

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΚΗΣ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

### ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τρισδιάστατη Εκτύπωση Κυψελωτών Δομών και Πειραματική Διερεύνηση της Επίδοσής τους υπό Δυναμική και Στατική Φόρτιση

### $\boldsymbol{\Sigma}\boldsymbol{A}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{H}\boldsymbol{\Sigma}\;\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{M}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\Sigma}$

1054571

Χρυσοχοΐδης Νικόλαος, Μέλος Ε.ΔΙ.Π. Σαραβάνος Δημήτρης, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, Φεβρουάριος 2022

## <u>Περιεχόμενα</u>

Πίνακας Εικόνων	
Περίληψη	6
Abstract	7
Κεφάλαιο 1: Σχεδίαση δομών ΤΡΜS	
1.1 Εισαγωγή – Σκοπός	
1.2 Δομές Lattice	10
1.2.1 Ορισμός και κατηγορίες Lattice δομών	10
1.2.2 Χρήση δομών	
1.3 Δομές TPMS	
1.4 Διαθέσιμα Λογισμικά Σχεδίασης	16
1.5 Διαδικασία σχεδίασης με χρήση λογισμικού	
Κεφάλαιο 2 : Κατασκευή δομών ΤΡΜS	19
2.1 Εισαγωγή – Σκοπός	19
2.2 Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)	19
2.2.1 Ορισμός	19
2.2.2 Εφαρμογές , χρήσεις και οφέλη της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης	20
2.2.2 Είδη Προσθετικής Κατασκευής	
2.2.3 Στάδια Παραγωγής Κομματιών με Προσθετική Κατασκευή	
2.3 Κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων	
2.4 Αξιολόγηση της διαδικασίας κατασκευής	
Κεφάλαιο 3 : Πειραματική Διαδικασία	
3.1 Εισαγωγή – Σκοπός	
3.2 Μερικός Χαρακτηρισμός Υλικού	
3.3 Δυναμικός Χαρακτηρισμός (Modal Analysis)	41
3.3.1 Πειραματική διάταξη	41
3.3.2 Αποτελέσματα Πειράματος Δυναμικού Χαρακτηρισμού	44

3.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	47
3.4 Κάμψη Τριών Σημείων (3-Point Bending)	48
3.4.1 Πειραματική Διάταξη	48
3.4.2 Αποτελέσματα Πειράματος Κάμψης τριών σημείων	49
3.4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	55
3.5.1 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας	56
3.5.2 Αποτελέσματα πειράματος Θλίψης	56
3.5.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	62
Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	63
Μελλοντικοί Στόχοι	64
Βιβλιογραφία - Αναφορές	65

# Πίνακας Εικόνων

Figure 1 Παραδείγματα κυψελωτών δομών στην φύση α) ανθρώπινο οστό β) κερήθρα
γ) μανιτάρι δ) φυσαλίδες ε) φτερό λυβελλούλας στ) φύλλο [44]8
Figure 2 Τύποι κυψελωτών δομών: α) αφροί β) honeycomb γ) lattice [29]
Figure 3 Κατηγορίες δομών lattice: α) στοχαστικές β) περιοδικές γ) ψευδο-περιοδικές
[27]
Figure 4 Διαχωρισμός lattice δομών: α) strut-based lattice $\beta$ ) surface-based lattice [60]
Figure 5 Χρήσεις δομών lattice : α) Περιέλιξη ελικοειδών νευρώσεων [29] β) πτέρυγα
αεροπλάνου [17] γ) & δ) κομμάτια από το Ελληνικό hypercar Chaos [61] ε) εμφύτευμα
γόνατος [62] στ) ορθοπεδικός γύψος [63]13
Figure 6 Μορφή, όνομα και μαθηματική εξίσωση των στοιχειωδών κυψελίδων που
χρησιμοποιήσαμε [64]15
Figure 7 Περιβάλλον χρήσης λογισμικών βασιζόμενα στο MATLAB : TPMS Designer
(Αριστερά) και MS Lattice (Δεξιά)16
Figure 8 Περιβάλλον χρήσης του λογισμικού Grasshopper

Figure 9 Περιβάλλον χρήσης λογισμικού nTopology και ενδεικτικό workflow
(αριστερά)
Figure 10 Στάδια σχεδίασης ενδεικτικού δοκιμίου που περιέχει Primitive τύπο
κυψελίδας
Figure 11 Ενδεικτικές χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης: α) Κατασκευή
τοιχωμάτων κτιρίου β)Εκτυπωμένα ορθοδοντικά αποτυπώματα γ) Μοντέλο κινητήρα
τζετ για εκπαιδευτικούς σκοπούς δ)Πρωτότυπα και λειτουργικά μέρη αυτοκινήτου 22
Figure 12 Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας FDM
Figure 13 Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας SLA
Figure 14 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της παραγωγής αντικειμένων με την
χρήση διαδικασιών ΠΚ
Figure 15 Υποστηρικτική δομή για διαφορετικούς προσανατολισμούς κατασκευής
φιάλης
Figure 16 Τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή που χρησιμοποιήσαμε (Επάνω) και
σχηματική απεικόνιση της διαφοράς στην προβολή των στρωμάτων, μεταξύ τεχνικής
SLA kai MSLA ( $\acute{\eta}$ DLP $\acute{\eta}$ LCD-BASED SLA)
Figure 17 Περιβάλλον του λογισμικού Chitubox : Επιλογή των διαφόρων παραμέτρων
εκτύπωσης (Αριστερά), αναπαράσταση του επιλεγμένου προσανατολισμού και των
προς κατασκευή στρωμάτων (layers) (Δεξιά)
Figure 18 Εικόνες των διαφόρων σταδίων της διαδικασίας εκτύπωσης των δοκιμίων :
1) Επιλογή εκτυπωτή και υλικού 2) Προαιρετικό στάδιο καλιμπραρίσματος της ρητίνης
3) Εκτύπωση των δοκιμίων 4) Διαδικασία καθαρισμού με ισοπροπιλική αλκοόλη
5) Διαδικασία 'ωρίμανσης' μέσω έκθεσης σε ακτινοβολία UV
Figure 19 Πειραματικά Δοκίμια
Figure 20 Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης (Αριστερά) και Πειραματική διάταξη
εφελκυσμού του δοκιμίου (Δεξιά)
Figure 21
Figure 22 Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης (Αριστερά) και Αστοχία του δοκιμίου
(Δεξιά)
Figure 23 Πειραματική διάταξη Modal Analysis 42
Figure 24 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Modal Analysis συναρτήσει του πορώδους
Figure 25 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Modal Analysis για όλα τα δοκίμια και
Ενδεικτικό Σήμα FRF

Figure 26 Πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων
Figure 27 Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης ανά τύπο κυψελίδας (Αριστερά) κα
ανά τιμή porosity (Δεξιά)
Figure 28 Στιγμιότυπα κάμψης τριών σημείων για κυψελίδα PRIMITIVE 50
Figure 29 Στιγμιότυπα κάμψης τριών σημείων για κυψελίδα DIAMOND 5
Figure 30 Στιγμιότυπα κάμψης τριών σημείων για κυψελίδα GYROID
Figure 31 Σχηματική απεικόνιση των διαστάσεων για το πείραμα της κάμψης 52
Figure 32 Συγκεντρωτικά διαγράμματα ιδιοτήτων κάμψης
Figure 33 Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης ανά τύπο κυψελίδας (Αριστερά) κα
ανά τιμή porosity (Δεξιά)
Figure 34 Στιγμιότυπα θλίψης για κυψελίδα DIAMOND
Figure 35 Στιγμιότυπα θλίψης για κυψελίδα GYROID
Figure 36 Στιγμιότυπα θλίψης για κυψελίδα PRIMITIVE
Figure 37 Διαγράμματα Απορρόφησης Ενέργειας (Αριστερά) και Ειδική
Απορρόφησης Ενέργειας (Δεξιά) για όλα τα δοκίμια

### Περίληψη

Οι συνεχώς εξελισσόμενες τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ) προσφέρουν την δυνατότητα κατασκευής κομματιών προσαρμοσμένα στις ανάγκες του χρήστη, σε μικρό χρονικό διάστημα, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες των πόρων, διατηρώντας το κόστος παραγωγής σχετικά χαμηλό. Παράλληλα, προσφέρουν ελευθερία κατά τον σχεδιασμό, επιτρέποντας την δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών ενισχύοντας την φιλοσοφία σχεδίασης ελαφρών κατασκευών.

Οι κυψελωτές δομές (lattice structures) είναι πολύπλοκες κατασκευές που μπορούν να παραχθούν εύκολα με την χρήση τεχνολογιών ΠΚ και γνωρίζουν διαρκώς αυξανόμενη αποδοχή. Το χαμηλό βάρος, η υψηλή αντοχή, η καλή απορρόφηση ενέργειας και κραδασμών αλλά και η εξοικονόμηση υλικού, είναι μερικά χαρακτηριστικά των κατασκευών αυτών που τις καθιστούν ελκυστικές για χρήσεις στους τομείς της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της ιατρικής.

Στην παρούσα σπουδαστική εργασία παρουσιάζονται οι κατηγορίες αυτών των κατασκευών και ερευνάται η συμπεριφορά του υπό διάφορα φορτία, αφού πρώτα έχει προηγηθεί ο σχεδιασμός και η κατασκευής τους. Τα προς εξέταση δοκίμια παρήχθησαν με την μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης και συγκεκριμένα με την τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας, αξιοποιώντας τρείς διαφορετικούς τύπους πλέγματος (Schwarz Diamond,Schwarz Primitive και Gyroid) και τρείς τιμές για το πορώδες (70%,75% και 80%). Ακολούθησε ο δυναμικός χαρακτηρισμός, η κάμψη τριών σημείων και η θλίψη των δοκιμίων, με σκοπό την σύγκριση της μηχανικής τους συμπεριφοράς και της επίδρασης τόσο της μορφής του πλέγματος όσο και της τιμής του πορώδους σε αυτήν. Με την αύξηση της τιμής του πορώδους παρατηρήθηκε υποβάθμιση των μηχανικόν ιδιοτήτων ενώ για κάθε φόρτιση αναδείχθηκε ο βέλτιστος τύπος πλέγματος. Ωστόσο όλα τα δοκίμια εμφάνισαν καλά αποτελέσματα για τις μετρούμενες μηχανικές ιδιότητες και εξέχουσα απορρόφηση ενέργειας αναλογικά με το βάρος τους που φαίνεται να σχετίζεται με την καλή κατανομή του υλικού στον τρισδιάστατο χώρο.

### **Abstract**

The constantly evolving Additive Manufacturing (AM) technologies offer the possibility of manufacturing parts tailored to the user's needs, in a short period of time, minimizing resource losses, while keeping production costs relatively low. At the same time, they offer freedom in design, allowing the creation of complex geometries, enabling the design of lightweight parts.

Lattice structures are complex structures that can be easily produced with the use of AM technologies and are increasingly accepted. Low weight, high strength, good energy absorption, vibration reduction, combined with material savings, are some features of these structures that make them attractive for use in the fields of aeronautics, aerospace, automotive and medicine.

The present work presents the different categories of these structures and investigates the behavior under various loads of TPMS lattice structures, which are previously designed and manufactured. The test specimens were produced by SLA 3D Printing, utilizing three different types of TPMS unit cells (Schwarz Diamond, Schwarz Primitive and Gyroid) and three different porosity values (70%, 75% and 80%). The next step was to perform modal analysis, three-point bending test and compression test for all the specimens. The main objective was to compare their mechanical behavior and the influence of both the shape of the unit cell and the value of the porosity in it. With the increase of the porosity value, a degradation of the mechanical properties was observed, while for each loading, different types of unit cell seemed to be optimal. However, all the specimens showed good results for the measured mechanical properties and exceptional energy absorption in proportion to their weight, which seems to be related to the specific distribution of the material in the three-dimensional space.

### Κεφάλαιο 1: Σχεδίαση δομών ΤΡΜS

### 1.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Οι κυψελωτές δομές (cellular structures) γνωρίζουν ευρεία αποδοχή και χρήση σε διάφορους τομείς τα τελευταία χρόνια λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων τους. Τέτοιες δομές παρατηρούνται στην φύση στο ξύλο, στην κηρύθρα των μελισσών, στα κοράλλια, στα σφουγγάρια και κυρίως στα κόκαλα τόσο των ανθρώπων όσο και των ζώων (Εικόνα 1). Σύμφωνα με τον Druv Bhate [1] αυτή η οικογένεια δομών διαχωρίζεται σε τρείς κατηγορίες : τους αφρούς (foams), τα honeycombs και τις δομές lattice (Εικόνα 2). Οι τελευταίες είναι και αυτές που θα μας απασχολήσουν καθώς εμφανίζουν πολύ καλές ιδιότητες που αφορούν το μικρό ειδικό βάρος, την απορρόφηση ενέργειας (είτε από κραδασμούς είτε από ηχητικά και όχι μόνο κύματα) και την μεταφορά θερμότητας. Οι ιδιότητες αυτές σε συνδυασμό με τους διάφορους τύπους επαναλαμβανόμενων κυψελίδων που έχουν αναπτυχθεί, καθιστούν τις δομές lattice ιδανικές για χρήση σε αεροπορικές, αεροδιαστημικές, μηχανοκίνητες και στατικές κατασκευές, καθώς και σε διάφορα εμφυτεύματα και ορθοπεδικά βοηθήματα.



Figure 1 Παραδείγματα κυψελωτών δομών στην φύση α) ανθρώπινο οστό β) κερήθρα γ) μανιτάρι δ) φυσαλίδες ε) φτερό λυβελλούλας στ) φύλλο [56]

Στην ολοένα αυξανόμενη χρήση των δομών αυτών όμως συντέλεσε και η βελτίωση της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D Printing) και των σχεδιαστικών και υπολογιστικών προγραμμάτων. Η πολύπλοκη γεωμετρία των δομών lattice, που αποτελείται από πολλές ακμές και επιφάνειες που αλλάζουν προσανατολισμό, είναι δύσκολο τόσο να σχεδιαστεί με τα συμβατικά σχεδιαστικά προγράμματα, όσο και να κατασκευαστεί με τις κλασικές τεχνικές παραγωγής (π.χ. χύτευση, injection molding, CNC κατεργασία). Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία αύξηση της παραγωγής κομματιών μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία προσφέρει αφενός πολύ μεγαλύτερη ελευθερία στην χρήση διαφόρων τύπων υλικών και αφετέρου αύξηση στην πολυπλοκότητα των προς κατασκευή κομματιών. Παράλληλα, η εκτίναξη της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος έχει συμβάλει στην βελτίωση των προγραμμάτων τρισδιάστατης (και παραμετρικής) σχεδίασης αλλά και των υπολογιστικών προγραμμάτων (FEM-FEA Software). Έτσι έχουν δημιουργηθεί οι κατάλληλές συνθήκες για την προσιτή από όλους σχεδίαση και κατασκευή των δομών lattice, με το αυξανόμενο ενδιαφέρον για αυτές να αντικατοπτρίζεται στην πληθώρα ερευνών που αφορούν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς αλλά και την βελτιστοποίηση τους.

Η παρούσα σπουδαστική εργασία επικεντρώνεται στον δυναμικό χαρακτηρισμό και την συμπεριφορά υπό καμπτικά φορτία των δομών lattice και πιο συγκεκριμένα των δομών TPMS (που αποτελούν μία υποομάδα των lattice δομών και αυτό θα αναλυθεί παρακάτω). Οι μηχανικές ιδιότητες της οικογένειας lattice , που αφορούν την αντοχή σε θλίψη, την απορρόφηση ενέργειας και την μεταφορά θερμότητας, έχουν μελετηθεί στην βιβλιογραφία [2]–[19]. Ωστόσο ο δυναμικός χαρακτηρισμός των διάφορων τύπων επαναλαμβανόμενων κυψελίδων TPMS, τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά , φαίνεται να μην έχει αναλυθεί αρκετά [20]–[24]. Ακολουθούν λεπτομερής ορισμοί για κάθε τύπο δομών, ο μαθηματικός ορισμός των επιλεγμένων προς ανάλυση δομών, οι εξισώσεις που τις ορίζουν καθώς και ο τρόπος σχεδίασης , με σκοπό την



Figure 2 Τύποι κυψελωτών δομών: α) αφροί β) honeycomb γ) lattice [29]

ανάδειξη ολόκληρης της παραγωγικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε και την πλήρη κατανόηση για αξιολόγηση των τελικών πειραματικών αποτελεσμάτων.

### 1.2 <u>Δομές Lattice</u>

#### 1.2.1 <u>Ορισμός και κατηγορίες Lattice δομών</u>

Γενικά μία κατασκευή lattice ορίζεται ως μία τρισδιάστατη κατασκευή που συντάσσεται από μία στοιχειώδη κυψελίδα επαναλαμβανόμενη στο χώρο, ακολουθώντας κάποιους άξονες ή επιφάνειες, χωρίς να παρεμβάλλεται κενό μεταξύ των γειτονικών κυψελίδων. Στην βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποιος σαφής και παγκόσμια αποδεκτός ορισμός για αυτές τις δομές. Αυτό οφείλεται αρχικά στο ότι ο όρος lattice υπάρχει σε πολλούς τομείς όπως στην Δομική Μηχανική, την Βιολογία, την Επιστήμη των Υλικών και την Κρυσταλλογραφία [25] με αποτέλεσμα η δημιουργία ενός κοινού ορισμού που να εφαρμόζεται σε όλους τους τομείς να είναι δύσκολη. Έπειτα πολλοί μελετητές, βασιζόμενοι στην διατύπωση των Gibson και Ashby, παραθέτουν την δική τους αντίληψη όσον αφορά τον ορισμό. Έτσι για παράδειγμα ο Tao [26] ορίζει τις δομές lattice σαν μία αρχιτεκτονική που σχηματίζεται από μία διάταξη χωρικά περιοδικών κυψελίδων με ακμές και πλευρές. Ο Dong [27] παρομοιάζει αυτές τις δομές με χωροδικτυώματα, ο Seharing [28] τις ορίζει ως τις πορώδεις και κοίλες δομές που προκύπτουν από την τοποθέτηση στοιχειωδών κυψελίδων στον τρισδιάστατο χώρο κοκ. Η κάθε θεώρηση έχει τις δικές της ελλείψεις με αποτέλεσμα να μην μπορεί να θεωρηθεί δογματική όμως το γενικό πλαίσιο παραμένει το ίδιο και συμβαδίζει με τον αρχικό ορισμό που δώσαμε πιο πάνω.

Όσον αφορά την κατηγοριοποίηση των δομών lattice, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [27], αυτές χωρίζονται σε τρείς κατηγορίες (Εικόνα 3):

- Περιοδικές: Αυτές οι δομές χαρακτηρίζονται από την περιοδικά επαναλαμβανόμενη διάταξη στον τρισδιάστατο χώρο, κυψελίδων με ίδια τοπολογία, σχήμα και μέγεθος. Αξίζει να σημειωθεί πως έχουν αναπτυχθεί πολλοί τύποι κυψελίδων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που μπορούν να επηρεάσουν την συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.
- Ψευδο-περιοδικές: Σε αυτές τις δομές οι ίδιες σε σχήμα κυψελίδες επαναλαμβάνονται περιοδικά στον χώρο, όμως διαφέρουν μεταξύ τους στο μέγεθος.

 Στοχαστικές: Αυτές οι δομές χαρακτηρίζονται από την τυχαία κατανομή στον τρισδιάστατο χώρο, κυψελίδων που διαφέρουν στην τοπολογία, στο μέγεθος ή στον συνδυασμό αυτών.



Figure 3 Κατηγορίες δομών lattice: α) στοχαστικές β) περιοδικές γ) ψευδο-περιοδικές [27]

Ένας άλλος διαχωρισμός των δομών αυτών είναι ο ακόλουθος [29]:

- Ομοιόμορφες : Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι περιοδικές δομές, καθώς απαρτίζονται από κυψελίδες ίδιου σχήματος οι οποίες κατανέμονται ομοιόμορφα και περιοδικά στον χώρο.
- Ανομοιόμορφες : Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι στοχαστικές και οι ψευδο-περιοδικές δομές καθώς το σχήμα και το μέγεθος των κυψελίδων αντίστοιχα, αλλάζει διαρκώς και η κατανομή στον χώρο δεν παρουσιάζει κάποια επαναληψιμότητα. Εδώ εντάσσονται επίσης και οι αυξητικές δομές (δομές που εμφανίζουν αρνητικό λόγο Poisson) καθώς και οι δομές που εμφανίζουν μεταβαλλόμενο λόγο Poisson κατά το μήκος τους.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε έναν βασικότερο διαχωρισμό των μηστοχαστικών δομών με βάση την τοπολογία της στοιχειώδους κυψελίδας [3]. Αυτός ο διαχωρισμός σχετίζεται άμεσα και επηρεάζει τον τρόπο σχεδίασης των κυψελίδων . Έτσι η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις κυψελίδες που βασίζονται σε ένα γεωμετρικό πλαίσιο και αποτελούνται από δοκίδες (αναφέρονται ως strut-based lattice structures) (Εικόνα 4α). Το πιο απλό παράδειγμα αποτελεί μία κυψελίδα που δημιουργείται αν τοποθετήσουμε κυλινδρικές δοκίδες στις ακμές ενός πολυέδρου. Όπως είναι κατανοητό υπάρχει μεγάλη ποικιλία πολυέδρων που μπορούν να αξιοποιηθούν. Ωστόσο έχουν αναπτυχθεί και πιο πολύπλοκοι τύποι που ενώνουν σημεία του χώρου με δοκίδες διαφόρων σχημάτων. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι κυψελίδες που ορίζονται στον τρισδιάστατο χώρο μέσω μαθηματικών εξισώσεων και αλγορίθμων. Το κυριότερο παράδειγμα είναι μία τριπλά περιοδική μινιμαλιστική επιφάνεια (TPMS-Triply Periodic Minimal Surface) (Εικόνα 4β). Αυτή μετατρέπει το θεωρητικό μαθηματικό μοντέλο σε μία πραγματική lattice δομή, η κυψελίδα της οποίας απαρτίζεται από επιφάνεια και όχι από δοκίδες όπως στην προηγούμενη περίπτωση (αναφέρεται ως surface-based). Η τελευταία κατηγορία είναι και αυτή που θα χρησιμοποιήσομε και θα ερευνήσουμε στην παρούσα εργασία. Περισσότερες πληροφορίες και εκτενής χαρακτηρισμός του τύπου αυτού ακολουθεί στα επερχόμενα κεφάλαια.



Figure 4 Διαχωρισμός lattice δομών: α) strut-based lattice  $\beta$ ) surface-based lattice [57]

### 1.2.2 Χρήση δομών

Σε κάθε στάδιο μίας έρευνας είναι βασικό να αναλογιζόμαστε πως θα πρέπει να υπάρχει ένας τελικός σκοπός που να βρίσκει εφαρμογή στην πράξη. Έτσι η έρευνα γύρω από τις δομές Lattice δεν αποτελεί θεωρητική προσέγγιση μίας ιδέας αλλά έχει εφαρμογή σε διάφορους τομείς. Λόγω τον πολύ καλών ιδιοτήτων τους και με την ταυτόχρονη βελτίωση των παραγωγικών μας διαδικασιών, παρατηρείται μεγάλη αύξηση στην χρήση των δομών αυτών στην βιομηχανία.

Αρχικά, λόγω του χαμηλού βάρους και της μεγάλης αντοχής τους, οι κατασκευές lattice βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυπηγική και στην αεροδιαστημική για την κατασκευή τμημάτων αεροσκαφών και πυραύλων [30]–[33]. Έπειτα εξαιτίας του ίδιου λόγου έχουν εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία [34]–[36], όπου χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κομματιών που συμβάλουν στην μείωση του βάρους του αυτοκινήτου με όλα τα οφέλη που συνεπάγονται από αυτήν. Ένα ακόμα

χαρακτηριστικό που κάνει ελκυστική την χρήση των δομών αυτών στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η δυνατότητα παραγωγής κομματιών που πέρα από ελαφριά, είναι και προσαρμοσμένα στην εκάστοτε κατάσταση φόρτισης. Με την χρήση υπολογιστικών λογισμικών (FEM-FEA Software) μπορούμε να εντοπίσουμε τις περιοχές της κατασκευής μας που δέχονται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις και με την εφαρμογή αλγορίθμων Topology Optimization, αξιοποιώντας τις στοχαστικές ή τις ψευδο-περιοδικές δομές που αναφέραμε προηγουμένως , δημιουργούμε βελτιωμένες κατασκευές στις οποίες έχει τοποθετηθεί υλικό όπου είναι απαραίτητο, πετυχαίνοντας έτσι το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς σπατάλη περισσευούμενου υλικού και με την ταυτόχρονη μείωση του συνολικού βάρους. Τέλος, η χρήση των δομών αυτών στην αρθροπλαστική και στον ορθοπεδικό τομέα, για την δημιουργία εμφυτευμάτων αλλά και ορθοπεδικών βοηθημάτων που εφαρμόζουν καλύτερα στην ανατομία του εκάστοτε ασθενούς και προσδίδουν μοναδικά χαρακτηριστικά , φαίνεται να αυξάνεται διαρκώς τα τελευταία χρόνια .



Figure 5 Χρήσεις δομών lattice : α) Περιέλιζη ελικοειδών νευρώσεων [29] β) πτέρυγα αεροπλάνου [9] γ) & δ) κομμάτια από το Ελληνικό hypercar Chaos [58] ε) εμφύτευμα γόνατος [59] στ) ορθοπεδικός γύψος [60]

#### 1.3 <u>Δομές TPMS</u>

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε και θα εξετάσουμε τις δομές TPMS (Triply Periodic Minimal Surface). Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, αυτές οι δομές φαίνεται να εμφανίζουν βέλτιστη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα [37], βελτιστοποιημένη διαπερατότητα όσον αφορά υγρά [38], ιδιαίτερη απορρόφηση ηχητικών κυμάτων [39] καθώς και ιδιότητες φωτονικού κρυστάλλου [40]. Παράλληλα, υπερτερούν έναντι των κυψελίδων με δοκίδες οι οποίες εμφανίζουν υψηλή συγκέντρωση τάσεων στα σημεία ένωσης των δοκίδων [2]. Τέλος, αναφέρεται πως εμφανίζουν ιδιαίτερη συμπεριφορά στην απορρόφηση κραδασμών [41].

Γενικά ως μινιμαλιστική επιφάνεια (minimal surface, η μετάφραση στα ελληνικά δεν είναι πολύ ακριβής, minimal=ελάχιστος) ορίζεται μία επιφάνεια που ελαχιστοποιεί τοπικά το εμβαδό της, για ένα δεδομένο όγκο, έτσι ώστε η μέση καμπυλότητα σε κάθε σημείο της να είναι μηδέν[42]. Όταν αυτή η επιφάνεια εκτείνεται περιοδικά και στις τρεις διαστάσεις καλείται τριπλά περιοδική μινιμαλιστική επιφάνεια ή όπως την χρησιμοποιούμε σε αυτήν την εργασία TPMS (Triply Periodic Minimal Surface). Η πρώτη αναφορά σε αυτές τις επιφάνειες έγινε από τον Γερμανό μαθηματικό Schwarz τον 19° αιώνα, ο οποίος εισήγαγε τις εξισώσεις των επιφανειών Primitive και Diamond, η οποίες σήμερα φέρουν συνοδευτικά το όνομα του. Πλέον έχουν οριστεί πολλές τέτοιες επιφάνειες , με πιο ενδιαφέρουσες αυτές που εμφανίζουν κυβική συμμετρία και οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ,επαναλαμβανόμενες στον τρισδιάστατο χώρο, ως δομικό στοιχείο για οποιαδήποτε γεωμετρία διατηρώντας την συνολική περιοδικότητα. Αυτή άλλωστε είναι και η χρήση τους για την δημιουργία δομών lattice ·αποτελούν την στοιχειώδη κυψελίδα που επαναλαμβάνεται και δημιουργεί την επιθυμητή κατασκευή.

Για την δημιουργία των προς εξέταση κατασκευών μας χρησιμοποιήσαμε τρεις από τις πιο γνωστές TPMS γεωμετρίες και παραθέτουμε τις εξισώσεις των επιφανειών τους καθώς και την μορφή της στοιχειώδους κυψελίδας παρακάτω (Εικόνα 6). Η επιλογή τους έγινε με γνώμονα την βιβλιογραφία αλλά και την δυνατότητα εκτύπωσης τους στις επιθυμητές διαστάσεις, με την τεχνολογία που χρησιμοποιήσαμε.



Figure 6 Μορφή, όνομα και μαθηματική εξίσωση των στοιχειωδών κυψελίδων που χρησιμοποιήσαμε [61]

Στην επιφάνεια που δημιουργείται, πρέπει να προσδώσουμε κάποιο πάχος ώστε τελικά να δημιουργήσουμε την στοιχειώδη δομική μας κυψελίδα. Το πάχος αυτό, όπως είναι λογικό, επηρεάζει την συνολική σχετική πυκνότητα ρ<sup>\*</sup> (ως σχετική πυκνότητα ορίζεται η αναλογία μεταξύ της πυκνότητας της δομής lattice ρ<sub>lattice</sub> και της πυκνότητας του υλικού που την απαρτίζει ρ<sub>solid</sub>, p<sup>\*</sup>= ρ<sub>lattice</sub> / ρ<sub>solid</sub>) της κατασκευής μας, μία ιδιότητα η οποία μαζί με τον τύπο της στοιχειώδους κυψελίδας, έχει αποδειχθεί πως αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες που καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες και τις φυσικές συχνότητες της τελικής κατασκευής [43]@. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε το μέγεθος του πορώδες (porosity), το οποίο είναι ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνει η δομή lattice προς τον όγκο του αντίστοιχου στερεού ίδιων διαστάσεων και είναι συμπληρωματικό της σχετικής πυκνότητας . Έτσι για κάθε τύπο κυψελίδας επιλέξαμε να μελετήσουμε δοκίμια με τρεις διαφορετικές τιμές για το πορώδες 70%,75% και 80%

### 1.4 Διαθέσιμα Λογισμικά Σχεδίασης

Η σχεδίαση των δομών αυτών είναι δυνατή με την χρήση διάφορων λογισμικών της αγοράς. Η πολυπλοκότητα των απαιτούμενων καμπυλών καθιστούν δύσκολο των σχεδιασμών διαφόρων κομματιών με την χρήση των 'συμβατικών' λογισμικών σχεδίασης όπως το AutoCAD,το CATIA και το SolidWorks. Έτσι έχουν αναπτυχθεί αρκετά σχεδιαστικά πακέτα που καθιστούν εύκολη την δημιουργία κατασκευών αποτελούμενες από πολύπλοκους τύπους καμπυλών. Ακολουθεί ενδεικτική αναφορά σε κάποια πακέτα με σκοπό την ανάδειξη και περιγραφή της τελικής επιλογής του λογισμικού που χρησιμοποιήσαμε.

Αρχικά έχουμε το MSLattice και το TPMS Designer (Εικόνα 7). Τα δύο αυτά λογισμικά βασίζονται στο Matlab για την παραγωγή και την απεικόνιση των επιθυμητών δομών, καθώς όπως προαναφέραμε δημιουργούνται βάσει μαθηματικών εξισώσεων. Το πρώτο λογισμικό είναι αυτόνομο και δεν απαιτεί την εγκατάσταση του MATLAB, ενώ το δεύτερο αποτελεί πρόσθετη εργαλειοθήκη του. Παρόλο που και τα δύο προγράμματα προσφέρουν πολλές επιλογές παραμετροποίησης, είναι φιλικά προς τον χρήστη και έχουν την δυνατότητα εξαγωγής σε μορφή .stl (τύπος αρχείου που αποτυπώνει την γεωμετρία και μπορεί να αναγνωριστεί από όλους τους 3D Printers), δεν ενδείκνυται να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία τελικών προϊόντων ή δοκιμίων, καθώς στερούνται αρκετές βασικές λειτουργίες ενός σχεδιαστικού πακέτου και περιορίζονται στην δημιουργία αποκλειστικά lattice-TPMS δομών. Είναι αυτονόητο βέβαια πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αυτούσιο το λογισμικό MATLAB, όπως βλέπουμε και στην βιβλιογραφία, ωστόσο προϋποθέτει την δημιουργία κώδικα (script). Ακολουθούν εικόνες με το περιβάλλον χρήσης αυτών των προγραμμάτων.



Figure 7 Περιβάλλον χρήσης λογισμικών βασιζόμενα στο MATLAB : TPMS Designer (Αριστερά) και MS Lattice (Δεξιά)

Στην συνέχεια έχουμε το Rhinoceros με το συνοδευτικό plugin του Grasshopper (Εικόνα 8). Το λογισμικό αυτό είναι ένα από τα καλύτερα διαθέσιμα αυτήν την στιγμή στην αγορά και χρησιμοποιείται ευρέως παγκοσμίως. Προσφέρει αμέτρητες δυνατότητες δημιουργίας σύνθετων σχημάτων και παραμετροποίησης όλων των διαστάσεων τους, είναι φιλικό προς τον χρήστη και έχει πολλές επιλογές τύπων αρχείων για εξαγωγή του σχεδίου. Ωστόσο δεν είναι απόλυτα προσανατολισμένο για την δημιουργία TPMS δομών.



Figure 8 Περιβάλλον χρήσης του λογισμικού Grasshopper

Τέλος έχουμε το λογισμικό nTpology (Εικόνα 9). Είναι ένα σχετικά καινούριο λογισμικό το οποίο καθιστά εύκολη την δημιουργία lattice δομών, την παραμετροποίηση τους βάσει διαφόρων κριτηρίων (μεταβολή του πάχους των κυψελίδων βάσει μαθηματικών εξισώσεων, πεδίων δυνάμεων και πιέσεων που επικρατούν κ.ά) και την ενσωμάτωση τους σε ήδη υπάρχοντα κομμάτια για μέγιστη απόδοση. Είναι φιλικό προς τον χρήστη και διατίθεται δωρεάν για ακαδημαϊκή χρήση. Παράλληλα παρέχει την δυνατότητα για topology optimization και επίλυση με την



Figure 9 Περιβάλλον χρήσης λογισμικού nTopology και ενδεικτικό workflow (αριστερά)

μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Όλοι αυτοί οι λόγοι μας οδήγησαν στην επιλογή αυτού του σχεδιαστικού πακέτου για τον σχεδιασμό των προς ανάλυση δομώνκατασκευών μας.

### 1.5 Διαδικασία σχεδίασης με χρήση λογισμικού

Έχοντας επιλέξει τους τύπους κυψελίδας και τις σχετικές πυκνότητες που θα μελετήσουμε καθώς και το λογισμικό στο οποίο θα σχεδιάσουμε τα τελικά δοκίμια, περνάμε πλέον στο τελικό στάδιο του σχεδιασμού.

Οι διαστάσεις των δοκιμίων καθορίστηκαν με γνώμονα την εφικτότητα της κατασκευής τους αλλά και των πειρματικών διαδικασιών που θα εκτελούσαμε. Έτσι σχεδιάσαμε δοκίμια με διαστάσεις 181mm x 22 mm x 22mm όπου περιέχουν 3 x 3 x 25 αριθμό κυψελίδων καθώς το μήκος της κάθε κυψελίδας είναι 7 mm. Επίσης τοποθετήθηκαν πλάκες 0,75 mm κατά το μήκος δύο πλευρών των δοκιμίων για καλύτερη κατανομή του φορτίου και για την προσομοίωση της δομής τύπου sandwich.

Αρχικά σχεδιάσαμε ένα συμπαγές στερεό στις διαστάσεις που επιθυμούμε για να ορίσουμε τα όρια του επιθυμητού όγκου. Έπειτα μετατρέψαμε τον όγκο αυτόν σε αποτελούμενο αποκλειστικά από TPMS κυψελίδες. Αφού επιλέξαμε το κατάλληλο μέγεθος της στοιχειώδους κυψελίδας ώστε να έχουμε τον επιθυμητό αριθμό (3 x 3 σε κάθε εγκάρσια τομή), ορίσαμε το σωστό πάχος του τοιχώματος για να επιτύχουμε τις τιμές του πορώδους που θέλαμε. Τέλος προσαρμόσαμε τις λεπτές πλάκες στην άνω και κάτω επιφάνεια και πήραμε το τελικό αποτέλεσμα. Να σημειωθεί πως προσαρμόσαμε επίσης ακόμα μία πλάκα για τις ανάγκες της εκτύπωσης, όπως φαίνεται στη εικόνα 10 και το δοκίμιο υπέστη μία αρχική διακριτοποίηση για την εξαγωγή του σε μορφή αρχείου .STL για τα μετέπειτα βήματα της διαδικασίας.



Figure 10 Στάδια σχεδίασης ενδεικτικού δοκιμίου που περιέχει Primitive τύπο κυψελίδας

### Κεφάλαιο 2 : Κατασκευή δομών ΤΡΜS

### 2.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η αναλυτική περιγραφή και παρουσίαση, της διαδικασίας παραγωγής των πειραματικών δοκιμίων. Περιγράφονται οι εξοπλισμοί που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε επιμέρους στάδιο, οι παράμετροι που επιλέχθηκαν και τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής.

Πιο συγκεκριμένα, καθώς επιλέξαμε την τρισδιάστατη εκτύπωση ως διαδικασία παραγωγής, γίνεται αναφορά στον ορισμό της και τις διάφορες χρήσεις της. Στην συνέχεια, περιγράφονται τα είδη Προσθετικής Κατασκευής και τα γενικά στάδια που ακολουθούνται για αυτήν τη παραγωγική διαδικασία, συγκρίνοντας παράλληλα τις δύο πιο δημοφιλείς τεχνολογίες ΠΚ. Έπειτα, αναφέρονται τα στάδια που ακολουθήσαμε για την κατασκευή των τελικών δοκιμίων και αναλύονται διεξοδικά, παρουσιάζοντας τον εξοπλισμό που απαιτεί το καθένα αλλά και τις παραμέτρους που επιλέξαμε. Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα των διαστάσεων και των μαζών των εκτυπωμένων κομματιών, όπου και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα κατασκευαστικά σχέδια, εξάγοντας συμπεράσματα και σχόλια για την ποιότητα της κατασκευαστικής διαδικασίας.

### 2.2 Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)

#### 2.2.1 <u>Ορισμός</u>

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Η εξέλιξη της τεχνολογίας CNC (Computerized Numerical Control) σε συνδυασμό με την εξέλιξη των συστημάτων σχεδίασης CAD (Computer-aided design) και των δυνατοτήτων των Η/Υ, οδήγησε και σταδιακά στη σύνδεση των δύο αυτών τεχνολογιών και την ανάπτυξη εφαρμογών λογισμικού CAD/CAM (Computer-aided manufacturing). Τα συγκεκριμένα τεχνολογικά επιτεύγματα είναι αυτά που αποτέλεσαν και τη βάση για την εμφάνιση, στα τέλη του 20ου αιώνα, και την ανάπτυξη μιας νέας οικογένειας κατασκευαστικών τεχνολογιών, της Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing). Ο όρος αυτός καθιερώθηκε σταδιακά γιατί προσδιορίζει το ουσιαστικό κοινό γνώρισμα όλων αυτών των τεχνολογιών, το οποίο είναι η κατασκευή αντικειμένων-κομματιών μέσω διαδικασιών ελεγχόμενης πρόσθεσης υλικού. Αναλόγως της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται

διαφόρων ειδών υλικά (φωτοπολυμερή, μέταλλα, θερμοπλαστικά πολυμερή, κεραμικά κ.ά) σε διάφορες μορφές (υγρή, σε κόκκους, νήματα ή φύλλα), τα οποία διαμορφώνονται συνήθως σε λεπτά στρώματα που προστίθενται σταδιακά μέχρι να «χτιστεί» το αντικείμενο. Ο όρος τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing) χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την περιγραφή μίας εκ των τεχνικών προσθετικής μηχανικής, η οποία αναπτύχθηκε στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT), όμως τα τελευταία χρόνια έχει καθιερωθεί ως συνώνυμος όρος αυτού της Προσθετικής Κατασκευής και πλέον χρησιμοποιείται για την περιγραφή όλων των τεχνολογιών πρόσθεσης υλικού[44].

### 2.2.2 Εφαρμογές, χρήσεις και οφέλη της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία διαρκής εξέλιξη της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης, η οποία φαίνεται να εντάσσεται όλο και περισσότερο σε διάφορες εφαρμογές. Αυτό αντανακλάται και στην οικονομία, όπου το 2020 η παγκόσμια αγορά για προϊόντα και υπηρεσίες τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτιμήθηκε σε περίπου 12,6 δισεκατομμύρια δολάρια, με προβλέψεις για το 2026 να κάνουν λόγο για αύξηση αυτού του ποσού στα 37,2 δισεκατομμύρια δολάρια [45]. Κάθε χρόνο συμβαίνουν διάφορες καινοτομίες και ανακαλύψεις γύρω από αυτήν την παραγωγική διαδικασία, εισάγοντας νέες μεθόδους και περισσότερα διαθέσιμα υλικά , διευρύνοντας και άλλο τις δυνατότητες της. Οφείλουμε λοιπόν να αναφέρουμε κάποιες από τις εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης ώστε να αντιληφθούμε τις τωρινές αλλά και τις μελλοντικές δυνατότητες αυτής της μεθόδου.

Έτσι αρχικά στον τομέα της κατασκευής κτιρίων, η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ορισμένων κατασκευαστικών στοιχείων αλλά και για την 'εκτύπωση' ολόκληρων κτιρίων. Η τελευταία χρήση, προσφέρει μία γρηγορότερη, φθηνότερη και φιλικότερη προς το περιβάλλον ενναλακτική έναντι της κλασικής μεθόδου κατασκευής, ανοίγοντας παράλληλα τον δρόμο για την κατασκευή κτιρίων σε επικίνδυνα για το ανθρώπινο δυναμικό περιβάλλοντα , όπως το διάστημα[46].

Έπειτα, παρατηρείται ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση εντάσσεται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική[47]– [49]. Αν και στην αρχή χρησιμοποιήθηκε σε αυτούς τους τομείς για την δημιουργία πρωτοτύπων και προϊόντων υπό κλίμακα, πλέον συναντάται και στην παραγωγή εξαρτημάτων για την τελική κατασκευή, ειδικά σε μικρές γραμμές παραγωγής και 'ειδικά' κομμάτια (ενδεικτικά το Airbus A350 XWB περιέχει πάνω από 1000 κομμάτια κατασκευασμένα με τρισδιάστατη εκτύπωση [48]). Η μεγάλη παραμετροποίηση και η ελευθερία στον σχεδιασμό αυτής της μεθόδου, σε συνδυασμό με λογισμικά τοπολογικής βελτιστοποίησης (topology optimization), επιτρέπουν την κατασκευή κομματιών προσαρμοσμένα άριστα στις συνθήκες λειτουργίας που επρόκειτο να αντιμετωπίσουν, με μοναδικά χαρακτηριστικά όπως χαμηλό βάρος, καλή αντοχή και θερμική συμπεριφορά. Τα διαρκώς αυξανόμενα διαθέσιμα υλικά και η βελτιστοποίηση των μεθόδων, είναι πιθανό να οδηγήσουν σε ακόμα μεγαλύτερη συνεισφορά της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε αυτούς τους τομείς.

Όσον αφορά τον ευρύ τομέα της ιατρικής, οι εφαρμογές εκτείνονται σε διάφορα πεδία [50]. Η εντονότερη και δημοφιλέστερη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης παρατηρείται στην ορθοπεδική. Η ανάγκη για προσθετικά μέλη και εμφυτεύματα που να ταιριάζουν στις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ασθενούς, καθιστά αυτήν την παραγωγική διαδικασία πολύ καλή επιλογή. Σε συνδυασμό με τεχνικές τρισδιάστατης σάρωσης (3D Scanning) και εργονομικού σχεδιασμού, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι άκρως εξατομικευμένο, με επιπλέον χαρακτηριστικό την δυνατότητα ταχείας παραγωγής του. Αυτά τα οφέλη της τρισδιάστατης εκτύπωσης, εφαρμόζονται και στην οδοντοτεχνία για την παραγωγή έξατομικευμένων ορθοδοντικών σιδερακίων αλλά και στην κατασκευή ακουστικών βαρηκοΐας. Άλλες χρήσεις είναι η κατασκευή ανατομικών μοντέλων τόσο για μελέτη ή προσομοίωση μίας χειρουργικής επέμβασης όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς , καθώς επίσης και η δημιουργία τεχνητών οργάνων και ιστών, μία τεχνολογία που βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο σε σχέση με όλα τα προαναφερθέντα παραδείγματα.

Επίσης αξίζει να αναφέρουμε και την πτυχή της τρισδιάστατης εκτύπωσης που εφαρμόζεται στον κοινωνικοπολιτισμικό τομέα. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας οδήγησε στην μείωση του κόστους των εκτυπωτών. Έτσι, όλο και περισσότεροι άνθρωποι ανά τον κόσμο έχουν στην κατοχή τους έναν εκτυπωτή για ερασιτεχνικούς σκοπούς. Αυτό συνέβαλε στην δημιουργία ελεύθερων διαδικτυακών βιβλιοθηκών με τρισδιάστατα σχέδια από διάφορα αντικείμενα, όπου ο καθένας μπορεί να μοιραστεί και να χρησιμοποιήσει, καθιστώντας εύκολη την εκτύπωσή τους, εκμηδενίζοντας τον απαραίτητο χρόνο σχεδίασης του αντικειμένου στον υπολογιστή. Αυτό αποδεικνύει και την δυνατότητα που προσφέρει αυτή η τεχνολογία, για την αποκέντρωση της παραγωγής και την αύξηση της συνεισφοράς του ατόμου. Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε πως η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκει εφαρμογές στις τέχνες, για την δημιουργία ευφάνταστων δημιουργημάτων, καθώς και στην εκπαίδευση, όπου βοηθά τους μαθητές να αναπτύξουν τις δημιουργικές τους ικανότητες [51].



Figure 11 Ενδεικτικές χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης: α) Κατασκευή τοιχωμάτων κτιρίου [46] β)Εκτυπωμένα ορθοδοντικά αποτυπώματα [62] γ) Μοντέλο κινητήρα τζετ για εκπαιδευτικούς σκοπούς [63] δ)Πρωτότυπα και λειτουργικά μέρη αυτοκινήτου [47]

Σε αυτό το σημείο οφείλουμε να αναφέρουμε την σειρά πλεονεκτημάτων της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής:

- Ελευθερία στον σχεδιασμό : Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει το σχεδιασμό και την εκτύπωση πιο περίπλοκων γεωμετριών από τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής.
- Ταχεία προτυποποίηση και παραγωγή: Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να κατασκευάσει εξαρτήματα μέσα σε λίγες ώρες, γεγονός που επιταχύνει τη διαδικασία δημιουργίας πρωτοτύπων, η οποία είναι σημαντική για την ανάπτυξη ενός προϊόντος.

- Προσαρμογή στις ανάγκες του χρήστη: Η ελευθερία στον σχεδιασμό δίνει την δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων εστιασμένα στις ανάγκες και τις απαιτήσεις του χρήστη.
- Ελαχιστοποίηση των απωλειών: Η παραγωγή εξαρτημάτων απαιτεί μόνο την ποσότητα υλικού για το αντικείμενο αυτό καθαυτό, σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους που κόβονται από μεγάλα κομμάτια (blocks) υλικού, εξοικονομώντας πόρους, μειώνοντας παράλληλα το κόστος των χρησιμοποιούμενων υλικών.
- Προσιτή σε όλους παραγωγή : Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές γίνονται ολοένα και πιο προσιτοί και σε συνδυασμό με την ύπαρξη ηλεκτρονικών βιβλιοθηκών με αρχεία τρισδιάστατων σχεδίων διαφόρων αντικειμένων, είναι ευκολότερη η κατασκευή αντικειμένων από ανεξάρτητα άτομα.
- Ευελιξία υλικών: Η διαδικασία αυτή δίνει την δυνατότητα εκτύπωσης μεγάλης ποικιλίας υλικών αλλά και χρήσης πολλαπλών υλικών στο ίδιο αντικείμενο, με την χρήση ενός μηχανήματος.

### 2.2.2 Είδη Προσθετικής Κατασκευής

Οι επτά βασικές τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής όπως έχουν οριστεί σύμφωνα με το πρότυπο ASTM F2792, τα υλικά που χρησιμοποιούν, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθώς και ένα ενδεικτικό σχήμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Παρόλο που όπως αναφέραμε οι διάφορες αυτές τεχνολογίες χαρακτηρίζονται από την ίδια 'φιλοσοφία', αξίζει να περιγράψουμε εκτενέστερα τις δύο πιο δημοφιλείς μεθόδους.

Τεχνολογία	Εναλλακτικά Ονόματα	Υλικά	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Εικόνα
VAT Photopolymerizati on	SLA DLP 3SP CLIP	Ρητίνες φωτοπολυμερών που σκληραίνουν με υπεριώδη ακτινοβολία	Δημιουργία των στρωμάτων μέσω του φωτοπολυμερισμού της ρητίνης λόγω της έκθεσης σε ακτινοβολία UV	Υψηλό επίπεδο ακρίβειας και πολυπλοκότητας Λείο φινίρισμα επιφάνειας Μεγάλοι χώροι εκτύπωσης	
Powder Bed Fusion	SLS DMLS SLM EBM MJF	Άμμος και σκόνες πλαστικών, μετάλλων και κεραμικών	Λέιζερ πυροσυσσωματώνει επιλεκτικά τα σωματίδια της σκόνης, συντήκοντάς τα μεταξύ τους και χτίζοντας τα στρώματα	οματώνει επιλεκτικά α της σκόνης, . μεταξύ τους και α στρώματα Μεγάλη γκάμα υλικών	
Binder Jetting	VoxelJet	<ul> <li>Σκόνες πλαστικών, μετάλλων,</li> <li>VoxelJet</li> <li>Η κεφαλή εκτύπωσης κινείται στο επίπεδο XY και εναποθέτει εναλλασσόμενα στρώματα υλικού κατασκευής και συνδετικού υλικού</li> <li>Πλήρη έγχρωμη εκτύπωση Υψηλή παραγωγικότητα Μεγάλη γκάμα υλικών</li> </ul>			
Material Jetting	MJM	MJM Φωτοπολυμερή, Πολυμερή, Κεριά Δημιουργία των στρωμάτων με Υψηλό επίπεδο ακρίβειας Δυνατότητα πλήρως έγχρωμων μερών και στερεοποίηση του Πολλαπλά υλικά σε ένα μόνο εξάρτημα		**	
Sheet Lamination	LOM SDL UAM	Χαρτί, πλαστικά φύλλα και μεταλλικά φύλλα/ταινίες	Κατασκευή του τρισδιάστατου αντικειμένου στοιβάζοντας και ενώνοντας λεπτά φύλλα υλικού	Υψηλοί ογκομετρικοί ρυθμοί κατασκευής Σχετικά χαμηλό κόστος (μη μέταλλα) Δυνατότητα συνδυασμού μεταλλικών φύλλων	
Material Extrusion	FFF FDM	FFΘερμοπλαστικά νήματα και ΠέλλετΚαρούλι υλικού (συνήθως θερμοπλαστικό πολυμερές) ωθείται μέσα από ένα θερμαινόμενο ο το τρώματα καιΦθηνό και οικονομικό Επιτρέπει πολλαπλά χρώματα Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οικιακό περιβάλλον Τα αντικείμενα έχουν καλές δομικές σχηματιστούν τα στρώματα			
Direct Energy Deposition	LMD LENS DMD	Μεταλλικό σύρμα και σκόνη, με Κεραμικά	Μεταλλικό σύρμα και σκόνη, με         Τροφοδοσία σκόνης ή σύρματος σε μια ενεργειακή πηγή (συνήθως λέιζερ) και επιλεκτική εναπόθεση για τον σχηματισμό στρωμάτων         Δεν περιορίζεται από τον προσανατολισμό           Μεταλλικό σύρμα         Τροφοδοσία σκόνης ή σύρματος σε μια ενεργειακή πηγή (συνήθως λέιζερ) και επιλεκτική εναπόθεση για τον σχηματισμό στρωμάτων         Δεν περιορίζεται από τον προσανατολισμό		

Πίνακας 1 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής 24

### 2.2.2.1 Κατασκευή με εναπόθεση υλικού (FDM)

Η τεχνολογία της κατασκευής (μοντέλων) με εναπόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling- FDM) αναπτύχθηκε εμπορικά από την εταιρία Stratasys το 1990 και χρησιμοποιεί στερεά πρώτη ύλη. Μέσω της συγκεκριμένης τεχνολογίας μπορούν να παραχθούν αντικείμενα που έχουν ως πρώτη ύλη το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ή άλλα θερμοπλαστικά πολυμερή, γνωστά για την ανθεκτικότητά τους. Έτσι, η μέθοδος αυτή συχνά επιλέγεται όταν η μηγανική αντογή καθίσταται κρίσιμη για το κατασκευαζόμενο αντικείμενο. Όπως και οι υπόλοιπες μέθοδοι, η μέθοδος FDM λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της διαδοχικής στρωματικής κατασκευής. Κάθε στρώση παράγεται μέσω της εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού σε υγρή κατάσταση. Το υλικό τροφοδοτείται σε μορφή νήματος (filament) σε μια θερμαινόμενη κεφαλή, από όπου και εξωθείται σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης του. Η κεφαλή βρίσκεται τοποθετημένη σε κατάλληλη διάταξη η οποία της επιτρέπει να κινείται σε δύο άξονες (Χ και Υ) έτσι ώστε να είναι δυνατή η ελεγγόμενη εναπόθεση του υλικού πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής η οποία κινείται στον κατακόρυφο άξονα (Ζ) (Εικόνα 12) [44]. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως υπάρχουν στο εμπόριο εκτυπωτές με διάφορους συνδυασμούς κινήσεων κεφαλής-πλατφόρμας, όμως όλοι περιορίζονται στους τρείς βαθμούς ελευθερίας. Επίσης στην μέθοδο αυτή (καθώς και σε πολλές άλλες) είναι πιθανό να απαιτείται η κατασκευή υποστηρικτικής δομής (support) ανάλογα με τον προσανατολισμό και την μορφή του εκάστοτε κομματιού, η οποία αποκολλάται με ευκολία. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία αύξηση των εκτυπωτών FDM, λόγω των διαρκώς αυξανόμενων υλικών που μπορούν να τυπωθούν με αυτήν την μέθοδο αλλά και του μειωμένου κόστους αγοράς τόσο των ίδιων των εκτυπωτών όσο και των πρώτων υλών τους.



Figure 12 Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας FDM [64]

#### 2.2.2.2 Στερεολιθογραφία (SLA)

Ο όρος Στερεολιθογραφία (Stereolithography - SLA) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1986 από τον Charles W. Hull . Αποτελεί μέθοδο που χρησιμοποιεί ρευστή πρώτη ύλη και πιο συγκεκριμένα κατασκευάζει το στερεό αντικείμενο μέσω διαδοχικής στερεοποιήσης στρωμάτων φωτοπολυμερούς ρητίνης (υγρή ρητίνη που έχει την ιδιότητα να στερεοποιείται-πολυμερίζεται εάν εκτεθεί σε ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος). Για τη στερεοποιήση των διαδοχικών διατομών χρησιμοποιείται υπεριώδης ακτινοβολία με τη μορφή εστιασμένης ακτίνας λέιζερ, η οποία σαρώνει την επιφάνεια ενός κάδου υγρής ρητίνης. (Εικόνα 13) Πρόσφατα, αυτή η ακτίνα λέιζερ έχει αντικατασταθεί με λαμπτήρες LED που ακτινοβολούν UV ,σε συνδυασμό με μία οθόνη LCD , με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η προβολή και συνεπώς ο πολυμερισμός, ολόκληρου του προς κατασκευή στρώματος απευθείας (δεν χρειάζεται σάρωση), βελτιώνοντας αισθητά την ταχύτητα εκτύπωσης. Εδώ παρατηρούμε κίνηση μόνο της πλατφόρμας άρα έχουμε έναν βαθμό ελευθερίας. Τέλος, σε αυτήν την μέθοδο απαιτείται επίσης δημιουργία υποστηρικτικής κατασκευής.



Figure 13 Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας SLA [65]

#### 2.2.2.3 Κατασκευή με εναπόθεση υλικού (FDM) VS Στερεολιθογραφία (SLA)

Όπως αναφέραμε, οι δύο αυτές μέθοδοι είναι αρκετά δημοφιλείς καθώς αρχικά το κόστος των εκτυπωτών (όσο και των πρώτων υλών τους) είναι σχετικά χαμηλό, ο χειρισμός τους είναι απλός και το μέγεθός τους ικανό για οικιακή χρήση. Ωστόσο, κάθε μέθοδος εμφανίζει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η τελική επιλογή καθορίζεται από την κρίση του χρήστη και την αρμοδιότητα του εκάστοτε κομματιού. Αυτά συγκεντρώνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

	Κατασκευή με εναπόθεση υλικού (FDM)	Στερεολιθογραφία (SLA)	
	Ποικιλία υλικών με καλές	Υλικά με καλές θερμικές	
Πλεονεκτήματα	Μικρό κόστος αναλώσιμων	Αξιοπιστία και επαναληψιμότητα	
	Παραγωγή σχετικά μεγάλων διαστάσεων	Μεγάλη ακρίβεια εκτύπωσης	
	Μηδενική επεξεργασία του κομματιού μετά την εκτύπωση	Ικανότητα εκτύπωσης πολύπλοκων γεωμετριών	
	Χαμηλή ακρίβεια εκτύπωσης	Φωτοευαίσθητα υλικά	
	Ευθυγράμμιση της πλατφόρμας πριν από κάθε χρήση	Περιορισμένος όγκος εκτύπωσης	
Μειονεκτήματα	Διαστρωματική αποκόλληση	Περαιτέρω επεξεργασία για την συντήρηση του κομματιού μετά την	
		εκτύπωση	

Πίνακας 2 Σύγκριση των δύο τεχνολογιών ΠΚ

### 2.2.3 Στάδια Παραγωγής Κομματιών με Προσθετική Κατασκευή

Ανεξάρτητα από την επιλογή της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, υπάρχουν τέσσερα βασικά στάδια που χαρακτηρίζουν αυτήν την παραγωγική διαδικασία. Κάθε ένα από αυτά τα στάδια έχει τις δικιές του δυσκολίες και ιδιαιτερότητες και μπορεί να επηρεάσει εξίσου το τελικό αποτέλεσμα, αναδεικνύοντας έτσι τις πολλές παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για μία επιτυχημένη παραγωγή.



Figure 14 Σχηματική απεικόνιση των σταδίων της παραγωγής αντικειμένων με την χρήση διαδικασιών ΠΚ [66]

Το πρώτο στάδιο αποτελεί η σχεδίαση του τρισδιάστατου (3D) ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου μέσω ενός συστήματος μηχανολογικής ή βιομηχανικής σχεδίασης (CAD). Η τρισδιάστατη σχεδίαση είναι μία εξαιρετικά συνηθισμένη πλέον εργασία λόγω της διαρκώς αυξανόμενης διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος και της συνεχούς βελτίωσης των σχεδιαστικών λογισμικών. Έτσι είναι δυνατή η τρισδιάστατη αναπαράσταση του επιθυμητού κομματιού με μεγάλη ακρίβεια, αλλά και η οπτικοποίηση οποιασδήποτε κίνησης ή αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιμέρους κομματιών μίας συναρμογής. Σε συνδυασμό μάλιστα με κάποιο υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων, μπορούμε πλέον να ελέγξουμε εκ των προτέρων την συμπεριφορά της κατασκευής μας υπό ορισμένα φορτία ή ρεολογικές συνθήκες.

Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από τις προπαρασκευαστικές εργασίες σύμφωνα με το τρισδιάστατο μοντέλο και από τον προγραμματισμό κατασκευής στην μηχανή προσθετικής μηχανικής (ΠΚ). Για την εξαγωγή του μοντέλου μας από το σχεδιαστικό λογισμικό και την μεταφορά των γεωμετρικών δεδομένων στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας, χρησιμοποιείται το πρότυπο STL (προκύπτει από το STereoLithography), το οποίο αναπτύχθηκε από την 3D Systems. Είναι ουσιαστικά ένα πολυεδρικό πρότυπο (facet format) στο οποίο οι επιφάνειες του τρισδιάστατου μοντέλου προσεγγίζονται από τρίγωνα, κατά την απλούστερη δηλαδή πολυεδρική προσέγγιση/ψηφιδωτή αναπαράσταση (tessellated modeling) . Καθώς πρόκειται για ένα απλό μοντέλο επιφανειών, το πρότυπο STL περιγράφει μόνο την γεωμετρία της επιφάνειας (και όχι τον όγκο του στερεού) χωρίς περαιτέρω πληροφορίες για το χρώμα, την υφή, το υλικό, τις κατασκευαστικές ανοχές και άλλα κοινά χαρακτηριστικά του μοντέλου CAD [44]. Ωστόσο έχει επικρατήσει λόγω της απλότητας αλλά και της ουδετερότητας του, δηλαδή ότι δεν εξαρτάται από το λογισμικό σχεδίασης.

Οι επόμενες προπαρασκευαστικές εργασίες αφορούν την επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης, τον 'τεμαχισμό' (slicing) του αντικειμένου και την δημιουργία των απαραίτητων για την εκτύπωση υποστηρικτικών δομών. Όλες αυτές οι διαδικασίες γίνονται με την χρήση ενός λογισμικού, που επιλέγεται από τον χρήστη, σύμφωνα πάντα και με την συμβατότητα



Figure 15 Υποστηρικτική δομή για διαφορετικούς προσανατολισμούς κατασκευής φιάλης. [44]

του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Το αρχείο .STL που εξήγαμε από το σχεδιαστικό μας πακέτο λοιπόν, εισάγεται στο προαναφερόμενο λογισμικό, όπου επιλέγουμε αρχικά τον προσανατολισμό της κατασκευής. Αυτός ορίζεται ως η θέση του αντικειμένου σε σχέση με το

σύστημα συντεταγμένων της μηχανής και ειδικά τον άξονα Ζ, ο οποίος αποτελεί την διεύθυνση κατά τη οποία προστίθενται τα διαδοχικά στρώματα (Εικόνα 15). Ο προσανατολισμός επηρεάζει την διάρκεια και την ποιότητα της εκτύπωσης καθώς και την ποσότητα των στηριγμάτων που απαιτούνται, συνεπώς πρέπει να γίνει συνειδητή και σωστή επιλογή από τον γρήστη με βάσει το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα και τις ιδιότητες του. Έπειτα, σύμφωνα με το είδος της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής, υπολογίζονται αυτόματα από το λογισμικό τα σημεία που χρειάζονται στήριξη και δημιουργείται η κατάλληλη υποστηρικτική δομή (support structure). Αυτή είναι απαραίτητη σε πολλές τεχνολογίες ΠΚ, καθώς εξασφαλίζει την ακεραιότητα και την σταθερότητα της κατασκευής κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, προφυλάσσοντας παράλληλα τα τμήματα του αντικειμένου που εξέχουν ή κρέμονται' βάσει του επιλεγμένου προσανατολισμού, από το να καμφθούν λόγω του βάρους τους. Στην συνέχεια επιλέγουμε τις παραμέτρους εκτύπωσης. Εφόσον έχουμε εισάγει το μοντέλο του εκτυπωτή μας στο λογισμικό, ορίζουμε τις ιδιότητες του υλικού (είτε επιλέγουμε το υλικό αν υπάρχει από υπάρχουσες βιβλιοθήκες, είτε ορίζουμε εμείς τις ιδιότητες σύμφωνα με τον κατασκευαστή ή την βιβλιογραφία) που επρόκειτο να τυπώσουμε. Ανάλογα με την τεχνολογία ΠΚ, υπάρχουν διαφορετικές παράμετροι που πρέπει ο χρήστης να γνωρίζει και να ρυθμίζει κατάλληλα. Ωστόσο μια κοινή και σημαντική παράμετρος είναι το πάχος στρώματος (layer thickness) το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οριζόντιων επιπέδων. Αυτή η απόσταση, που αναφέρεται επίσης και με τον όρο βήμα τεμαχισμού (slicing step) επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αντικειμένου, σε βάρος όμως της διάρκειας εκτύπωσης (μικρότερο πάχος στρώματος οδηγεί σε περισσότερα στρώματα που πρέπει να κατασκευαστούν, σε μεγαλύτερη ακρίβεια της 'αποτύπωσης' του σχεδίου, αλλά και σε μεγαλύτερη διάρκεια εκτύπωσης). Τελικά, έχοντας επιλέξει με προσοχή όλες τις παραμέτρους εκτύπωσης, το λογισμικό τεμαχισμού παράγει το αρχείο διατομών (sliced file), δηλαδή μία ιεραρχημένη στοίβα δισδιάστατων τομών που περιγράφουν γεωμετρικά τα στρώματα που πρέπει να κατασκευασθούν από τη μηχανή, για να παραχθεί το τελικό μας αντικείμενο. Παράλληλα, αυτές οι τομές 'μεταφράζονται' σε γλώσσα μηχανής και συγκεκριμένα σε κώδικα-G (G-code) (ο κώδικας-G είναι η πιο διαδεδομένη γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου και χρησιμοποιείται για την καθοδήγηση αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών, σε υποβοηθούμενη από Η/Υ κατασκευή προϊόντων ), ο οποίος περιέχει τις εντολές που θα οδηγήσουν σε μία αλληλουχία κινήσεων του τρισδιάστατου εκτυπωτή, για να χτίσει το αντικείμενο μας.

Στην τρίτη φάση της διαδικασίας, το αρχείο με τον κώδικα-G εισάγεται στην μηχανή και ξεκινά η κατασκευή του αντικειμένου. Ανάλογα με την τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής, ενδέχεται να απαιτούνται κάποιες περαιτέρω ρυθμίσεις της ίδιας της μηχανής πριν την εκτύπωση, όπως ενδεικτικά για παράδειγμα ρύθμιση της ταχύτητας της κεφαλής εναπόθεσης υλικού και ευθυγράμμιση της πλατφόρμας εκτύπωσης, για την τεχνολογία FDM. Ωστόσο αυτή η φάση είναι εντελώς αυτοματοποιημένη και δεν απαιτεί την παρουσία του χρήστη , με δεδομένο φυσικά ότι έχει δημιουργήσει τις σωστές συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία του χώρου εκτύπωσης και η συνεχώς ανεμπόδιστη παροχή ή παρουσία υλικού.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής φάσης, στο τελικό στάδιο, το αντικείμενο μας απομακρύνεται από την πλατφόρμα εκτύπωσης και υπόκειται σε κάποιες μεταπαρασκευαστικές εργασίες. Έτσι αρχικά αφαιρούνται τα στηρίγματα που πιθανόν να υπάρχουν, όπως και τα υπολείμματα πρώτης ύλης. Έπειτα, ανάλογα με την φύση της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας ΠΚ, ίσως απαιτούνται επιπλέον μετα-παρασκευαστικές εργασίες όπως η τοποθέτηση του κομματιού εντός κατάλληλου θαλάμου «ωρίμανσης», όπου εκτίθεται σε κατάλληλες συνθήκες προκειμένου να αποκτήσει την επιθυμητή αντοχή. Στο τέλος όλης αυτής της σειράς διαδικασιών, έχουμε το τελικό μας αντικείμενο έτοιμο για χρήση.

#### 2.3 Κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων

Όπως είναι λογικό, τα στάδια που περιγράψαμε πιο πάνω ακολουθήθηκαν και κατά την διαδικασία παραγωγής των προς εξέταση δοκιμίων μας. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα περιγράψουμε αυτήν την διαδικασία, δίνοντας έμφαση στα υλικά και τα μηχανήματα που χρησιμοποιήσαμε, καθώς επίσης και στα βοηθητικά στάδια που ακολουθήθηκαν.

Αρχικά, καθοριστικό ρόλο σε όλη αυτήν την παραγωγική διαδικασία παίζει η επιλογή της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής και του τρισδιάστατου εκτυπωτή (3D Printer) που θα χρησιμοποιήσουμε. Έτσι, επιλέξαμε την διαδικασία της Στερεολιθογραφίας (SLA), λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας των δοκιμίων αλλά και της εξαιρετικής ανάλυσης των αντικειμένων που παράγονται με αυτήν την τεχνολογία. Επίσης, η συνοχή μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων και η φόρτιση σε σχέση με τον προσανατολισμό αυτών , είναι παράγοντες που δεν θέλαμε να επηρεάσουν και να συμπεριληφθούν στην ανάλυση μας, καθιστώντας την τεχνολογία FDM ακατάλληλη επιλογή. Παράλληλα, η απουσία σχετικής βιβλιογραφίας για τον δυναμικό χαρακτηρισμό δοκιμίων που έχουν παραχθεί με την SLA τεχνική και η εύκολη πρόσβαση μας σε έναν τέτοιου τύπου εκτυπωτή, ολοκληρώνουν την λίστα με τους λόγους που μας ώθησαν στην τελική μας επιλογή. Ο εκτυπωτής που

χρησιμοποιήσαμε είναι ο Photon Mono X της εταιρίας ANYCUBIC, ο οποίος φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί μαζί με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά. Πρόκειται προφανώς για έναν εκτυπωτή της οικογένειας SLA, ο οποίος θυμίζουμε πως χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη υγρή ρητίνη, την οποία πολυμερίζει μέσω της έκθεσης της σε υπεριώδη ακτινοβολία UV, δημιουργώντας έτσι τα διαδοχικά στρώματα. Αυτό που αξίζει να αναφέρουμε, είναι πως ο συγκεκριμένος εκτυπωτής δεν διαθέτει μία ακτίνα λέιζερ η οποία 'σκανάρει' το κάθε στρώμα για να πολυμερίσει το υλικό, αντιθέτως προβάλει και συνεπώς πολυμερίζει, ολόκληρο το στρώμα απευθείας, με την χρήση λαμπτήρων led σε συνδυασμό με μία οθόνη LCD (Εικόνα 16). Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά αισθητά πιο γρήγορη την διαδικασία της εκτύπωσης, θυσιάζοντας βέβαια την ακρίβεια στις διαστάσεις λόγω της διακριτοποίησης των παραγόμενων καμπυλών (Εικόνα 16).



Figure 16 Τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή που χρησιμοποιήσαμε (Επάνω) και σχηματική απεικόνιση της διαφοράς στην προβολή των στρωμάτων, μεταξύ τεχνικής SLA και MSLA (ή DLP ή LCD-BASED SLA)

Έπειτα επιλέγουμε το υλικό που επρόκειτο να εκτυπώσουμε, δηλαδή στην δική μας περίπτωση την ρητίνη που θα χρησιμοποιήσουμε. Παρόλο που οι εκτυπωτές SLA υστερούν σε ποικιλία υλικών που μπορούν να τυπώσουν, οι ρητίνες που χρησιμοποιούν έχουν βελτιωθεί με την πάροδο των χρόνων και εμφανίζουν καλά μηχανολογικά χαρακτηριστικά. Εμείς επιλέξαμε την ρητίνη M58 της εταιρίας Resione, η οποία αναφέρει ότι μοιάζει με το θερμοπλαστικό ABS και είναι συμβατή με τον εκτυπωτή μας.

Στην συνέχεια εκτελέσαμε ένα προ-παρασκευαστικό στάδιο το οποίο είναι προαιρετικό και αφορά την ρύθμιση παραμέτρων εκτύπωσης της συγκεκριμένης ρητίνης. Αν και ο κατασκευαστής αναφέρει τις τιμές των παραμέτρων που θα πρέπει να επιλέξουμε, συνίσταται για έναν καινούριο συνδυασμό εκτυπωτή-ρητίνης τον οποίο δεν έχουμε χρησιμοποιήσει ξανά, να εκτυπώνουμε κάποια κομμάτια αναφοράς (benchmarks), ώστε να πετύχουμε στην πράξη τις σωστές παραμέτρους. Πρόκειται για κατασκευές οι οποίες περιέχουν διάφορες γεωμετρίες με λεπτομέρειες, που αναδεικνύουν την ακρίβεια, την ορθότητα και τις δυνατότητες της εκτύπωσης γενικά. Έτσι αντλήσαμε τα σχέδια αυτών των κομματιών από το διαδίκτυο, τα οποία και εκτυπώσαμε αφού ορίσαμε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης για το καθένα. Τελικά, εξετάζοντας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της εκτύπωσης για το καθένα, καταλήξαμε στις κατάλληλες παραμέτρους εκτύπωσης.

Το τελευταίο προ-παρασκευαστικό στάδιο είναι η επιλογή του λογισμικού τεμαχισμού (slicing software). Επιλέξαμε το λογισμικό Chitubox που ενδείκνυται για εκτυπώσεις της SLA οικογένειας και είναι συμβατό με τον εκτυπωτή μας. Έτσι ορίσαμε το προσανατολισμό των κομματιών μας, τις ιδιότητες της ρητίνης που επιλέξαμε, τις διάφορες παραμέτρους εκτύπωσης που αφορούν τους χρόνους έκθεσης κ.ά. ,(Εικόνα 17) και στο τέλος εξήγαμε τα αρχεία που θα εισάγουμε στον εκτυπωτή.

			_						
Machine	Resin		C Print #	Adva	inced	122			
Layer Height:	0,050	mm	Bottom Lift Distance:	8,000	mm				line ware
Bottom Layer Count:	4		Lifting Distance:	8,900	mm	400 880 880			bakers mill ert meget. 777 m
Exposure Time:	2,800	s	Bottom Retract Distance:	8,000	mm				Anna 200
Bottom Exposure Time:	55,000	s	Retract Distance:	8,000	mm	2222			
Waiting Mode During Printing:	Light ¥		Bottom Lift Speed:	180,900	mm/min			1004	West ledge
Light-off Delay:	0,500	s	Lifting Speed:	180,000	mm/min				
Bottom Light-off Delay:	0,500	s	Bottom Retract Speed:	240,000	mm/min	~	1888		
			Retract Speed:	240,000	mm/min		-		

Figure 17 Περιβάλλον του λογισμικού Chitubox : Επιλογή των διαφόρων παραμέτρων εκτύπωσης (Αριστερά), αναπαράσταση του επιλεγμένου προσανατολισμού και των προς κατασκευή στρωμάτων (layers) (Δεζιά)

Ακολούθησε η σημαντική διαδικασία της εκτύπωσης. Σε αυτό το στάδιο όπως αναφέραμε, δεν απαιτείται κάποια εποπτεία από τον χειριστή καθώς είναι αυτοματοποιημένη διαδικασία. Ωστόσο έπρεπε να εξασφαλίσουμε πως έχουμε εισάγει στην 'δεξαμενή' την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης που θα χρειαστεί για την εκτύπωση , καθώς και την σωστή θερμοκρασία για την λειτουργία της. Με δεδομένα αυτά, ξεκινήσαμε την διαδικασία της εκτύπωσης η οποία διήρκησε έξι (6) ώρες για μία τετράδα δοκιμίων (Εικόνα 18.3). Συνολικά εκτυπώσαμε εικοσιεπτά (27) δοκίμια: 3 τύποι κυψελίδων TPMS x 3 τιμές για το εκάστοτε porosity x 3 παρτίδες δοκιμίων . Αυτό έγινε με σκοπό την σύγκριση της επαναληψιμότητας της εκτύπωσης των δοκιμίων αλλά και των πειραμάτων που εκτελέσαμε .

Το τελευταίο στάδιο ήταν ο καθαρισμός των δοκιμίων και η 'ωρίμανση' τους. Αφού αφαιρέσαμε τα δοκίμια μας από την πλατφόρμα εκτύπωσης, τα τοποθετήσαμε μέσα σε ισοπροπυλική αλκοόλη για τον καθαρισμό της απομένουσας ρητίνης στην επιφάνεια του εκάστοτε κομματιού που δεν έχει πολυμεριστεί. Αυτό έγινε με την χρήση της αντίστοιχης συσκευής από την εταιρία Creality που φαίνεται στην Εικόνα 18.4&5. Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με αναδευτήρα, ο οποίος δημιουργεί μία κίνηση της ισοπροπιλικής αλκοόλης μέσα στο δοχείο, για αποτελεσματικότερο καθαρισμό. Στην συνέχεια απομακρύναμε το δοχείο με την αλκοόλη και τοποθετήσαμε έναν περιστρεφόμενο δίσκο στην ίδια συσκευή, όπου και τοποθετήσαμε τα δοκίμια μας για την διαδικασία της 'ωρίμανσης' τους, μέσω της έκθεσης σε ακτινοβολία UV. Έτσι επιτυγχάνεται ο πολυμερισμός της ρητίνης που δεν έχει καθαριστεί σε διάφορα σημεία της κατασκευής μετά το πλύσιμο αλλά και η γενικότερη σκλήρυνση του κομματιού ώστε να είναι έτοιμο για χρήση.



1)

2)

3)



Figure 18 Εικόνες των διαφόρων σταδίων της διαδικασίας εκτύπωσης των δοκιμίων : 1) Επιλογή εκτυπωτή και υλικού 2) Προαιρετικό στάδιο καλιμπραρίσματος της ρητίνης 3) Εκτύπωση των δοκιμίων 4) Διαδικασία καθαρισμού με ισοπροπιλική αλκοόλη 5)Διαδικασία 'ωρίμανσης' μέσω έκθεσης σε ακτινοβολία UV

### 2.4 Αξιολόγηση της διαδικασίας κατασκευής

Μετά το τέλος όλων των προαναφερόμενων διαδικασιών, έχουμε τελικά τα πειραματικά μας δοκίμια που φαίνονται στην Εικόνα 19. Ακολούθησε η μέτρηση των διαστάσεων και της μάζας των εκτυπωμένων κομματιών με σκοπό την σύγκριση τους με το σχεδιαστικό πακέτο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους συγκεντρωτικούς πίνακες.



Figure 19 Πειραματικά Δοκίμια

Pattern	Porosity	Θεωρητική Μάζα (gr)	Μάζα Batch 1 (gr)	Απόκλιση (%)	Μάζα Batch 2 (gr)	Απόκλιση (%)	Μάζα Batch 3 (gr)	Απόκλιση (%)
	70	37.63	43.65	16.00	47.39	25.94	43.42	15.39
Primitive	75	33.29	39.85	19.71	41.15	23.61	41.84	25.68
	80	27.31	32.32	18.34	35.37	29.51	33.8	23.76
	70	37.46	46.25	23.47	51.34	37.05	46.75	24.80
Diamond	75	32.67	41.79	27.92	45.62	39.64	45.59	39.55
	80	27.57	35.8	29.85	39.27	42.44	37.52	36.09
	70	41.48	49.72	19.86	48.51	16.95	47.05	13.43
Gyroid	75	35.86	43.11	20.22	42.88	19.58	45.94	28.11
	80	29.43	36.41	23.72	38	29.12	40.14	36.39

Πίνακας 3 Σύγκριση θεωρητικής και πραγματικής μάζας δοκιμίων

Patternn	Porosity	Θεωρητ	ικές Διαα TPMS	στάσεις	Πραγματικές Διαστάσεις			Απόκλιση (%)		
		Μήκος	Ύψος	Πλάτος	Μήκος	Ύψος	Πλάτος	Μήκος	Ύψος	Πλάτος
		(mm)	(mm)	(mm)						
	70.00	188	20	21	188	20.07	21.09	0.00	0.35	0.43
Primitive	75.00	188	20	21	188	20.43	21.07	0.00	2.15	0.33
	80.00	188	20	21	187.5	19.95	20.95	0.27	0.25	0.24
	70.00	188	20	21	188	19.98	21.14	0.00	0.10	0.67
Diamond	75.00	188	20	21	188	19.93	21.05	0.00	0.35	0.24
	80.00	188	20	21	188	20.02	21.03	0.00	0.10	0.14
	70.00	188	21	22	187.5	21.42	22.07	0.27	2.00	0.32
Gyroid	75.00	188	21	22	187.5	21.45	22.04	0.27	2.14	0.18
	80.00	188	21	22	187.5	21.4	22.05	0.27	1.90	0.23

Πίνακας 4 Σύγκριση θεωρητικών και πραγματικών διαστάσεων του πυρήνα των δοκιμίων

Pattern	Porosity	Θεωριτικέα Πλ	ς Διαστάσεις άκας	Διαστάσεις	Πλάκας	Απόκλ	ւօղ (%)
		Ύψος	Πλάτος	Ύψος	Πλάτος	Ύψος	Πλάτος
		(mm)	(mm)				
	70.00	0.75	22	0.97	21.96	29.33	0.18
Primitive	75.00	0.75	22	0.95	21.98	26.67	0.09
	80.00	0.75	22	0.93	21.94	24.00	0.27
	70.00	0.75	22	0.96	22.01	28.00	0.05
Diamond	75.00	0.75	22	1.01	22.04	34.67	0.18
	80.00	0.75	22	0.95	22.01	26.67	0.05
Gyroid	70.00	0.75	23	0.97	22.97	29.33	0.13
	75.00	0.75	23	0.91	22.93	21.33	0.30
	80.00	0.75	23	0.92	22.95	22.67	0.22

Πίνακας 5 Σύγκριση θεωρητικών και πραγματικών διαστάσεων της εξωτερικής πλάκας των δοκιμίων

Είναι φανερό πως υπάρχει διαφορά μεταξύ των δοκιμίων που σχεδιάσαμε και αυτών που εν τέλει πήραμε από την τρισδιάστατη εκτύπωση. Έτσι, οι διαφορές στις διαστάσεις, αν και είναι μικρές πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Η μεγάλη απόκλιση όμως, παρατηρείται στην μάζα των πραγματικών δοκιμίων, η οποία αν και επηρεάζεται από τις διαστάσεις (μεγαλύτερες διαστάσεις συνεπάγονται και μεγαλύτερη μάζα) κυρίως οφείλεται στην συγκράτηση ρητίνης στο εσωτερικό των δοκιμίων. Αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται αρχικά στη τεχνική του τρισδιάστατου εκτυπωτή που επιλέξαμε. Όπως αναφέραμε, χρησιμοποιεί μία οθόνη LCD αντί μίας ακτίνας λέιζερ, για την προβολή του κάθε στρώματος, γεγονός που οδηγεί σε μία πιο διακριτοποιημένη αναπαράσταση των καμπυλών της κατασκευής, με συγκριτικά λιγότερη λεπτομέρεια (Εικόνα 16). Έπειτα η πολύπλοκη γεωμετρία των δοκιμίων επηρεάζει την κατασκευαστική διαδικασία. Κατά την εκτύπωση εγκλωβίζεται στο εσωτερικό των δομών περισσευούμενη ρητίνη η οποία δεν μπορεί να διαφύγει κατά την διαδικασία του πλυσίματος και της ωρίμανσης, διότι αφενός δεν το ευνοεί το πυκνό πλέγμα των δοκιμίων και αφετέρου δεν μπορούμε να πετύχουμε την ακριβή επανάληψη των συνθηκών των μεταπαρασκευαστικών διαδικασιών. Τέλος δεν θα πρέπει να ξεχνάμε πως η γεωμετρία μας εισέρχεται στο λογισμικό τεμαχισμού, όντας ήδη διακριτοποιημένη με την χρήση τριγώνων, γεγονός που αλλοιώνει σε κάποιο βαθμό τις καμπύλες της γεωμετρίας μας. Αυτό το φαινόμενο δεν επηρεάζει έντονα το αποτέλεσμα, ωστόσο οφείλουμε να το αναφέρουμε καθώς τα δοκίμια μας είναι μικρών διαστάσεων και απαρτίζονται από πολύπλοκες καμπύλες.

Ορισμένες βελτιώσεις για όλα αυτά τα προβλήματα είναι η επιλογή κατάλληλου προσανατολισμού εκτύπωσης για κάθε σχέδιο (pattern) ώστε να μην έχουμε συγκράτηση ρητίνης στο εσωτερικό, η χρήση 'πυκνότερης' διακτιροποίησης για την δημιουργία του .STL αρχείου, η χρήση καλύτερου Laser-SLA τρισδιάστατου εκτυπωτή και η εξασφάλιση λεπτομερών και επαναλήψιμων μετα-παρασκευαστικών διαδικασιών.

36
# Κεφάλαιο 3 : Πειραματική Διαδικασία

### 3.1 Εισαγωγή – Σκοπός

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η αναλυτική περιγραφή και παρουσίαση, των πειραματικών διαδικασιών που εκτελέστηκαν. Περιγράφονται οι εξοπλισμοί που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κάθε διαδικασίας και γίνονται παρατηρήσεις σχετικά με την μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων.

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζεται αρχικά η διαδικασία χαρακτηρισμού του υλικού. Καθώς η τρισδιάστατη εκτύπωση επηρεάζει την μηχανική αντοχή του υλικού θεωρήθηκε πρέπον να εκτελεστεί αυτή η διαδικασία για ένα συμπαγές δοκίμιο από το υλικό που χρησιμοποιήσαμε. Στην συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία του δυναμικού χαρακτηρισμού των δοκιμίων μας. Πραγματοποιήθηκε η ταλάντωση τους με σκοπό την διέγερση της πρώτης καμπτικής ιδιωμορφής και την εύρεση της αντίστοιχης ιδιωσυχνότητας. Έπειτα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων όπου παρήχθησαν τα πειραματικά διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης, υπολογίστηκαν οι επιλεγμένες ιδιότητες και παρουσιάστηκαν στιγμιότυπα από την διαδικασία με σκοπό την ανάδειξη της μορφής των παραμορφωμένων δοκιμίων. Τέλος, πραγματοποιήσαμε το πείραμα της θλίψης των δοκιμίων προκειμένου να διακρίνουμε τον μηχανισμό κατάρρευσης του κάθε τύπου στοιχειώδους κυψελίδας, καθώς και για να υπολογίσουμε την ενέργεια που απορρίφθηκε . Για όλες τις διαδικασίες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα που συγκρίνουν την επίδραση της κυψελίδας και της τιμής του πορώδους στην μηχανική συμπεριφορά.

### 3.2 Μερικός Χαρακτηρισμός Υλικού

Είναι εύκολα κατανοητό πως η μηχανική συμπεριφορά μίας κατασκευής εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού (ή των υλικών) που την απαρτίζει. Ένα από τα βασικότερα πειράματα που συμβάλει στην εξαγωγή των ιδιοτήτων του υλικού, είναι το πείραμα του εφελκυσμού, όπου το εκάστοτε δοκίμιο υπόκειται σε ελεγχόμενα εφελκυστικά φορτία μέχρι την θραύση του. Για τα ισότροπα υλικά το πιο σύνηθες πείραμα είναι η δοκιμή υπό μονοαξονικό εφελκυστικό φορτίο, από όπου εξάγουμε το Μέτρο Ελαστικότητας, τον λόγο Poisson, το Όριο Διαρροής και άλλα χαρακτηριστικά του υλικού, διακρίνοντας παράλληλα από την μορφή του παραγόμενου διαγράμματος Τάσης-Παραμόρφωσης, την μακροσκοπική συμπεριφορά του υλικού. Όσον αφορά τις κατασκευές που προκύπτουν από μεθόδους Προσθετικής Κατασκευής, η μηχανική συμπεριφορά τους εξαρτάται αφενός από τις ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου υλικού και αφετέρου από τον προσανατολισμό τους, κατά την διάρκεια της κατασκευής, καθώς η ένωση μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων υστερεί σε αντοχή, οδηγεί σε ανισοτροπίες του υλικού και επηρεάζει αρνητικά την συνολική συμπεριφορά. Ο βαθμός επίδρασης αυτού του παράγοντα βέβαια, εξαρτάται από την τεχνολογία ΠΚ και τις παραμέτρους εκτύπωσης που επιλέγονται.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αποφασίσαμε να εκτελέσουμε το πείραμα του μονοαξονικού εφελκεσιμού. Παρόλο που ο κατασκευαστής του υλικού που χρησιμοποιήσαμε παρέχει δεδομένα για τις ιδιότητες του, όπως προαναφέραμε, η φορά κατασκευής των δοκιμίων επηρεάζει τις ιδιότητες αυτές. Έτσι κατασκευάσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή ένα συμπαγές δοκίμιο διαστάσεων 12 x 5 x 180 (mm) με τον ίδιο προσανατολισμό που επιλέξαμε και για τα υπόλοιπα προς εξέταση δοκίμια, δηλαδή κάθετα στην πλατφόρμα του εκτυπωτή (Εικόνα 18). Το συμπαγές αυτό δοκίμιο εισήχθη στην μηχανή δοκιμών INSTRON 8802 (την οποία χρησιμοποιήσαμε για όλες τις πειραματικές διαδικασίες που εκτελέσαμε) εξοπλισμένη με δυναμοκυψέλη 25 KN, προκειμένου να εκτελεστεί το πείραμα του μονοαξονικού εφελκυσμού και έτσι το δοκίμιο φορτίστηκε με σταθερό ρυθμό 1 mm/min μέχρι τη θραύση του. Από την μηχανή δοκιμών πήραμε δεδομένα για την Δύναμη συναρτήσει της Μετατόπισης της αρπάγης, τα οποία χρησιμοποιώντας τις διαστάσεις του δοκιμίου μετατρέψαμε στο γνωστό διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης (Εικόνα 20). Παράλληλα προσαρτήσαμε στο δοκίμιο ένα μονοαξονικό μηκυνσιόμετρο και μία ροζέτα συνολικής αντίστασης 350 Ohm για την εξαγωγή του λόγου Poisson.



Figure 20 Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης (Αριστερά) και Πειραματική διάταξη εφελκυσμού του δοκιμίου (Δεξιά)

Πριν προχωρήσουμε στην εξαγωγή των ιδιοτήτων οφείλουμε να αναφέρουμε πως η συγκεκριμένη διαδικασία συμβάλει στον μερικό χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του υλικού και δεν αποτελεί ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος. Η επίδραση της φοράς εκτύπωσης στην συμπεριφορά του υλικού, καθιστά αναγκαία την κατασκευή και τη διερεύνηση των ιδιοτήτων, συμπαγών πειραματικών δοκιμίων, κατασκευασμένων υπό διάφορες γωνίες εκτύπωσης (Εικόνα 21)[52], για τον πλήρη χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του εκάστοτε υλικού. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία αποτελεί ξεχωριστό πεδίο έρευνας και ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας.



Figure 21 Απεικόνιση διάφορων προσανατολισμών εκτύπωσης [52]

Έχοντας αντλήσει τα δεδομένα από την πειραματική μας διαδικασία, μπορούμε πλέον να εξάγουμε τις ιδιότητες για το υλικό μας. Έτσι αρχικά βλέπουμε στην Εικόνα 22 γ) τις τιμές της παραμόρφωσης που καταγράφηκαν από την μηχανή δοκιμών INSTRON και προέκυψαν όπως προαναφέραμε, από το ένα αξονικό μηκυννσιόμετρο (Axial 1) και από το δεύτερο αξονικό μηκυνσιόμετρο της ροζέτας (Axial 2). Μεταξύ αυτών των δύο τελευταίων παρατηρούμε μία διαφορά στις τιμές τους και γι' αυτό υπολογίζουμε τον μέσο όρο τους (Mean Value). Το Μέτρο Ελαστικότητας υπολογίζεται ως η κλήση της ευθείας στο διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης, όπου το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά και υπακούει στον νόμο του Hooke. Για μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιούμε την ευθεία που προκύπτει από τις τιμές των μηκυνσιομέτρων και η τιμή καταγράφεται στον Πίνακα 6. Καθώς ο εφελκυσμός του δοκιμίου συνεχίζεται και η παραμόρφωση του μεγαλώνει, τα μηκυνσιόμετρα σπάνε και χρησιμοποιούμε τα δεδομένα της μηχανής δοκιμών, που δεν απέχουν πολύ από αυτά των μηκυνσιομέτρων, για την κατασκευή του συνολικού διαγράμματος Τάσης-Παραμόρφωσης (Εικόνα 22 α).Έτσι παρατηρούμε πως υπάρχει και μία δεύτερη γραμμική περιοχή (Σημείο 1 έως 2) με διαφορετική κλίση, άρα και Μέτρο Ελαστικότητας, που καταγράφεται στον Πίνακα 6. Από το σημείο 2 ξεκινά η διαρροή του υλικού, όπου δεν παρατηρείται ελαστική συμπεριφορά και επέρχεται τελικά η θραύση του δοκιμίου. Όσον αφορά τον λόγο Poisson (ν), υπολογίζεται στο σημείο που αντιστοιχεί στο 5% των μετρήσεων των μηκυνσιομέτρων, διαιρώντας την τιμή της παραμόρφωσης του πλευρικού (Lateral) μηκυνσιομέτρου, με αυτήν του μέσου όρο των αξονικών (ν=-ε<sub>y</sub>/ε<sub>x</sub>). Γενικά, παρατηρώντας την μορφή του διαγράμματος, βλέπουμε πως το υλικό μας, για την συγκεκριμένη φορά εκτύπωσης (0°) και την φόρτιση του παράλληλα σε αυτήν, εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά, καθώς δεν παρατηρείται κάποια καμπή στο διάγραμμα που να υποδεικνύει την αποθήκευση ενέργειας και την δημιουργία 'λαιμού' στο τέλος του πειράματος (Εικόνα 22β).



Figure 22 Διαγράμματα α)Τάσης-Παραμόρφωσης και Αστοχίας του δοκιμίου από την μηχανή δοκιμών β)Εζεταζόμενο δοκίμιο γ)Τάσης-Παραμόρφωσης από την μηχανή δοκιμών και τα αζονικά μηκυνσιόμετρα δ)Τάσης-Παραμόρφωσης από το πλευρικό μηκυνσιόμετρο

Τα συνολικά δεδομένα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία αναγράφονται στον ακόλουθο συγκεντρωτικό Πίνακα.

Ελαστικές Περιοχές	ПЕРІОХН 0-1	<b>ПЕРІОХН 1-2</b>
Μέτρο Ελαστικότητας	1,275 GPa	715 MPa
Λόγος Poisson	0.33	
Μέτρο Ελαστικότητας Κατασκευαστή	614,5 MPa	

Πίνακας 6 Μετρούμενες ιδιότητες του υλικού

## 3.3 Δυναμικός Χαρακτηρισμός (Modal Analysis)

## 3.3.1 Πειραματική διάταξη

Η πρώτη πειραματική διαδικασία που εκτελέσαμε αφορά τον δυναμικό χαρακτηρισμό των δοκιμίων μας και έγινε μέσω του πειράματος του Modal Analysis. Πρόκειται για μία διαδικασία που μπορεί να δώσει στο χρήστη μια επισκόπηση των φυσικών συχνοτήτων, των παραμέτρων απόσβεσης και των δομικών ιδιομορφών του προς εξέταση αντικειμένου ή της κατασκευής. Αυτά τα δεδομένα φανερώνουν αφενός την ταλαντωτική συμπεριφορά του αντικειμένου και αφετέρου αναδεικνύουν τα όρια για την σωστή λειτουργία του, ώστε οι επιβαλλόμενες δυνάμεις να μην προκαλέσουν το φαινόμενο του συντονισμού, που μπορεί να βλάψει ή ακόμα και να καταστρέψει το αντικείμενο. Αυτή η γνώση παράλληλα επιτρέπει στους μηχανικούς να τροποποιήσουν και να βελτιστοποιήσουν τη σχεδίαση του αντικειμένου ώστε να είναι λιγότερο ευαίσθητο στις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Με δεδομένο μάλιστα, πως σχεδόν όλες οι κατασκευές στην πραγματικότητα υπόκεινται σε δυναμικά φορτία και καταπονήσεις, γίνεται εύκολα αντιληπτή η αναγκαιότητα επίγνωσης των ταλαντωτικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου ή μίας ολόκληρης κατασκευής. Η σημαντική αυτή ανάλυση, βρίσκει εφαρμογές μεταξύ άλλων, στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, της κατασκευής κτιρίων, της αεροναυπηγικής, της αεροδιαστημικής και της παραγωγής ενέργειας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε και επεξηγούνται τα συστήματα που την απαρτίζουν.



Figure 23 Πειραματική διάταζη Modal Analysis

• Επιταχυσνιόμετρο: Αισθητήριο όργανο, που λόγω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, κατά την επιτάχυνση του δημιουργεί διαφορά δυναμικού. Πρόκειται για μοντέλο PCB 352C66, ευαισθησίας 100mV/gr και μάζας 1gr ώστε να μην επηρεάζει την κίνηση του δοκιμίου. Στην περίπτωση μας είναι προσαρτημένο στο άκρο του δοκιμίου (που θα έχει την μέγιστη επιτάχυνση) και η παραγόμενη διαφορά δυναμικού καταγράφεται για την αποτύπωση της ταλάντωσης.

**Permanent Magnet Shaker**: Πρόκειται για έναν ηλεκτρομηχανικό διεγέρτη μοντέλου LDS V201 από την εταιρεία LDS, που αναλαμβάνει την διέγερση του εκάστοτε δοκιμίου στο εύρος συχνότητας και με το εύρος δύναμης που κάθε φορά επιθυμούμε. Οι παράμετροι αυτές ορίζονται στον Η/Υ με την χρήση του περιβάλλοντος Labview, όπου και δημιουργείται το σήμα το οποίο στέλνεται στον διεγέρτη. Είναι εξοπλισμένος με load cell τύπου 208C03, για την καταγραφή του σήματος της πραγματικής δύναμης διέγερσης με το χρόνο και η επιβολή της δύναμης γίνεται με την χρήση του stinger ,μιας λεπτής εύκαμπτης ράβδου που βελτιώνει την ακρίβεια της δοκιμής μεταδίδοντας κυρίως δύναμη στην αξονική κατεύθυνση, προστατεύοντας παράλληλα την συσκευή από κρίσιμες δυνάμεις.

**Β** <u>Ενισχυτής (Amplifier)</u>: Το προαναφερόμενο σήμα που στέλνεται από τον Η/Υ στον διεγέρτη ενισχύεται με την χρήση ενός amplifier τύπου PA 500L από την εταιρεία LDS.

**Signal Conditioner:** Το σήμα από το διεγέρτη και το επιταχυνσιόμετρο, περνάει από τον conditioner, με σκοπό να εξομαλυνθεί και στη συνέχεια να ενισχυθεί, για να οδηγηθεί με επιτυχία στο επόμενο στάδιο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ωστόσο δεν επιβλήθηκε κάποια ενίσχυση του σήματος. Να σημειωθεί πως το σήμα παραμένει σε αναλογική μορφή κατά την έξοδο του.

Θ Κάρτα συλλογής δεδομένων: Ο υπολογιστής ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, ήταν συνδεδεμένος με μια κάρτα δειγματοληψίας (Data Acquisition Card) της εταιρείας National Instruments. Αυτή μεσολαβεί μεταξύ όλων των σημάτων που στέλνονται και λαμβάνονται από τον υπολογιστή, καθώς μετατρέπει τα ψηφιακά σήματα σε αναλογικά και αντίστροφα, για τις αντίστοιχες περιπτώσεις. Έτσι σε αυτήν καταλήγουν τα σήματα από το διεγέρτη και το επιταχυνσιόμετρο μετά την εξομάλυνση τους στο Signal Conditioner και από αυτήν ξεκινά το σήμα με την μορφή και το εύρος της δύναμης με τελικό προορισμό τον διεγέρτη. Η συγκεκριμένη κάρτα ήταν τύπου USB-6366, διαθέτει 8 αναλογικές εισόδους, κάθε μία εκ των οποίο έχουν ρυθμό δειγματοληψίας 2.00MS/s και μέγιστη ανάλυση 16 bits.

Θ Η/Υ και υπολογιστικό πακέτο Labview : Η υποβολή, η καταγραφή και η εμφάνιση των στοιχείων που χρησιμοποιούνται και συλλέγονται κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως ο τύπος και η μορφή της διέγερσης, γίνεται μέσω του υπολογιστικού πακέτου Labview. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα εισαγωγής των παραμέτρων δειγματοληψίας όπως ο ρυθμός της, ο αριθμός των σημείων, το φιλτράρισμα του σήματος που λαμβάνουμε, καθώς και το επίπεδο του Triggering, δηλαδή το μέγιστο πλάτος το οποίο θα πρέπει να έχει η ταλάντωση διέγερσης. Στο τέλος κάθε προσομοίωσης, παραλαμβάνουμε ένα διάγραμμα που παρουσιάζει το πλάτος της ταλάντωσης συναρτήσει της συχνότητας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι μετρήσεις τιμών δύναμης και επιτάχυνσης γίνονται σε Volt, και μετά μεταφέρονται από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχινοτήτων μέσω μετασχηματισμού Fourier. Επιπλέον, η αντιστοιχία της τάσης, που ορίζεται ή συλλέγεται, με την δύναμη ή την επιτάχυνση, που καταγράφεται, εξαρτάται από το κέρδος των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται.

Εμείς αξιοποιήσαμε τον εξοπλισμό του εργαστηρίου για την διεξαγωγή του πειράματος, με έμφαση στην πρώτη καμπτική ιδιομορφή. Έτσι προσαρμόσαμε την επιβαλλόμενη διέγερση σε κατάλληλες θέσεις, για να ταλαντώσουμε το δοκίμιο μας ανάλογα, και το επιταχυνσιόμετρο στην θέση με την μεγαλύτερη μετατόπιση, άρα και επιτάχυνση. Η

43

στήριξη που επιλέξαμε ήταν ελεύθερη διότι η ύπαρξη πάκτωσης στην μία πλευρά δεν μας εξασφάλιζε επαναλήψιμα δεδομένα πειράματος. Όσον αφορά την διέγερση, στην αρχή επιλέξαμε κρουστικού τύπου με το γνωστό σφυράκι που είναι εξοπλισμένο με αισθητήριο δύναμης (Modal Hammer), ωστόσο καταλήξαμε στην χρήση ταλαντωτικού shaker που περιγράφεται πιο πάνω, για καλύτερη, πιο ελεγγόμενη και πιο στογευμένη διέγερση. Ο τύπος της ήταν ημιτονοειδής σάρωση συχνότητας (Swept Sine) με τιμές από ένα (1) έως οκτακόσια (800) Hertz, οι οποίες επιλέχθηκαν αφού εκτελέσαμε ένα αρχικό πείραμα και είδαμε που κυμαίνεται η τιμή της πρώτης ιδιοσυχνότητας. Το σήμα της διέγερσης δημιουργείται στον Η/Υ (υπολογιστικό πακέτο Labview), κατευθύνεται στην Κάρτα συλλογής δεδομένων για την μετατροπή του από ψηφιακή σε αναλογική μορφή, ενισχύεται και τελικά καταλήγει στο ταλαντωτικό shaker το οποίο διεγείρει κατάλληλα το δοκίμιο μας. Τα δεδομένα που λαμβάνουμε ακολουθούν την 'αντίστροφη' πορεία. Έτσι, τα αναλογικά σήματα που μετρούνται από το επιταχυνσιόμετρο του δοκιμίου μας και το load cell του διεγέρτη (shaker), οδηγούνται στο Signal Conditioner για την εξομάλυνση και ενίσχυση τους και έπειτα στην Κάρτα συλλογής δεδομένων όπου και μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή, για την επιτυχή αναγνώριση και επεξεργασία τους από τον Η/Υ. Τελικά εξάγουμε τις Συναρτήσεις Απόκρισης Συχνότητας (Frequency Response Functions - FRFs) της μετρούμενης επιτάχυνσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης δύναμης.

Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως για να ανακαλύψουμε και άλλα ταλαντωτικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου μας, δηλαδή και άλλες ιδιομορφές, θα πρέπει να το στηρίξουμε και να το διεγείρουμε με μεγαλύτερο εύρος συχνότητας και σε άλλα σημεία ώστε να μπορέσουν να διεγερθούν και να φανούν όλα τα modes, που με αυτές τις συνθήκες είναι πιθανό να μην απορροφούν ενέργεια και συνεπώς δεν διεγείρονται.

#### 3.3.2 Αποτελέσματα Πειράματος Δυναμικού Χαρακτηρισμού

Μέσω της πειραματικής μας διαδικασίας, εξάγουμε την Συνάρτηση Απόκρισης Συχνότητας (Frequency Response Function - FRF), η οποία ποσοτικοποιεί την απόκριση του συστήματος στην επιβαλλόμενη διέγερση, στο πεδίο των συχνοτήτων, και ουσιαστικά μας υποδεικνύει τις εγγενείς ιδιότητες του (γραμμικού) συστήματος μας. Μέσω αυτής μπορούμε να κατασκευάσουμε τα γνωστά διαγράμματα FRFs (Frequency Response Functions), που αφορούν το μέγεθος της απόκρισης συχνότητας και την φάση της, συναρτήσει της συχνότητας. Από τα διαγράμματα αυτά, όταν το μέγεθος της απόκρισης συχνότητας εμφανίζει ολικό μέγιστο και η φάση στρέφεται κατά εκατόν ογδόντα μοίρες (180°), καταλαβαίνουμε πως υπάρχει συντονισμός και έτσι βρίσκουμε τις φυσικές συχνότητες της κατασκευής μας.

Το πείραμα εκτελέστηκε για όλα τα δοκίμια μας (27) και καταγράφηκαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Για την εύρεση της μέγιστης τιμής στα προαναφερόμενα διαγράμματα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB, όπου και έγινε ένα φιλτράρισμα του σήματος μας για ακόμα πιο ευδιάκριτα αποτελέσματα και την ανάδειξη της μέγιστης τιμής.









Figure 24 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Modal Analysis για όλα τα δοκίμια και Ενδεικτικό Σήμα FRF

Στην συνέχεια εξήχθη ο μέσος όρος των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων για κάθε τύπο δοκιμίου και δημιουργήθηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις φυσικές συχνότητες συναρτήσει του είδους της στοιχειώδους κυψελίδας, για μία δεδομένη τιμή του πορώδους (porosity).





Figure 25 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Modal Analysis συναρτήσει του πορώδους

### 3.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Έχοντας συγκεντρώσει όλα τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, μπορούμε πλέον να κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις. Έτσι αρχικά, στην Εικόνα 24 διακρίνουμε πως τα δοκίμια ίδιου τύπου, δηλαδή με την ίδια στοιχειώδη κυψελίδα και την ίδια τιμή για το πορώδες, εμφανίζουν κάποιες διαφοροποιήσεις στις φυσικές τους συχνότητες. Η μεγαλύτερη απόκλιση μετράται για το δοκίμια Gyroid 80% σε ποσοστό 17,5% μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής, ωστόσο στα υπόλοιπα δοκίμια οι διαφορές αυτές είναι αισθητά μειωμένες. Η μικρή αυτή ανομοιογένεια σχετίζεται κυρίως με την διαφοροποίηση των διαστάσεων και της μάζας των πανομοιότυπων δοκιμίων που σχολιάσαμε στο Κεφάλαιο 2.4 και οφείλεται στην παραγωγική διαδικασία των κομματιών μας. Παράλληλα, τα στάδια μέτρησης και επεξεργασίας του σήματος ενδέχεται να επηρεάζουν σε μικρό βαθμό τις τιμές αυτές.

Οσον αφορά τα διαγράμματα των συχνοτήτων συναρτήσει του είδους της στοιχειώδους κυψελίδας, παρατηρούμε πως για την δεδομένη ιδιομορφή που εξετάζουμε (1<sup>η</sup> Καμπτική) δεν διακρίνεται κάποια σημαντική διαφοροποίηση της συχνότητας που αντιστοιχεί σε αυτήν, λόγω της αλλαγής στην γεωμετρία της στοιχειώδους κυψελίδας. Ενδέχεται κατά την έρευνα και των υπόλοιπων καμπτικών αλλά και στρεπτικών ιδιομορφών να παρατηρηθεί η επίδραση της κυψελίδας στην ταλαντωτική συμπεριφορά των δοκιμίων, όπως βλέπουμε και από την υπάρχουσα βιβλιογραφία για άλλα υλικά [20], [21], [24]. Τέλος, παρόλο που παρατηρείται μία διαφοροποίηση των συχνοτήτων για τις διάφορες τιμές του πορώδους, είναι πολύ μικρή και δεν μπορούμε να εξάγουμε κάποια σίγουρα συμπεράσματα, καθώς τα δοκίμια με μικρότερη μάζα είχαν και χαμηλότερη δυσκαμψία, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ακριβή παρατήρηση της επίδρασης της τιμής του πορώδους. Σύμφωνα και με αυτά που προαναφέραμε, είναι πιθανό η επίδραση αυτή να είναι περισσότερο εμφανής στις υπόλοιπες ιδιομορφές ταλάντωσης των δοκιμίων.

## 3.4 Κάμψη Τριών Σημείων (3-Point Bending)

### 3.4.1 Πειραματική Διάταξη

Το επόμενο στάδιο των πειραματικών δοκιμών, αποτελείται από το πείραμα της κάμψης τριών σημείων. Πρόκειται για ένα πολύ σύνηθες πείραμα που αναδεικνύει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όταν αυτό καταπονείται με καμπτικά φορτία, τα οποία συναντώνται πολύ συχνά στην πραγματικότητα. Παράλληλα στις κατασκευές τύπου sandwich, που κατασκευάζονται με την σύνδεση δύο λεπτών αλλά άκαμπτων φλοιών σε ένα ελαφρύ αλλά παχύ πυρήνα, η δομή αυτού του πυρήνα φαίνεται να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την κάμψη καθώς και την αντίσταση σε λυγισμό ολόκληρης της κατασκευής. Έτσι τα δοκίμια μας υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων, με σκοπό την αξιολόγηση και την σύκγριση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, οι οποίες επηρεάζονται από τον τύπο της στοιχειώδους κυψελίδας και την επιλεγμένη τιμή του πορώδους.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από την μηχανή δοκιμών Instron 8802 εξοπλισμένη με δυναμοκυψέλη 25 KN, η διάμετρος των στηρίξεων και της κεφαλής των τριών σημείων επιβολής της δύναμης ήταν 10 mm και τα δοκίμια φορτίστηκαν με σταθερό ρυθμό μετατόπισης 2mm/min, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D790 [53], μέχρι να σημειωθεί αστοχία. Η απόσταση μεταξύ των κέντρων των στηρίξεων (span) ορίστηκε στα 100mm.





Figure 24 Πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων

### 3.4.2 Αποτελέσματα Πειράματος Κάμψης τριών σημείων

Μέσω της πειραματικής διαδικασίας εξάγουμε αρχικά τα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης που παρουσιάζονται παρακάτω, για τα δοκίμια με ίδιο τύπο κυψελίδας και διαφορετική τιμή για το πορώδες, και αντίστροφα. Η διαδικασία έγινε για δύο σετ δοκιμίων και εξήχθη ο μέσος όρος αυτών. Παρουσιάζονται επίσης φωτογραφίες από την πειραματική διαδικασία.



Figure 25 Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης ανά τύπο κυψελίδας (Αριστερά) και ανά τιμή porosity (Δεξιά)



Figure 26 Στιγμιότυπα κάμψης τριών σημείων για κυψελίδα PRIMITIVE



Figure 27 Στιγμιότυπα κάμψης τριών σημείων για κυψελίδα DIAMOND



Figure 28 Στιγμιότυπα κάμψης τριών σημείων για κυψελίδα GYROID 52

Στην συνέχεια υπολογίσαμε το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη  $E_B$  και την μέγιστη τάση  $\sigma_B$  που εμφανίζεται στο κέντρο του δοκιμίου, στην εξωτερική επιφάνεια. Αυτά υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις που προκύπτουν από το πρότυπο αλλά και την βιβλιογραφία [54]:

$$E_B = \frac{mL}{4d^3b}$$

$$\sigma_B = \frac{3LP}{2d^2 l}$$

Όπου L είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των στηρίξεων (Span), **m** η κλίση της ευθείας στο γραμμικό κομμάτι του διαγράμματος Δύναμης-Μετατόπισης , **P** το επιβαλλόμενο φορτίο, **b** το πλάτος του δοκιμίου και **d** το πάχος του δοκιμίου (Εικόνα 31).



Figure 29 Σχηματική απεικόνιση των διαστάσεων για το πείραμα της κάμψης

Παράλληλα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C393, που αφορά κατασκευές τύπου sandwich σε κάμψη, υπολογίστηκαν η τάση στις εξωτερικές επιφάνειες (φλοιούς) **σ**<sub>f</sub> και μέγιστη αντοχή σε διάτμηση του πυρήνα **t**<sub>CSU</sub>. Οφείλουμε να τονίσουμε πως οι διαστάσεις των δοκιμίων μας δεν συνάδουν με το προαναφερόμενο πρότυπο και συνεπώς οι τιμές που υπολογίστηκαν δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Ωστόσο μας προσφέρουν μια

προσεγγιστική εποπτεία για την συμπεριφορά των δοκιμίων μας. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\sigma_f = \frac{LP}{2tb(c+d)}$$

$$t_{CSU} = \frac{P}{b(c+d)}$$

Όπου ισχύουν οι συμβολισμοί των άνωθεν εξισώσεων, με την προσθήκη του πάχους των φλοιών **t**, (Εικόνα 31).

Οι τιμές των ιδιοτήτων που προκύπτουν από τις προαναφερόμενες εξισώσεις, υπολογίστηκαν για όλα τα δοκίμια μας και παρουσιάζονται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα που ακολουθεί.



Figure 30 Συγκεντρωτικά διαγράμματα ιδιοτήτων κάμψης

#### 3.4.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Έχοντας πλέον συγκεντρώσει όλα τα επιθυμητά αποτελέσματα για τα δοκίμια μας, είμαστε σε θέση να κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις και να εξάγουμε τα συμπεράσματα μας. Έτσι αρχικά είναι φανερό από τα διαγράμματα της Εικόνας 27 ότι η αύξηση της τιμής του πορώδους επιφέρει μείωση του μέγιστου φορτίου που μπορούν να αντέξουν τα δοκίμια μας. Αυτό θα λέγαμε πως ήταν αναμενόμενο καθώς η αύξηση του πορώδους συνεπάγεται την μείωση του πάχους των τοιχωμάτων της κυψελίδας , οδηγώντας σε μία πιο ελαφριά αλλά συνάμα 'αδύναμη' κατασκευή. Παράλληλα όμως, αυτή η αύξηση της τιμής του πορώδους φαίνεται να προσδίδει στα δοκίμια μας μία 'όλκιμη' συμπεριφορά , καθώς παρατηρούμε στα διαγράμματα μας την δημιουργία του χαρακτηριστικού πλατού , ειδικά για τα δοκίμια με τιμή 80% . Η επίδραση του πορώδους στην μείωση των ιδιοτήτων των δοκιμίων, είναι φανερή και στα διαγράμματα της ΕΙΚΟΝΑΣ 32, όπου διακρίνουμε τις μέγιστες τιμές αυτών για τα δοκίμια με τιμή 70%.

Όσον αφορά τώρα την επίδραση της μορφής της στοιχειώδους κυψελίδας, μπορούμε να εξάγουμε τα συμπεράσματα μας από τα διαγράμματα της Εικόνας 27. Διακρίνουμε λοιπόν πως για δοκίμια με ίδια τιμή του πορώδους 70 και 75%, η κυψελίδα τύπου Primitive υπερέχει σε ιδιότητες, ενώ για τα δοκίμια με πορώδες 80% φαίνεται να υπερισχύει η κυψελίδα τύπου Gyroid. Σε κάθε περίπτωση όμως η κυψελίδα τύπου Diamond καταλαμβάνει την τελευταία θέση αναφορικά με τις ιδιότητες σε καμπτικά φορτία (Εικόνα 32).

Σε αυτό το σημείο οφείλουμε να σχολιάσουμε τις διάφορες ανομοιομορφίες που παρατηρούνται στα διαγράμματα μας. Αρχικά μία έντονη ανομοιομορφία παρατηρείται στο διάγραμμα της ΕΙΚΟΝΑΣ 27 για την κυψελίδα τύπου Primitive όπου τα δοκίμια με τιμή πορώδους 70 και 75% εμφανίζουν παρόμοια μέγιστη τιμή δύναμης. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται σε κακή ευθυγράμμιση της κεφαλής επιβολής της δύναμης και του κέντρου της κυψελίδας, όπου λόγω του σχήματος της τελευταίας, είναι πιθανόν να επιφέρει ανομοιόμορφη κατανομή του φορτίου και τελικά διαφορετική από την 'προβλεπόμενη' συμπεριφορά των δοκιμίων. Ενδεχομένως ο ίδιος λόγος να οφείλεται και για την μειωμένη αντοχή του δοκιμίου Primitive 80%. Τέλος να αναφέρουμε πως η 'όλκιμη' συμπεριφορά του δοκιμίου Diamond 75% είναι περιορισμένη στην πρώτη παρτίδα δοκιμίων , επηρεάζοντας ωστόσο τον συνολικό μέσο όρο. Πιθανότατα η αύξηση του αριθμού των πειραματικών δοκιμίων θα εξομάλυνε τις διαφορές αυτές οδηγώντας σε ομοιόμορφα αποτελέσματα.

### 3.5 Πείραμα Θλίψης

#### 3.5.1 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

Η τελευταία πειραματική διαδικασία που εκτελέσαμε αφορά το πείραμα της Θλίψης των δοκιμίων μας. Πρόκειται για μία εξίσου συνήθη μέθοδο δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εκάστοτε υλικού υπό θλιπτικά φορτία. Μέσω αυτής μπορούμε να υπολογίσουμε το Μέτρο Ελαστικότητας, το Όριο Διαρροής σε θλίψη, την Αντοχή σε Θλίψη και άλλα. Αυτές οι ιδιότητες είναι σημαντικές για να καθοριστεί εάν το υλικό είναι κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές ή εάν επρόκειτο να αστοχήσει κάτω από συγκεκριμένες καταπονήσεις. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, με δεδομένο ότι η κατασκευή των δοκιμίων δεν έγινε σύμφωνα με κάποιο πρότυπο και σε συνδυασμό με την έλλειψη προτύπων για δοκίμια που έχουν παραχθεί από διαδικασίες Προσθετική Κατασκευής, το συγκεκριμένο πείραμα στοχεύει να αναδείζει τον μηχανισμό κατάρρευσης της εκάστοτε κυψελώδους δομής και να μας δώσει κάποια προσεγγιστικά αποτελέσματα για το πως επιδρά τόσο η μορφή της στοιχειώδους κυψελίδας όσο και η τιμή του πορώδους, στην μέγιστη θλιπτική δύναμη που μπορούν να δεχτούν τα δοκίμια μας. Τέλος υπολογίστηκε η Απορρόφηση Ενέργειας και η Ειδική Απορρόφηση Ενέργειας για κάθε δοκίμιο , καθώς αυτοί είναι οι κύριοι δείκτες για τον χαρακτηρισμό κυψελωτών δομών σε εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας.

Το πείραμα εκτελέστηκε με την χρήση της μηχανής δοκιμών INSTRON 8802 που χρησιμοποιήθηκε και στις προηγούμενες πειραματικές διαδικασίες, αφού πρώτα προσαρμόσαμε στις αρπάγες της μηχανής τις κατάλληλες κυλινδρικές κεφαλές για ομοιόμορφη κατανομή του επιβαλλόμενου φορτίου σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου. Η φόρτιση έγινε με ρυθμό 4 mm/min και η επιβολή της έγινε μέχρι να παρατηρηθεί η συμπύκνωση του δοκιμίου η οποία συνοδεύεται από την αύξηση της δύναμης, ύστερα από την παρουσία τοπικού ελαχίστου αυτής (Εικόνα 33).

#### 3.5.2 Αποτελέσματα πειράματος Θλίψης

Μέσω της πειραματικής διαδικασίας εξάγουμε αρχικά τα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης που παρουσιάζονται παρακάτω, για τα δοκίμια με ίδιο τύπο κυψελίδας και διαφορετική τιμή για το πορώδες, και αντίστροφα. Παρουσιάζονται επίσης φωτογραφίες από τα διάφορα στάδια της φόρτισης.

56



Figure 31 Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης ανά τύπο κυψελίδας (Αριστερά) και ανά τιμή porosity (Δεζιά)







Max Force

Figure 32 Στιγμιότυπα θλίψης για κυψελίδα DIAMOND



Figure 33 Στιγμιότυπα θλίψης για κυψελίδα GYROID



Figure 34 Στιγμιότυπα θλίψης για κυψελίδα PRIMITIVE

Στην συνέχεια, όπως προαναφέραμε, υπολογίσαμε την Απορρόφηση Ενέργειας για κάθε δοκίμιο. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει αντίστοιχη τυποποίηση για την απορρόφηση ενέργειας σε πλαστικά κυψελωτά υλικά, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία για τον υπολογισμό της απορρόφησης ενέργειας, για την τυποποίηση μεταλλικών κυψελωτών υλικών[55]. Σύμφωνα με αυτήν, μετράται η απορροφούμενη ενέργεια συναρτήσει της μετατόπισης της κεφαλής (δ) και υπολογίζεται από το εμβαδό του διαγράμματος Δύναμης-Μετατόπισης, δηλαδή από τον τύπο:

$$AE(\delta) = \int_0^{\delta^0} F(\delta) \, d\delta$$

Όπου  $\delta^0$  η μέγιστη τιμή της μετατόπισης της κεφαλής και  $F(\delta)$  η δύναμη σε κάθε σημείο.

Επίσης υπολογίστηκε και η τιμή της Ειδικής Απορρόφησης Ενέργειας που ορίζεται ως η Απορρόφηση Ενέργειας ανά μονάδα μάζας :

$$EAE(\delta) = \frac{AE(\delta)}{M}$$

Όπου **M** η μάζα του εκάστοτε δοκιμίου. Γενικά, μία υψηλή τιμή της ΕΑΕ σημαίνει καλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της κατασκευής. Οι τιμές των δύο αυτών ιδιοτήτων για κάθε δοκίμιο, αναπαρίστανται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Figure 35 Διαγράμματα Απορρόφησης Ενέργειας (Αριστερά) και Ειδικής Απορρόφησης Ενέργειας (Δεξιά) για όλα τα δοκίμια

## 3.5.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Με την εξαγωγή όλων των επιθυμητών διαγραμμάτων, τον υπολογισμό των τιμών και την παρουσίαση των στιγμιότυπων της τελευταίας πειραματικής διαδικασίας, μπορούμε να κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις. Έτσι αρχικά, όπως και στην κάμψη τριών σημείων, η αύξηση της τιμής του πορώδους συνεπάγεται την υποβάθμιση των ιδιοτήτων των δοκιμίων. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο, καθώς όπως εξηγήσαμε, η αύξηση του πορώδους οδηγεί σε μείωση του πάχους των τοιχωμάτων της κυψελίδας, οδηγώντας σε μία πιο ελαφριά αλλά ταυτόχρονα υποδεέστερη όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες κατασκευή. Ωστόσο, με την μικρότερη τιμή της μέγιστης δύναμης να είναι 6 KN και της Ειδικής Απορρόφησης Ενέργειας 0.9 MJ/KG, αποδεικνύεται πως όλα τα δοκίμια εμφάνισαν καλές ιδιότητες.

Έπειτα μπορούμε να αξιολογήσουμε την επίδραση της μορφής της κυψελίδας στην συμπεριφορά του δοκιμίου. Βλέπουμε λοιπόν πως η κυψελίδα τύπου Diamond εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές θλιπτικής δύναμης και απορρόφησης ενέργειας, για όλες τις τιμές του πορώδους. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την οπτική παρατήρηση των στιγμιότυπων της πειραματικής διαδικασίας, όπου βλέπουμε μικρότερη παραμόρφωση του τύπου Diamond. Αξίζει ωστόσο να αναφέρουμε πως η κυψελίδα τύπου Gyroid μετά το τέλος της επιβολής των θλιπτικών φορτίων, επανήλθε σχεδόν ακαριαία στην αρχική της μορφή, σε αντίθεση μες τις υπόλοιπες, γεγονός που οφείλεται πιθανόν στον μηχανισμό κατάρρευσης της κυψελίδας αυτής.

Γενικά, παρατηρώντας τα διαγράμματα των ΕΙΚΟΝΩΝ 33 & 37, μπορούμε να δούμε πως όλες οι προς εξέταση TPMS δομές εμφάνισαν υψηλές τιμές μέγιστης θλιπτικής δύναμης και απορρόφησης ενέργειας, καθιστώντας πολλά υποσχόμενη την χρήση τους σε εφαρμογές για απορρόφηση κραδασμών και κρουστικών φορτίων.

62

# <u>Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις</u>

Από την εκπόνηση της παρούσας σπουδαστικής εργασίας και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των πειραματικών διαδικασιών, εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα τόσο για την κατασκευή όσο και για την συμπεριφορά των κυψελωτών δομών που αποτελούνται από επιφάνειες TPMS και πως αυτή επηρεάζεται από την μορφή της επιφάνειας και το πάχος των τοιχωμάτων αυτής. Η κατανόηση αυτής της συμπεριφοράς είναι σημαντικό βήμα, προκειμένου να εξεταστούν πιθανές εμπορικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτές τις δομές ως πυρήνα κατασκευών τύπου sandwich.

Αρχικά, η κατασκευή των δομών αυτών παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες. Παρόλο που η σχεδίαση και ενσωμάτωση τους σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές είναι σχετικά εύκολη διαδικασία με την χρήση των λογισμικών που αναφέραμε, η κατασκευή τους χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, προκειμένου να επιτευχθεί η ακρίβεια στις διαστάσεις. Η τεχνολογία Προσθετικής Κατασκευής που θα επιλεχθεί για την παραγωγή, όπως έχουμε αναφέρει, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας, με την επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης και του προσανατολισμού να ακολουθούν στην ιεραρχία αντίστοιχα. Στην περίπτωση μας, η χρήση τεχνολογίας Στερεολιθογραφίας (SLA) για την κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων, αν και προσέφερε πολύ καλή ακρίβεια στις επιφανειακές διαστάσεις, ο συνδυασμός με τον προσανατολισμό εκτύπωσης που επιλέξαμε, οδήγησε στην συγκράτηση ρητίνης στο εσωτερικό των πολύπλοκων γεωμετριών, με αποτέλεσμα την μεγάλη απόκλιση στην μάζα όλων των δοκιμίων και την πιθανή ανακρίβεια στο πάχος των εσωτερικών τοιχωμάτων. Για τον λόγο αυτόν συνίσταται η επιλογή βέλτιστου προσανατολισμού εκτύπωσης και η χρήση καλύτερου τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Στην συνέχεια, ακολούθησε ο χαρακτηρισμός του υλικού που επιλέξαμε για την κατασκευή των δοκιμίων. Κατά την διαδικασία αυτήν παρατηρήσαμε πως το Μέτρο Ελαστικότητας του υλικού δεν είναι σταθερό και η συμπεριφορά του είναι ψαθυρή, σε αντίθεση με της πληροφορίες που παρέχει ο κατασκευαστής του υλικού. Αυτό απέδειξε για ακόμη μία φορά την επίδραση του προσανατολισμού εκτύπωσης στην συμπεριφορά της κατασκευής, καθιστώντας απαραίτητη την εκπόνηση πλήρους χαρακτηρισμού του υλικού υπό διάφορες γωνίες εκτύπωσης. Η μεγάλη επίδραση του προσανατολισμού, αναδεικνύει την αναγκαιότητα θέσπισης προτύπων ευρείας αποδοχής για πειραματικά δοκίμια και κατασκευές, παραγόμενες από διαδικασίες ΠΚ, τόσο συναρτήσει του προσανατολισμού εκτύπωσης, όσο και της τεχνολογίας ΠΚ επιλέγεται.

63

Κατά την πρώτη διαδικασία του πειραματικού χαρακτηρισμού των δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων, λήφθηκαν ορισμένα συμπεράσματα. Όλες οι ομάδες δοκιμίων υποβλήθηκαν σε ημιτονοειδή διέγερση με σκοπό την ανάδειξη της πρώτης (1<sup>ης</sup>) ιδιομορφής ταλάντωσης και την καταγραφή της αντίστοιχης ιδιοσυχνότητας. Ωστόσο παρατηρήθηκε πως η μορφή της στοιχειώδους κυψελίδας και η τιμή του πορώδους δεν επιδρούν στην τιμή της συχνότητας που αντιστοιχεί σε αυτήν την ιδιόμορφή, με αποτέλεσμα όλα τα δοκίμια να έχουν τα ίδια όρια σωστής λειτουργίας. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, είναι πιθανό η επίδραση αυτών των παραγόντων να είναι πιο έντονη στις επόμενες ιδιομορφές ταλάντωσης.

Στην συνέχεια τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων. Για κάθε ομάδα, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης ,υπολογίστηκαν το Μέτρο Ελαστικότητας σε κάμψη, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται και με την θεώρηση ότι πρόκειται για κατασκευές τύπου sandwich υπολογίστηκαν επίσης η τάση στην εξωτερική επιφάνεια-φλοιό και η αντοχή σε διάτμηση του πυρήνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της τιμής του πορώδους επιφέρει μείωση του μέγιστου φορτίου και προσδίδει 'όλκιμη' συμπεριφορά στα δοκίμια μας. Παράλληλα, η κυψελίδα τύπου Primitive υπερέχει σε ιδιότητες, με την κυψελίδα τύπου Diamond να καταλαμβάνει την τελευταία θέση. Η χρήση περισσότερων δοκιμίων συνίσταται για την εξαγωγή περισσότερο ομοιόμορφων αποτελεσμάτων και την εξάλειψη τυχών σφαλμάτων κατά την πειραματική διαδικασία.

Στο τελευταίο στάδιο, που αφορά τα πειράματα θλίψης, τα δοκίμια εμφάνισαν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Η αύξηση της τιμής του πορώδους οδήγησε και πάλι στην μείωση των ιδιοτήτων, με την κυψελίδα τύπου Diamond ωστόσο να εμφανίζει τις βέλτιστες ιδιότητες και την κυψελίδα τύπου Primitive να καταλαμβάνει την τελευταία θέση. Παρόλα αυτά, όλες οι προς εξέταση δομές εμφάνισαν υψηλές τιμές μέγιστης θλιπτικής δύναμης και απορρόφησης ενέργειας, καθιστώντας πολλά υποσχόμενη την χρήση τους σε εφαρμογές για απορρόφηση κραδασμών και κρουστικών φορτίων.

# Μελλοντικοί Στόχοι

Από την εκπόνηση της παρούσας σπουδαστικής εργασίας και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που αναφέρθηκαν εκτενώς, προτείνονται τα παρακάτω πεδία ενδιαφέροντος για περαιτέρω εμβάθυνση και βελτιστοποίηση της έρευνας των TPMS δομών.

> Εύρεση κατάλληλων παραμέτρων εκτύπωσης για την ακριβή αναπαραγωγή των διαστάσεων κατά την κατασκευή.

- Πλήρης καμπάνια χαρακτηρισμού του υλικού για διάφορες γωνίες εκτύπωσης
  και εκτέλεση αντίστοιχων πειραμάτων.
- Χρήση CT-Scan για την ακριβή μέτρηση όλων των διαστάσεων των δοκιμίων,
  για σωστή αξιολόγηση της παραγωγικής διαδικασίας
- Διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών για δοκίμια κατασκευασμένα από διαφορετικό υλικό ή/και διαφορετική τεχνολογία ΠΚ.
- Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτών των δομών και εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού με χρήση αλγορίθμων Topology Optimization.

# Βιβλιογραφία - Αναφορές

- D. Bhate, *Four Questions in Cellular Material Design*, vol. 12, no. 7. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.
- I. Kaur and P. Singh, "Flow and thermal transport characteristics of Triply-Periodic [2] Minimal Surface (TPMS)-based gyroid and Schwarz-P cellular materials," Numer. Heat 79, Transf. Part vol. no. 8, 553-569, 2021, doi: Α Appl., pp. 10.1080/10407782.2021.1872260.
- [3] O. Al-Ketan, R. Rowshan, and R. K. Abu Al-Rub, "Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials," *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 167–183, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.006.
- Y. Wu and L. Yang, "The effect of unit cell size and topology on tensile failure behavior of 2D lattice structures," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 170, no. December 2019, p. 105342, 2020, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105342.
- [5] M. J. Ashrafi *et al.*, "Shape memory response of cellular lattice structures: Unit cell finite element prediction," *Mech. Mater.*, vol. 125, no. December 2017, pp. 26–34, 2018, doi: 10.1016/j.mechmat.2018.06.008.
- [6] J. Kadkhodapour, H. Montazerian, and S. Raeisi, "Investigating internal architecture effect in plastic deformation and failure for TPMS-based scaffolds using simulation

methods and experimental procedure," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 43, pp. 587–597, 2014, doi: 10.1016/j.msec.2014.07.047.

- M. Shen, C. Wang, and Z. Zhao, "Mechanical Properties of ZrO2 TPMS Structures Prepared by DLP 3D Printing," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 678, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/678/1/012017.
- [8] J. Plocher and A. Panesar, "Effect of density and unit cell size grading on the stiffness and energy absorption of short fibre-reinforced functionally graded lattice structures," *Addit. Manuf.*, vol. 33, no. December 2019, p. 101171, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101171.
- [9] S. K. Moon, Y. E. Tan, J. Hwang, and Y. J. Yoon, "Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 223–228, 2014, doi: 10.1007/s40684-014-0028-x.
- [10] M. Alaña, A. Cutolo, S. Ruiz de Galarreta, and B. Van Hooreweder, "Influence of relative density on quasi-static and fatigue failure of lattice structures in Ti6Al4V produced by laser powder bed fusion," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-98631-3.
- [11] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, and D. Raymont, "Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 62, pp. 32–38, 2012, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.002.
- J. Tkac, S. Samborski, K. Monkova, and H. Debski, "Analysis of mechanical properties of a lattice structure produced with the additive technology," *Compos. Struct.*, vol. 242, no. February, p. 112138, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112138.
- [13] N. Kladovasilakis, K. Tsongas, and D. Tzetzis, "Mechanical and fea-assisted characterization of fused filament fabricated triply periodic minimal surface structures," *J. Compos. Sci.*, vol. 5, no. 2, 2021, doi: 10.3390/jcs5020058.
- [14] S. Catchpole-Smith, R. R. J. Sélo, A. W. Davis, I. A. Ashcroft, C. J. Tuck, and A. Clare, "Thermal conductivity of TPMS lattice structures manufactured via laser powder bed fusion," *Addit. Manuf.*, vol. 30, no. June, p. 100846, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100846.

- [15] L. Zhang *et al.*, "Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading," *Addit. Manuf.*, vol. 23, no. August, pp. 505–515, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.08.007.
- [16] S. Yu, J. Sun, and J. Bai, "Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing," *Mater. Des.*, vol. 182, p. 108021, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108021.
- [17] L. Yang, R. Mertens, M. Ferrucci, C. Yan, Y. Shi, and S. Yang, "Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and mechanical properties," *Mater. Des.*, vol. 162, no. December, pp. 394–404, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.12.007.
- [18] V. Nguyen-Van, P. Tran, C. Peng, L. Pham, G. Zhang, and H. Nguyen-Xuan, "Bioinspired cellular cementitious structures for prefabricated construction: Hybrid design & performance evaluations," *Autom. Constr.*, vol. 119, no. February, p. 103324, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103324.
- [19] C. Peng and P. Tran, "Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings," *Compos. Part B Eng.*, vol. 188, no. July 2019, p. 107773, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107773.
- [20] U. Simsek, A. Akbulut, C. E. Gayir, C. Basaran, and P. Sendur, "Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling methods," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 115, no. 3, pp. 657–674, Jul. 2021, doi: 10.1007/S00170-020-06174-0/TABLES/5.
- [21] U. Simsek, T. Arslan, B. Kavas, C. E. Gayir, and P. Sendur, "Parametric studies on vibration characteristics of triply periodic minimum surface sandwich lattice structures," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 115, no. 3, pp. 675–690, Jul. 2021, doi: 10.1007/S00170-020-06136-6/FIGURES/21.
- [22] U. Simsek, C. E. Gayir, G. Kiziltas, and P. Sendur, "An integrated homogenization– based topology optimization via RBF mapping strategies for additively manufactured FGLS and its application to bandgap structures," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 5–6, pp. 1361–1374, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06207-8.
- [23] U. Simsek, M. Ozdemir, and P. Sendur, "An efficient design methodology for graded

surface-based lattice structures using free-size optimization and enhanced mapping method," *Mater. Des.*, vol. 210, p. 110039, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.MATDES.2021.110039.

- [24] G. Altintas, S. Prof, and I. Varank, "Vibration Properties of TPMS Based Structures Parametrik Tasarım Anlayışıyla Tasarlanan Yapının BIM Süreçlerinden Geçerek TBDY-2018'e Göre Yapısal Analizinin Gerçekleştirilmesi View project Determination of Shortest Geodesic Paths on General Terrains View project Vibration Properties of TPMS Based Structures," *Int. J. Sci. Technol. Res. www.iiste.org ISSN*, vol. 4, no. 4, 2018, Accessed: Dec. 01, 2021. [Online]. Available: www.iiste.org.
- [25] M. Helou and S. Kara, "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: An overview," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, no. 3, pp. 243–261, 2018, doi: 10.1080/0951192X.2017.1407456.
- [26] W. Tao and M. C. Leu, "Design of lattice structure for additive manufacturing," *Int. Symp. Flex. Autom. ISFA 2016*, pp. 325–332, Dec. 2016, doi: 10.1109/ISFA.2016.7790182.
- [27] G. Dong, Y. Tang, and Y. F. Zhao, "A survey of modeling of lattice structures fabricated by additive manufacturing," *J. Mech. Des. Trans. ASME*, vol. 139, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.1115/1.4037305/367020.
- [28] A. Seharing, A. H. Azman, and S. Abdullah, "A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts:," *https://doi.org/10.1177/1687814020916951*, vol. 12, no. 6, Jun. 2014, doi: 10.1177/1687814020916951.
- [29] C. Pan, Y. Han, and J. Lu, "Design and Optimization of Lattice Structures: A Review," *Appl. Sci. 2020, Vol. 10, Page 6374*, vol. 10, no. 18, p. 6374, Sep. 2020, doi: 10.3390/APP10186374.
- [30] L. Zhu, N. Li, and P. R. N. Childs, "Light-weighting in aerospace component and system design," *Propuls. Power Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 103–119, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.JPPR.2018.04.001.
- [31] G. Totaro and Z. Gürdal, "Optimal design of composite lattice shell structures for aerospace applications," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 4–5, pp. 157–164, Jun. 2009,

doi: 10.1016/J.AST.2008.09.001.

- [32] V. V. Vasiliev and A. F. Razin, "Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications," *Compos. Struct.*, vol. 76, no. 1–2, pp. 182–189, Oct. 2006, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.06.025.
- [33] V. V. Vasiliev, V. A. Barynin, and A. F. Razin, "Anisogrid composite lattice structures Development and aerospace applications," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 3, pp. 1117–1127, Feb. 2012, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2011.10.023.
- [34] A. J. Kulangara, C. S. P. Rao, and P. Subhash Chandra Bose, "Generation and optimization of lattice structure on a spur gear," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 5068–5073, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.12.085.
- [35] M. Abdi, I. Ashcroft, and R. D. Wildman, "Design optimisation for an additively manufactured automotive component," *Int. J. Powertrains*, vol. 7, no. 1–3, pp. 142–161, 2018, doi: 10.1504/IJPT.2018.090371.
- [36] S. Yin, H. Chen, Y. Wu, Y. Li, and J. Xu, "Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood," *Compos. Struct.*, vol. 201, pp. 131– 140, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.06.038.
- [37] S. Torquato and A. Donev, "Minimal surfaces and multifunctionality," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 460, no. 2047, pp. 1849–1856, Jul. 2004, doi: 10.1098/RSPA.2003.1269.
- [38] Y. Jung and S. Torquato, "Fluid permeabilities of triply periodic minimal surfaces," *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 72, no. 5, p. 056319, Nov. 2005, doi: 10.1103/PHYSREVE.72.056319/FIGURES/9/MEDIUM.
- [39] S. Babaee, N. Viard, P. Wang, N. X. Fang, and K. Bertoldi, "Harnessing Deformation to Switch On and Off the Propagation of Sound," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 8, pp. 1631– 1635, Feb. 2016, doi: 10.1002/ADMA.201504469.
- [40] Y. H. Ha *et al.*, "Three-dimensional network photonic crystals via cyclic size reduction/infiltration of sea urchin exoskeleton," *Adv. Mater.*, vol. 16, no. 13, pp. 1091– 1094, Jul. 2004, doi: 10.1002/ADMA.200400131.
- [41] U. Simsek, A. Akbulut, C. E. Gayir, C. Basaran, and P. Sendur, "Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling

methods," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 115, no. 3, pp. 657–674, Jul. 2021, doi: 10.1007/S00170-020-06174-0/TABLES/5.

- [42] "Triply periodic minimal surface Wikipedia."
  https://en.wikipedia.org/wiki/Triply\_periodic\_minimal\_surface (accessed Feb. 01, 2022).
- [43] O. Al-Ketan, D. W. Lee, R. Rowshan, and R. K. Abu Al-Rub, "Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 102, p. 103520, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.JMBBM.2019.103520.
- [44] "ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ," Accessed: Feb. 04, 2022. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/3D\_printing.
- [45] "• Global 3D printing industry market size | Statista."
  https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/ (accessed Feb. 04, 2022).
- [46] "3D printing in construction Designing Buildings."
  https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D\_printing\_in\_construction (accessed Feb. 04, 2022).
- [47] "Automotive 3D printing applications | Hubs." https://www.hubs.com/knowledgebase/automotive-3d-printing-applications/ (accessed Feb. 04, 2022).
- [48] "The Best Applications of 3D Printing in the Aerospace Industry." https://www.3dcastor.com/post/the-best-applications-of-3d-printing-in-the-aerospaceindustry (accessed Feb. 04, 2022).
- [49] "Aerospace 3D printing applications | Hubs." https://www.hubs.com/knowledgebase/aerospace-3d-printing-applications/ (accessed Feb. 04, 2022).
- [50] C. Lee Ventola, "Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses," *Pharm. Ther.*, vol. 39, no. 10, p. 704, Oct. 2014, Accessed: Feb. 04, 2022. [Online]. Available: /pmc/articles/PMC4189697/.
- [51] T. P. Mpofu, C. Mawere, and M. Mukosera, "The Impact and Application of 3D Printing Technology," Int. J. Sci. Res., 2014, Accessed: Feb. 04, 2022. [Online]. Available:

www.ijsr.net.

- [52] R. Zou *et al.*, "Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material," *Compos. Part B Eng.*, vol. 99, pp. 506–513, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2016.06.009.
- [53] ASTM INTERNATIONAL, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–12, 2002, doi: 10.1520/D0790-10.
- [54] N. Kladovasilakis, P. Charalampous, K. Tsongas, I. Kostavelis, D. Tzetzis, and D. Tzovaras, "Experimental and Computational Investigation of Lattice Sandwich Structures Constructed by Additive Manufacturing Technologies," *J. Manuf. Mater. Process. 2021, Vol. 5, Page 95*, vol. 5, no. 3, p. 95, Aug. 2021, doi: 10.3390/JMMP5030095.
- [55] X. Cao *et al.*, "Compression experiment and numerical evaluation on mechanical responses of the lattice structures with stochastic geometric defects originated from additive-manufacturing," *Compos. Part B Eng.*, vol. 194, p. 108030, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108030.
- [56] A. Nazir, K. M. Abate, A. Kumar, and J. Y. Jeng, "A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 104, no. 9–12, pp. 3489–3510, Oct. 2019, doi: 10.1007/S00170-019-04085-3.
- [57] A. Panesar, M. Abdi, D. Hickman, and I. Ashcroft, "Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 81–94, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.ADDMA.2017.11.008.
- [58] "Spyros Panopoulos Automotive." https://spyrospanopoulos.com/ (accessed Feb. 02, 2022).
- [59] L. E. Murr, S. M. Gaytan, E. Martinez, F. Medina, and R. B. Wicker, "Next generation orthopaedic implants by additive manufacturing using electron beam melting," *Int. J. Biomater.*, 2012, doi: 10.1155/2012/245727.
- [60] "3d printed orthopedics Αναζήτηση Google." https://www.google.com/search?q=3d+printed+orthopedics&tbm=isch&ved=2ahUKE

wi-weHGnuH1AhXKtSoKHZZ4A24Q2-

cCegQIABAA&oq=3d+printed+orthopedics&gs\_lcp=CgNpbWcQAzoECAAQEzoIC AAQCBAeEBNQ3Q5Y8hRg8RVoAHAAeACAAa4BiAHtBpIBAzAuN5gBAKABA aoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=XJb6Yb6jLMrrqgGW8Y3wBg&bi h=969&biw=1903&hl=el#imgrc=K0bnFQyM42EivM (accessed Feb. 02, 2022).

- [61] "What equations are used to create the TPMS types? nTopology." https://support.ntopology.com/hc/en-us/articles/360053267814-What-equations-areused-to-create-the-TPMS-types- (accessed Feb. 02, 2022).
- [62] "3D printing in dentistry: the end-game manufacturing solution?" https://www.medicaldevice-network.com/features/3d-printing-in-dentistry/ (accessed Feb. 04, 2022).
- [63] "X-Plorer 1 JetX Engineering." https://www.jet-x.org/x-plorer-1.html (accessed Feb. 04, 2022).
- [64] "FDM Fused Deposition Modeling Engman Taylor." https://www.3dpartsunlimited.com/blog-post/fdm-fused-deposition-modeling/ (accessed Feb. 09, 2022).
- [65] "Stereolithography (SLA) 3D Printing Overview | Xometry Europe." https://xometry.eu/en/stereolithography-sla-3d-printing-technology-overview/ (accessed Feb. 05, 2022).
- [66] Δ. Τ. Έργων and Ι. Παπάς, "Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας Πτυχιακή / Διπλωματική Εργασία μηχανικού," 2018.