



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ "

**Τριδιάστατη εκτύπωση (3D) συνθέτων υλικών
πολυμερικής μήτρας με έξυπνη σχεδίαση**

Μεταπτυχιακή εργασία

της

ΚΥΤΤΑΡΗ ΘΕΟΔΩΡΑ

Επιβλέπων: Χαριτίδης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2019

Ευχαριστίες

Νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που συνέβαλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την κατανόηση, το ενδιαφέρον, τη βοήθεια και την αμέριστη συμπαράστασή τους.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Χαριτίδη Κωνσταντίνο, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια ολόκληρης της πορείας μου. Πολύτιμες υπήρξαν οι συμβουλές και η βοήθεια του Μεταδιδακτορικού Ερευνητή Κούμουλου Ηλία καθώς και της υποψηφίας Διδάκτορος Ελένης Γκάρτζου και Άννας Καραντζά. Η άψογη συνεργασία μας καθώς και η συνεχής υποστήριξή τους ήταν καταλυτικής σημασίας για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα R-NANO. Το υπέροχο κλίμα συνεργασίας που δημιούργησαν τόσο σε φιλικό όσο και σε επιστημονικό επίπεδο συντέλεσε στην ομαλή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στην οικογένειά μου και στο κοντινό φιλικό μου περιβάλλον για την συμπαράστασή τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιείται η τριδιάστατη εκτύπωση για τη δημιουργία πολυμερικών δομών μνήμης σχήματος (*Shape Memory Polymer structures*). Οι πολυμερικές δομές, οι οποίες σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο, έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν δομή κατά τη θέρμανση τους και να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα όταν βρίσκονται σε θερμοκρασία δωματίου. Η χρήση της τριδιάστατης εκτύπωσης επιλέχθηκε γιατί παρέχει στο χρήστη μια κατασκευαστική ρουτίνα με πλεονεκτήματα εύκολης εκτέλεσης, μεγάλη ελευθερία σχεδίου καθώς και υψηλή σε ανάλυση εκτύπωση, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για μηχανικές εφαρμογές, αλλά και γρήγορη και μαζική παραγωγή. Επίσης έγινε μελέτη μιας ειδικής κατηγορίας δομών που έχουν την ικανότητα εξαιτίας της δομής τους να αποκτούν διάφορες γωνίες λύγισης όταν το δοκίμιο κάμπτεται κατά τη θέρμανση. Αυτή η κατηγορία υλικών ανακαλύφθηκε στα τέλη του 1800, ωστόσο το 1991 ο επιστήμονας Ken Evans έδωσε σε αυτή τη δομή, την ονομασία *Auxetics*.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται, η ακολουθία της τριδιάστατης εκτύπωσης από τη σύλληψη της ιδέας και την δημιουργία ενός μοντέλου ψύκτρας μέχρι την παραγωγή του πρωτότυπου μοντέλου. Γίνεται περιγραφή των λογισμικών που εμπλέκονται στην διαδικασία καθώς και στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του μοντέλου αυτού. Τέλος εξετάζεται εν συντομία η εξέλιξη στις τεχνολογίες της τριδιάστατης εκτύπωσης και το πεδίο εφαρμογών με έμφαση στις προοπτικές που μπορεί να έχει μια ψύκτρα υπολογιστή σχεδιασμένη να έχει έξυπνες ιδιότητες.

Abstract

In this postgraduate thesis, 3D printing is used to create **Shape Memory Polymer** structures. Polymeric structures designed and manufactured in the laboratory have the ability to change structure upon heating and return to their original shape when at room temperature. The use of 3D printing was chosen because it provides the user with an easy-to-use manufacturing routine, great design freedom as well as high resolution printing, making it suitable for mechanical applications as well as fast and mass production. Also, a special category of structures having the ability due to their structure to obtain various bending angles when the specimen is bent during heating has also been studied. This class of materials was discovered in the late 1800s, but in 1991 the scientist Ken Evans gave it the name **Auxetics**.

This paper describes the sequence of three-dimensional printing from the conception of the idea and the creation of a heat sink model to the production of the original model. The software involved in the process is described as well as the materials used to create this model. Finally, we briefly discuss the evolution of 3D printing technologies and the scope of applications with an emphasis on the prospects that a computer heat sink can be designed to have intelligent properties.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Κεφάλαιο 1	8
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Bioinspired structure.....	8
1.3 Τριδιάστατη εκτύπωση – 3D Printing.....	10
1.4 Ιστορική αναδρομή	11
Κεφάλαιο 2	12
2.1 Αρχή λειτουργίας 3d εκτυπωτή.....	12
2.2 Κατασκευαστική δομή ενός 3d εκτυπωτή	13
2.2.1 Κεφαλή απόθεσης υλικού	14
2.2.2 Μηχανισμός εξώθησης υλικού.....	15
2.2.3 Η τράπεζα εκτύπωσης	16
2.2.4 Πλαίσιο στήριξης	17
2.3 Τεχνολογίες 3D Printing	17
2.3.1 Στερεολιθογραφία (SLA)	18
2.3.2 Digital Light Processing (DLP).....	18
2.3.3 Επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ - Selective Laser Sintering (SLS)	19
2.3.4 Μοντελοποίηση με εναπόθεση υλικού - Fused Deposition Molding (FDM)	20
2.4 Πολυμερή.....	22
2.4.1 Κατάταξη των πολυμερών με βάση τις μηχανοθερμικές ιδιότητες τους.....	23
Κεφάλαιο 3	25
3.1 Έξυπνα Υλικά – Smart Materials	25
3.2 Πολυμερή σχήματος-μνήμης – Shape Memory Polymers (SMPs).....	25
3.3 Κάμψη (Bending).....	26
3.4 Πολυμερή που επιλέχθηκαν για το πειραματικό μέρος.....	28

3.4.1 Πολυμερή πολουρεθάνης - Polyurethanes (PUs).....	28
3.4.2 Δομή και ιδιότητες θερμοπλαστικών ελαστομερών	30
3.4.3 Συμπολυμερές τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με γλυκόλη - PETG.....	31
Κεφάλαιο 4	32
4.1 Αυξητικά Υλικά/Δομές – Auxetic Materials/Structures.....	32
4.2 Ο νόμος του Hooke.....	36
4.3 Ο λόγος Poisson και η επίδρασή του στην καμπυλότητα.....	36
4.4 Ιδιότητες αυξητικών υλικών.....	39
4.4.1 Αντίσταση στη διείσδυση (indentation behaviour).....	39
4.4.2 Συμπεριφορά και αντοχή στη ρωγμή (crack resistance).....	40
4.4.3 Απόσβεση ταλαντώσεων και απορρόφηση ενέργειας	42
4.4.4 Συγκλαστική συμπεριφορά - Synclastic Behaviour	43
4.5 Αυξητική κυψελώδης δομή - Auxetic Cellular Honeycomb Structure.....	44
4.6 Επαναλαμβανόμενη δομή - Re-entrant structure.....	44
4.7 Χειρόμορφη δομή - Chiral structure.....	46
4.8 Γενικές μηχανικές εφαρμογές αυξητικών υλικών	47
Κεφάλαιο 5	51
5.1 Δημιουργία αντικειμένου μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης.....	51
5.2 Παράμετροι κατεργασίας και επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες.....	52
5.3 Εφαρμογές της τριδιάστατης εκτύπωσης.....	53
5.4 Προσδοκίες για την τριδιάστατη εκτύπωση ψύκτρας.....	57
Κεφάλαιο 6	60
6.1 Διάγραμμα ροής πειραματικού μέρους.....	60
6.2 Πειραματική διάταξη.....	60
6.3 Δοκίμια	66
6.4 Εκτύπωση δοκιμίων-Γεωμετρία.....	71
6.4.1 Εκτύπωση δοκιμίων	71

6.4.2 Γεωμετρία δοκιμίων	74
6.5 Υλικά	78
6.6 Παράμετροι εκτύπωσης	79
Κεφάλαιο 7	90
7.1 Συμπεράσματα.....	90
Βιβλιογραφία	92

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Η φύση έχει αναπτύξει υλικά και δομές υψηλής απόδοσης πάνω από εκατομμύρια χρόνια εξέλιξης και παρέχει πολύτιμες πηγές έμπνευσης για το σχεδιασμό δομικών υλικών επόμενης γενιάς, δεδομένης της ποικιλίας εξαιρετικών μηχανικών, υδροδυναμικών, οπτικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Η βιοϊατρική παίρνοντας παραδείγματα από τη φύση οδηγεί μια μεταστροφή του πρότυπου στην επιστήμη και την τεχνολογία των σύγχρονων υλικών. Παρόλα αυτά, οι πολύπλοκες δομικές αρχιτεκτονικές στη φύση υπερβαίνουν κατά πολύ την ικανότητα των παραδοσιακών τεχνολογιών σχεδίασης και κατασκευής, γεγονός που παρεμποδίζει την πρόοδο της βιομηχανικής μελέτης και τη χρήση της στα συστήματα μηχανικής. Η μέθοδος προσθετικής κατασκευής (τριδιάστατη (3D) εκτύπωση) δημιούργησε νέες ευκαιρίες για τον χειρισμό και την μίμηση της εγγενώς πολύπλευρης, πολυμορφικής και πολυλειτουργικής δομής στη φύση. Τις τελευταίες δεκαετίες, αυτοματοποιημένα συστήματα τα οποία βασίζονται στην ρομποτική τεχνολογία, αναλαμβάνουν όλο και περισσότερο την μεσολάβηση αυτή σε πολλούς τομείς της παραγωγής. Η κατασκευή των τριδιάστατων εκτυπωτών αποτελεί ένα νέο στάδιο στην εξέλιξη της αυτοματοποίησης, καθώς μέσα από αυτό οδηγούμαστε στην απευθείας μετάβαση από το ψηφιακό μοντέλο ή σχέδιο, στο φυσικό αντικείμενο τριών διαστάσεων.

[1]

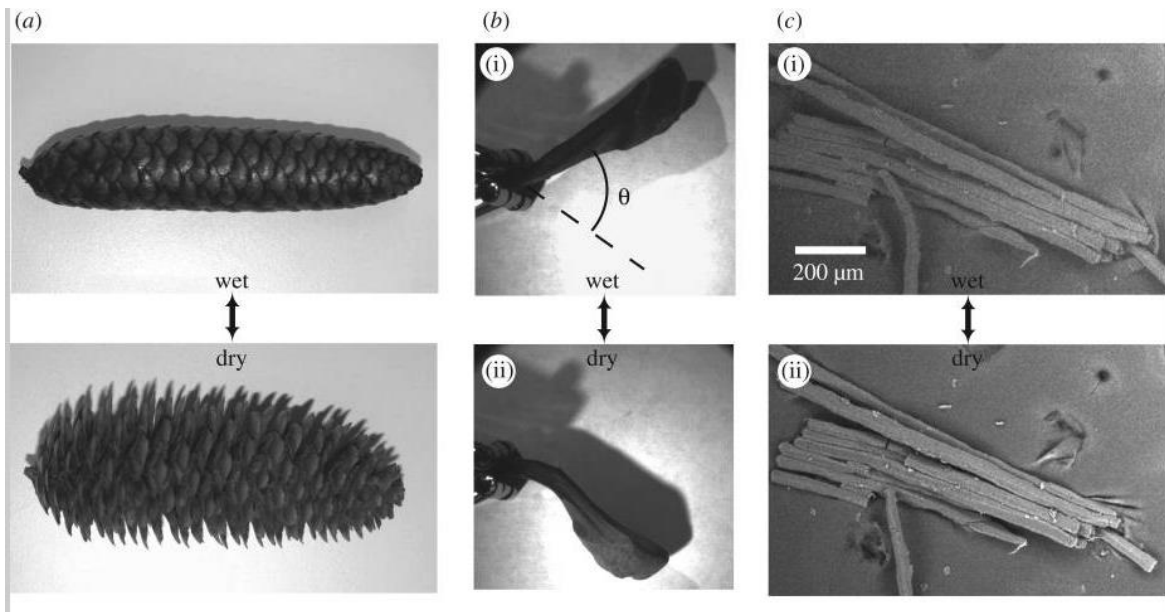
1.2 Bioinspired structure

Πάνω από εκατομμύρια χρόνια η φύση βελτιστοποίησε τους οργανισμούς της προκειμένου να επιβιώσει στις σκληρές συνθήκες στη Γη. Αυτή η εξέλιξη δεν σημαίνει απαραίτητα την επιβίωση του ισχυρότερου ή μεγαλύτερου αλλά την επιβίωση αυτού που προσαρμόζεται καλύτερα. Για να επωφεληθούν από τα εκατομμύρια των ετών ανάπτυξης, όλο και περισσότερα συστήματα στην καθημερινή μας ζωή είναι εμπνευσμένα από τη φύση. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το φαινόμενο του λωτού, το οποίο απωθεί το νερό και κάθε είδους ακαθαρσία από την επιφάνεια του.

Το λουλούδι αυτό αποτελεί την φυσική έννοια που έχει επιλεγεί στην βιομηχανική, με σκοπό την μίμηση αυτού, όχι μόνον από άποψη μορφής, αλλά και με βάση τους μηχανισμούς και τη συμπεριφορά, περιλαμβάνοντας αντιδράσεις που έχει στο φως, τη θερμομόνωση, την ανταπόκριση σε διάφορες ατμόσφαιρες γύρω από αυτό και τον τρόπο

που παρέχει ενέργεια το ίδιο προς το περιβάλλον προκειμένου να επιβιώσει. Η πρώτη και πιο σημαντική συμπεριφορά του λωτού που μπορεί να αποτελέσει έμπνευση είναι ο μηχανισμός ανοίγματος και κλεισίματος ανάλογα με το ποσοστό του φωτός που παρέχεται γύρω από το φυτό στον κύκλο της ημέρας, αλλά και ικανότητα αυτο-σκίασης που παρέχουν τα υψηλότερα φύλλα στο λουλούδι. Η λειτουργία αυτή διασφαλίζει στο φυτό ασφάλεια και προστασία από τον σκληρό ηλιακό φωτισμό και ο σπόρος παραμένει ασφαλής ώσπου να ωριμάσει. [2]

Ένα άλλο παράδειγμα για το πώς ένας δομημένος ιστός ανταποκρίνεται σε ένα περιβαλλοντικό ερέθισμα είναι το κουκουνάρι. Εξαιτίας της υγρασίας που προκαλείται λόγω αλλαγών στις καιρικές συνθήκες το κουκουνάρι αποτελεί έναν κλειστό, σφιχτά δομημένο κώνο για να ανοίξει σταδιακά, όπως φαίνεται στο σχήμα *Ia*. Ο μηχανισμός που οδηγεί στο άνοιγμα του κώνου καθώς στεγνώνει (κλείνει ξανά όταν είναι βρεγμένος) βασίζεται στη διπλή δομή των μεμονωμένων κλιμάκων που αλλάζουν τη διαμόρφωση με την αλλαγή της περιβαλλοντικής υγρασίας. Στο σχήμα *Ib*, φαίνεται πως η παραμόρφωση εντοπίζεται σε μια μικρή περιοχή κοντά στην οποία το σώμα συνδέεται στο στήμονα του κώνου, ενώ το υπόλοιπο ενισχύει την κίνηση αυτή γεωμετρικά. Σε αυτό το ενεργό εξωτερικό στρώμα ιστού, στενά δομημένα παράλληλα κύτταρα με παχύ τοίχωμα αποκρίνονται επεκτεινόμενα διαμήκως κατά την έκθεση τους σε υγρασία και συρρικνώνονται όταν ξηραίνονται. Εν αντιθέσει, το εσωτερικό παθητικό στρώμα δεν αποκρίνεται τόσο έντονα. Κατά συνέπεια, ο ιστός συμπεριφέρεται σαν μια θερμικά ενεργοποιούμενη διμεταλλική λωρίδα που κάμπτεται σε απόκριση της θερμικής μεταβολής, εξαιτίας της διαφορικής διαστολής των λωρίδων που είναι κολλημένες μεταξύ τους. [3]



Εικόνα 1: (α) Κώνος από *Picea abies* στις υγρές (κλειστές) και ξηρές (ανοικτές) καταστάσεις. (β) κλίμακα κώνου στις υγρές (i) και ξηρές (ii) καταστάσεις. (γ) Εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης περιβάλλοντος (Environmental scanning electron microscopy-ESEM) μερικών κυττάρων από τον αποκριτικό ιστό ποικιλίας *Pinus coulteri*. Τα κύτταρα είναι κατά 20% μεγαλύτερα στην υγρή κατάσταση (i) από ότι σε ξηρό περιβάλλον (ii). [3]

1.3 Τριδιάστατη εκτύπωση – 3D Printing

Η 3D εκτύπωση είναι μια τεχνική κατασκευής πρόσθετων για την κατασκευή ενός μεγαλύτερου φάσματος δομών και σύνθετων γεωμετριών αντικειμένων, χρησιμοποιώντας ποικιλία υλικών, όπως μέταλλο, πλαστικό, ξύλο, χαρτί και διάφορα άλλα. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην δημιουργία πολλών στρώσεων υλικού, οι οποίες προσκολλώνται η μία πάνω στην άλλη έτσι ώστε να συνθέτουν ένα συμπαγές στερεό αντικείμενο στο τέλος κάθε διεργασίας.

Η χρήση των αντικειμένων που γίνεται μετά από κάθε τριδιάστατη εκτύπωση ποικίλει ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και υλικό. [4] Η προσθετική κατασκευή (**Additive Manufacturing**) έχει εφαρμοστεί ευρέως σε διαφορετικούς τύπους βιομηχανιών. Παρά το γεγονός πως η τριδιάστατη εκτύπωση έχει αρκετά πλεονεκτήματα π.χ. λιγότερα απόβλητα, ελευθερία σχεδιασμού και αυτοματοποίηση, αποτελούσε ταυτόχρονα μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία για τη βιομηχανία. Με την πάροδο των χρόνων όμως νέες εφαρμογές, νέα υλικά και μέθοδοι AM αναπτύσσονται συνεχώς μειώνοντας το κόστος και δίνοντας την ευκαιρία σε σχολεία, σπίτια βιβλιοθήκες και

εργαστήρια να χρησιμοποιήσουν και αυτοί τους Τριδιάστατους εκτυπωτές. Επίσης η τριδιάστατη εκτύπωση έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό από αρχιτέκτονες και σχεδιαστές για να αποδώσουν αισθητική και λειτουργικότητα στα έργα τους. Ωστόσο η προσαρμογή του προϊόντος ήταν ανέκαθεν μια πρόκληση για τους κατασκευαστές λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής προσαρμοσμένων προϊόντων για τελικούς χρήστες. Από την άλλη μεριά, η AM είναι σε θέση να εκτυπώσει τριδιάστατες ποσότητες μικρού μεγέθους με σχετικά χαμηλό κόστος. Η ικανότητα αυτή είναι αρκετά χρήσιμη στον τομέα της βιοϊατρικής καθώς απαιτούνται προϊόντα κατάλληλα προσαρμοσμένα για τον κάθε ασθενή ξεχωριστά. [5]

1.4 Ιστορική αναδρομή

Γνωστή και ως *Rapid Prototyping (RP)*, η τριδιάστατη εκτύπωση έκανε την εμφάνιση της στη βιομηχανία στα τέλη περίπου της δεκαετίας του 1980. Στόχος της ήταν η γρήγορη, εύκολη αλλά και οικονομική παρασκευή πρωτοτύπων και τη χρήση τους ως βιομηχανικά προϊόντα. Ο Charles Hull το 1986 ήταν ο πρώτος που δημιούργησε μια πατέντα για συσκευή στερεολιθογραφίας. Το μηχάνημα εφευρέθηκε το 1983 και ίδρυσε την 3D Systems Corporation στην Καλιφόρνια, η οποία αποτέλεσε έναν από τους μεγαλύτερους και παραγωγικότερους οργανισμούς στον τομέα της τριδιάστατης εκτύπωσης έως και σήμερα. [6]

Αν και η **Selective Laser Sintering, SLS** διεργασία ουσιαστικά αποτέλεσε την αρχή της τριδιάστατης εκτύπωσης, το ίδιο διάστημα, το 1987, βρισκόταν υπό ανάπτυξη από τον Carl Deckard η μέθοδος της Επιλεκτικής συσσωμάτωσης με Λείζερ (**Selective Laser Sintering, SLS**), η οποία κατοχυρώθηκε το 1989. Την ίδια χρονιά ο Scott Crump αιτήθηκε πατέντα για την μέθοδο κατασκευής με εναπόθεση υλικού (**Fused Deposition Modeling, FDM**) η οποία έγινε για λογαριασμό της εταιρίας του Stratasys Inc. Στην Ευρώπη, ιδρύθηκε το 1989 στη Γερμανία από τον Hans Langer, η EOS GmbH, η οποία μετά από ένα διάστημα όχι και τόσο επιτυχημένης ενασχόλησης με τις Selective Laser διεργασίες, έστρεψε την προσοχή της στις Laser Sintering διεργασίες. Σήμερα τα συστήματά της έχουν διεθνή αναγνώριση για την ποιότητά τους στην βιομηχανική παραγωγή. Στα τέλη του '90 με αρχές του '00 είχαμε την εμφάνιση νέων τεχνολογιών που αφορούσαν κυρίως στην παραγωγή καλουπιών και μητρών για περιορισμένη παραγωγή γνωστή και ως Ταχεία Κατασκευή Εργαλείων (Rapid Tooling). [6]

Κεφάλαιο 2

2.1 Αρχή λειτουργίας 3d εκτυπωτή

Η βασική ιδέα πίσω από την τριδιάστατη εκτύπωση είναι μια μέθοδος που ονομάζεται «προσθετική κατασκευή». Οι αρχές λειτουργίας είναι κοινές με έναν απλό εκτυπωτή χαρτιού ψεκασμού μελάνης ο οποίος προσθέτει μεμονωμένες κουκίδες μελανιού για να σχηματίσουν μια εικόνα. Σύμφωνα με αυτή την αρχή, ένας 3D εκτυπωτής προσθέτει το υλικό κατασκευής του αντικειμένου μόνο όπου χρειάζεται, ακολουθώντας εντολές από ένα ψηφιακό αρχείο. Η διαδικασία της εκτύπωσης και η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής ακολουθεί τον ίδιο βασικό κανόνα και εφαρμόζεται σε εκτυπωτές με διάφορα μεγέθη και σχήματα, ανεξάρτητα από το είδος του 3D εκτυπωτή ή από το υλικό που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση του αντικειμένου. Το πρώτο βήμα ξεκινάει με τη δημιουργία ενός τριδιάστατου σχεδίου του αντικείμενου που θέλουμε να εκτυπωθεί, χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό **CAD (Computer Aid Design)**. Αυτό το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να προκύψει μέσω της χρήσης τριδιάστατου σαρωτή είτε κατασκευάζοντας το σχέδιο. Το στάδιο της προετοιμασίας του εκτυπωτή περιλαμβάνει αρχικά τον εφοδιασμό του με πρώτες ύλες. Σημαντική είναι η επιλογή του κατάλληλου υλικού εκτύπωσης το οποίο θα επιτύχει με τον καλύτερο τρόπο τις συγκεκριμένες ιδιότητες που απαιτούνται για το αντικείμενο της παραγωγής. Η ποικιλία των υλικών που χρησιμοποιούνται στους 3D εκτυπωτές είναι μεγάλη γι' αυτό και η σωστή επιλογή του υλικού αποτελεί βασικό μέρος της διαδικασίας. Υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το πλαστικό, η ρητίνη, διάφορα μέταλλα όπως ο χρυσός και ο χαλκός, το γυαλί, ακόμα και ανθρώπινα κύτταρα. [6] Απαιτείται επίσης προετοιμασία της πλατφόρμας κατασκευής καθώς σε πολλές περιπτώσεις ίσως είτε χρειαστεί να καθαριστεί είτε να εφαρμοστεί μια κόλλα για να αποτραπεί η μετακίνηση και η στρέβλωση του αντικειμένου από τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. Μόλις φορτωθεί το ψηφιακό μοντέλο στον εκτυπωτή, το μηχάνημα αναλαμβάνει αυτόματα τη δημιουργία του αντικειμένου. Η πιο κοινή μέθοδος για τη κατασκευή 3d αντικειμένων είναι η εξώθηση υλικού. Το υλικό εκτύπωσης θερμαίνεται μέχρι να τακεί και εξωθείται μέσω του ακροφυσίου εκτύπωσης. Παίρνοντας πληροφορίες από το ψηφιακό αρχείο, ο σχεδιασμός του αντικειμένου είναι χωρισμένος σε λεπτές διδιάστατες διατομές (thin slices), ώστε ο εκτυπωτής να ξέρει ακριβώς πού να τοποθετήσει το πλαστικό υλικό. Το υλικό αυτό στερεοποιείται γρήγορα και συγκολλάται με το κάτω στρώμα του υλικού πριν χαμηλώσει η πλατφόρμα και η κεφαλή εκτύπωσης προσθέσει άλλο στρώμα. Η διάρκεια της

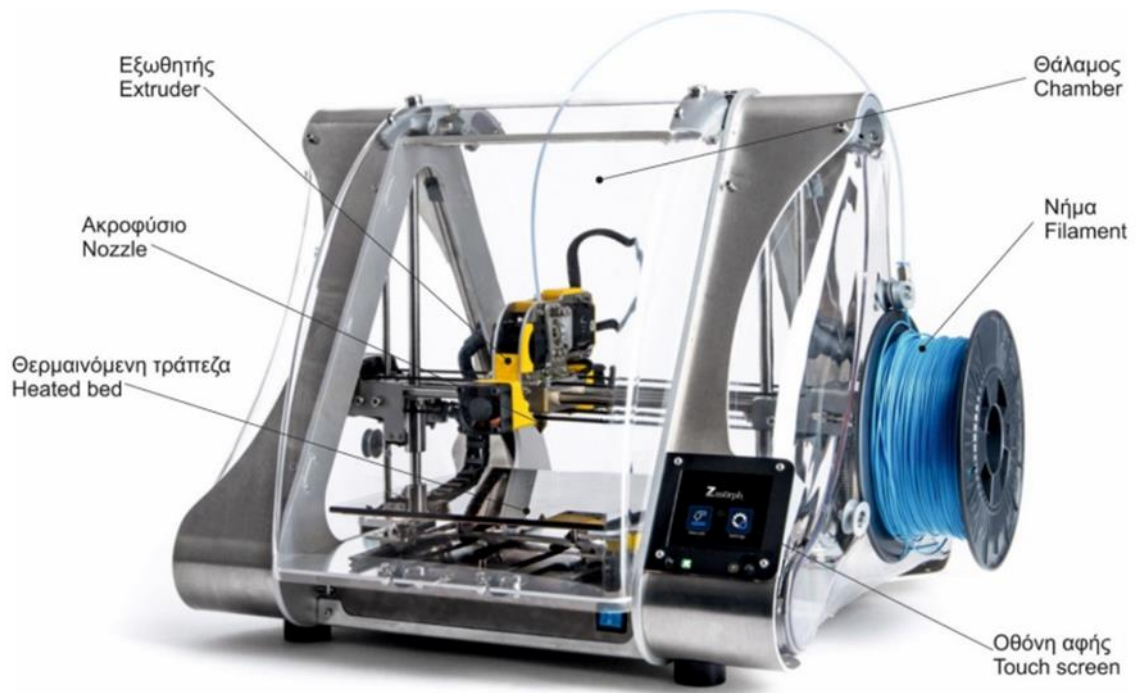
εκτύπωσης, όπως αναφέρθηκε, μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου, τον τρόπο εκτύπωσης και του υλικού παραγωγής. Αφού ολοκληρωθεί η εκτύπωση κάθε αντικείμενο απαιτεί μία ελάχιστη μετεπεξεργασία (**post processing**), η οποία περιλαμβάνει από την απλή αποκόλληση του αντικειμένου από την πλατφόρμα εκτύπωσης, έως την αφαίρεση προσωρινού υλικού που τυπώνεται για τη στήριξη προεξοχών επί του αντικειμένου, το φινίρισμα και άλλα. Αυτή η διαδικασία απαιτεί συχνά εξειδικευμένες δεξιότητες και υλικά καθώς όταν το αντικείμενο τυπώνεται πρώτη φορά πολλές φορές δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί άμεσα μέχρι να λειανθεί, βερνικωθεί ή βαφτεί ώστε να ολοκληρωθεί ο αρχικός σχεδιασμός του. Το υλικό το οποίο έχει επιλεγεί είναι αυτό το οποίο θα καθορίσει ποια μέθοδος μετεπεξεργασίας είναι η πιο κατάλληλη.

[7]

2.2 Κατασκευαστική δομή ενός 3d εκτυπωτή

Οι τριδιάστατοι εκτυπωτές παρουσιάζουν μια κοινή δομή ως προς τα μηχανικά μέρη από τα οποία αποτελούνται καθώς και ως προς τα δομικά τους στοιχεία. Αυτά μπορούν να μπουον στις παρακάτω κατηγορίες:

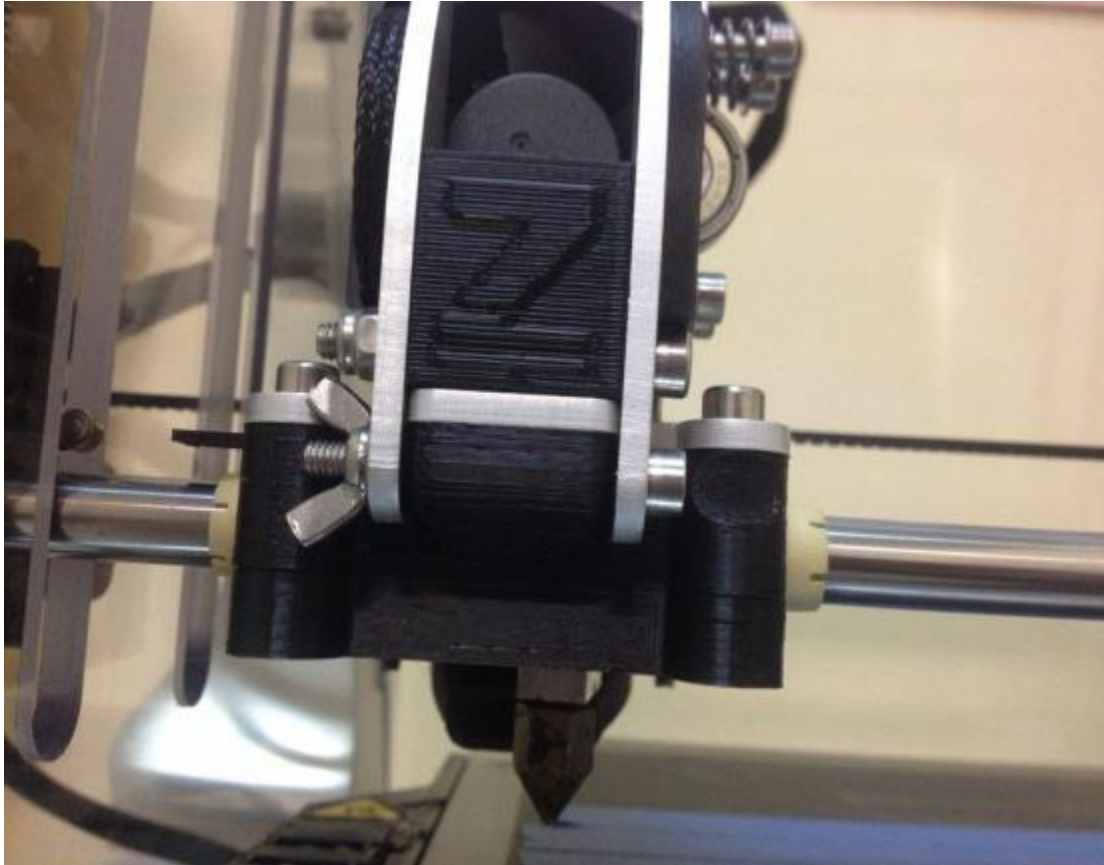
- ❖ Κεφαλή απόθεσης υλικού
- ❖ Μηχανισμός εξώθησης υλικού
- ❖ Τράπεζα εκτύπωσης
- ❖ Πλαίσιο στήριξης
- ❖ Υλικά εκτύπωσης [8]



Εικόνα 2: Μέρη από τα οποία αποτελείται ένας εκτυπωτής **Zmorph** [8]

2.2.1 Κεφαλή απόθεσης υλικού

Η κεφαλή απόθεσης υλικού είναι από τα πιο σημαντικά μέρη του εκτυπωτή. Αυτή κατέχει παράλληλα πολλαπλούς ρόλους. Ο μηχανισμός εξώθησης προωθεί το νήμα είτε άμεσα είτε μέσω ενός σωλήνα. Το κρύο νήμα εισέρχεται σε έναν διάτρητο κοχλία ο οποίος εδράζεται στο «μπλοκ θέρμανσης». Το τελευταίο με τη βοήθεια μιας αντίστασης αναπτύσσει υψηλή θερμοκρασία με σκοπό την τήξη του νήματος. Ο μηχανισμός εξώθησης υλικού ωθεί το κρύο νήμα μέσα στον θάλαμο θέρμανσης, όπου με τη σειρά του ωθεί το ρευστοποιημένο πλέον υλικό να εξέλθει από το ακροφύσιο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, στην κεφαλή εξώθησης υλικού εδράζεται ένας αισθητήρας για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Η σωστή επιλογή των στοιχείων επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα αλλά και το χρόνο εκτύπωσης. Το ακροφύσιο αποτελεί σημαντικό στοιχείο στη διαδικασία της εκτύπωσης. [8]



Εικόνα 3: Κεφαλή εναπόθεσης υλικού του τριδιάστατου εκτυπωτή

2.2.2 Μηχανισμός εξώθησης υλικού

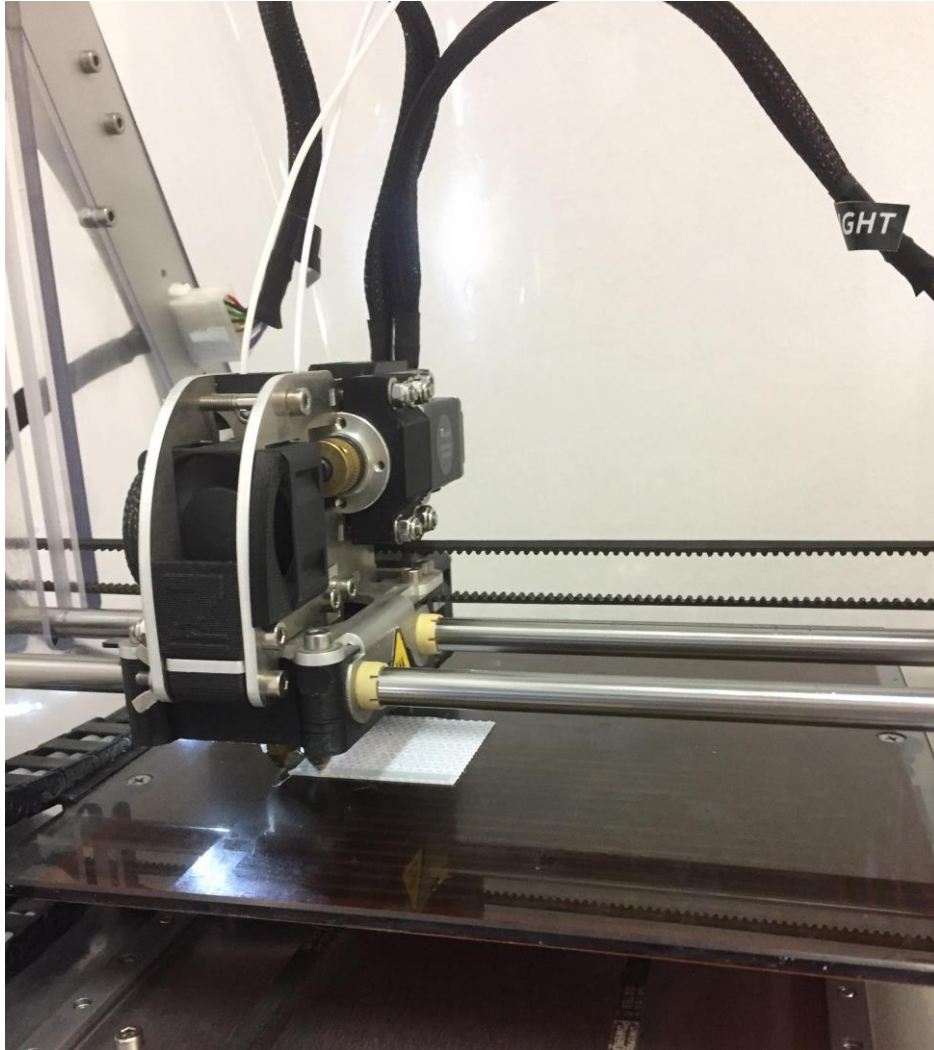
Ο εξωθητής είναι ικανός να στρώνει λεπτές λωρίδες θερμοπλαστικού. Πρόκειται για μια ένωση δύο στοιχείων: του οδηγού νήματος και του θερμικού τέλους. Ο οδηγός νήματος τραβάει μέσα το πλαστικό νήμα με διάμετρο νήματος είτε 3mm ή 1.75 mm, χρησιμοποιώντας μηχανισμό για τον έλεγχο της ροής του νήματος. Οι περισσότεροι, αν όχι όλοι, μηχανισμοί νήματος χρησιμοποιούν μικροκινητήρα για τον καλύτερο έλεγχο της ροής του πλαστικού μέσα στο θερμικό τέλος. Αυτοί οι κινητήρες είναι συχνά εξοπλισμένοι με αναπόσπαστα γρανάζια, για να δώσουν στον οδηγό νήματος την δύναμη που απαιτείται για συνεχή εξώθηση.

Το νήμα αφού τραβηχτεί μέσα στον εξωθητή από τον οδηγό νήματος, καταλήγει στον θάλαμο θέρμανσης. Ο θάλαμος θέρμανσης είναι θερμικά μονωμένος από τον υπόλοιπο εξωθητή και είναι φτιαγμένο είτε από ένα κομμάτι αλουμινίου με ενσωματωμένη θέρμανση ή από κάποιο άλλο υλικό με αισθητήρα θερμοκρασίας. Όταν το πλαστικό φθάνει στο θάλαμο θέρμανσης ζεσταίνεται περίπου στους 170 °C με 220 °C (αναλόγως με την θερμοκρασία τήξης του πλαστικού που θα εξωθηθεί). Μόλις φθάσει σε ημι-

υγροποιημένη κατάσταση, το πλαστικό πιέζεται μέσο ενός ακροφυσίου, πριν στρωθεί η λεπτή στρώση καυτού πλαστικού πάνω στην πλατφόρμα εκτύπωσης, σχεδιάζοντας γραμμές που διαμορφώνουν το σχήμα του εκτυπωμένου αντικειμένου. [8]

2.2.3 Η τράπεζα εκτύπωσης

Η τράπεζα εκτύπωσης είναι η ωφέλιμη περιοχή στην οποία παίρνουν μορφή τα αντικείμενα που έχουν σχεδιαστεί. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για το υλικό χρήσης. Τα πιο διαδεδομένα είναι το γυαλί και το μέταλλο. Επίσης, χαρακτηριστική είναι η δυνατότητα ρύθμισης και ευθυγράμμισης του επιπέδου της πλατφόρμας (ως βαθμονόμηση), η οποία πραγματοποιείται μέσω κοχλιών στις γωνίες της πλάκας. Δεν πρέπει να παραληφθεί η σημασία των θερμαινόμενων πλακών, οι οποίες παρέχουν σημαντική βοήθεια για την αποφυγή του φαινομένου της αποκόλλησης του υλικού από την πλάκα λόγω της απότομης αλλαγής της θερμοκρασίας και της ψύξης της στρώσης που εναποτίθεται. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό πως η σχεδιαστική λεπτομέρεια του αντικειμένου που εκτυπώνεται εξαρτάται από το ποσοστό κβάντισης του χώρου, δηλαδή από πλήθος κινήσεων του συστήματος εκτύπωσης και του συστήματος τροφοδοσίας. Όσο μικρότερη η γωνία περιστροφής του κινητήρα ανά παλμό, τόσο μεγαλύτερο το πλήθος των κινήσεων του άξονα, με αποτέλεσμα την καλύτερη ακρίβεια στην εκτύπωση. [8]



Εικόνα 4: Τράπεζα εκτύπωσης τριδιάστατου εκτυπωτή

2.2.4 Πλαίσιο στήριξης

Η καλή λειτουργία και η αποδοτικότητα του εκτυπωτή επηρεάζονται άμεσα από την μηχανική αντοχή και τη στιβαρότητα της βάσης του. Ο σωστός σχεδιασμός και ο έλεγχος της λειτουργίας αποτελούν βασικούς παράγοντες για να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες ή δυσλειτουργίες του εκτυπωτή. Ως πλαίσιο στήριξης του εκτυπωτή ορίζεται το σώμα του εκτυπωτή. Τα μέλη του συστήματος συμπεριφέρονται ως στερεά σώματα. Σύμφωνα με αυτό, γίνεται η μαθηματική ανάλυση των δομικών συστημάτων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια στην χρήση συγκεκριμένων υλικών, τα οποία δέχονται πολλές τάσεις. [8]

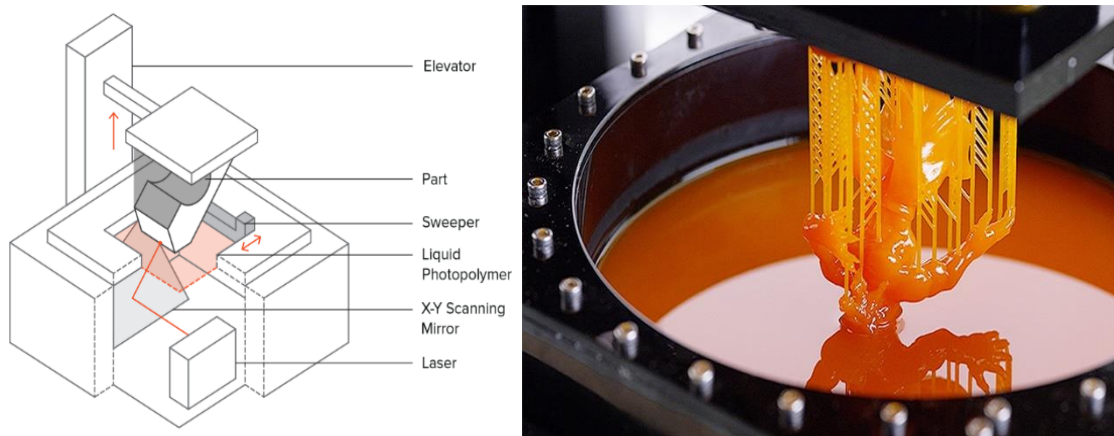
2.3 Τεχνολογίες 3D Printing

Η τεχνολογία του 3D Printing ξεκίνησε το 1982 από τον Charles Hull, ο οποίος ανέπτυξε την τεχνολογία της στερεολιθογραφίας (**Stereolithography-SLA**). Η κεντρική ιδέα της

τεχνολογίας αυτής είναι η χρήση μιας συνήθως υπεριώδους (UV) πηγής φωτός για τη μετατροπή ρητίνων σε στερεά μορφή. Με την πάροδο του χρόνου και αφού έχει σημειωθεί μεγάλη εξέλιξη στις τεχνολογικές εκτυπώσεις και στις διατάξεις εκτυπωτών, η χρήση του 3D Printing επεκτάθηκε σε διάφορους τομείς. Πρόκειται για μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, σε αντίθεση με συμβατικές μεθόδους όπου το τελικό αντικείμενο προκύπτει μέσω <<αφαιρετικής κατασκευής>>. Αυτό σημαίνει πως αφαιρείται υλικό μέχρι να προκύψει το επιθυμητό σχήμα. [7]

2.3.1 Στερεολιθογραφία (SLA)

Είναι η παλαιότερη χρησιμοποιούμενη μέχρι και σήμερα μέθοδος 3D εκτύπωση. Το τελικό αντικείμενο δημιουργείται με διαδοχικές στρώσεις κάνοντας επιλεκτική επεξεργασία ρητίνης ή υγρού φωτοπολυμερούς από ένα laser υπεριώδους (UV) φωτός. Η SLA τεχνική είναι αποτελεσματική μέθοδος για την εκτύπωση μεγάλου μεγέθους αντικειμένων. Ωστόσο αποτελεί αργή και ακριβή μέθοδο λόγω του κόστους που έχουν τα χρησιμοποιούμενα υλικά. [9]

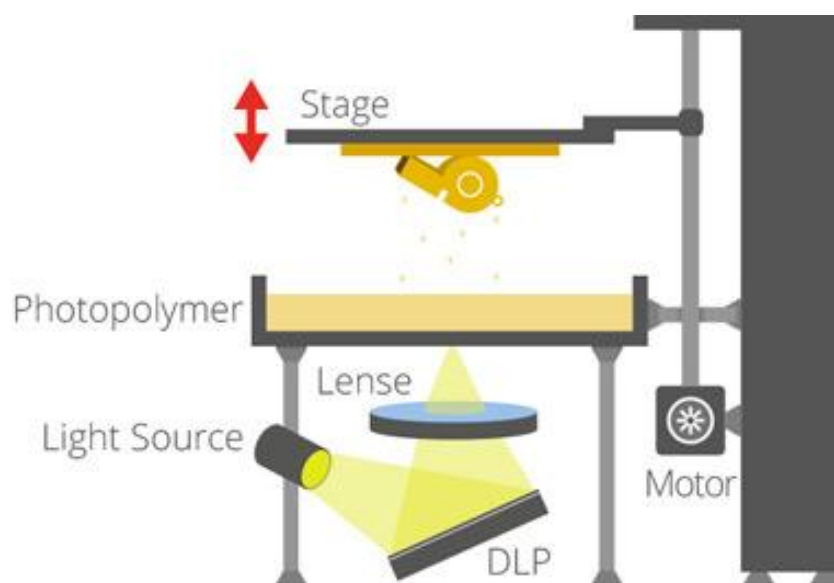


Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας της Στερεολιθογραφίας [10]

2.3.2 Digital Light Processing (DLP)

Σε αυτή τη διαδικασία, μια δεξαμενή υγρού πολυμερούς εκτίθεται σε φως από ένα προβολέα Digital Light Processing (DLP). Ο προβολέας DLP εμφανίζει την εικόνα του μοντέλου 3D πάνω στο υγρό πολυμερές. Το εκτεθειμένο υγρό πολυμερές σκληραίνει και η πλάκα κατασκευής κινείται προς τα κάτω και το υγρό πολυμερές για μια ακόμη φορά εκτίθεται στο φως βάση του ψηφιακού μοντέλου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το τριδιάστατο μοντέλο ολοκληρωθεί και η δεξαμενή αποστραγγίζεται από το υγρό, αποκαλύπτοντας το στερεοποιημένο μοντέλο.

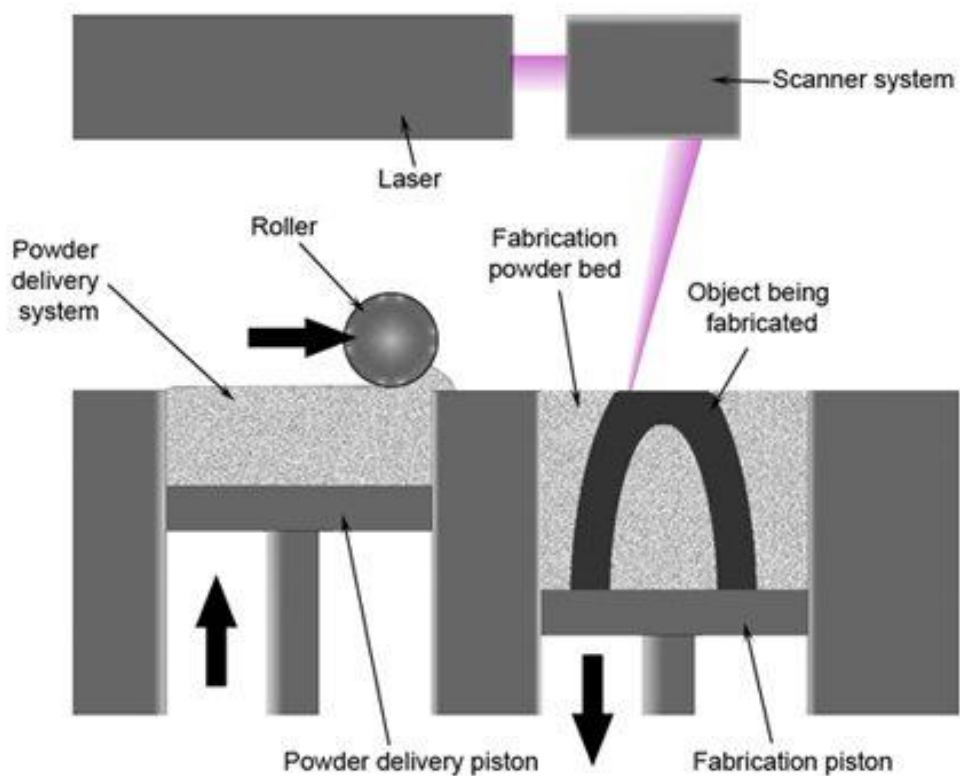
Ένα πλεονέκτημα της DLP έναντι της SLA είναι ότι απαιτείται ρηχή δεξαμενή με ρητίνη που διευκολύνει τη διαδικασία, η οποία οδηγεί γενικά σε λιγότερα απόβλητα και χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Η DLP εκτύπωση είναι πολύ γρήγορη διαδικασία λόγω της ενιαίας στρώσης που δημιουργείται με μία μοναδική ψηφιακή εικόνα και μπορεί να εκτυπώσει αντικείμενα με υψηλότερη ανάλυση. Παρόμοια με την SLA, η DLP χρησιμοποιείται συνήθως για να δημιουργήσει εξαιρετικά λεπτομερή έργα τέχνης, μη λειτουργικά πρωτότυπα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία καλουπιών σε εφαρμογές χύτευσης. Envision Tec Ultra, MiiCraft και Lunavast XG2 είναι παραδείγματα εκτυπωτών DLP. [11]



Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση της ψηφιακής επεξεργασίας φωτός [12]

2.3.3 Επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ - Selective Laser Sintering (SLS)

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί το *laser* σαν πηγή ενέργειας για τη δημιουργία 3D αντικειμένων. Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι θερμοπλαστικό, μέταλλο ή κεραμικό σε μορφή σκόνης (powdered material). Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η εκτύπωση αντικειμένων με λεία επιφάνεια και υψηλή ακρίβεια σε κατασκευές λεπτών δομών. Παρόλα αυτά οι SLS εκτυπωτές είναι ακριβοί και η χρήση τους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω των lasers και των αερίων τα οποία μπορεί να φτάσουν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. [13]



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση της επιλεκτικής σύντηξης laser. [14]

2.3.4 Μοντελοποίηση με εναπόθεση υλικού - Fused Deposition Molding (FDM)

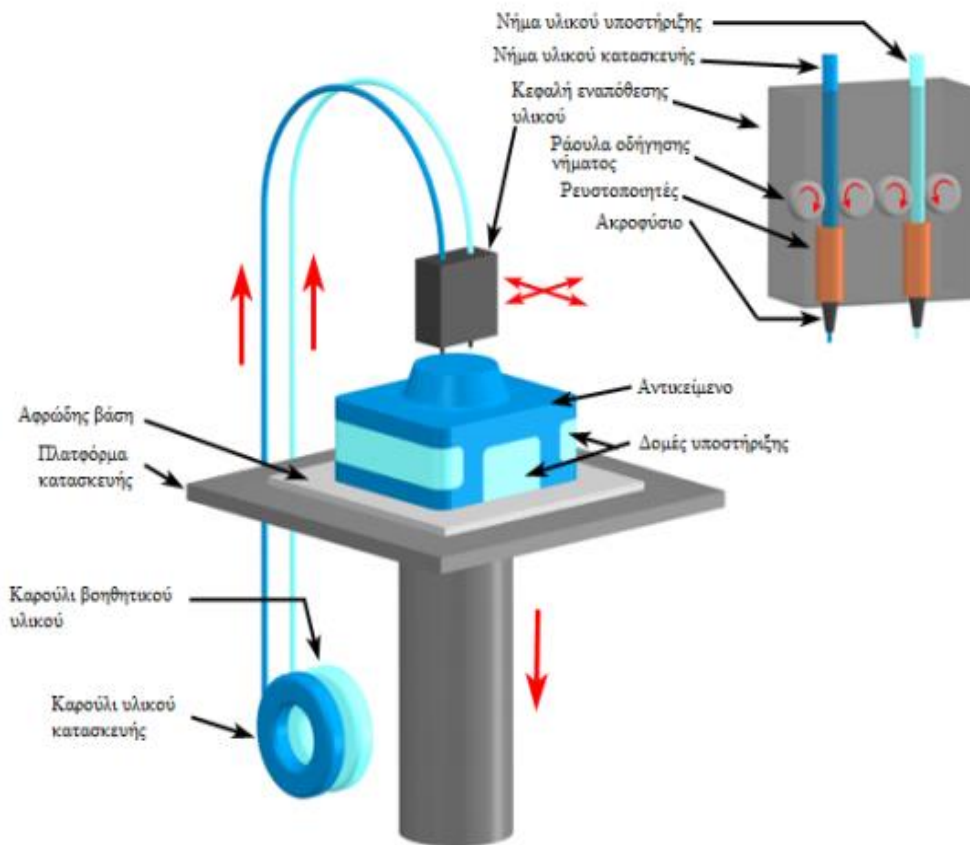
Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε το 1988 από τον S.Scott Crump και εμπορευματοποιήθηκε από την εταιρεία του, *Stratasys*, με την ονομασία Fused Deposition Modeling (FDM). Η διαδικασία αναφέρεται συχνά ως κατασκευή σύντηξης **Fused Filament Fabrication (FFF)**. Η τεχνολογία αυτή είναι διαδεδομένη σε εφαρμογές όπου στο προς κατασκευή αντικείμενο παίζουν κρίσιμο ρόλο οι μηχανικές αντοχές, αφού τα περισσότερα θερμοπλαστικά πολυμερή που χρησιμοποιούνται διακρίνονται για την ανθεκτικότητά τους. Σε γενικές γραμμές οι εκτυπωτές που βασίζονται στην FFF τεχνική χρησιμοποιούν μια λεπτή ίνα θερμοπλαστικού νήματος που ξετυλίγεται από ένα καρούλι, έτσι ώστε το υλικό να ωθείται προς μία ή και περισσότερες κεφαλές εξώθησης και προς τους κινητήριους τροχούς, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο της ροής. Η κεφαλή θερμαίνεται έως ότου το υλικό γίνει ρευστό και μπορεί να μετακινείται οριζόντια και κατακόρυφα βάση ενός μηχανισμού αριθμητικού ελέγχου, ακολουθώντας μια διαδρομή που δίδεται από το λογισμικό. Για την ομαλή εναπόθεση του υλικού στα ήδη υπάρχοντα στρώματα και για την εξάλειψη παραμορφώσεων λόγω ανομοιόμορφης ψύξης μεταξύ των κάτω στρώσεων

και των σημείων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση με την κεφαλή κατά τη διαδικασία της εναπόθεσης του θερμού υλικού, καθώς επίσης και για την αποφυγή απότομης ψύξης, όλη η διάταξη λειτουργεί μέσα σε θάλαμο ο οποίος βρίσκεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται και η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την τήξη της πρώτης ύλης, καθιστώντας την όλη διαδικασία αποδοτικότερη και καλύτερα ελεγχόμενη. [15] Χαρακτηρίζεται από υψηλή σχέση απόδοσης/τιμής συγκριτικά με άλλες μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίησης ή συμβατικής παραγωγής. Το αντικείμενο που εκτυπώνεται είναι πολύ ανθεκτικό και συνήθως έτοιμο προς χρήση χωρίς να απαιτείται κάποια πρόσθετη επεξεργασία. Αυτά τα οφέλη κάνουν την FFF τεχνική καλά προσαρμοσμένη στην μικρομηχανική, η οποία εξελίσσεται συνεχώς και υπερβαίνει τις περιορισμένες δυνατότητες κατασκευής μικρών εξαρτημάτων [16]

Ωστόσο ορισμένα μειονεκτήματα αυτής της εφαρμογής είναι η τραχύτητα της επιφάνειας, η αδυναμία για καλή ένωση των στρώσεων μεταξύ τους, η ανάγκη για υλικό υποστήριξης αλλά και οι μεγάλοι χρόνοι κατασκευής μεγάλων εξαρτημάτων. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξώθηση θερμοπλαστικών και σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας (ενισχυμένα με (νανο)σωματίδια μετάλλων και ίνες άνθρακα/γυαλιού) προκειμένου να ενσωματώσουν λειτουργικά εξαρτήματα (όπως π.χ. αισθητήρες, ενεργοποιητές, μπαταρίες, αισθητήρες τάσης, κεραίες, ηλεκτρόδια κ.α.) σε λειτουργικές διατάξεις. [17]

Τα αντικείμενα που δημιουργούνται με εκτύπωση εναπόθεσης υλικού ξεκινούν ως ένα ψηφιακό αρχείο CAD που δημιουργείται σε κάποιο πρόγραμμα ψηφιακού σχεδιασμού. Προκειμένου να εκτυπωθεί η επιθυμητή γεωμετρία πρέπει πρώτα να μετατραπεί το αρχείο σε μορφή τέτοια που να μπορεί ο τριδιάστατος εκτυπωτής να το εκτυπώσει. Τέτοιες μορφές αρχείων, συνήθως είναι τα αρχεία *STL*. Κατά τη διάρκεια εκτύπωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός από το υλικό εκτύπωσης και ένα ακόμα υλικό το οποίο λειτουργεί ως βάση και υποστήριξη του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Κατά την διαδικασία της τριδιάστατης εκτύπωσης τα συγκεκριμένα υλικά τροφοδοτούνται στον εκτυπωτή με έναν μηχανισμό ώθησης (*extruder*) ο οποίος σπρώχνει το υλικό μέσω ενός ακροφύσιου. Όταν το υλικό φθάνει στο ακροφύσιο τήκεται, ενώ παράλληλα η πλατφόρμα ελέγχεται σε συντεταγμένες στον χώρο **X**, **Y** και **Z** τις οποίες ακολουθεί και το ακροφύσιο μαζί καθώς από εκεί εξωθείται το υλικό για την εκτύπωση. Στη συνέχεια, αυτή η λεπτή στρώση πλαστικού ψύχεται και σκληραίνει αμέσως μετά την εναπόθεσή και είναι έτοιμη ώστε να δεχθεί την αμέσως επόμενη στρώση. Όταν ολοκληρώνεται μια στρώση από τη

διατομή του αντικειμένου, η κεφαλή εκτύπωσης μετακινείται προς τα πάνω ώστε να αφήσει ελεύθερο χώρο για την επόμενη στρώση που πρόκειται να εκτυπωθεί. Όταν το αντικείμενο εκτυπωθεί και εξέλθει από το μηχάνημα της τριδιάστατης εκτύπωσης, το υλικό υποστήριξης αφαιρείται είτε από το χρήστη είτε μέσω εμβάπτισης του αντικειμένου μέσα σε κατάλληλο διαλύτη (π.χ. νερό) ο οποίος απομακρύνει τα υποστηρίγματα.



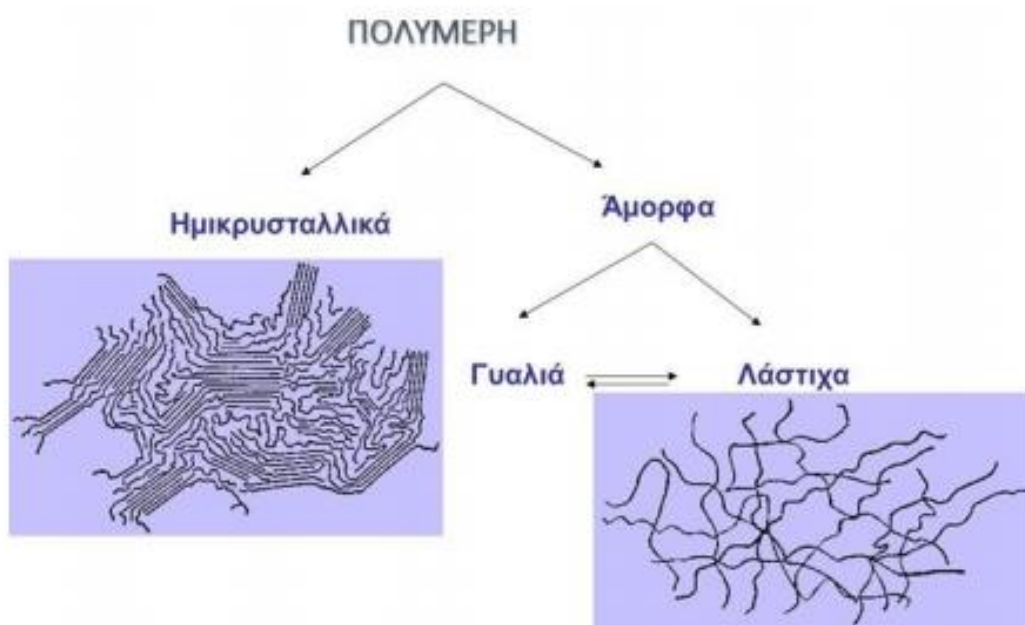
Εικόνα 8: Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας εναπόθεσης υλικού για τον σχηματισμό τριδιάστατης δομής διπλής κεφαλής [15]

2.4 Πολυμερή

Πολυμερή ονομάζονται οι χημικές ενώσεις με μεγάλα μόρια, τα λεγόμενα μακρομόρια, που σχηματίζονται από τη σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων, που λέγονται "μονομερή". Τα πολυμερή προκύπτουν από τη χημική αντίδραση των μονομερών, που ονομάζεται πολυμερισμός. Όμως δεν είναι όλα τα μακρομόρια πολυμερή, επειδή δεν αποτελούνται όλα τους από όμοια μόρια π.χ. τα λιπίδια. Τα πολυμερή διακρίνονται εκ της προέλευσής τους σε "φυσικά πολυμερή" και "συνθετικά πολυμερή". Τέτοια φυσικά πολυμερή είναι για παράδειγμα το DNA, το καουτσούκ, το άμυλο, η κυτταρίνη, οι

πρωτεΐνες κ.λπ., ενώ συνθετικά πολυμερή είναι τα πλαστικά, οι εκρηκτικές ύλες, οι λευκαντικές ουσίες, τα σαπούνια κ.λπ. [18]

Η δομή ενός πολυμερούς καθορίζεται από τη χημική δομή του, η οποία αποτελείται από τη σύσταση και τη στερεοταξική διεύθυνση και δεύτερον από τη φυσική δομή η οποία αποτελείται από τον προσανατολισμό και την κρυσταλλικότητα. Συνήθως τα πολυμερή είναι τελείως άμορφα ή μερικώς κρυσταλλικά σε στερεά κατάσταση. Κατά την κρυστάλλωση του πολυμερούς από το τήγμα του, οι κρύσταλλοι αναπτύσσονται από το κέντρο προς τα έξω έως ότου συναντηθούν με γειτονικούς διαφορετικού μεγέθους και να απλωθούν σε όλο τον όγκο του κρυσταλλικού υλικού. [18]



Εικόνα 9: Ημικρυσταλλική και άμορφη φάση πολυμερών [18]

2.4.1 Κατάταξη των πολυμερών με βάση τις μηχανοθερμικές ιδιότητες τους

Θερμοπλαστικά (thermoplastics): αποτελούνται από γραμμικά κυρίως μακρομόρια που με τη επιβολή θερμοκρασίας μαλακώνουν και ρέουν (χαλάρωση δευτερογενών δεσμών) και αφού μορφοποιηθούν, ψύχονται και στερεοποιούνται. Κατά τη θέρμανση τους, τα μακρομόρια χάνουν τη συνοχή τους και μπορούν να ολισθαίνουν μεταξύ τους, πράγμα που κάνει το πολυμερές εύπλαστο. Στην κατάσταση αυτή μπορούν να διατηρηθούν όσο εφαρμόζεται θερμοκρασία. Τα θερμοπλαστικά είναι ευαίσθητα στους διαλύτες και τη θερμοκρασία.

Θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings): εν αντιθέσει με τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα αποτελούνται από μη γραμμικούς δεσμούς μικρών μακρομορίων. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία δεν είναι αντιστρεπτή. Αποτελείται από προϊόντα που είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και δεν επιδέχονται διαμόρφωση με την εφαρμογή επιπλέον θέρμανσης ή πίεσης.

Ελαστομερή (elastomers): τα πολυμερή αυτά έχουν την ιδιότητα να επιδέχονται κατά τον εφελκυσμό πολύ μεγάλη επιμήκυνση και ταχύτατη πλήρη επαναφορά όταν αποφορτίζονται, είναι δηλαδή υπερελαστικά (π.χ. σιλικόνη, καουτσούκ). Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος. [19]

Όπως είναι φανερό, τα πολυμερή παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των προϊόντων που καλύπτουν καθημερινές ανάγκες. Αυτό οφείλεται στο ότι μπορούμε μέσω των παραπάνω μεθόδων να δημιουργήσουμε προϊόντα με σαφή έλεγχο των ιδιοτήτων τους χωρίς υψηλό κόστος.

Κεφάλαιο 3

3.1 Έξυπνα Υλικά – Smart Materials

Η 4D εκτύπωση χρησιμοποιεί κυρίως τεχνικές προσθετικής κατασκευής σε συνδυασμό με έξυπνα υλικά. Έξυπνα υλικά, ορίζονται τα υλικά που υπόκεινται σε αλλαγές στο σχήμα, και μερικές φορές στη λειτουργικότητα, κάτω από κατάλληλα εξωτερικά ερεθίσματα, όπως η θερμοκρασία, ο διαλύτης, το pH, η μαγνήτιση και το φως. [20] Μέσω αυτής της συνέργειας, η εκτύπωση 4D επιτρέπει την κατασκευή δυναμικών και προσαρμοστικών τμημάτων / εξαρτημάτων σε αντίθεση με τα ανενεργά που προκύπτουν από την εκτύπωση 3D. Τα έξυπνα υλικά είναι σε θέση να ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα ακολουθώντας εξωτερικά ερεθίσματα. Τα κράματα μετάλλων και τα πολυμερή είναι τα πιο δημοφιλή από αυτά τα υλικά και έχουν τραβήξει την προσοχή των ερευνητών. Σε σύγκριση με τα μέταλλα, τα πολυμερή μνήμης σχήματος (**Shape Memory Polymers-SMPs**) παρουσιάζουν περισσότερα πλεονεκτήματα εξαιτίας των ευρύτερων δυνατοτήτων τους, με το να συντονίζουν τις ιδιότητές τους, αλλάζοντας για παράδειγμα, το μοριακό τους βάρος. [21]

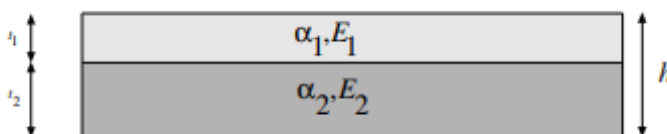
3.2 Πολυμερή σχήματος-μνήμης – Shape Memory Polymers (SMPs)

Τα πολυμερή μνήμης σχήματος, είναι ελαστομερή στα οποία όταν τους επιβάλλεται μια θερμοκρασία παραμορφώνονται από το σχήμα ισορροπίας τους. Ωστόσο, σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έχουν την ικανότητα να διατηρούν το παραμορφωμένο σχήμα τους. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, βρίσκονται πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) της ελαστομερικής φάσης τους έτσι ώστε να διατηρούν το παραμορφωμένο σχήμα τους για μεγάλο χρονικό διάστημα έως ότου η μνήμη ενεργοποιηθεί με θέρμανση. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης πρέπει να είναι σχετικά πάνω από οποιεσδήποτε πιθανές θερμοκρασίες λειτουργίας/περιβάλλοντος, αν και συνήθως σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, η ελαστομερική συμπεριφορά μπορεί να ενεργοποιηθεί χρησιμοποιώντας ήπια θέρμανση, π.χ. μέσω ζεστού νερού, πιστόλι θερμού αέρα και άλλες φορητές συσκευές θέρμανσης. Όταν θερμαίνονται στην ελαστομερή κατάσταση, τα υλικά μνήμης σχήματος θα πρέπει να έχουν πραγματική ελαστομερική συμπεριφορά, δηλαδή θα πρέπει να έχουν ταχείες και αναστρέψιμες παραμορφώσεις χωρίς ερπυσμό, καθώς απαιτείται άμεση επιστροφή στο αρχικό σχήμα. [22,23] Οι πολυουρεθάνες είναι κοινά υλικά μνήμης σχήματος επειδή παρουσιάζουν ελαστομερικές ιδιότητες σε θερμοκρασίες που ελέγχονται από τη δομή και η χαρακτηριστική δέσμευση

υδρογόνου παρέχει συγκράτηση στη διαμόρφωση και τις μοριακές κινήσεις των υλικών. Η απόκριση της μνήμης σχήματος μπορεί να ενεργοποιηθεί ηλεκτρικά αντί της εφαρμογής μιας μηχανικής δύναμης. [24] Οι παράμετροι αλληλεπίδρασης μεταξύ των σκληρών και των μαλακών φάσεων και οι διαφορές στις θερμοκρασίες υαλώδους μετάπτωσης απέδειξαν πως ισχυρότερες αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μεταξύ πολυεστέρα-πολυουρεθάνης σε σχέση με την πολυαιθερική πολυουρεθάνη. Η διαφάνεια που χαρακτηρίζει τον πολυεστέρα-πολυουρεθάνη οφείλεται σε μικρότερα διασκορπισμένα σωματίδια σκληρής φάσης που δίνουν υψηλότερη φυσική πυκνότητα σταυροδεσμών και εργοσκλήρυνση. [25]

3.3 Κάμψη (Bending)

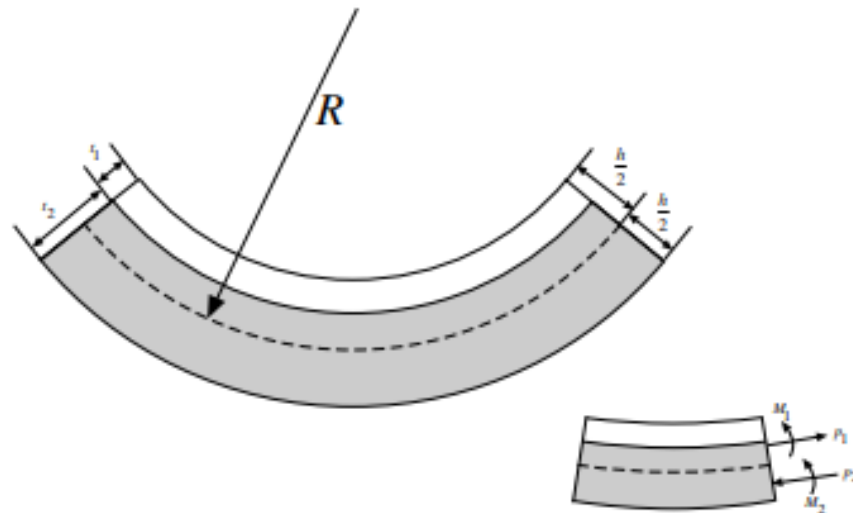
Όταν δύο στρώματα αναπτύσσονται άνισα, αλλά ενώνονται μεταξύ τους, υπάρχει μια φυσική τάση για κάμψη του σύνθετου υλικού. Στην ανάλυση αυτή θεωρείται ότι τα δύο στρώματα συμπεριφέρονται σαν δοκάρια, τα οποία έχουν την ικανότητα να παραμορφώνονται αξονικά και να κάμπτονται, χωρίς να δημιουργείται ολίσθηση μεταξύ των δύο επιφανειών. Μια τυπική διαμόρφωση φαίνεται παρακάτω, όπου h , E και a είναι το πάχος, το μέτρο ελαστικότητας και ο συντελεστής θερμικής διαστολής, αντίστοιχα.



Εικόνα 10: Δύο συνδεδεμένα στρώματα με διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες.

Εάν $\alpha_2 > \alpha_1$, τότε με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται τάνυση του κάτω στρώματος περισσότερο από το ανώτερο στρώμα. Επειδή τα δύο στρώματα δεν μπορούν να κινηθούν το ένα ως προς το άλλο στη διεπαφή, ολόκληρη η δομή θα κάμπτεται όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Η ισορροπία των δυνάμεων αποδίδεται:

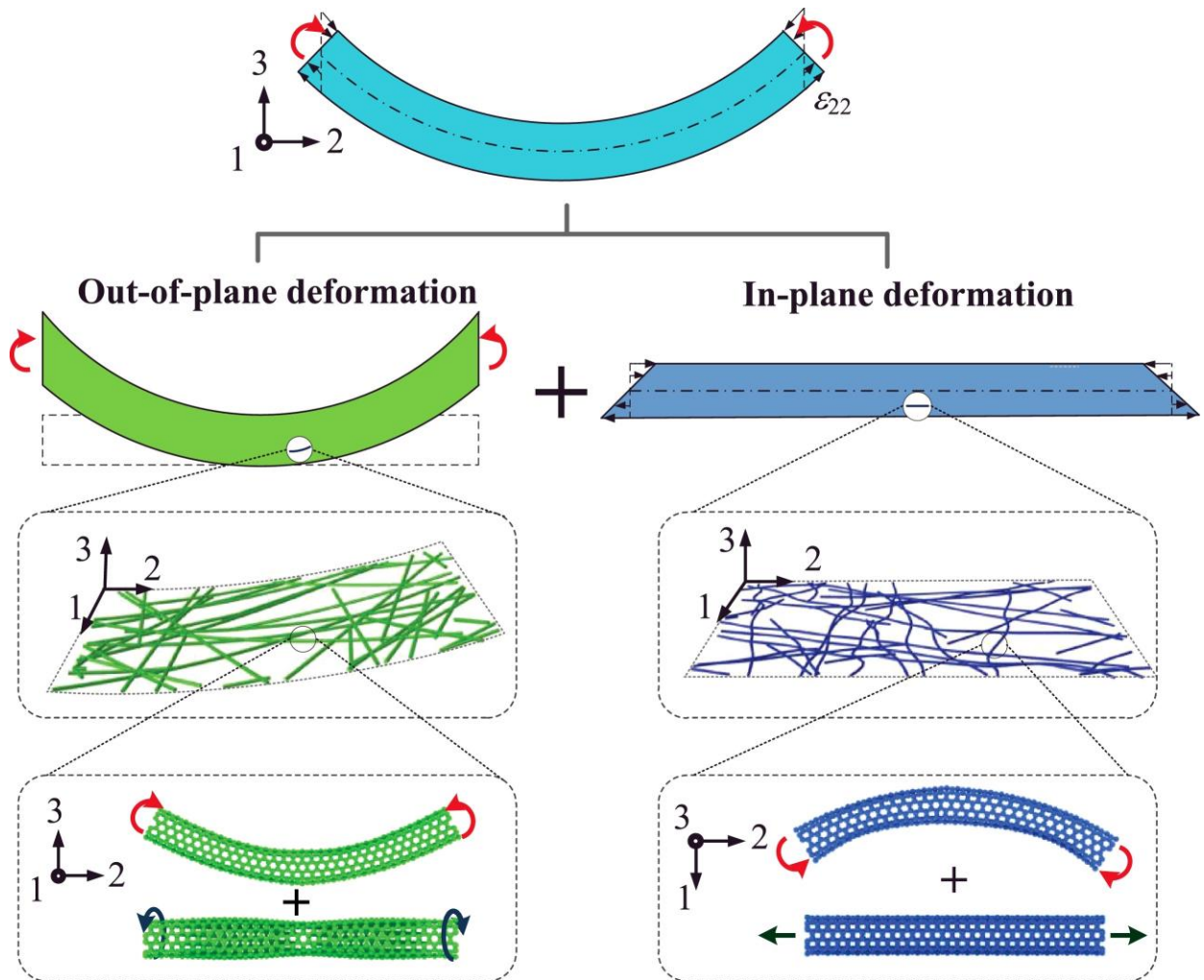
$$P_1 = P_2 = P$$



Εικόνα 11: Ενωμένα στρώματα με διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες τείνουν να κάμπτονται λόγω της διαφορετικής απόκρισης στη θερμοκρασία. [26]

Καθαρή κάμψη

Κατά την ανάλυση των δοκών, είναι συχνά απαραίτητο να γίνει διάκριση ανάμεσα στην καθαρή κάμψη και την μη ομοιόμορφη κάμψη. Η καθαρή κάμψη αναφέρεται στην κάμψη μιας δοκού κάτω από μια σταθερή ροπή κάμψης. Επομένως, η καθαρή κάμψη εμφανίζεται μόνο σε περιοχές όπου η δύναμη διάτμησης είναι μηδέν (επειδή $V = dM / dx$). Αυτός ο τύπος κάμψης μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: την παράπλευρη παραμόρφωση (*out of plane*) και την κάμψη στο επίπεδο (*in plane bending*) όπως βλέπουμε στην εικόνα 12.



Εικόνα 12: Συμπεριφορά κάμψης στην παράπλευρη και στην επίπεδη παραμόρφωση [27]

Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να προκληθούν αλλαγές στην καμπυλότητα και τη γωνία στρέψης του δοκιμίου, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η κάμψη που παρατηρείται προκαλεί την τάνυση και συστολή του δοκιμίου. Η ενέργεια παραμόρφωσης αποτελείται από δύο μέρη: α) την ενέργεια που προκαλείται από την παραμόρφωση εκτός επιπέδου και β) την ενέργεια που προκαλείται στο επίπεδο. Για ισοτροπικά υλικά, είναι εύλογο να υποθέσουμε πως το σύστημα είναι γραμμικό ελαστικό και οι ενέργειες είναι ανεξάρτητες, επομένως, η συνολική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

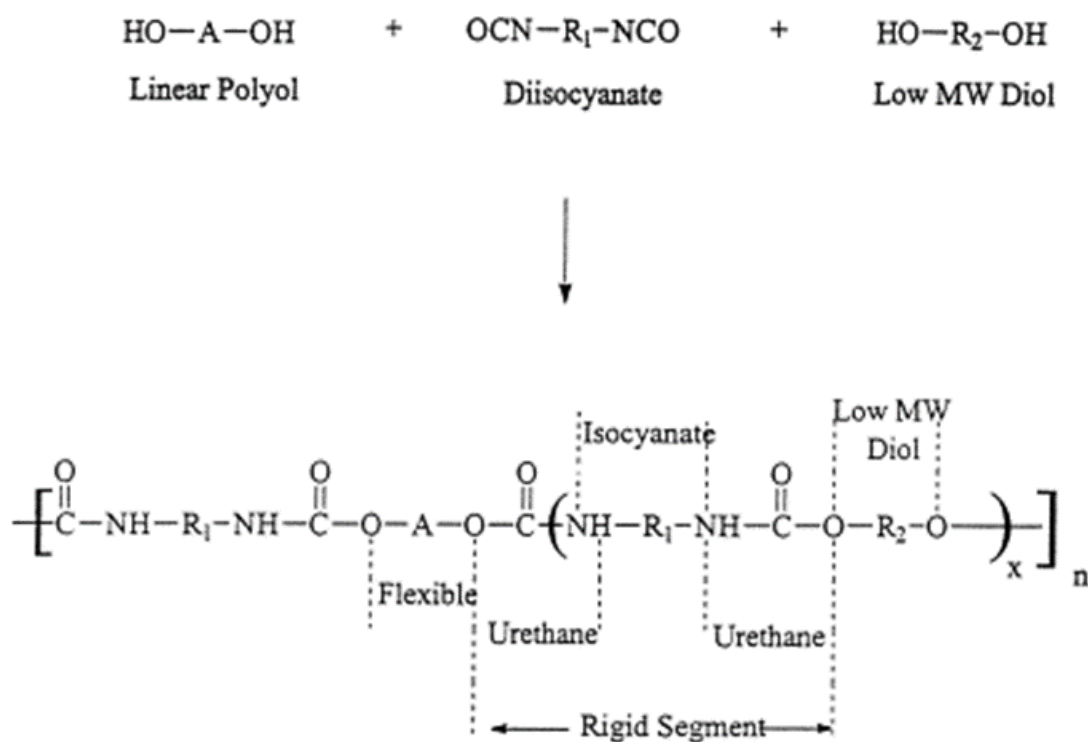
$$U_N = U_N^{out} + U_N^{in}$$

3.4 Πολυμερή που επιλέχθηκαν για το πειραματικό μέρος

3.4.1 Πολυμερή πολυουρεθάνης - Polyurethanes (PUs)

Οι πολυουρεθάνες είναι τα πιο γνωστά πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αφρών. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των πολυουρεθάνων

είναι συνήθως πολυισοκυανικά, πολυόλες, διαμίνες, καταλύτες, πρόσθετα και ορισμένοι παράγοντες δέσμευσης. Ο σχηματισμός τους γίνεται με την αντίδραση ενός διισοκυανικού εστέρα και μιας διόλης με εστερικό ή αιθερικό σκελετό παρουσία καταλυτών. Οι PU που βασίζονται σε αιθέρα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εύκαμπτων και άκαμπτων αφρών, ενώ οι PU που έχουν βάση τους εστέρες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ελαστομερών, εύκαμπτων αφρών και επικαλύψεων. Η δομή των πολυμερών αυτών επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις διαμοριακές δυνάμεις, όπως για παράδειγμα η δέσμευση με υδρογόνο, η πολικότητα, οι δυνάμεις Van der Waals, η ακαμψία της αλυσίδας και οι δεσμοί πλέγματος (σταυροδεσμοί, διασυνδέσεις). Μπορεί να υπάρχουν κρυσταλλικές περιοχές μεταξύ εύκαμπτων αλυσίδων. Τα πολυμερή παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή στη διάβρωση σε ισχυρά οξέα, αλκάλια, και σε οργανικούς διαλύτες. Ορισμένες εφαρμογές των PUs είναι σόλες υποδημάτων, πίνακες, καλύμματα προφυλακτήρων, καλούπια και φτερά στην αυτοκινητοβιομηχανία. [28,29]



Εικόνα 13: Σύνθεση ελαστομερών πολυουρεθάνης [30]

Οι θερμοπλαστικές πολυουρεθάνες (TPU's) είναι μια ομάδα πολυμερών στις οποίες παρατηρούνται καλές μηχανικές και ελαστικές ιδιότητες. Συνήθως, παρουσιάζουν μια μικροδομή δύο φάσεων, η οποία προκύπτει από τη χημική ασυμβατότητα μεταξύ των μαλακών και των σκληρών τμημάτων των πολυμερικών αλυσίδων. Το σκληρό άκαμπτο τμήμα διαχωρίζεται σε ένα υαλώδες ή ημικρυσταλλικό πεδίο και τα μαλακά τμήματα

πολυόλης σχηματίζουν άμορφες ή ελαστικές μήτρες, στις οποίες διασκορπίζονται τα σκληρά τμήματα. [31] Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τον διαχωρισμό των φάσεων, όπως το μοριακό βάρος, η κρυσταλλικότητα του άκαμπτου τμήματος, η συνολική σύνθεση και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διατομών. [32]



Εικόνα 14: Νήμα θερμοπλαστικής πολυουρεθάνης- PolyFlex TPU95 [33]

3.4.2 Δομή και ιδιότητες θερμοπλαστικών ελαστομερών

Τα θερμοπλαστικά ελαστομερή (TPE) είναι συνθετικές ενώσεις που συνδυάζουν μερικές από τις ιδιότητες του καουτσούκ με τα πλεονεκτήματα κατεργασίας των θερμοπλαστικών. Γενικά, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες: **1)** συμπολυμερή πολλαπλών συστάδων και **2)** μείγματα. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από συμπολυμερή από μαλακά ελαστομερή και σκληρά θερμοπλαστικά τεμάχια, όπως συμπολυμερή στυρενίου (SBCs), συμπολυμερή κατά συστάδες πολυαμιδίου - ελαστομερούς (COPA), συμπολυμερή κατά συστάδες πολυαιθερικού εστέρα-ελαστομερούς (COPEs) και συμπολυμερή κατά συστάδες πολυουρεθάνης- ελαστομερούς (TPUs) . Τα μείγματα TPE μπορούν να χωριστούν σε μείγματα πολυολεφίνης (TPOs) και δυναμικά βουλκανισμένα μείγματα (TPVs).

Ιδιότητες	Τριδιάστατη εκτύπωση	Μέθοδοι
Μέτρο εφελκυσμού	26.0 MPa	ASTM D638
Αντοχή εφελκυσμού	8.6 MPa	ASTM D638
Θερμική απόκλιση-Heat deflection (HDT) στα 0.455 MPa	74°C	ASTM D648

Θερμική απόκλιση (HDT) στα 1.82 MPa	49°C	ASTM D648
Θερμοκρασία υαλώδης μετάπτωσης	-24°C	DSC
Συντελεστής θερμικής διαστολής	$100 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	ASTM E693
Θερμοκρασία τήξης	220°C	DSC

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες του νήματος TPU που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος [34]

3.4.3 Συμπολυμερές τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με γλυκόλη - PETG

Το συμπολυμερές τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου με γλυκόλη έχει κατά βάση την ίδια χημική σύσταση με το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), με την προσθήκη γλυκόλης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου πλαστικού με μεγάλη αντοχή σε κρούση και ελαστική απορρόφηση υγρασίας.[35]

Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), είναι συμπολυμερές που προκύπτει με πολυσυμπύκνωση τερεφθαλικού οξέος με 1,2- αιθανοδιόλη (άκυκλη, κορεσμένη, δισθενής αλκοόλη), έχει μοριακό τύπο: $\text{H}-[\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4]_n-\text{60}-120 \text{ OH}$, και ανήκει στην κατηγορία των πολυεστέρων. Η σπουδαιότητα των πολυεστέρων οφείλεται στις εξαιρετικές μηχανικές και χημικές τους ιδιότητες, στην απλότητα της χημικής διεργασίας της σύνθεσής τους, στην δυνατότητα παραγωγής σε κλειστό βρόγχο (χαμηλές εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον), η ανακυκλωσιμότητά του, το χαμηλό επίπεδο τοξικότητας των πρώτων υλών αλλά και των παραπροϊόντων κατά τη διάρκεια της παρασκευής του πολυεστέρα και η ευρεία χρήση του σε πολλές εφαρμογές. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται σε μπουκάλια νερού, συσκευασίες τροφίμων και σε πολλά άλλα κοινά πλαστικά αντικείμενα. Ως νήμα 3D εκτύπωσης, το πλαστικό PETG αποτελεί ένα ανθεκτικό υλικό που είναι εύκολο στη χρήση καθώς αποτελεί συνδυασμό των πιο χρήσιμων χαρακτηριστικών του νήματος ABS (την ακαμψία και τις μηχανικές ιδιότητες για λειτουργικά μέρη) με την ευκολία εκτύπωσης που προσφέρει το νήμα PLA. [36,37]

Οι ενδεικτικές παράμετροι εκτύπωσης αναγράφονται παρακάτω:

- **Θερμοκρασία εξώθησης** : το PETG εκτυπώνεται συνήθως στους 220-250 °C. Καθώς το υλικό αυτό μπορεί να τυπωθεί και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 235 °C, υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε ακροφύσιο, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων με εσωτερικό σωλήνα PTFE – Teflon.
- **Επιφάνεια εκτύπωσης** : είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται ένα ζεστό υπόστρωμα για την εκτύπωση του PETG. Η ιδανική θερμοκρασία της επιφάνειας αυτής είναι μεταξύ 60 και 90 °C.
- **Ανεμιστήρας στρώσεων** : για τη βέλτιστη ποιότητα της εκτύπωσης, συνίσταται η χρήση ανεμιστήρα στρώσεων κατά την εκτύπωση.
- **Κάμψη (Warping)** : το PETG έχει μειωμένη θερμική συστολή, οπότε δεν είναι επιρρεπές στη στρέβλωση. Η κάμψη μπορεί να εμφανιστεί σε μεγαλύτερα τμήματα του δοκιμίου. [38]

Μηχανικές ιδιότητες	Τριδιάστατη εκτύπωση	Μέθοδοι
Μέτρο εφελκυσμού	2,1 GPa	ASTM D638
Αντοχή εφελκυσμού	53 MPa	ASTM D638
Θερμική απόκλιση- Heat Deflection (HDT)	73°C	ASTM D648
Θερμοκρασία Υαλώδης μετάπτωσης	82°C	DSC
Συντελεστής θερμικής διαστολής	$68 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	ASTM E693

Πίνακας 2: Πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων PETG [39]

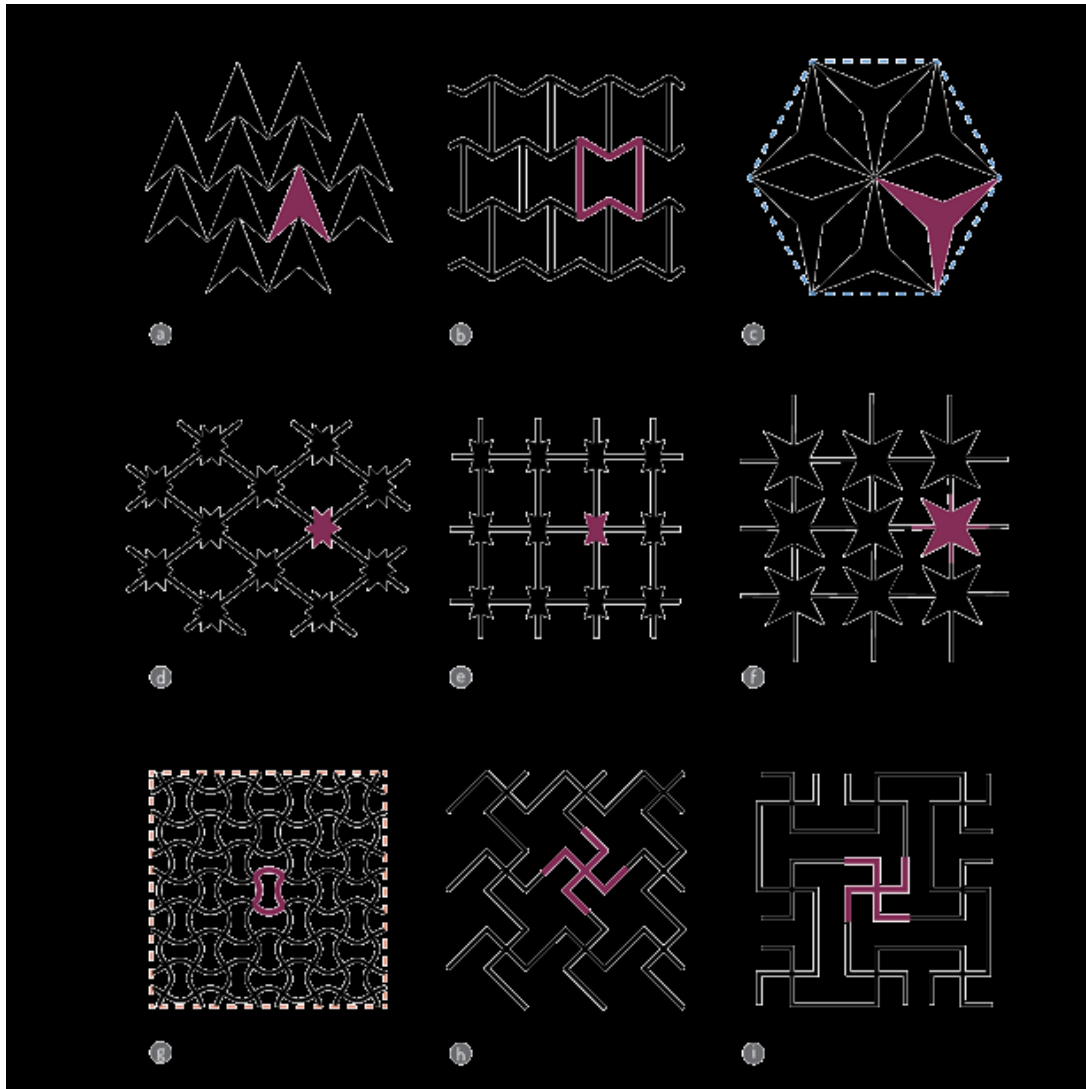
Κεφάλαιο 4

4.1 Αυξητικά Υλικά/Δομές – Auxetic Materials/Structures

Τα αυξητικά υλικά είναι υλικά που έχουν αρνητικό λόγο Poisson (αντίστοιχα και δομές). Όταν τανυστούν, αυξάνεται η διατομή κάθετα στην εφαρμοζόμενη δύναμη. Αυτό συμβαίνει λόγω των αρθρωτών τους δομών, οι οποίες κάμπτονται όταν τεντώνονται. Οι κυψελωτές δομές με επαναλαμβανόμενες κυψέλες επανεισόδου είναι ένα κοινό

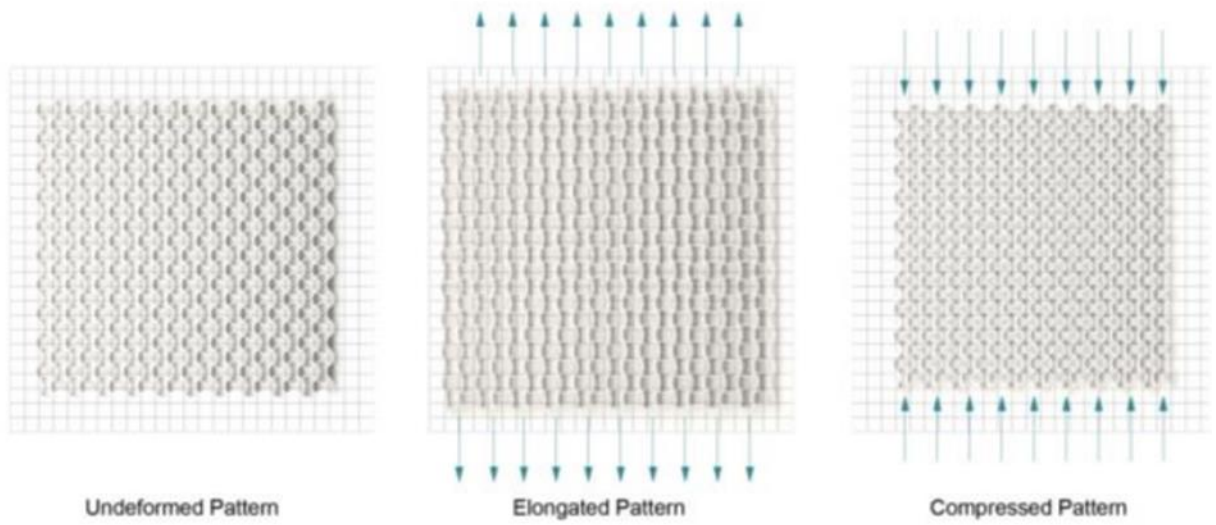
παράδειγμα των αυξητικών δομών. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι μεμονωμένα μόρια ή μια συγκεκριμένη δομή μακροσκοπικής ύλης. Τέτοια υλικά αναμένεται να έχουν μηχανικές ιδιότητες όπως υψηλή απορρόφηση ενέργειας και αντοχή στη θραύση. Έχουν εφαρμογές σε διάφορα είδη όπως προστατευτικός ρουχισμός, υλικό για συσκευασίες, επιδέσμους γόνατος και αγκώνα, ισχυρό υλικό απορρόφησης κραδασμών αλλά και απορροφητικά σφουγγαράκια. [40]

Τα Auxetic υλικά μπορούν να θεωρηθούν ως μετα-υλικά, τα οποία είναι υλικά που έχουν κατασκευαστεί τεχνητά για να αποκτήσουν αναδυόμενες ιδιότητες και λειτουργίες που διαφορετικά δεν είναι εφικτές σε φυσικά υλικά. Οι επιδόσεις και η συμπεριφορά τους έχουν άμεση συνέπεια με τον σχεδιασμό της εγγενούς και συγκεκριμένης χωρικής τους διάταξης, και όχι την υλική σύνθεση, επομένως οργανώνονται σε πρότυπα δομημένα με ακριβές σχήμα, γεωμετρία, μέγεθος και προσανατολισμό. [40] Τα αυξητικά υλικά έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε θραύσεις σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά, καθώς η διάδοση της ρωγμής είναι χαμηλότερη σε υλικά με αρνητικό λόγο Poisson. Επιπλέον, τα υλικά αυτά εκτείνονται τόσο πλευρικά όσο και διαμήκως, οπότε αν υπάρχει ρωγμή στο υλικό, τα αυξητικά υλικά τείνουν να κλείσουν τη ρωγμή μόλις βρεθούν κάτω από ένα εφαρμοζόμενο φορτίο. [41]

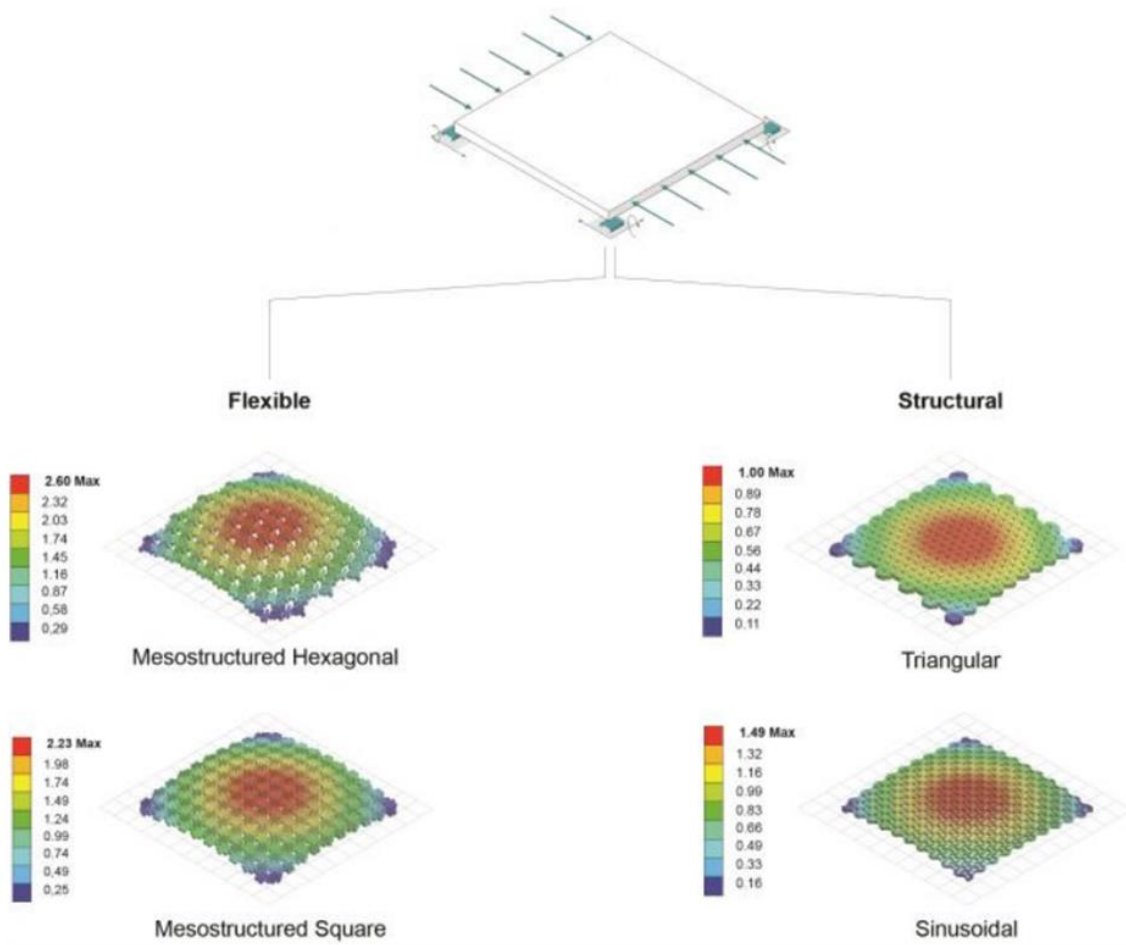


Εικόνα 15: **a)** δομή κεφαλής βέλους, **b)** 2D επαναλαμβανόμενη κυψελοειδής δομή, **c)** εξαγωνική επαναλαμβανόμενη κυψελώδη δομή, **d,e,f)** διασυνδεδεμένα αστερία, **g)** ημιτονοειδές πλέγμα, **h)** παστίλια και **i)** τετραγωνικά πλέγματα [41]

Σήμερα οι δομές αυτές είναι αρκετά γνωστές από τους ερευνητές και τους επιστήμονες, ωστόσο η συνεχής ενασχόληση και έρευνα είναι αναγκαία προκειμένου να κατανοήσει κανείς το τρόπο συμπεριφοράς αυτών των υλικών. Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα βασικά μοτίβα σε ισοτροπικά ή ανισότροπα αυξητικά. Τα ισοτροπικά μοντέλα περιλαμβάνουν: ημιτονοειδή, μεσοστρωματικά, τετραγωνικά και εξαγωνικά τριγωνικά, ενώ τα ανισότροπα μοτίβα είναι τα εξής: Εξάγωνο, chiral τριγωνικό και τετράγωνο. Πιο συγκεκριμένα, το ημιτονοειδές σχέδιο έχει μια τυπική αμφίδρομη γεωμετρία η οποία παράγει μια τέλεια ισότροπη συμπεριφορά (Εικόνα 16) σε αντίθεση με άλλα δείγματα που έχουν δείξει διαφορετικούς βαθμούς ανισοτροπικής συμπεριφοράς. [42]



Εικόνα 16: Επιμήκυνση και δοκιμή συμπίεσης σε ημιτονοειδή μοτίβα [42]



Εικόνα 17: Συμπεριφορά κάμψης διαφορετικών σχημάτων και σύγκριση της παραμόρφωσής τους. [42]

4.2 Ο νόμος του Hooke

Προκειμένου να υπάρξει μια ακριβέστερη περιγραφή για την τροποποίηση που υφίσταται το υλικό λόγω της αυξητικής γεωμετρίας η οποία υπόκειται σε ένα πεδίο δυνάμεων, πρέπει να ληφθούν υπόψιν πολλοί άλλοι παράγοντες φυσικής ποσότητας. Ο νόμος του Hooke ή νόμος της ελαστικότητας περιγράφει την ελαστικότητα ενός υλικού ή συστήματος, όταν αυτό παραμορφώνεται με την επίδραση εξωτερικής δύναμης. Σύμφωνα με τον νόμο αυτόν, το αποτέλεσμα (παραμόρφωση) είναι ανάλογο με το αίτιο (δύναμη). Ο νόμος αυτός ισχύει σε ορισμένη περιοχή παραμορφώσεων ή δυνάμεων που ασκούνται στο σώμα. Με εφαρμογή του νόμου σε ελατήριο, προκύπτει ότι η παραμόρφωση του ελατηρίου (x) (αλλαγή μήκους $= x$) είναι ανάλογη με τη δύναμη (F) που δέχεται το ελατήριο. Η μαθηματική σχέση είναι $F = K * x$, όπου F η δύναμη που δέχεται το ελατήριο, x η αλλαγή του μήκους του (επιμήκυνση ή συσπίρωση) και K μια σταθερά, χαρακτηριστική για κάθε ελατήριο, που ονομάζεται σταθερά ή σκληρότητα του ελατηρίου. Ο νόμος αυτός είναι η βάση για τους νόμους που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση υλικών με αρνητικό συντελεστή Poisson.

$$G = E/[2(1+V)]$$

$$K = E/[3(1 - 2V)] \quad [43]$$

όπου ν ο λόγος Poisson, E μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young, G συντελεστής διάτμησης και K το μέτρο συμπίεσης θα εξηγηθούν παρακάτω. Για ισοτροπικά υλικά, οι τέσσερις σταθερές (ν , E , G , K) δεν είναι ανεξάρτητες. [44]

4.3 Ο λόγος Poisson και η επίδρασή του στην καμπυλότητα

Η συμπεριφορά κάμψης που έχουν οι κυψελώδεις δομές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μακροσκοπική αναλογία Poisson του σχεδίου. Αρχικά χρησιμοποιούμε τον λόγο Poisson για γραμμικά ισότροπα υλικά και το συμβολίζουμε με το γράμμα ν . η αναλογία Poisson ν είναι μια ελαστική σταθερά που ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της πλευρικής συστολής και της επιμήκυνσης στην μονοαξονική επέκταση ενός ομογενούς ισοτροπικού σώματος και εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{εγκάρσια}}{\varepsilon_{διαμήκη}}$$

Από τον τύπο συμπεραίνουμε πως όταν το ν πλησιάζει το -1 , το όριο δηλαδή για τα ανισότροπα υλικά, ο συντελεστής διάτμησης θα γίνει απείρως μεγάλος. Οι παραμορφώσεις εφελκυσμού θεωρούνται θετικές ενώ οι παραμορφώσεις συμπίεσης είναι αρνητικές. Ο ορισμός του λόγου Poisson έχει μείον μπροστά έτσι ώστε τα κανονικά υλικά να έχουν μια θετική αναλογία. Πρόκειται για έναν καθαρό αδιάστατο αριθμό δεδομένου ότι είναι ο λόγος δύο ποσοτήτων οι οποίες είναι αδιάστατες. Το θεωρητικό όριο του λόγου Poisson για ισοτροπικά υλικά είναι $-1 < \nu < 0.5$. Αυτό οφείλεται στη θεμελιώδη υπόθεση ότι η συνάρτηση της πυκνότητας ενέργειας ανά μονάδα όγκου για ένα γραμμικό ελαστικό στερεό ψ πρέπει να αυξάνεται αυστηρά για όλες τις πιθανές παραμορφώσεις, δηλαδή $\psi \geq 0$. [45] Αυτή η ποσότητα είναι συνάρτηση των ελαστικών σταθερών και παραμορφώσεων. Για ισοτροπικό υλικό οι ελαστικές σταθερές (μέτρο ελαστικότητας E του Young, αναλογία Poisson ν , συντελεστής διάτμησης G και το μέτρο συμπίεσης K) είναι γραμμικά εξαρτώμενα το ένα από το άλλο. Μια τέτοια σχέση που συσχετίζει το μέτρο συμπίεσης με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson είναι η εξής:

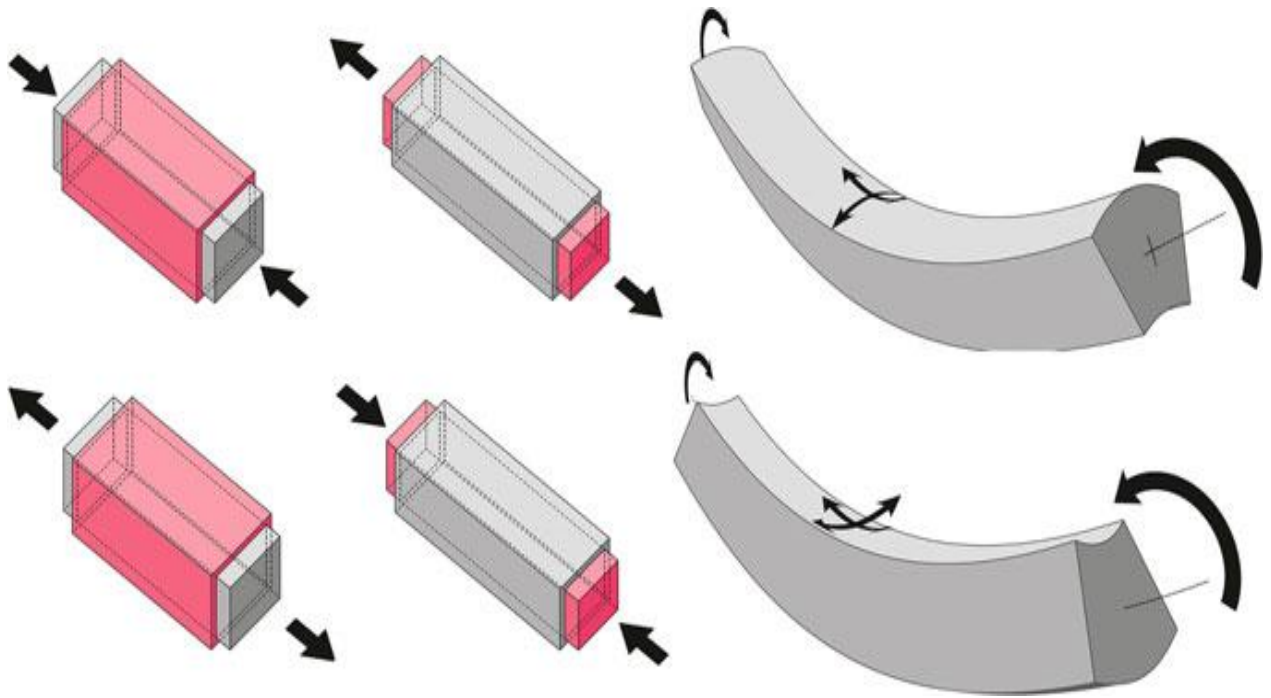
$$K(G, \nu) = \frac{2G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} > 0$$

Μία άλλη σημαντική σχέση είναι αυτή που συνδέει το μέτρο διάτμησης με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson:

$$G(K, \nu) = \frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} > 0$$

Για να ικανοποιήσουμε και τους δύο αυτούς περιορισμούς και για να εξασφαλίσουμε ότι το μέτρο διάτμησης G και το μέτρο συμπίεσης K είναι οριοθετημένα, ο περιορισμός $-1 < \nu < 0.5$ πρέπει να τοποθετηθεί στις τιμές του λόγου Poisson. Σχεδόν όλα τα συνηθισμένα υλικά, ειδικά εκείνα που χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευαστική βιομηχανία, έχουν θετική αναλογία Poisson, δηλαδή γίνονται στενότερα σε εγκάρσια τομή όταν τεντώνονται (εικόνα 16). Ο λόγος αυτής της συμπεριφοράς είναι ότι τα περισσότερα υλικά αντιστέκονται σε μια μεταβολή όγκου, που καθορίζεται από το συντελεστή συμπίεσης K , περισσότερο από ότι αντιστέκονται σε μια αλλαγή σχήματος, η οποία καθορίζεται από το συντελεστή διάτμησης G λόγω της επίδρασης του Poisson, όταν ένα υλικό συμπιέζεται σε

μια κατεύθυνση, θα επεκταθεί στις άλλες δύο κατευθύνσεις κάθετα προς εκείνη της συμπίεσης. Η τιμή του λόγου Poisson καθορίζει το πόσο θα επεκταθεί στην εγκάρσια κατεύθυνση. Από την άλλη μεριά, αν το υλικό είναι τεντωμένο παρά συμπιεσμένο, θα συρρικνωθεί στις κατευθύνσεις εγκάρσια προς την κατεύθυνση της τάνυσης. Ως εκ τούτου, η κάμψη θα επηρεαστεί άμεσα από τη διπλή ύπαρξη της επίδρασης Poisson για εντατικές και συμπιεστικές ενέργειες.



Εικόνα 18: Επίδραση του Poisson για συμβατικά υλικά. αυξητικά υλικά με αρνητικά αποτελέσματα. Η αναλογία Poisson εμφανίζει το αντίθετο αποτέλεσμα των συμβατικών υλικών. [46]

Λαμβάνοντας υπόψη μια ομοιογενή δοκό κατασκευασμένη από ισότροπο υλικό που υφίσταται κάμψη, η διατομή θα παρουσιάσει μια τυπική κατανομή πεταλούδας των κανονικών τάσεων. [45] Για την δοκό που παρουσιάζεται στην εικόνα 18, το άνω μισό της διατομής θα είναι υπό συμπίεση και το κάτω μισό υπό τάση, με την ουδέτερη επιφάνεια να τρέχει ακριβώς κατά μήκος του κέντρου της μάζας της δοκού. Καθώς το πάνω μισό υπόκειται σε συμπιεστικές δυνάμεις, θα επεκταθεί πλευρικά για να αντισταθμίσει την αλλαγή της έντασης μετά την επίδραση του Poisson. Το ίδιο ισχύει και για το κάτω μισό, το οποίο θα συρρικνωθεί πλευρικά γιατί βρίσκεται υπό τάση. Αυτή η μεταβολή μήκους πάνω από τη διατομή της δοκού είναι υπεύθυνη για την πρόκληση καμπυλότητας στην

εγκάρσια κατεύθυνση της παραμόρφωσης κάμψης. Συνοπτικά ο λόγος Poisson ρυθμίζει την καμπυλότητα σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της κάμψης.

Τα κοινά υλικά έχουν θετικό λόγο Poisson. Ωστόσο, τα υλικά με αρνητική αναλογία Poisson τα οποία προέρχονται θεωρητικά από τις σχέσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι εξαιρετικά σπάνια. Στη φύση μόνο ορισμένα πετρώματα και ορυκτά έχουν βρεθεί ότι εμφανίζουν αυξητική συμπεριφορά. Ενώ ένα θετικό σε λόγο Poisson υλικό θα συστέλλεται πλευρικά όταν τεντώνεται, ένα αυξητικό υλικό θα επεκτείνει την εγκάρσια διατομή του. Το αντίθετο ισχύει για μια συμπιεστική αξονική δύναμη που ενεργεί στο υλικό, πράγμα που θα έχει ως αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του δείγματος στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Ανατρέποντας την αίσθηση πλευρικής διαστολής (ή συρρίκνωσης), έχει επίσης άμεση επίδραση στην απόκριση στην κάμψη. Κοιτώντας πίσω στο παράδειγμα που αναλύθηκε προηγουμένως, θεωρούμε τώρα μία δοκό κατασκευασμένη από ομοιογενές και ισότροπο υλικό, αλλά αυτή τη φορά υποθέτουμε ότι το υλικό έχει αυξητική συμπεριφορά (Σχήμα 17 στο κάτω μέρος). Εφαρμόζοντας ένα φορτίο κάμψης, θα έχουμε ακόμα το άνω μισό της δοκού υπό συμπίεση και το κάτω μισό υπό τάση. Τώρα θα έχουμε στο πάνω μισό συρρίκνωση υπό συμπίεση και το κάτω μισό θα επεκταθεί υπό ένταση. Ως συνέπεια αυτής της αναστροφής μεταξύ των περιοχών που επεκτείνονται και συρρικνώνονται, η υποθετική ακτινοειδής δοκός θα παρουσιάσει μια συνκλαστική καμπυλότητα, σε αντίθεση με την αντικλαστική καμπυλότητα της συμβατικής δέσμης που συζητήθηκε προηγουμένως. [46]

4.4 Ιδιότητες αυξητικών υλικών

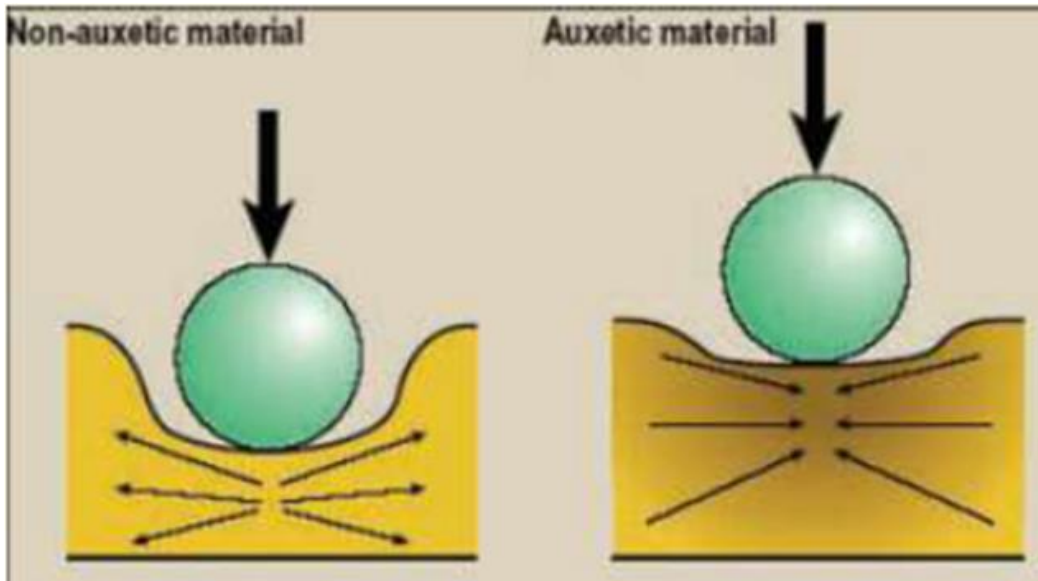
Τα αυξητικά υλικά παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Αντίσταση στη διείσδυση (indentation behaviour)
2. Αντοχή στο σχισμό (fracture behaviour)
3. Απόσβεση ταλαντώσεων και απορρόφηση ενέργειας
4. Συγκλαστική καμπυλότητα (synclastic curvature)

4.4.1 Αντίσταση στη διείσδυση (indentation behaviour)

Τα αυξητικά υλικά είναι πιο σκληρά σε σχέση με τα συμβατικά υλικά. Παρουσιάζουν, δηλαδή, μεγαλύτερη αντίσταση στην διείσδυση. Αυτό οφείλεται στην πυκνότητα του υλικού που προσδίδει ο λόγος Poisson.

Πιο συγκεκριμένα, σ' ένα συμβατικό υλικό ($0 < \nu < 0.5$), όταν υπόκειται σε κρουστική φόρτιση, οι θλιπτικές τάσεις που δημιουργούνται στο σημείο επαφής, παραμορφώνουν το υλικό καθώς το σπρώχνουν προς όλες τις κατευθύνσεις εκτός αυτής του σημείου κρούσης. Αντίθετα, σ' ένα αυξητικό υλικό (αρνητικός λόγος Poisson), η τοπική κρούση προκαλεί και τοπική αύξηση της πυκνότητας. Αυτό συμβαίνει διότι όταν το υλικό δέχεται αξονικές θλιπτικές τάσεις, τότε υπάρχουν εισροές υλικού από τις πλάγιες περιοχές του, στο σημείο εφαρμογής των τάσεων αυτών. [47]



Εικόνα 19: Συμπεριφορά στην διείσδυση κατά την κρουστική αξονική θλίψη, ενός συμβατικού (αριστερά) και ενός αυξητικού (δεξιά) υλικού. [47]

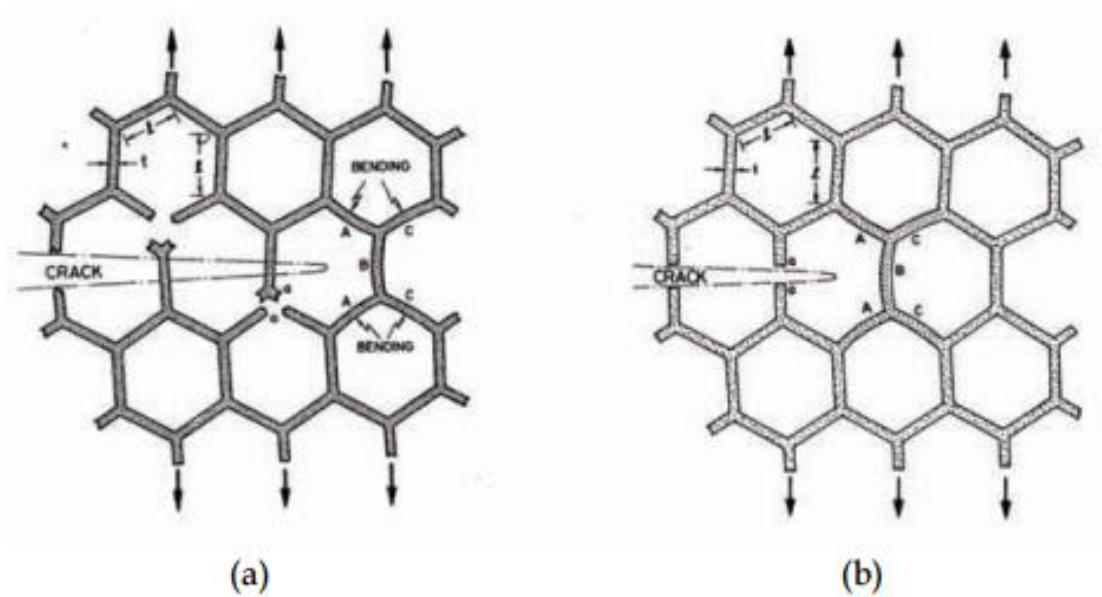
4.4.2 Συμπεριφορά και αντοχή στη ρωγμή (crack resistance)

- **Συμπεριφορά στη ρωγμή**

Στη δημιουργία ρωγμής, τόσο στα συμβατικά υλικά όσο και στους αυξητικούς αφρούς, η αστοχία συμβαίνει ξαφνικά, χωρίς δηλαδή τη δημιουργία "λαιμού". Από την πλευρά της διάστασης των κελιών, μια ρωγμή εκτείνεται σταδιακά. Σε κάθε βήμα η ρωγμή αυξάνεται κατά πλάτος του κάθε κελιού. Όταν η τάση στην άκρη της ρωγμής είναι αρκετά υψηλή, στην ακμή ή στο τοίχωμα του κελιού, τότε το ράγισμα επεκτείνεται. Παρόλα αυτά, η διάδοση της ρωγμής μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους:

α. Μέσω της αποτυχίας κάμψης του μη κάθετου τοιχώματος του κελιού ή της άκρης του.

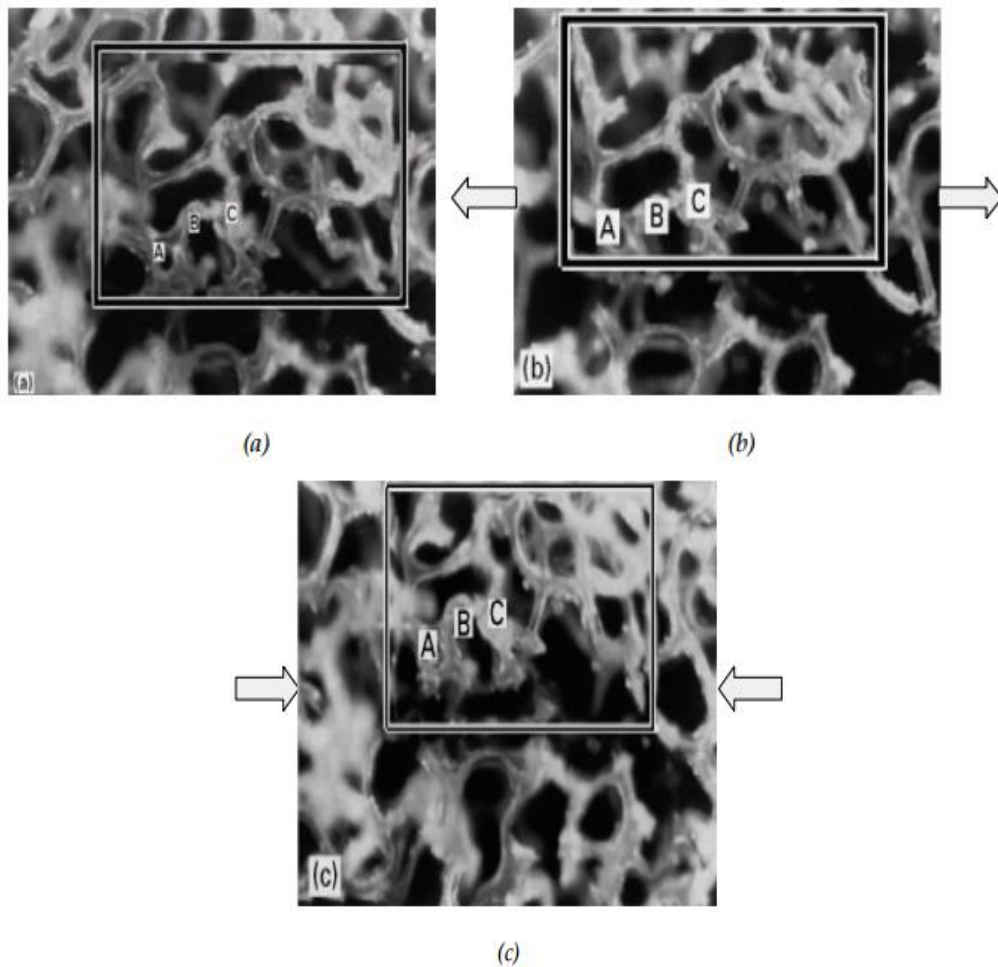
β. Από τη ρωγμή των κάθετων στοιχείων, υπό τον συνδυασμό του εφελκυσμού και της ροπής κάμψης. [47]



Εικόνα 20: Επέκταση της ρωγμής σ' ένα στερεό κελί, **α)** Μέσω της αποτυχίας κάμψης του μη κάθετου τοιχώματος του κελιού ή της άκρης του. **β)** Μέσω της ρωγμής των κάθετων στοιχείων, υπό τον συνδυασμό του εφελκυσμού και της ροπής κάμψης [47]

- **Αντοχή στο σχισμό**

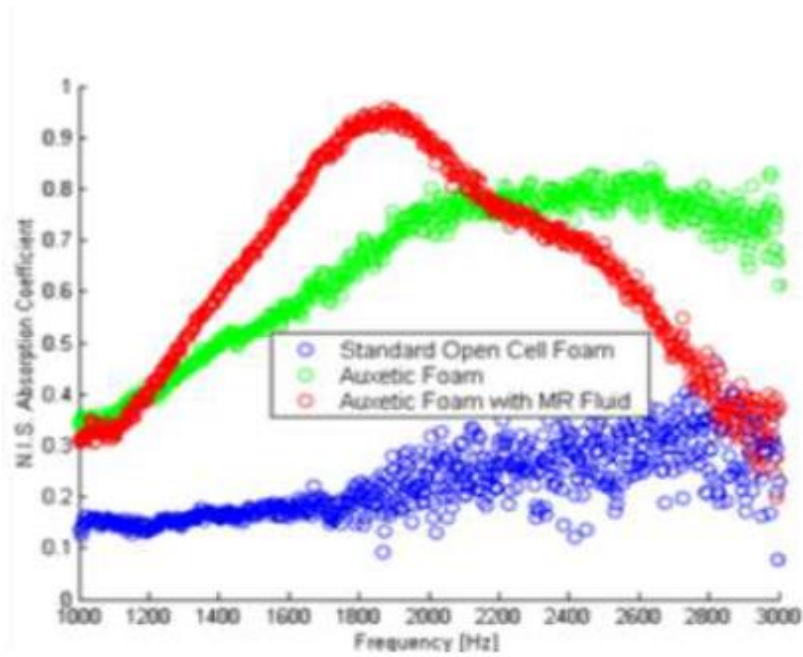
Τα αυξητικά υλικά, σε σχέση με τα μη αυξητικά, έχουν κάποιες επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, εάν το υλικό έχει μια ρωγμή και έλκεται για να διαχωριστεί, αυτό διαστέλλεται και έτσι η ρωγμή κλείνει. Αυτός ο τύπος υλικού, λοιπόν, παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη δημιουργία ρωγμών και αντοχή στην διατμητική παραμόρφωση. [47]



Εικόνα 21: Μικρογραφίες των αυξητικών αφρών πολυουρεθάνης παρουσιάζοντας τις ελαστικές παραμορφώσεις υπό διαφορετικούς τύπους φορτίσεων. **(α)** Ελεύθερο **(β)** Υπό εφελκυσμό **(γ)** Υπό συμπίεση [47]

4.4.3 Απόσβεση ταλαντώσεων και απορρόφηση ενέργειας

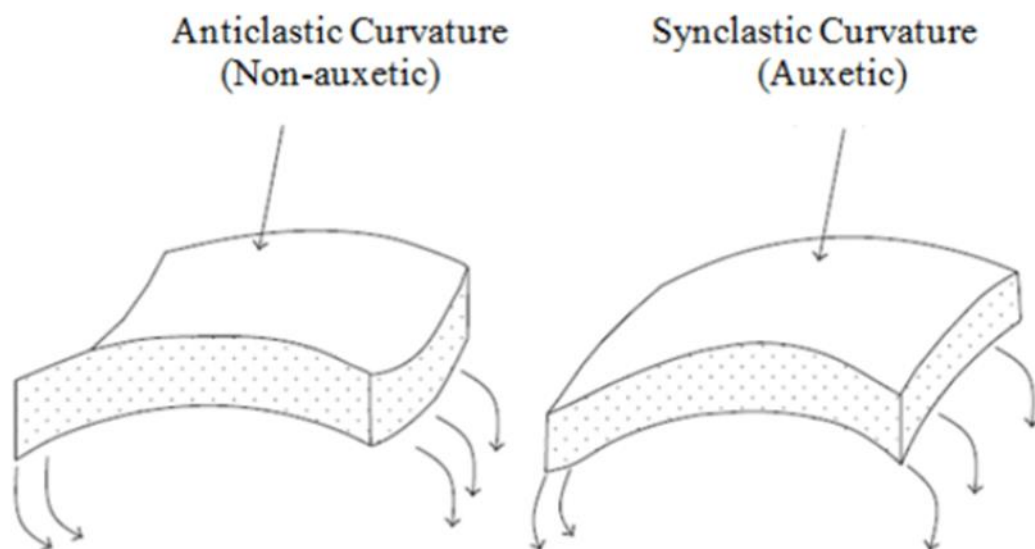
Ο λόγος Poisson ενός υλικού επηρεάζει την μεταδοτικότητα και την ανακλαστικότητα των κυμάτων τάσης μέσα στο υλικό. Σύμφωνα με μελέτες, έχει αποδειχθεί ότι οι αυξητικοί αφροί έχουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα ηχητικών κυμάτων σε σχέση με τους συμβατικούς σε όλες τις συχνότητες. Επίσης, το μέγεθος των πόρων επηρεάζει το εύρος των συχνοτήτων που απορροφούνται από τον εκάστοτε αφρό. Οι αυξητικοί αφροί με μικρούς πόρους ήταν αποτελεσματικότεροι στην απορρόφηση ηχητικών κυμάτων 630 Hz και άνω, σε σχέση με τους αφρούς με μεγαλύτερους πόρους. [48,49]



Εικόνα 22: Συντελεστής απόσβεσης - συχνότητα ηχητικού κύματος [48]

Ακόμη, στους αυξητικούς αφρούς, τα αποτελέσματα των δοκιμών από δυναμική σύνθλιψη είναι καλύτερα σε σχέση με αυτά των συμβατικών. Σύμφωνα με μελέτη, όπου εξετάστηκε η αντοχή σε σύγκρουση αφρού πολυουρεθάνης ανοιχτών κελιών και του αντίστοιχου αυξητικού του, η αξιοπιστία του αυξητικού αφρού στην αντοχή στην σύγκρουση είναι πολύ ανώτερη σε σχέση με αυτή του συμβατικού. [50]

4.4.4 Συγκλαστική συμπεριφορά - Synclastic Behaviour



Εικόνα 23: Η καμπυλότητα σε συμβατικά υλικά (αντικλαστική) και η καμπυλότητα σε αυξητικά υλικά (συνκλαστική) [51,52]

Όταν ένα δείγμα έχει μια ροπή κάμψης, υποβάλλεται σε εφελκυστικές και συμπιεστικές τάσεις. Τα συμβατικά μη-αυξητικά υλικά συμπεριφέρονται όπως στο σχήμα 23 (α). Εάν όμως είναι αυξητικό υλικό, τότε η εξωτερική επιφάνεια, η οποία βρίσκεται υπό τάση, υφίσταται επέκταση και το εσωτερικό, το οποίο είναι σε συμπίεση, συστέλλεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός “θόλου”, όπως φαίνεται και στο σχήμα 23 (β). [51] Οι δομές τύπου “σάντουιτς” με αυξητικούς κυψελωτούς πυρήνες παρουσιάζουν συγκλαστική συμπεριφορά. Αυτό είναι επιθυμητό για αεροδιαστημικές εφαρμογές καθώς τα αυξητικά πάνελ είναι ικανά να παραμορφωθούν σε μορφή διπλής κάμψης ή αλλιώς σχήμα θόλου, συμπεριφορά που προκύπτει από την συγκλαστική ιδιότητα. Η ικανότητα αυτή οδηγεί στην αποφυγή της χρήσης δαπανηρών τεχνικών κατασκευής που απαιτούνται συνήθως στα μη αυξητικά υλικά, τα οποία έχουν αντικλαστικές ιδιότητες. [51]

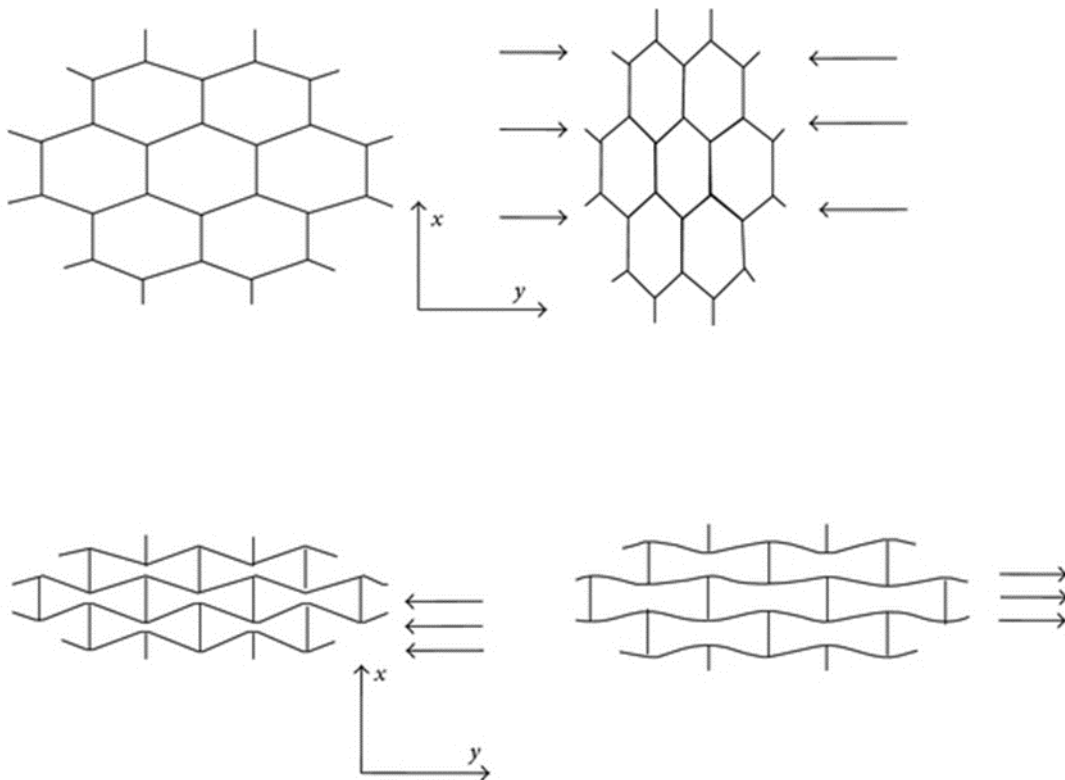
4.5 Αυξητική κυψελώδης δομή - Auxetic Cellular Honeycomb Structure

Οι κυψελωτές δομές παράγουν τις μακρο-μηχανικές τους ιδιότητες από συγκεκριμένη διάταξη υλικού, επομένως η γεωμετρία είναι υπεύθυνη για την ιδιαίτερη μηχανική συμπεριφορά αυτών των κατηγοριών μετα-υλικών. Με τη μεταβολή της γεωμετρίας και της τοπολογίας του σχεδίου, η μηχανική απόκριση μεταβάλλεται ανάλογα, επιτρέποντας την επίτευξη ενός ευρέος φάσματος ιδιοτήτων, δίνοντας έτσι την ευκαιρία στον σχεδιαστή να προσαρμόσει το σχέδιο του στις εκάστοτε ανάγκες του. Η πρώτη μακροσκοπική κυψελωτή δομή με αρνητικό συντελεστή Poisson επιτεύχθηκε το 1982.[53] Ο κυρίαρχος μηχανισμός μιας τέτοιας δομής είναι οι ενώσεις (μέσω «ραφών») των αρθρώσεων των κυψελών. Σε σύγκριση με άλλες δομές αυξητικών κυψέλων, οι κυψελοειδείς κηρήθρες παρουσιάζουν την αυξητική αυτή ιδιότητα λόγω της μοναδικής γεωμετρίας που έχουν. Οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται μπορεί να είναι είτε “επαναλαμβανόμενα” ή “χειρόμορφα στοιχεία” [54] και “περιστρεφόμενα άκαμπτα και ήμι-άκαμπτα μοντέλα παραμόρφωσης”. [55]

4.6 Επαναλαμβανόμενη δομή - Re-entrant structure

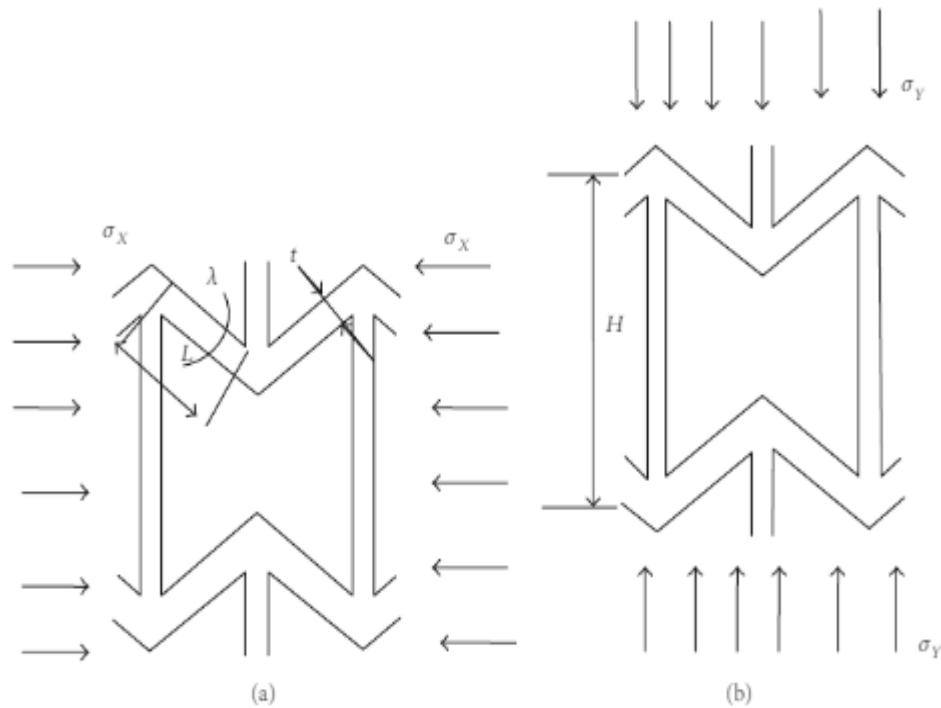
Η δομή αυτή προέρχεται από την αρχική δομή γνωστή και ως *honeycomb structure*, η οποία έχει επαναλαμβανόμενες εξαγωνικές κυψέλες. Η συμβατική δομή κηρήθρας υφίσταται επιμήκυνση κατά τον y άξονα και συρρικνώνεται κατά μήκος του x . Μετά την τροποποίηση του, το καινούριο μοντέλο έχει πλέον προεξέχουσες πλευρές που δείχνουν

προς τα έξω. Οι αρθρώσεις που επανασυνδέονται κάμπτονται και έλκονται, την ίδια στιγμή, υπό μονοαξονική τάση με αποτέλεσμα να τεντώνουν τόσο διαμήκως όσο και εγκάρσια. [56] Συνεπώς, η κυψελωτή δομή και ο όγκος αυξάνονται εξαιτίας της παραμόρφωσης, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την αντίθετη συμπεριφορά των αυξητικών υλικών. [57]



Εικόνα 24: Μηχανισμός παραμόρφωσης μη αυξητικής (κυψελώδης) και αυξητικής (επαναλαμβανόμενης) δομής [51]

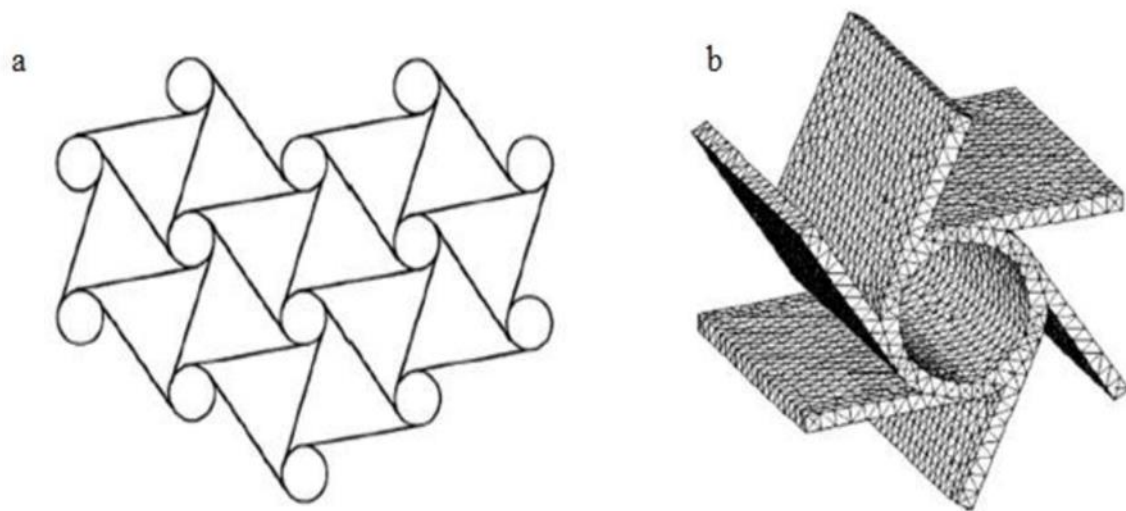
Οι γεωμετρικές παράμετροι των επαναλαμβανόμενων δομών μπορούν να αλλάξουν το λόγο Poisson από αρνητικό σε θετικό, όταν οι αυξητικές κυψελώδεις δομές φέρουν φορτίο εφελκυσμού στον άξονα y ή φορτίο συμπίεσης κατά τον άξονα x . Το H συμβολίζει το κατακόρυφο μήκος που έχει η κυψελίδα, L είναι το κεκλιμένο μήκος της κυψελίδας και λ η γωνία μεταξύ της μη παραμορφωμένης κεκλιμένης κυψελίδας και του άξονα x . Με άλλα λόγια, το μέγεθος του λόγου Poisson ελαττώνεται σημαντικά όταν υφίσταται υψηλή τάση κατά τη διάρκεια ενός εφελκυσμού ή συμπίεσης στους xy άξονες. Τέλος σε όλα τα αυξητικά υλικά υπάρχει μια συγκεκριμένη μικροδομή που παίζει σημαντικό ρόλο για τη δημιουργία αρνητικού λόγου Poisson.



Εικόνα 25: Παραμόρφωση κυψελίδας κατά την επίδραση φορτίου (a) στον x άξονα και (b) στο y άξονα με σκοπό την κάμψη [50]

4.7 Χειρόμορφη δομή - Chiral structure

Το κύριο συστατικό της μοναδιαίας κυψελίδας είναι ένας κόμβος στο κέντρο, ο οποίος συνδέεται με μερικές ίσιες πλευρές και η διάσταση των αρθρώσεων μπορεί να ποικίλει. [57] Οι αρθρώσεις συνδέουν τον κεντρικό κόμβο εφαπτόμενη στην εξωτερική όψη του κόμβου. Παρατηρείται μόνο ανάκλαση κατά την περιστροφή της δομής λόγω της έλλειψης συμμετρικής φύσης της χειρόμορφης δομής. [58] Στο σχήμα 25 α) παρατηρείται ένα 2D μοντέλο, το οποίο είναι ιστροπικό, δηλαδή το PR του είναι περίπου -1. [59] Όταν εφαρμόζεται φορτίο εφελκυσμού ή θλίψης στη δομή, κάθε μονάδα κυψελίδων βρίσκεται σε στρέψη. Επομένως κάθε κεντρικός κόμβος περιστρέφεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συστρόφη ή την αποσύνδεση των κυψελίδων. Ως εκ τούτου, η συνολική δομή επεκτείνεται, είτε έρχεται σε επαφή. [60]



Εικόνα 26: α) Χειρόμορφη δομή [61] και β) κύτταρο μονάδα [62]

4.8 Γενικές μηχανικές εφαρμογές αυξητικών υλικών

Από την εισαγωγή τους το 1987 έως σήμερα υπάρχει αύξηση ενδιαφέροντος για ένα ευρύ φάσμα των μηχανικών ιδιοτήτων. Ο μεγάλος αριθμός εφαρμογών των υλικών αυτών σχετίζεται με την ιδιαίτερη παραμόρφωση που υφίστανται υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Ιδιαίτερη προσοχή έχει η συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης των πολυμερών αφρών και ελαστομερών λόγω της ικανότητας απόσβεσης καθώς και τα δύο υλικά έχουν αυξημένη αντοχή σε κραδασμούς.

Βιομηχανία κλωστοϋφαντουργίας

Η επαναστατική εξέλιξη μιας συνεχούς διαδικασίας για την παραγωγή αυξητικών υλικών σε ινώδη μορφή έχει δημιουργήσει την ευκαιρία για να εφαρμόσουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά του αρνητικού λόγου Poisson δομές σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Για την παραγωγή υφαντών με αυξητική δομή υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση αυξητικών ινών και η δεύτερη δομή περιλαμβάνει τη χρήση συμβατικών ινών για την παραγωγή συνθετικών υφαντών με αυξητικές ιδιότητες. Οι προηγμένες ίνες αποτελούνται από πολλαπλά νήματα εκ των οποίων το αυξητικό νήμα είναι τυλιγμένο με ένα ή περισσότερα άλλα νήματα με σκοπό να συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα του υλικού αυτού με άλλες ωφέλιμες ιδιότητες για εφαρμογές έξυπνων τεχνικών υφασμάτων.



Εικόνα 27: Βοηθητικό νήμα διπλής έλικας

Με την χρήση των αυξητικών ιών ως ενίσχυση έχει όφελος στην απορρόφηση ακουστικής ενέργειας, την ενέργεια κρούσης που επιτυγχάνεται στο επίπεδο της μικροδομής. Ωστόσο δημιουργούνται αρκετά προβλήματα κατά την παραγωγή αυξητικών υλικών, τα οποία δημιουργούνται μετά από επεξεργασία με μη συμβατικές μεθόδους καθώς κάθε βήμα παρέχει επιπρόσθετο κόστος. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι τα υφαντά που παράγονται από συμβατικά νήματα. Ο Hooke κατασκεύασε ένα πορώδες ύφασμα το οποίο περιλαμβάνει μια συστοιχία ζευγών γειτονικών ελικοειδών αυξητικών νημάτων. Τα νήματα αυτά όταν βρίσκονται υπό τάση υφίστανται αύξηση στη διάμετρο τους, παρουσιάζοντας έτσι άνοιγμα πόρων κατά τη διάρκεια της ενσωμάτωσής τους σε υφάσματα. Μία τέτοια περίπτωση υφασμάτων είναι τα υφάσματα που αλλάζουν χρώμα. Πρόκειται για υφάσματα τα οποία περιλαμβάνουν ένα βασικό ύφασμα διαφορετικού χρώματος από το επικαλυμμένο πορώδες υλικό που κατασκευάζεται από αυξητικές ίνες. Μια τέτοια διάταξη επιτρέπει την αλλαγή χρώματος υπό εφαρμογή τάσης. Αυτού του είδους τα υφάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της μόδας αλλά και σε άλλους τομείς όπου απαιτείται μια ακριβής ένδειξη της κατάλληλης τάσης. [69]

Αεροδιαστημική και αυτοκινητοβιομηχανία

Σε αυτό το πεδίο εφαρμογών έχει γίνει αρκετή έρευνα και πολλές εφαρμογές μπορούν να βρεθούν. Τα αυξητικά υλικά εφαρμόζονται σε αυτή την περίπτωση λόγω της ικανότητας τους να αντιστέκονται στους κραδασμούς, να απορροφούν τις δονήσεις και την ενέργεια.

Πάνελ τύπου ‘σάντουιτς’ : οι δομές αυτές υπόκεινται συχνά σε αντικρουόμενες απαιτήσεις, όπως η ανάγκη για ελάχιστο βάρος σε συνδυασμό με την ανάγκη για υψηλή ακαμψία. Το 2013 ο Li Yang και άλλοι παρουσίασαν μια δομική εφαρμογή αυξητικών υλικών όπως βλέπουμε στην εικόνα 28. Ξεκίνησαν με τη σκέψη πως οι δισδιάστατες

κυψελωτές δομές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως πυρήνες σάντουιτς, συχνά υστερούν σε ιδιότητες που ικανοποιούν όλες τις απαιτήσεις. Έτσι κατέληξαν στη χρήση Τριδιάστατων κυψελοειδών δομών που μπορούν και συνδυάζουν αρκετά πλεονεκτήματα για τέτοιες εφαρμογές. Ωστόσο πολλά προβλήματα και περιορισμοί προκύπτουν κατά την παραγωγή λόγω έλλειψης ανάπτυξης θεωριών σχεδίασης. Οι δομές αυτές παρουσιάζουν μεγάλες προοπτικές λόγω του αρνητικού λόγου Poisson σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις. Ο συνδυασμός μέτρου υψηλής διάτμησης και δύναμης, υψηλής αντοχής, μεγάλη απόκριση σε κάμψη, καθιστούν τις αυξητικές δομές κατάλληλες για εφαρμογές δομών τύπου σάντουιτς.



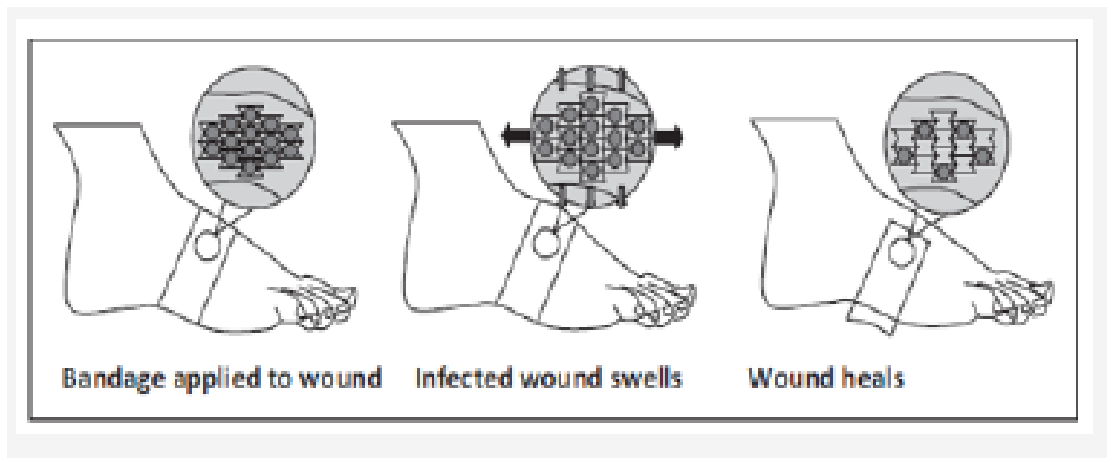
Εικόνα 28: Μονωμένο πάνελ με αυξητικούς μεταλλικούς αφρούς [70]

Προστασία και αθλητισμός

Ένα ακόμα πεδίο στο οποίο τα αυξητικά υλικά κερδίζουν όλο και περισσότερα επιτεύγματα είναι στο σχεδιασμό μηχανισμών προστασίας του ανθρώπου. Τα αυξητικά πολυμερή έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή προστατευτικών κρανών ή γιλέκων ανθεκτικών στα χτυπήματα. Οι αυξητικοί αφροί είναι το υλικό που προσδίδει αυτές τις ιδιότητες σε τέτοιου είδους κατασκευές εξαιτίας του υψηλού συντελεστή διεύθυνσης. Χάρη σε αυτή την ιδιότητα, όταν υπάρχει κρούση από μια κατεύθυνση, το υλικό ρέει προς άλλες κατευθύνσεις προκειμένου να αντισταθμίσει την κρούση. [70]

Βιοϊατρική

Προσθετικά υλικά, χειρουργικά εμφυτεύματα, διαστολέα για το άνοιγμα αιμοφόρων αγγείων κατά τη διάρκεια χειρουργικής επέμβασης στην καρδιά, πρόκειται για αντικείμενα τα οποία με την προσθήκη αυξητικών δομών μπορούν να βελτιώσουν ορισμένες από τις ιδιότητες τους. Η έρευνα για τα υλικά αυτά στον τομέα της βιοϊατρικής παίζει κυρίαρχο ρόλο στις μέρες μας και η χρήση τους αυξάνεται διαρκώς. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση έξυπνων επίδεσμων. Οι επίδεσμοι αυτοί παράγονται από αυξητικά νήματα και είναι ικανά να φέρουν θεραπευτικά μέσα για την επούλωση πληγών. Όταν ο επίδεσμος εφαρμόζεται σε πρησμένο τραύμα, τείνει να τεντώνεται και να ανοίγει απελευθερώνοντας τους παράγοντες επούλωσης των πληγών. Αφού το τραύμα επουλωθεί και το πρήξιμο υποχωρήσει, ο επίδεσμος αυτός κλείνει σταματώντας την απελευθέρωση άλλων παραγόντων. [71]



Εικόνα 29: Έξυπνος επίδεσμος [71]

Κεφάλαιο 5

5.1 Δημιουργία αντικειμένου μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης

Η διαδικασία που ακολουθείται για να δημιουργηθεί ένα 3D εκτυπωμένο αντικείμενο γίνεται σε διαδοχικά στάδια ξεκινώντας με την εναπόθεση υλικού σε στρώσεις, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ενός 3D ψηφιακού μοντέλου. Τα στάδια που ακολουθούνται αναλυτικότερα είναι τα εξής:

i. Σχεδίαση του αντικειμένου (design)

Τα τριδιάστατα μοντέλα προς εκτύπωση μπορούν να προέλθουν από λογισμικά σχεδίασης CAD (Computer Aided Design) (solidworks, fusion 360, Rhino 6 κ.α.) αλλά και από αρχεία τριδιάστατης σάρωσης (3D scanning). Με την ολοκλήρωση του σταδίου αυτού προκύπτει ένα αρχείο το οποίο εξάγεται σε μορφή **STL**.

ii. Παραμετροποίηση (Parameterization)

Στο στάδιο αυτό προγραμματίζονται οι παράμετροι κατασκευής του μοντέλου με τη βοήθεια λογισμικά **CAM** (Computer-aided Manufacturing) κατάλληλα για την παραμετροποίηση της διαδικασίας παραγωγής των μοντέλων μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης. Υπάρχει ευρεία ποικιλία λογισμικών (slicer), για αυτό τον σκοπό, εκ των οποίων τα πιο διαδεδομένα είναι το Simplify3D και το Cura, πολλά από αυτά διατίθενται δωρεάν στο διαδίκτυο ενώ άλλα συνοδεύουν συγκεκριμένα συστήματα τριδιάστατης εκτύπωσης. Η μεταφορά των γεωμετρικών πληροφοριών γίνεται μέσω του διαχωρισμού και της προσέγγισης του αντικειμένου με τη μορφή τριγώνων δημιουργώντας έτσι μια ψηφιδωτή αναπαράσταση (μορφή STL αρχείου). Αφού γίνει η μεταφορά αυτή των πληροφοριών, ορίζονται οι παράμετροι διεργασίας οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες που θα έχει το τελικό μας αντικείμενο. Αφού επιλεγθούν οι απαραίτητες παράμετροι εκτύπωσης όπως οι ταχύτητες αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εναποτιθέμενου υλικού μετατρέπονται σε αρχείο κώδικα (g-code) ο οποίος είναι αναγνωρίσιμος από τους τριδιάστατους εκτυπωτές.

iii. Εκτύπωση (Printing)

Στη διάταξη του εκτυπωτή συμπεριλαμβάνεται μια κινητή πλατφόρμα εκτύπωσης στην οποία η κεφαλή του εκτυπωτή εναποθέτει υλικό για τη δημιουργία του 3D αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση της κεφαλής περιορίζεται σε x- y άξονες για τη δημιουργία της μιας στρώσης και στη συνέχεια γίνεται κίνηση της

πλατφόρμας εκτύπωσης ως προς τον z άξονα. Πολλές διατάξεις έχουν σταθερή πλατφόρμα εκτύπωσης ενώ η κίνηση της κεφαλής περιλαμβάνει και τον άξονα z. Η κίνηση ως προς τον z άξονα δηλώνει το πάχος στρώσης.

iv. Το φινίρισμα (Finish)

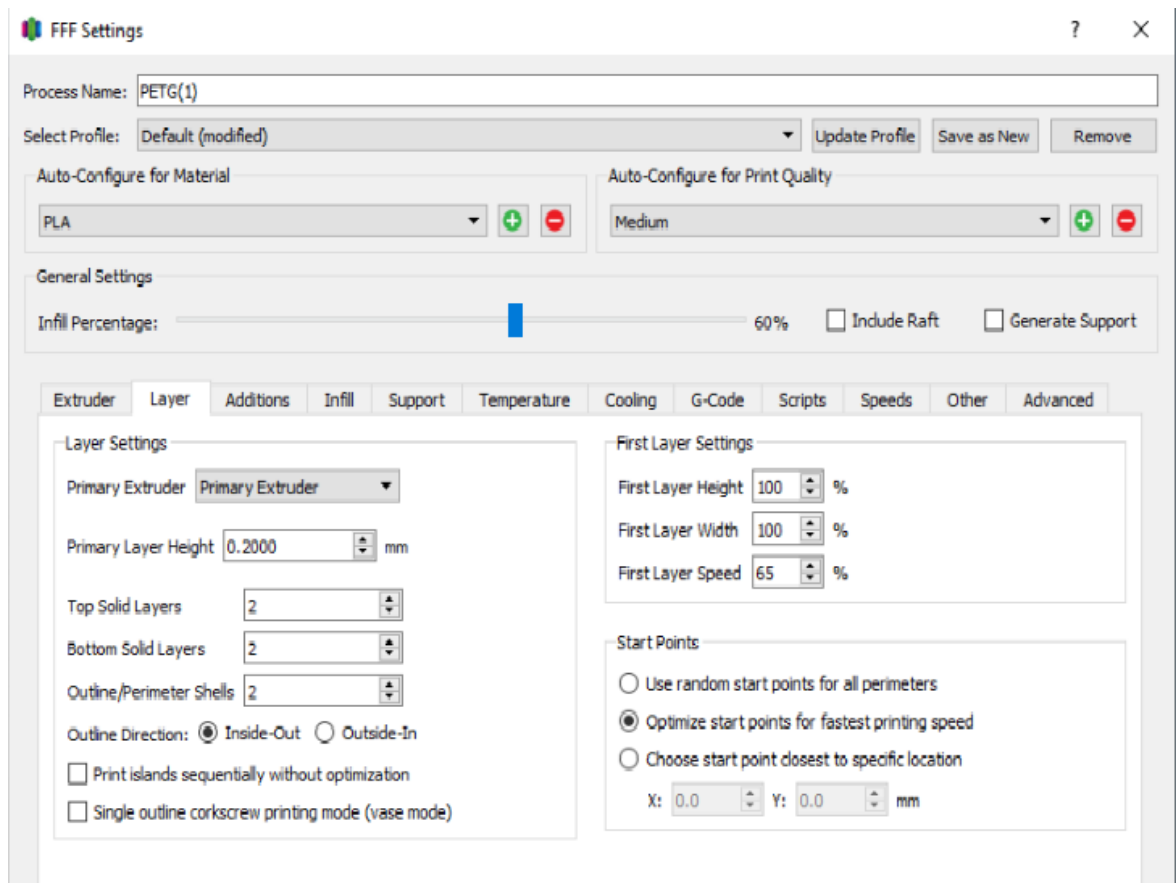
Στο στάδιο αυτό γίνεται η αφαίρεση των δομών υποστήριξης και των υπολειμμάτων πρώτης ύλης.

v. Μετεπεξεργασία

Το στάδιο αυτό αποτελεί δευτερεύουσα διαδικασία καθώς αναφέρεται στην μετεπεξεργασία της επιφάνειας των υλικών, η οποία περιλαμβάνει το γυάλισμα, τη βαφή, την επιχρύσωση του εκτυπωμένου αντικειμένου, ακόμα και την συναρμολόγηση ξεχωριστών 3D εκτυπωμένων αντικειμένων μεταξύ τους. [8]

5.2 Παράμετροι κατεργασίας και επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες

Οι παράμετροι διεργασίας στην προσθετική κατασκευή αντικειμένων, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το αντικείμενο τόσο ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες, όσο και ως προς το αισθητικό αποτέλεσμα. Οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός αντικειμένου το οποίο έχει κατασκευαστεί με την FDM μέθοδο, είναι ο αριθμός των στρώσεων, το πάχος που πρέπει να έχει η κάθε στρώση, το πλάτος της ραφής που χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει τη στρώση, η γωνία Δέλτα, η γωνία ραφής και τέλος η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διαδρομών που ορίζει την πυκνότητα του στρώματος (infill). [63] Γωνία Δέλτα είναι η γωνία μεταξύ της εκάστοτε στρώσης (μόλις ολοκληρωθεί μια στρώση η επόμενη γίνεται αντίστροφα με τη γωνία που έχει οριστεί) και η γωνία ραφής είναι η γωνία εναπόθεσης, ως προς τον άξονα x της πλατφόρμας κατασκευής. Οι Swayam και Siba ανακάλυψαν πως αλλάζοντας τη γωνία επικάλυψης και τον αριθμό περιγραμμάτων μπορεί να δημιουργηθεί μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και το αντικείμενο αποκτά μια πιο ισοτροπική συμπεριφορά. [64]



Εικόνα 30: Παράμετροι εκτύπωσης που ρυθμίζει ο χρήστης στο λογισμικό Solidworks με σκοπό να ορίσει το ύψος, το πάχος των στρώσεων κ.α.

5.3 Εφαρμογές της τριδιάστατης εκτύπωσης

Με την πάροδο του χρόνου η ανάγκη για αύξηση της παραγωγικότητας, μείωση του κόστους στη βιομηχανία αλλά και οι σύγχρονες ανάγκες για μια πιο εξατομικευμένη και στοχευμένη βιομηχανοποίηση, έχουν ωθήσει την ανάπτυξη Τριδιάστατων εφαρμογών σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο. Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένα παραδείγματα βιομηχανιών, οι οποίες κάνουν χρήση της τεχνολογίας της τριδιάστατης εκτύπωσης με σκοπό να αναπτύξουν νέα προϊόντα με υψηλό βαθμό εξατομίκευσης και σχηματικής πολυπλοκότητας.

Αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία

Όπως πολλές βιομηχανίες έτσι και οι αεροπορικές και οι αεροδιαστημικές βιομηχανίες αξιοποιούν τις τεχνολογίες της τριδιάστατης εκτύπωσης προκειμένου να κατασκευάζουν πολύπλοκες γεωμετρίες με την προσθετική μέθοδο των μετάλλων. Σκοπός είναι να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους σε σχέση με το κόστος καθώς και την ποιότητα.

Επιπλέον με τη χρήση της 3d εκτύπωσης επιτυγχάνουν να μειώσουν τις απαιτήσεις συντήρησης αλλά και εξοικονόμησης κόστους των καυσίμων κάνοντας χρήση ελαφρύτερων εξαρτημάτων.



Εικόνα 31: Τριδιάστατη εκτυπωμένη μινιατούρα τουρμπίνας από Rapid 2006 στο Σικάγο, Ιλινόις. [65]

Αυτοκινητοβιομηχανία

Οι βιομηχανίες αυτές ήταν από τις πρώτες που υιοθέτησαν τις μεθόδους των Τριδιάστατων εκτυπώσεων για την κατασκευή πρωτοτύπων σε επίπεδο ολοκληρωμένων οχημάτων αλλά και εξαρτημάτων. Ωστόσο, υπάρχει ακόμα δυσκολία στην προσαρμογή της βιομηχανίας αυτής σε πιο υψηλό επίπεδο κατασκευής οχημάτων. Οι τεχνολογίες τριδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιούνται είτε σε απλές εφαρμογές για τη δημιουργία πρωτοτύπων και την αξιολόγηση τους σε σχεδιαστικό και πρακτικό επίπεδο, μέχρι και τη δημιουργία λειτουργικών εξαρτημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται σε δοκιμαστικά οχήματα και μηχανές. Επίσης γίνονται αξιολογήσεις για την αεροδυναμική απόδοση και αξιολόγηση ενός οχήματος, για αυτό είναι σημαντική η δημιουργία πολλαπλών πρωτοτύπων, δοκιμάζοντας έτσι τις διαφορές τους χωρίς να καταναλώνουν χρήματα αλλά και πολύτιμο χρόνο στην κατασκευή ενός πρωτοτύπου.



Εικόνα 32: Πολύπλοκες γεωμετρίες εκτυπωμένες με την τεχνολογία της τριδιάστατης εκτύπωσης για την αυτοκινητοβιομηχανία. [66]

Αμυντική βιομηχανία

Όσον αφορά τη βιομηχανία αυτή, τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σαν εξοπλισμός πρέπει να έχουν αντοχή, να είναι στιβαρά και πάνω απ' όλα αξιόπιστα, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε αστοχία του υλικού η οποία μπορεί να φέρει σε κίνδυνο μια ανθρώπινη ζωή. Επειδή ακριβώς μιλάμε για μια πολύ απαιτητική βιομηχανία, λόγω των καταπονήσεων αλλά και των περιβαλλοντικών συνθηκών, οι τεχνολογίες 3D printing στοχεύουν στο να κατασκευάζουν καλύτερα και ποιοτικότερα προϊόντα. Στο μέλλον είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιηθούν Τριδιάστατοι εκτυπωτές σε πεδία μάχης. Η δυνατότητα να παραχθούν πραγματικά και λειτουργικά πρωτότυπα όπου ομάδες ανθρώπων μπορούν να αξιολογήσουν και να χρησιμοποιήσουν για τέτοιους σκοπούς, γεφυρώνει το χάσμα που υπάρχει μεταξύ του ψηφιακού σχεδίου και του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 33: 3D εκτυπωμένο εξάρτημα για όπλο – AR-15 [67]

Ιατρική βιομηχανία

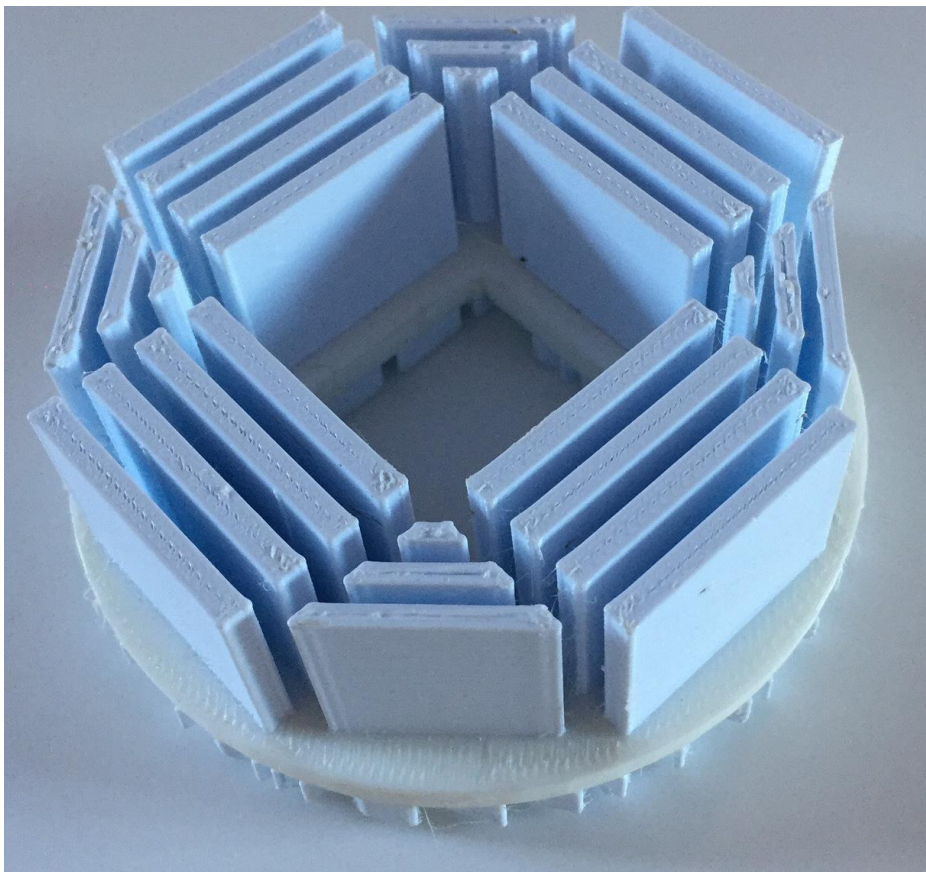
Οι προοπτική των Τριδιάστατων εκτυπωτών για χρήση στην ιατρική βιομηχανία εξελίσσεται με ένα εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό καθώς οι ειδικοί έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούν Τριδιάστατες μεθόδους εκτύπωσης σε πιο προχωρημένο και εξελιγμένο στάδιο. Πολλοί ασθενείς σε ολόκληρο τον κόσμο βιώνουν τη βελτίωση της ιατρικής περίθαλψης μέσω τριδιάστατα εκτυπωμένων μοσχευμάτων και προσθετικών μελών όπως δεν ήταν ποτέ άλλοτε. Αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία καθώς έχει τη δυνατότητα να σώσει ανθρώπινες ζωές ή να βελτιώσει δραματικά το βιοτικό επίπεδο των ασθενών. Πρόσφατες έρευνες που αφορούν τη δημιουργία ιστών, οργάνων, οστών και προσθετικά μέλη δείχνουν πολύ ενθαρρυντικές. Η κατασκευή προσθετικών μελών είναι επίσης πολύ σημαντικός τομέας στην ιατρική βιομηχανία, εφόσον η χρήση των τεχνολογιών 3D εκτύπωσης είναι ιδανική για περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε εξατομίκευση, μικρού όγκου παραγωγής και χαμηλού βάρους αλλά ανθεκτικής κατασκευής. Η τριδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει στα άτομα που έχουν χάσει κάποιο μέλος τους, να αποκτήσουν αυτό ακριβώς που χρειάζονται με βάση την εμφάνιση, την αίσθηση, το μέγεθος και το βάρος, σε συνάρτηση πάντα με την ποιότητα της κατασκευής και της αξίας.



Εικόνα 34: Υποδοχή ορθοπεδικού ισχίου εκτυπωμένο σε Τριδιάστατο εκτυπωτή. [68]

5.4 Προσδοκίες για την τριδιάστατη εκτύπωση ψύκτρας

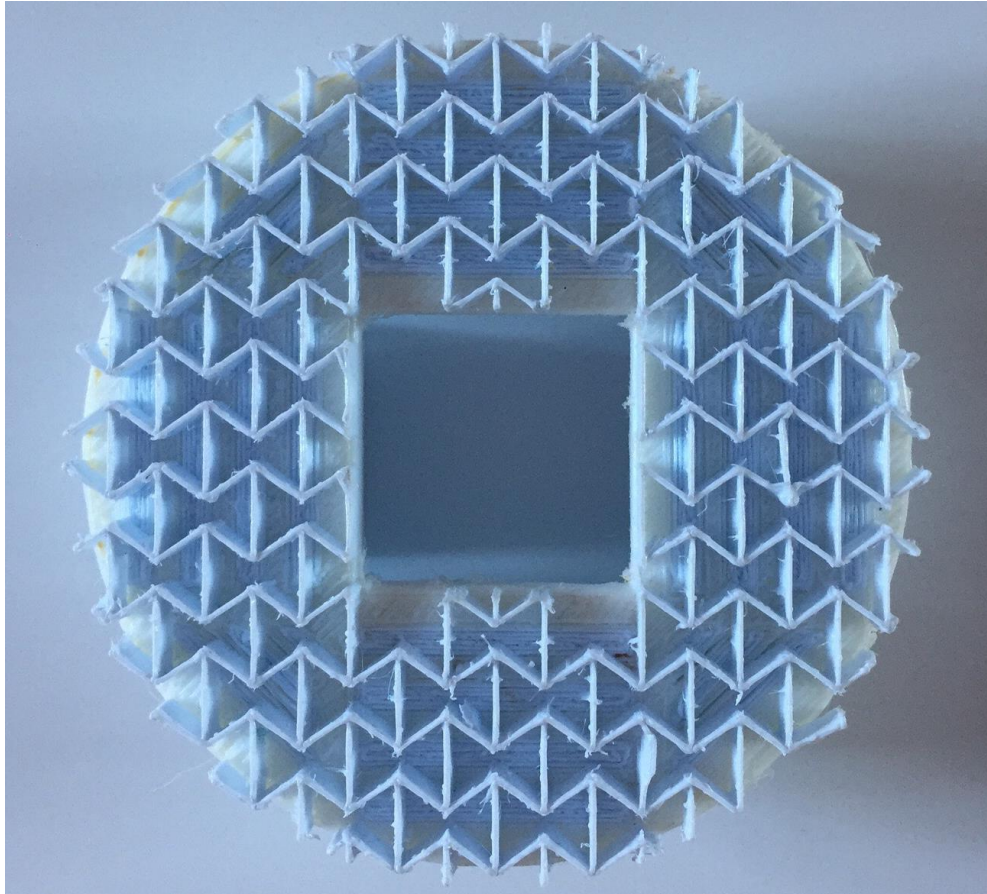
Ο επεξεργαστής ή Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (Central Processing Unit ή CPU) είναι ουσιαστικά ο εγκέφαλος ενός υπολογιστή. Από την αρχή της κυκλοφορίας τους οι επεξεργαστές έχουν δεχθεί τεράστιες βελτιώσεις και αναβαθμίσεις, ο τρόπος όμως λειτουργίας τους έχει παραμείνει ουσιαστικά ο ίδιος και αποτελείται από τρία βασικά βήματα: την ανάκληση, την αποκωδικοποίηση και την εκτέλεση των εντολών. Κατά την ανάκληση ο επεξεργαστής δέχεται μία εντολή από την RAM με τη μορφή μιας σειράς αριθμών. Στη συνέχεια προβαίνει στην αποκωδικοποίηση αυτής της εντολής και δίνει σήμα, ώστε να γίνει η εκτέλεση της εντολής. Αφού γίνει η εκτέλεση της εντολής, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στη μνήμη, προκειμένου να είναι εύκολα προσπελάσιμα από επόμενες εντολές. Ο επεξεργαστής ενός υπολογιστή είναι ένα μικρό τετράγωνο εξάρτημα που έχει στην κάτω πλευρά του μικρές μεταλλικές επαφές (pins) μέσω των οποίων ο επεξεργαστής συνδέεται με τη μητρική κάρτα. Η φυσική θέση στην οποία ο επεξεργαστής συνδέεται με τη μητρική κάρτα ονομάζεται socket. [72]



Εικόνα 35: Τριδιάστατη εκτυπωμένη βάση ψύκτρας

Ο αέρας που περιβάλλει ένα τσιπ αρχικά ψύχει την επιφάνεια. Στην συνέχεια όμως θερμαίνεται και ανεβαίνει προς τα πάνω φθάνοντας στην επιφάνεια του υπολογιστή, όπου συναντά ακόμα πιο ζεστό αέρα. Εάν ο αέρας αυτός δεν βγει από την ψύκτρα προκειμένου να εξαερισθεί και να ανανεωθεί, γίνεται ακόμα πιο ζεστός με αποτέλεσμα η θερμότητα που παράγεται από το τσιπ να μην μπορεί να διαφύγει. Τυπικά ένα τέτοιο τσιπ Η/Υ σχεδιασμένο για εμπορική χρήση αντέχει σε θερμοκρασίες 125 °C – 150 °C. Η υπέρβαση του ορίου αυτού μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση αλλά και δημιουργία έντονου θορύβου κατά τη χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

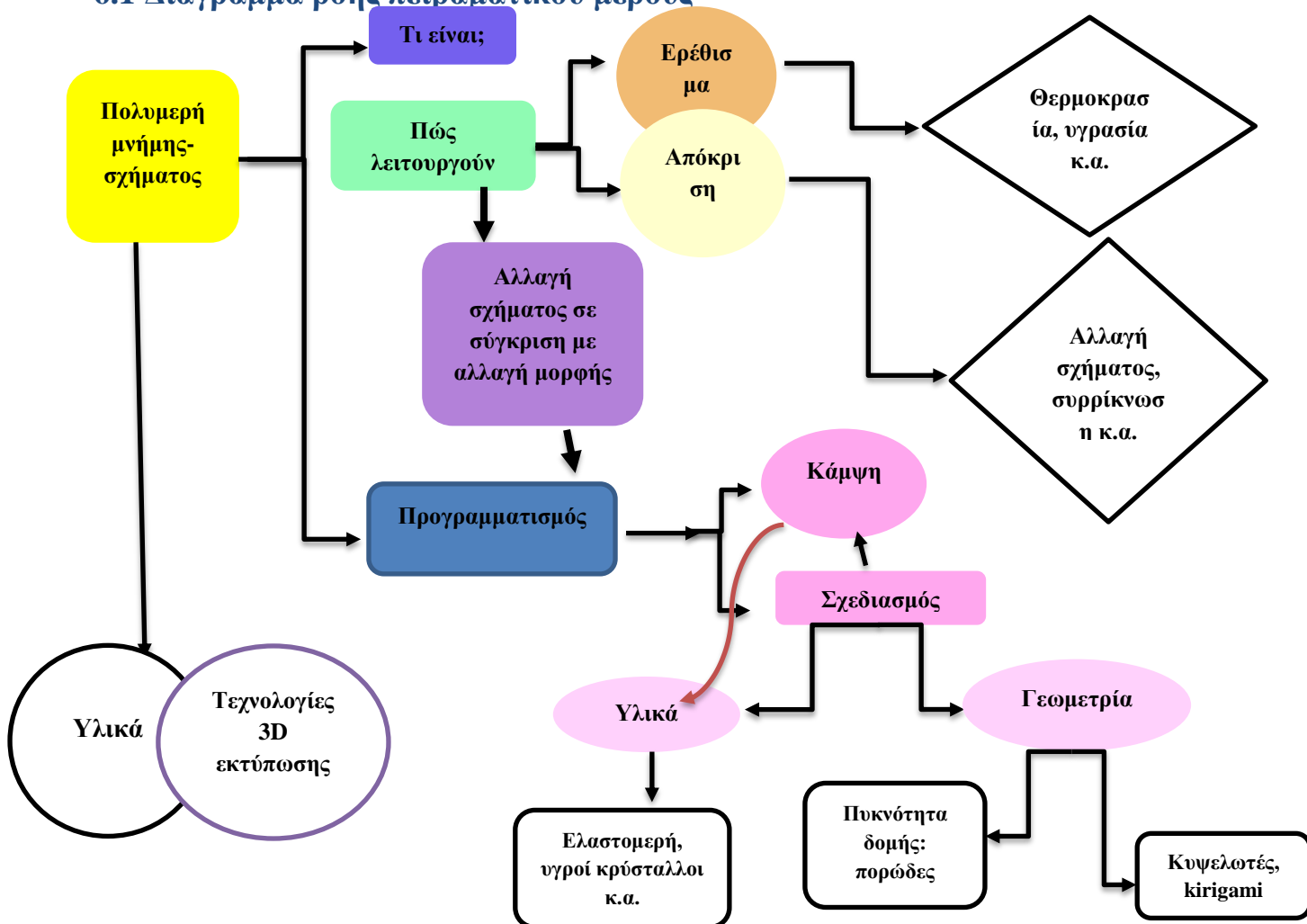
Ο σχεδιασμός χαμηλού θορύβου για συστήματα εξαερισμού αποτελεί αναδυόμενο θέμα για την σύγχρονη βιομηχανία, δεδομένου των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι επεξεργαστές υπολογιστών. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παροχή μιας γρήγορης, φθηνής και αξιόπιστης τεχνικής προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υπερθέρμανσης αλλά και του θορύβου που προκύπτει από τους ανεμιστήρες των Η/Υ. Με τη βοήθεια λοιπόν της τριδιάστατης εκτύπωσης και πιο συγκεκριμένα με τη χρήση της FDM τεχνικής, προσπαθήσαμε να μελετήσουμε τρόπους που θα μας οδηγούσαν στον σχεδιασμό μιας ‘έξυπνης’ ψύκτρας. Με τον όρο αυτό εννοούμε πως, μέσω μιας συγκεκριμένης γεωμετρίας και σε συνδυασμό με τις ιδιότητες που έχουν τα υλικά που επιλέξαμε θα καταφέρουμε να προσδώσουμε στο τελικό μας δοκίμιο την ικανότητα να λυγίζει και να απελευθερώνει αέρα όταν η θερμοκρασία του υπολογιστή αρχίζει να αυξάνεται.



Εικόνα 36: Τριδιάστατη εκτυπωμένη βάση ψύκτρας με επαναλαμβανόμενη γεωμετρία (*re-entrant structure*) με 20% πυκνότητα σε PETG

Κεφάλαιο 6

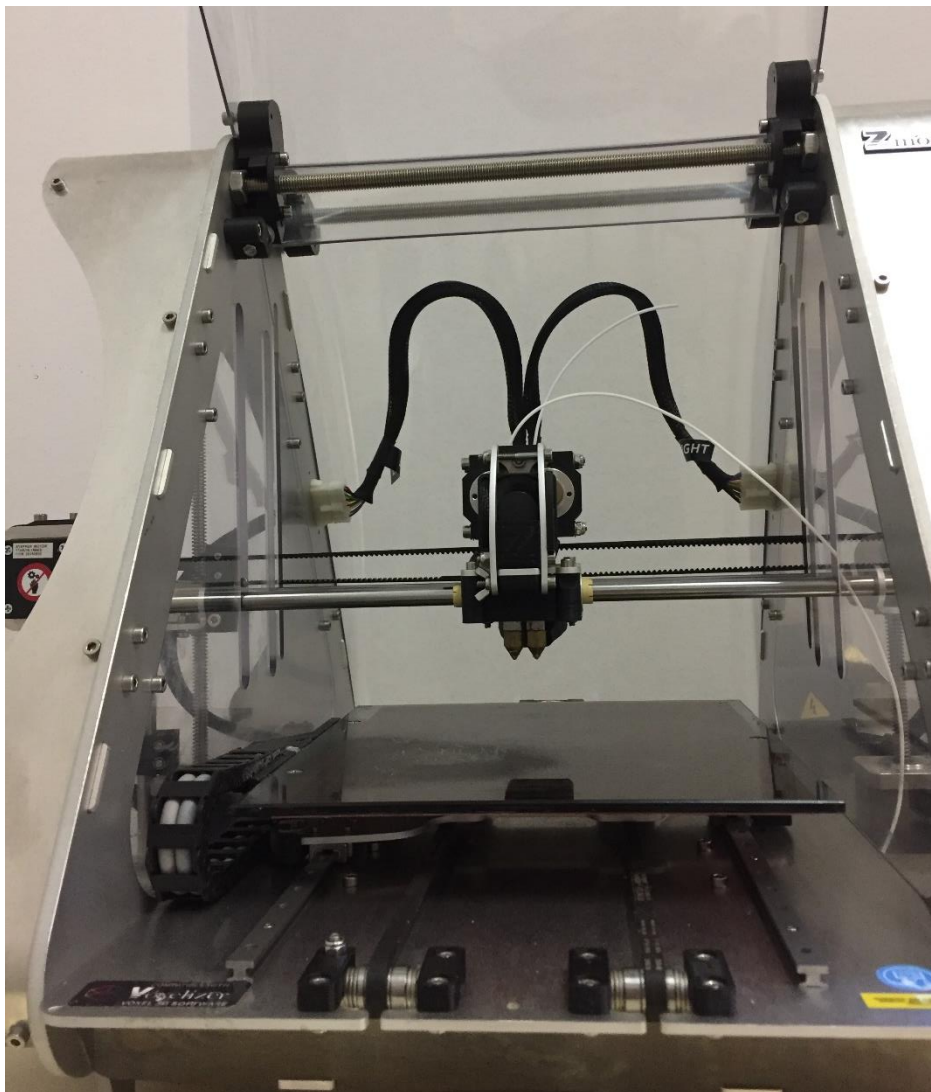
6.1 Διάγραμμα ροής πειραματικού μέρους



6.2 Πειραματική διάταξη

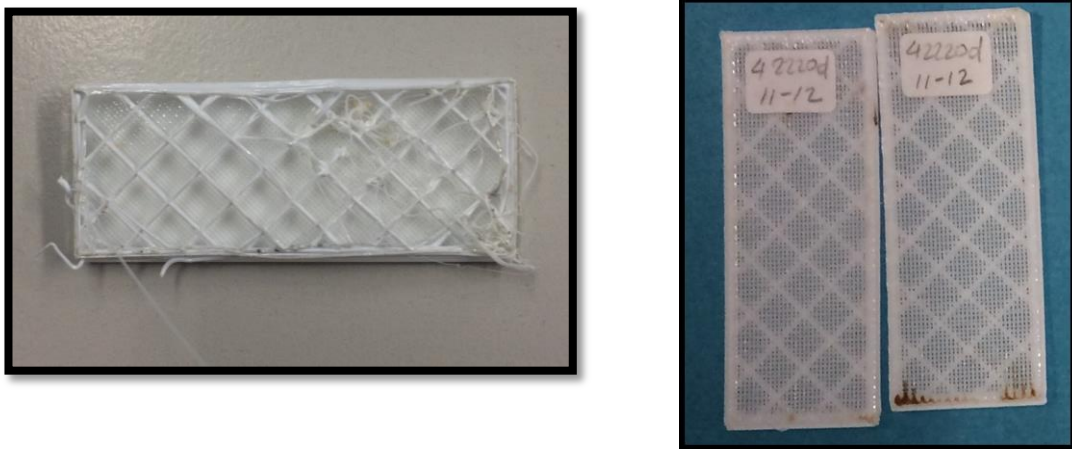
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο υλικά για την τριδιάστατη εκτύπωση της ψύκτρας επεξεργαστή H/Y θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU) και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο τροποποιημένο με γλυκόλη (PETG). Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση 5 δοκιμίων είναι ο *ZMorph 2.0*. Το πρώτο στάδιο, το οποίο είναι η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου, πραγματοποιείται με λογισμικό σχεδίασης στερεών μοντέλων καθώς μπορούν να αναπαριστούν τα τριδιάστατα αντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια. Ο σχεδιαστής μπορεί, είτε να χρησιμοποιήσει ένα υπάρχον αρχείο CAD ως είναι ή να το επεξεργαστεί, είτε να δημιουργήσει ένα νέο μοντέλο. Εξοπλισμός αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering equipment) όπως η

τριδιάστατη σάρωση (3D Scanning) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ψηφιακή σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου και τη δημιουργία 3D μοντέλου CAD. Ο τριδιάστατος αυτός εκτυπωτής διαθέτει πολλές λειτουργίες ανάλογα με την κεφαλή που τοποθετείται και συνδέεται. Η γεωμετρική αναπαράσταση, που δημιουργείται μέσω αυτών των προγραμμάτων, μπορεί να αρχειοθετηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως βάση για άλλες λειτουργίες και επιπρόσθετα μειώνονται τα λάθη που προκαλούνται σε διαφορετική περίπτωση με τον απαραίτητο επαναπροσδιορισμό εξαρχής της γεωμετρίας του σχεδίου κάθε φορά που απαιτείται. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετροποίηση του .stl αρχείου και τη δημιουργία G-code για την εκτύπωση των δοκιμίων είναι το *Simplify3D*.



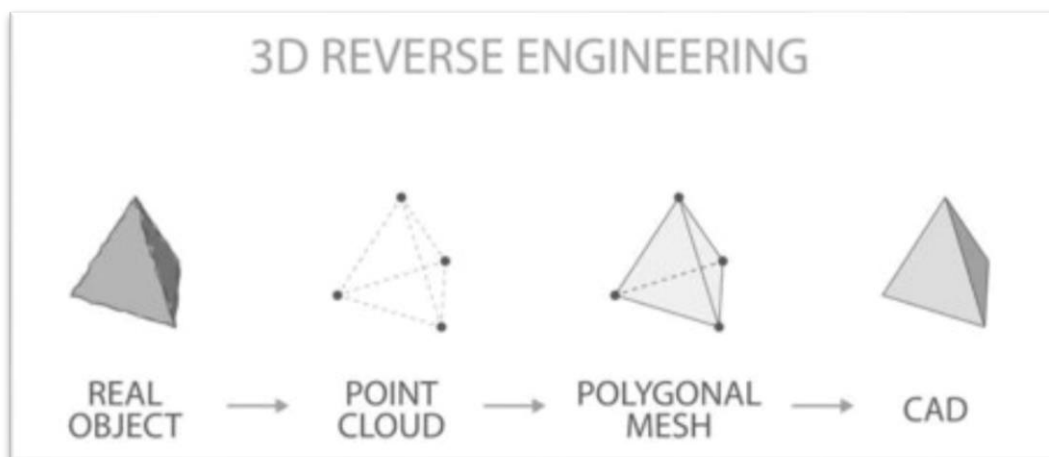
Εικόνα 37: Πειραματική διάταξη 3d εκτυπωτή με τεχνική FDM

Η εκτύπωση έγινε με τη χρήση διπλής κεφαλής. Συγκεκριμένα, στην αριστερή κεφαλή έχει τοποθετηθεί νήμα TPU το οποίο εκτυπώνεται πρώτο και στην δεξιά κεφαλή το PETG, το οποίο εκτυπώνεται ακριβώς πάνω από το TPU δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα ενιαίο δοκίμιο. Αφού έχουν μελετηθεί όλες οι ιδιότητες των υλικών που επιλέχθηκαν για το πείραμα αυτό, έγιναν προπαρασκευαστικές δοκιμές αλλάζοντας κάθε φορά τις παραμέτρους εκτύπωσης (ταχύτητα εκτύπωσης, ύψος στρώματος που γίνεται η εκτύπωση, θερμοκρασία εκβολής του κάθε υλικού) με σκοπό τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό αυτών. Κατά τη διαδικασία αυτή δεν ακολουθήθηκε κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία επιλογής παραμέτρων. Οι παράμετροι επιλέχθηκαν με βάση τις ιδιότητες που έχει το κάθε υλικό, τις παραμέτρους του χρησιμοποιούμενου εκτυπωτή και στη συνέχεια μέσω δοκιμής και σφάλματος καταλήξαμε στις παραμέτρους που αναγράφονται στον Πίνακα 8. Έπειτα, οι παράμετροι αυτές εισάγονται και ελέγχονται πρώτα στο *Simplify3D*. Το πρόγραμμα αυτό υποδεικνύει το κάθε βήμα που πρόκειται να ακολουθήσει ο εκτυπωτής κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, χωρίς ωστόσο να είναι δυνατή η πλήρης αποφυγή άστοχης ή αναποτελεσματικής εκτύπωσης (αναποτελεσματική συγκόλληση υλικών, ροή νήματος και υπερθέρμανση, **Εικόνα 38**).



Εικόνα 38: Αποτυχημένη προσπάθεια εκτύπωσης δείγματος TPU-PETG, με πυκνότητα 20% PETG και 100% πυκνότητα TPU

Εν συνεχεία, αφού έχουν εκτυπωθεί και τα πέντε δείγματα, ξεκινάει η διαδικασία της σάρωσης (*scan*). Με την τριδιάστατη σάρωση δίνεται η δυνατότητα τόσο κατασκευής εξαρτημάτων για τα οποία δεν είναι διαθέσιμα τα κατασκευαστικά σχέδια, όσο και επανασχεδίασης και βελτιστοποίησης κατασκευών μέσω εργαλείων *Computer Aided Engineering (CAE)*.



Εικόνα 39: Διάγραμμα ροής αντίστροφης σχεδίασης [73]

Η μετατροπή του μοντέλου CAD σε κατάλληλο αρχείο εξαγωγής, αποτελεί το επόμενο στάδιο της τριδιάστατης εκτύπωσης και είναι το μεταβατικό στάδιο του ψηφιακού μοντέλου σε αρχείο κατάλληλο και αναγνωρίσιμο για το λογισμικό του 3D εκτυπωτή. Το αρχείο εξαγωγής είναι σε μορφή STL (STereoLithography), το οποίο έχει καθιερωθεί ως στάνταρ και σχεδόν όλα τα CAD συστήματα μπορούν να εξάγουν τέτοιο αρχείο. Στο αρχείο STL κωδικοποιείται πλήρως η γεωμετρική περιγραφή του αντικειμένου ως πλέγμα αλληλοσυνδεδεμένων τριγωνικών εδρών. Αναπαριστούν γεωμετρικά στο χώρο ολόκληρο το κλειστό σύνολο επιφανειών που απαρτίζουν. Σε ένα τριδιάστατο στερεό μοντέλο, διαχωρίζονται οι επιφάνειες σε προσανατολισμένες στο χώρο τριγωνικές έδρες που θυμίζουν την πολυεδρική όψη μιας επιφάνειας ενός κατεργασμένου διαμαντιού. Οι έδρες αυτές διασυνδέονται μεταξύ τους με προκαθορισμένο τρόπο, έτσι ώστε η κάθε μια να μοιράζεται υποχρεωτικά μία κοινή πλευρά και δύο κοινές κορυφές με κάποια γειτονική της. Επειδή τα αρχεία STL χρησιμοποιούν στοιχειώδη επίπεδα, δεν μπορούν να αναπαραστήσουν καμπύλες επιφάνειες, παρά μόνο κατά προσέγγιση. Η αύξηση του αριθμού των στοιχειωδών τριγώνων επιτρέπει καλύτερη προσέγγιση, αλλά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του αρχείου. Μεγάλα και πολύπλοκα αρχεία σημαίνουν μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας και κατασκευής. Τυπικά ένα σύνθετο CAD μοντέλο που εξάγεται σε STL format έχει μέγεθος μεταξύ 1-1.5 MB. [73]

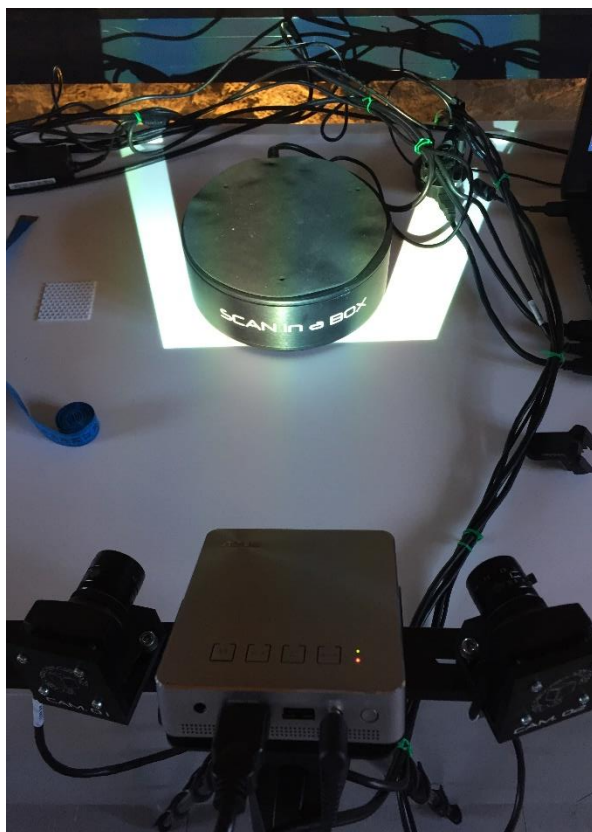
Σκοπός της διαδικασίας αυτής λοιπόν, είναι να καταγράψουμε την κάμψη με τη βοήθεια του σαρωτή *Scan in a Box* και του λογισμικού IDEA (εικόνα 39). Απαρτίζεται από την κάμερα, τη δέσμη λέιζερ και την περιστροφική πλάκα σάρωσης. Η δέσμη λέιζερ προβάλλει

μία γραμμή στο υπό εξέταση αντικείμενο και η κάμερα καταγράφει την απεικόνιση της γραμμής λέιζερ καθώς αυτό περιστρέφεται. Το πρόγραμμα μετατρέπει την πληροφορία σε ένα νέφος σημείων και δημιουργείται ένα 3d πλέγμα μέσω βελτιστοποίησης και ένωσης των σημείων.



Εικόνα 40: Τριδιάστατος σαρωτής

Αρχικά σαρώνονται όλα τα δοκίμια προκειμένου να καταγραφεί η αρχική τους κατάσταση. Στη συνέχεια εφαρμόζεται συγκεκριμένος ρυθμός θέρμανσης μέσω hotplate, ξεκινώντας από τους 35 °C μέχρι τους 80 °C, ενώ παρατηρείται και καταγράφεται ο χρόνος που χρειάζεται το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά μέχρι τη κάμψη. Ακολουθεί σάρωση και στη συνέχεια αφήνεται το δοκίμιο με φυσική (ήπια, T περιβάλλοντος) ψύξη να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, ώστε να σαρωθεί εκ νέου.



Εικόνα 41: Απαραίτητο calibration της κάμερας και της περιστροφικής τράπεζας για να ξεκινήσει η σάρωση των αντικειμένων

Η διαδικασία αυτή γίνεται για κάθε δείγμα ξεχωριστά και επαναλαμβάνεται 10 φορές (2 δοκίμια από 5 διαφορετικούς συνδυασμούς που επιλέχθηκαν) προκειμένου να μελετηθούν οι κύκλοι θέρμανσης-ψύξης του υλικού αλλά και το πόσο αυτό θα λυγίσει κάθε φορά.

Δοκίμια	t (min)	T (°C)	Χρόνος σάρωσης (min)
146840	00.03.41	83 °C	00.06.00
86260	00.02.53	79 °C	00.03.00
128460	00.03.50	80 °C	00.05.00
148640	00.04.43	82 °C	00.07.00
64240	00.01.32	65 °C	00.01.32

Πίνακας 3: Χρόνος που χρειάστηκε μέχρι τη κάμψη αλλά και θερμοκρασία στην οποία λύγισαν τα δοκίμια

Η στιγμή που ορίσαμε πως ένα δοκίμιο λυγίζει μελετήθηκε για θερμοκρασίες από τους 60 έως και τους 90 °C. Παρατηρήθηκαν διάφορες γωνίες λυγίσεως και μετρήθηκαν στο Solidworks. Ωστόσο λίγα ήταν τα δοκίμια που χρειάστηκε αρκετός χρόνος για να φθάσουν τους 90 °C και να λυγίσουν. Τα δοκίμια με τις περισσότερες στρώσεις κατάφεραν να λυγίσουν σε τόσο μεγάλες θερμοκρασίες λόγω του πάχους τους και για το λόγο αυτό απορρίφθηκαν. Οι θερμοκρασίες που σημειώνονται στον πίνακα 3 είναι αυτές στις οποίες παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη γωνία λύγισης.

6.3 Δοκίμια

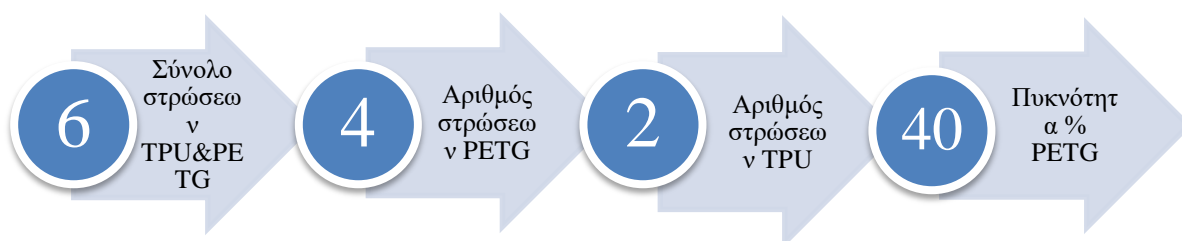
Τα δοκίμια είναι τετραγωνικής διατομής και οι διαστάσεις τους είναι $50 \times 50 \text{ mm}$, και το πάχος κάθε *layer* = 0.2 mm . Η επιλογή του πάχους *layer* αποτελεί μια μέση λύση για να δημιουργήσουμε ένα ποιοτικά εκτυπωμένο και όμορφο αντικείμενο σε καλή τιμή, χωρίς μεγάλη αναμονή. Οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν για την εκτύπωση της ψύκτρας είναι αντιπροσωπευτικές των διαστάσεων που είχε ήδη υπάρχουσα ψύκτρα H/Y στο εργαστήριο. Εν συνεχεία, εξετάστηκαν διάφορες παράμετροι πάχους των *layers* αλλά και διαφορετικών πυκνοτήτων και οι βέλτιστες τιμές αποτέλεσαν σημείο αναφοράς για το σύστημα TPU-PETG. Η πυκνότητα % αναφέρεται στο κατά πόσο γεμάτες η άδειες θα είναι σε υλικό οι κλειστές δομές του αντικειμένου προς εκτύπωση. Η πυκνότητα, ή αλλιώς ποσοστό πλήρωσης, εκφράζεται σαν ποσοστό επί της εκατό. Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό, τόσο περισσότερο υλικό θα χρησιμοποιηθεί, όπου το 100% μας δίνει ένα πλήρως συμπαγές αντικείμενο. Η στιβαρότητα και το τελικό βάρος του 3D εκτυπωμένου αντικειμένου εξαρτώνται άμεσα από τη ρύθμιση αυτή. Είναι καλό στα αντικείμενα που είναι λειτουργικά, οπότε και υφίστανται μηχανική καταπόνηση, να επιλέγουμε κάποιο από τα υψηλότερα ποσοστά. Διαφορετικά αν το μοντέλο προορίζεται να είναι αντικείμενο παρουσίασης είναι ασφαλές να επιλέξουμε μια χαμηλότερη τιμή. Οι πυκνότητες που επιλέχθηκαν για τα δείγματά μας είναι 20%, 40%, 60% και 100%.

Αρχικά βρέθηκαν 16 διαφορετικοί συνδυασμοί (πίνακας 4) με τη βοήθεια της μεθόδου Taguchi και εκτυπώθηκαν 4 ίδια δοκίμια για καθέναν από τους 16 διαφορετικούς συνδυασμούς, εκ των οποίων 5 από αυτούς επιλέχθηκαν για την τελική εκτύπωση και σύγκριση των δοκιμίων. Επομένως το ελάχιστο πάχος που έχει ένα δοκίμιο είναι 0.8 mm και το μέγιστο φθάνει τα 3.2 mm .

Δείγματα							
1.	42220	5.	64240	9.	86260	13.	1082100
2.	62440	6.	84420	10.	1064100	14.	128460
3.	82660	7.	1046100	11.	126620	15.	148640
4.	1028100	8.	124860	12.	146840	16.	168820

Πίνακας 4: Αρχικός αριθμός δειγμάτων

Οι ονομασίες που έχουν λάβει τα παραπάνω δοκίμια υποδηλώνουν τα χαρακτηριστικά τους, όπως π.χ. φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για το δοκίμιο **64240**:



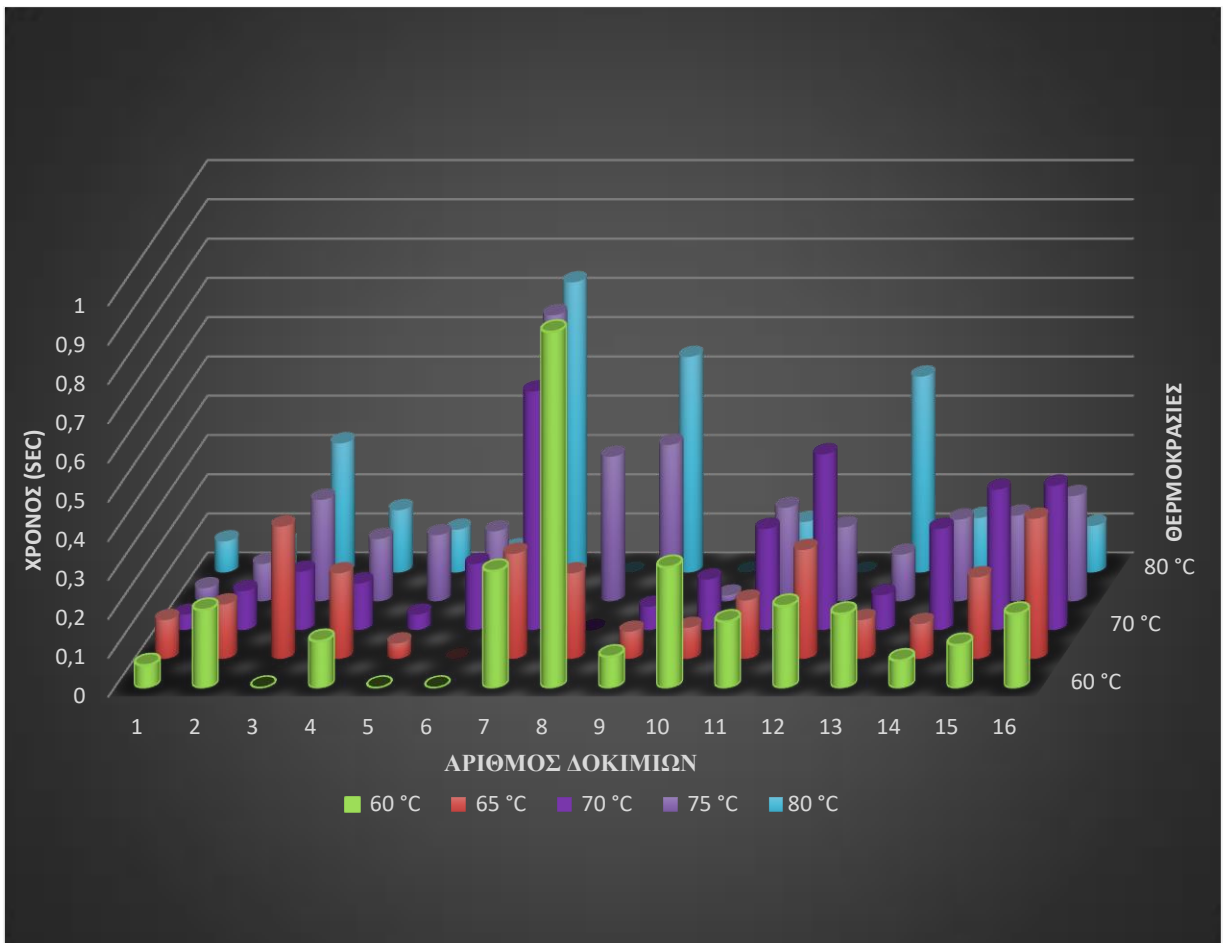
Έπειτα, το κάθε εκτυπωμένο δοκίμιο θερμάνθηκε σε θερμαντική εστία καταγράφοντας κάθε φορά τη συμπεριφορά του δοκιμίου μέσω μιας κάμερας. Μέσα από αυτή τη διαδικασία ήταν εφικτό να παρατηρήσουμε την κάμψη του κάθε εκτυπωμένου δείγματος ξεχωριστά, να καταγράψουμε τον χρόνο που χρειάστηκε αλλά και τη θερμοκρασία στην οποία έγινε η κάμψη αυτή.



Εικόνα 42: Δείγμα 86260. Κατάσταση δείγματος κατά τη θέρμανση του σε hotplate, αρχικά στους 63 °C (αριστερή εικόνα) και η κάμψη του δείγματος στους 70 °C (δεξιά εικόνα).

Το επόμενο βήμα, αφού έγιναν όλες οι βιντεοσκοπήσεις και των 16 δειγμάτων, ήταν να παρατηρηθούν τα βίντεο προκειμένου να σημειωθεί ο χρόνος που χρειάζεται το κάθε δοκίμιο για να λυγίσει, έτσι όπως φαίνεται και στην εικόνα 42 από τα δεξιά. Έπειτα, όλα τα δείγματα θερμάνθηκαν ξανά στο hotplate με σκοπό να σκαναριστούν. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν από 60 °C έως τους 80 °C, με βήμα ανά 5 βαθμούς. Η επιλογή των θερμοκρασιών έγινε με βάση των χαρακτηριστικών που υποδηλώνονται στους πίνακες 1 και 2. Μετέπειτα, καταγράφηκαν σε ένα αρχείο excell οι χρόνοι στους οποίους το κάθε δοκίμιο άρχισε να ανταποκρίνεται στη λύγιση.

Στο ιστόγραμμα που παρουσιάζεται στην εικόνα 43 έχουν καταγραφεί οι τιμές των χρόνων και των θερμοκρασιών που μετρήθηκαν από τα βίντεο. Στον άξονα z παρουσιάζονται οι τιμές του χρόνου που χρειάστηκε το κάθε δοκίμιο μέχρι τη λύγιση. Στον x άξονα παρατίθενται τα δοκίμια με τη σειρά που είναι και στον πίνακα 4, και τέλος στον άξονα y καταγράφονται οι θερμοκρασίες στις οποίες παρατηρήθηκε η λύγιση.



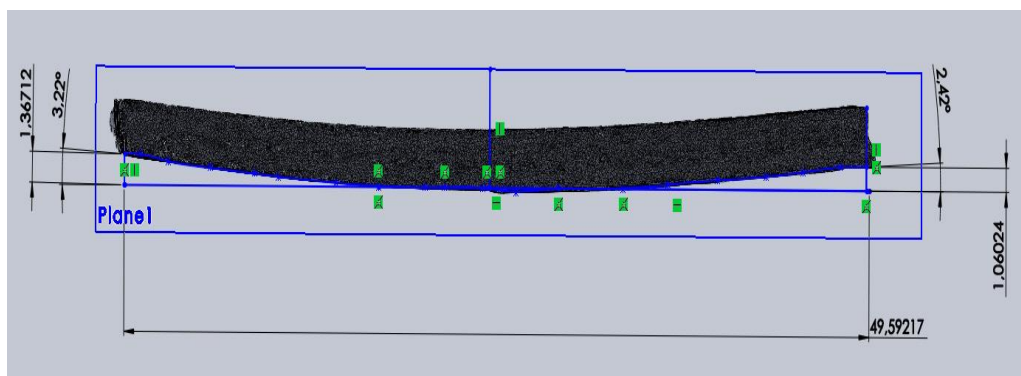
Εικόνα 43: Γράφημα 3D για την αναπαράσταση της θερμικής απόκρισης 16 δοκιμίων

Μέσα από τα παραπάνω δεδομένα που συλλέχθηκαν, παρατηρήθηκε πως ορισμένα δείγματα δεν κατάφεραν να λυγίσουν καθόλου. Κάποια άλλα δοκίμια χρειάστηκε πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία για να ανταποκριθούν στη λύγιση και άλλα λύγισαν σε μεγαλύτερο χρόνο από τα υπόλοιπα. Με βάση τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν καταφέραμε να απορρίψουμε ορισμένα δοκίμια προκειμένου να μειωθεί ο όγκος του πειράματος.

Στη συνέχεια, αφού μειώθηκε ο αριθμός των δειγμάτων κατά 6, σκανάραμε τα δείγματά μας με σκοπό να τα εισάγουμε στο Solidworks σε μορφή .stl αρχείου και να μετρήσουμε τη γωνία λύγισης του κάθε δείγματος ξεχωριστά. Προκειμένου να υπολογιστεί η γωνία λύγισης για κάθε δοκίμιο μετρήθηκε η γωνία από τη δεξιά και από την αριστερή πλευρά και βγήκε ο μέσος όρος αυτής (εικόνα 44). Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις γωνίες που μετρήθηκαν μέσω του προγράμματος.

Δείγματα	Γωνία λύγισης ($\bar{\theta}$)	Θερμοκρασία (°C)
42220	2.05°	75
64240	4.57°	70
1046100	4.45°	65
86260	3.09°	70
1064100	6.4°	75
126620	2.84°	80
146840	2.75°	75
128460	2.82°	80
148640	3.42°	80
168820	3.59°	80

Πίνακας 5: Μέτρηση γωνιών μέσω του προγράμματος Solidworks



Εικόνα 44: Απεικόνιση σκαναρισμένου δοκιμίου Solidworks που έχει υποστεί θέρμανση και μέτρηση γωνιών λύγισης

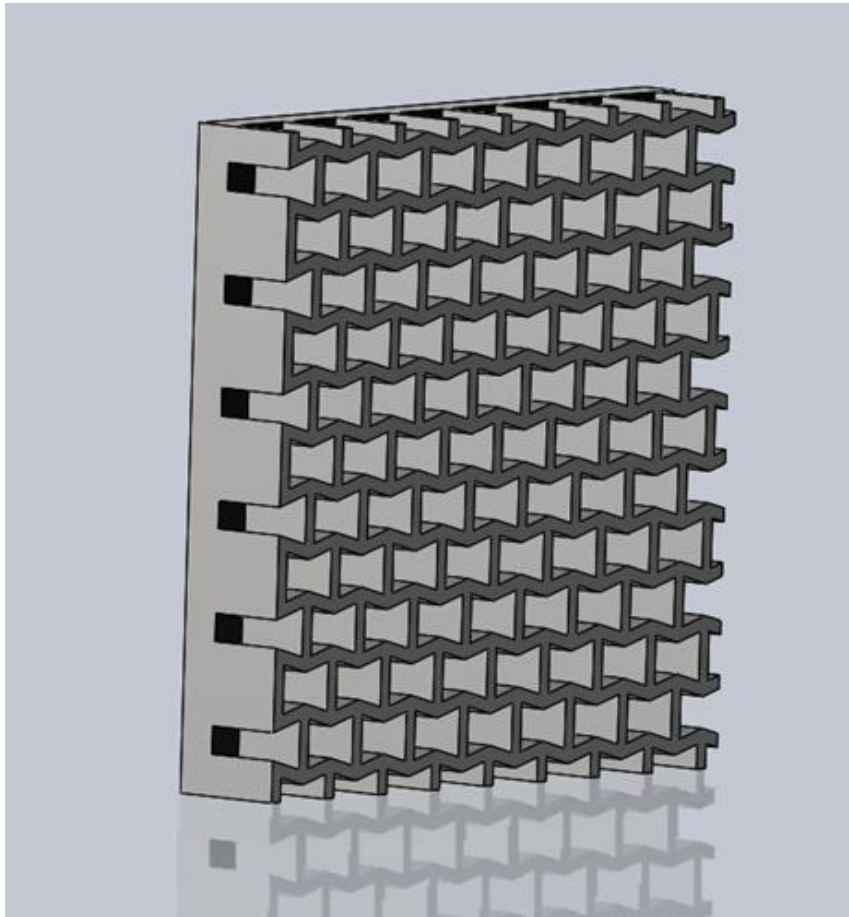
Στην εικόνα 44 εκτός από τον υπολογισμό των γωνιών προκειμένου να υπολογιστεί ο μέσος όρος αυτών, έχουν μετρηθεί και οι αποστάσεις που έχει το λυγισμένο δοκίμιο από το νοητό επίπεδο αλλά και το συνολικό μήκος αυτού.

Ωστόσο από τα 10 παραπάνω δοκίμια δεν επιλέχθηκαν όλα προς εκτύπωση. Όπως παρατηρούμε στον πίνακα 5, τα δοκίμια που είχαν infill 20% απορρίφθηκαν καθώς είχαν ίδιο αριθμό στρώσεων σε TPU και PETG πράγμα που δεν βοηθούσε στην συγκεκριμένη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα μας. Για τον ίδιο λόγο απορρίφθηκαν και τα δοκίμια με infill 100%, καθώς δεν θα μπορούσε να σχεδιαστεί η επαναλαμβανόμενη δομή.

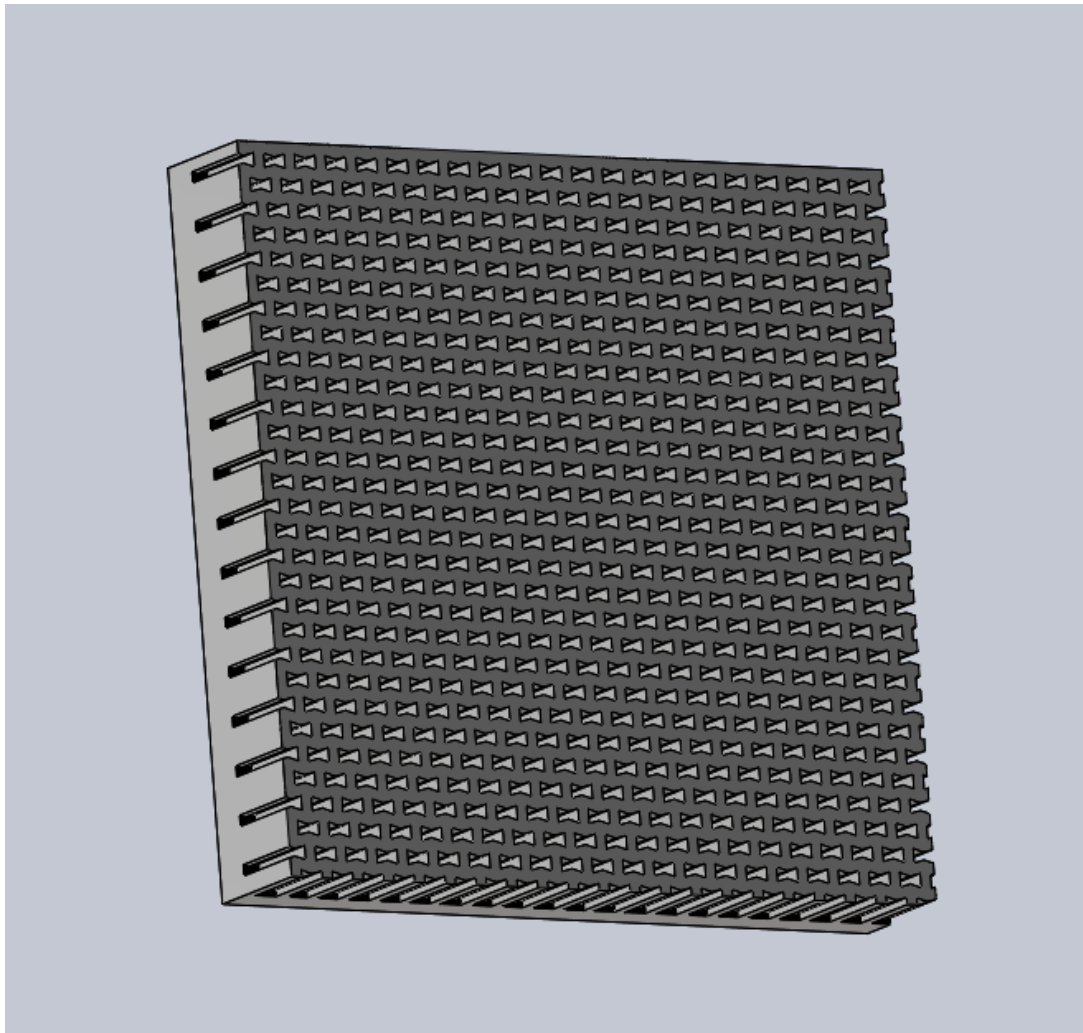
6.4 Εκτύπωση δοκιμίων-Γεωμετρία

6.4.1 Εκτύπωση δοκιμίων

Οι εκτυπώσεις έγιναν για 5 διαφορετικά δοκίμια , με δύο διαφορετικές πυκνότητες, 40% και 60% σε PETG. Το TPU εκτυπώθηκε με σταθερή πυκνότητα 100% σε όλα τα δοκίμια. Η γεωμετρία που επιλέχθηκε για το PETG είναι η *επαναλαμβανόμενη δομή(re-entrant structure)* καθώς είναι δομή που εκδηλώνει αρνητικό λόγο Poisson και χρησιμοποιείται συχνά σε αυξητικές δομές. Η παραμόρφωση που υφίσταται εξαιτίας της δομής αυτής εμφανίζεται με τη μορφή κάμψης/λύγισης των διαγώνιων άκρων του δοκιμίου με την επιβολή θερμοκρασίας, πράγμα επιθυμητό για την επίτευξη του πειράματός μας. Η δομή αυτή σχεδιάστηκε στο Solidworks, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 45: Σχεδίαση δοκιμίου με 40% πυκνότητα σε PETG (επαναλαμβανόμενη δομή (re-entrant structure))



Εικόνα 46: Σχεδίαση δοκιμίου με 60% πυκνότητα σε PETG (επαναλαμβανόμενη δομή(re-entrant structure))

Βασική προϋπόθεση για την δημιουργία ενός τέτοιου αρχείου είναι το 3D μοντέλο να είναι στερεό (solid model). Στερεό θεωρείται το 3D μοντέλο του οποίου ο όγκος καθορίζεται απόλυτα και σαφώς από τις περιβάλλουσες επιφάνειες, είναι δηλαδή εντελώς «κλειστό» έτσι ώστε να είναι σαφές πιο τμήμα του χώρου είναι εντός του μοντέλου και πιο εκτός. Σε ένα στερεό μοντέλο είναι επίσης σαφώς καθορισμένη η τοπολογία των επιφανειών, ποιες δηλαδή επιφάνειες συνδέονται μεταξύ τους και μέσω ποιων ακμών, ενώ δεν επιτρέπονται τεμνόμενες ή ελεύθερες ακμές (ακμές που ανήκουν σε μία μόνο επιφάνεια).

Με βάση το STL μοντέλο του αντικειμένου που σχεδιάσαμε παραπάνω, εκτελούνται οι προπαρασκευαστικές εργασίες έχοντας ως πρώτη την επιλογή προσανατολισμού και των παραμέτρων κατασκευής. Προσανατολισμός κατασκευής ορίζεται η θέση του αντικειμένου σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής και ειδικά τον άξονα

κατασκευής Z, ο οποίος ορίζει την κατεύθυνση κατά την οποία προστίθενται τα διαδοχικά στρώματα. Ακολουθεί η διαδικασία του τεμαχισμού (slicing) όπου το αντικείμενο τέμνεται από διαδοχικά επίπεδα, τα οποία είναι παράλληλα σε αυτό της πλατφόρμας (επίπεδο XY). Η απόσταση αυτή περιγράφεται και με τον όρο **βήμα τεμαχισμού** και επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του τελικού αντικείμενου. Αποτέλεσμα της διαδικασίας τεμαχισμού είναι το αρχείο διατομών (**sliced file**), μία ιεραρχημένη από κάτω προς το πάνω «στοίβα» διδιάστατων τομών, που περιγράφουν γεωμετρικά τα στρώματα τα οποία πρέπει να κατασκευασθούν από τη μηχανή για να «χτισθεί» το αντικείμενο. [74]

Μετά την ολοκλήρωση των βημάτων που προαναφέρθηκαν ακολουθεί η εισαγωγή του αρχείου στη συσκευή του εκτυπωτή για τη ρύθμιση ορισμένων κατασκευαστικών παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία εκτύπωσης, ταχύτητα κίνησης και ρυθμό εναπόθεσης υλικού) και έπειτα ξεκινά η εκτύπωση. Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης δεν είναι απαραίτητη η εποπτεία από τον χειριστή, καθώς πρόκειται για αυτοματοποιημένη διαδικασία. Ωστόσο, μερικές φορές η συσκευή μπορεί να κολλήσει ή μπορεί να προκύψει κάποιο πρόβλημα με το υλικό που εκτυπώνεται ειδικά αν η εκτύπωση κρατάει αρκετές ώρες.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής φάσης το αντικείμενο απομακρύνθηκε με τη βοήθεια ειδικών εργαλείων.

Για κάθε περίπτωση εκτυπώθηκαν 2 δοκίμια, συνεπώς η πειραματική διαδικασία επαναλήφθηκε 10 φορές. Αφού έγιναν οι εκτυπώσεις μετρήθηκαν τα πάχη και τα πλάτη των δοκιμίων με ένα παχύμετρο και καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Δοκίμια	Πάχος(mm)	Πλάτος(mm)
64240	1.20 ± 0.10	49.86
86260	1.60 ± 0.11	50.12
128460	2.40 ± 0.08	50.12
146840	2.80 ± 0.09	50.11
148640	2.80 ± 0.07	50.00

Πίνακας 6: Μετρήσεις των δοκιμίων που εκτυπώθηκαν με τη χρήση ενός παχύμετρου

Στον πίνακα 6 παρατηρούμε πως το πάχος όλων των δοκιμίων είναι ελάχιστα μεγαλύτερο από το αναμενόμενο. Η ακρίβεια του εκτυπωμένου αντικειμένου εξαρτάται από την απόδοση του συστήματος τριδιάστατης εκτύπωσης και του λογισμικού CAM, όσον αφορά την ικανότητα ελέγχου της κίνησης και της παροχής υλικού από το ακροφύσιο καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης.

6.4.2 Γεωμετρία δοκιμίων

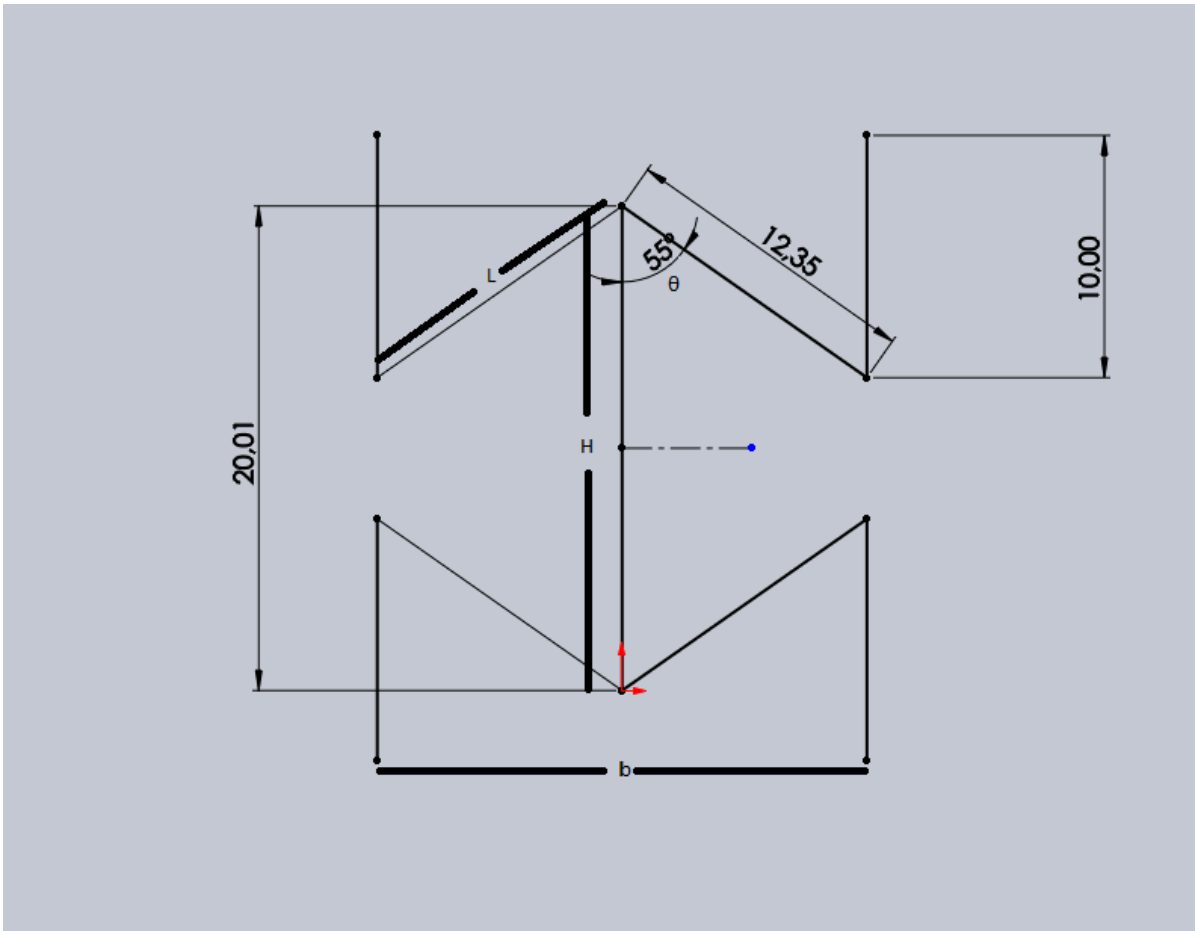
Με τη χρήση του Solidworks καταφέραμε να σχεδιάσουμε από την αρχή την επαναλαμβανόμενη γεωμετρία που χρειάζεται να έχει η ψύκτρα μας. Έχοντας ως βάση λοιπόν την εξαγωνική μοναδιαία κυψελίδα μπορούν να γίνουν υπολογισμοί για τις περισσότερες επαναλαμβανόμενες γεωμετρίες. Επομένως, ο λόγος Poisson αλλά και το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση φόρτισης εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$V_{12} = \frac{\sin \theta \left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{\cos^2 \theta}$$

$$E_1 = K \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta \right)}{b \cos^3 \theta}$$

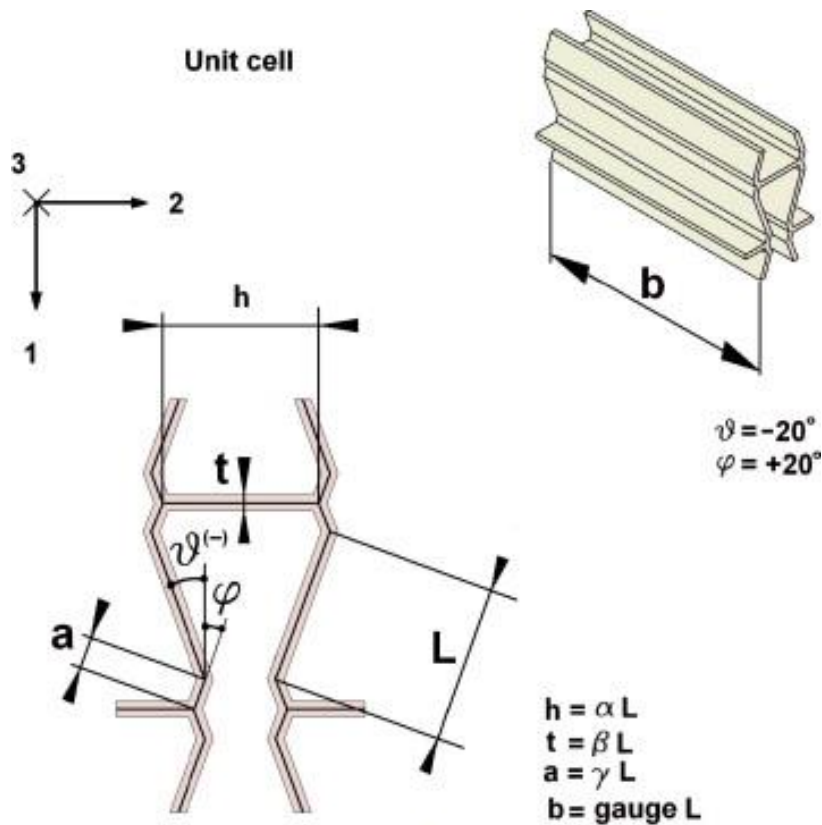
Όπου τα μεγέθη h , l , b και θ είναι όπως ορίζονται στην εικόνα 48. [76]

Η εικόνα που ακολουθεί αποτελεί το αρχικό μας σχέδιο για τον σχεδιασμό της ψύκτρας και αποτέλεσε αφετηρία για κάθε πυκνότητα που θέλαμε να σχεδιάσουμε στην πορεία.



Εικόνα 47: 2D σχεδίαση επαναλαμβανόμενης δομής με χρήση του προγράμματος Solidworks

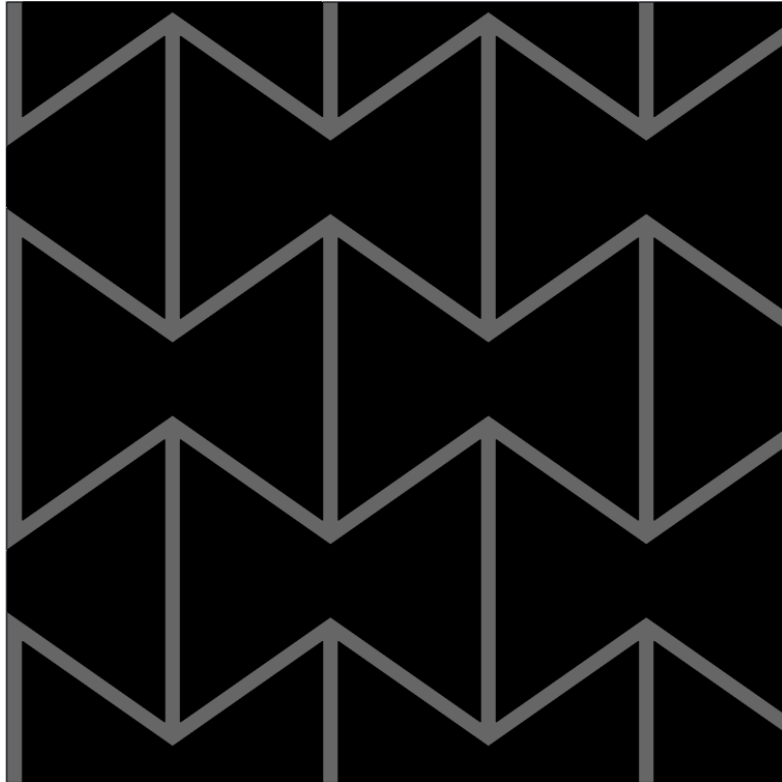
Όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 47, οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας αυτής, επιλέχθηκαν με βάση μια θεωρητική προσέγγιση βασισμένη στις θεωρίες Voigt και Reuss. Τις θεωρίες αυτές μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει προκειμένου να εκτελέσει παραμετρική ανάλυση για το σχεδιασμό πυρήνων σε κλασικές και πολυλειτουργικές κατασκευές τύπου σάντουιτς. [76]



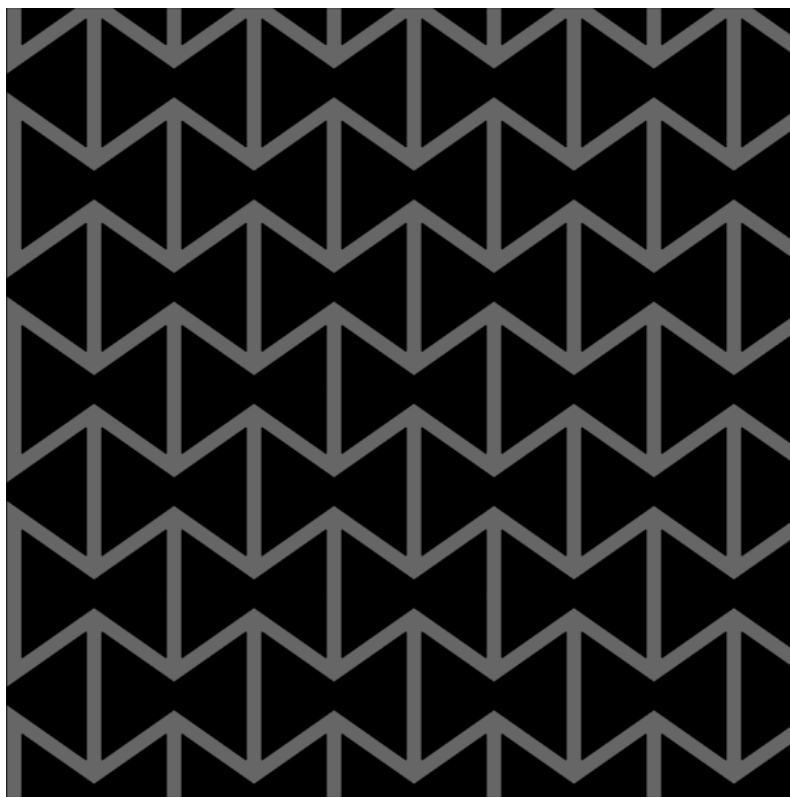
Εικόνα 48: Μοναδιαίο κελί μιας επαναλαμβανόμενης δομής [75]

Προκειμένου να σχεδιαστούν και οι 3 πυκνότητες (20%, 40% και 60%) έπρεπε να διαμορφωθούν αντίστοιχα και οι τιμές των γωνιών αλλά και της κλίμακας που απαιτείται κάθε φορά για να έχουμε το επιθυμητό σχέδιο.

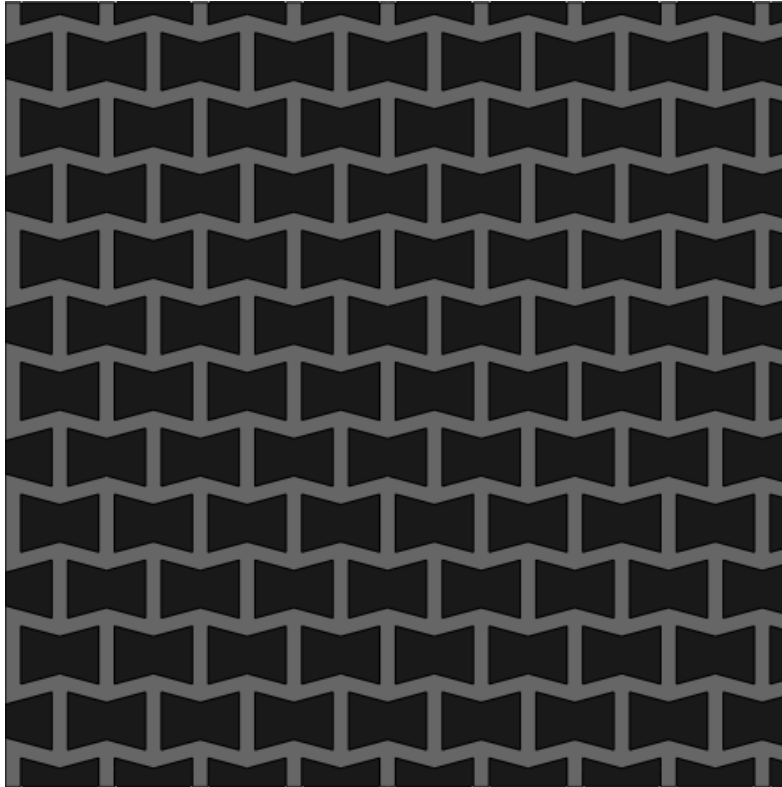
Επομένως για τον σχεδιασμό των δοκιμίων με πυκνότητα 20% σε PETG, η γωνία που χρησιμοποιήθηκε ήταν $\theta = 55^\circ$ και κλίμακα 100%. Για τα δοκίμια που έχουν πυκνότητα 40%, η γωνία αυξήθηκε στις 75° και η κλίμακα μειώθηκε στο 25%. Τέλος για τα δοκίμια με 60% πυκνότητα, η γωνία παρέμεινε στις 75° και η κλίμακα μειώθηκε στο 10%. Ωστόσο να σημειωθεί πως τα δοκίμια με πυκνότητα 20% απορρίφθηκαν εξαιτίας των ίσων στρωμάτων TPU και PETG αλλά και λόγω χαμηλής πυκνότητας σε PETG, γεγονός που δεν διευκόλυνε στην λύγιση του δοκιμίου κατά την θέρμανση.



Εικόνα 49: Επαναλαμβανόμενη δομή με 20% πυκνότητα σε PETG



Εικόνα 50: Επαναλαμβανόμενη δομή με 40% πυκνότητα σε PETG



Εικόνα 51: Επαναλαμβανόμενη δομή με 60% πυκνότητα σε PETG

Οι παραπάνω εικόνες σχεδιάστηκαν μέσω του προγράμματος Solidworks, έχοντας σαν πρότυπο την εικόνα 47 και αλλάζοντας τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Color Summarizer προκειμένου να γίνει ταυτοποίηση του ποσοστού πυκνότητας σε PETG.

6.5 Υλικά

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να εκτυπωθεί μια διμερής δομή αποτελούμενη από δύο υλικά που έχουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής (CTE), όπως παρατηρούμε και στους **πίνακες 1** και **2**. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια είναι TPU της Polymaker Industrial (PolyFlex™) και το PETG της 3DHUB. Το PolyFlex™ TPU95 είναι ένα νήμα με βάση την θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU) ειδικά σχεδιασμένο για να χρησιμοποιείται στους περισσότερους επιτραπέζιους εκτυπωτές 3D. Έχει διάμετρο 1.75mm και μπορεί να επιμηκύνεται περισσότερο από 3 φορές από το αρχικό τους μήκος.

Παράμετροι 3d εκτύπωσης	Μηχανικές ιδιότητες
<ul style="list-style-type: none"> • Θερμοκρασία κεφαλής: 210 °C- 230 °C • Ταχύτητα εκτύπωσης: 20mm/s-40mm/s • Επιφάνεια στρώματος εκτύπωσης: γυαλί, blue tape κ.α. 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% Modulus: 9.4 ± 0.3 Mpa • Αντοχή εφελκυσμού: 29 ± 2.8 Mpa • Επιμήκυνση σε κάμψη: 330.1 ± 14.9 Mpa

Πίνακας 7: Παράμετροι τριδιάστατης εκτύπωσης και μηχανικές ιδιότητες για το PolyFlex™ TPU95 [77]

Το MasterFill Premium PETG Pro συνδυάζει την ευκολία χρήσης του PLA με τη δύναμη και αντοχή του ABS. Έχει σταθερή διάμετρο 1.75 mm με βάρος 1 kg. Αντέχει σε θερμοκρασίες με T_g περίπου 78°C.

6.6 Παράμετροι εκτύπωσης

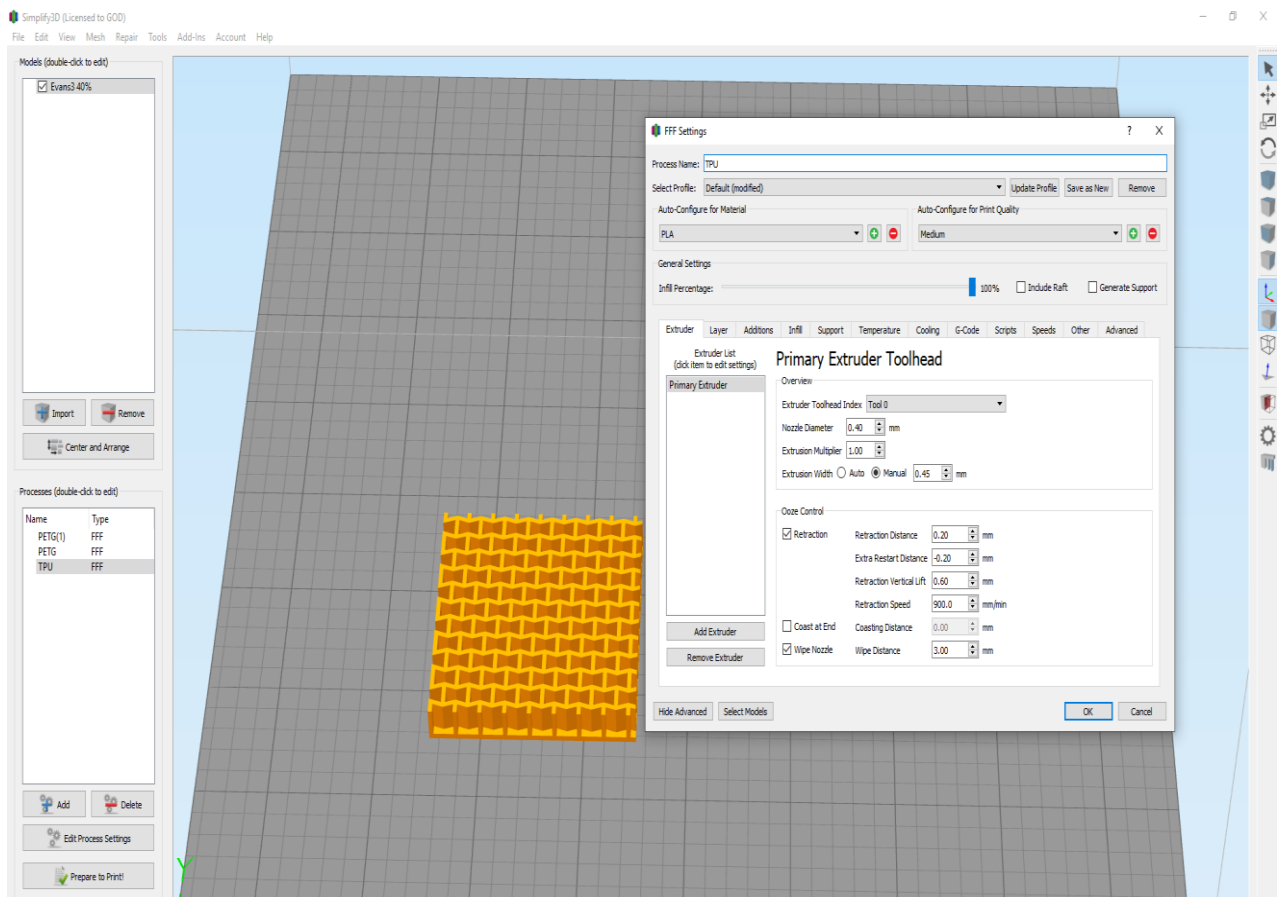
Το CAM λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την τριδιάστατη εκτύπωση είναι το Simplify3D. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το λογισμικό αυτό βρίσκονται στον πίνακα 8.

Παράμετροι	Τιμές για TPU	Τιμές για PETg
Διάμετρος κεφαλής εκτύπωσης-Nozzle diameter	0.40 mm	0.40 mm
Θερμοκρασία κεφαλής-Nozzle temperature	220 °C	230 °C
Ταχύτητα εκτύπωσης-Printing speed	1200 mm	1800 mm
Πάχος στρώσεων-Layer thickness	0.2 mm	0.2 mm
Σχέδιο πλήρωσης-Infill pattern	Rectilinear	Rectilinear

Γωνία κλίσης-Raster angle	45/135°	45/-45°
Πάχος εξώθησης -Extrusion width	0.45 mm	0.45 mm
Πολλαπλασιαστής εξώθησης- Extrusion multiplier	1,00	0.90

Πίνακας 8: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση των δοκιμίων

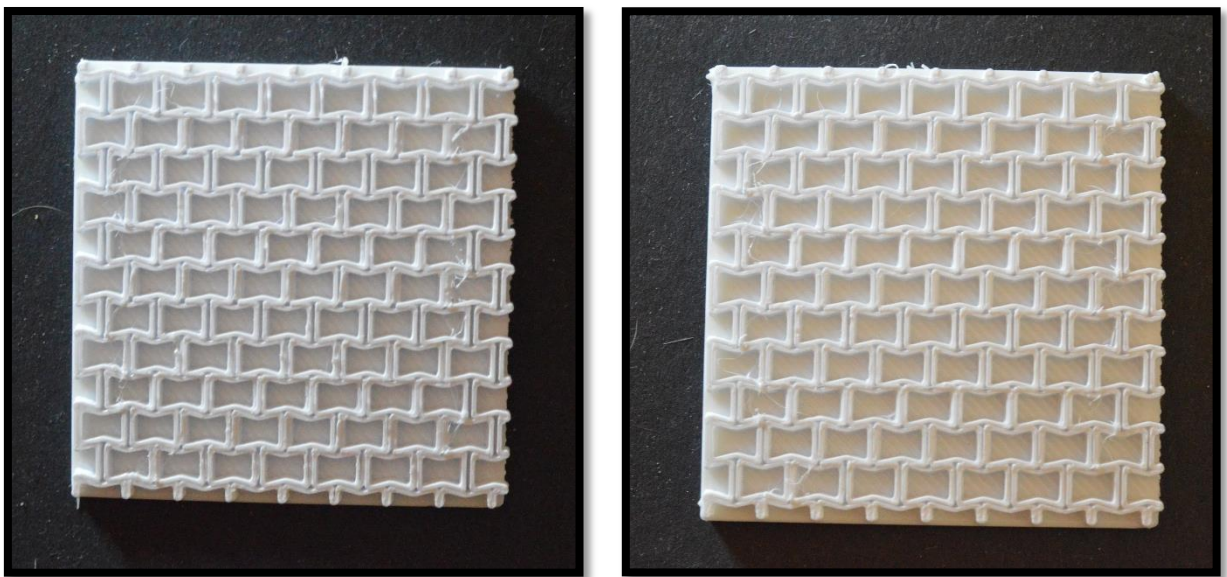
Οι κύριες παράμετροι ήταν ίδιες σε όλα τα δοκίμια αφού στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση μεταξύ των 5 υλικών που προαναφέραμε. Το πάχος στρώσης ορίστηκε ίσο με 0,2 mm για βέλτιστη αντοχή αλλά και εξοικονόμηση χρόνου, καθώς περαιτέρω μείωση του πάχους στρώσης θα αύξανε κατά πολύ το χρόνο κατεργασίας, συνεπώς και το κόστος, χωρίς να βελτιώνει σε ικανοποιητικό βαθμό την αντοχή του δοκιμίου. Ο προσανατολισμός εκτύπωσης που επιλέχθηκε είναι: το μήκος L του δοκιμίου κατά την κατεύθυνση του άξονα x(0°), το πάχος του κατά τον άξονα z και το πλάτος κατά τον άξονα y.



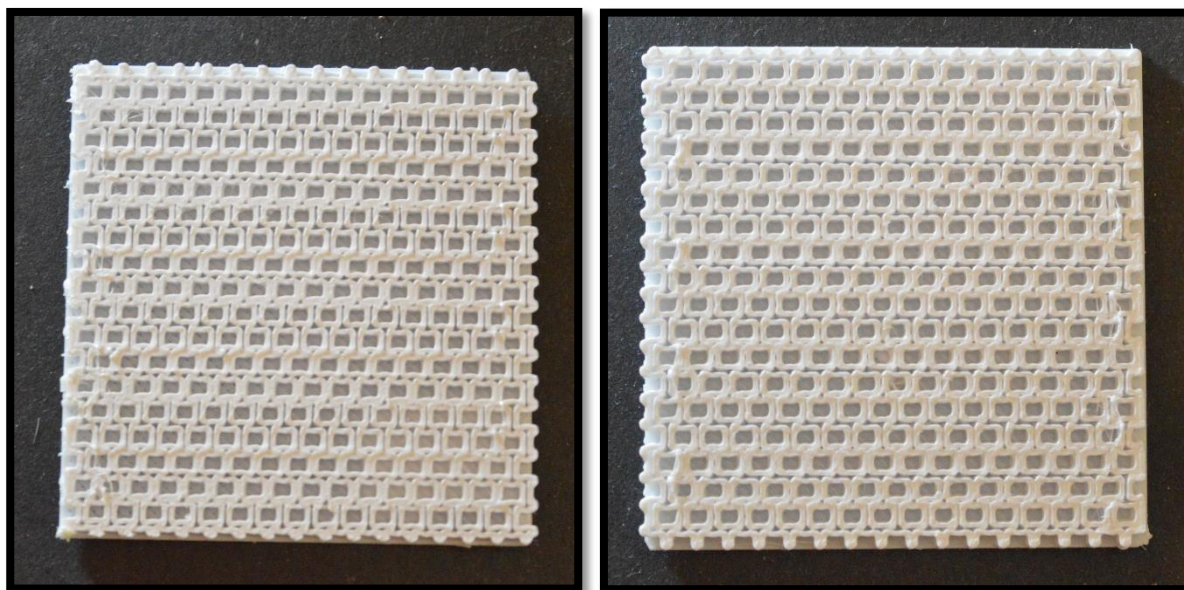
Εικόνα 52: Εικονική αναπαράσταση της θέσης του δοκιμίου στην τράπεζα εκτύπωσης μέσω του λογισμικού Simplify3D, κατά την παραμετροποίηση.

Δύο βασικές παράμετροι του G κώδικα που έπρεπε να προσέξουμε κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης που επηρεάζουν άμεσα το υλικό κατεργασίας ήταν η παράμετρος που ορίζει την ποσότητα υλικού που εξωθείται και η παράμετρος η οποία ορίζει την ταχύτητα με την οποία κινούνται τα μέρη του εκτυπωτή. Ουσιαστικά η πρώτη παράμετρος ορίζει την ποσότητα υλικού που εξωθείται, ενώ η δεύτερη παράμετρος καθορίζει την κίνηση όλων των κινητήρων του συστήματος, δηλαδή τόσο την ταχύτητα κίνησης της κεφαλής εκτύπωσης κατά τους XY άξονες (σε επίπεδο στρώσης) όσο και την παροχή του υλικού (όγκος υλικού που εξωθείται ανά μονάδα χρόνου).

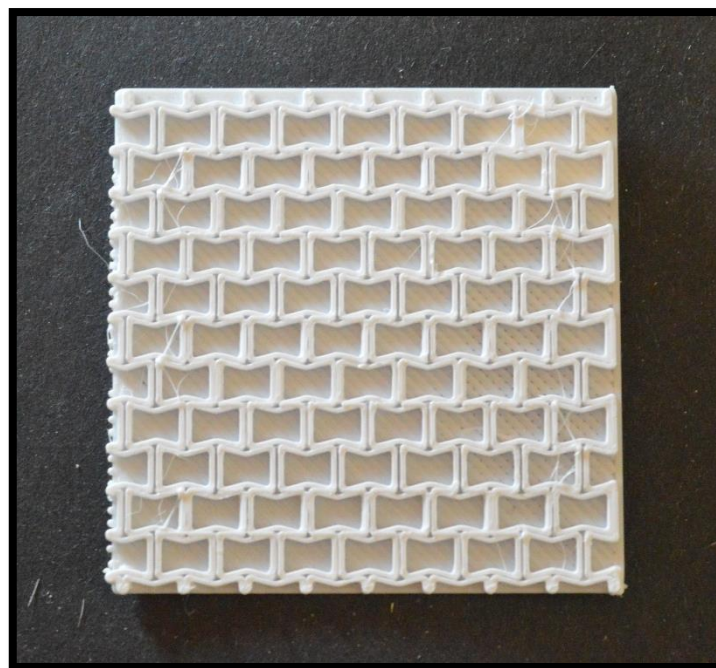
Αφού ορίστηκαν όλες οι παράμετροι στο CAM λογισμικό, δόθηκε εντολή στον εκτυπωτή να προχωρήσει στην εκτύπωση. Οι εκτυπώσεις μας έγιναν με επιτυχία και αυτό το βλέπουμε στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 53: Εκτυπωμένο δοκίμιο με 8 στρώσεις PETG, 6 TPU και πυκνότητα 40% (αριστερή εικόνα, δοκίμιο **148640**). Εκτυπωμένο δοκίμιο με 6 στρώσεις PETG, 8 TPU και πυκνότητα 40% (δεξιά εικόνα, δοκίμιο **146840**).



Εικόνα 54: Εκτυπωμένο δοκίμιο με 6 στρώσεις PETG, 2 TPU και πυκνότητα 60% (αριστερή εικόνα, δοκίμιο **86260**). Εκτυπωμένο δοκίμιο με 8 στρώσεις PETG, 4 TPU και πυκνότητα 60% (δεξιά εικόνα, δοκίμιο **128460**).



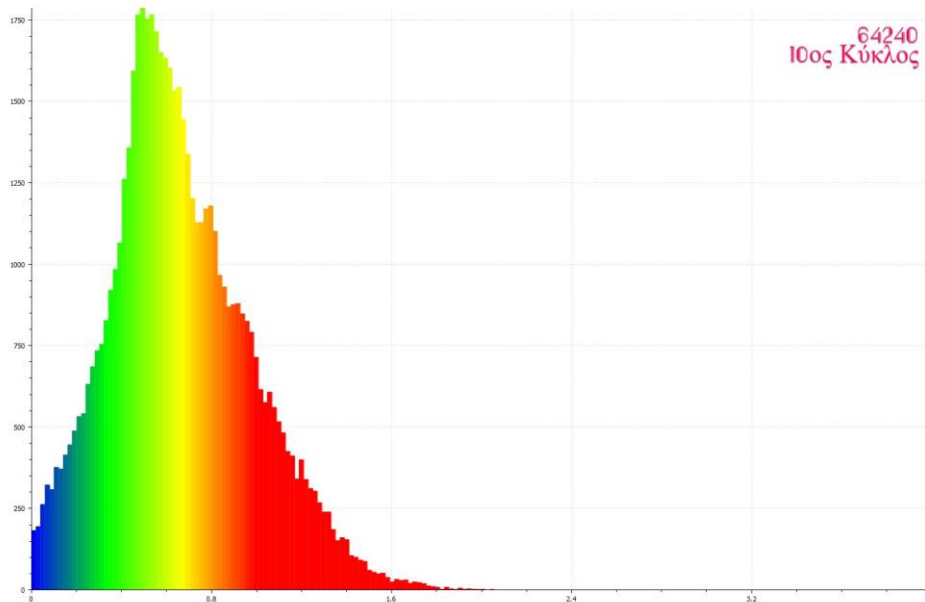
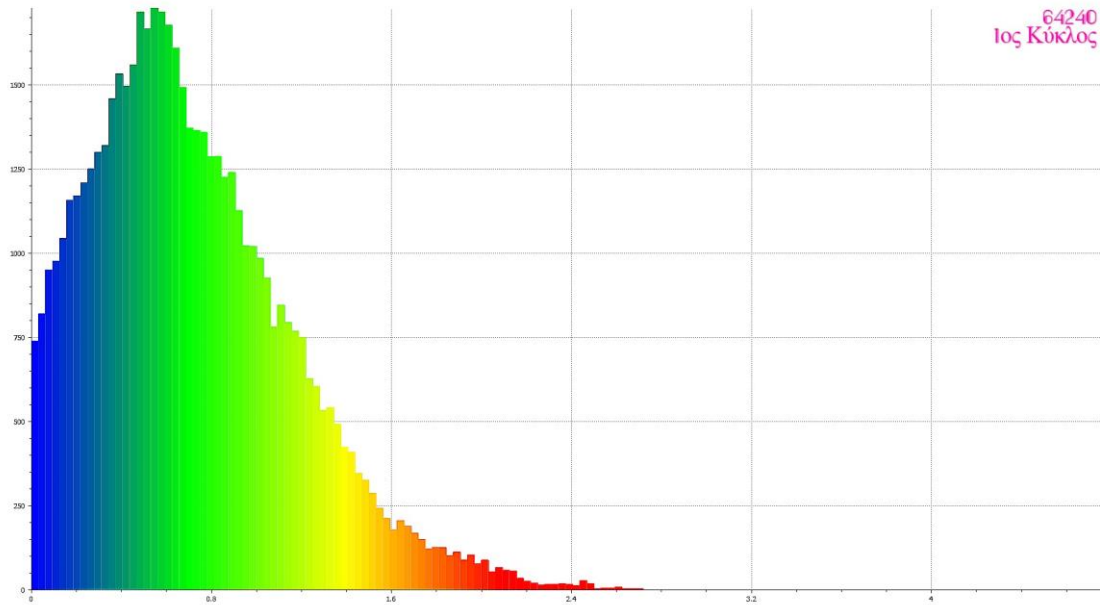
Εικόνα 55: Εκτυπωμένο δοκίμιο **64240**, με 4 στρώσεις PETG, 2 TPU και πυκνότητα 40%.

Προκειμένου όμως να επιτευχθεί ο σκοπός της παρούσας εργασίας πρέπει μετά την εκτύπωση να εξετασθούν όλα μας τα δείγματα έτσι ώστε να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά που έχουν κατά τη θέρμανσή τους στη θερμαντική εστία. Ακολουθούν

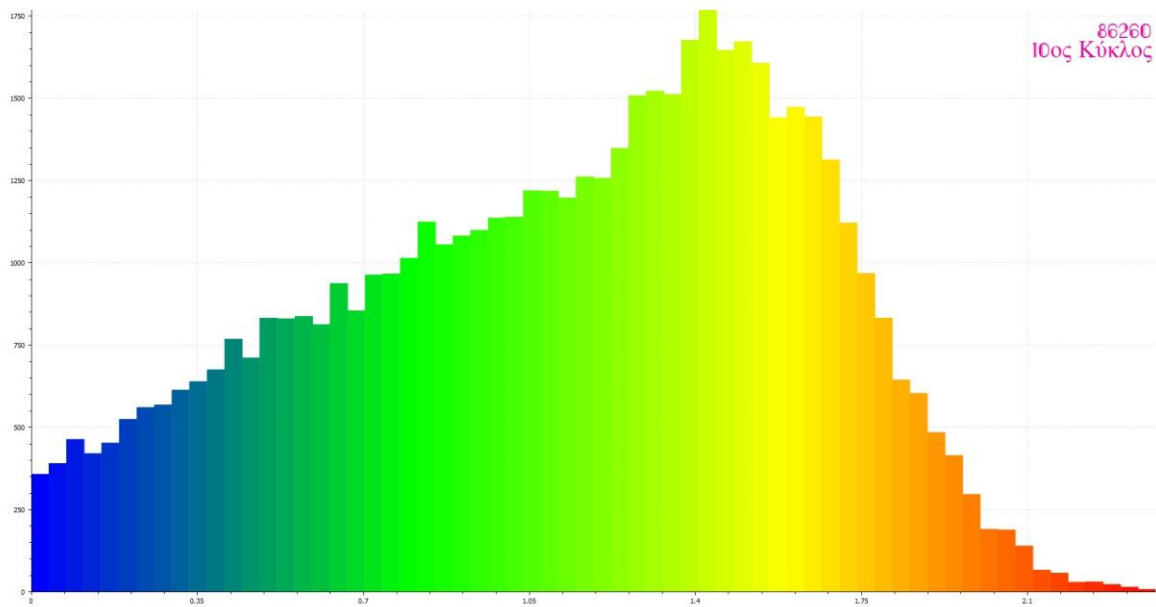
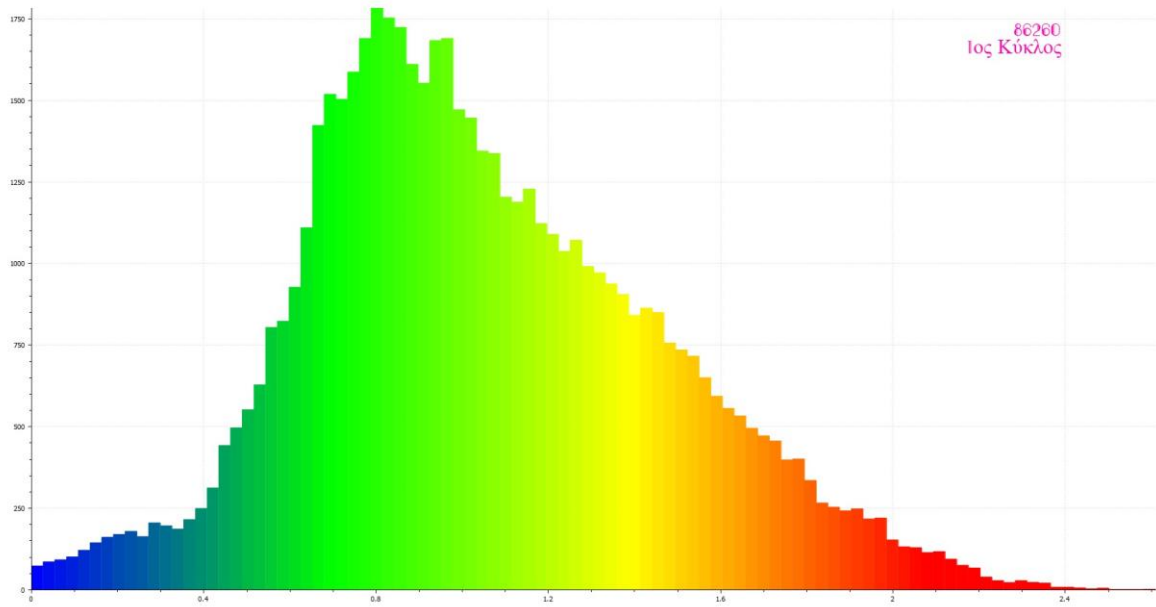
κύκλοι θέρμανσης ψύξης και καταγραφή της κάμψης με σκάνερ, όπως ήδη προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.1. Στη συνέχεια, τα stl αρχεία που μας έδωσε ο σαρωτής τα επεξεργαστήκαμε στο **CloudCompare**. Πρόκειται για ένα λογισμικό που δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα επεξεργασίας τριδιάστατων αντικειμένων. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία του προγράμματος αυτού ήταν η χρήση 2 αρχείων stl του ίδιου δοκιμίου, το ένα αρχείο ήταν αυτό που θερμάνθηκε και το άλλο ήταν αυτό που το αφήσαμε να κρυώσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο λόγος που χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό αυτό ήταν για να απεικονίσουμε την απόσταση που έχει κάθε δοκίμιο το οποίο έχει θερμανθεί σε σύγκριση με το δοκίμιο το οποίο έχει κρυώσει και έχει επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να απεικονίσουμε τη διαφορετική λύγιση που έχει σε κάθε κύκλο θέρμανσης-ψύξης το δοκίμιο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι αποστάσεις που υπολογίζει το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι σε μορφή απόλυτης τιμής, για το λόγο αυτό δεν υπάρχουν μονάδες μέτρησης στους άξονες. Πιο συγκεκριμένα, ο κάθετος άξονας y αναφέρεται στην ποσότητα των σημείων που έχει υπολογίσει το πρόγραμμα, ενώ ο οριζόντιος άξονας x αναφέρεται στην απόλυτη τιμή των αποστάσεων μεταξύ των σημείων.

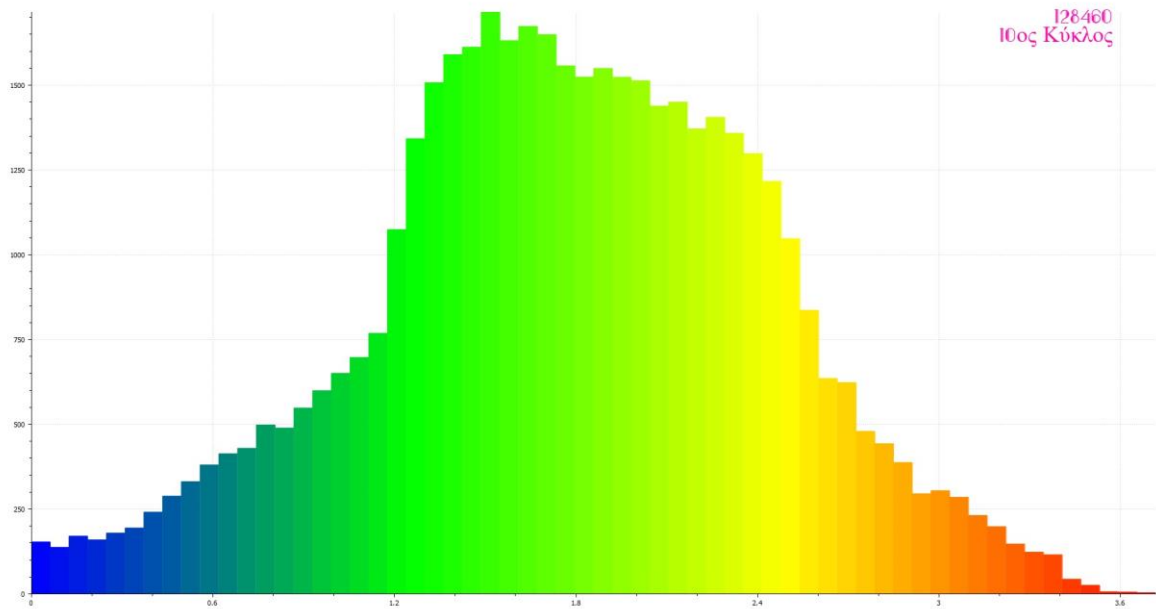
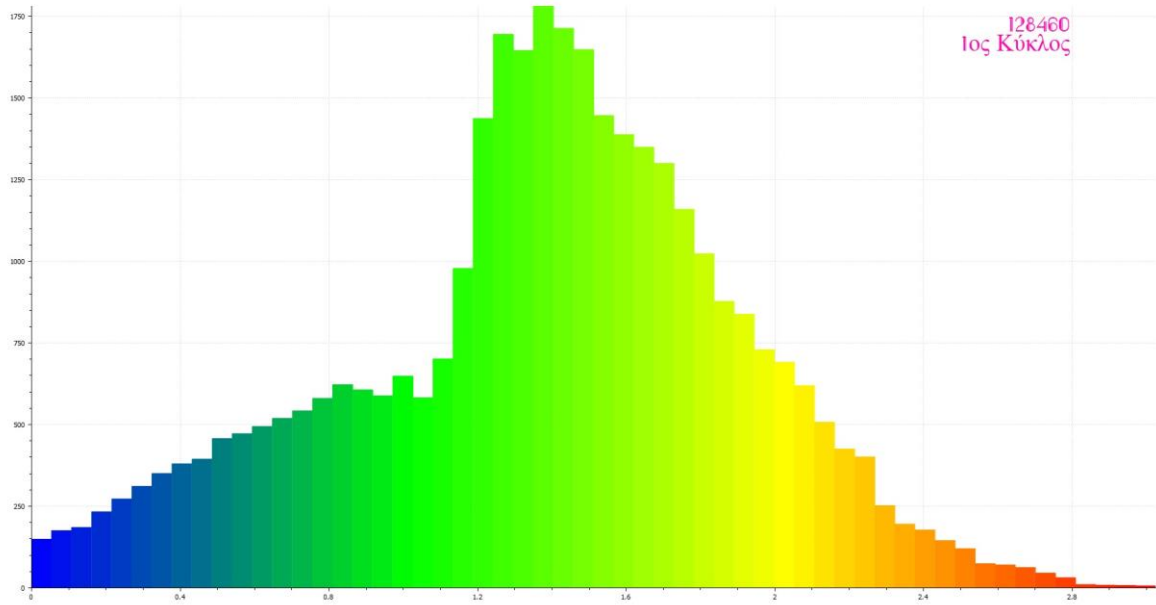
Όπως θα δούμε και στα παρακάτω ιστογράμματα, οι τιμές που είναι κοντά στο μηδέν δείχνουν πως τα δύο δοκίμια έχουν έρθει το ένα πάνω στο άλλο και είναι εφικτό να υπολογίσουμε την απόσταση που έχει κάθε φορά το λυγισμένο άκρο του δοκιμίου. Οι τιμές που έχουν χρώμα κόκκινο απεικονίζουν τη λύγιση που έχει υποστεί το κάθε δοκίμιο. Τα διαγράμματα που ακολουθούν αφορούν τον πρώτο και τον τελευταίο κύκλο θέρμανσης-ψύξης.



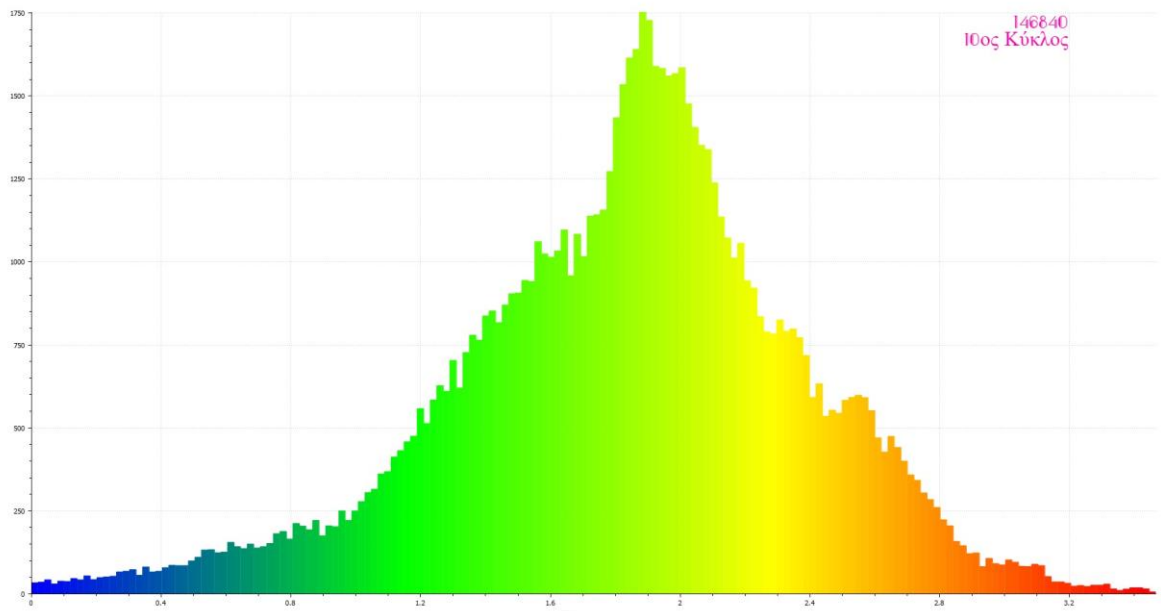
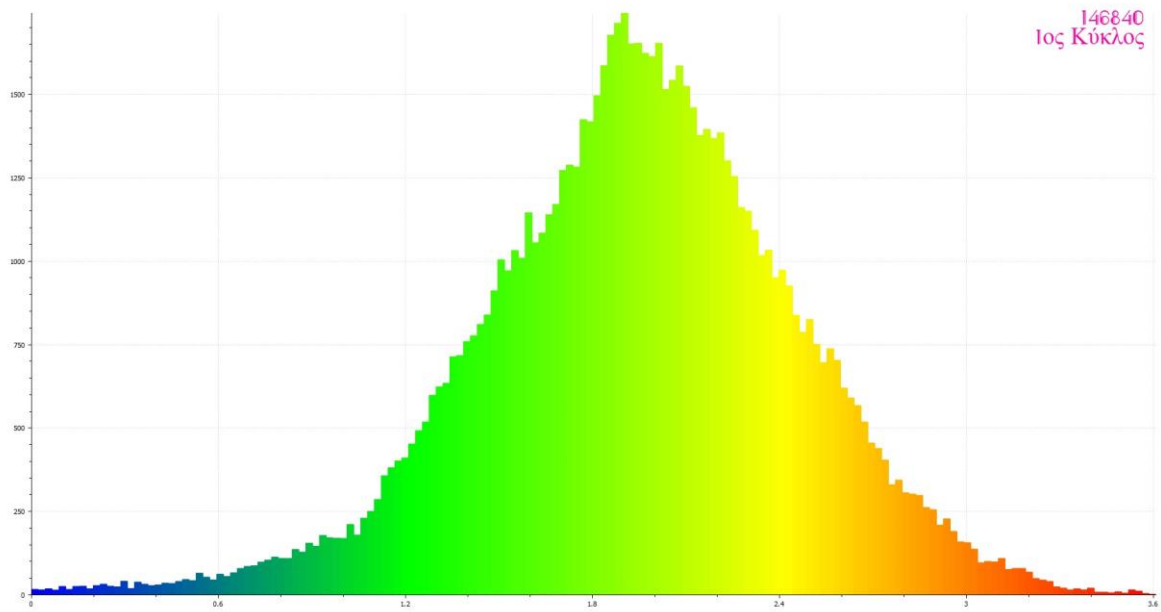
Εικόνα 56: Διαγράμματα του δοκιμίου **64240**, όπου παρουσιάζονται ο πρώτος κύκλος θέρμανσης – ψύξης και ο τελευταίος σε μορφή ιστογράμματος.



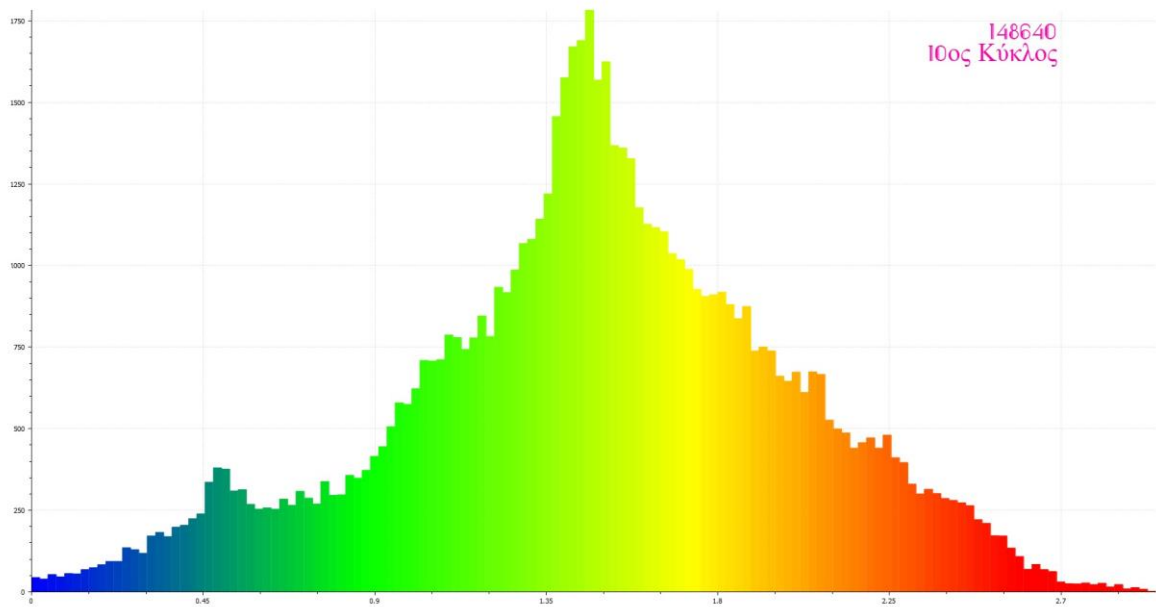
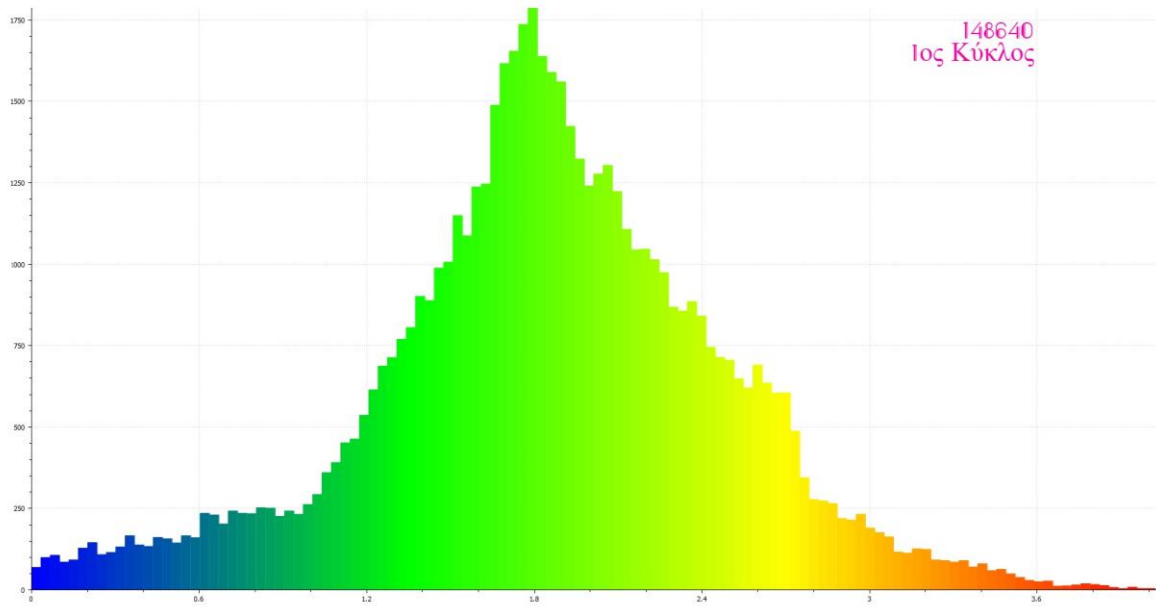
Εικόνα 57: Διαγράμματα θέρμανσης ψύξης σε μορφή ιστογράμματος, του δοκιμίου **86260**



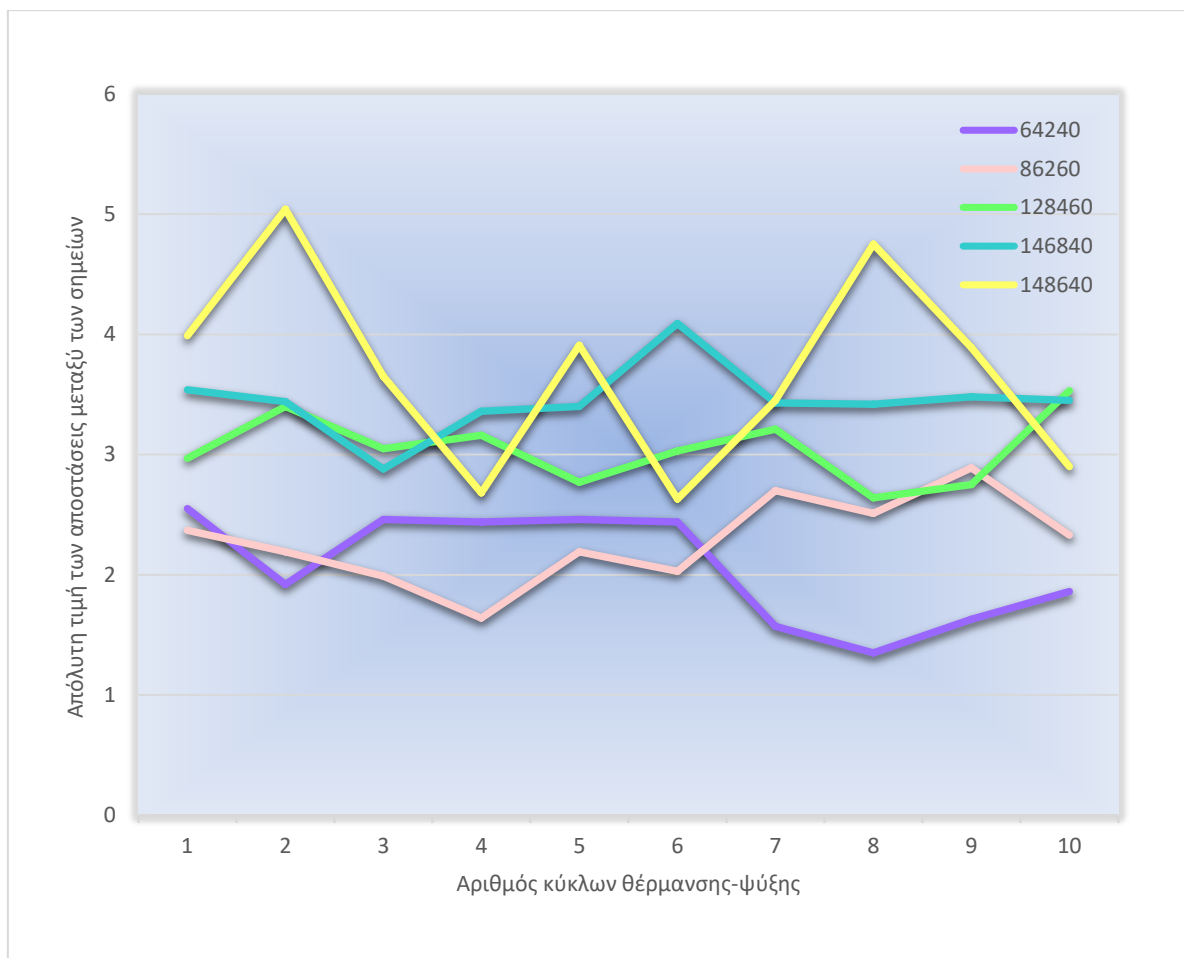
Εικόνα 58: Διαγράμματα θέρμανσης ψύξης σε μορφή ιστογράμματος του δοκιμίου 128460



Εικόνα 59: Διαγράμματα θέρμανσης ψύξης σε μορφή ιστογράμματος του δοκιμίου 146840



Εικόνα 60: Διαγράμματα θέρμανσης ψύξης σε μορφή ιστογράμματος του δοκιμίου 148640



Εικόνα 61: Συγκριτικό διάγραμμα θέρμανσης-ψύξης και των 5 δοκιμίων σε συνάρτηση με τις αποστάσεις που δημιουργούνται μεταξύ θερμαινόμενου και μη δοκιμίου.

Στην εικόνα 61 παρατηρούμε στον άξονα x τους 10 κύκλους θέρμανσης ψύξης των δοκιμίων, ενώ στον άξονα y την απόσταση που έχει κάθε φορά το θερμαινόμενο δοκίμιο με αυτό που έχει ανακτήσει το σχήμα του. Παρατηρούμε ότι κάθε κύκλος θέρμανσης ψύξης δεν έχει την ίδια τιμή με τον προηγούμενο κύκλο ή με τον επόμενο. Επομένως το δοκίμιο σε κάθε κύκλο αποκτά διαφορετική κάμψη. Ωστόσο όλα τα δοκίμια επανήλθαν στην αρχική τους μορφή όταν τα αφήσαμε στην θερμοκρασία δωματίου να κρυώσουν. Πέραν του δοκιμίου 64240 το οποίο λόγω του ότι δεν είναι ιδιαίτερα παχύ έμεινε ελαφρώς λυγισμένο και δεν κατάφερε να επανέλθει 100% στην αρχική του μορφή. Το δοκίμιο 148640 παρουσίασε μεγαλύτερες αποστάσεις σημείων μεταξύ θερμαινόμενου και ψυχρού δοκιμίου.

Κεφάλαιο 7

7.1 Συμπεράσματα

Ως σχετικά νέα κατηγορία υλικών τα αυξητικά υλικά δημιουργούν συνεχώς ένα ενδιαφέρον για την επιστημονική κοινότητα. Η ικανότητα που έχουν να παραμορφώνουν διαρκώς την εσωτερική τους δομή, δίνει νέες προοπτικές όσον αφορά τις πιθανές εφαρμογές αυτών των υλικών. Έχοντας ως στόχο τη συνεχή ανάπτυξη των ισοτροπικών υλικών με αρνητικό λόγο Poisson, είναι αναγκαίο να υπάρχει συνεχής μελέτη των θεωρητικών δομών (επαναλαμβανόμενες δομές, άκαμπτες, ημι-άκαμπτες, καθώς και οι χειρόμορφες δομές).

Ο μοναδικός συνδυασμός μηχανικών χαρακτηριστικών που παρέχουν τα αυξητικά υλικά, όπως η μεγάλη αντοχή τους σε διείσδυση, διάτμηση, θραύση και φθορά, τα καθιστούν επιθυμητά σε δομικές κατασκευές αλλά και κατ' επέκταση στη βιομηχανία.

Μεταξύ διάφορων αυξητικών δομών, η επαναλαμβανόμενη δομή αποδείχθηκε πως είναι κατάλληλη για τη δημιουργία δοκιμίων με συγκλαστική συμπεριφορά (όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4.4.4), καθώς δημιουργούν μια συγκεκριμένη μορφή επιφάνειας όταν κάμπτονται. Με βάση δοκιμές που έγιναν στο εργαστήριο προέκυψε ότι η καμπυλότητα μπορεί να διαμορφωθεί χάρη στη ρύθμιση συγκεκριμένων παραμέτρων, ένας εκ των οποίων είναι ο συντελεστής εξώθησης και η ταχύτητα εναπόθεσης υλικού. Η γεωμετρία του υλικού επίσης έπαιξε καθοριστικό ρόλο για την λύγιση. Αυτό σημαίνει πως όσο πιο μεγάλη γωνία χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό της συγκεκριμένης γεωμετρίας, τόσο μεγαλύτερη λύγιση παρατηρήθηκε. Ωστόσο κανένα από τα δοκίμια μας δεν κατάφερε να κρατήσει τη γωνία αυτή πάνω από 1 λεπτό. Όλα είχαν την τάση να επανέρχονται αμέσως στην αρχική τους μορφή, μετά την απομάκρυνση τους από την θερμαντική εστία. Κάτι ακόμα που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν ότι σε κάθε κύκλο θέρμανσης ψύξης το δοκίμιο χρειάστηκε τον ίδιο χρόνο προκειμένου να λυγίσει, αλλά δεν αποκτούσε ακριβώς την ίδια λύγιση κάθε φορά όπως βλέπουμε και στο συγκριτικό διάγραμμα (εικόνα 60).

Επιπλέον, τα δοκίμια που είχαν πυκνότητα 40% σε PETG ανταποκρίνονται καλύτερα στη λύγιση. Πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο που έχει 8 στρώσεις PETG και 6 στρώσεις TPU έχει αρκετά μεγάλη απόσταση όταν θερμαίνεται σε σύγκριση με όταν βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Τα δοκίμια που είχαν λιγότερες στρώσεις (συνολικά 6 και 8 στρώσεις το καθένα),

παρατηρήθηκε να λυγίζουν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες, ωστόσο δεν κατάφεραν να λυγίσουν τόσο όσο τα υπόλοιπα με 12 και 14 στρώσεις παρατηρούμε πως παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις, συγκρίνοντάς τα πάντα με ίδια δοκίμια που έχουν κρυώσει και δεν είναι πλέον λυγισμένα. Το πάχος των στρώσεων έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη λύγιση των δοκιμίων. Σε μικρότερα πάχη παρατηρήθηκε μειωμένη λύγιση, ενώ σε αυξημένα πάχη υπήρξε μεγαλύτερη λύγιση. Τέλος τα δοκίμια 64240 και 86260 λύγισαν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς ωστόσο να σχηματίζουν μεγάλες γωνίες.

Αν και η αυξητική δομή που επιλέχθηκε στο πείραμα μας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα και εμφανίζει πολλές προοπτικές, είναι αναγκαίο να γίνουν περαιτέρω μελέτες και δοκιμές διαφορετικών ειδών γεωμετρίας. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί σημείο εκκίνησης για μελλοντικές εξελίξεις, οι οποίες θα οδηγήσουν σε νέες και πρωτότυπες εφαρμογές.

Βιβλιογραφία

- 1) ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΥ Δ. ΑΘΑΝΑΣΙΑ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ <<Τριδιάστατοι εκτυπωτές και εφαρμογές τους στην Βιοϊατρική τεχνολογία.>>, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα 2014
- 2) Y. Nanaa & H. Taleb, The lotus flower: biomimicry solutions in the built environment, Sustainable Design of the Built Environment, British University in Dubai, UAE
- 3) Harlow W. M., Cote W. A., Day A. C. 1964. The opening mechanism of pine cone scales. J. Forestry 62, 538–540.
- 4) Hamley I. W. Introduction to Soft Matter, Polymers, Colloids, Amphiphiles and Liquid crystals, 2000.
- 5) Wu P, Wang J, Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry
- 6) Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities.
- 7) Jan Kietzmann, Leyland Pitt, Pierre Berthon, “Disruptions, decisions, and destinations : Enter the age of 3-D Printing and additive manufacturing”, in Elsevier, pp. 209-215, 2015.
- 8) Evans Brian, 2012, Practical 3D Printers, The Science and Art of 3D Printing, Πρώτη έκδοση, California USA, Apress Berkely.
- 9) Michael P. Chae, Warren M. Rozen, Paul G. McMenamin, Michael W. Findlay, Robert T. Spychal, David J. Hunter-Smith, “Emerging Applications of Bedside 3D Printing in Plastic Surgery”, in Frontiers In Surgery, June 2015.
- 10) <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- 11) Young Lae Moon, Sang Ha Park, Hong Moon Sohn, “3D Imaging in Sports Medicine”, in Sports Orthopaedics and Traumatology, pp. 276-282, 2016.
- 12) <https://3dprintingindustry.com/>
- 13) Michael P. Chae, Warren M. Rozen, Paul G. McMenamin, Michael W. Findlay, Robert T. Spychal, David J. Hunter-Smith, “Emerging Applications of Bedside 3D Printing in Plastic Surgery”, in Frontiers In Surgery, June 2015.
- 14) <https://www.tth.com/3d-printing/sls-prototyping/>

- 15) Pryor, S. Implementing a 3D Printing Service in an Academic Library: Discovery Service for Kent State University Libraries. *J. Libr. Adm.* 2014, 54, 1–10.
- 16) King, P.H. *Towards Rapid 3D Direct Manufacture of Biomechanical Microstructures*; University of Warwick: Coventry, UK, 2009.
- 17) Au, A.K.; Huynh, W.; Horowitz, L.F.; Folch, A. 3D-Printed Microfluidics. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, 55, 3862–3881.
- 18) *Επιστήμη και τεχνολογία υλικών*, William D. Callister, Εκδ. Τζιόλας, Θεσσαλονίκη, 2004
- 19) Hamley I. W. *Introduction to Soft Matter, Polymers, Colloids, Amphiphiles and Liquid crystals*, 2000.
- 20) Khoo, Z.X.; Teoh, J.E.M.; Liu, Y.; Chua, C.K.; Yang, S.; An, J.; Leong, K.F.; Yeong, W.Y. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2015, 10, 103–122
- 21) An, J.; Chua, C.K.; Mironov, V. A perspective on 4D bioprinting. *Int. J. Bioprint.* 2016, 2, 3–6
- 22) Meng, Q., Hu, J.: A review of shape memory polymer composites and blends. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* 40, 1661–1672 (2009)
- 23) Ratna, D., Karger-Kocsis, J.: Recent advances in shape memory polymers and composites: a review. *J. Mater. Sci.* 43, 254–269 (2008)
- 24) Liu, Y., Lv, H., Lan, X., Leng, J., Du, S.: Review of electro-active shape-memory polymer composite. *Compos. Sci. Technol.* 69, 2064–2068 (2009)
- 25) Bagdi, K., Molnár, K., Sajo, I., Pukánszky, B.: Specific interactions, structure and properties in segmented polyurethane elastomers. *eXPRESS Polym. Lett.* 5, 417–427 (2011)
- 26) S. Timoshenko. *Analysis of bi-metal thermostats*. *Journal of Optical Society of America and R.S.I.* 11:233–255, 1925.
- 27) S. Timoshenko. *Theory of Elastic Stability*. Mc Graw-Hill Book Co., 1956.
- 28) Jaúregui-Beloqui, B., Fernández-García, J.C., Orgilés-Barceló, A.C., Mahiques-Bujanda, M.M. & Martín-Martínez, J.M. (1999). Thermoplastic polyurethane-fumed silica composites: influence of the specific surface area of fumed silica on the viscoelastic and adhesion properties. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 13, pp. 695-711, 0169-4243.

- 29) Maciá-Agulló, T.G., Fernández-García, J.C., Pastor-Sempere, N., Orgilés-Barceló, A.C. & Martín-Martínez. J.M. (1992). Addition of Silica to Polyurethane Adhesives. *Journal of Adhesion*, 38, pp. 31-53, 0021-8464.
- 30) Y. Li, T. Gao, J. Liu, K. Linliu, C.R. Desper, *Macromolecules*, 25 (1992), p. 7365
- 31) Oertel, G. (1993). *Polyurethane Handbook 2nd*. Hanser: New York, pp. 7-116. 3-446-17198-3.
- 32) Maciá-Agulló et al., 1992, Jaúregui-Belogui et al., 1999, Jaúregui-Belogui et al., 1999, Torró-Palau κ.á. 2001, Péres-Limaña et al., 2001.
- 33) <https://www.digitmakers.ca/collections/flexible-filaments-1-75mm/products/polyflex-tpu95?variant=10668049367076>
- 34) <https://ultimaker.com/download/73764/TDS%20TPU%2095A%20v3.010%20ENG.pdf>
- 35) Ksawery Szykiedans, Wojciech Credo, Dymitr Osiński, 2017. “Selected mechanical properties of PETG 3-D prints”.
- 36) http://wikipedia.qwika.com/en2el/Polyethylene_terephthalate
- 37) Scheirs, J. (n.d.). *Additives for the Modification of Poly(Ethylene Terephthalate) to Produce Engineering-Grade Polymers*. Wiley Series in Polymer Science
- 38) <https://bitfab.io/blog/petg-in-3d-printing/>
- 39) https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PETG_01.pdf
- 40) M. H. Fu, O. T. Xu, L. L. Hu, and T. X. Yu, “Nonlinear shear modulus of re-entrant hexagonal honeycombs under large deformation,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 80, pp. 284–296, Feb. 2016.
- 41) Choi, J.B. and R.S. Lakes, Non-linear Properties of Metallic Cellular Materials with a Negative Poisson's Ratio, *Journal of Materials Science*, vol. 27,no.19, pp.5375-5381, 1992
- 42) Körner, C. and Liebold-Ribeiro, Y., (2014), A systematic approach to identify cellular auxetic materials, in *Smart Mater. Struct.* 24 025013 (10pp), 19 December.
- 43) Marsh, G. Airframers exploit composites in battle for supremacy. *Reinf. Plast.*, 2005,49(3), 26–32.
- 44) Evans, K. E. Tailoring the Poisson’s ratio. *Chem. Ind.*1990,20, 654–657.

- 45) Mott, P.H., Roland, C.M.: Limits of Poisson's ratio in isotropic materials—general result for arbitrary deformation. *Phys. Scr.* 87 (2013)
- 46) La Magna, R., Schleicher, S., Knippers, K.: Bending-active plates: form and structure. *Adv. Archit. Geom.* 2016, 170–186 (2016)
- 47) Literature review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence , Q. Liu, 2006
- 48) Auxetics: From Foams to Composites and Beyond, Fabrizio Scarpa, 2011
- 49) Examination of acoustic behavior of negative poisson's ratio materials, B Howell, P Prendergast, L Hansen - *Applied Acoustics*, 1994
- 50) Novel generation of auxetic open cell foams for curved and arbitrary shapes, M. Bianchi, F. Scarpa, M. Banse, C.W. Smith, 2011
- 51) H. Wan, H. Ohtaki, S. Kotosaka, and G. Hu, “A study of negative Poisson's ratios in auxetic honeycombs based on a large deflection model,” *European Journal of Mechanics, A/Solids*, vol. 23, no.4, pp.148-154, 2004.
- 52) Evans, K.E. and A. Alderson, Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!, *Advanced Materials*, vol. 12, no.9, pp. 617-628, 2000
- 53) Evans, K.E., Auxetic Materials: the Positive Side of Being Negative, *Engineering Science & Education Journal*, vol. 9, no.4, pp. 148-154, 2000
- 54) Gibson, L.J., et al., The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 382, no.1782, p. 25, 1982
- 55) Critchley, R., et al., A Review of the Manufacture, Mechanical Properties and Potential Applications of Auxetic Foams, *Physica Status Solidi (b)*, vol. 250, no.10, pp. 1963-1982, 2013
- 56) Grima, J.N., A. Alderson, and K.E. Evans, Auxetic Behaviour From Rotating Rigid Units, *Physica Status Solidi (b)*, vol. 242, no.3, pp. 561-575, 2005
- 57) Liu, Q., Literature Review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence, A.V. Division, Defence Science and Technology Organisation, Department of Defence, Australia, 2006
- 58) Liu, Y. and H. Hu, A Review on Auxetic Structures and Polymeric Materials, *Scientific Research and Essays*, vol. 5, no.10, pp. 1052-1063, 2010
- 59) Abramovitch, H., et al., Sensing and Actuation of Smart Chiral Honeycombs, *SPIE Proceedings*, vol. 6935, p. 7, 2008

- 60) Prall, D. and R. Lakes, Properties of a Chiral Honeycomb with a Poisson's Ratio-1, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 39, pp. 305-314, 1997
- 61) Carneiro, V., J. Meireles, and H. Puga, Auxetic Materials-A Review, Materials Science-Poland, vol. 31, no.4, pp. 561-571, 2013
- 62) Prall, D. and R. Lakes, Properties of a Chiral Honeycomb with a Poisson's Ratio-1, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 39, pp. 305-314, 1997
- 63) Scarpa, F., et al., Elastic Buckling of Hexagonal Chiral Cell Honeycombs, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 38, no.2, pp. 280-289, 2007
- 64) Agnes Bagsik, Volker Schöppner, 2011. "MECHANICAL PROPERTIES OF FUSED DEPOSITION MODELING PARTS MANUFACTURED WITH ULTEM*9085".
- 65) O.S. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, B.A. Pregger, Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples, Mater. Manuf. Process. 15 (2000)
- 66) [https://bg.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Turbine_\(3D_printing\).jpg](https://bg.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Turbine_(3D_printing).jpg)
- 67) <https://www.3dengr.com/3d-printing-and-the-aerospace-industry.html>
- 68) <http://alexanderdevore.com/3d-printing-in-defense-sector>
- 69) <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/medical-3d-printing-applications#introduction>
- 70) P. Hook, Uses of auxetic fibres, US Patent Number 8002879 B2, date of patent Aug 23, 2011
- 71) Yang, L., Harrysson, O., West, H., Cormier, D. (2013). A Comparison of Bending Properties for Cellular Core Sandwich Panels. Materials Sciences and Applications, 4, 471-477.
- 72) Yang W., Li Z.-M., Shi, W., Xie, B.-H., Yang, M.-B. (2004). Review on auxetic materials. Journal of Material Science, 39.
- 73) Alderson K, Webber R, Kettle A, Evans K (2005) Novel fabrication route for auxetic polyethylene. Polymer Engineering & Science, 45(4): 568- 578.
- 74) 7. Lira C, Innocenti P, Scarpa F (2009) Transverse elastic shear of auxetic multi re-entrant honeycombs. Composite Structures 90(3): 314-322.

- 75) Carolus, T., Schneider, M., Reese, H. - Axial flow fan broad-band noise and prediction, Journal of Sound and Vibration, 300, 50-70, 2007.
- 76) Evans Brian, 2012, Practical 3D Printers, The Science and Art of 3D Printing, Πρώτη έκδοση, California USA, Apress Berkely.
- 77) <https://eu.polymaker.com/product/polyflex-tpu95/>