από το πρότυπο ASTM D638. Αρχικά, πρέπει να γίνει έλεγχος του δείγματος για τυχόν επιφανειακά ελαττώματα ή ασυνέχειες οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα του πειράματος. Έπειτα, είναι βασικό να γίνει μέτρηση των γεωμετρικών διαστάσεων του με ένα παχύμετρο ή μικρόμετρο και καταγραφούν για τους μετέπειτα υπολογισμούς των μηχανικών ιδιοτήτων. Εφόσον γίνουν τα παραπάνω, είναι σημαντικό το δοκίμιο να ασφαλιστεί σταθερά στην μηχανή εφελκυσμού και συγκεκριμένα στις λαβές πλευρικής δράσης με οδοντωτές επιφάνειες σιαγόνων. Επιπλέον, για την διασφάλιση της ακρίβειας των δοκιμών, τα δείγματα είναι βασικό να τοποθετηθούν κάθετα στις επιφάνειες σιαγόνων και όχι κεκλιμένα υπό γωνία, καθώς εάν δεν γίνει σωστή ευθυγράμμιση των δειγμάτων μπορεί να προκύψουν σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα. [97]



Σχήμα 3.1.1.4 *Διαφορετικοί τύποι επιτραπέζιων μηχανών εφελκυσμού*

Συνοπτικά η διαδικασία δοκιμής απαιτεί:

- Μέτρηση πλάτους και πάχους με ακρίβεια ± 0.025 mm.
- Απόλυτη ευθυγράμμιση του δοκιμίου με τον άξονα φόρτισης.
- Χρήση εκτενσιόμετρου Class B-2 για μέτρηση επιμήκυνσης.
- Καταγραφή καμπύλης δύναμης παραμόρφωσης και προσδιορισμός σημείων yield and break.

Το δοκίμιο εκτυπώνεται με προσανατολισμό ±45°, ώστε να αναπαραχθεί η εσωτερική δομή στρωμάτων που χαρακτηρίζει τα FDM δείγματα. Η προετοιμασία και συντήρηση των δειγμάτων διενεργείται, σε θερμοκρασία 23 ± 2 °C και σχετική υγρασία 50 ± 5 % για ελάχιστο χρόνο 40 ώρες.

Ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων πραγματοποιείται βάσει της θεωρίας της μηχανικής των υλικών, η οποία παρουσιάζεται στην διεθνή βιβλιογραφία (Gere, 2001). Οι υπολογισμοί βασίστηκαν στα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την δοκιμή εφελκυσμού σε δοκίμιο με πρότυπο ASTM D638, με τις εξισώσεις να αποτελούν θεμελιώδεις ορισμούς της μηχανικής στερεών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις ονομαστικής τάσης, μηχανικής παραμόρφωσης και μέτρου ελαστικότητας αντίστοιχα :

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

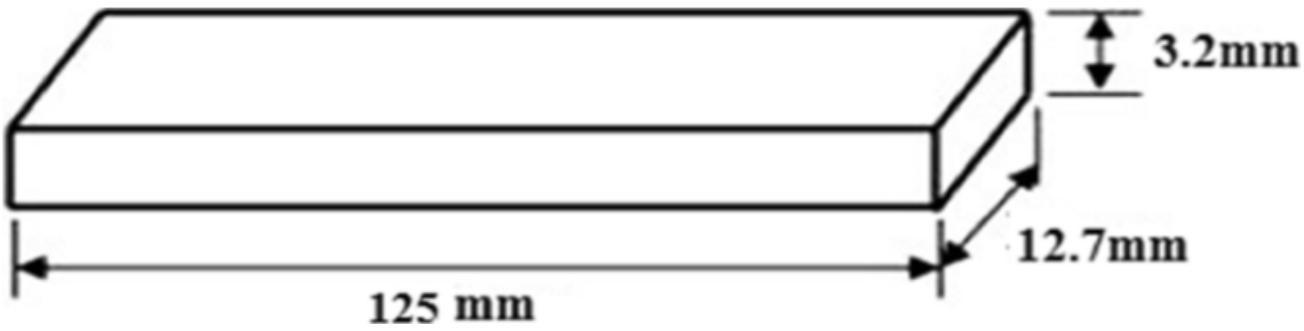
Όπου F είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη , A_0 η αρχική διατομή, L_0 το αρχικό μήκος μετρικής περιοχής ενώ ο λόγος $\frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$ αντιπροσωπεύει τις μεταβολές της τάσης και της παραμόρφωσης εντός της γραμμικής ελαστικής περιοχής. Τα αποτελέσματα πρέπει να παρουσιάζονται σε μέση τιμή και τυπική απόκλιση για τουλάχιστον 5 δοκίμια ανά συνθήκη, ενώ δοκίμια που σπάνε εκτός της μετρητικής περιοχής απορρίπτονται.

3.1.2 Πρότυπο ASTM D790 – Δοκίμιο κάμψης

Το πρότυπο ASTM D790 καθορίζει τη μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής σε κάμψη και του μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη ενισχυμένων και μη ενισχυμένων πλαστικών, σύνθετων υλικών με υψηλό μέτρο ελαστικότητας, θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων υλικών καθώς και υλικών ηλεκτρικής μόνωσης . Το δοκίμιο ASTM 790 χρησιμοποιείται για να ελέγξει και να μετρήσει πόσο ισχυρό ή άκαμπτο είναι ένα υλικό. Η δοκιμή βασίζεται στη φόρτιση του δείγματος σε τρία σημεία, δύο στηρίξεις και ένα σημείο εφαρμογής δύναμης στο μέσο του δείγματος.

Το δοκίμιο έχει ορθογώνια διατομή με καθορισμένες διαστάσεις μήκους, πλάτους και πάχους. Οι διαστάσεις που ορίζει το πρότυπο είναι οι εξής:

- Πλάτος: 12.7 mm
- Πάχος: 3.2 mm
- Μήκος: ≥ 60 mm

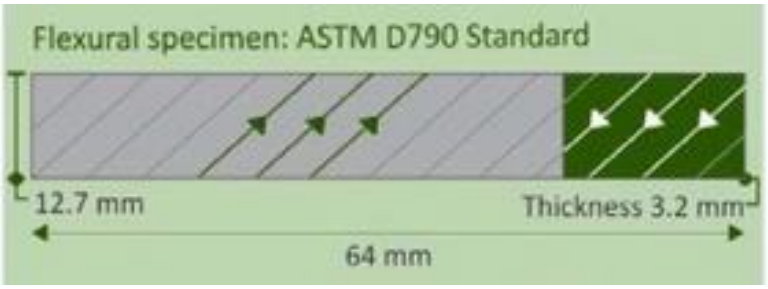


Σχήμα 3.1.2.1 *Διαστάσεις δείγματος, ASTM D790*

Οι βασικές διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη αναφέρονται στον πίνακα 3.1.2.1 και στο σχήμα 3.1.2.2:

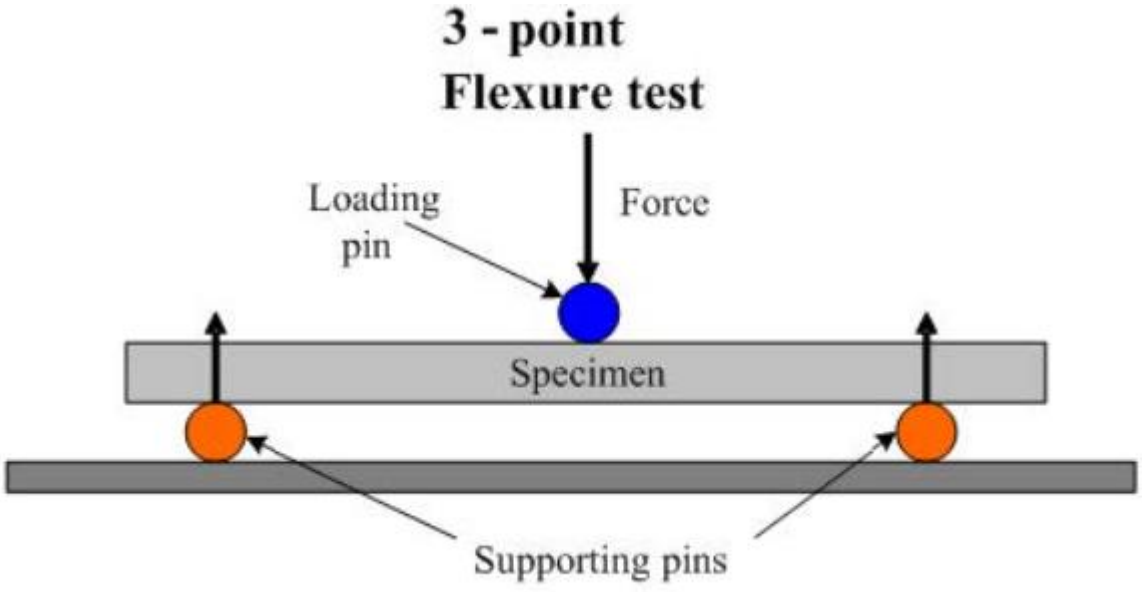
Παράμετρος	Τιμή (mm)
Μήκος	65
Πλάτος	12.7
Πάχος	3.2

Πίνακας 3.1.2.1 *Διαστάσεις δοκιμίου ASTM D790*



Σχήμα 3.1.2.2 *Διαστάσεις δοκιμίου ASTM D790*

Κατά την πειραματική διαδικασία το δείγμα στηρίζεται σε δύο σημεία, και η δύναμη εφαρμόζεται κατακόρυφα στο μέσο του δοκιμίου μέσω κυλινδρικής κεφαλής φόρτισης. Η ταχύτητα φόρτισης δεν είναι σταθερή για όλα τα δείγματα αλλά υπολογίζεται ως συνάρτηση των διαστάσεων ώστε να διατηρείται ένας σταθερός ρυθμός παραμόρφωσης. Αυτό εξασφαλίζει ότι η θραύση θα συμβεί εντός ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος.



Σχήμα 3.1.2.3 *Δοκιμή κάμψης τριών σημείων*

Το πρότυπο επιτρέπει δύο τρόπους μέτρησης της παραμόρφωσης:

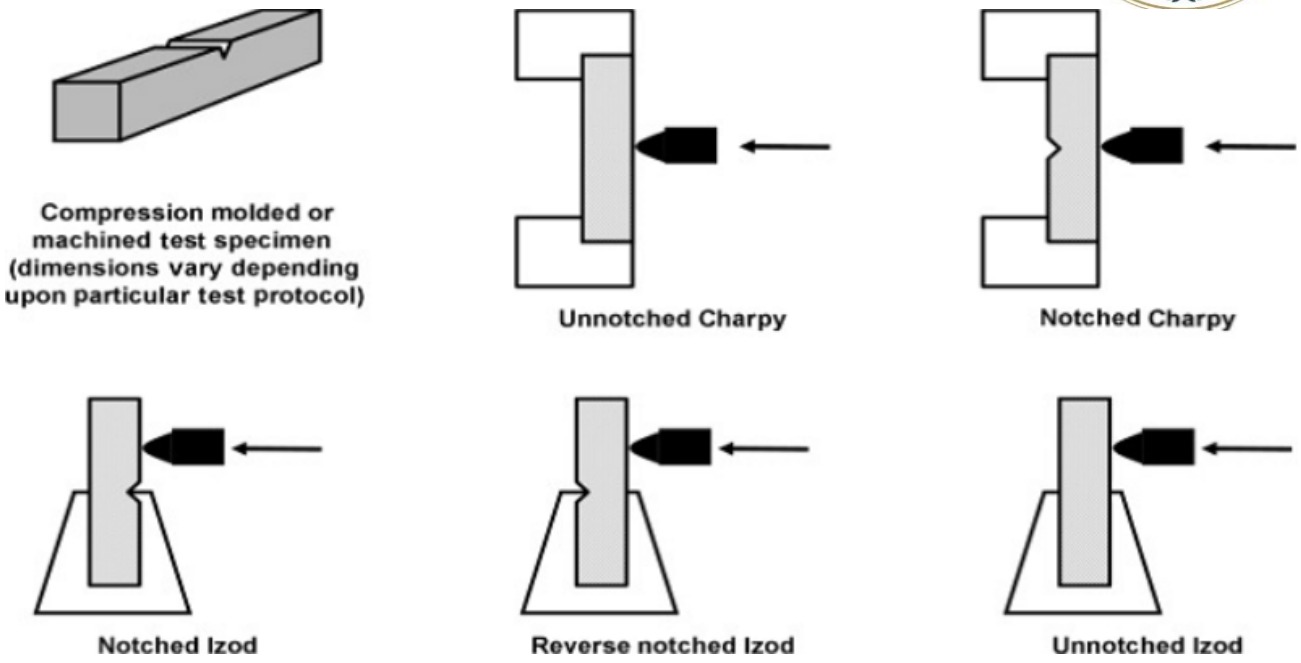
- **Μέσω της διαδρομής της διατμητικής κεφαλής**, η οποία δίνει εκτίμηση της παραμόρφωσης στο μέσο του δοκιμίου.
- **Μέσω εξωτερικού αισθητήρα (deflectometer ή extensometer)**, ο οποίος τοποθετείται απευθείας στο δείγμα για ακριβότερη μέτρηση της εκτροπής.
- Η συγκεκριμένη διάταξη μέτρησης πρέπει να δηλώνεται ρητά στα αποτελέσματα και στο πρωτόκολλο δοκιμής.
- Η συγκεκριμένη διάταξη μέτρησης πρέπει να δηλώνεται ρητά στα αποτελέσματα και στο πρωτόκολλο δοκιμής.

Το πρότυπο ASTM 790 χρησιμοποιείται επίσης για τον προσδιορισμό διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων. Συγκεκριμένα:

- **Μέτρο τέμνουσας:** Η κλίση που βρίσκεται μεταξύ της αρχής των αξόνων και ενός προκαθορισμένου σημείου στην καμπύλη παραμόρφωσης φορτίου.
- **Μέτρο ελαστικότητας χορδής:** Η κλίση μεταξύ δύο σημείων στην καμπύλη παραμόρφωσης φορτίου.
- **Αντοχή σε κάμψη:** Η μέγιστη τάση κάμψης η οποία επιτυγχάνεται κατά την δοκιμή κάμψης.
- **Μέτρο εφαπτομένης (μέτρο κάμψης):** Η κλίση του αρχικού γραμμικού τμήματος της καμπύλης παραμόρφωσης φορτίου και αποτελεί μέτρηση της ακαμψίας του υλικού.
- **Κάμψη κατά την θραύση:** Η περίπτωση κατά την οποία ένα δείγμα σπάει κατά την διάρκεια μίας δοκιμής σε κάμψη πριν από το όριο διαρροής, επομένως η αντοχή σε κάμψη ισούται με την κάμψη κατά την θραύση.

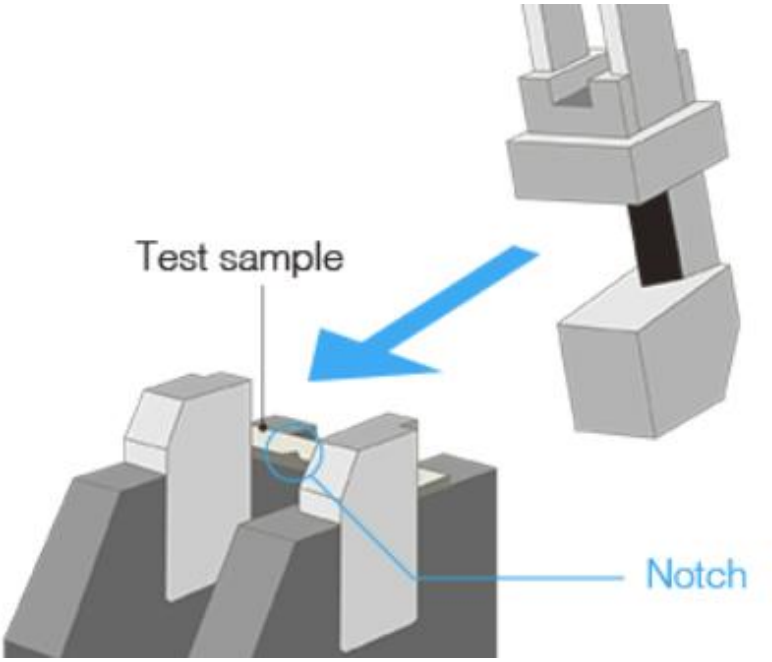
3.1.3 Πρότυπο ASTM D6110-Δοκιμή κρούσης Charpy

Η δοκιμή κρούσης αποτελεί μέθοδος κατά την οποία αξιολογείται η συμπεριφορά των υλικών υπό δυναμική φόρτιση. Σε αντίθεση με τις στατικές δοκιμές (εφελκυσμός, κάμψη), οι δοκιμές κρούσης προσομοιώνουν συνθήκες πραγματικών εφαρμογών καθώς μετρούν την ενέργεια για την θραύση τυποποιημένου δοκιμίου επί του οποίου ασκείται κρουστικό φορτίο. Εάν ένα υλικό έχει την ικανότητα να απορροφά ενέργεια πριν από την θραύση, σημαίνει πως έχει υψηλή ανθεκτικότητα γεγονός που σχετίζεται με την αξιοπιστία λειτουργικών εξαρτημάτων.



Σχήμα 3.1.3.1 *Μέθοδοι δοκιμής κρούσης Charpy και Izod με και χωρίς εγκοπή δοκιμίου*

Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε το πρότυπο ASTM D6110 το οποίο καθορίζει μία τυποποιημένη μέθοδο δοκιμής κρούσης τύπου Charpy για τον προσδιορισμό αντοχής πολυμερών υλικών. Η δοκιμή κρούσης Charpy βασίζεται στην αρχή μετατροπής της κινητικής ενέργειας του εκκρεμούς σε ενέργεια θραύσης του δείγματος. Κατά την πειραματική διαδικασία ένα σφυρί εκκρεμούς ταλαντεύεται προς τα κάτω με δεδομένο αρχικό ύψος και προσκρούει ένα δείγμα με εγκοπή V. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο τοποθετείται στις στηρίξεις που βρίσκονται στα δύο άκρα και το εκκρεμές κρούσης προσπίπτει στο κέντρο του δείγματος στην πλευρά αντίθετα από την εγκοπής, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.3.2.



Σχήμα 3.1.3.2 *Απεικόνιση της δοκιμής κρούσης Charpy*

Το δοκίμιο που χρησιμοποιείται στην δοκιμή ASTM D6110 έχει ορθογωνική μορφή και φέρει εγκοπή τύπου V στην μία του πλευρά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η εγκοπή αυτή λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης τάσεων, γεγονός που εξασφαλίζει ότι η θραύση θα εκκινήσει από αυτό το σημείο. Οι τυποποιημένες διαστάσεις του δείγματος αναφέρονται στον πίνακα 3.1.3.1.

Πρότυπο	**Μήκος L (mm)**	**Πλάτος b (mm)**	**Πάχος h (mm)**	**Πλάτος έως την άκρη της εγκοπής hN(mm)**
ASTM	124,5-127	12,7±0,15	3,0-12,7	10,16±0,05

Πίνακας 3.1.3.1 *Τυποποιημένες διαστάσεις δοκιμίου ASTM D6110*

Οι διαστάσεις του δοκιμίου που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (3.1.3.2).

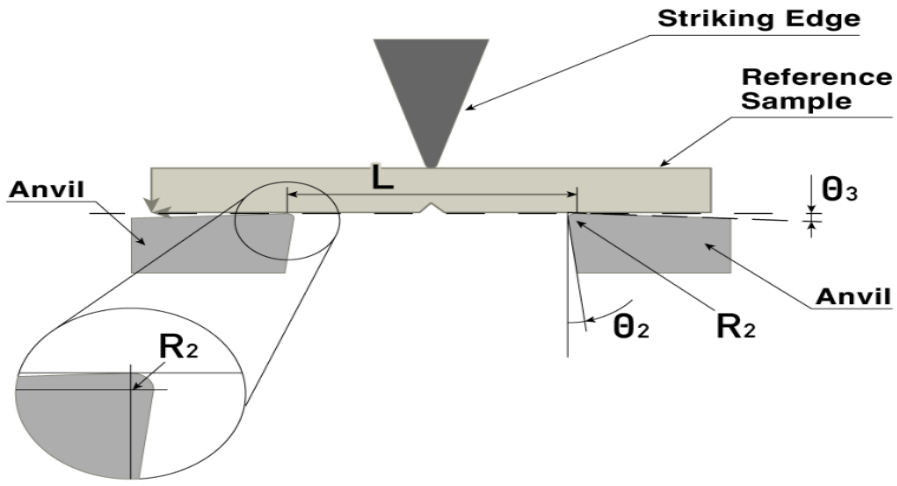
Πρότυπο	**Μήκος L (mm)**	**Πλάτος b (mm)**	**Πάχος h (mm)**	**Πλάτος έως την άκρη της εγκοπής hN(mm**
ASTM	126	12,7	5	10,2

Πίνακας 3.1.3.2 *Διαστάσεις δοκιμίου ASTM D6110 που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία*

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι, οι μέθοδοι δοκιμών καθώς και οι μηχανές δοκιμών που χρησιμοποιούνται κατά την κρούση Charpy έχουν τυποποιηθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), την Ιαπωνική Επιτροπή Βιομηχανικών Προτύπων (JISC) και την Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών Υλικών (ASTM). Στους παρακάτω πίνακες 3.1.3.3 και 3.1.3.4 αναφέρονται οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι στηρίξεις του δοκιμίου και το εκκρεμές αντίστοιχα.

Σύμβολο	**Παράμετρος**	**ASTM**
R2	Ακτίνα καμπυλότητας αμονιών (mm)	3,17±0,12
Θ2	Γωνία κωνικότητας αμονιών (°)	0
Θ3	Γωνία κλίσης αμονιών (°)	0
-	Γωνία στηριγμάτων και ακμόνων (°)	90
L	Άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων (mm)	101,6±0,5

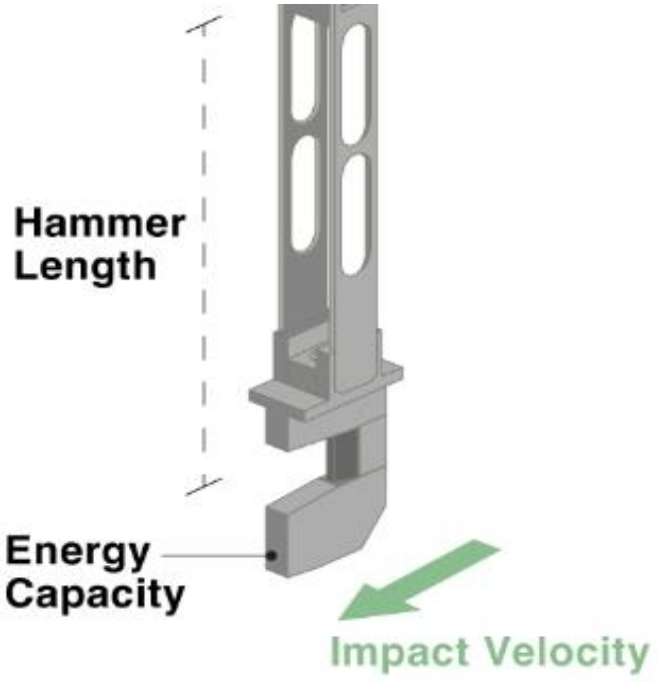
Πίνακας 3.1.3.3 *Προδιαγραφές των στηρίξεων για την δοκιμή Charpy*



Σχήμα 3.1.3.3 *Απεικόνιση της γεωμετρίας στηρίξεων και ακμών στην δοκιμή Charpy σύμφωνα με ASTM*

Πρότυπο	Δυναμική ενέργεια (J)	Ταχύτητα κρούσης (m/s)	Γωνία κρούσης (°)	Ακτίνα της ακμής κρούσης (mm)
ASTM	2,7-21,7	3,46	45±2	3,17±0,12

Πίνακας 3.1.3.4 *Προδιαγραφές του εκκρεμούς με το οποίο πραγματοποιείται μία δοκιμή κρούσης*

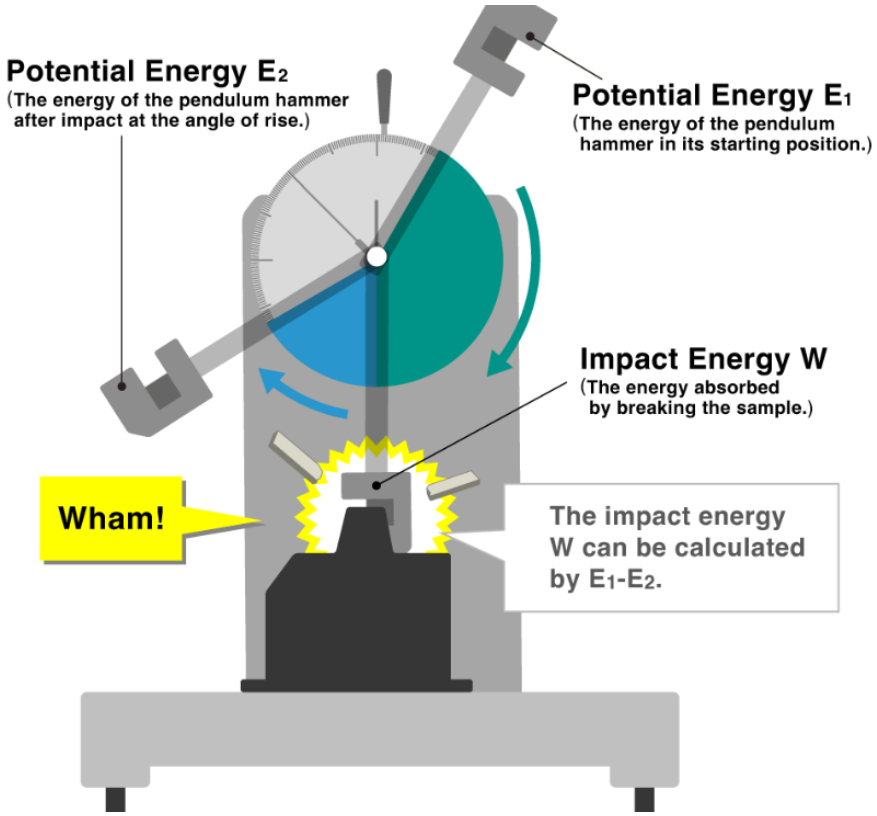


Σχήμα 3.1.3.4 *Χαρακτηριστικά εκκρεμούς που χρησιμοποιείται στην δοκιμή κρούσης Charpy*

Η ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωση ή την θραύση του δοκιμίου μετριέται με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής του στην κρούση. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή σε κρούση, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση της ενέργειας κατά την κρούση. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, τα υλικά που θα απορροφήσουν το μεγαλύτερο μέρος ενέργειας είναι πιο ανθεκτικά και έχουν την δυνατότητα να αντέξουν σε μεγαλύτερες κρούσεις.

Η ενέργεια κρούσης είναι η διαφορά μεταξύ της αρχικής δυναμικής ενέργειας του εκκρεμούς και της ενέργειας που απομένει μετά την θραύση του δείγματος. Δίνεται από τον τύπο:

$$W = E1 - E2 \tag{3.1.3.1}$$

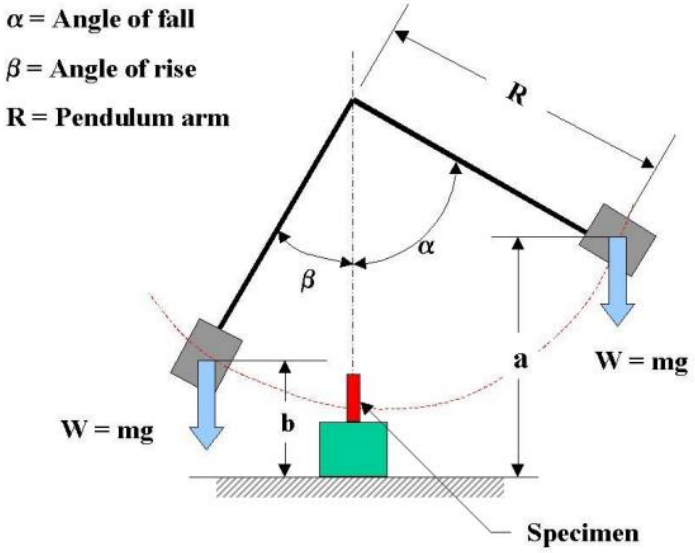


Σχήμα 3.1.3.5 *Σχηματική απεικόνιση της αρχής υπολογισμού της απορροφούμενης ενέργειας, ως διαφορά της αρχικής ενέργειας εκκρεμούς και της υπολειπόμενης ενέργειας μετά την κρούση*

Για να υπολογιστεί η ενέργεια κρούσης θα πρέπει να είναι γνωστή η διαφορά της γωνίας ανύψωσης του εκκρεμούς μετά την κρούση με τη γωνία ανύψωσης του εκκρεμούς όταν δεν υπάρχει το δείγμα δοκιμής. Παράλληλα, είναι βασικό να ληφθεί υπόψη η απώλεια ενέργειας που προκύπτει λόγω της αντίστασης του αέρα και της τριβής στο ρουλεμάν του εκκρεμούς. Με σκοπό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε μία εξίσωση (3.1.3.2) από την οποία υπολογίζεται η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο μετά από διόρθωση απωλειών (τριβές, μηχανικές απώλειες κ.ο.κ.).

$$Wc = WR[(cos\beta - cos\alpha) - (cos\alpha' - cos\alpha)\left(\frac{\alpha+\beta}{\alpha+\alpha'}\right)] \quad (3.1.3.2)$$

Όπου,
Wc= η απορροφούμενη ενέργεια μετά τη διόρθωση (J)
WR= ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής της σφύρας (N · m)
α= γωνία απελευθέρωσης της σφύρας (°)
α'= γωνία απελευθέρωσης της σφύρας (N · m)
β= γωνία ανύψωσης μετά την κρούση (°)



Σχήμα 3.1.3.6 *Απεικόνιση των γεωμετρικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απορροφούμενης ενέργειας μετά τη διόρθωση απωλειών (τριβές κ.ο.κ) [98]*

Εφόσον υπολογιστεί η ενέργεια κρούσης Wc είναι εφικτό να βρεθεί και η αντοχή σε κρούση από την παρακάτω εξίσωση:

$$a = \frac{\mathrm{W}c}{\mathrm{b}h} \times 103 \tag{3.1.3.3}$$

Όπου,
Wc= η απορροφούμενη ενέργεια μετά τη διόρθωση (J)
b= πλάτος δείγματος (mm)
h= πάχος δείγματος (mm)

3.2 Σχεδιασμός δοκιμίων-Fusion 360

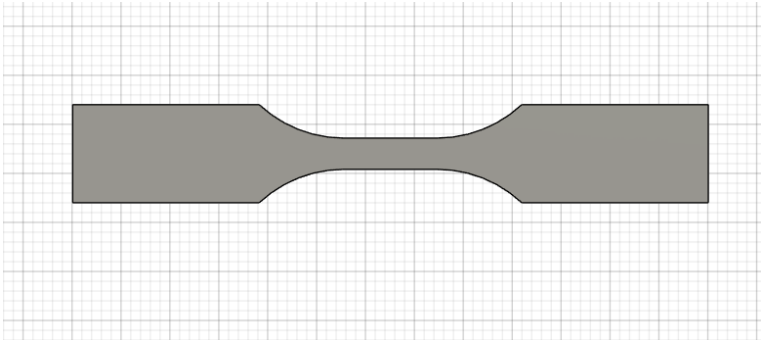
Ο σχεδιασμός των πρότυπων δοκιμίων που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο αποτελεί βασικό παράγοντα της πειραματικής διαδικασίας στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ο σχεδιασμός των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με την χρήση λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης (CAD), το οποίο επιτρέπει την ανάλυση γεωμετρίας με ακρίβεια, το έλεγχο των διαστάσεων καθώς και την εύκολη τροποποίηση των σχεδίων.

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Fusion 360, μία πλατφόρμα λογισμικού τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing), CAE (Computer-Aided Engineering) και PCB (Printed Circuit Board), η οποία αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε από την Autodesk το 2013 [99]. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει ένα περιβάλλον σχεδίασης στερεών μοντέλων, το οποίο βασίζεται σε παραμετρική προσέγγιση, γεγονός που επιτρέπει τον ορισμό βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων, όπως πλάτη, μήκη, πάχη και ακτίνες καμπυλότητας ως μεταβλητές. Κατά αυτό τον τρόπο, υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προτύπων ASTM ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η γεωμετρική συνέπεια μεταξύ των διαφορετικών τύπων δοκιμίων (εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης).

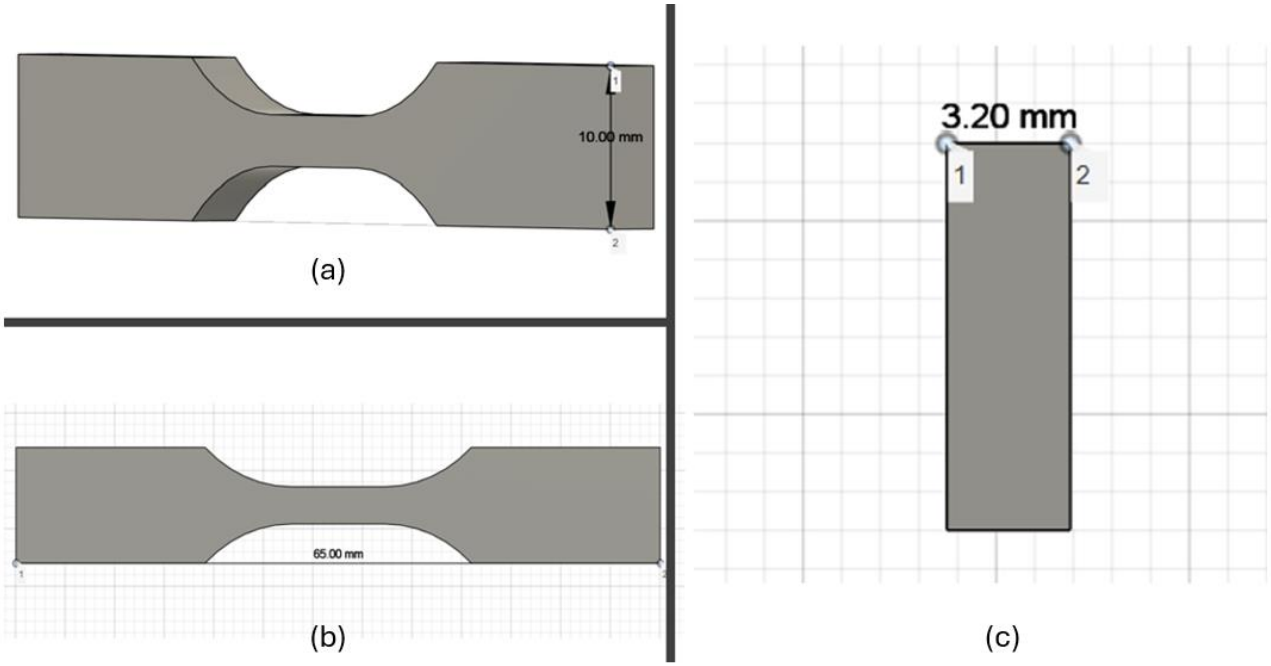
Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα τρισδιάστατα σχέδια των δοκιμίων που πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό Fusion 360, καθώς και οι βασικές τους διαστάσεις οι οποίες ακολουθούν τα πρότυπα δοκιμών που εφαρμόζονται στην εργασία αυτή.

3.2.1 Δοκίμιο εφελκυσμού ASTM D638

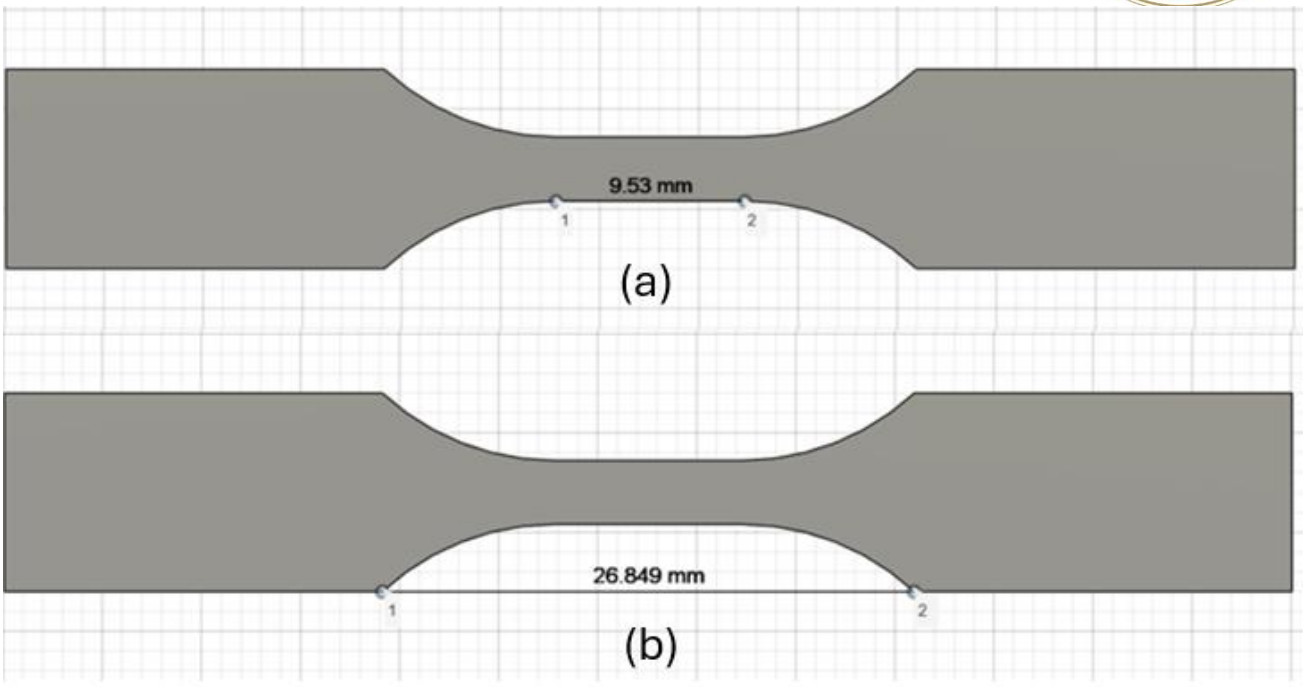
Το δοκίμιο αρχικά σχεδιάστηκε σε δισδιάστατη μορφή, με βάση τις διαστάσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.1.1. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εξώθηση πάχους (extrude), ώστε να προκύψει η τελική τρισδιάστατη γεωμετρία του δείγματος. Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό σχέδιο του δοκιμίου, με όλες τις βασικές διαστάσεις του:



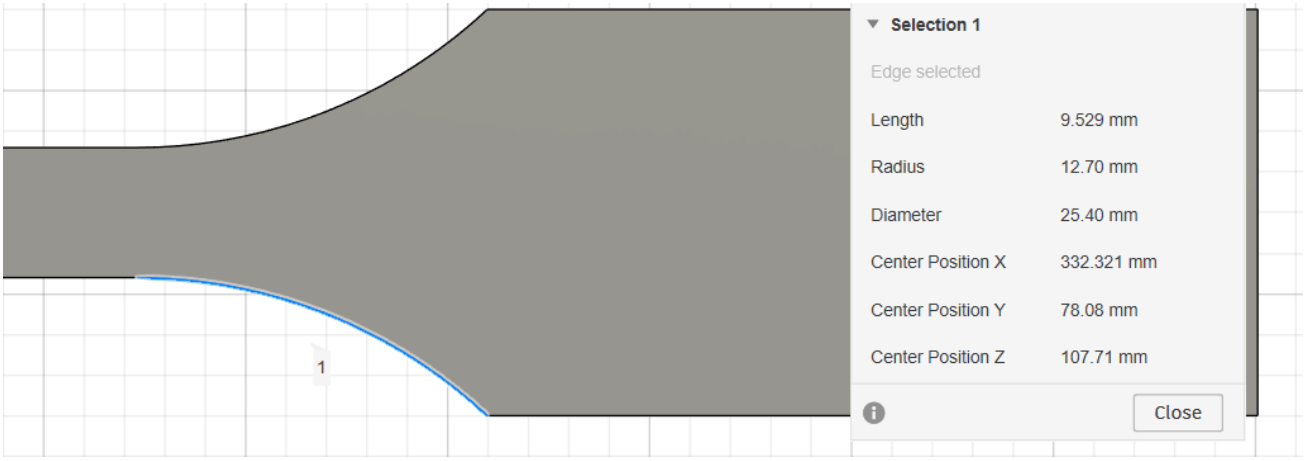
Σχήμα 3.2.1.1 *Τρισδιάσατο σχέδιο δοκιμίου εφελκυσμού τύπου ASTM D638*



Σχήμα 3.2.1.2 *(a) Πλάτος δοκιμίου (10mm), (b)Μήκος δοκιμίου (65mm) και (c) Πάχος δοκιμίου (3,2mm)*



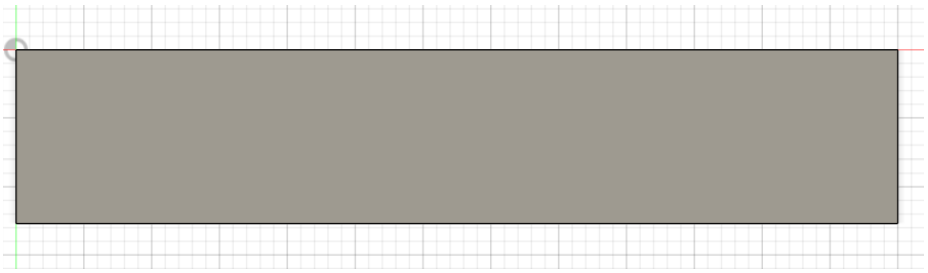
Σχήμα 3.2.1.3 *(a)Μήκος αναφοράς (περιοχή μέτρησης) (9,53mm) και (b)Μήκος μειωμένης διατομής (26,849mm)*



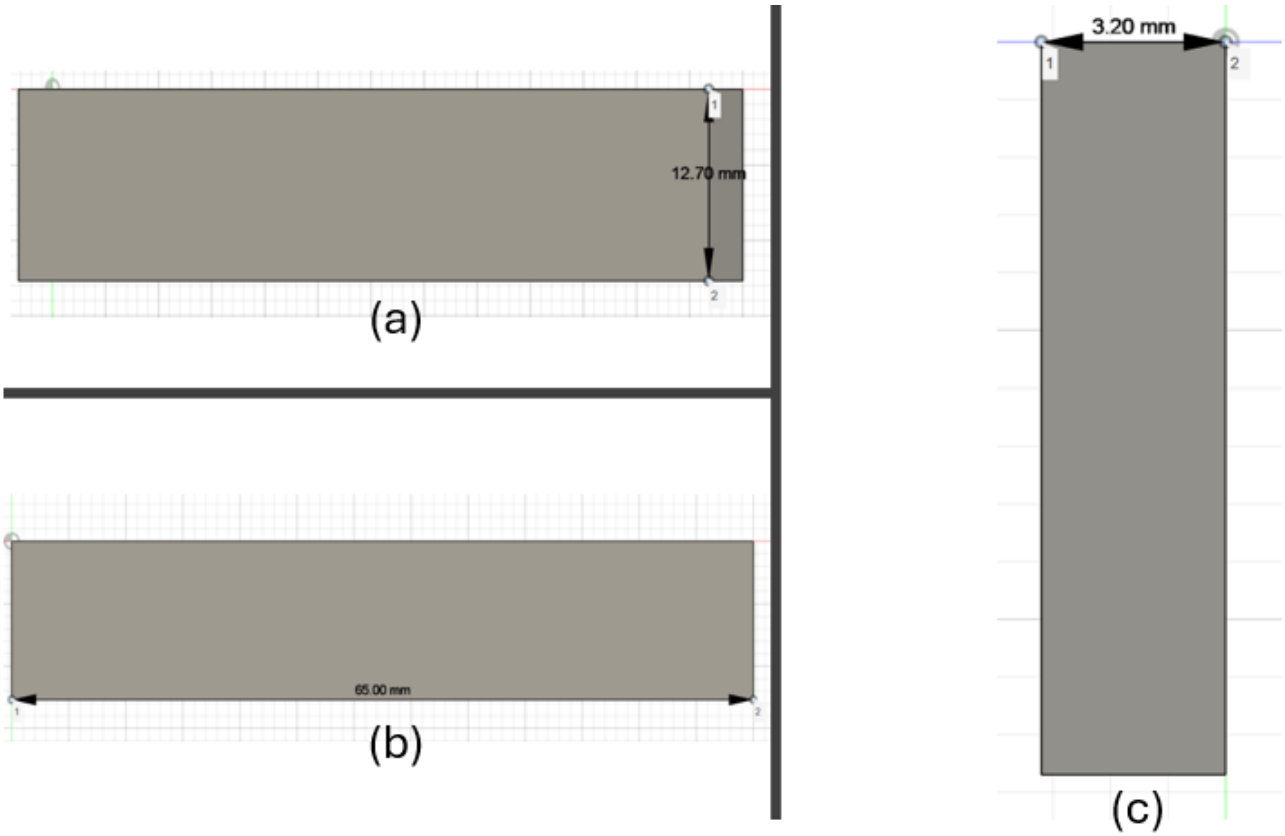
Σχήμα 3.2.1.4 *Ακτίνα καμπυλότητας (12,7mm)*

3.2.2 Δοκίμιο κάμψης ASTM D790

Το δοκίμιο κάμψης αρχικά σχεδιάστηκε σε δισδιάστατη μορφή ως ένα παραλληλόγραμμο με τις διαστάσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.1.2. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εξώθηση πάχους ώστε να ολοκληρωθεί το τρισδιάστατο δοκίμιο. Παρακάτω φαίνονται οι διαστάσεις του τελικού δοκιμίου:



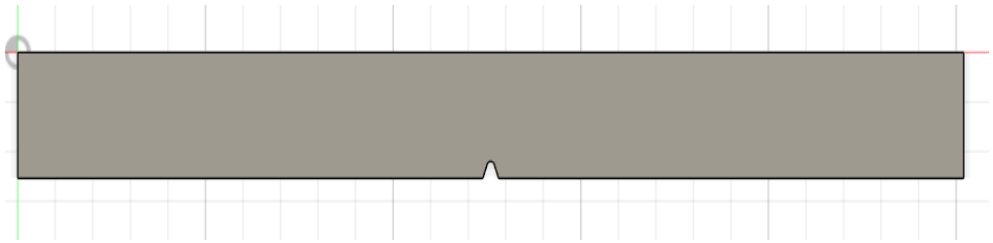
Σχήμα 3.2.2.1 *Τρισδιάστατο σχέδιο δοκιμίου κάμψης τύπου ASTM D790*



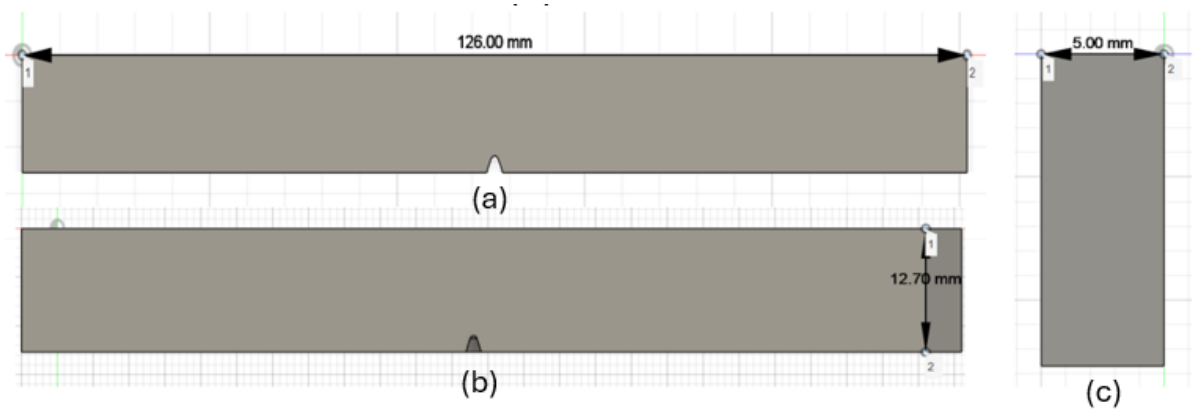
Σχήμα 3.2.2.2 *(a)Πλάτος δοκιμίου (12,7mm), (b)Μήκος δοκιμίου (65mm) και (c)Πάχος δοκιμίου (3,2mm)*

3.2.3 Δοκίμιο κρούσης ASTM D6110

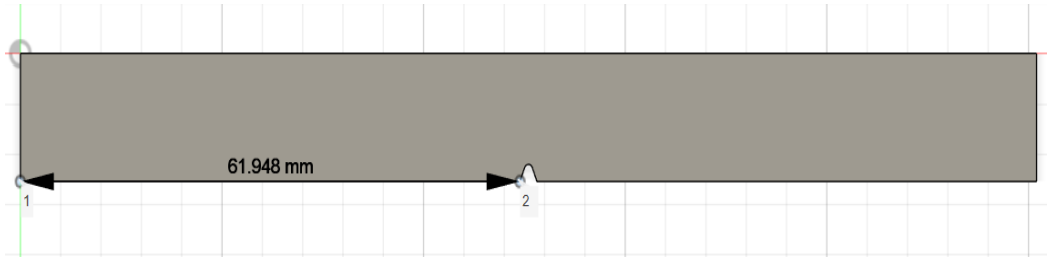
Ομοίως με το δοκίμιο κάμψης σχεδιάστηκε και το δοκίμιο κρούσης σε δισδιάστατη μορφή συμπεριλαμβανομένης και της εγκοπής V. Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στην ενότητα 3.1.3. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η εγκοπή τοποθετήθηκε στο μέσο του δοκιμίου και σε πλευρά αντίθετη από την διεύθυνση της κρούσης με γωνία 45° και βάθος 1.7mm.



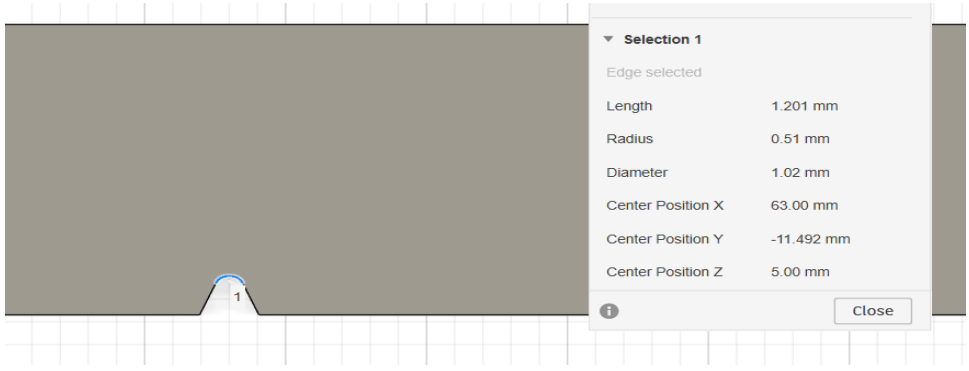
Σχήμα 3.2.3.1 *Τρισδιάστατο σχέδιο δοκιμίου κρούσης τύπου ASTM D6110*



Σχήμα 3.2.3.2 *(a) Μήκος δοκιμίου (126mm) , (b) Πλάτος δοκιμίου (12,7mm) και (c) Πάχος δοκιμίου (5mm)*



Σχήμα 3.2.3.3 *Μήκος έως την εγκοπή (61,948mm)*



Σχήμα 3.2.3.4 *Ακτίνα καμπυλότητας εγκοπής (0,51mm)*

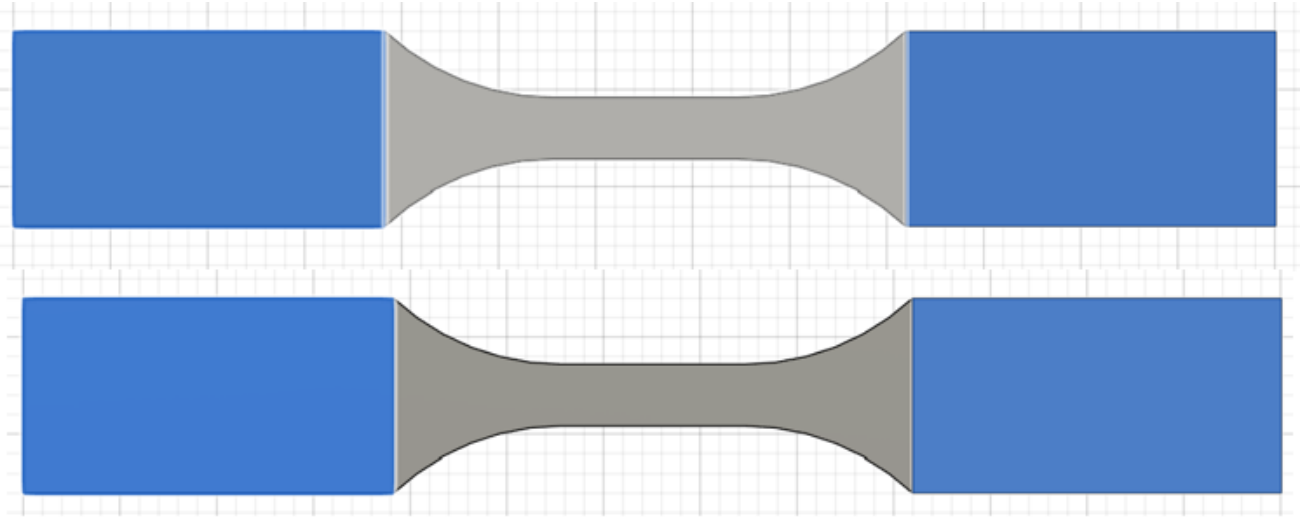
3.3 Ορισμός περιοχών εφαρμογής φορτίων και συνοριακών συνθηκών

Μετά τον σχεδιασμό τον δοκιμίων και πριν την ενσωμάτωση πλεγματικών δομών στο εσωτερικό τους, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία της γεωμετρίας των δοκιμίων στο λογισμικό Fusion 360. Συγκεκριμένα,

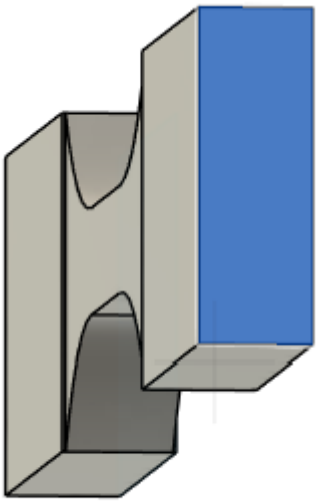
σχεδιάστηκαν διακριτές επιφάνειες στα σημεία όπου κατά την πειραματική διαδικασία τα δοκίμια δέχονται φορτίο καθώς και τα σημεία όπου παραμένουν πακτωμένα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε ώστε να μπορεί το λογισμικό n-topology που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση αργότερα, να αναγνωρίσει τις επιφάνειες αυτές ως ξεχωριστά τμήματα και να μην εφαρμοστούν τα φορτία και οι περιορισμοί σε όλο το δοκίμιο.

3.3.1 Δοκίμιο εφελκυσμού - Ορισμός συνοριακών συνθηκών

Στον δοκίμιο εφελκυσμού χρειάστηκε να σχεδιαστούν τέσσερις επιφάνειες, δύο από κάθε πλευρά στα σημεία που συγκρατείται το δοκίμιο κατά την δοκιμή του. Οι επιφάνειες αυτές, ήταν απαραίτητες για τον ορισμό της πάκτωσης κατά την προσομοίωση. Επιπλέον, δημιουργήθηκε μία ακόμα επιφάνεια στο πάνω μέρος του δοκιμίου, στο σημείο δηλαδή που δέχεται φόρτιση.



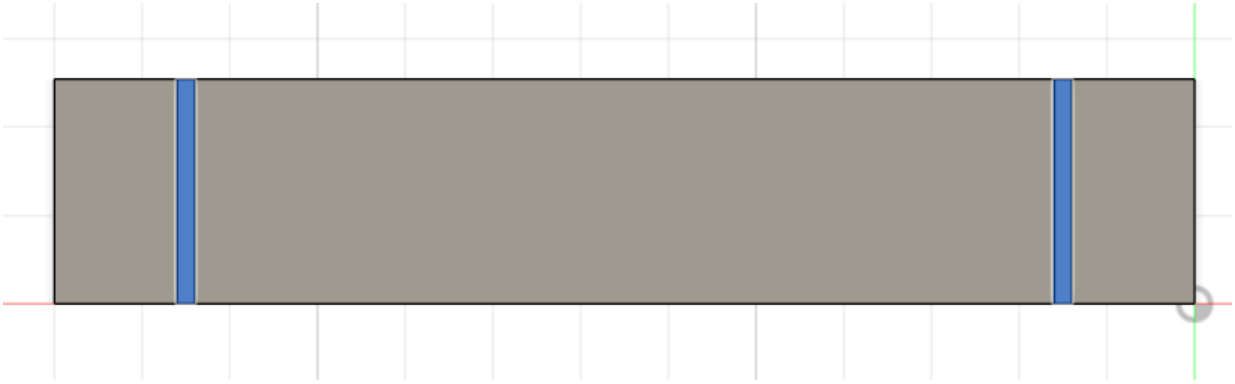
Σχήμα 3.3.1.1 *Επιφάνειες που σχεδιάστηκαν και από τις δύο πλευρές για τον ορισμό της πάκτωσης*



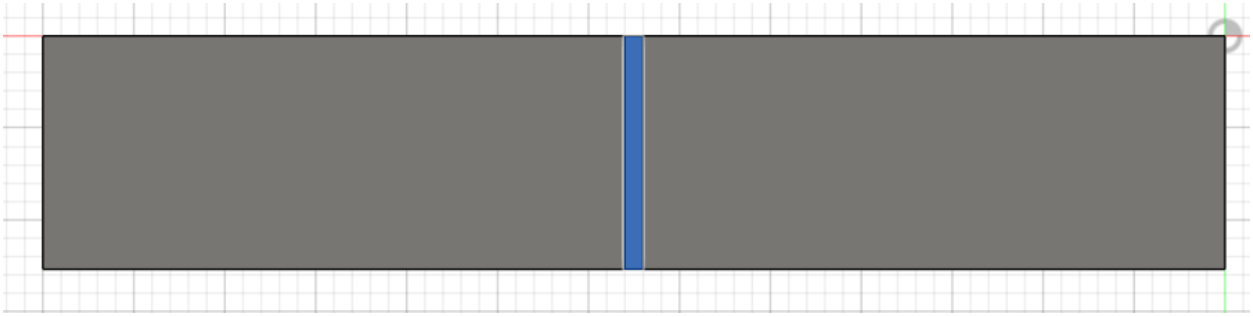
Σχήμα 3.3.1.2 *Σχεδιασμός επιφάνειας που δέχεται φόρτιση κατά την δοκιμή*

3.3.2 Δοκίμιο κάμψης - Ορισμός συνοριακών συνθηκών

Κατά την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο κάμψης στηρίζεται σε δύο σημεία, τα οποία και σχεδιάστηκαν στο κάτω μέρος του δείγματος έτσι ώστε να μπορούν να επιλεχθούν ως σημεία πάκτωσης. Επιπλέον, σχεδιάστηκε μία ακόμη επιφάνεια στο μέσο της επάνω πλευράς, το οποίο υποδεικνύει το σημείο που ασκείται φόρτιση μέσω της κυλινδρικής κεφαλής κατά την δοκιμή.



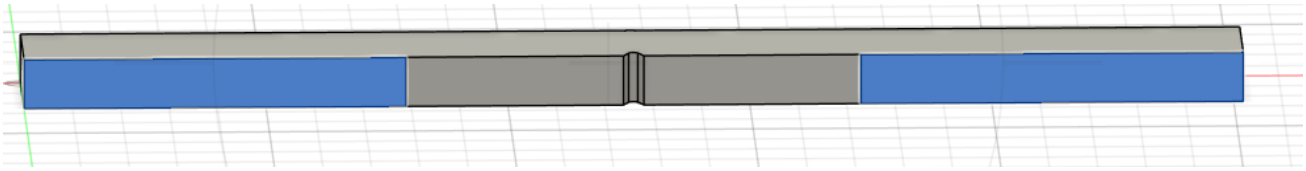
Σχήμα 3.3.2.1 *Σχεδιασμός επιφανειών πάκτωσης*



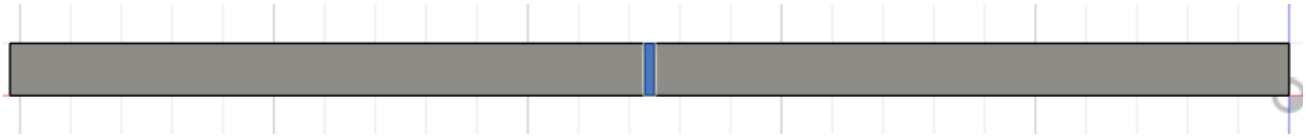
Σχήμα 3.3.2.2 *Ορισμός επιφάνειας που δέχεται φόρτιση*

3.3.3 Δοκίμιο κρούσης - Ορισμός συνοριακών συνθηκών

Στο δοκίμιο κρούσης χρειάστηκε να ορίσουμε τις δύο επιφάνειες οι οποίες τοποθετούνται στις στηρίξεις, ώστε να οριστεί η πάκτωση. Επίσης, σχεδιάστηκε και η επιφάνεια στην οποία ασκεί δύναμη το εκκρεμές, η οποία βρίσκεται στο μέσο της επιφάνειας αντίθετα από την εγκοπή.



Σχήμα 3.3.3.1 *Σχεδιασμός επιφανειών που τοποθετούνται στις στηρίξεις*



Σχήμα 3.3.3.2 *Σχεδιασμός επιφάνειας που δέχεται κρουστικό φορτίο*

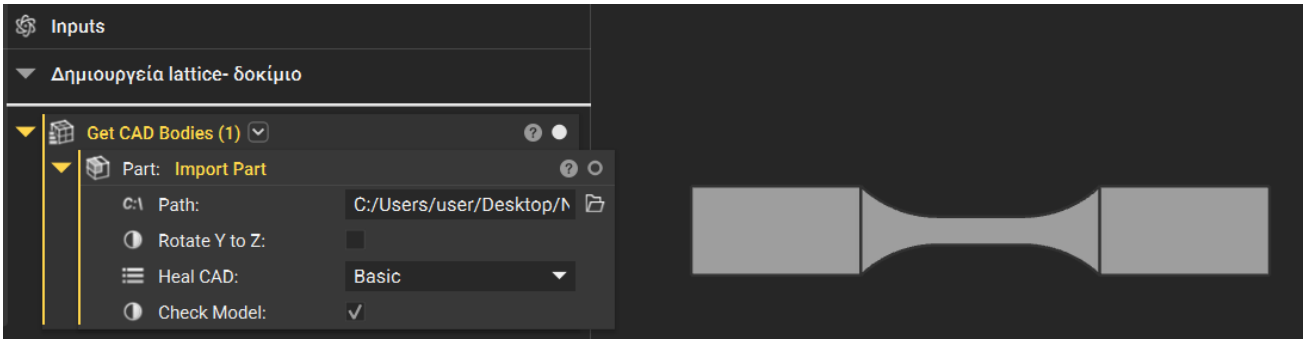
3.4 Ενσωμάτωση πλεγματικών δομών στο εσωτερικό δοκιμίων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα τελικά δοκίμια με ενσωματωμένες τρεις δομές TPMS στο εσωτερικό τους. Οι δομές που επιλέχθηκαν είναι η Gyroid, η Diamond και η Split-P και η διαδικασία ενσωμάτωσης πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό n-topology. Το συγκεκριμένο λογισμικό επιλέχθηκε για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, καθώς δίνει την δυνατότητα εφαρμογής σύνθετων δομών, οι οποίες είναι δύσκολο να σχεδιαστούν με συμβατικές τεχνικές CAD.

3.4.1 Βήματα ενσωμάτωσης πλεγματικών δομών σε δοκίμιο εφελκυσμού

1. **Εισαγωγή αρχείου CAD στο n-topology**

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή του γεωμετρικού μοντέλου του δοκιμίου εφελκυσμού σε μορφή STEP, μέσω της εντολής Import Part. Στην συνέχεια, το block αυτό εισήχθη στο Get CAD Bodies, ώστε να μπορεί να γίνει αναγνώριση του μοντέλου ως σώμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί κατά την παραμετρική διαδικασία. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4.1.1 ο έλεγχος μοντέλου (Check Model) είναι ενεργοποιημένος ώστε να υπάρχει η επιβεβαίωση ότι η γεωμετρία δεν παρουσιάζει κάποιο σφάλμα.

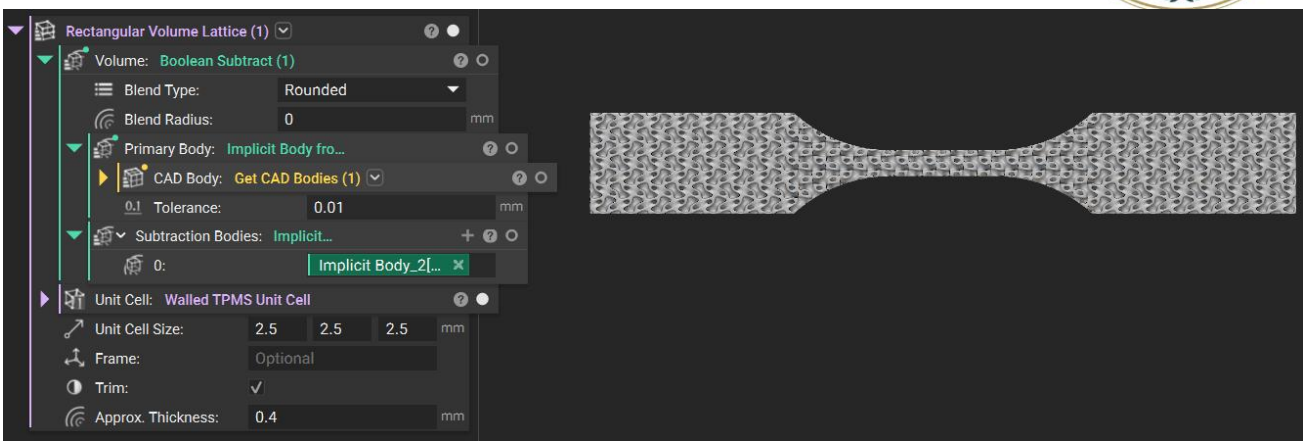


Σχήμα 3.4.1.1 *Εισαγωγή CAD αρχείου στο λογισμικό n-topology και απεικόνιση του συμπαγούς δοκιμίου που σχεδιάστηκε στο λογισμικό Fusion 360*

2. **Δημιουργία πλεγματικής δομής**

Στην συνέχεια, έγινε προσθήκη του block Rectangular Volume Lattice, το οποίο δημιουργεί ένα πλέγμα που γεμίζει πλήρως έναν όγκο σχηματίζοντας ένα κελί μονάδας κατά μήκος ορθογωνίων συντεταγμένων. Απλούστερα, χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός αρχικού ορθογωνικού όγκου (volume) μέσα στον οποίο θα ενσωματωθεί η πλεγματική δομή. Στο πεδίο του volume εισήχθη η εντολή Boolean Subtract, η οποία αφαιρεί τον όγκο έμμεσων σωμάτων (Implicit Bodies) από ένα πρωτεύον σώμα. Για τον λόγο αυτό έγινε μετατροπή του CAD body σε Implicit body from CAD ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύριο σώμα (Primary Body) και να εφαρμοστούν αξιόπιστα οι Boolean λειτουργίες. Επιπλέον, στο πεδίο της ανοχής (tolerance) επιλέχθηκαν τα 0.01 mm με σκοπό την υψηλή ακρίβεια.

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της δομής που θα χρησιμοποιηθεί για την συγκεκριμένη εργασία. Στο πεδίο Unit Cell επιλέχθηκε Walled TPMS Unit Cell και όλες οι δομές που θα χρησιμοποιηθούν ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η δομή Split-P με μέγεθος κυψελίδας 2.5×2.5×2.5 το οποίο είναι κατάλληλο καθώς εξασφαλίζει έναν επαρκή αριθμό επαναλήψεων κυψελίδων. Επιπλέον, ενεργοποιήθηκε η επιλογή Trim, ώστε το πλέγμα να περιορίζεται αυτόματα στα όρια του δοκιμίου. Τέλος, ορίστηκε το πάχος της δομής (Approx. Thickness) 0.4 mm ως ασφαλής επιλογή με μειωμένο κίνδυνο αστοχίας κατά την κατασκευή. Οι ιδιότητες αυτές, είναι ίδιες και για τις τρεις δομές που επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία.

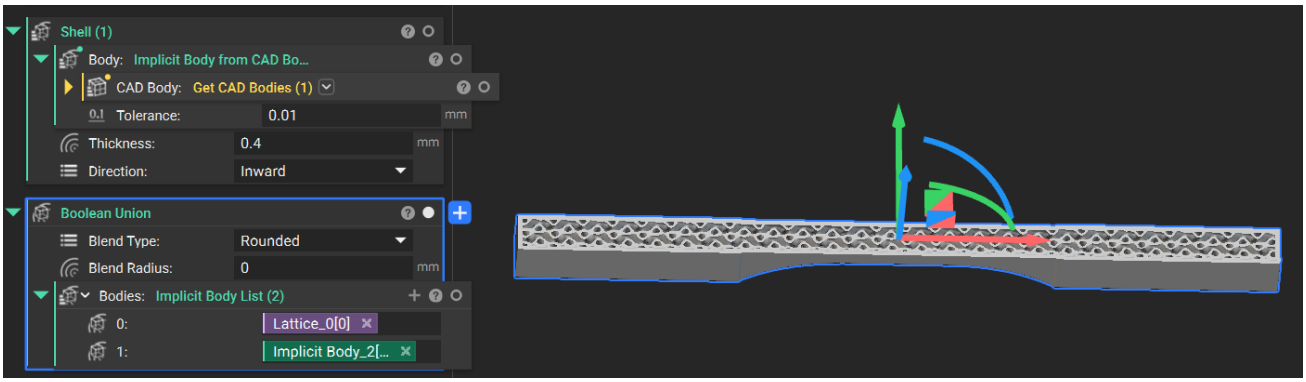


Σχήμα 3.4.1.2 *Δημιουργία πλεγματικών δομών για το εσωτερικό του δοκιμίου με μέγεθος κυψελίδας 2.5×2.5×2.5*

3. Δημιουργία κελύφους και ένωση με την δομή πλέγματος

Εφόσον δημιουργήθηκε η πλεγματική δομή, το επόμενο στάδιο είναι να δημιουργηθεί και το κέλυφος (Shell) από το οποίο θα περιβάλλεται. Για το εξωτερικό συμπαγές περίβλημα εισήχθη το block Shell, στο οποίο ως body επιλέχθηκε το Implicit Body from CAD body με την ίδια τιμή Tolerance που χρησιμοποιήθηκε και σε προηγούμενο στάδιο. Επίσης, το πάχος του κελύφους ορίστηκε 0.4 mm.

Στην συνέχεια, έγινε ένωση του κελύφους και της πλεγματικής δομής με την εντολή Boolean Union. Στο πεδίο Bodies επιλέχθηκαν τα δύο σώματα (Implicit και Lattice) ώστε να δημιουργηθεί το τελικό δοκίμιο.



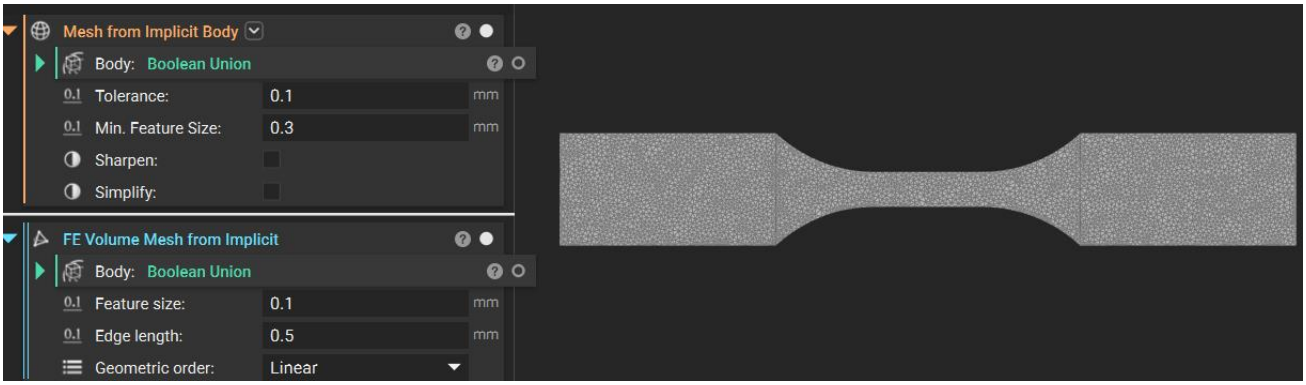
Σχήμα 3.4.1.3 *Ορισμός εξωτερικού κελύφους με πάχος 0.4mm και ενοποίηση του με την εσωτερική πλεγματική δομή*

4. Δημιουργία επιφανειακού πλέγματος Mesh και FE Volume Mesh

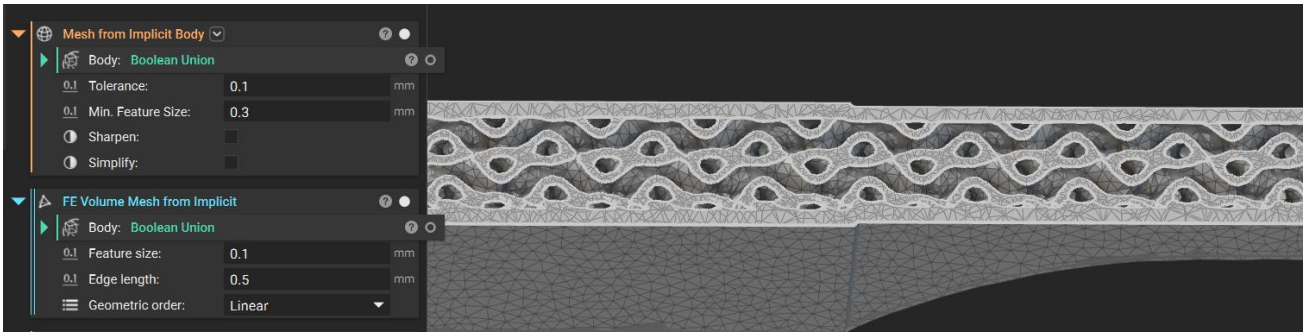
Σε αυτό το στάδιο έγινε μετατροπή του implicit body σε επιφανειακό τριγωνικό πλέγμα (surface mesh), χρησιμοποιώντας την εντολή Mesh from Implicit Body. Με την εντολή αυτή, δημιουργούνται ισχυρά και ανθεκτικά σε σφάλματα πλέγματα για σύνθετες γεωμετρίες. Πρακτικά, το λογισμικό μετατρέπει την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου (κέλυφος), σε μία επιφάνεια αποτελούμενη από μικρά τρίγωνα με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο της τελικής γεωμετρίας. Στο πεδίο του body επιλέχθηκε το ενιαίο σώμα που δημιουργήθηκε με την εντολή Boolean Union, ενώ το tolerance ορίστηκε 0.1 mm για μεγαλύτερη ακρίβεια και περισσότερα τρίγωνα. Επίσης, το ελάχιστο μέγεθος χαρακτηριστικού (Min. Feature Size) ορίστηκε 0.3 mm με σκοπό να εκτελεί ένα βήμα φιλτραρίσματος για να αφαιρέσει τυχόν χαρακτηριστικά ή οπές μικρότερες από την παρεχόμενη είσοδο.

Στην συνέχεια, έγινε εισαγωγή του block FE (Finite Element) Volume Mesh From Implicit, το οποίο δημιουργεί ογκομετρικό πλέγμα σε ολόκληρο το σώμα. Στην ουσία, χωρίζει τον όγκο σε πολλά μικρά στοιχεία και είναι απαραίτητο βήμα για να γίνει μετέπειτα προσομοίωση ή βελτιστοποίηση. Ως κύριο σώμα χρησιμοποιήθηκε ξανά το ενιαίο σώμα και στο πεδίο feature size επιλέχθηκε η τιμή 0.1 mm η οποία ορίζει την ικανότητα του πλέγματος να λαμβάνει υπόψη ακόμα και τις μικρές γεωμετρικές λεπτομέρειες. Επίσης η τιμή

του μήκους άκρου (Edge length) ορίστηκε 0.5 mm ενώ επιλέχθηκαν γραμμικά στοιχεία (Linear) ως μία πιο απλή και υπολογιστικά οικονομική επιλογή.



Σχήμα 3.4.1.4 *Δημιουργία επιφανειακού πλέγματος (Mesh)*

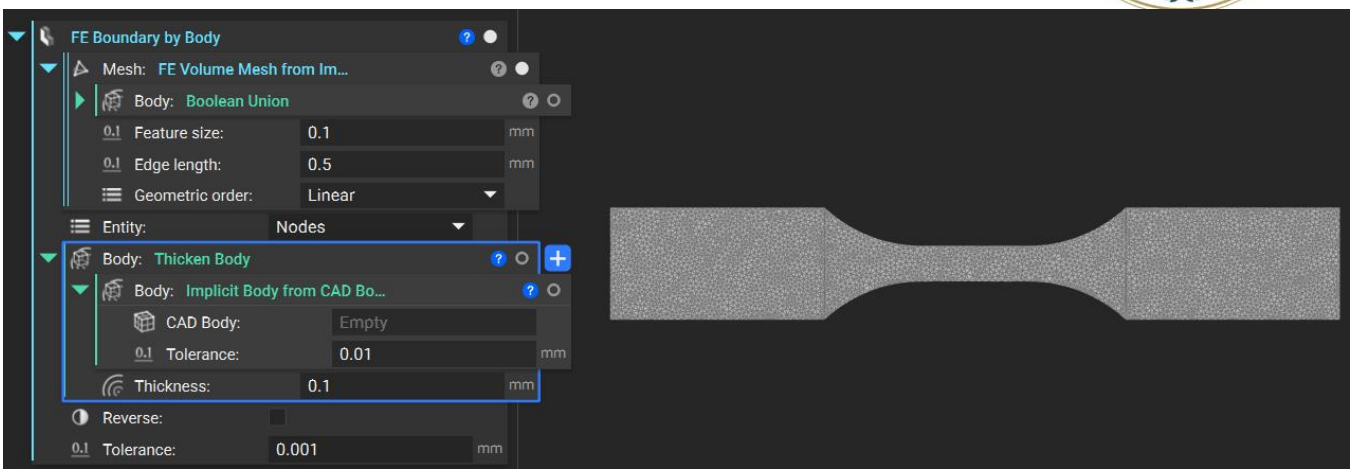


Σχήμα 3.4.1.5 *Απεικόνιση ογκομετρικού πλέγματος (FE Volume Mesh)*

5. Ορισμός οριακών σημείων

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε ορισμός ενός συνόλου οριακών σημείων (κόμβων) ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν σε επόμενο βήμα οι οριακές συνθήκες της ανάλυσης στα άκρα του δοκιμίου. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το block FE Boundary by Body και στο πεδίο του Mesh εισήχθη το FE Volume Mesh που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη καθώς το FE Boundary by Body επιλέγει οντότητες (κόμβους, ακμές κ.ο.κ) ενός FE Mesh πάνω στο οποίο θα εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες. Στην προκειμένη περίπτωση στον τύπο οντότητας (Entity) επιλέχθηκαν οι κόμβοι (nodes) λόγω πρακτικής εφαρμογής.

Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα βοηθητικό σώμα (Thicken Body) που εισήχθη στο πεδίο του Body με είσοδο ένα Implicit Body from CAD και ανοχή 0.01 mm. Με το πάχος το οποίο ορίστηκε 0.1 mm δημιουργήθηκε μία λεπτή ζώνη ώστε να γίνει σταθερή αντιστοίχιση σημείων στο boundary. Σκοπός του Thicken Body είναι να αποτρέψει την επιλογή κόμβων «με το χέρι» και να δώσει την δυνατότητα στο λογισμικό να εντοπίσει τους κόμβους που βρίσκονται εντός της ζώνης αυτής. Τέλος, ορίστηκε η τιμή tolerance 0.001 mm, καθώς όσο πιο μικρή είναι η τιμή τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασφάλιση ότι οι κόμβοι που θα επιλεχθούν θα αντιστοιχούν στην επιθυμητή επιλογή.



Σχήμα 3.4.1.7 *Ορισμός ενός συνόλου οριακών σημείων και δημιουργία βοηθητικού σώματος Thicken Body*

6. Δημιουργία Solid Domain και καθορισμός υλικού

Το τελευταίο βήμα που πραγματοποιήθηκε πριν από την προσομοίωση είναι η δημιουργία του Solid Domain, ενός πεδίου υπολογισμού στο οποίο θα γίνει η ανάλυση. Με την εντολή αυτή, το λογισμικό αντιλαμβάνεται ότι το FE Volume Mesh θα αντιμετωπιστεί ως ένα συμπαγές συνεχές υλικό ώστε να μπορεί να αναλυθεί μηχανικά. Αρχικά, στο πεδίο Mesh εισήχθη το FE Volume Mesh from Implicit καθώς για την ανάλυση στερεού απαιτείται διακριτοποίηση του όγκου και όχι μόνο της επιφάνειας. Στην συνέχεια, στο πεδίο Attributes προστέθηκε ένα Solid Attribute και ως υλικό ορίστηκε ένα Isotropic (ισοτροπικό) Material με γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

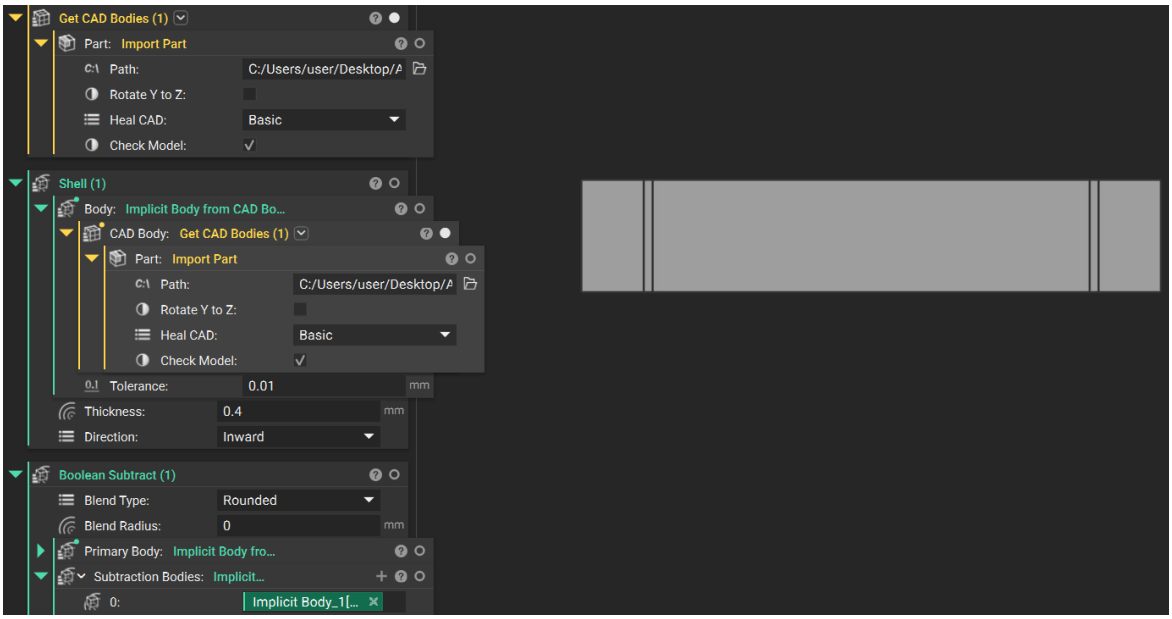
Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας επιλέχθηκε ως υλικό το PLA, με το οποίο και θα εκτυπωθούν τα δοκίμια κατά την πειραματική διαδικασία που θα ακολουθηθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Επομένως, στις ιδιότητες ορίστηκε Isotropic Linear Elastic Property με μέτρο ελαστικότητας 3.5e+0.9 P, λόγο Poisson 0.38 και πυκνότητα 1240 kg/m^3.



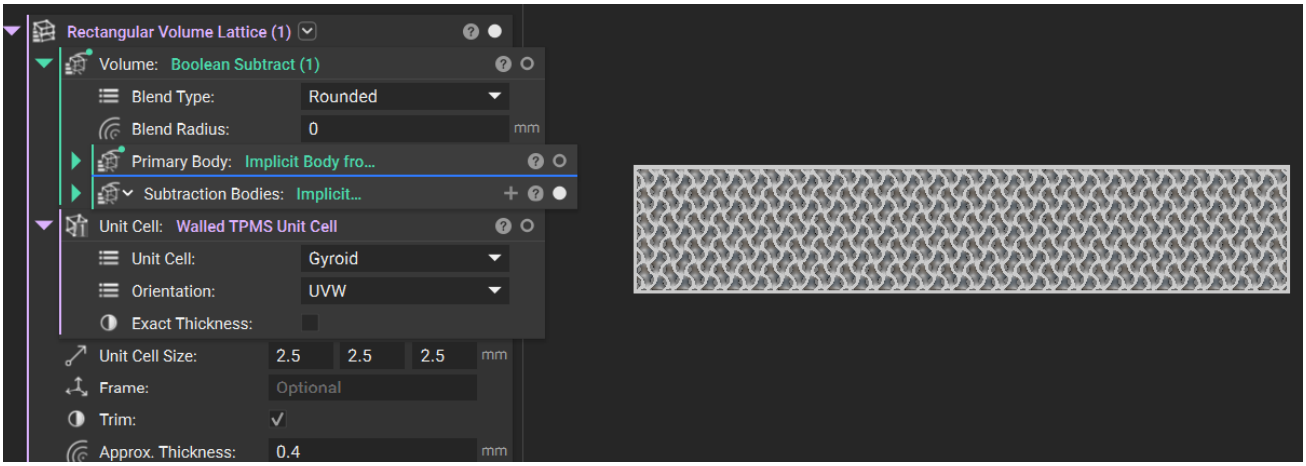
Σχήμα 3.4.1.8 *Δημιουργία ενός πεδίου υπολογισμού (Solid Domain) στο οποίο θα γίνει η μηχανική ανάλυση και επιλογή υλικού (PLA)*

3.4.2 Βήματα ενσωμάτωσης πλεγματικών δομών σε δοκίμιο κάμψης

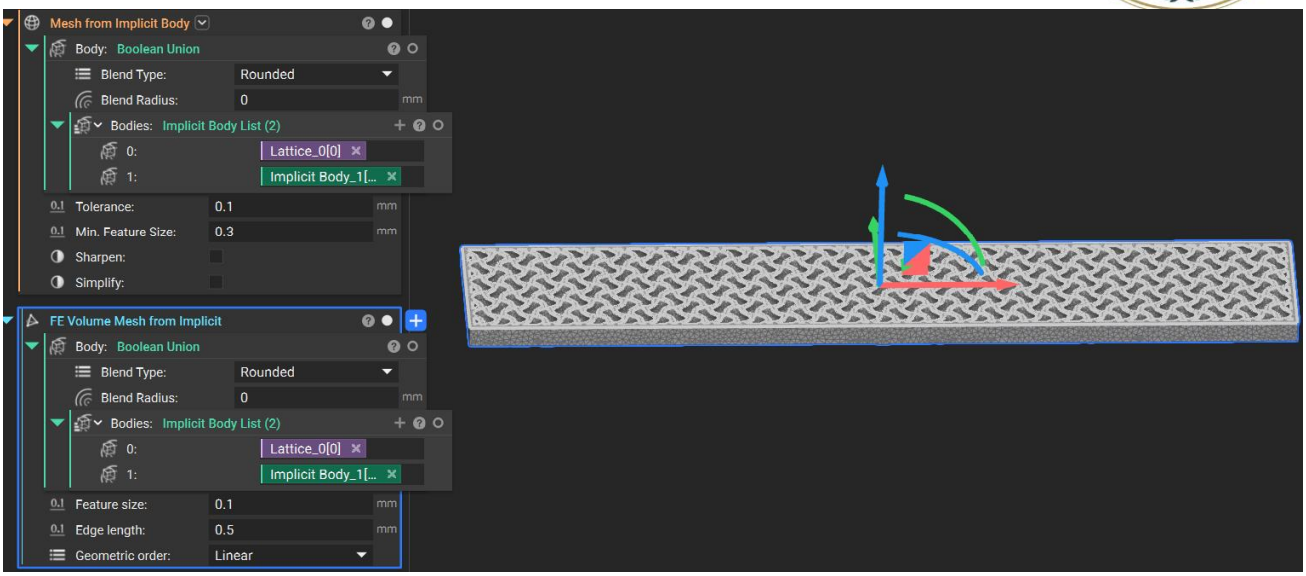
Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την ενσωμάτωση πλεγματικών δομών σε δοκίμιο κάμψης είναι ίδια με τα βήματα που αναλύθηκαν παραπάνω για το δοκίμιο εφελκυσμού. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ξανά η διαδικασία με το δοκίμιο κάμψης να έχει ενσωματωμένο στο εσωτερικό του την δομή πλέγματος Gyroid.



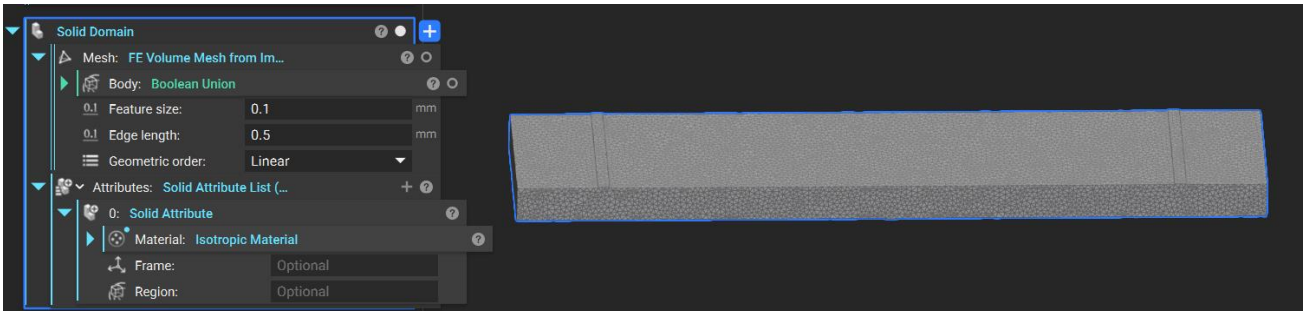
Σχήμα 3.4.2.1 *Εισαγωγή CAD αρχείου στο n-topology, δημιουργία εξωτερικού κελύφους (Shell) και αφαίρεση όγκου έμμεσου σώματος (implicit body) από το πρωτεύον σώμα με την εντολή Boolean Substract*



Σχήμα 3.4.2.2 *Δημιουργία πλέγματος στο εσωτερικό του δοκιμίου με μέγεθος κυψελίδας 2.5×2.5×2.5*



Σχήμα 3.4.2.3 *Δημιουργία επιφανειακού (Mesh) και ογκομετρικού πλέγματος (FE Volume Mesh)*



Σχήμα 3.4.2.4 *Ορισμός Solid Domain*

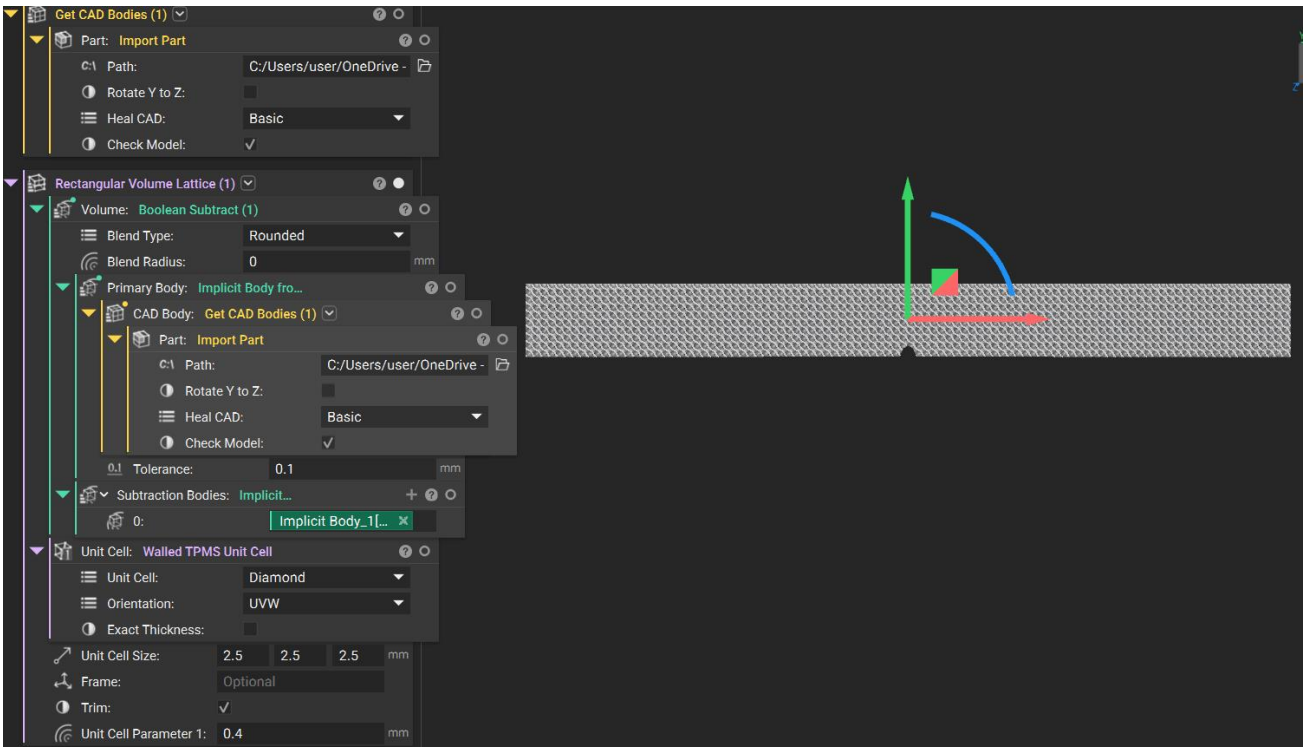
3.4.3 Βήματα ενσωμάτωσης πλεγματικών δομών σε δοκίμιο κρούσης

Για την ενσωμάτωση πλεγματικών δομών σε δοκίμιο κρούσης ακολουθήθηκε η ίδια λογική με τα δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης και χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια blocks στο λογισμικό n-topology. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν στοχευμένες αλλαγές στις παραμέτρους ορισμένων πεδίων, καθώς τα δοκίμια κρούσης έχουν αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις και υψηλή γεωμετρική πολυπλοκότητα. Οι διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται κυρίως σε τιμές που σχετίζονται με το πλέγμα παραγωγής καθώς και με την προσέγγιση της γεωμετρίας του τελικού δοκιμίου (ανοχή, χαρακτηριστικό μέγεθος σημείων κ.ο.κ.). Παρακάτω αναλύεται βήμα-βήμα η διαδικασία που ακολουθήθηκε:

1) **Εισαγωγή CAD αρχείου και ορισμός πλεγματικής δομής**

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή του CAD αρχείου με το δοκίμιο κρούσης μέσω της εντολής Import Part η οποία εισήχθη στο block Get CAD Bodies. Στην συνέχεια, επιλέχθηκε το block Rectangular Volume Lattice με σκοπό τον ορισμό της πλεγματικής δομής. Στο πεδίο Volume, εισήχθη η εντολή Boolean Substract και ως primary body ορίστηκε το δοκίμιο ως Implicit Body from CAD. Στο πεδίο αυτό παρουσιάζεται και η πρώτη διαφορά συγκριτικά με τα δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης καθώς η τιμή που ορίστηκε στην ανοχή (tolerance) ήταν 0.1 (αντί 0.01 που ορίστηκε στα δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης). Αυτό συνέβη, γιατί με την αύξηση της ανοχής μειώνονται οι πολύ μικρές λεπτομέρειες οι οποίες επηρεάζουν την αριθμητική ανάλυση. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερα και χωρίς αλλοιώσεις, η διαδικασία του mesh και της προσομοίωσης.

Επιπλέον, για το δοκίμιο κρούσης επιλέχθηκε Walled TPMS Unit Cell με μοναδιαία κυψελίδα την δομή Diamond μεγέθους 2,5 × 2,5 × 2,5 mm και πάχους 0.4 mm.



Σχήμα 3.4.3.1 *Εισαγωγή CAD μοντέλου και δημιουργία πλεγματικής δομής (Diamond)*

2) Δημιουργία κελύφους (shell)

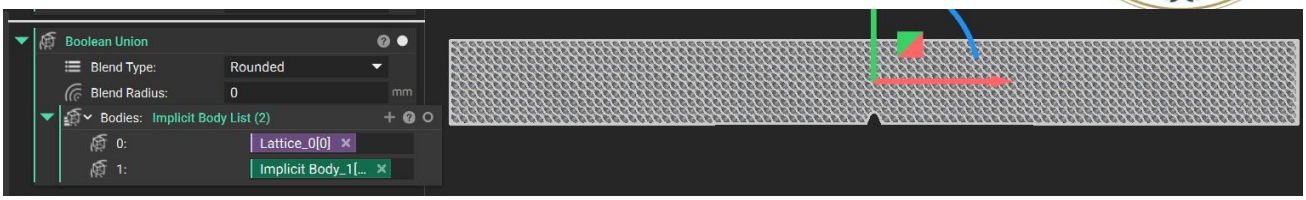
Για την δημιουργία του κελύφους η διαδικασία παρέμεινε η ίδια με τα προηγούμενα δοκίμια. Η ανοχή ορίστηκε 0.1 mm σε αντιστοιχία με το προηγούμενο στάδιο και το πάχος παρέμεινε 0.4 mm.



Σχήμα 3.4.3.2 *Δημιουργία περιβλήματος (shell)*

3) Ένωση κελύφους και πλεγματικής δομής

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ένωση του κελύφους με την δομή Diamond μέσω της εντολής Boolean Union.

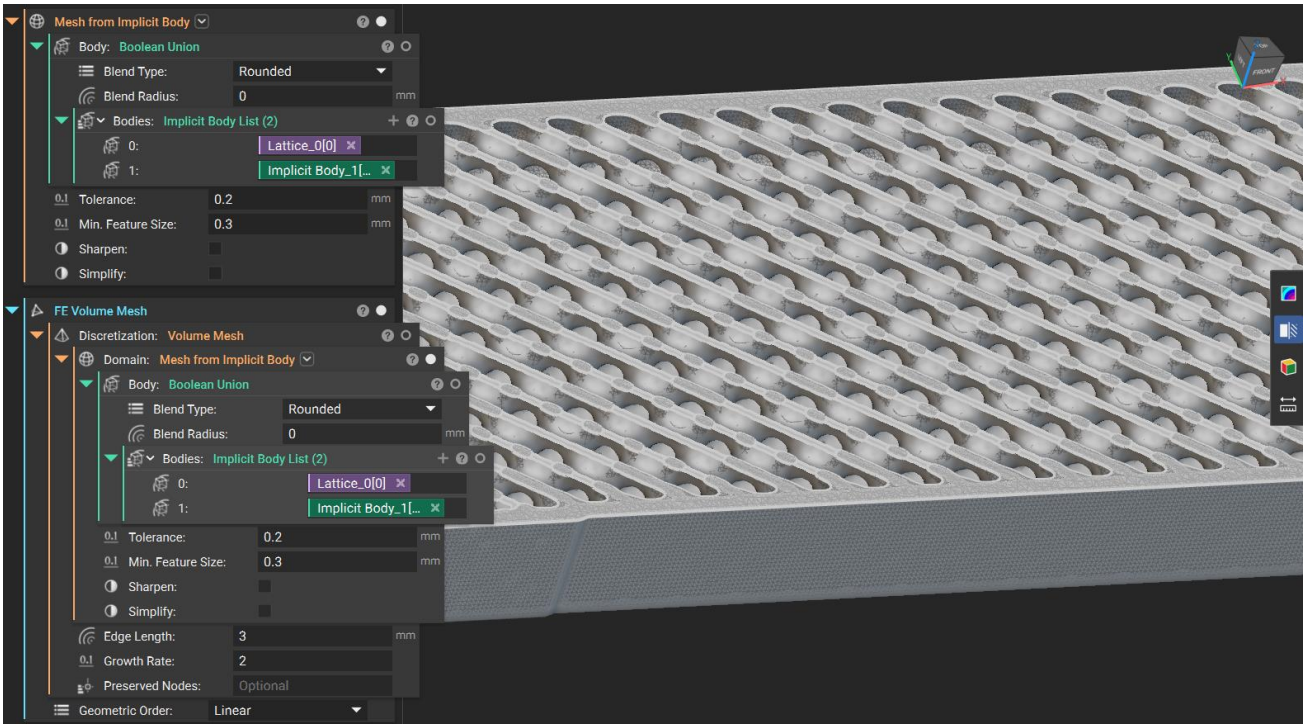


Σχήμα 3.4.3.3 *Ένωση κελύφους και πλεγματικής δομής δημιουργώντας ένα σώμα*

4) Δημιουργία Mesh και FE Volume Mesh

Αρχικά, δημιουργήθηκε επιφανειακό πλέγμα μέσω της εντολής Mesh from Implicit Body με την ανοχή να έχει οριστεί 0.2 mm και το ελάχιστο μέγεθος χαρακτηριστικού 0.3 mm. Οι δύο αυτές τιμές αυξήθηκαν σε σύγκριση με τα δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης, με σκοπό να αγνοηθούν οι πολύ μικρές λεπτομέρειες και το μοντέλο να μπορέσει να τρέξει χωρίς αριθμητικά προβλήματα, τα οποία δημιουργούνται λόγω πυκνού mesh.

Έπειτα, επιλέχθηκε το block FE Volume Mesh για την δημιουργία ογκομετρικού πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Στο πεδίο της διακριτοποίησης (Discretization) εισήχθη η εντολή Volume Mesh έτσι ώστε να δημιουργηθεί πλέγμα σε όλο τον όγκο του δοκιμίου και να μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις/παραμορφώσεις και στο εσωτερικό του. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω υπολογιστικών δυσκολιών που παρουσιάστηκαν κατά την δημιουργία πλέγματος απευθείας από implicit γεωμετρία καθώς το δοκίμιο κρούσης έχει μεγαλύτερες διαστάσεις. Το Edge Length το οποίο προσδιορίζει το μέγεθος του στοιχείου, ορίστηκε 3 mm, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο λιγότερα στοιχεία δημιουργούνται και επομένως είναι πιο εύκολη η ανάλυση του δοκιμίου. Τέλος, για το Growth Rate το οποίο ορίζει το βήμα με το οποίο αυξάνεται το μέγεθος των στοιχείων του mesh, επιλέχθηκε η τιμή 2 μετά από δοκιμές.

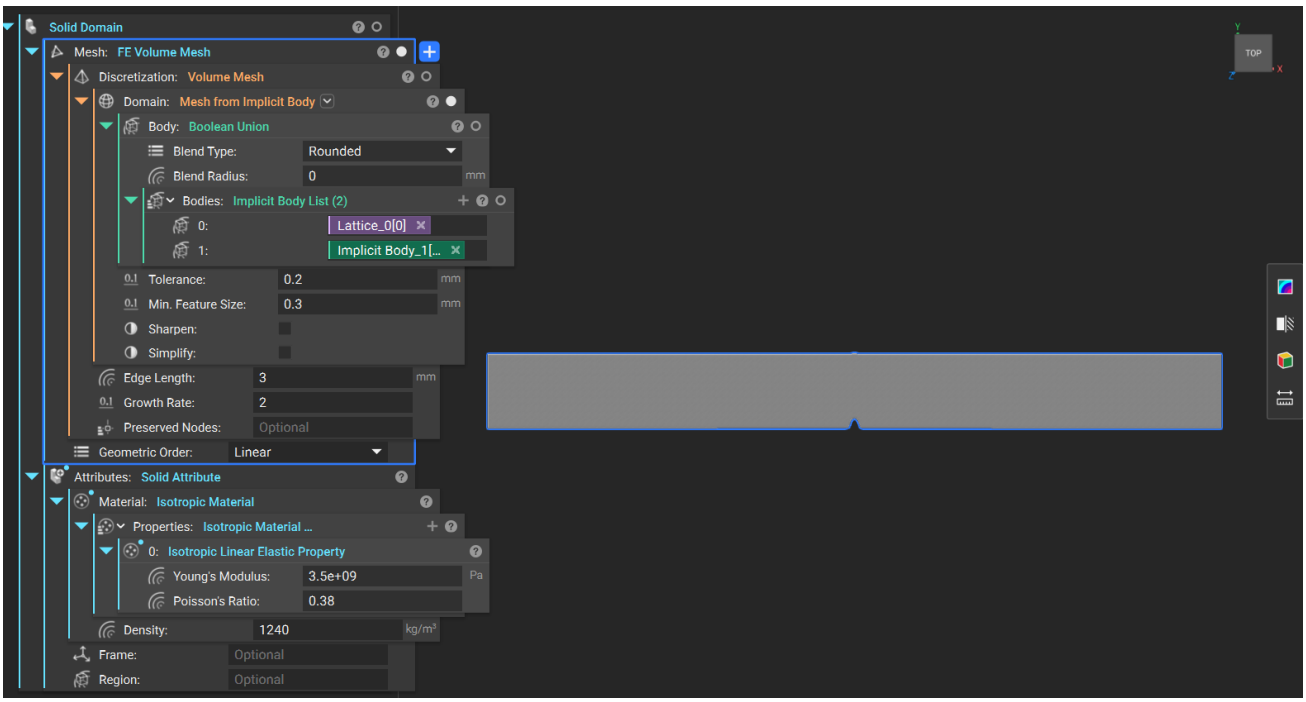


Σχήμα 3.4.3.4 *Δημιουργία επιφανειακού πλέγματος και ογκομετρικού πλέγματος για ανάλυση FEA*

5) Ορισμός Solid Domain και επιλογή υλικού

Στο στάδιο αυτό, δημιουργήθηκε το Solid Domain του δοκιμίου κρούσης έτσι ώστε να μπορέσει να αντιμετωπιστεί ως ένα τρισδιάστατο στερεό (solid) κατά την προσομοίωση. Στο πεδίο του mesh εισήχθη το

block FE Volume Mesh που αναλύθηκε σε προηγούμενο βήμα. Τέλος, στο block Attributes δεν εφαρμόστηκε καμία αλλαγή συγκριτικά με τα δοκίμια κάμψης και εφελκυσμού καθώς χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό (PLA).



Σχήμα 3.4.3.5 *Ορισμός Solid Domain και επιλογή υλικού (PLA)*

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση

Η προσομοίωση και των τριών δοκιμίων εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό n-topology, με σκοπό να αξιολογηθούν οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων μετά την ενσωμάτωση των δομών TPMS στο εσωτερικό τους. Η διαδικασία της προσομοίωσης είναι αρκετά σημαντική καθώς δίνει την δυνατότητα ανάλυσης της μηχανικής απόκρισης του αντικειμένου πέρα από όσα μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα από τις πειραματικές δοκιμές. Συγκεκριμένα, μπορεί να αποτυπωθεί η κατανομή τάσεων/παραμορφώσεων στο εσωτερικό του δοκιμίου και να εντοπιστούν τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων και αστοχίας.

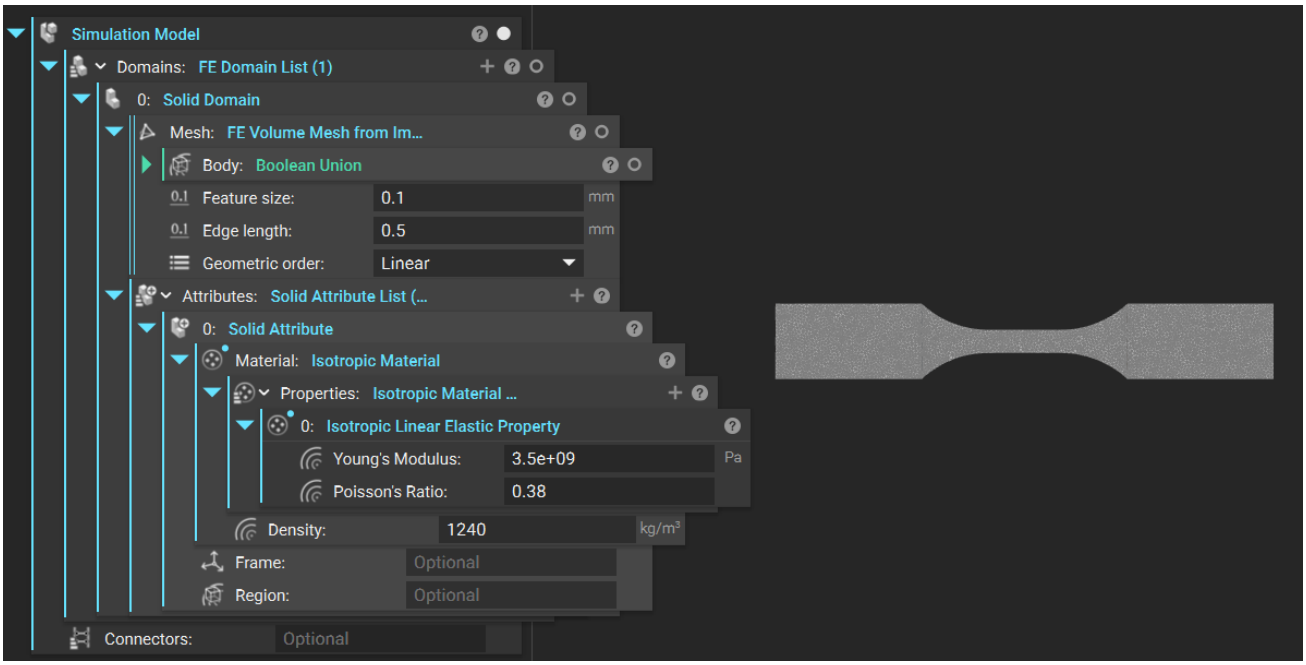
Το λογισμικό n-topology κρίθηκε επαρκές για την διαδικασία της προσομοίωσης καθώς υπήρχε η δυνατότητα επίλυσης στατικών αναλύσεων για τα δοκίμια εφελκυσμού και κάμψης. Στην περίπτωση της κρούσης, δεδομένου ότι το n-topology δεν υποστηρίζει πλήρως την δυναμική ανάλυση κρούσης, εφαρμόστηκε βαρυτική επιτάχυνση (gravity load) η οποία δημιουργεί ισοδύναμο αδρανειακό φορτίο σύμφωνα με την σχέση $F=m\times a$. Η διαδικασία αυτή ήταν κατάλληλη ώστε να εκτιμηθεί η κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων στο δοκίμιο καθώς σκοπός ήταν να προκύψει μία πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς της δομής. Στην περίπτωση που υπήρχε ανάγκη για πλήρη δυναμική ανάλυση προτείνονται λογισμικά με explicit dynamic solvers, όπως είναι τα Abaqus και LS-DYNA.

4.1 Προσομοίωση δοκιμίου εφελκυσμού

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η προσομοίωση του δοκιμίου εφελκυσμού με ενσωματωμένη την δομή Split-P στο εσωτερικό του, όπως ακριβώς αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία της προσομοίωσης βήμα-βήμα καθώς τα αποτελέσματά της :

1. **Δημιουργία Simulation Model**

Το Simulation Model είναι μία εντολή η οποία χρησιμοποιείται για να ενώσει όλα τα απαραίτητα στοιχεία του αντικειμένου που πρόκειται να αναλυθεί, είτε σε προσομοίωση είτε σε βελτιστοποίηση. Στην προκειμένη περίπτωση του δοκιμίου εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε το Simulation Model έτσι ώστε να μπορούν σε επόμενο στάδιο να οριστούν οι οριακές συνθήκες (στήριξης και φόρτισης) και να εκτελεστεί η στατική ανάλυση. Για οριστεί το μοντέλο προσομοίωσης βασικό βήμα αποτελεί το Solid Domain που ορίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο καθώς αποτελεί το σώμα του δοκιμίου που θα υποβληθεί σε φόρτιση. Επομένως, στο πεδίο Domains επιλέχθηκε η εντολή FE Domain List και ως Domain ορίστηκε το Solid Domain χωρίς να γίνει καμία αλλαγή στα πεδία.



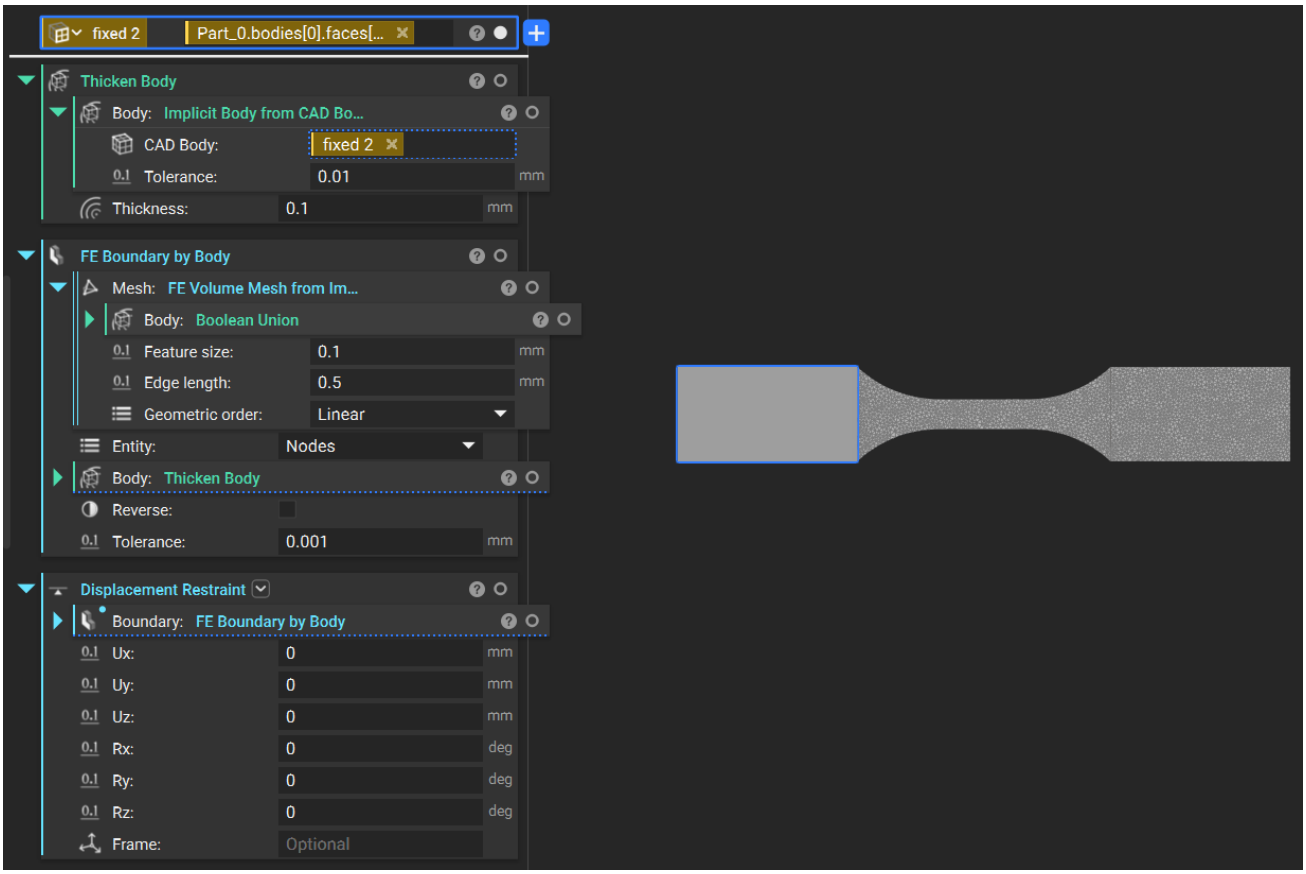
Σχήμα 4.1.1 *Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης (Simulation Model) και ορισμός παραμέτρων υλικού (PLA)*

2. **Ορισμός περιοχών πάκτωσης και εφαρμογή περιορισμού μετατόπισης (Displacement Restraint)**

Αρχικά, επιλέχθηκε η αντίστοιχη επιφάνεια του CAD δοκιμίου η οποία σχεδιάστηκε με σκοπό να επιλεχθεί ως επιφάνεια πάκτωσης και ορίστηκε ως fixed 2 (face selection). Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα βοηθητικό σώμα Thicken Body καθώς με την εντολή αυτή δημιουργείται μία ζώνη λεπτού πάχους γύρω από την επιφάνεια επιλογής (fixed 2). Αυτό χρειάστηκε να γίνει, καθώς οι οριακές συνθήκες κατά την προσομοίωση εφαρμόζονται σε κόμβους και όχι σε CAD επιφάνειες, επομένως με το πρόσθετο αυτό σώμα θα μπορέσουν να εντοπιστούν οι κόμβοι στο FE Mesh και έτσι να οριστεί το boundary για την πάκτωση. Στο πεδίο του body εισήχθη το implicit Body from CAD με ανοχή 0.01 mm και το πάχος του σώματος ορίστηκε 0.1 mm.

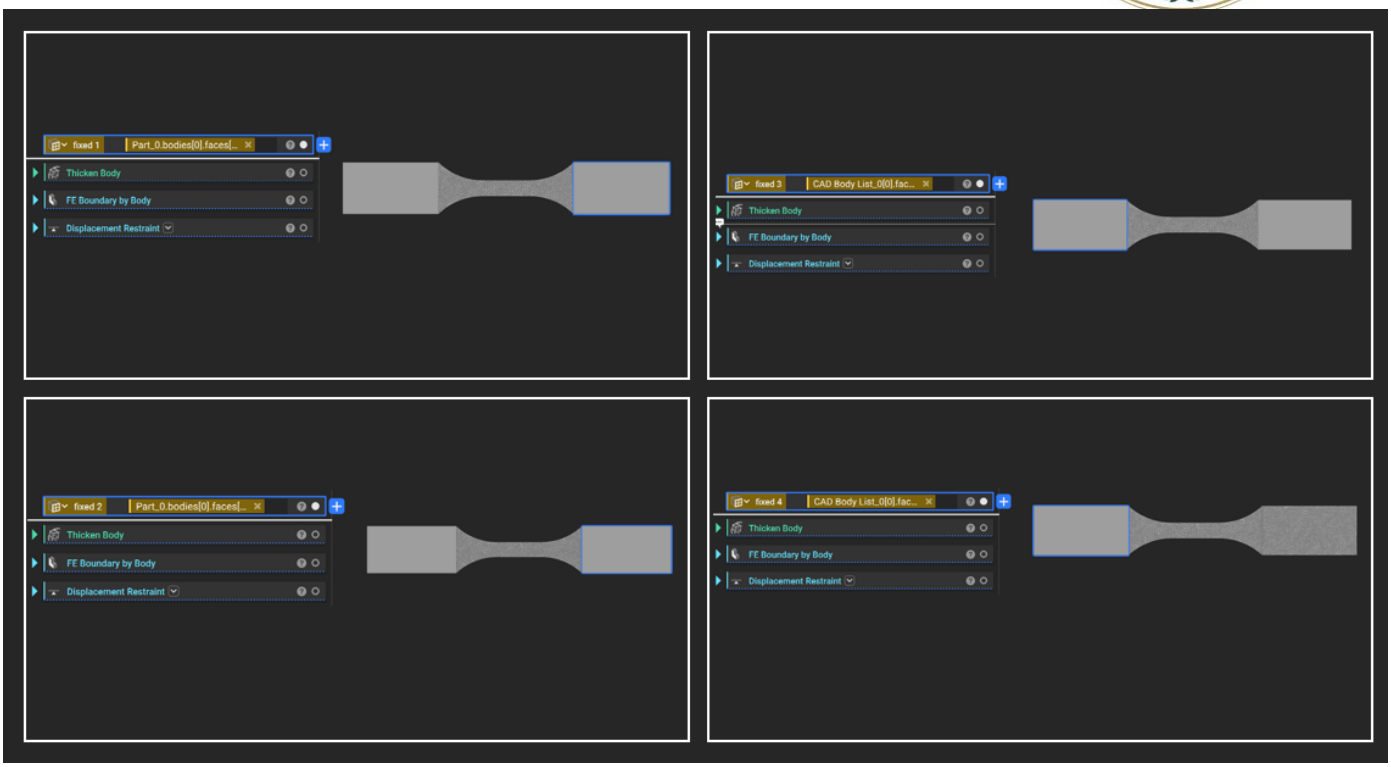
Εφόσον ορίστηκε η επιφάνεια πάκτωσης, χρησιμοποιήθηκε το block FE Boundary by Body ώστε να εντοπιστούν οι κόμβοι του FE Mesh οι οποίοι βρίσκονται εντός του Thicken Body και να ομαδοποιηθούν σε ένα boundary (σύνορο). Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα σύνολο κόμβων (nodes) πάνω στο οποίο θα εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες. Στο πεδίο του mesh εισήχθη το FE Volume Mesh και στο entity επιλέχθηκαν οι κόμβοι (nodes). Στην ανοχή (tolerance) ορίστηκε η τιμή 0.001 καθώς με μία τόσο μικρή τιμή είναι εφικτό να επιλεγούν μόνο οι κόμβοι που αντιστοιχούν στην περιοχή πάκτωσης, και όχι σε γειτονικές περιοχές.

Τέλος, έγινε εφαρμογή της οριακής συνθήκης μέσω της εντολής Displacement Restraint. Στο πεδίο boundary εισήχθη το FE Boundary by Body με μηδενικές μετατοπίσεις (Ux, Uy, Uz) και στροφές (Rx, Ry, Rz). Έτσι, το άκρο του δοκιμίου είναι πλήρως πακτωμένο όπως ακριβώς συμβαίνει και σε πραγματικές συνθήκες δοκιμής.



Σχήμα 4.1.2 *Επιλογή επιφάνειας πάκτωσης (Fixed 2) από CAD μοντέλο και εφαρμογή περιορισμού μετατόπισης*

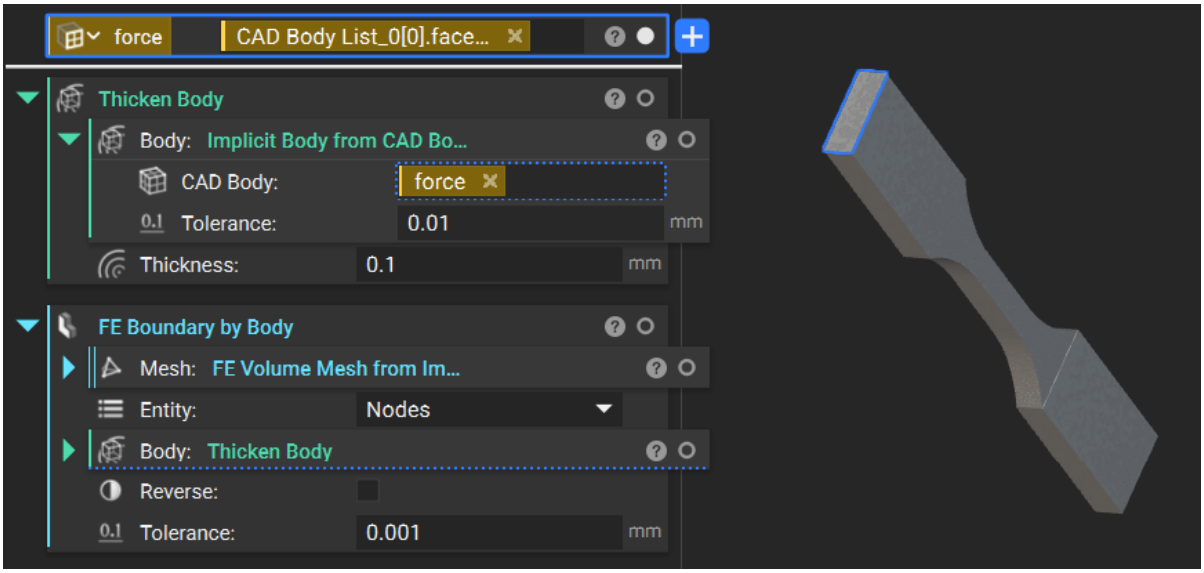
Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο επιλέχθηκαν και οι υπόλοιπες τρεις περιοχές πάκτωσης (σχήμα 4.1.3) του δοκιμίου χρησιμοποιώντας τις CAD επιφάνειες που αναλύθηκαν στην υποενότητα 3.3.1.



Σχήμα 4.1.3 *Εφαρμογή περιορισμού μετατόπισης σε όλες τις περιοχές στήριξης (Fixed 1, Fixed 2, Fixed 3, Fixed 4)*

3. Ορισμός περιοχής φόρτισης

Σε αυτό το βήμα πραγματοποιήθηκε ορισμός της περιοχής η οποία δέχεται εφελκυστική φόρτιση. Η περιοχή αυτή αποθηκεύτηκε ως force (face selection from CAD) και βρίσκεται στο άνω σημείο του δοκιμίου, δηλαδή στο σημείο όπου εφαρμόζεται το φορτίο κατά την πειραματική διαδικασία. Κατά αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι η καταπόνηση θα μεταφερθεί αξονικά προς το κεντρικό τμήμα όπου αναμένεται να αναπτυχθούν οι μέγιστες τάσεις/παραμορφώσεις. Ομοίως με την διαδικασία ορισμού περιοχών πάκτωσης, ορίστηκε το Thicken Body εισάγοντας την περιοχή Force στο πεδίο CAD Body καθώς και το FE Boundary by Body με tolerance 0.001.

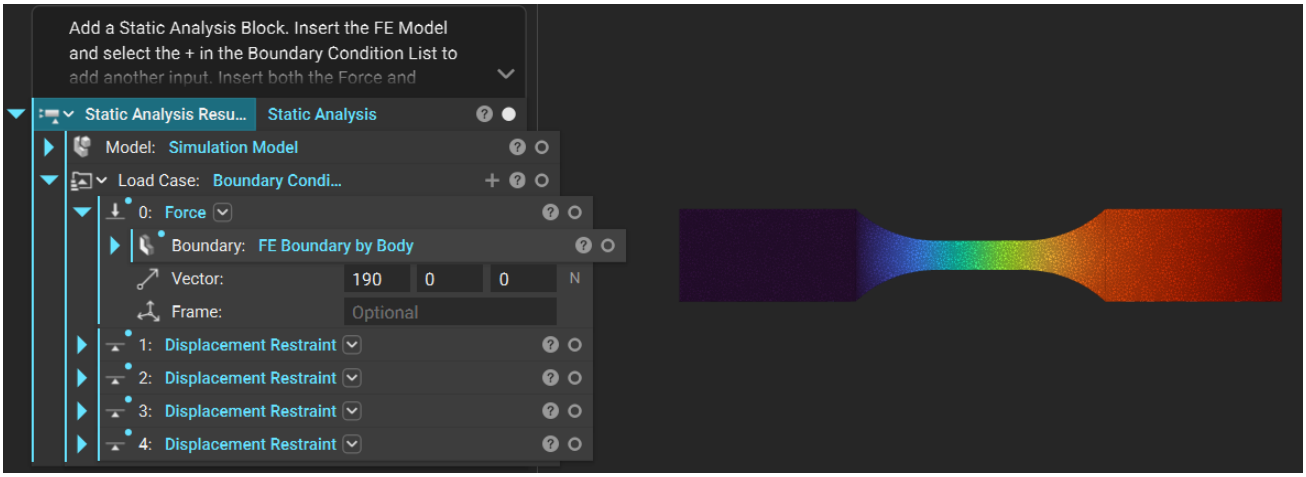


Σχήμα 4.1.4 Επιλογή περιοχής φόρτισης και εφαρμογή δύναμης

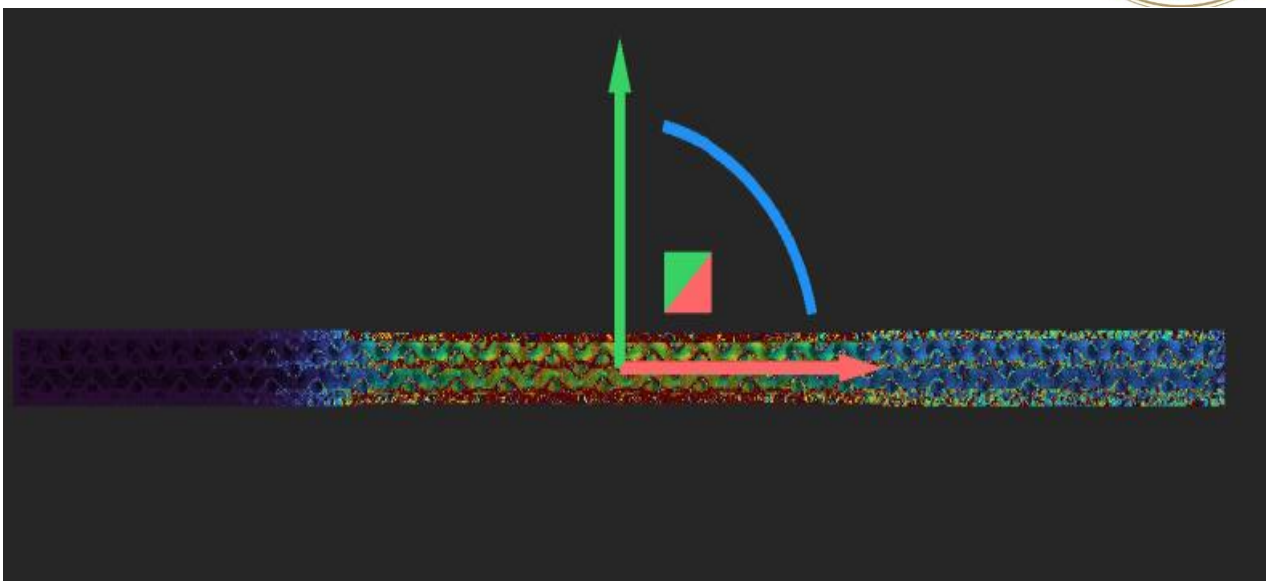
4. Ορισμός στατικής ανάλυσης (Static Analysis)

Το τελικό στάδιο για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης είναι ο ορισμός της στατικής ανάλυσης. Αρχικά, έγινε προσθήκη του block Static Analysis και στο πεδίο του Model εισήχθη το Simulation Model, το οποίο ορίστηκε σε προηγούμενο βήμα. Έπειτα, στο Load Case επιλέχθηκε η εντολή Boundary Conditions ώστε να προστεθούν οι απαιτούμενες οριακές συνθήκες (Force, Displacement Restraint). Για την φόρτιση εισήχθη το block Force και ως Boundary επιλέχθηκε το FE Boundary by Body. Στο πεδίο Vector συμπληρώθηκε η δύναμη που δέχθηκε πραγματικά το δοκίμιο κατά την πειραματική διαδικασία και συγκεκριμένα συμπληρώθηκαν 190N στο άξονα X καθώς με αυτήν την τιμή παρατηρήθηκε θραύση του δοκιμίου. Στην συνέχεια, προστέθηκαν τα blocks Displacement Restraint τα οποία αντιστοιχούν στις τέσσερις πακτώσεις που ορίστηκαν για το δοκίμιο.

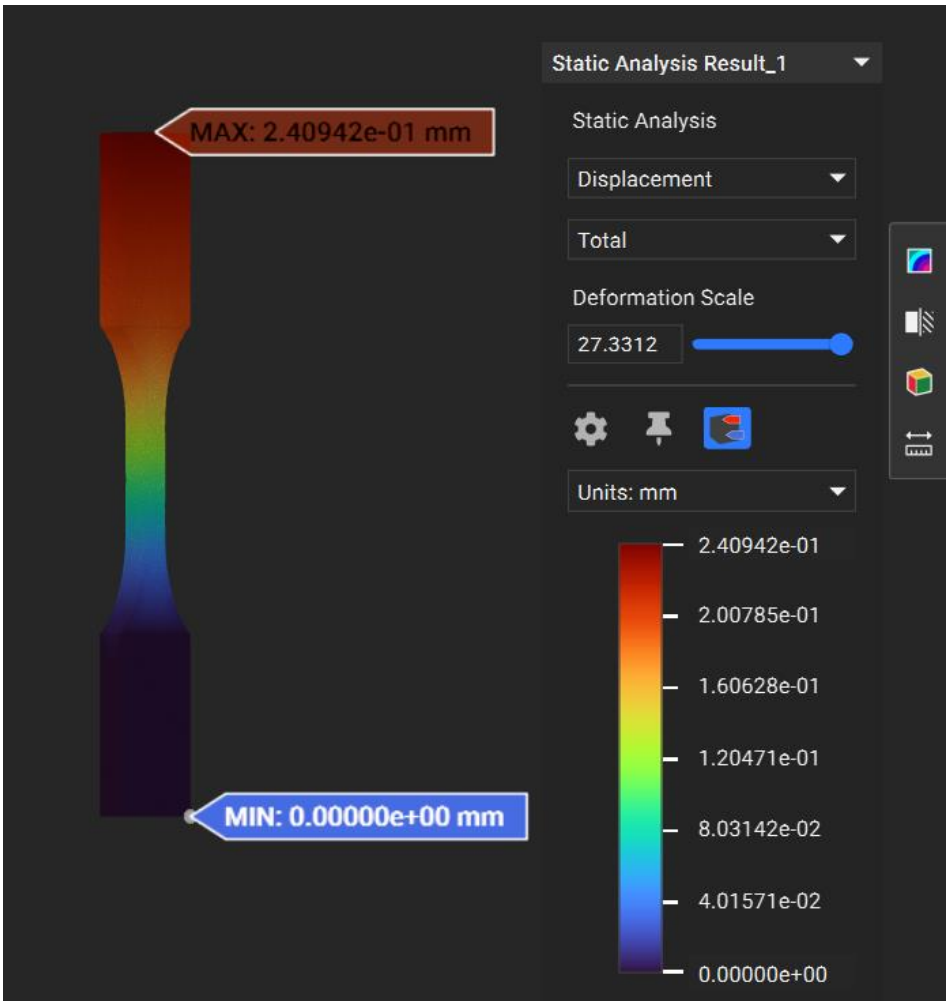
Εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία της στατικής ανάλυσης διεξήχθησαν τα αποτελέσματα της με το μοντέλο να παρουσιάζει την αναμενόμενη μηχανική συμπεριφορά. Η συνολική μετατόπιση παρουσιάζει αύξηση από το κάτω πακτωμένο άκρο προς την περιοχή φόρτισης, με μέγιστη τιμή 2.40942e-01 mm. Επιπλέον, η κατανομή τάσης Von Mises καθώς και η μέγιστη παραμόρφωση παρουσιάζουν κορύφωση σχεδόν στο μέσο του δοκιμίου, στο σημείο δηλαδή όπου η διατομή μειώνεται, γεγονός αναμενόμενο για ένα δοκίμιο εφελκυσμού. Στα σχήματα 4.1.7, 4.1.8 και 4.1.9 φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης τα οποία αφορούν μετατόπιση, παραμόρφωση και τάση Von Mises αντίστοιχα.



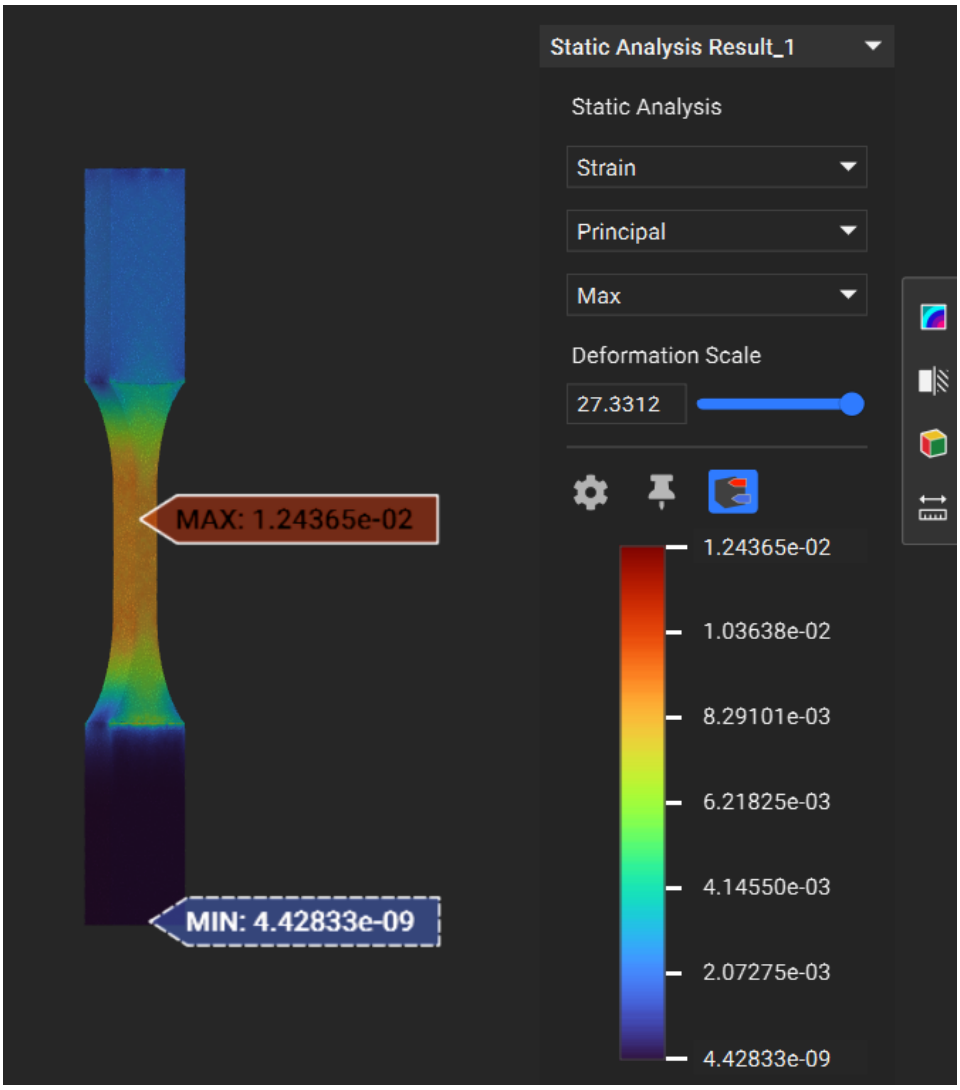
Σχήμα 4.1.5 Ορισμός στατικής ανάλυσης του δοκιμίου εφελκυσμού και εφαρμογή πραγματικής τιμής δύναμης που παρατηρήθηκε κατά την δοκιμή



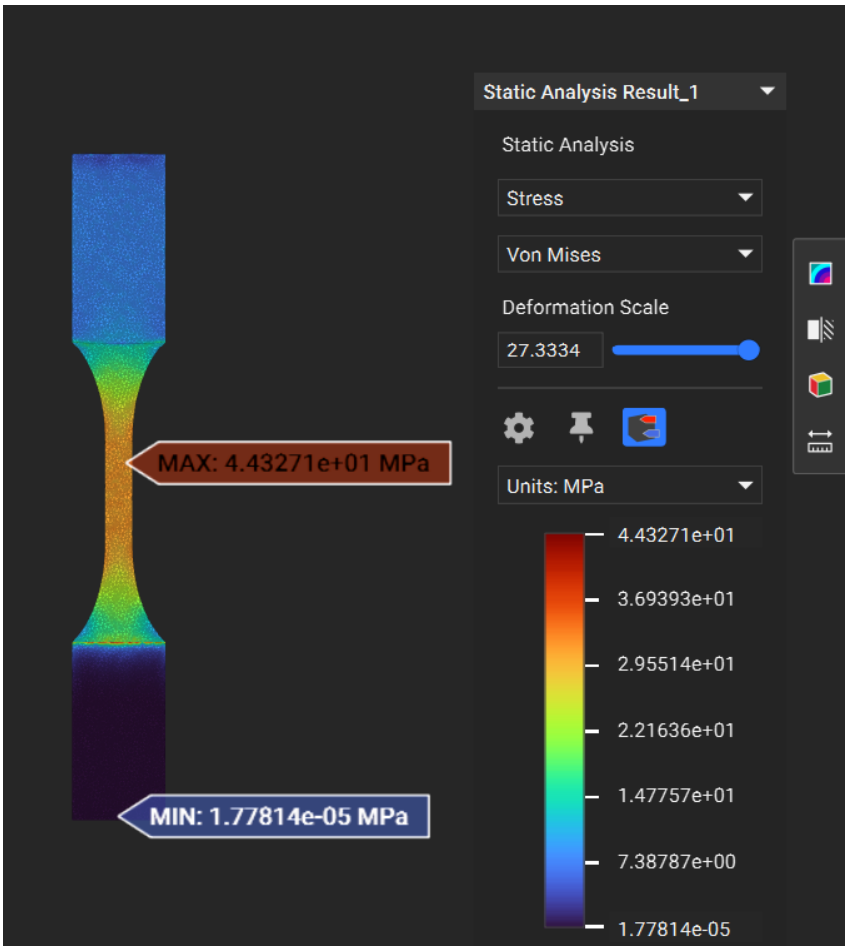
Σχήμα 4.1.6 *Απεικόνιση της δομής Split-P στο εσωτερικό του δοκιμίου υπό φόρτιση*



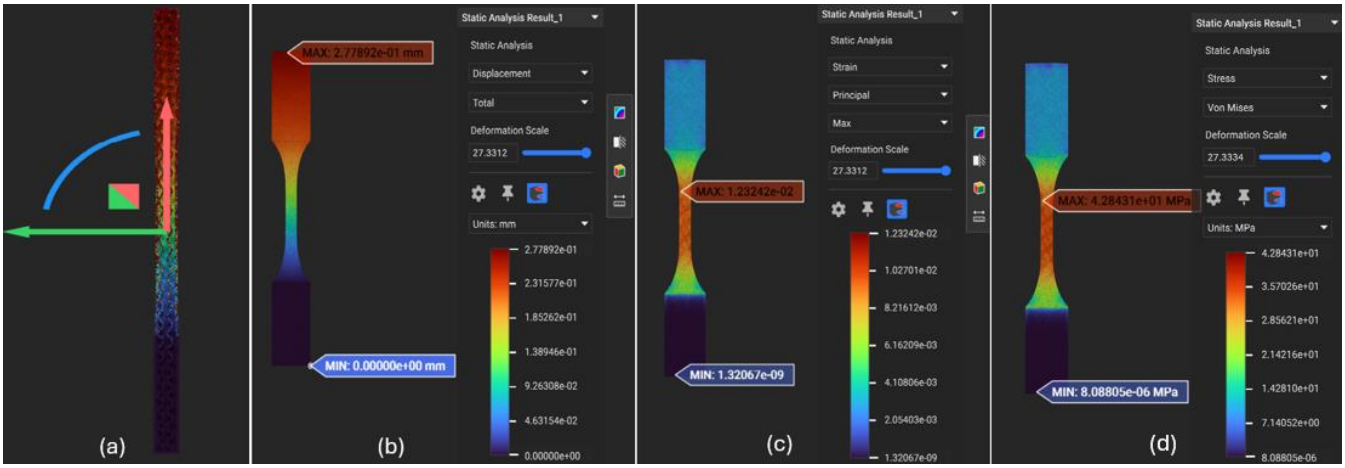
Σχήμα 4.1.7 *Συνολική μετατόπιση μετά από στατική ανάλυση εφελκυσμού για το δοκίμιο με Split-P δομή*



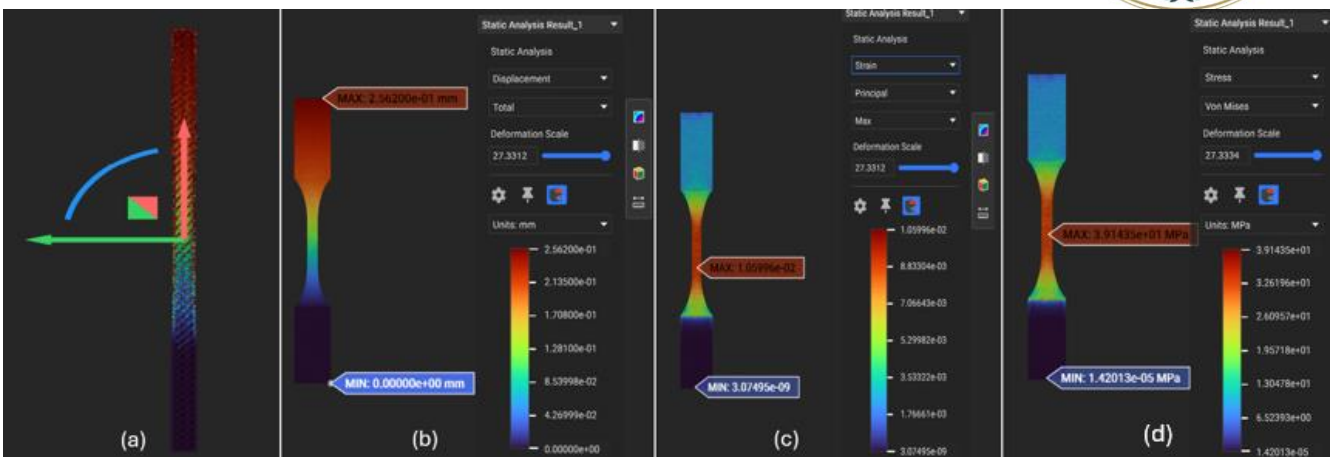
Σχήμα 4.1.8 *Κατανομή μέγιστης κύριας παραμόρφωσης του δοκιμίου με Split-P δομή*



Σχήμα 4.1.9 *Κατανομή ισοδύναμης τάσης Von Mises για το δοκίμιο με Split-P δομή*



Σχήμα 4.1.10 *Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης του δοκιμίου με δομή Gyroid: (a) Απεικόνιση δομής Gyroid στο εσωτερικό δοκιμίου, (b) κατανομή συνολικής μετατόπισης, (c)κατανομή μέγιστης κύριας παραμόρφωσης και (d) κατανομή ισοδύναμης τάσης Von Mises*



Σχήμα 4.1.11 *Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης του δοκιμίου με δομή Diamond: (a) Απεικόνιση δομής Diamond στο εσωτερικό δοκιμίου, (b) κατανομή συνολικής μετατόπισης, (c)κατανομή μέγιστης κύριας παραμόρφωσης και (d) κατανομή ισοδύναμης τάσης Von Mises*

4.2 Προσομοίωση δοκιμίου κάμψης

Για την προσομοίωση του δοκιμίου κάμψης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που εφαρμόστηκε για το δοκίμιο εφελκυσμού, με τις κατάλληλες διαφοροποιήσεις στις οριακές συνθήκες ώστε να αναπαρασταθεί το αντίστοιχο σενάριο φόρτισης. Η διαδικασία αναλύεται παρακάτω:

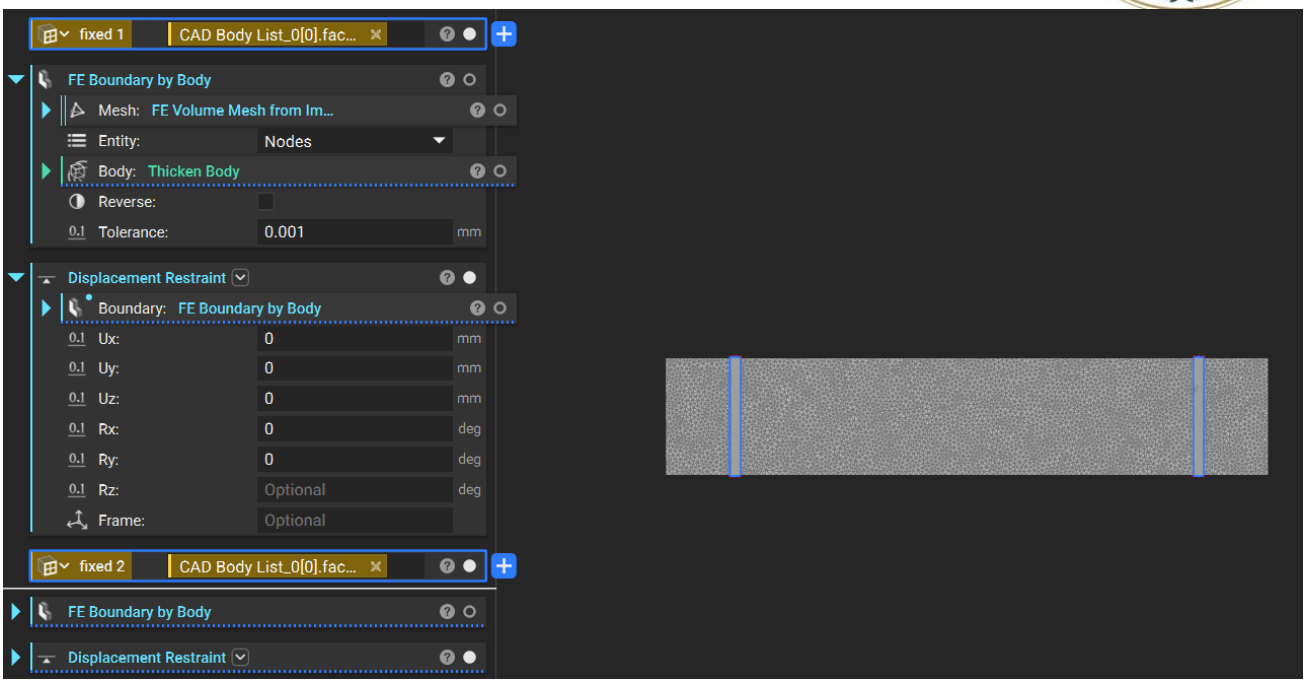
1) Ορισμός Simulation Model και επιλογή υλικού



Σχήμα 4.2.1 *Ορισμός μοντέλου προσομοίωσης (Simulation Model) και ορισμός παραμέτρων υλικού (PLA)*

2) Επιλογή περιοχών πάκτωσης και εφαρμογή περιορισμού μετατόπισης (Displacement Restraint)

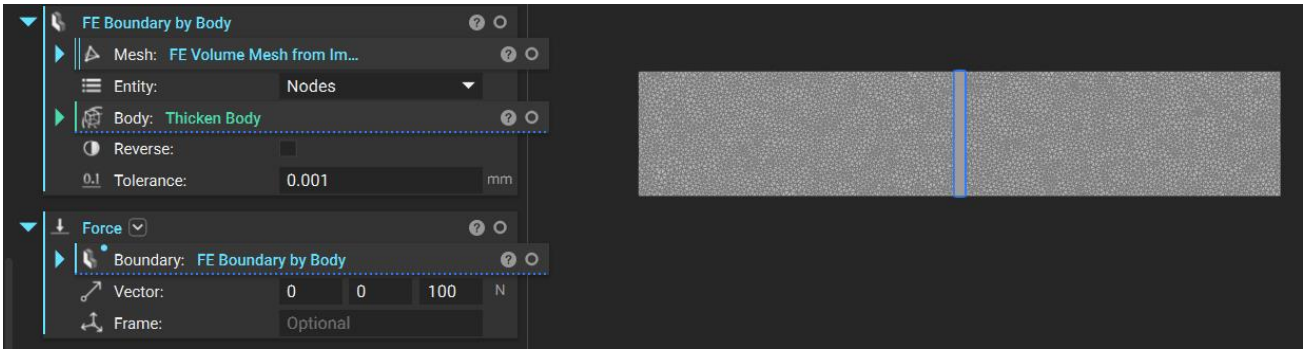
Κατά τις δοκιμές κάμψης το δοκίμιο στηρίζεται σε δύο σημεία, επομένως ορίστηκαν δύο boundary sets (fixed 1, fixed 2).



Σχήμα 4.2.2 *Επιλογή περιοχών στήριξης και εφαρμογή περιορισμού μετατοπίσεων (Displacement Restraint)*

3) Ορισμός περιοχής φόρτισης και εφαρμογή δύναμης στον άξονα Z

Η τιμή της δύναμης που ορίστηκε στο πεδίο Force δεν είναι η πραγματική μέγιστη δύναμη η οποία καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3.3 εφαρμόστηκε δύναμη 100 N στον άξονα Z, δηλαδή κάθετα στην διεύθυνση του δοκιμίου όπως ακριβώς απαιτείται σε σενάριο κάμψης. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με σκοπό την καλύτερη απεικόνιση της απόκρισης του δοκιμίου κατά την αριθμητική προσομοίωση, καθώς οι μέγιστες δυνάμεις που καταγράφηκαν κατά τις δοκιμές ήταν σαφώς χαμηλότερες (10-18N). Επομένως, τα 100N εφαρμόστηκαν ώστε να αναδειχθούν με σαφή τρόπο η παραμόρφωση των δομών στο εσωτερικό των δοκιμίων, η κατανομή των μετατοπίσεων και η εμφάνιση των κρίσιμων περιοχών καταπόνησης υπό αυξημένο φορτίο.

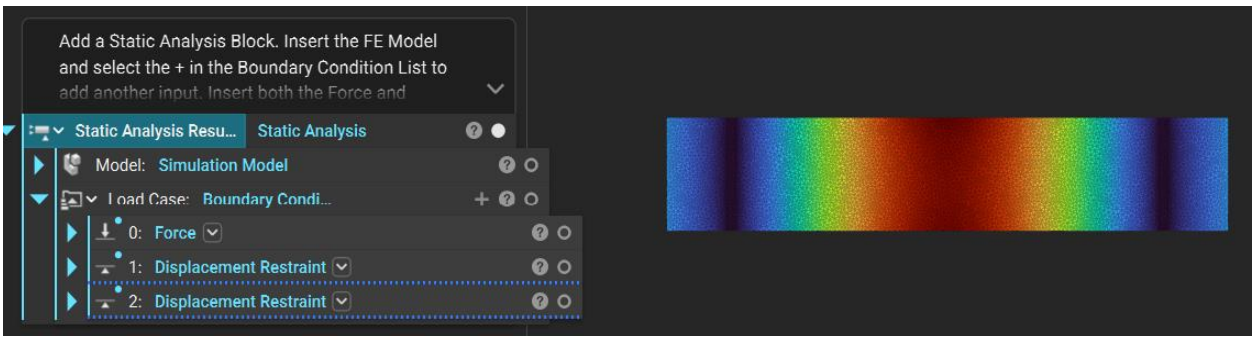


Σχήμα 4.2.3 *Ορισμός της περιοχής φόρτισης και εφαρμογή κατακόρυφης δύναμης στην διεύθυνση του άξονα Z*

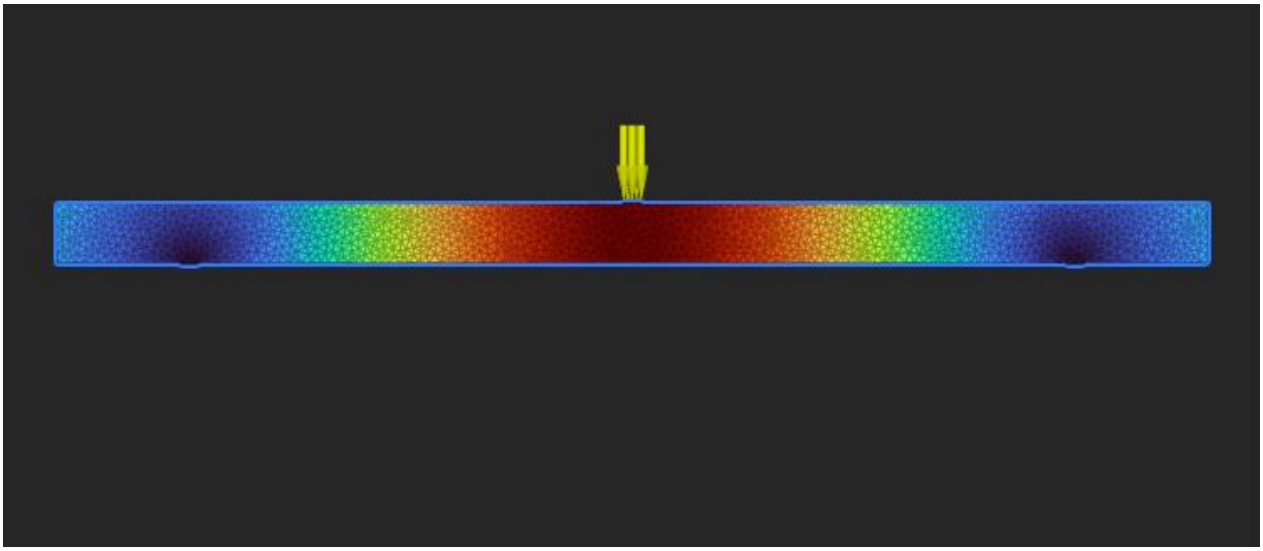
4) Ορισμός στατικής ανάλυσης (Static Analysis)

Από την στατική ανάλυση προέκυψε ότι η συνολική μετατόπιση (Displacement) παρουσιάζει μέγιστη τιμή 1.32721 mm στο κέντρο του δοκιμίου, ενώ φαίνεται ότι στα σημεία στήριξης παραμένει μηδενική. Η μέγιστη παραμόρφωση (Strain) και η μέγιστη τάση Von Mises (stress) εμφανίζονται στην περιοχή μέγιστης ροπής κάμψης, με τιμές 3.40985×10^{-2} και 1.73365×10^{8} Pa αντίστοιχα. Τα σχήματα 4.2.7, 4.2.8 και 4.2.9

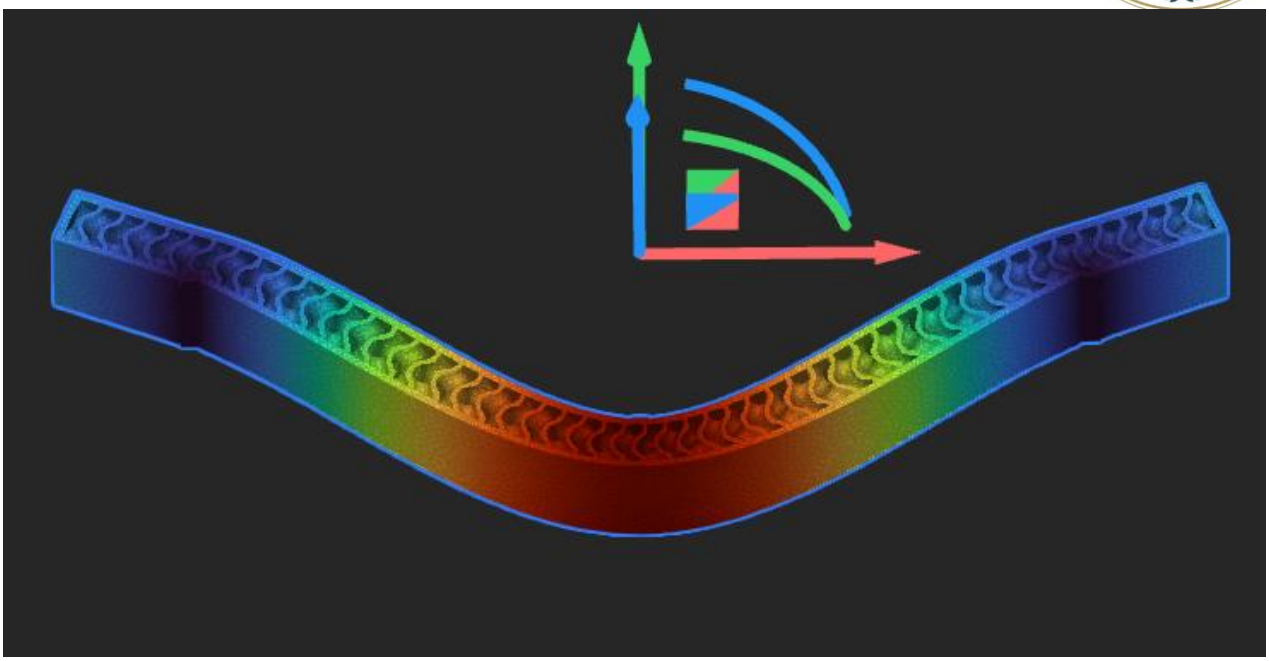
παρουσιάζουν αναλυτικά τα παραπάνω αποτελέσματα. Επιπλέον, στα σχήματα 4.2.10 και 4.2.11 αναλύονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την στατική ανάλυση των δομών Split-P και Diamond αντίστοιχα.



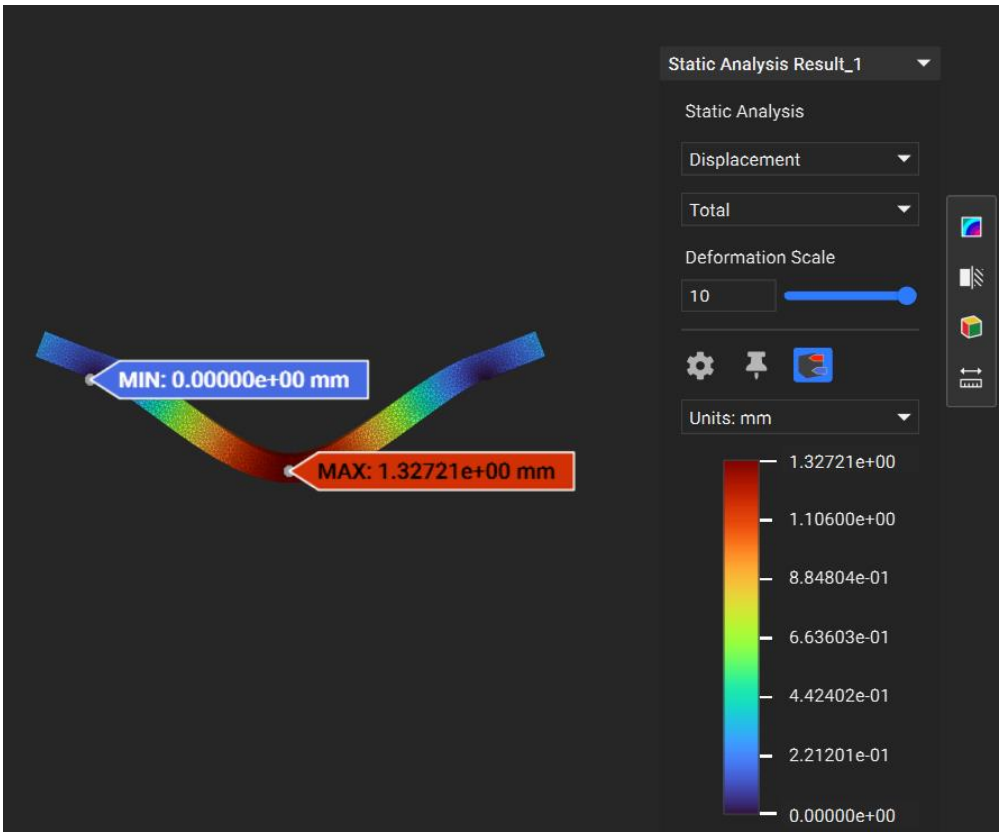
Σχήμα 4.2.4 *Εκτέλεση στατικής ανάλυσης για την δοκιμή κάμψης*



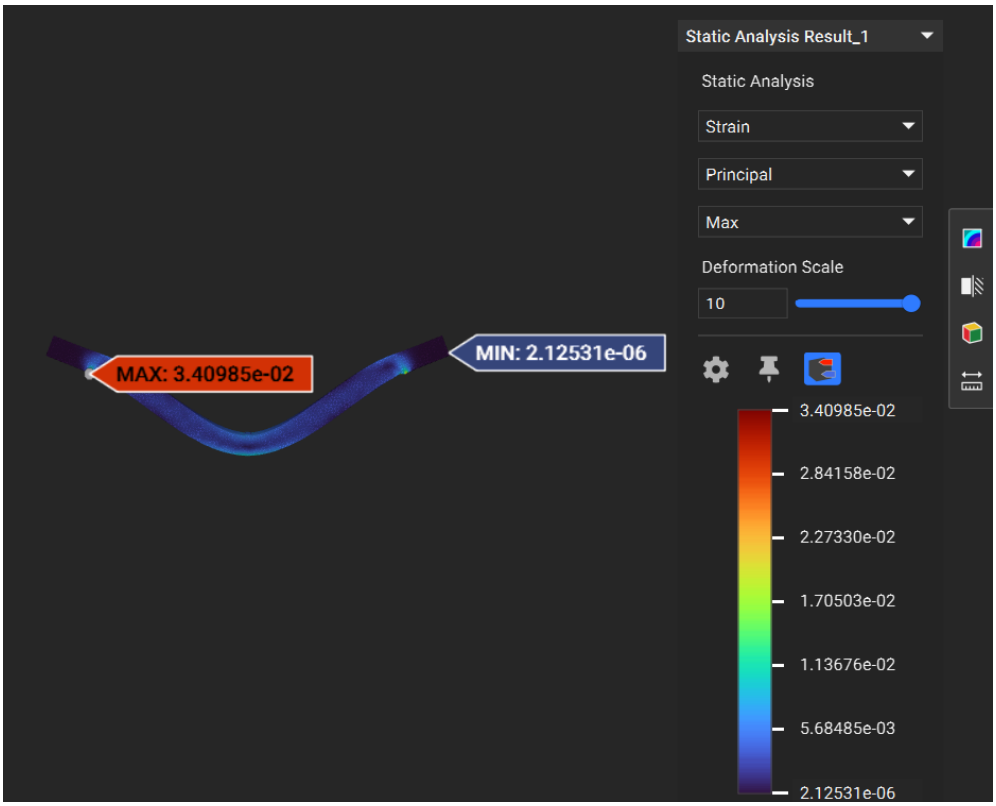
Σχήμα 4.2.5 *Απεικόνιση της εφαρμογής δύναμης στο μέσο του δοκιμίου*



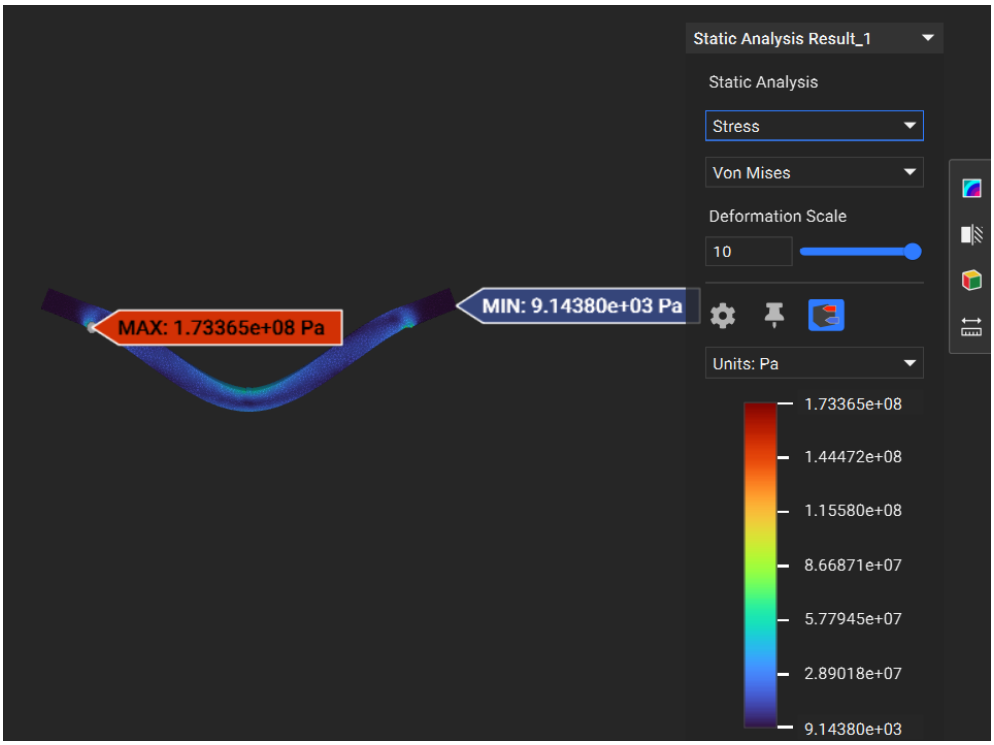
Σχήμα 4.2.6 *Απεικόνιση της δομής Gyroid στο εσωτερικό του δοκιμίου κάμψης υπό φόρτιση*



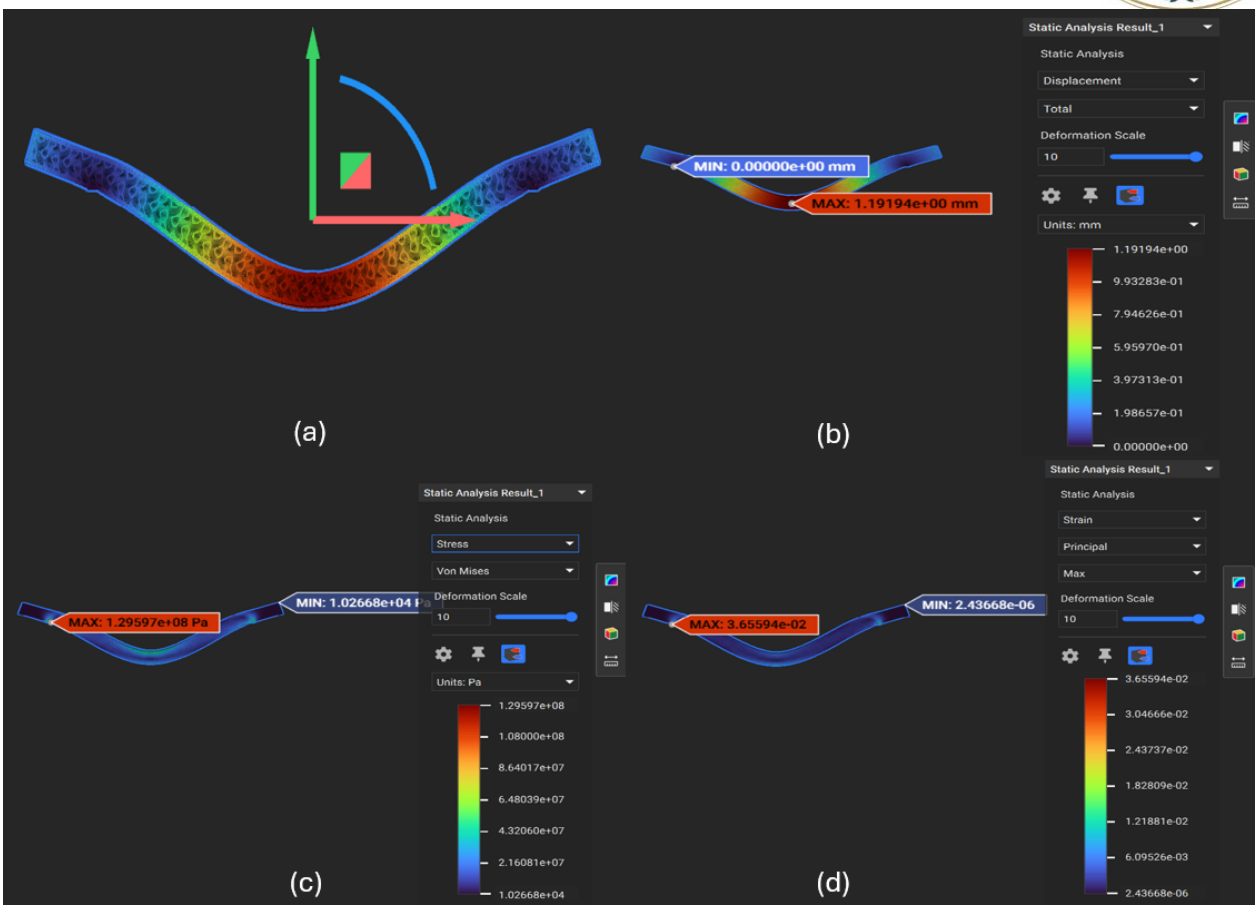
Σχήμα 4.2.7 *Συνολική μετατόπιση μετά από στατική ανάλυση κάμψης για το δοκίμιο με Gyroid δομή*



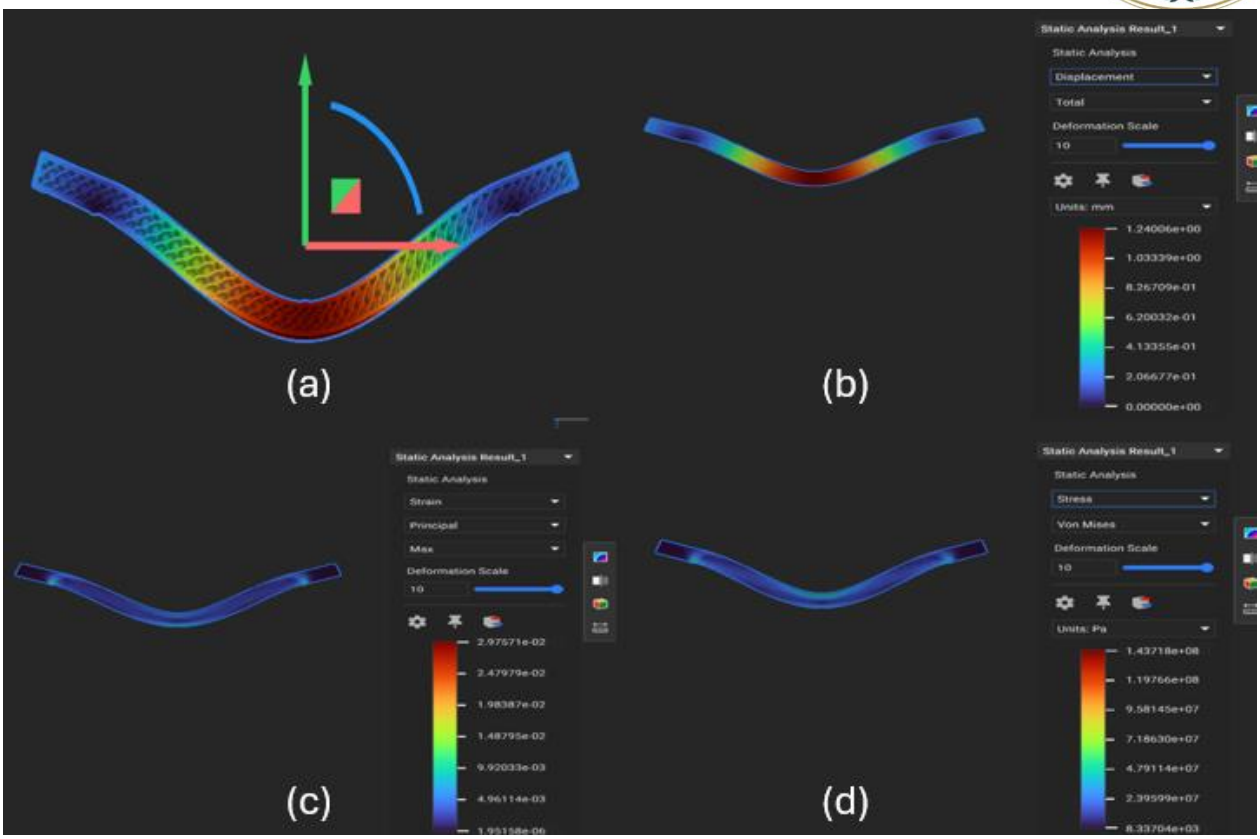
Σχήμα 4.2.8 *Κατανομή μέγιστης κύριας παραμόρφωσης του δοκιμίου κάμψης με Gyroid δομή*



Σχήμα 4.2.9 *Κατανομή ισοδύναμης τάσης Von Mises δοκιμίου κάμψης με Gyroid δομή*



Σχήμα 4.2.10 *Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης δοκιμίου κάμψης με δομή Split-P: (a) Απεικόνιση παραμόρφωσης της δομής στο εσωτερικό δοκιμίου, (b)κατανομή συνολικής μετατόπισης, (c)κατανομή ισοδύναμης τάσης Von Mises και (d)κατανομή μέγιστης κύριας παραμόρφωσης*

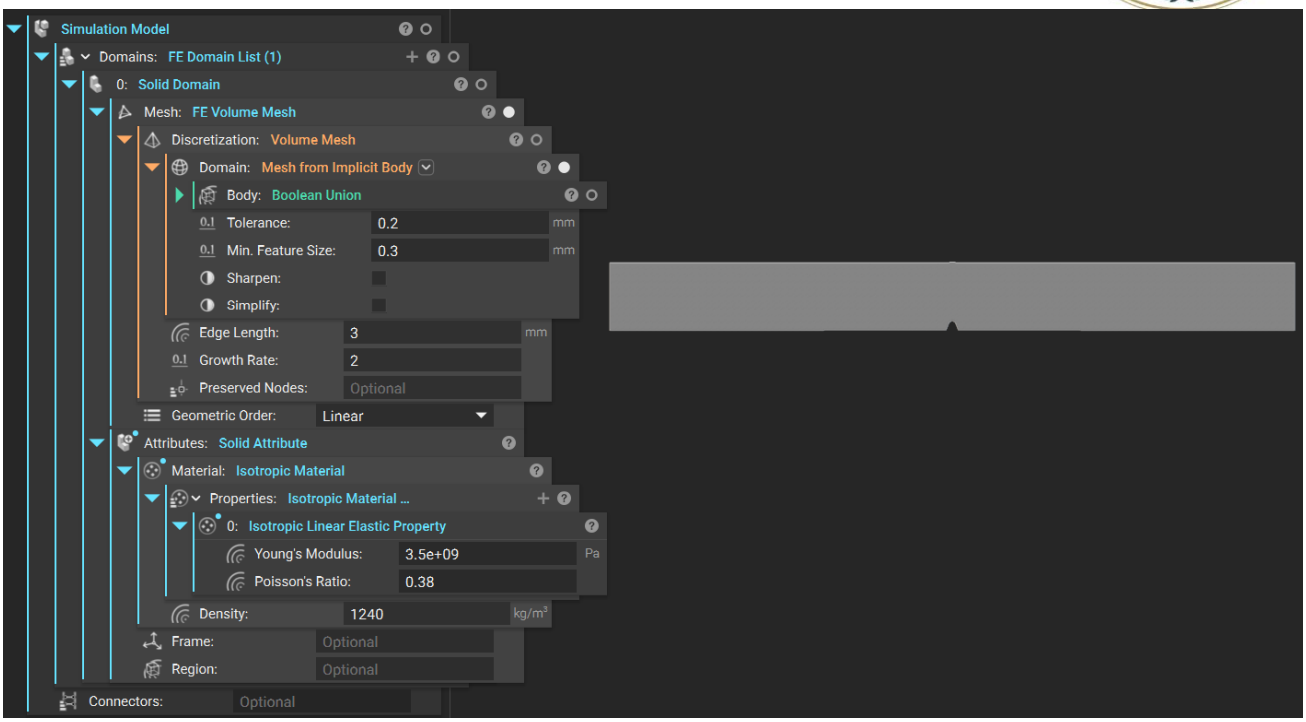


Σχήμα 4.2.11 *Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης δοκιμίου κάμψης με δομή Diamond: (a)απεικόνιση παραμόρφωσης της δομής στο εσωτερικό δοκιμίου, (b)κατανομή συνολικής μετατόπισης, (c)κατανομή ισοδύναμης τάσης Von Mises και (d)κατανομή μέγιστης κύριας παραμόρφωσης*

4.3 Προσομοίωση δοκιμίου κρούσης

Για την προσομοίωση κρούσης ακολουθήθηκαν παρόμοια βήματα με την προσομοίωση εφελκυσμού και κάμψης, με κάποιες διαφοροποιήσεις που αφορούν τον ορισμό μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων καθώς και τον ορισμό οριακών συνθηκών και δύναμης. Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία προσομοίωσης στο δοκίμιο κρούσης.

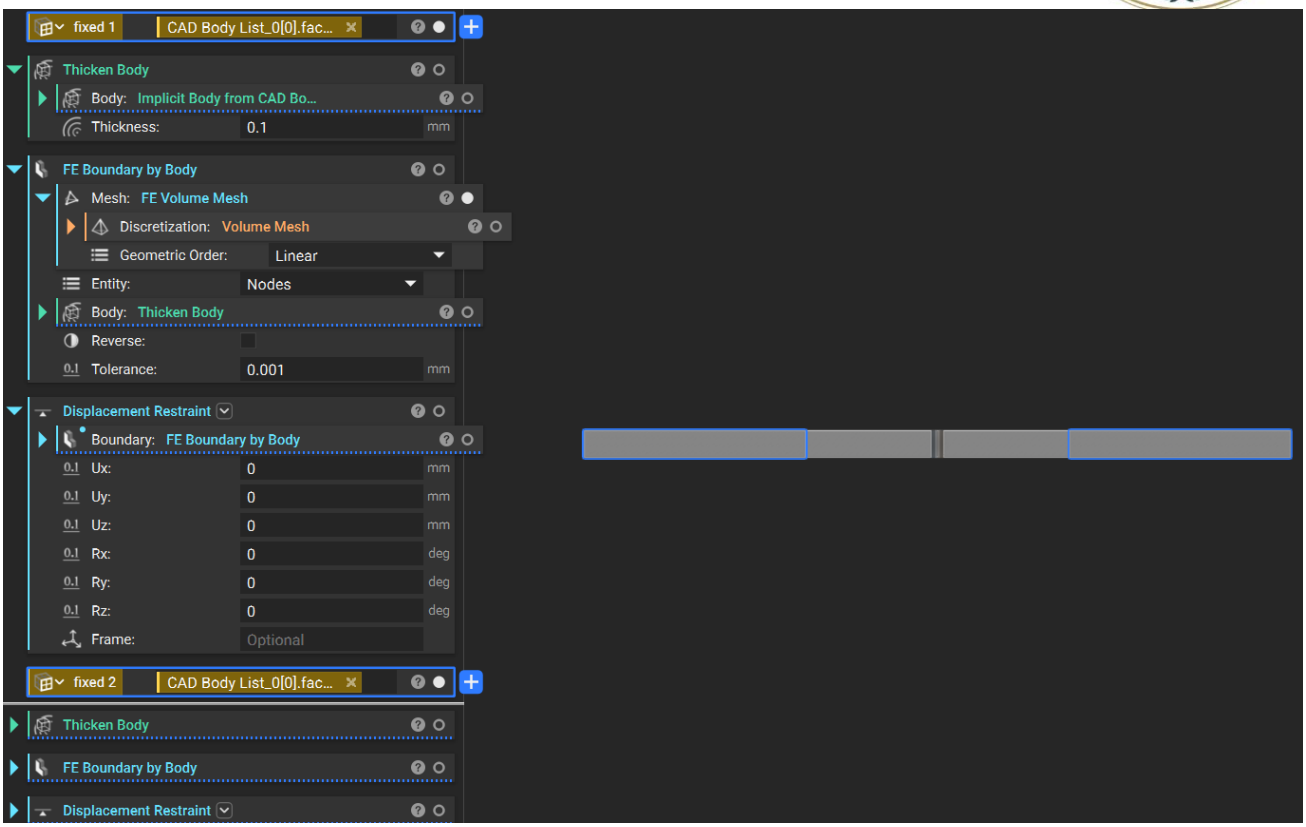
1) **Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης (Simulation Model)**



Σχήμα 4.3.1 *Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης και ορισμός ιδιοτήτων υλικού στο solid domain*

2) Ορισμός περιοχών πάκτωσης και εφαρμογή περιορισμού μετατόπισης (Displacement Restraint)

Στο στάδιο αυτό επιλέχθηκαν οι περιοχές στήριξης του δοκιμίου, δημιουργώντας node sets στο FE Volume Mesh και εφαρμόζοντας Displacement Restraints. Αρχικά, επιλέχθηκαν οι επιφάνειες από το CAD (υποενότητα 3.3.3) και ορίστηκαν ως fixed 1 και fixed 2. Για κάθε επιφάνεια, δημιουργήθηκε ένα Thicken Body πάχους 0.1 mm με σκοπό να δημιουργηθεί ένα μικρός όγκος στην περιοχή και να είναι αξιόπιστη η αντιστοίχιση με του κόμβους του FE Volume Mesh. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή των πεδίων FE Boundary by Body και Displacement Restraint με τις ίδιες παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν και στις προσομοιώσεις εφελκυσμού και κάμψης.



Σχήμα 4.3.2 *Ορισμός περιοχών στήριξης και εφαρμογή περιορισμών μετατόπισης στα σημεία έδρασης*

3) Ορισμός Acceleration Load

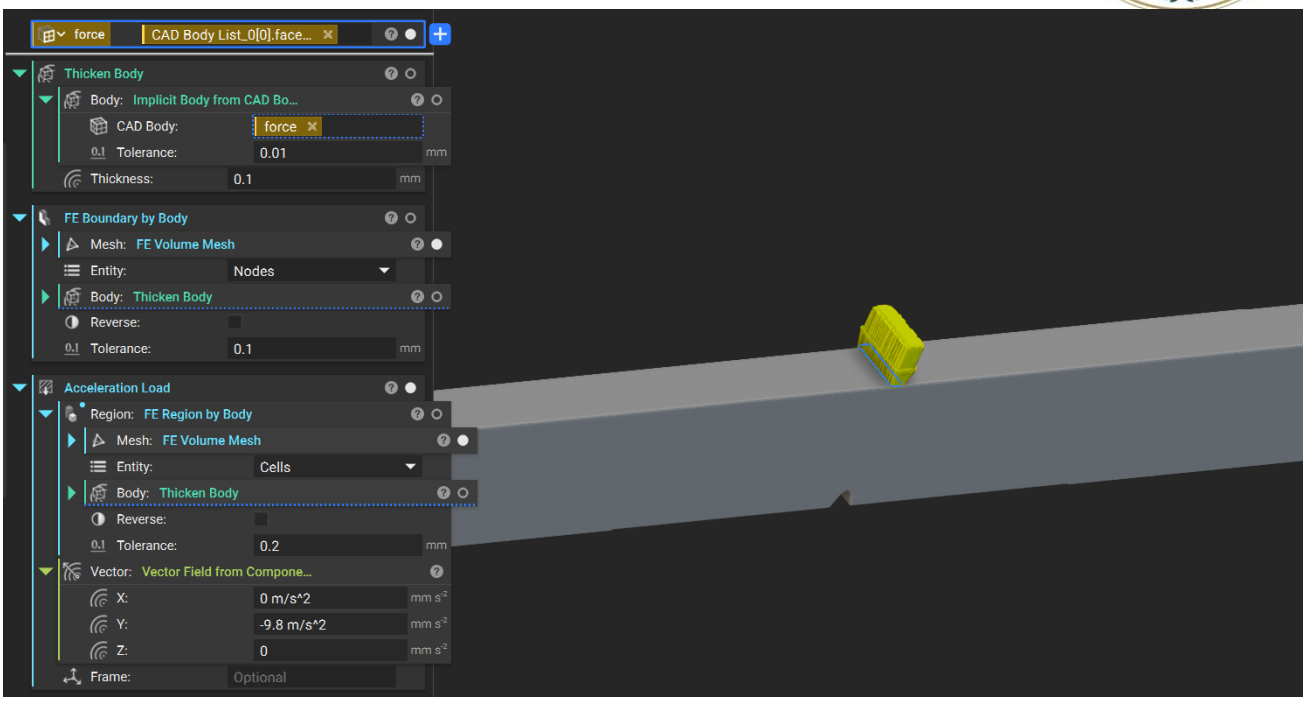
Για τον ορισμό της φόρτισης του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η εντολή Acceleration Load. Μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου φόρτισης, εφαρμόζεται επιτάχυνση στην καθορισμένη περιοχή του μοντέλου, δημιουργώντας αδρανειακές δυνάμεις οι οποίες εξαρτώνται από την μάζα του σώματος που συγκρούεται με το δοκίμιο σύμφωνα με την σχέση:

$$F=m\times a \quad (4.3.1)$$

Στην παρούσα προσομοίωση η επιτάχυνση εφαρμόστηκε σε καθορισμένη περιοχή του δοκιμίου (FE Region by Body) για την αναπαράσταση της κατεύθυνσης της φόρτισης σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία. Η προσέγγιση αυτή διαφέρει από τον εφελκυσμό και την κάμψη όπου η φόρτιση επιβλήθηκε άμεσα ως Force σε καθορισμένη περιοχή.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το λογισμικό N-topology δεν διαθέτει εξειδικευμένο solver για την πλήρη προσομοίωση δυναμικών φαινομένων κρούσης. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αποτελεί μία προσεγγιστική λύση, η οποία αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση της μηχανικής συμπεριφοράς της δομής.

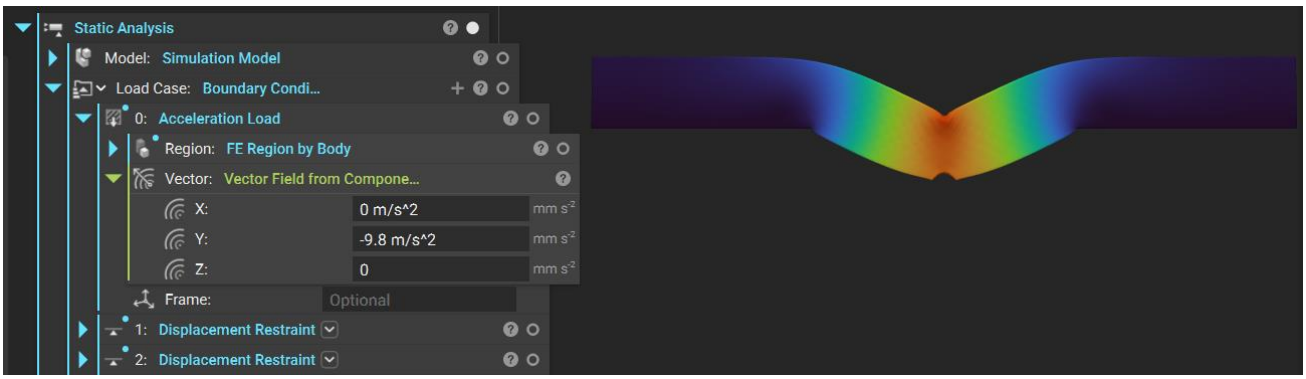
Η φόρτιση ορίστηκε μέσω ενός διανυσματικού πεδίου επιτάχυνσης (Vector Field), το οποίο καθορίζει το μέτρο και την κατεύθυνση της επιταχυνόμενης δύναμης. Το διανυσματικό αυτό πεδίο χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στο Acceleration Load, ώστε να εφαρμοστεί στην επιλεγμένη περιοχή του μοντέλου. Η επιτάχυνση ορίστηκε στον άξονα Y με τιμή -9.8 m/s^2, ισοδύναμη με την επιτάχυνση της βαρύτητας.



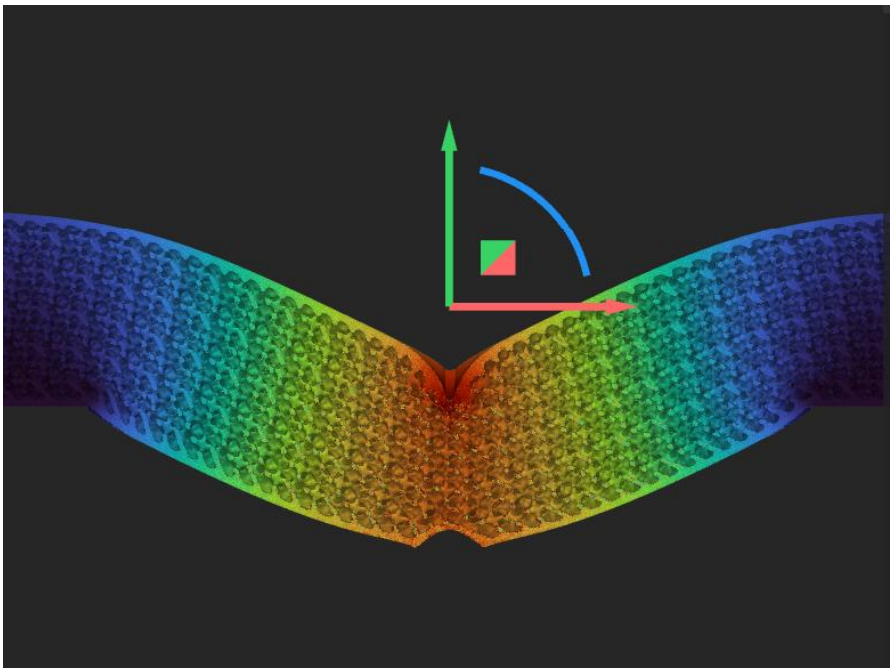
Σχήμα 4.3.3 *Ορισμός περιοχής φόρτισης και εφαρμογή επιτάχυνσης στην διεύθυνση φόρτισης για την προσομοίωση*

4) Ορισμός στατικής ανάλυσης (Static Analysis)

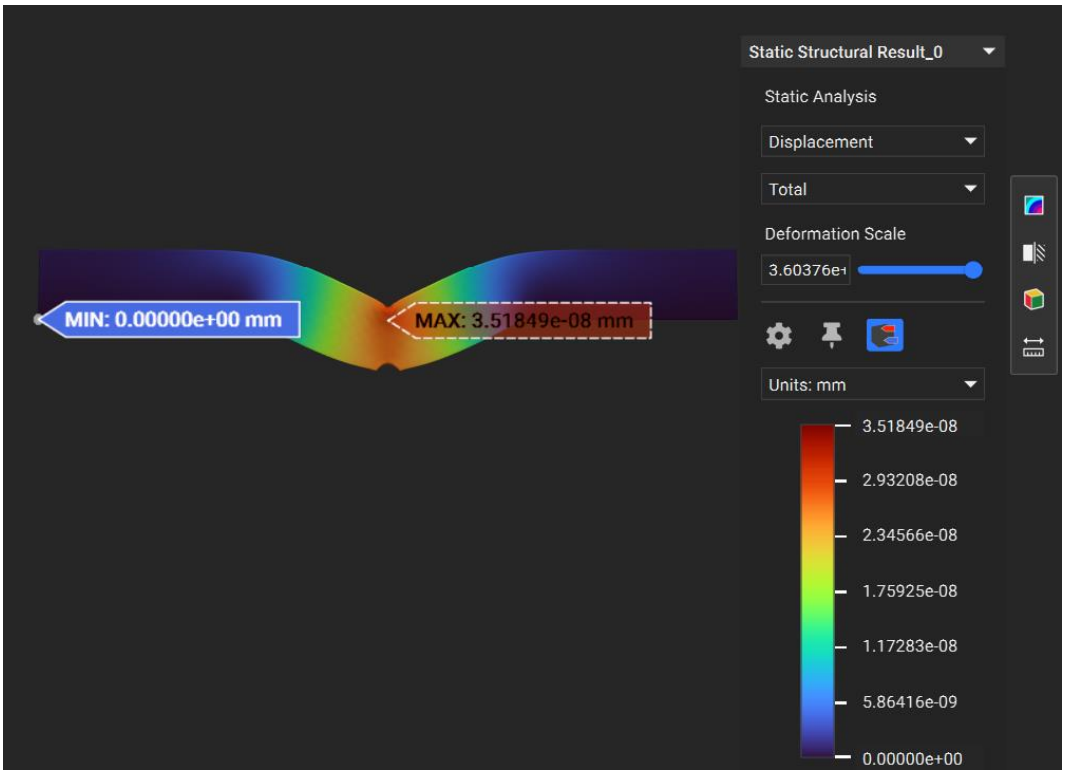
Τέλος, πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση του μοντέλου, μέσω του block Static Analysis και εισάγοντας το ήδη ορισμένο Simulation Model στο πεδίο Model. Έπειτα, συγκεντρώθηκαν οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν σε προηγούμενο βήμα ώστε να δημιουργηθεί ένα σύνολο συνθηκών για την ανάλυση. Στα σχήματα 4.3.6, 4.3.7 και 4.3.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και συγκεκριμένα οι τιμές της μετατόπισης, της παραμόρφωσης και της τάσης Von Mises.



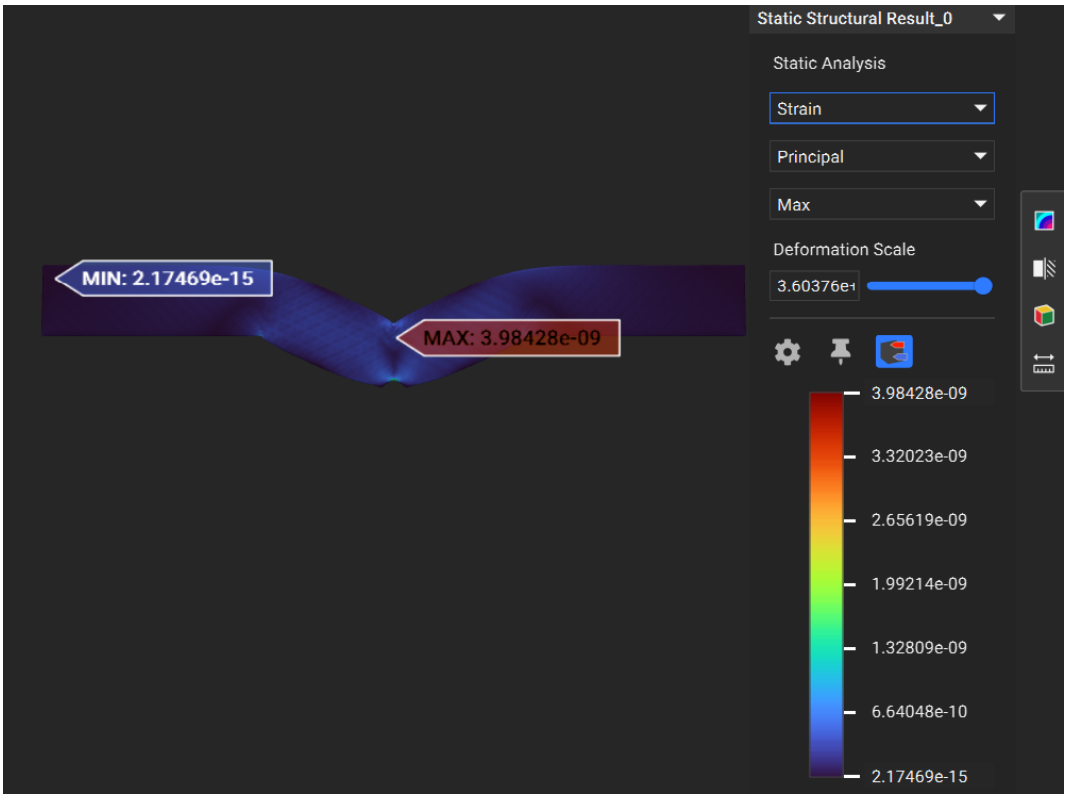
Σχήμα 4.3.4 *Εκτέλεση στατικής ανάλυσης και απεικόνιση απόκρισης του δοκιμίου*



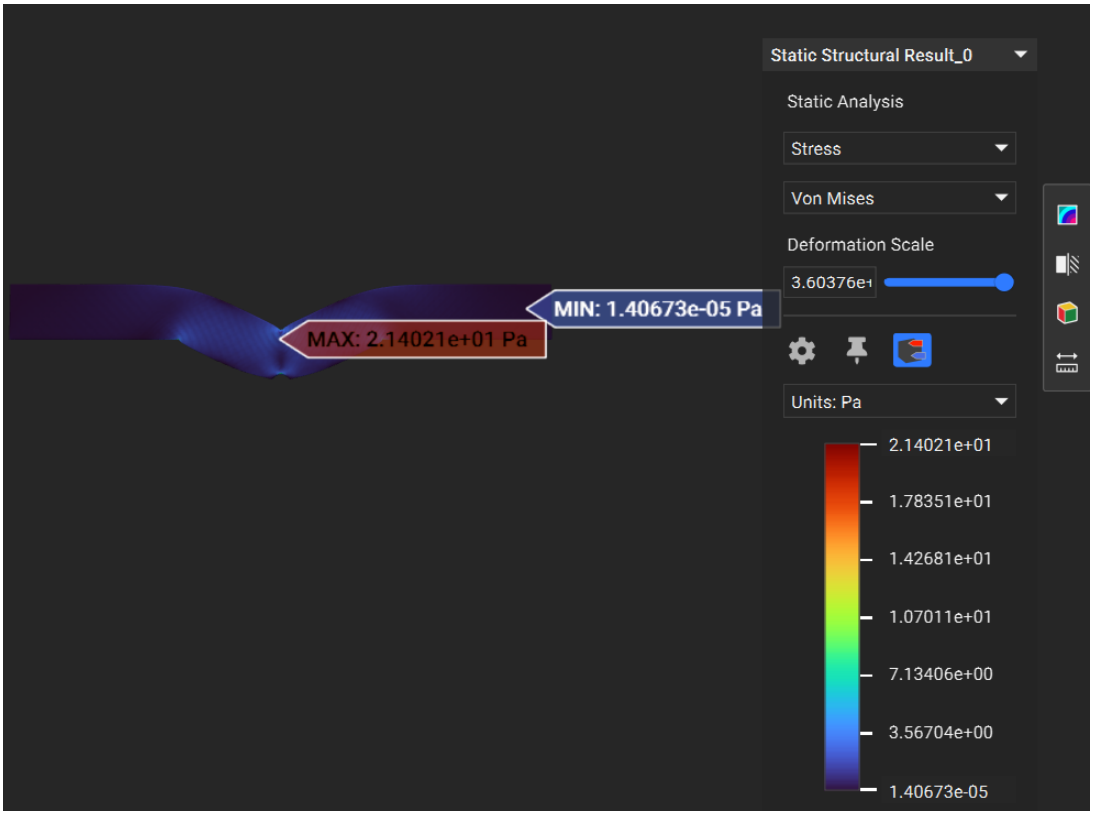
Σχήμα 4.3.5 *Απεικόνιση της δομής Diamond στο εσωτερικό του δοκιμίου κρούσης κατά τη στατική ανάλυση*



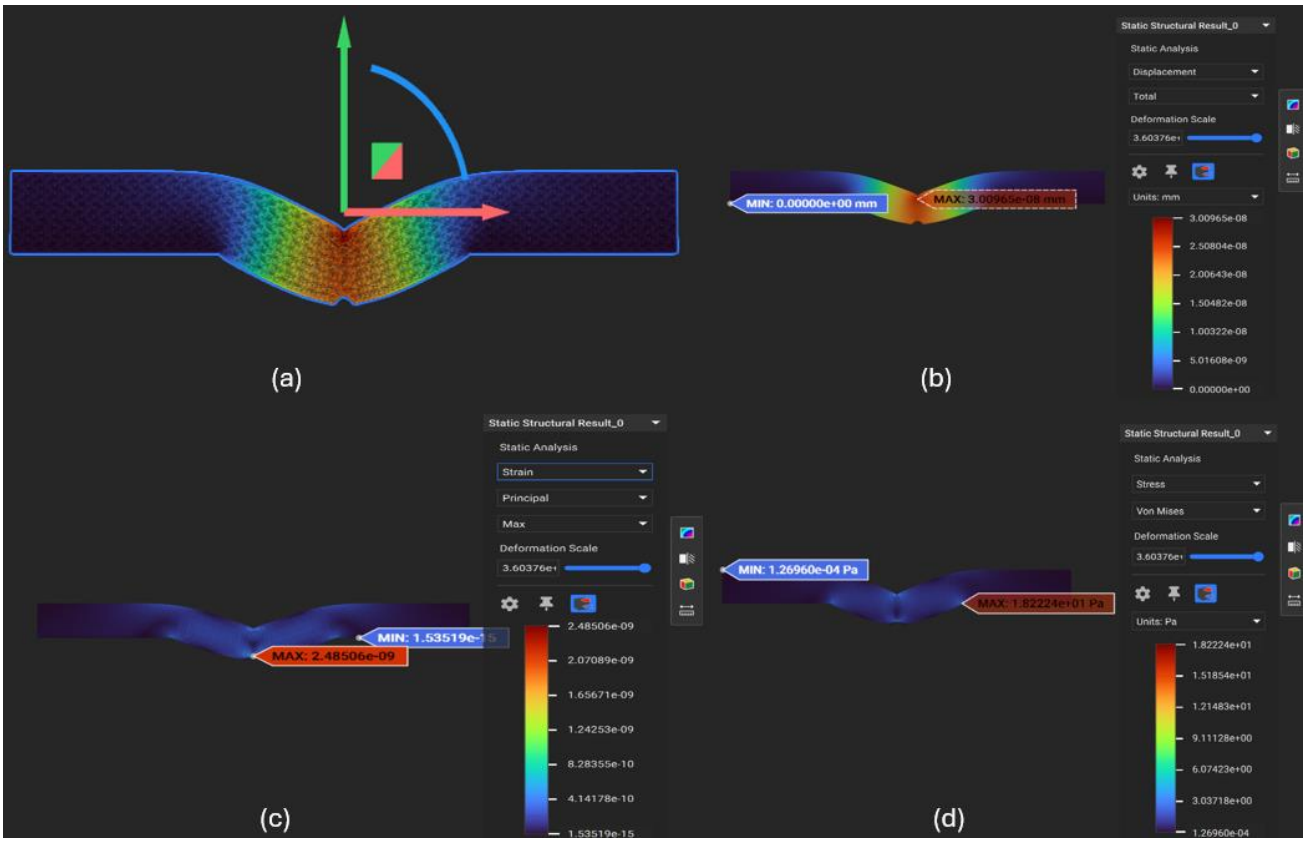
Σχήμα 4.3.6 *Τιμές μετατόπισης δοκιμίου κρούσης με ενσωματωμένη την δομή Diamond*



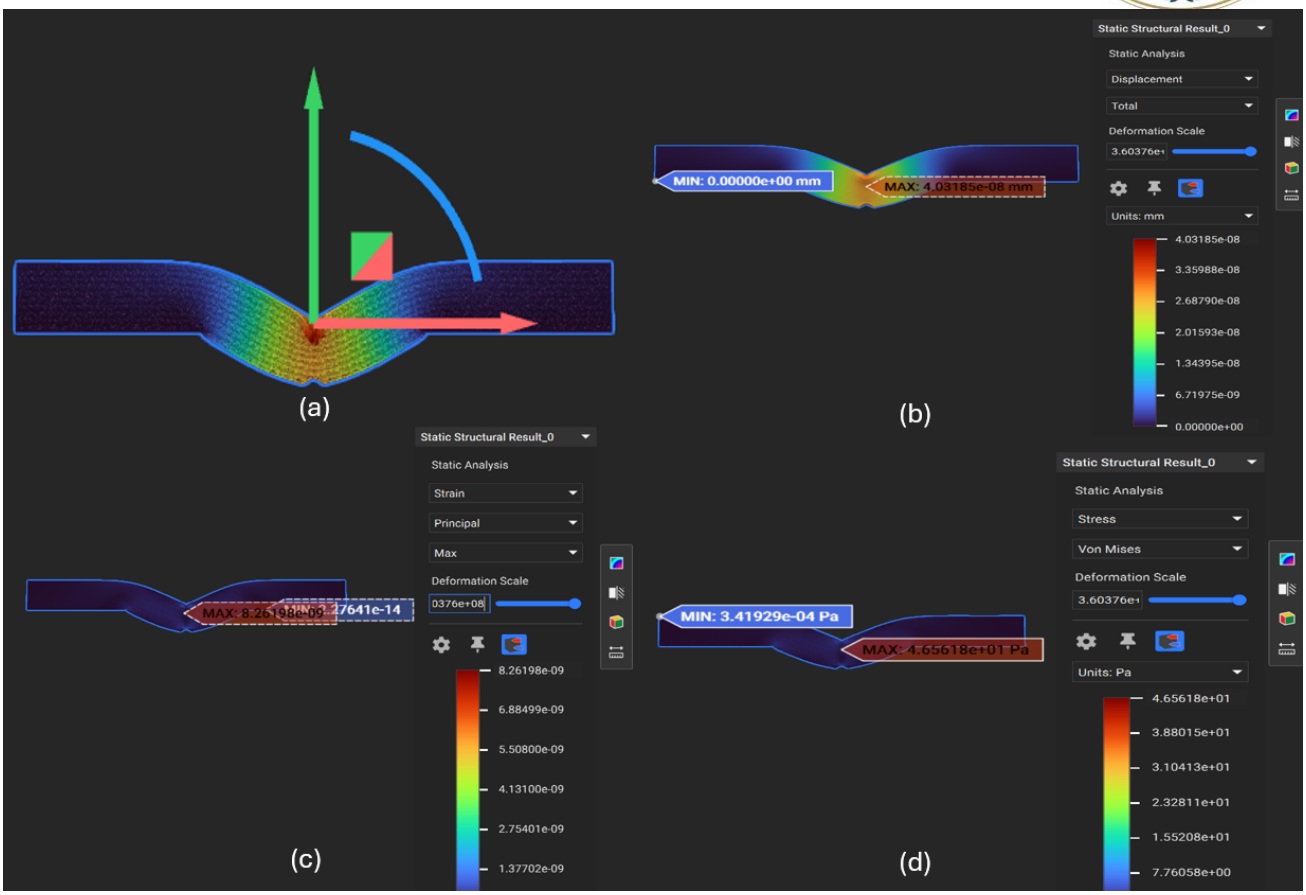
Σχήμα 4.3.7 *Τιμές παραμόρφωσης δοκιμίου κρούσης με ενσωματωμένη την δομή Diamond*



Σχήμα 4.3.8 *Τιμές τάσης Von Mises δοκιμίου κρούσης με ενσωματωμένη την δομή Diamond*



Σχήμα 4.3.8 *Αποτελέσματα συνολικής μετατόπισης, παραμόρφωσης και τάσης Von Mises που προέκυψαν από την προσομοίωση δοκιμίου κρούσης για την δομή Gyroid*



Σχήμα 4.3.8 *Αποτελέσματα συνολικής μετατόπισης, παραμόρφωσης και τάσης Von Mises που προέκυψαν από την προσομοίωση δοκιμίου κρούσης για την δομή Split-P*

4.4 Συμπεράσματα προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα βασικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις των δοκιμίων με διαφορετικές πλεγματικές δομές στο εσωτερικό τους. Η σύγκριση πραγματοποιείται ξεχωριστά για εφελκυσμό, κάμψη και κρούση και τα βασικά συγκρίσιμα μεγέθη είναι οι μέγιστες τιμές της μετατόπισης, της παραμόρφωσης και της τάσης Von Mises. Με βάση τα μεγέθη αυτά, διακρίνονται οι διαφορές που προκαλεί η γεωμετρία της πλεγματικής δομής στην κατανομή παραμορφώσεων και τάσεων αλλά και στην συνολική απόκριση του δοκιμίου. Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται τα συμπεράσματα προσομοίωσης ανά δοκίμιο εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης με συνοπτικό σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

4.4.1 Συμπεράσματα προσομοίωσης δοκιμίων εφελκυσμού

Στον πίνακα 4.1.1.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές μετατόπισης (displacement), παραμόρφωσης (strain) και τάσης Von Mises (stress) των δοκιμίων εφελκυσμού με διαφορετικές πλεγματικές δομές (Split-P, Gyroid, Diamond). Από την ανάλυση προέκυψε ότι η δομή Gyroid παρουσιάζει την μεγαλύτερη μέγιστη μετατόπιση, ακολουθεί η δομή Diamond ενώ η Split-P εμφανίζει την μικρότερη μετατόπιση. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι, υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης η δομή Gyroid παρουσιάζει μία πιο ενδοτική συνολική απόκριση συγκριτικά με τις άλλες δύο.

Οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης και των τριών δομών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, και όπως φαίνεται και στον πίνακα η Split-P εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή ενώ η Diamond παρουσιάζει την χαμηλότερη

μέγιστη παραμόρφωση. Επιπλέον, την μεγαλύτερη τιμή μέγιστης τάσης Von Mises εμφανίζει η Split-P, ακολουθεί η Gyroid ενώ την μικρότερη τιμή παρουσιάζει η Diamond.

Συνοψίζοντας, στο σενάριο του εφελκυσμού η δομή Gyroid παρουσιάζει την μεγαλύτερη μετατόπιση. Ενώ η Split-P εμφάνισε τις μεγαλύτερες μέγιστες τιμές τάσης και παραμόρφωσης, γεγονός που υποδηλώνει έντονη τοπική συγκέντρωση καταπόνησης, δηλαδή αυξημένη πιθανότητα τοπικής αστοχίας σε συγκεκριμένα σημεία της πλεγματικής δομής.

	Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση (mm)	**Μέγιστη Κύρια Παραμόρφωση**	**Μέγιστη Ισοδύναμη Τάση Von Mises (Pa)**
Split-P	2.40942e-01	1.24365e-02	4.41134e+07
Gyroid	2.77892e-01	1.23242e-02	4.28431e+07
Diamond	2.56200e-01	1.05996e-02	3.91435e+07

Πίνακας 4.4.1.1 *Σύγκριση μέγιστων τιμών προσομοίωσης δοκιμίου εφελκυσμού για δομές Split-P, Gyroid και Diamond*

4.4.2 Συμπεράσματα προσομοίωσης δοκιμίων κάμψης

Από τον πίνακα 4.2.1 προκύπτει ότι η δομή Gyroid εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή μέγιστης μετατόπισης, ενώ η Split-P την μικρότερη. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι στο σενάριο κάμψης η δομή Split-P είναι πιο άκαμπτη σε σχέση με τις άλλες δύο δομές.

Η μέγιστη κύρια παραμόρφωση είναι υψηλότερη για την δομή Split-P, ακολουθεί η Gyroid ενώ την χαμηλότερη τιμή παρουσιάζει η Gyroid. Παράλληλα, η Gyroid εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή τάσης Von Mises σε σχέση με την Diamond και την Split-P η οποία μάλιστα εμφανίζει τη χαμηλότερη. Τα αποτελέσματα αυτά, δείχνουν ότι η Gyroid εμφανίζει υψηλότερα επίπεδα καταπόνησης. Ενώ Split-P παρά την μέγιστη τιμή που παρουσιάζει, έχει την χαμηλότερη τιμή τάσης, γεγονός που σχετίζεται με διαφορετικό μηχανισμό παραμόρφωσης του πλέγματος και διαφοροποιημένη κατανομή της καταπόνησης.

	Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση (mm)	**Μέγιστη Κύρια Παραμόρφωση**	**Μέγιστη Ισοδύναμη Τάση Von Mises (Pa)**
Split-P	1.19194e+00	3.65594e-02	1.29597e+08
Gyroid	1.32721e+00	3.40985e-02	1.73365e+08
Diamond	1.24006e+00	2.97571e-02	1.43718e+08

Πίνακας 4.4.2.1 *Συγκριτικά αποτελέσματα μέγιστων τιμών προσομοίωσης δοκιμίου κάμψης για δομές Split-P, Gyroid και Diamond*

4.4.3 Συμπεράσματα προσομοίωσης δοκιμίων κρούσης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την ανάλυση κρούσης που αναλύονται στον πίνακα 4.4.3.1 η δομή Split-P παρουσιάζει τις μεγαλύτερες μέγιστες τιμές μετατόπισης, παραμόρφωσης και τάσης Von Mises συγκριτικά με τις άλλες δύο δομές. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει η δομή εμφανίζει πιο έντονη τοπική συγκέντρωση καταπόνησης υπό το συγκεκριμένο σενάριο φόρτισης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της εφαρμογής Acceleration Load σε στατική ανάλυση, τα μεγέθη είναι πολύ μικρά και δεν αντιστοιχούν με τις τιμές ενός δυναμικού πειράματος. Παρόλα αυτά, είναι χρήσιμα καθώς η σύγκριση εστιάζει στην σχετική διαφοροποίηση μεταξύ των τριών δομών.

	Μέγιστη Συνολική Μετατόπιση (mm)	**Μέγιστη Κύρια Παραμόρφωση**	**Μέγιστη Ισοδύναμη Τάση Von Mises (Pa)**
Split-P	4.03185e-08	8.26198e-09	4.65618e+01
Gyroid	3.00965e-08	2.48506e-09	1.82224e+01
Diamond	3.51849e-08	3.98428e-09	2.14021e+01

Πίνακας 4.4.3.1 *Συγκριτικά αποτελέσματα μέγιστων τιμών στατικής ανάλυσης (Acceleration Load) δοκιμίου κρούσης για τις δομές Split-P, Gyroid και Diamond*

Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διαδικασία

Το παρόν κεφάλαιο αποτελείται από την ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας που διεξήχθη στην παρούσα διπλωματική. Αρχικά, γίνεται περιγραφή της διαδικασίας τρισδιάστατης εκτύπωσης των δοκιμίων, όπου συμπεριλαμβάνονται οι βασικές παράμετροι παραγωγής καθώς και τα στάδια προετοιμασίας που ακολουθήθηκαν μέχρι την ολοκλήρωση της εκτύπωσης.

Επιπλέον, παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων και συγκεκριμένα οι δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης. Για κάθε δοκιμή, περιγράφονται οι συνθήκες φόρτισης, οι μετρήσεις που καταγράφηκαν και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με στόχο την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, μέσω των οποίων θα μπορέσει να γίνει σύγκριση της απόκρισης των τριών διαφορετικών πλεγματικών δομών καθώς και συσχέτιση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση.

5.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση δοκιμίων

Στην παρούσα διπλωματική, πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη εκτύπωση των δοκιμίων που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, και συγκεκριμένα τα αντικείμενα κατασκευάστηκαν μέσω διαδοχικής απόθεσης υλικού σε στρώσεις. Η προσθετική κατασκευή επιλέχθηκε καθώς τα δοκίμια θα υποβληθούν σε μηχανικές δοκιμές, επομένως η γρήγορη, ελεγχόμενη και επαναλήψιμη παραγωγή τους ήταν αναγκαία.

Στην εργασία, έγινε εφαρμογή της μεθόδου FDM, στην οποία πραγματοποιείται τήξη θερμοπλαστικού νήματος το οποίο εξωθείται μέσω θερμαινόμενου ακροφυσίου και εναποτίθεται σε προκαθορισμένη τροχιά σύμφωνα με το ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Για την εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε ο εκτυπωτής Bambu Lab P1S (σχήμα 5.1.1) ενώ η προετοιμασία των μοντέλων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό slicing Bambu Studio. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται η προετοιμασία που χρειάστηκε να γίνει πριν την εκτύπωση, οι βασικές παράμετροι που ορίστηκαν στον slicer καθώς και τα παραγόμενα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν για τις δοκιμές.



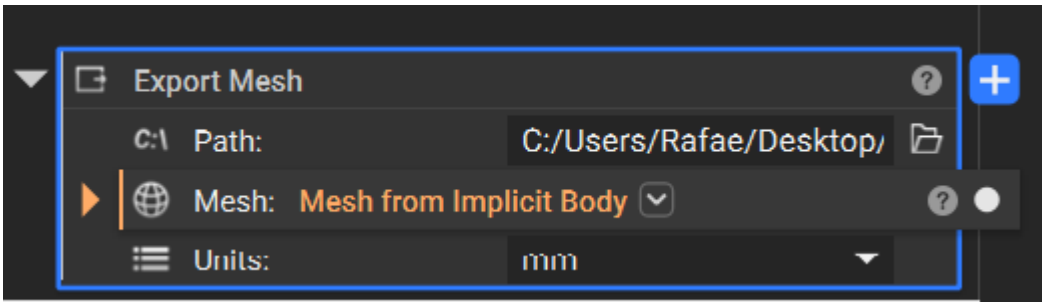
Σχήμα 5.1.1 *Απεικόνιση του τρισδιάστατου εκτυπωτή Bambu Lab P1S*

5.1.1 Προετοιμασία πριν την εκτύπωση

Πριν την εκτύπωση πραγματοποιήθηκε μία σειρά βημάτων για την προετοιμασία των δοκιμίων, έτσι ώστε να ακολουθηθεί μία επαναλαμβανόμενη και κοινή διαδικασία για όλες τις πλεγματικές δομές (Split-P, Gyroid, Diamond). Η διαδικασία ήταν η εξής:

1) **Εξαγωγή των μοντέλων σε αρχείο εκτύπωσης STL**

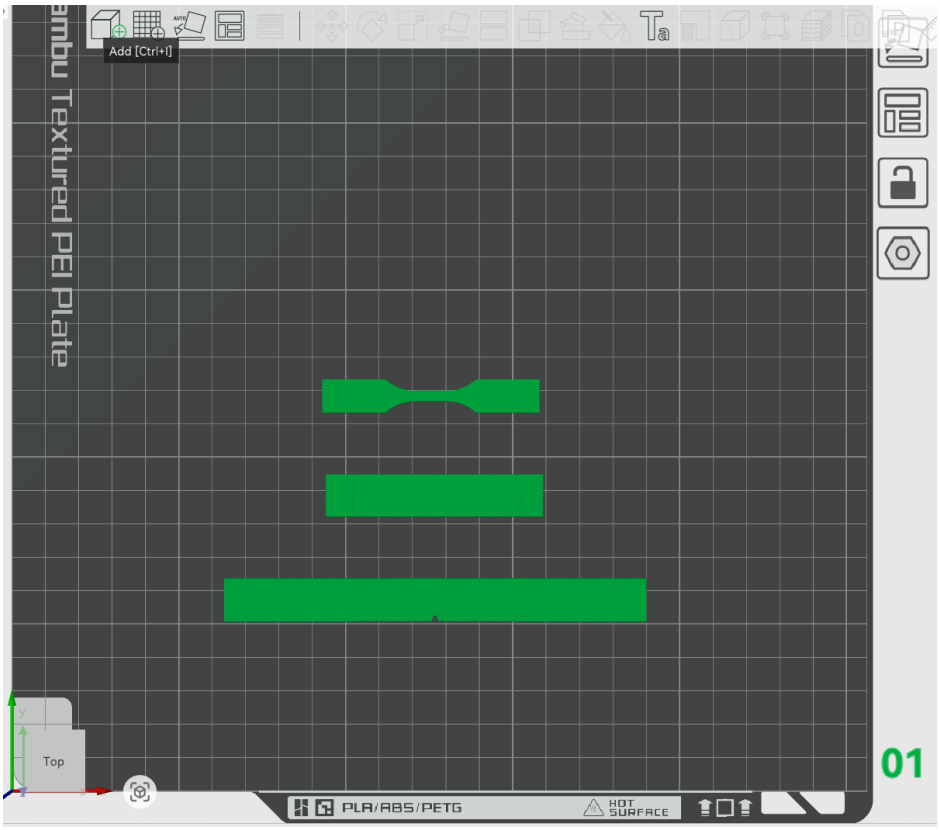
Τα τρισδιάστατα μοντέλα δοκιμίων έπρεπε να μετατραπούν σε κατάλληλη μορφή για την τρισδιάστατη εκτύπωση και συγκεκριμένα σε μορφή STL. Επομένως, έγινε εισαγωγή του block Export Mesh στον λογισμικό n-topology, όπου στο πεδίο path επιλέχθηκε η μορφή με την οποία θα αποθηκευόταν το αρχείο ενώ στο πεδίο Mesh εισήχθη η εντολή Mesh from Implicit Body. Με αυτόν τον τρόπο, το ψηφιακό μοντέλο είναι πλήρως συμβατό με το λογισμικό slicing.



Σχήμα 5.1.1.1 *Εξαγωγή του mesh από το n-topology σε αρχείο STL (Export Mesh), ώστε να εισαχθεί στο λογισμικό slicing*

2) **Εισαγωγή των αρχείων στο λογισμικό (slicer)**

Στο στάδιο αυτό, έγινε εισαγωγή των αρχείων στο λογισμικό Bambu Studio, όπου έγινε έλεγχος της θέσης τους στην πλάκα (bed) και της γεωμετρίας τους.



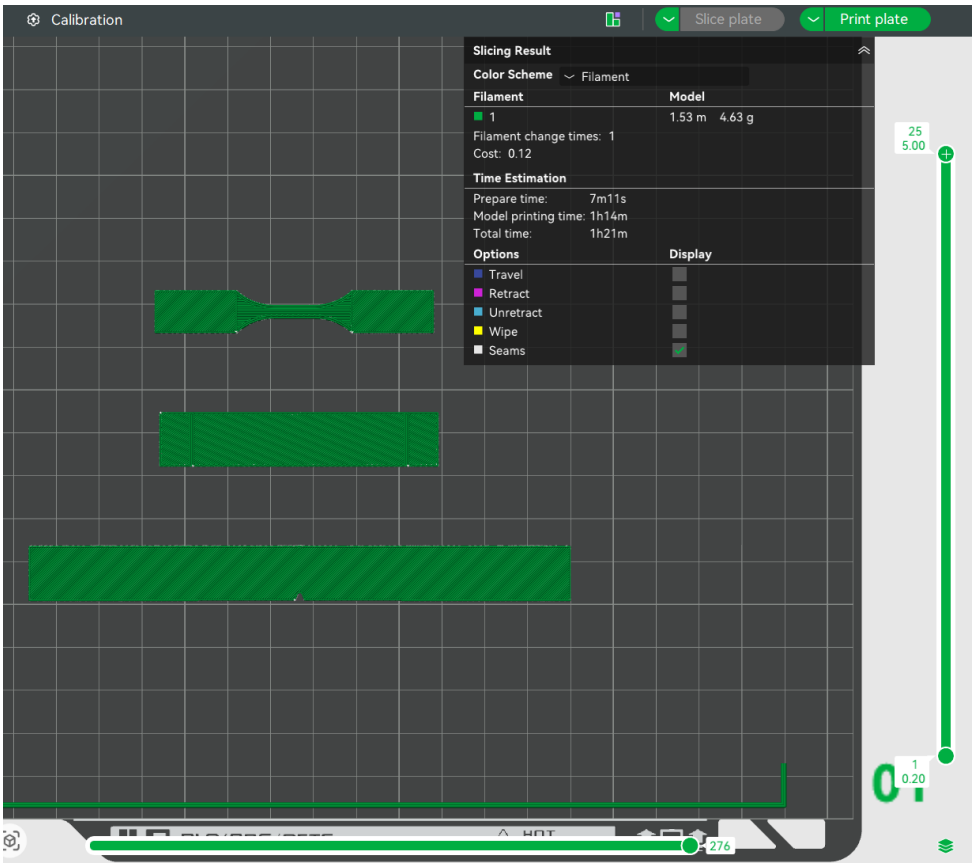
Σχήμα 5.1.1.2 *Ενδεικτική εισαγωγή τριών δοκιμίων (εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης) στον slicer Bambu Studio*

3) Καθορισμός παραμέτρων εκτύπωσης

Στην συνέχεια, ορίστηκαν οι παράμετροι εκτύπωσης, οι οποίες παρουσιάζονται στην επόμενη υποενότητα και συγκεκριμένα στον πίνακα 5.1.1. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι παράμετροι διατηρήθηκαν κοινές για όλα τα δοκίμια και δεν υπήρξαν αλλαγές.

4) Slice

Εφόσον καθορίστηκαν οι βασικές παράμετροι εκτύπωσης, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία slicing, με την οποία το λογισμικό διαχωρίζει (κόβει) το μοντέλο σε διαδοχικές στρώσεις και υπολογίζει τις διαδρομές απόθεσης υλικού (toolpaths) για κάθε layer. Μετά την ολοκλήρωση του slicing, το λογισμικό παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα να γνωρίζει την ποσότητα του υλικού που θα χρειαστεί καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο εκτύπωσης, διευκολύνοντας έτσι τον έλεγχο της διαδικασίας παραγωγής.



Σχήμα 5.1.1.3 *Εκτέλεση της διαδικασίας slicing και αποτελέσματα εκτιμώμενου χρόνου εκτύπωσης και κατανάλωσης υλικού*

5) Εξαγωγή κώδικα εκτύπωσης (G-code)

Τελευταίο βήμα πριν δοθεί εντολή για εκτύπωση, είναι η εξαγωγή G-code, ο οποίος περιλαμβάνει όλες τις εντολές κίνησης και εξώθησης που εκτελεί ο 3D printer. Συγκεκριμένα, εντολές κίνησης του ακροφυσίου (συντεταγμένες X,Y,Z), ποσότητα υλικού, ταχύτητα, θερμοκρασίες κ.ο.κ.

6) Εκτύπωση

Εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία εξαγωγής του G-code, το αρχείο μεταφέρθηκε στον εκτυπωτή Bambu Lab P1S μέσω της εντολής print από τον slicer. Κατά την έναρξη της εκτύπωσης έγινε έλεγχος της σωστής πρόσφυσης του πρώτου layer καθώς και η ομαλή εξαγωγή του υλικού PLA. Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από την πλάκα ώστε να ελεγχθούν πριν από τις μηχανικές δοκιμές.

5.1.2 Παράμετροι εκτύπωσης

Οι παράμετροι εκτύπωσης επιλέχθηκαν με προσοχή αφού πρώτα έγιναν διάφορες δοκιμές, έτσι ώστε να μπορέσει να αποδοθεί στα δοκίμια η πολυπλοκότητα των δομών στο εσωτερικό και επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι, τα δοκίμια εκτυπώθηκαν χωρίς υποστηρίγματα (supports), αλλά για την βελτίωση της πρόσφυσης χρησιμοποιήθηκε brim (περιμετρική επιφάνεια), έτσι ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα αποκόλλησης των δοκιμίων κατά την εκτύπωση. Οι τιμές διατηρήθηκαν σταθερές για όλα τα δοκίμια (εφελκυσμού, κάμψης, κρούσης) και για όλες τις πλεγματικές δομές και συνοψίζονται στον πίνακα 5.1.2.

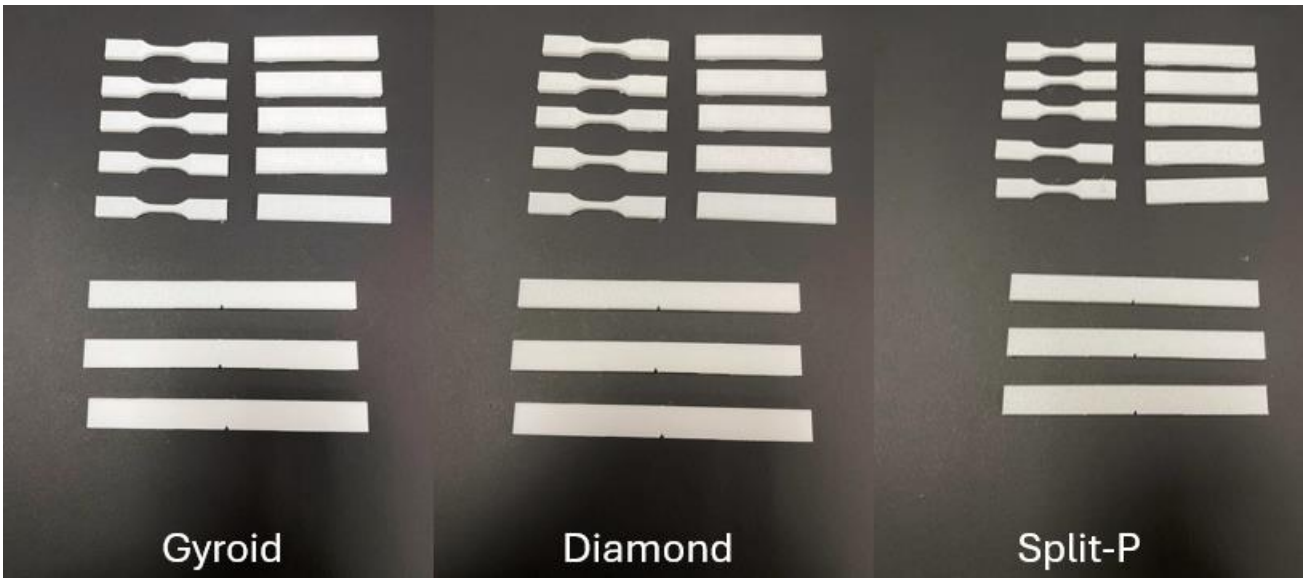
Παράμετρος	**Τιμή**
Υλικό	PLA
Διάμετρος ακροφυσίου (Nozzle)	0.4 mm

Θερμοκρασία ακροφυσίου	220°C
Θερμοκρασία bed	55°C
Layer height	0.1 mm
Ταχύτητα εκτύπωσης	200 mm/s
Infill	15 % (Grid)
Supports	Όχι
Brim width	5 mm
Ψύξη	100%

Πίνακας 5.1.2 *Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων*

5.1.3 Παραγόμενα δοκίμια

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα τελικά δοκίμια εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης που παρήχθησαν έπειτα από την τρισδιάστατη εκτύπωση. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εκτυπώθηκαν 39 δοκίμια συνολικά, 5 δοκίμια για κάθε δομή στην περίπτωση του εφελκυσμού και την κάμψης και 3 για κάθε δομή στα δοκίμια κρούσης. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες των παραγόμενων δοκιμίων και η παρουσίαση γίνεται ανά τύπο δοκιμίου, ώστε να είναι εμφανής η τελική τους μορφή.

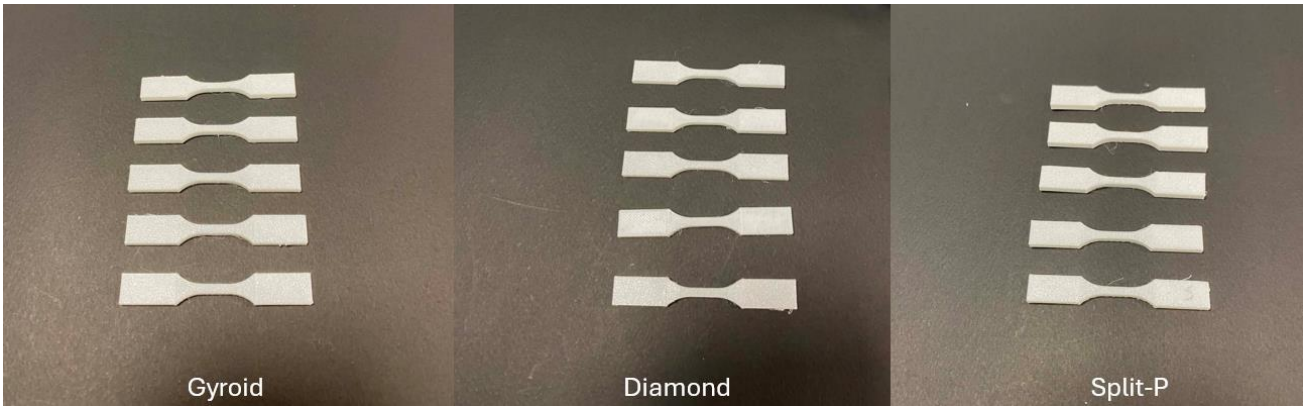


Σχήμα 5.1.3.1 *Παραγόμενα δοκίμια εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης με ενσωματωμένες τις δομές Gyroid, Diamond και Split-P*

5.1.3.1 Δοκίμια εφελκυσμού



Σχήμα 5.1.3.1.1 *Στιγμιότυπο από την διαδικασία εκτύπωσης δοκιμίων εφελκυσμού*

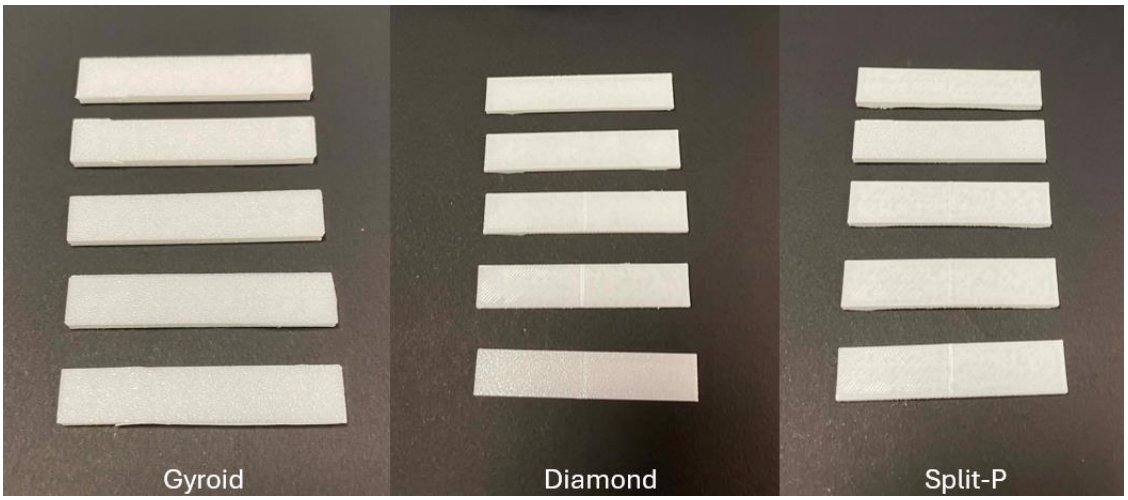


Σχήμα 5.1.3.1.2 *Απεικόνιση τελικών δοκιμίων εφελκυσμού με ενσωματωμένες πλεγματικές δομές Gyroid, Diamond, Split-P*

5.1.3.2 Δοκίμια κάμψης



Σχήμα 5.1.3.2.1 *Στιγμιότυπο από την παραγωγή δοκιμίων κάμψης*



Σχήμα 5.1.3.2.2 *Απεικόνιση των τελικών δοκιμίων κάμψης με ενσωματωμένες πλεγματικές δομές Gyroid, Diamond, Split-P*

5.1.3.3 Δοκίμια κρούσης



Σχήμα 5.1.3.3.1 *Διαδικασία εκτύπωσης δοκιμίων κρούσης*

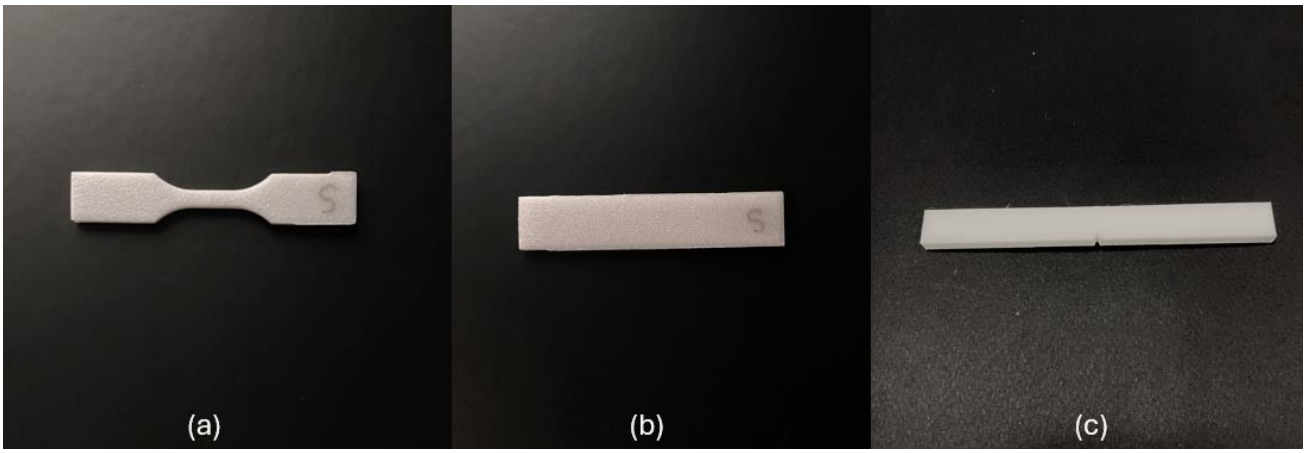


Σχήμα 5.1.3.3.2 *Στιγμιότυπο από την διαδικασία εκτύπωσης δοκιμίων κρούσης, όπου διακρίνεται η πρώτη στρώση της πλεγματικής δομής Split-P*

5.1.3.4 Συμπαγή δοκίμια

Επιπλέον, εκτυπώθηκαν τρία συμπαγή (solid) δοκίμια αναφοράς, ένα για κάθε σενάριο φόρτισης. Τα δοκίμια αυτά, παράχθηκαν με σκοπό να λειτουργήσουν ως βάση για την σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια που

περιείχαν πλεγματικές δομές. Κατά αυτόν τρόπο, δόθηκε η δυνατότητα αξιολόγησης της επίδρασης των πλεγμάτων TPMS στην μηχανική απόκριση. Η διαδικασία παραγωγής παρέμεινε ίδια, με τις παραμέτρους εκτύπωσης και το ίδιο υλικό, ούτως ώστε η σύγκριση να είναι πλήρως τεκμηριωμένη.



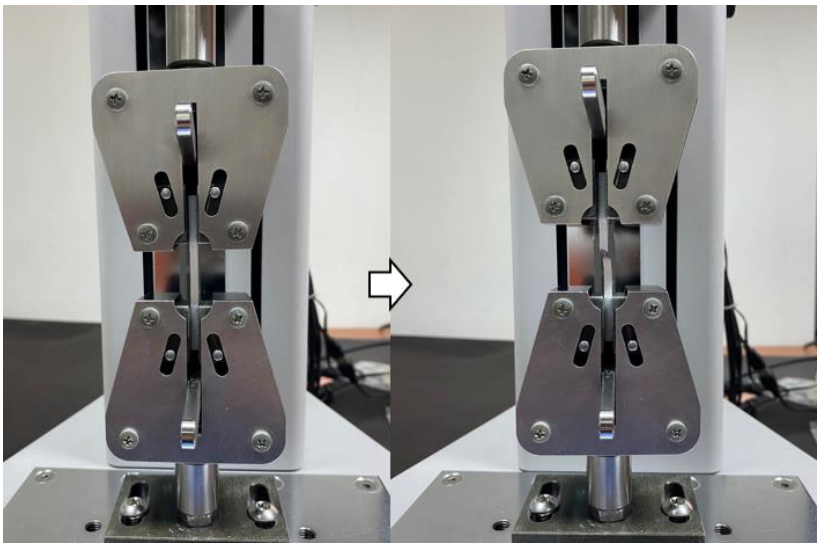
Σχήμα 5.1.3.4.1*: Απεικόνιση solid δοκιμίων (a) εφελκυσμού, (b) κάμψης και (c) κρούσης*

5.2 Πειραματικές δοκιμές

Σε αυτή τη ενότητα παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την αξιολόγηση της μηχανικής απόκρισης των δοκιμίων που αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Τα σενάρια φόρτισης ήταν τρία και συγκεκριμένα εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης έτσι ώστε διερευνηθεί η συμπεριφορά των δομών τόσο σε αξονική και καμπτική φόρτιση όσο και σε δυναμική φόρτιση λόγω κρούσης.

5.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σε κοινό μηχάνημα δοκιμών, το οποίο επιτρέπει ελεγχόμενη εφαρμογή δύναμης/μετατόπισης και καταγράφει τα αντίστοιχα μεγέθη καθ’ όλη την διάρκεια της δοκιμής. Συγκεκριμένα, κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε κατάλληλα μεταξύ των σιαγόνων σύσφιξης της μηχανής και εφαρμόστηκε αξονική έλξη με σταθερό ρυθμό της κεφαλής. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: (α)ταχύτητα εφελκυσμού 10 mm/min και (β) θερμοκρασία δωματίου. Η διαδικασία που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.1.1 παρέμεινε η ίδια για όλα τα δοκίμια.



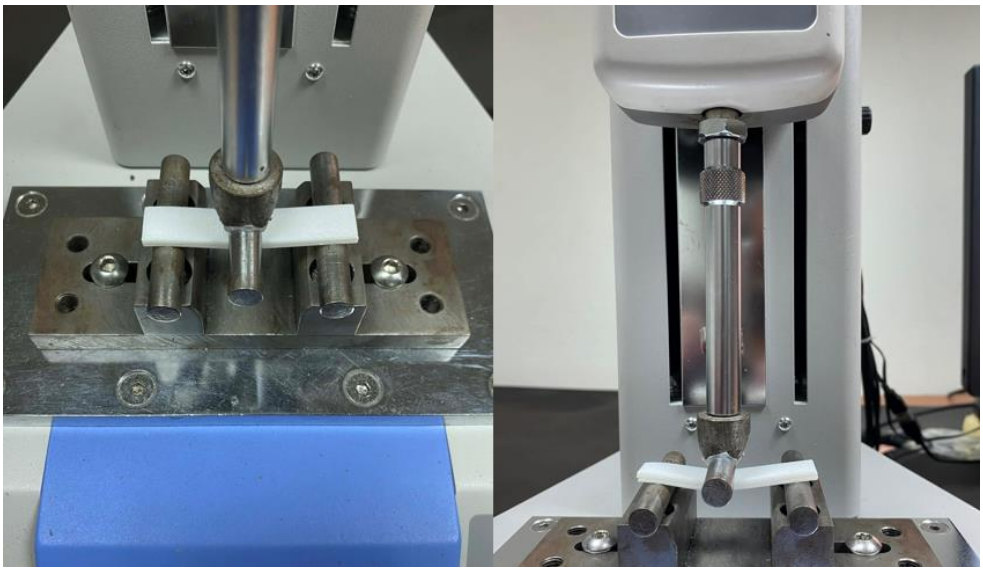
Σχήμα 5.2.1.1 *Εφαρμογή δοκιμίου μεταξύ των σιαγόνων συγκράτησης του μηχανήματος δοκιμών εφελκυσμού και θραύση του δοκιμίου*

5.2.2 Δοκιμές κάμψης

Για τις δοκιμές κάμψης χρησιμοποιήθηκε συμβατικό εργαστηριακό σύστημα δοκιμών, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.2.1. Τα δοκίμια κάμψης τοποθετήθηκαν ευθυγραμμισμένα πάνω στις δύο στηρίξεις της μηχανής και δοκιμάστηκαν σε ένα σύστημα κάμψης τριών σημείων σε θερμοκρασία δωματίου και με ταχύτητα 10 mm/min. Η εφαρμογή του φορτίου πραγματοποιείται μέσω της άνω κεφαλής του μηχανήματος.



Σχήμα 5.2.2.1 *Συσκευή κάμψης*



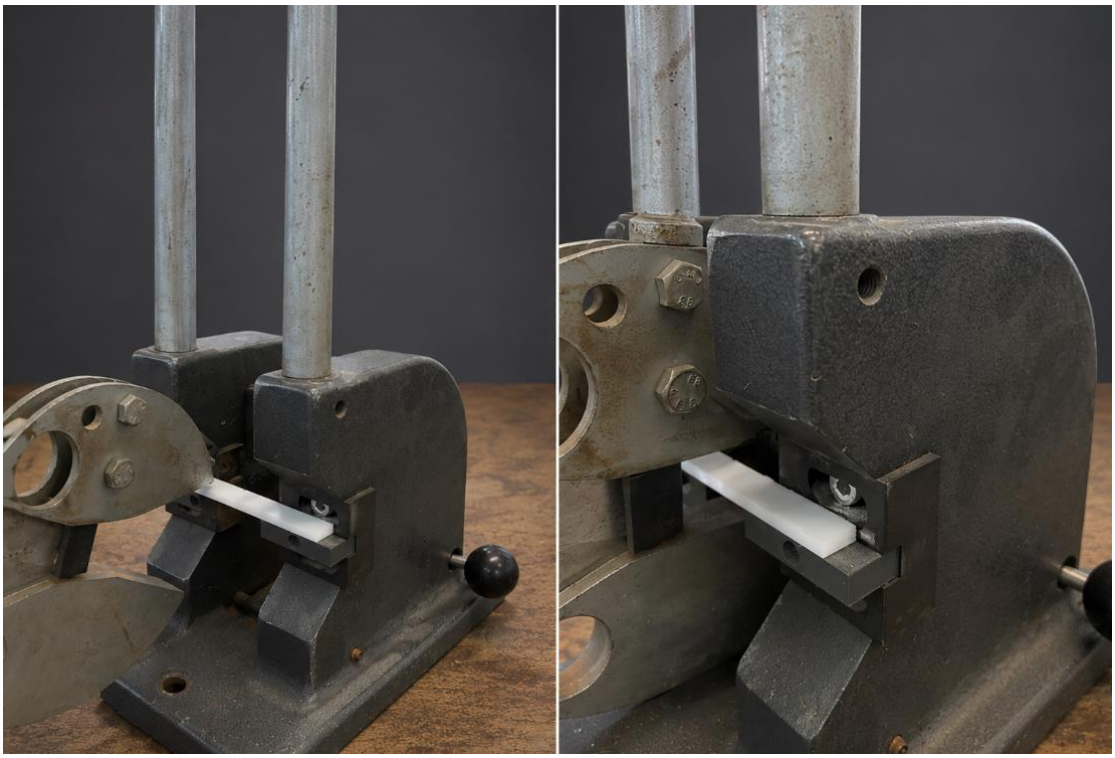
Σχήμα 5.2.2.2 *Απεικόνιση της διαδικασίας δοκιμής κάμψης*

5.2.3 Δοκιμές κρούσης

Οι δοκιμές κρούσης πραγματοποιήθηκαν στο μηχάνημα Terco MT220 Charpy (σχήμα 5.2.3.1), το οποίο έχει σταθερό ύψος 367mm και λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στις στηρίξεις με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η εγκοπή να βρίσκεται αντίθετα από την πλευρά κρούσης. Στην συνέχεια αφέθηκε το εκκρεμές από γωνία 30 μοιρών, με σταθερή ταχύτητα κρούσης, το οποίο προσέκρουσε στο δοκίμιο και προκάλεσε θραύση. Η διαδικασία παρέμεινε ίδια για όλα τα δοκίμια κρούσης.



Σχήμα 5.2.3.1 *Μηχάνημα δοκιμών κρούσης Terco MT220 Charpy*



Σχήμα 5.2.3.2 *Στιγμιότυπα από την διαδικασία δοκιμής κρούσης, λίγο πριν την θραύση του δοκιμίου*

5.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού, κάμψης και κρούσης. Η ανάλυση αφορά όλα τα δοκίμια που παράχθηκαν και αναλύθηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Παρόλα αυτά δεν δόθηκε ιδιαίτερη ανάλυση για τα solid δοκίμια όπου πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή για κάθε σενάριο φόρτισης, καθώς σκοπός της εργασίας είναι να αναλυθεί η μηχανική συμπεριφορά των πλεγματικών δομών και τα συμπαγή χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως δοκίμια αναφοράς. Για τα lattice δοκίμια πραγματοποιήθηκαν πέντε επαναλήψεις για κάθε δομή στην περίπτωση εφελκυσμού και κάμψης και τρεις επαναλήψεις για κάθε δομή στην κρούση. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω δίνονται ως μέση τιμή ±τυπική απόκλιση.

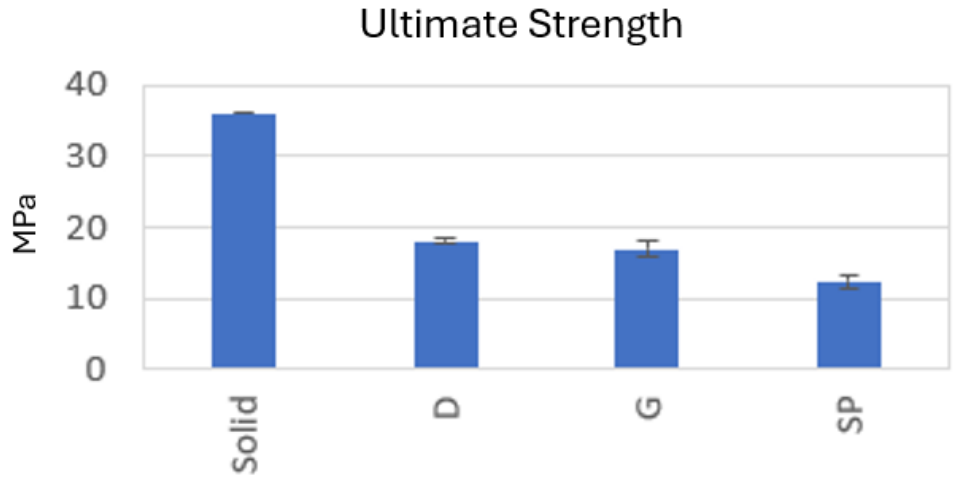
5.3.1 Αποτελέσματα εφελκυσμού

Στον πίνακα 5.3.1.1 παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού. Για την ακρίβεια, καταγράφονται η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό sB (ultimate strength), το μέτρο ελαστικότητας E (elastic modulus) και η σκληρότητα (toughness), δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απορροφάται από το δοκίμιο μέχρι την αστοχία.

Δομή	**sB (MPa)**	**E (MPa)**	**Toughness (MJ/m^3)**
Solid	36.05	633.16	1.69
Diamond	18.09 ±0.45	277.91 ±9.44	1.04±0.14
Gyroid	16.91 ±1.11	267.42 ±14.53	0.85±0.13
Split-P	12.39 ±1.01	196.11 ±16.46	0.89±0.15

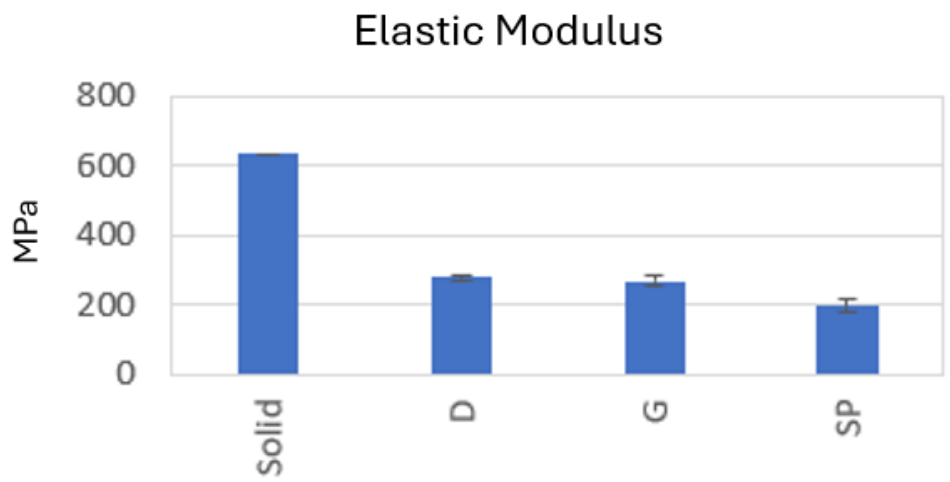
Πίνακας 5.3.1.1 *Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού για τα δοκίμια solid, diamond, gyroid και split-p: μέγιστη αντοχή sB, μέτρο ελαστικότητας E και ανθεκτικότητα (toughness)*

Στο σχήμα 5.3.1.1 παρουσιάζεται η αντοχή σε εφελκυσμό όλων των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη μελέτη. Παρατηρείται ότι το solid δοκίμιο εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή, γεγονός αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης σχετικής πυκνότητας (συμπαγές). Από τις TPMS δομές φαίνεται ότι η Diamond είναι πιο ανθεκτική καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή ενώ ακολουθεί η Gyroid με μικρή διαφορά. Η Split-P εμφανίζει την μικρότερη τιμή γεγονός που σημαίνει ότι η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάσε γρήγορη αστοχία υπό αξονική φόρτιση.



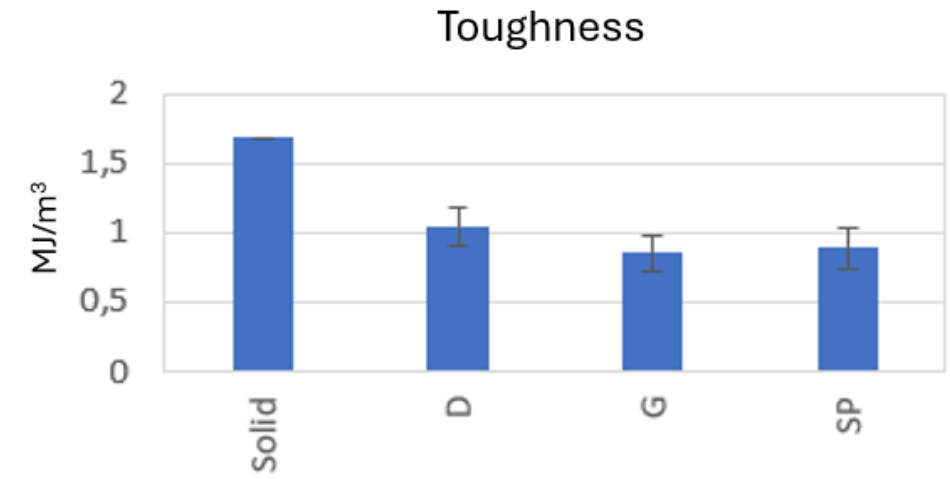
Σχήμα 5.3.1.1 *Διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής σε εφελκυσμό (ultimate strength, sB) για τα δοκίμια Solid, Diamond, Gyroid, Split-P*

Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3.1.2 παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας των δομών, το οποίο εκφράζει την ακαμψία (δυσκαμψία) στην αρχή της φόρτισης (ελαστική περιοχή). Μεταξύ των τριών TPMS δομών φαίνεται ότι η Diamond έχει την μεγαλύτερη τιμή ακολουθεί η Gyroid με πολύ μικρή διαφορά ενώ πιο εύκαμπτη είναι η δομή Split-P.



Σχήμα 5.3.1.2 *Διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας για Solid, Diamond, Gyroid, Split-P δοκίμια*

Το σχήμα 5.3.1.3 παρουσιάζει τις τιμές της σκληρότητας, δηλαδή πόση ενέργεια απορρόφησαν τα δοκίμια πριν αστοχήσουν. Όπως είναι λογικό το δοκίμιο solid έχει την μέγιστη τιμή, ενώ από τις δομές την μεγαλύτερη τιμή εμφανίζει η Diamond. Την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή παρουσιάζει η Split-P ενώ ακολουθεί η Gyroid με μικρή διαφορά. Μέσω της σύγκρισης αυτής, προκύπτει ότι η δομή Diamond έχει μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πριν την θραύση.

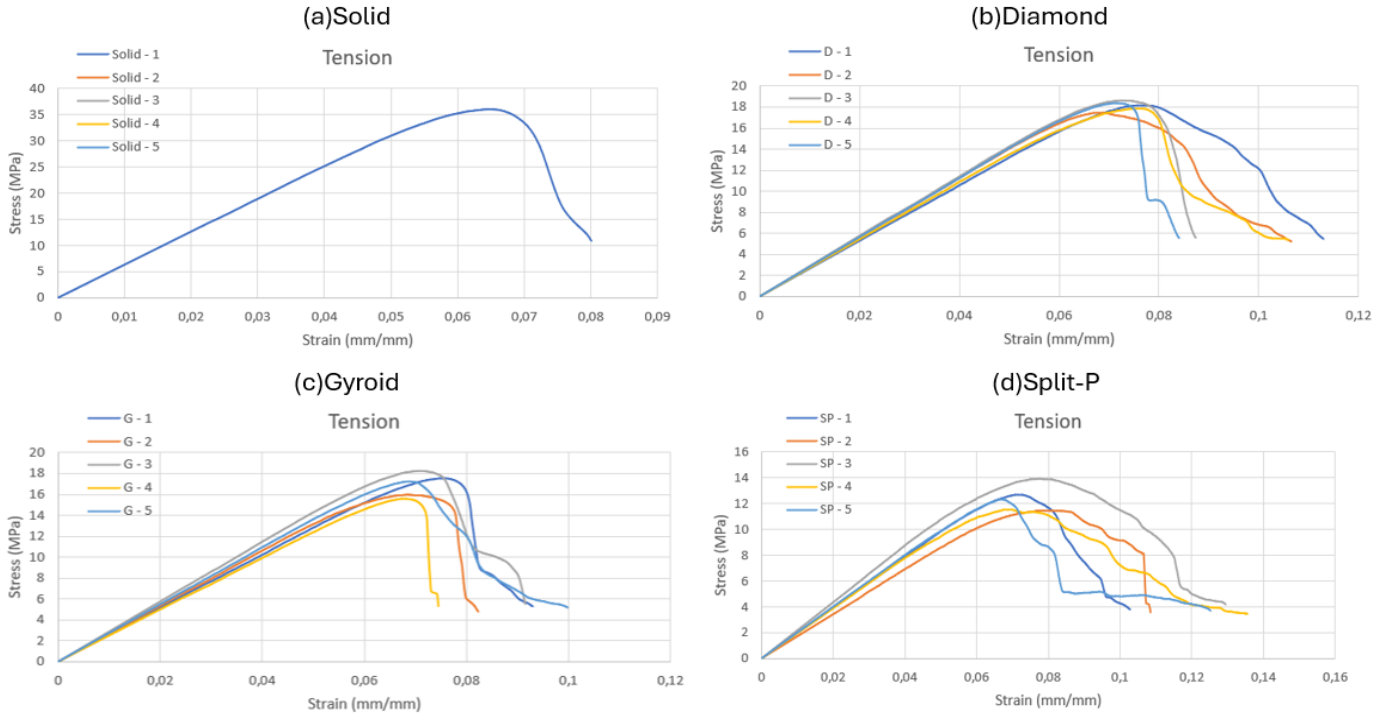


Σχήμα 5.3.1.3 *Διάγραμμα αποτελεσμάτων ανθεκτικότητας (σκληρότητας) σε εφελκυσμό μεταξύ Solid, Diamond, Gyroid, Split-P δοκιμίων*

Αξίζει να σημειωθεί, ότι πέρα από τις τιμές που παρουσιάστηκαν παραπάνω προέκυψαν και δεδομένα για την ποσοστιαία μεταβολή, η οποία παρουσιάζει το πόσο διαφέρει μία δομή lattice από το solid σε ποσοστό (%). Οι TPMS δομές παρουσιάζουν μείωση της αντοχής κατά περίπου 49.8% (Diamond), 53.1% (Gyroid) και 65.6% (Split-P). Επιπλέον, το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται κατά 56.1% (Diamond), 57.8 (Gyroid ΚΑΙ 69% (Split-P). Τέλος, η σκληρότητα παρουσίασε μείωση κατά 38.2% (Diamond), 49.6% (Gyroid) και 47.3% (Split-P).

Στο σχήμα 5.3.1.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα για κάθε κατηγορία δοκιμίου. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε ένα δοκίμιο με την αρχική κλίση να σχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας, το μέγιστο σημείο (peak) με την μέγιστη αντοχή και το εμβαδόν κάτω κάτω από την καμπύλη με την σκληρότητα. Στο διάγραμμα του συμπαγούς δοκιμίου παρατηρείται υψηλότερη τιμή τάσης, ενώ τα δοκίμια με πλεγματική δομή παρουσιάζουν χαμηλότερα επίπεδα τάσης και διαφορετική μορφή καμπυλών, λόγω του ότι το φορτίο μεταφέρεται μέσω των λεπτότοιχων επιφανειών του πλέγματος. Η Diamond, παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές τάσης, ακολουθεί η Gyroid και τέλος η Split-P γεγονός που υποδηλώνει μειωμένη αντοχή σε αξονική φόρτιση. Επίσης, οι πτώσεις τάσης που παρατηρούνται μετά το μέγιστο σημείο σχετίζονται με προοδευτική αστοχία των δομών και παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των επαναλήψεων.

Συμπερασματικά, οι καμπύλες αποδεικνύουν ότι η τοπολογία του πλέγματος επηρεάζει την μέγιστη αντοχή καθώς και τον τρόπο εξέλιξης της αστοχίας, με την Diamond να παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά στον εφελκυσμό μεταξύ των TPMS δομών που αξιολογήθηκαν.



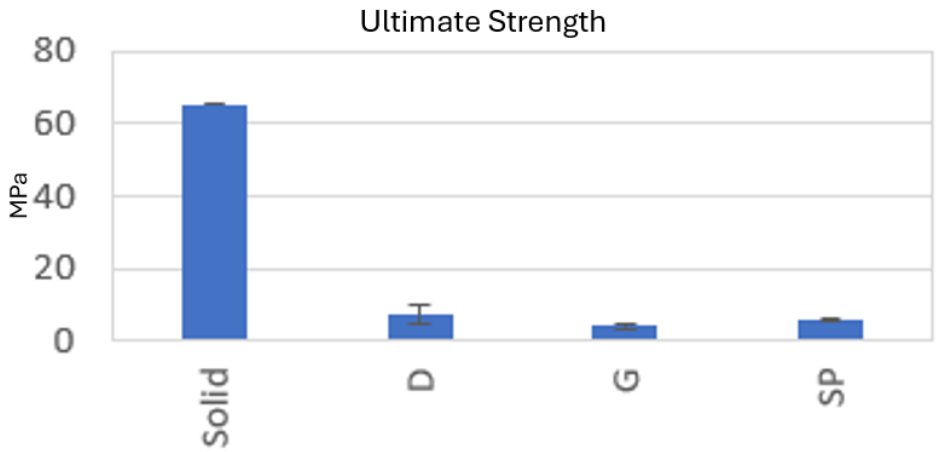
Σχήμα 5.3.1.4 *Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης εφελκυσμού για δοκίμια Solid, Diamond, Gyroid και Split-P*

5.3.2 Αποτελέσματα κάμψης

Δομή	**sB (MPa)**	**E (MPa)**	**Toughness (MJ/m^3)**
Solid	65.3	2259.12	2.27
Diamond	7.35±2.35	875.78±312.34	0.22±0.05
Gyroid	4.09±0.7	346.18±253.11	0.15±0.02
Split-P	6.03±0.56	569.13±47.2	0.22±0.02

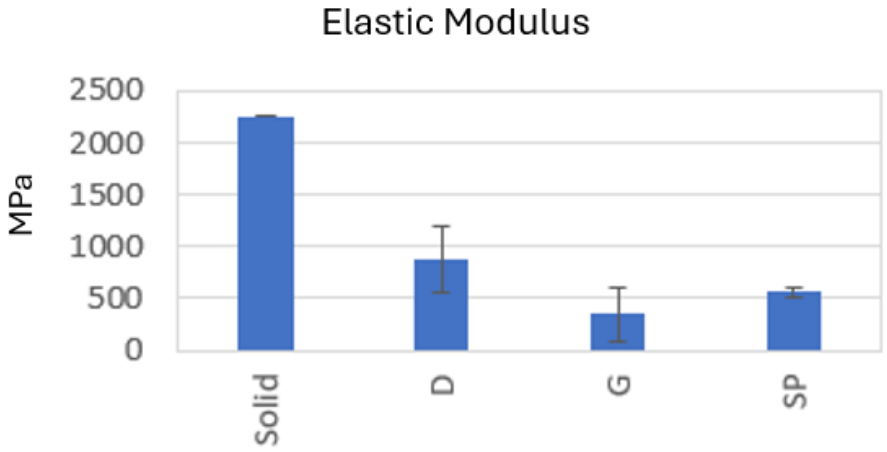
Πίνακας 5.3.2.1 *Αποτελέσματα κάμψης για τα δοκίμια solid, diamond, gyroid και split-p: μέγιστη αντοχή sB, μέτρο ελαστικότητας E και ανθεκτικότητα (toughness)*

Στο σχήμα 5.3.2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη όλων των δοκιμίων. Όπως ήταν αναμενόμενο το solid δοκίμιο υπερέχει συγκριτικά με τις TPMS δομές, οι οποίες εμφανίζουν πολύ χαμηλότερες τιμές λόγω μειωμένης ενεργού διατομής (μικρότερη πυκνότητα) και προοδευτικής αστοχίας του πλέγματος. Την μεγαλύτερη αντοχή μεταξύ των δομών παρουσίασε η Diamond καθώς και η Split-P, ωστόσο η Diamond εμφανίζει αυξημένη διασπορά (error bars), γεγονός που υποδεικνύει ότι ο μηχανισμός έναρξης της βλάβης διαφοροποιείται μεταξύ δοκιμίων.



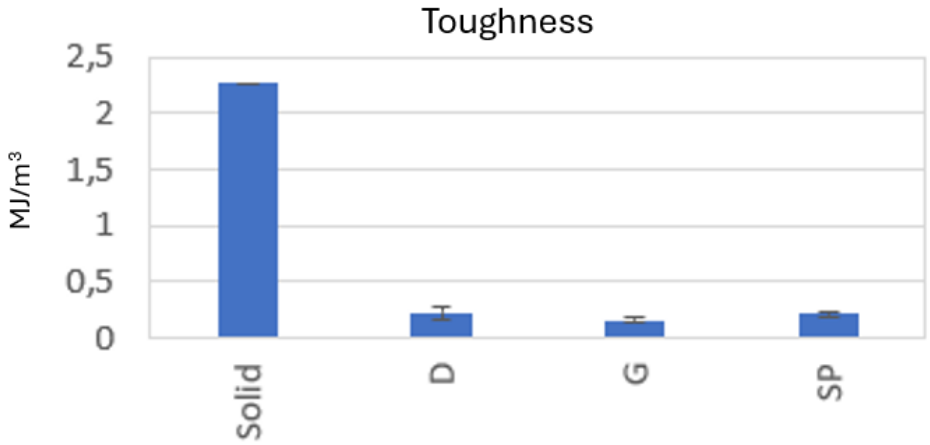
Σχήμα 5.3.2.1 *Διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων Solid, Diamond, Gyroid και Split-P*

Στο διάγραμμα που παρουσιάζει τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας (σχήμα 5.3.2.2) φαίνεται ότι οι δομές Diamond και Gyroid εμφανίζουν υψηλή διασπορά (υψηλό STDEV), γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στην ευαισθησία της αρχικής κλίσης σε φαινόμενα έδρασης στις στηρίξεις ή σε μικροολισθήσεις. Παρόλα αυτά, η Diamond παρουσιάζει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, ακολουθεί η Split-P ενώ η Gyroid έχει την μικρότερη τιμή.



Σχήμα 5.3.2.2 *Διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας για τα δοκίμια κάμψης Solid, Diamond, Gyroid και Split-P*

Στο σχήμα 5.3.2.3 στο οποίο παρουσιάζονται οι τιμές σκληρότητας η δομές Diamond και Split-P εμφανίζουν μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας σε κάμψη σε σχέση με την Gyroid.

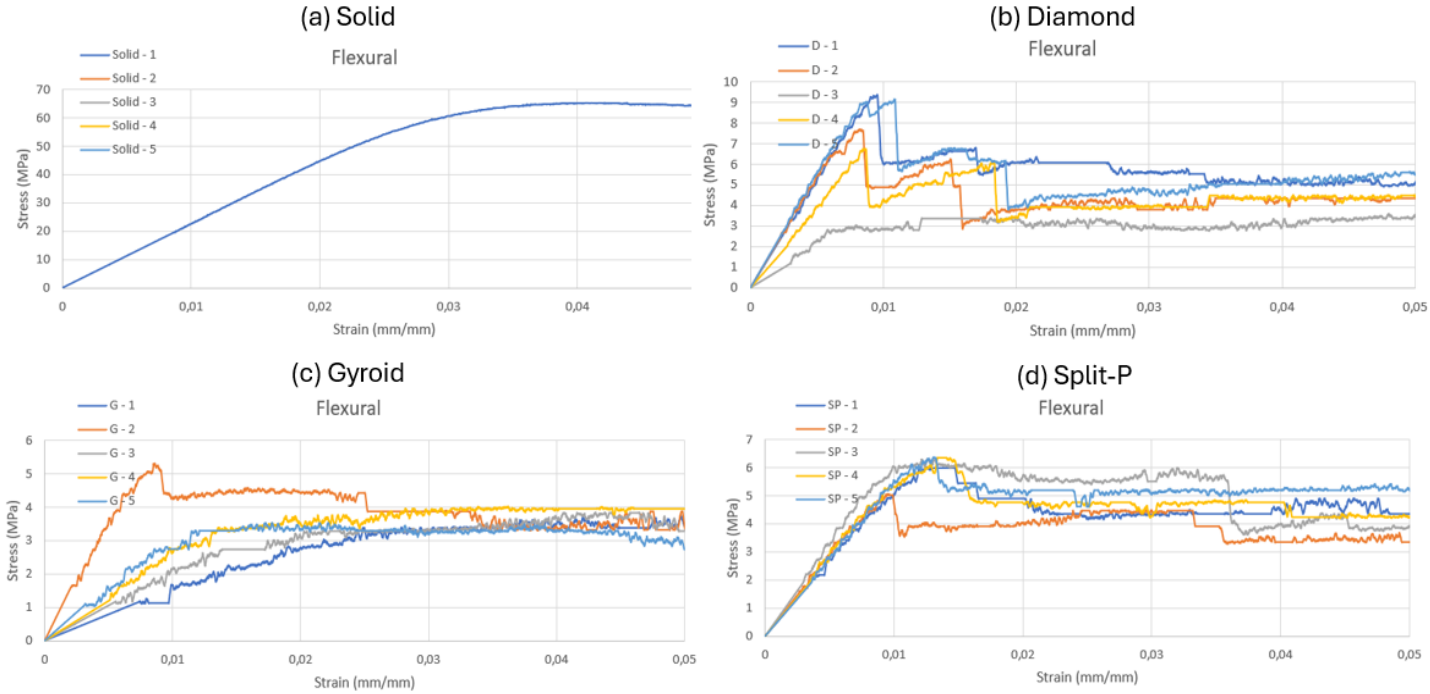


Σχήμα 5.3.2.3 *Διάγραμμα αποτελεσμάτων σκληρότητας για τα δοκίμια κάμψης Solid, Diamond και Split-P*

Επιπλέον η ποσοστιαία μεταβολή σε σχέση με το solid, οι TPMS δομές παρουσιάζουν μείωση της αντοχής κατά περίπου 88.8% (Diamond), 93.7% (Gyroid) και 90.8% (Split-P). Επιπλέον, το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται κατά 61.2% (Diamond), 84.7 (Gyroid) και 74.8% (Split-P). Τέλος, η σκληρότητα παρουσίασε μείωση κατά 90.2% (Diamond), 93.2% (Gyroid) και 90.4% (Split-P).

Η κάμψη είναι ένα σενάριο φόρτισης κατά το οποίο η απόκριση είναι συχνά μη γραμμική και εμφανίζει πτώσεις και πλατώ. Ιδίως στην περίπτωση των πλεγματικών δομών, οι απότομες πτώσεις μετά από ένα peak είναι συχνό φαινόμενο. Οι πτώσεις αυτές αποδίδονται κυρίως στην προοδευτική αστοχία (σταδιακή θραύση, τοπικό λύγισμα) του πλέγματος μετά την οποία η δομή συνεχίζει να φέρει φορτίο σε χαμηλότερο επίπεδο (πλατώ). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τα δοκίμια κάμψης δεν παρουσίασαν πλήρη θραύση, γεγονός που εξηγεί τον λόγο που οι καμπύλες στο σχήμα 5.3.2.4 συνεχίζουν σε χαμηλότερο επίπεδο και δεν τερματίζουν απότομα.

Από τα παρακάτω διαγράμματα προκύπτει ότι η δομή Diamond εμφανίζει τις υψηλότερες μέγιστες τάσεις, γεγονός που σημαίνει ότι έχει αυξημένη ικανότητα να δεχτεί καμπτικά φορτία. Παράλληλα, εμφανίζει μεγάλη διασπορά μεταξύ των επαναλήψεων και έντονες πτώσεις μετά το peak, γεγονός που δείχνει ότι η εξέλιξη της τοπικής βλάβης μεταβάλλεται από δοκίμιο σε δοκίμιο. Η Gyroid εμφανίζει χαμηλά επίπεδα τάσης και συνολικά μία αδύναμη απόκριση σε κάμψη, όπως φάνηκε και στις τιμές του πίνακα 5.3.2.1. Η Split-P, εμφανίζει μία σχετικά επαναλαμβανόμενη συμπεριφορά, με πιο σταθερό πλατώ μετά το peak, υποδεικνύοντας προοδευτική παραμόρφωση. Συμπερασματικά, η Diamond εμφανίζει καλύτερη σταθερότητα ενώ η Split-P φαίνεται να παρουσιάζει σταθερότερο μηχανισμό προοδευτικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 5.3.2.4 *Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τα δοκίμια: (a)Solid, (b)Diamond, (c)Gyroid και (d)Split-P*

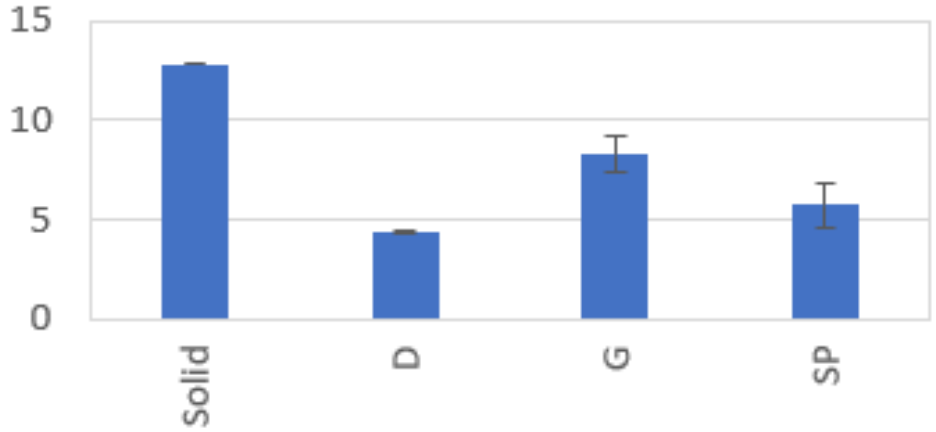
5.3.3 Αποτελέσματα κρούσης

Δομή	**Impact strength (kJ/m^2)**
Solid	12.8
Diamond	4.42±0.05
Gyroid	8.29±0.96
Split-P	5.73±1.14

Πίνακας 5.3.3.1 *Αποτελέσματα αντοχής σε κρούση των δοκιμίων Solid, Diamond, Gyroid και Split-P*

Στο σχήμα 5.3.3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα αντοχής σε κρούση κάθε κατηγορίας δοκιμίου. Μεταξύ των δομών TPMS, η Gyroid εμφανίζει την υψηλότερη αντοχή, γεγονός που υποδεικνύει καλύτερη ικανότητα απορρόφησης κρουστικής ενέργειας. Η Diamond εμφανίζει πολύ μικρή τυπική απόκλιση (πιο επαναλήψιμη συμπεριφορά), αλλά έχει την χαμηλότερη τιμή αντοχής. Η Split-P εμφανίζει την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή αντοχής σε κρούση μετά την Diamond, ενώ παρουσιάζει υψηλή διασπορά, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην δυναμική φύση της κρούσης ή στην ευαισθησία α<αστοχίας σε τοπικές ατέλειες.

Επιπλέον υπολογίστηκε και η ποσοστιαία μεταβολή όπου σε σχέση με το συμπαγές δοκίμιο, η αντοχή σε κρούση μειώνεται κατά 65.5% (Diamond), 35.2% (Gyroid) και 55.2% (Split-P).



Σχήμα 5.3.3.1 *Διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής σε κρούση των δοκιμίων Solid, Diamond, Gyroid και Split-P*

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς τριών πλεγματικών δομών της κατηγορίας TPMS, μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων και πειραματικών δοκιμών. Κατά αυτόν τον τρόπο, δόθηκε η δυνατότητα αξιολόγησης της δυσκαμψίας και της αντοχής, ενώ παράλληλα μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο κάθε πλέγμα παραμορφώνεται και απορροφά φορτίο έως την εμφάνιση αστοχίας.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις και τις πειραματικές δοκιμές, επιβεβαιώνουν ότι οι πλεγματικές δομές παρουσιάζουν μειωμένη μέγιστη αντοχή και ακαμψία συγκριτικά με μία συμπαγή δομή λόγω της χαμηλής σχετικής πυκνότητας και της μεταφοράς φορτίου μέσω λεπτότοιχων επιφανειών (κυψελίδων). Ωστόσο, η συμπεριφορά αυτή δεν είναι ίδια για όλες τις TPMS δομές και διαφέρει ανάλογα με τον κυρίαρχο μηχανισμό φόρτισης. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, η επαναληψιμότητα έχει μεγάλη σημασία καθώς κάποιες τοπολογίες παρουσίασαν με αποκλίσεις μεταξύ δοκιμίων, υποδεικνύοντας ευαισθησία σε ατέλειες εκτύπωσης ή σε διαφοροποιήσεις κατά την δοκιμή. Επιπλέον, οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ιδίως στην περίπτωση της κάμψης παρουσίασαν συμπεριφορά προοδευτικής παραμόρφωσης, με εμφάνιση πλατώ, γεγονός που ερμηνεύεται ως σταδιακή κατάρρευση και όχι ως άμεση θραύση. Τα αποτελέσματα αυτά, είναι χαρακτηριστικά των δομών πλέγματος και αποτελούν χρήσιμα στοιχεία για την αξιολόγηση τους καθώς αφορούν την λειτουργική συμπεριφορά τους πριν την αστοχία.

Η σύγκριση μεταξύ των τριών δομών που μελετήθηκαν (Diamond, Gyroid, Split-P), έδειξε ότι η Diamond παρουσιάζει την πιο ισχυρή συνολικά απόκριση στην περίπτωση αξονικής φόρτισης, λόγω των μέγιστων τιμών αντοχής και ενεργειακής ικανότητας που επέδειξε πριν την αστοχία. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκαν αποκλίσεις μεταξύ των επαναλήψεων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η υψηλή επίδοση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ευαισθησία έναρξης τοπικής αστοχίας. Η Gyroid, παρουσίασε μία ομαλή συμπεριφορά, με χαμηλότερα όμως επίπεδα αντοχής και τάση για μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Το πλεονέκτημα της δομής αυτής, είναι ότι εμφάνισε καλύτερη απορρόφηση ενέργειας στην περίπτωση κρουστικού φορτίου γεγονός που πιθανότατα αποδίδεται στην ομοιόμορφη μορφολογία της. Η Split-P εμφάνισε μία προοδευτική εξέλιξη της παραμόρφωσης και πιο σταθερή συμπεριφορά μετά την αστοχία, αποτυπώνοντας μία πιο συνεπή μορφή καμπυλών. Παράλληλα, οι μέγιστες τιμές που παρουσίασε δεν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικές, για παράδειγμα στα διαγράμματα αντοχής σε εφελκυσμό η Split-P είχε την χαμηλότερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με τις δομές Diamond και Gyroid.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή την εργασία, είναι ότι η επιλογή TPMS δομής πρέπει να γίνεται με βάση τον μηχανισμό φόρτισης αλλά και το ζητούμενο σε κάθε περίπτωση εφαρμογής. Συγκεκριμένα, εάν το ζητούμενο είναι η μέγιστη αντοχή και δυσκαμψία τότε η Diamond παρουσιάζει ισχυρά αποτελέσματα. Αν το κριτήριο είναι η απορρόφηση ενέργειας τότε η Gyroid είναι μία από τις δομές που θα μπορούσαν να

επιλεχθούν, ενώ στην περίπτωση που σκοπός είναι η διατήρηση φέρουσας ικανότητας μετά τις τοπικές αστοχίες, η Split-P είναι μία πιθανή επιλογή.

Βιβλιογραφία/Αναφορές

[1] ‘How Johannes F. Gottwald Pioneered Modern 3D Printing’. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.bridgewaterstudio.net/blog/how-johannes-f-gottwald-pioneered-modern-3d-printing

[2] ‘Chuck Hull’, *Βικιπαίδεια*. 11 Νοέμβριος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chuck_Hull&oldid=1321636596

[3] ‘1498418106490678865-04938816’. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://repositories.lib.utexas.edu/server/api/core/bitstreams/1a3b9221-d288-42a8-b656-c0bd04977e9c/content

[4] ‘Selective laser sintering’, *Wikipedia*. 13 Ιανουάριος 2026. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Selective_laser_sintering&oldid=1332710379

[5] ‘S. Scott Crump’, *Βικιπαίδεια*. 28 Σεπτέμβριος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=S._Scott_Crump&oldid=1313814842

[6] ‘Electron-beam additive manufacturing’, *Wikipedia*. 2 Φεβρουάριος 2026. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electron-beam_additive_manufacturing&oldid=1336133367

[7] ‘Objet Geometries’, *Wikipedia*. 8 Νοέμβριος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Objet_Geometries&oldid=1321036304

[8] ‘RepRap’, *Wikipedia*. 8 Ιανουάριος 2026. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=RepRap&oldid=1331896445

[9] ‘Microsoft Word - 09537 Spectrum User Manual_RevF.doc’. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://fab.cba.mit.edu/content/tools/spectrum510/09537%20Spectrum%20User%20Manual_RevF.pdf

[10] ‘MakerBot’, *Wikipedia*. 28 Σεπτέμβριος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=MakerBot&oldid=1313940944

[11] Τ. εκτύπωσηΟδηγοί24 λεπτά ανάγνωσης, ‘Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing’, Formlabs. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/

[12] K. Pathak *κ.ά.*, ‘3D printing in biomedicine: advancing personalized care through additive manufacturing’, *Explor Med.*, τ. 4, τχ. 6, σελ. 1135–1167, Δεκεμβρίου 2023, doi: 10.37349/emed.2023.00200.

[13] J. Yang, B. Li, J. Liu, Z. Tu, και X. Wu, ‘Application of Additive Manufacturing in the Automobile Industry: A Mini Review’, *Processes*, τ. 12, τχ. 6, σελ. 1101, Ιουνίου 2024, doi: 10.3390/pr12061101.

[14] V. Raja, S. Zhang, J. Garside, C. Ryall, και D. Wimpenny, ‘Rapid and cost-effective manufacturing of high-integrity aerospace components’, *Int J Adv Manuf Technol*, τ. 27, τχ. 7–8, σελ. 759–773, Ιανουαρίου 2006, doi: 10.1007/s00170-004-2251-z.

[15] J. D, ‘Recent 3D Printing Applications in the Aeronautics Sector’, 3Dnatives. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-aeronautics-010320184/

[16] B. Jackson, ‘3D printing buildings, a summary of additive manufacturing in construction’, 3D Printing Industry. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-buildings-summary-additive-manufacturing-

construction-97312/
[17] ‘Τρισδιάστατη Εκτύπωση Κοσμημάτων: Διαδικασία, Υλικά, Πλεονεκτήματα και Παραδείγματα’. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.3erp.com/blog/3d-printing-jewellery/
[18] *Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary:* doi: 10.3403/30448424.
[19] M. Rezapourian, I. Jasiuk, M. Saarna, και I. Hussainova, ‘Selective laser melted Ti6Al4V split-P TPMS lattices for bone tissue engineering’, *International Journal of Mechanical Sciences*, τ. 251, σελ. 108353, Αυγούστου 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108353.
[20] ‘Figure 2 Application areas of FDM’, ResearchGate. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/Application-areas-of-FDM_fig1_356209638
[21] ‘Πώς λειτουργεί η στερεολιθογραφία ή η τρισδιάστατη εκτύπωση SLA; | Manufactur3D’. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/
[22] ‘SLS 3D printing - Selective Laser Sintering in PA6 | ArpTech’. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.arptech.com.au/sls.htm
[23] ‘SLS 3D Printing – The Ultimate Guide’, FacFox Docs. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://facfox.com/docs/kb/sls-3d-printing-the-ultimate-guide
[24] ‘Άμεση σύντηξη μετάλλου με λέιζερ - μια επισκόπηση | ScienceDirect Topics’. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-metal-laser-sintering
[25] ‘Τι είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση DMLS και πώς λειτουργεί’; Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.javelin-tech.com/blog/2022/05/what-is-dmls-3d-printing-and-how-does-it-work/
[26] ‘Binder Jetting | Ομάδα Έρευνας Προσθετικής Κατασκευής | Πανεπιστήμιο Loughborough’. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/
[27] ‘Figure 2. Bending-and Stretch-dominated unit cells.’, ResearchGate. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Οκτώβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/Bending-and-Stretch-dominated-unit-cells_fig2_353503662
[28] I. Flores, N. Kretzschmar, A. H. Azman, S. Chekurov, D. B. Pedersen, και A. Chaudhuri, ‘Implications of lattice structures on economics and productivity of metal powder bed fusion’, *Additive Manufacturing*, τ. 31, σελ. 100947, Ιανουαρίου 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100947.
[29] ‘(a) BCC unit cell, (b) side view of BCC lattice structure, and (c) 3D...’, ResearchGate. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Οκτώβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/a-BCC-unit-cell-b-side-view-of-BCC-lattice-structure-and-c-3D-view-of-the-BCC_fig4_362405159
[30] S. Yuan *κ.ά.*, ‘Enhanced Compressive Mechanical Properties of Bio-Inspired Lattice Metamaterials with Taper Struts’, *Materials*, τ. 18, τχ. 1, σελ. 29, Ιανουαρίου 2025, doi: 10.3390/ma18010029.
[31] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, και M. F. Ashby, ‘Effective properties of the octet-truss lattice material’, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, τ. 49, τχ. 8, σελ. 1747–1769, Αυγούστου 2001, doi: 10.1016/S0022-5096(01)00010-2.
[32] ‘Euler–Bernoulli beam theory’, *Wikipedia*. 4 Απρίλιος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Οκτώβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory&oldid=1283944776
[33] Z. Wang, X. Jiang, G. Yang, B. Song, και H. Sha, ‘Design and mechanical performance analysis of T-BCC lattice structures’, *Journal of Materials Research and Technology*, τ. 32, σελ. 1538–1551, Σεπτεμβρίου 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.08.021.
[34] ‘(PDF) Effect of Heat Treatment on Gradient Microstructure of AlSi10Mg Lattice Structure

Manufactured by Laser Powder Bed Fusion', *ResearchGate*, Οκτωβρίου 2025, doi: 10.3390/ma13112487.
[35] B. Ohl, 'What Is the Difference Between FCC and BCC? (Crystal Structure, Properties, Interstitial Sites, and Examples)', Materials Science & Engineering Student. Ημερομηνία πρόσβασης: 22 Οκτώβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://msestudent.com/what-is-the-difference-between-fcc-and-bcc-crystal-structure-properties-interstitial-sites-and-examples/
[36] C.-P. Jiang, A. T. Wibisono, και T. Pasang, 'Selective Laser Melting of Stainless Steel 316L with Face-Centered-Cubic-Based Lattice Structures to Produce Rib Implants', *Materials*, τ. 14, τχ. 20, σελ. 5962, Ιανουαρίου 2021, doi: 10.3390/ma14205962.
[37] 'Figure 2. μCT-based numerical simulations of AM: a) FCC lattice...', ResearchGate. Ημερομηνία πρόσβασης: 22 Οκτώβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/mCT-based-numerical-simulations-of-AM-a-FCC-lattice-structure-with-heterogenous_fig1_344327116
[38] J. C. Maxwell, 'L. *On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames*', *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, τ. 27, τχ. 182, σελ. 294–299, Απριλίου 1864, doi: 10.1080/14786446408643668.
[39] V. S. Deshpande, M. F. Ashby, και N. A. Fleck, 'Foam topology: bending versus stretching dominated architectures', *Acta Materialia*, τ. 49, τχ. 6, σελ. 1035–1040, Απριλίου 2001, doi: 10.1016/S1359-6454(00)00379-7.
[40] '20 × 20 × 20 mm FCC lattice structure with a density range from 10 to...', ResearchGate. Ημερομηνία πρόσβασης: 28 Οκτώβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/202020-mm-FCC-lattice-structure-with-a-density-range-from-10-to-60-left-to-right-order_fig5_366309006
[41] 'Lattice structure with an octet truss cell', ResearchGate. Ημερομηνία πρόσβασης: 29 Οκτώβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/Lattice-structure-with-an-octet-truss-cell_fig2_363518628
[42] 'A. G. Bell & the Octet Truss « grunch.net'. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Νοέμβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://grunch.net/archives/55
[43] 'AG Bell & το Octet Truss « grunch.net'. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Νοέμβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://grunch.net/archives/55
[44] 'Alexander Graham Bell Tetrahedrals', oobject. Ημερομηνία πρόσβασης: 2 Νοέμβριος 2025. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.oobject.com/category/alexander-graham-bell-tetrahedrals/
[45] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, και M. F. Ashby, 'Effective properties of the octet-truss lattice material', *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, τ. 49, τχ. 8, σελ. 1747–1769, Αυγούστου 2001, doi: 10.1016/S0022-5096(01)00010-2.
[46] T. A. Schaedler *κ.ά.*, 'Ultralight Metallic Microlattices', *Science*, τ. 334, τχ. 6058, σελ. 962–965, Νοεμβρίου 2011, doi: 10.1126/science.1211649.
[47] L. Wang, Q. Chen, P. K. D. V. Yarlagadda, F. Zhu, Q. Li, και Z. Li, 'Single-parameter mechanical design of a 3D-printed octet truss topological scaffold to match natural cancellous bones', *Materials & Design*, τ. 209, σελ. 109986, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.109986.
[48] 'Plateau's laws', *Wikipedia*. 17 Ιούλιος 2024. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plateau%27s_laws&oldid=1234977505
[49] R. Daya Karthic, J. Joy, G. Sakthivel, και R. Nadimpalli, 'Mechanical characterization of 3D-printed Kelvin cell with varying infill densities', *Materials Today: Proceedings*, τ. 84, σελ. 41–46, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.675.
[50] X. Kong, H. Zhang, Y. Du, X. Wang, και G. Xiao, 'A study of pore scale flow and conjugate heat transfer characteristics in real and Kelvin anisotropic foams', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, τ. 221, σελ. 125024, Απριλίου 2024, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125024.
[51] 'A concentrated effort—researchers develop ceramic lattice structures for high-temperature heat exchangers - The American Ceramic Society', https://ceramics.org/. Ημερομηνία πρόσβασης: 19

Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://ceramics.org/ceramic-tech-today/ceramic-lattice-structures-for-high-temperature-heat-exchangers/
[52] 'Schwarz minimal surface', *Wikipedia*. 17 Νοέμβριος 2025. Ημερομηνία πρόσβασης: 21 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Schwarz_minimal_surface&oldid=1322685125
[53] 'Alan Schoen - Wikipedia'. Ημερομηνία πρόσβασης: 21 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/wiki/Alan_Schoen
[54] I. Maskery, N. T. Aboulkhair, A. O. Aremu, C. J. Tuck, και I. A. Ashcroft, 'Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices', *Additive Manufacturing*, τ. 16, σελ. 24–29, Αυγούστου 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.04.003.
[55] '19700020472'.
[56] K. Große-Brauckmann και W. Meinhard, 'The gyroid is embedded and has constant mean curvature companions', *Calculus of Variations and Partial Differential Equations*, 1996, doi: 10.1007/BF01261761.
[57] I. Maskery *κ.ά.*, 'Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing', *Polymer*, τ. 152, σελ. 62–71, Σεπτεμβρίου 2018, doi: 10.1016/j.polymer.2017.11.049.
[58] D. W. Abueidda, M. Elhebeary, C.-S. (Andrew) Shiang, S. Pang, R. K. Abu Al-Rub, και I. M. Jasiuk, 'Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study', *Materials & Design*, τ. 165, σελ. 107597, Μαρτίου 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107597.
[59] system, 'Triply periodic minimal surface', Grokipedia. Ημερομηνία πρόσβασης: 24 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://grokipedia.com/page/Triply_periodic_minimal_surface
[60] G. Feng, S. Li, L. Xiao, και W. Song, 'Mechanical properties and deformation behavior of functionally graded TPMS structures under static and dynamic loading', *International Journal of Impact Engineering*, τ. 176, σελ. 104554, Απριλίου 2023, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104554.
[61] J. Ma *κ.ά.*, 'Novel 3D printed TPMS scaffolds: microstructure, characteristics and applications in bone regeneration', *J Tissue Eng*, τ. 15, σελ. 20417314241263689, Ιουλίου 2024, doi: 10.1177/20417314241263689.
[62] F. Liu, D. Z. Zhang, P. Zhang, M. Zhao, και S. Jafar, 'Mechanical Properties of Optimized Diamond Lattice Structure for Bone Scaffolds Fabricated via Selective Laser Melting', *Materials*, τ. 11, τχ. 3, σελ. 374, Μαρτίου 2018, doi: 10.3390/ma11030374.
[63] X. Su, Y. Zhang, Y. Rao, K. Yeranee, και X. Wang, 'Experimental and Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Additively Manufactured Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Heat Exchangers for Micro Gas Turbine', *Aerospace*, τ. 12, τχ. 5, σελ. 416, Μαΐου 2025, doi: 10.3390/aerospace12050416.
[64] X. Guo *κ.ά.*, 'Enhancement in the mechanical behaviour of a Schwarz Primitive periodic minimal surface lattice structure design', *International Journal of Mechanical Sciences*, τ. 216, σελ. 106977, Φεβρουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106977.
[65] Y. Jung και S. Torquato, 'Fluid permeabilities of triply periodic minimal surfaces', *Phys. Rev. E*, τ. 72, τχ. 5, σελ. 056319, Νοεμβρίου 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.72.056319.
[66] R. Lai *κ.ά.*, 'Design of novel graded bone scaffolds based on triply periodic minimal surfaces with multi-functional pores', *Front. Bioeng. Biotechnol.*, τ. 13, σελ. 1503582, Φεβρουαρίου 2025, doi: 10.3389/fbioe.2025.1503582.
[67] A. FG, *albertforesg/TPMSgen*. (8 Ιανουάριος 2026). Python. Ημερομηνία πρόσβασης: 26 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://github.com/albertforesg/TPMSgen
[68] M. Rezapourian, I. Jasiuk, M. Saarna, και I. Hussainova, 'Selective laser melted Ti6Al4V split-P TPMS lattices for bone tissue engineering', *International Journal of Mechanical Sciences*, τ. 251, σελ. 108353, Αυγούστου 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108353.
[69] X.-Y. Zhang, G. Fang, L.-L. Xing, W. Liu, και J. Zhou, 'Effect of porosity variation strategy on the

performance of functionally graded Ti-6Al-4V scaffolds for bone tissue engineering', *Materials & Design*, τ. 157, σελ. 523–538, Νοεμβρίου 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.07.064.
[70] M. Ali, R. K. Sari, U. Sajjad, M. Sultan, και H. M. Ali, 'Effect of annealing on microstructures and mechanical properties of PA-12 lattice structures proceeded by multi jet fusion technology', *Additive Manufacturing*, τ. 47, σελ. 102285, Νοεμβρίου 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102285.
[71] R. Miralbes, D. Ranz, F. J. Pascual, D. Zouzias, και M. Maza, 'Characterization of additively manufactured triply periodic minimal surface structures under compressive loading', *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, τ. 29, τχ. 13, σελ. 1841–1855, Μαΐου 2022, doi: 10.1080/15376494.2020.1842948.
[72] F. Claybrook, M. Mohammed, και D. Southee, 'Investigation of additive manufactured Split P TPMS elastomeric structures for diabetic foot insoles', *Transactions on Additive Manufacturing Meets Medicine*, σελ. 664 Pages, Σεπτεμβρίου 2022, doi: 10.18416/AMMM.2022.2209664.
[73] D. Lee, M. Weber, και A. T. Yerger, 'On Alan Schoen's I-WP Minimal Surface', 8 Ιανουάριος 2024, *arXiv*: arXiv:2309.15010. doi: 10.48550/arXiv.2309.15010.
[74] C. Zhang *κ.ά.*, 'Vibration characteristics of additive manufactured IWP-type TPMS lattice structures', *Composite Structures*, τ. 327, σελ. 117642, Ιανουαρίου 2024, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117642.
[75] W. Tang *κ.ά.*, 'Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, τ. 201, σελ. 123642, Φεβρουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123642.
[76] S.-Y. Park, K.-S. Kim, B. AlMangour, D. Grzesiak, και K.-A. Lee, 'Compressive deformation behavior and energy absorption characteristic of additively manufactured sheet CoCrMo triply periodic minimal surface lattices', *Journal of Materials Research and Technology*, τ. 18, σελ. 171–184, Μαΐου 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.086.
[77] D. W. Abueidda, M. Elhebeary, C.-S. (Andrew) Shiang, R. K. Abu Al-Rub, και I. M. Jasiuk, 'Compression and buckling of microarchitectured Neovius-lattice', *Extreme Mechanics Letters*, τ. 37, σελ. 100688, Μαΐου 2020, doi: 10.1016/j.eml.2020.100688.
[78] P. Khanna, S. Sood, P. Mishra, V. Bharadwaj, A. Aggarwal, και S. J. Singh, 'Analysis of compression and energy absorption behaviour of SLM printed AlSi10Mg triply periodic minimal surface lattice structures', *Structures*, τ. 64, σελ. 106580, Ιουνίου 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.106580.
[79] E. F. Lehder, I. A. Ashcroft, R. D. Wildman, L. A. Ruiz-Cantu, και I. Maskery, 'A multiscale optimisation method for bone growth scaffolds based on triply periodic minimal surfaces', *Biomech Model Mechanobiol*, τ. 20, τχ. 6, σελ. 2085–2096, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1007/s10237-021-01496-8.
[80] S. Zou, H. Gong, και J. Gao, 'Study on design and impact energy absorption of Voronoi porous structure with tunable Poisson's ratio', *Thin-Walled Structures*, τ. 197, σελ. 111552, Απριλίου 2024, doi: 10.1016/j.tws.2023.111552.
[81] J. Liu *κ.ά.*, 'Ti6Al4V biomimetic scaffolds for bone tissue engineering: Fabrication, biomechanics and osseointegration', *Materials & Design*, τ. 234, σελ. 112330, Οκτωβρίου 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.112330.
[82] R. Wang *κ.ά.*, 'Effect of topological characteristics on manufacturability and mechanical performance of multiscale graded structures fabricated by laser powder bed fusion', *Journal of Materials Processing Technology*, τ. 337, σελ. 118721, Μαρτίου 2025, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2025.118721.
[83] A. Panesar, M. Abdi, D. Hickman, και I. Ashcroft, 'Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing', *Additive Manufacturing*, τ. 19, σελ. 81–94, Ιανουαρίου 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.11.008.
[84] D. Li, N. Dai, Y. Tang, G. Dong, και Y. F. Zhao, 'Design and Optimization of Graded Cellular Structures With Triply Periodic Level Surface-Based Topological Shapes', *J. Mech. Des*, τ. 141, τχ. 071402, Μαρτίου 2019, doi: 10.1115/1.4042617.
[85] L. J. Gibson και M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge University Press, 1997.
[86] I. Ntintakis και Z. Tampakakis, 'Optimization of bicycle helmet design with auxetic lattice structure'.

[87] A. Rajpura *κ.ά.*, ‘Performance evaluation of lattice structured bumper beam for automobile’, *AIMSMATES*, τ. 12, τχ. 3, σελ. 395–422, 2025, doi: 10.3934/matersci.2025021.
[88] ‘FIG. 1: Lattices structures in a range of lightweight part designs. (a)...’, ResearchGate. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/Lattices-structures-in-a-range-of-lightweight-part-designs-a-shows-a-cross-section_fig5_275409961
[89] ‘Isotropic octet-truss lattice structure design and anisotropy control strategies for implant application - ScienceDirect’. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127521001489
[90] ‘Jumpstart innovation with 3D-printed lattice structures’. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://oqton.com/posts/jumpstart-innovation-with-3d-printed-lattice-structures/
[91] ‘Q&A: Discover the high-performance materials’. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-materials-guide/high-performance-materials/
[92] I. Ntintakis και G. E. Stavroulakis, ‘Infill Microstructures for Additive Manufacturing’, *Applied Sciences*, τ. 12, τχ. 15, σελ. 7386, Ιουλίου 2022, doi: 10.3390/app12157386.
[93] S. Geyer και C. Hölzl, ‘Comparison of CAD Software for Designing Cellular Structures for Additive Manufacturing’, *Applied Sciences*, τ. 14, τχ. 8, σελ. 3306, Ιανουαρίου 2024, doi: 10.3390/app14083306.
[94] T. Maconachie *κ.ά.*, ‘SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges’, *Materials & Design*, τ. 183, σελ. 108137, Δεκεμβρίου 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
[95] H. Gong, X. Xing, και J. Nel, ‘Impact Strength of 3D Printed Polyether-ether-ketone (PEEK)’.
[96] D20 Committee, *Test Method for Tensile Properties of Plastics*. doi: 10.1520/D0638-14.
[97] victoradmin, ‘ASTM D638 The Essential Guide to Plastic Tensile Testing.’, Malaysia’s Universal Testing Machine Manufacturer - Victor Manufacturing Sdn Bhd. Ημερομηνία πρόσβασης: 12 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.victortestingmachine.com/astm-d638-the-definitive-guide-to-plastic-tensile-testing/
[98] ‘publication_4_2110_6379.pdf’. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_4_2110_6379.pdf
[99] ‘Autodesk Fusion’, *Wikipedia*. 17 Ιανουάριος 2026. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Ιανουάριος 2026. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Autodesk_Fusion&oldid=1333339243