



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ «ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ»**

**Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νάνο Υλικών
και Νανοτεχνολογίας**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΟΜΩΝ ΨΥΞΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ
ΜΕΣΩ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΜΠΡΟΣ ΦΛΟΥΔΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής:

Χαριτίδης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πρόλογος

Βρίσκομαι στην ευχάριστη θέση να προλογίζω την διπλωματική μου εργασία η οποία πραγματοποιήθηκε στην Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Συνθέτων, Νανοϋλικών και Νανοτεχνολογίας, στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Εκφράζεται βαθιά ευγνωμοσύνη και θερμές ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Συγκεκριμένα, στον Καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Χαριτίδη Κωνσταντίνο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, το ενδιαφέρον που υπέδειξε και την ουσιαστική υποστήριξή του καθόλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επίσης, πολλές ευχαριστίες οφείλω στην ερευνήτρια κα. Πετρακλή Φωτεινή για τη σημαντική συμβολή της καθόλη τη διάρκεια της διπλωματικής, τόσο στο πειραματικό στάδιο όσο και στη συγγραφή της διπλωματικής, στην υποψήφια διδάκτορα κα. Καραξή Ευαγγελία η οποία μου προσέφερε πολύτιμη βοήθεια στο ξεκίνημα της διπλωματικής εργασίας, καθώς και την υποψήφια διδάκτορα κ. Καλογεροπούλου Μαριτινή για τη σημαντική βοήθεια στα πειράματα.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο μου και υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου κ. Σεμιτέκολο Διονύση για την υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την ηθική συμπαράσταση και υποστήριξη τους.

Φλούδας Λάμπρος

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract.....	5
Κεφάλαιο 1. Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)	7
1.1 Ορισμός Τριδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing).....	7
1.1.1 Κυριότερες Τεχνολογίες 3D Εκτύπωσης	7
1.2 Μοντελοποίηση – Σχεδιασμός Αρχείου CAD.....	8
1.2.1 Εκτύπωση.....	9
1.2.2 Finishing	10
1.3 Ιστορική Αναδρομή.....	11
1.4 Σύγχρονες και μελλοντικές εφαρμογές	12
Κεφάλαιο 2. Διαδικασίες Εκτύπωσης και Πρώτες Ύλες	15
2.1 Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης (Μέθοδοι τριδιάστατης εκτύπωσης)	15
2.1.1 Fused Deposition Modeling (FDM)	15
2.1.2 Stereolithography SLA.....	16
2.1.3 Selective Laser Sintering (SLS).....	18
2.2 Πρώτες Ύλες (Filaments)	19
2.2.1 Acrylonitrile butadiene styrene (ABS).....	20
2.2.2 Thermoplastic elastomers (TPE)	20
2.2.3 Polylactic acid (PLA)	20
2.2.4 High Impact Polystyrene (HIPS)	20
2.2.5 Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG)	21
2.2.6 Nylon	21
2.2.7 Νήματα Από Ίνες Άνθρακα	21
2.2.8 Acrylonitrile styrene acrylate (ASA)	21
2.2.9 Polycarbonate (PC).....	22
2.2.10 Πολυπροπυλένιο.....	22
2.2.11 Polyvinyl alcohol (PVA).....	22
Κεφάλαιο 3. Έξυπνα Σύνθετα Υλικά	23
3.1 Smart Technologies.....	23
3.2 Composite Materials.....	25
3.2.1 Εφαρμογές	28
3.2.2 Πλεονεκτήματα Και Μειονεκτήματα	30
Κεφάλαιο 4. Ψύξη Επεξεργαστή.....	32
4.1 Ψύκτρα Συμβατική.....	32
4.1.1 Αρχή μεταφοράς θερμότητας.....	32

4.1.2 Σχεδιαστικοί Παράγοντες	34
4.1.3 Διατάξεις	36
4.1.4 Αγωγός πυκνής πλάκας μεταξύ της πηγής θερμότητας και της ψύκτρας	37
4.1.5 Μέθοδοι για τον προσδιορισμό της απόδοσης	37
4.2 Ψύξη Υπολογιστή	38
4.2.1 Γεννήτριες ανεπιθύμητης θερμότητας	39
4.3 Μέθοδοι ψύξης υπολογιστή	40
4.3.1 Ψύξη υπολογιστή με αέρα	40
4.3.2 Υδρόψυξη	41
Κεφάλαιο 5. Σκοπός	44
Κεφάλαιο 6. Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας Εκτύπωσης Ψύκτρας	46
Κεφάλαιο 7. Χαρακτηρισμός με Θερμοκάμερα	51
7.1 Αρχή Λειτουργίας	51
7.2 Μετρήσεις Θερμοκρασίας Ψυκτρών	51
7.3 Αποτελέσματα - Σχολιασμός	52
7.3.1 30% Στήλη	52
7.3.2 50% Στήλη	57
7.3.3 100% Στήλη	62
7.3.4 100% PLA	67
7.3.5 Συμβατική Ψύκτρα	72
7.4 Συζήτηση Αποτελεσμάτων	77
Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα – Προτάσεις	78
8.1 Συμπεράσματα για την εκτύπωση ψυκτρών	78
8.2 Συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα ψυκτρών στην ψύξη επεξεργαστή	78
8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	79
Κεφάλαιο 9. Βιβλιογραφία	80

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η ψύξη επεξεργαστή υπολογιστή με τη χρήση τριδιάστατα εκτυπωμένης ψύκτρας με νήμα από CarbonFil το οποίο αποτελείται από πολυμερές PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ενισχυμένο κατά 20% w/w με ίνες άνθρακα, σε σύγκριση με συμβατική ψύκτρα αλλά και ψύκτρα από PLA με χρήση θερμοκάμερας ως μέθοδο χαρακτηρισμού. Παράλληλα, προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι εκτύπωσης ψύκτρας CarbonFil με στόχο μηδενικές αστοχίες στο εκτυπωμένο υλικό. Η επιλογή του CarbonFil έγινε με ζητούμενο τη μείωση του κόστους παραγωγής της ψύκτρας, τη μείωση βάρους της με στόχο τη λιγότερη καταπόνηση του επεξεργαστή, ενώ παράλληλα δόθηκε η δυνατότητα της μελέτης χρήσης πλαστικών ενισχυμένων με Carbon σε εφαρμογές ψύξης.

Το υλικό εκτυπώθηκε χρησιμοποιώντας τριδιάστατο εκτυπωτή ZMorph 2.0s με τη μέθοδο Fused Deposition Modeling (FDM) με επάλληλες στρώσεις υλικού (CarbonFil) μέσω χρήσης μοντέλου ψύκτρας σε αρχείο CAD. Προτού πραγματοποιηθούν οι εκτυπώσεις, έγινε επεξεργασία των παραμέτρων εκτύπωσης για τις ψύκτρες σε πρόγραμμα υπολογιστή το οποίο ονομάζεται Simplify3D. Σε αυτό, επεξεργάστηκαν παράμετροι όπως η ταχύτητα της εκτύπωσης, η θερμοκρασία εξώθησης του υλικού, ο αριθμός των βάσεων του υλικού (raft) καθώς επίσης και την πλήρωση (infill) των ψυκτρών -δηλαδή, την πυκνότητα σε υλικό στις στρώσεις της ψύκτρας-, διαφορετικό για κάθε μία. Στη συνέχεια οι ψύκτρες εκτυπώθηκαν με το χρόνο εκτύπωσης να ποικίλει ανάλογα του infill που επιλέχθηκε για κάθε ψύκτρα με εύρος τιμών 55 λεπτά έως 80 λεπτά. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν έξι εκτυπώσεις για την εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων οι οποίες με εξαίρεση το infill χρησιμοποιήθηκαν ίδιες σε όλες τις εκτυπώσεις του υλικού CarbonFil.

Με τη χρήση θερμοκάμερας, μετρήθηκε η θερμοκρασία σε διαφορετικά σημεία της κάθε ψύκτρας οι οποίες είχαν τοποθετηθεί σε εν λειτουργία επεξεργαστή υπολογιστή, με σκοπό τη μελέτη της ψύξης του επεξεργαστή με τις εκτυπωμένες ψύκτρες. Κάθε ψύκτρα μετρήθηκε σε οκτώ σημεία, καθένα σε διαφορετικό ύψος σε σύγκριση με τον επεξεργαστή, ούτως ώστε να παρατηρηθεί η μεταφορά της θερμότητας από τον επεξεργαστή μέσω της ψύκτρας.

Σε σύγκριση των ψυκτρών CarbonFil με απλό PLA, παρατηρήθηκε ότι οι ίνες άνθρακα προσέδωσαν στην ψύκτρα θερμοαγωγίμες ιδιότητες κάτι που υποδηλώνει ότι η προσθήκη ινών άνθρακα σε νήμα εκτύπωσης βελτιώνει την θερμική αγωγιμότητα του πολυμερικού νήματος, επιτυγχάνοντας καλύτερη ψύξη του επεξεργαστή. Συγκεκριμένα, το υλικό με 100% infill CarbonFil εμφάνισε τα καλύτερα χαρακτηριστικά.

Abstract

In this thesis, computer processor cooling was studied using a 3D printed heat sink from “CarbonFil” a rod consisting of 20% w/w carbon fiber enhanced PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) polymer compared to conventional and PLA heat sink using a thermal camera as a characterization method. At the same time, the optimum CarbonFil heat sink printing parameters were determined with the aim of zero print failures. CarbonFil was chosen with the aim of reducing the cost of the heat sink production, reducing its weight in order to make the processor receive less stress, while studying the use of carbon-reinforced plastics in cooling applications.

The material was printed using a Fused Deposition Modeling (FDM) printer with Carbon Filled PLA and using a ready-made heat sink model in a CAD file. Before the printouts were made, the print parameters for the heat sinks were processed in a computer program called Simplify3D. Parameters such as print speed, material extrusion temperature, the number of material rafts, as well as the infill - which is, the density of material in the heat sink layers - were processed, differently for each one. The heatsinks were then printed with the print time varying depending on the infill selected for each brush with a range of 55 to 80 minutes, depending on the infill. Specifically, six prints were made in order to find the appropriate parameters which, excluding infill, were used in all printouts of CarbonFil.

Using a thermal camera, the temperature was measured at different points of each heat sink which had been mounted on a fully operational computer processor to study the processor cooling with the printed heat sinks. Each heat sink was measured at eight points, each at a different height compared to the processor in order to observe heat transfer from the processor to the top of the heat sink.

Comparing CarbonFil heat sinks with plain PLA, it was observed that carbon fibers improved heat-conductive properties of the heat sink which suggests that the addition of carbon fibers to the printing rod improves the thermal conductivity of the polymeric filament, thereby achieving better cooling process. In particular, the material with 100% infill CarbonFil showed the best features.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1. Τριδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing)

1.1 Ορισμός Τριδιάστατης Εκτύπωσης (3D Printing)

Η τριδιάστατη εκτύπωση (3D printing) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμό προσθετικής κατασκευής, οι τριδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Η τριδιάστατη εκτύπωση είναι ένας συνεχώς αναπτυσσόμενος τομέας, ενώ αναμένεται να παρουσιάσει ακόμα μεγαλύτερη αύξηση μέσα στα επόμενα χρόνια. Στη δεκαετία του 1990, οι τεχνικές 3D εκτύπωσης θεωρήθηκαν κατάλληλες μόνο για την παραγωγή λειτουργικών ή αισθητικών πρωτοτύπων. Σήμερα, η ακρίβεια, της μεθόδου έχει αυξηθεί στο σημείο που η εκτύπωση 3D θεωρείται ως βιομηχανική τεχνολογία παραγωγής. Τα 3D τυπωμένα αντικείμενα μπορούν να έχουν πολύ περίπλοκο σχήμα ή γεωμετρία και παράγονται πάντοτε ξεκινώντας από ένα ψηφιακό 3D μοντέλο ή ένα αρχείο CAD. [1]

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διαδικασίες εκτύπωσης 3D, που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε επτά κατηγορίες σύμφωνα με τον ISO/ASTM International Standard (17296–2:2015(E):

- Vat photopolymerization
- Material jetting
- Binder jetting
- Powder bed fusion
- Material extrusion
- Directed energy deposition
- Sheet lamination

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διαδικασία εκτύπωσης 3D είναι μια τεχνική εξώθησης υλικού, η οποία ονομάζεται συντηγμένη μοντελοποίηση εναπόθεσης (FDM). Στην τριδιάστατη εκτύπωση, ένα τριδιάστατο αντικείμενο κατασκευάζεται από μοντέλο CAD, συνήθως προσθέτοντας διαδοχικά το στρώμα υλικού σε στρώση, σε αντίθεση με τη συμβατική διαδικασία μηχανουργικής κατεργασίας, όπου το υλικό απομακρύνεται από ένα απόθεμα ή τις διαδικασίες χύτευσης και σφυρηλασίας. [2]

1.1.1 Κυριότερες Τεχνολογίες 3D Εκτύπωσης

Δεν χρησιμοποιούν όλοι οι εκτυπωτές την ίδια τεχνολογία για την εκτύπωση των αντικειμένων τους. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι υλοποίησης και όλοι όσοι ήταν διαθέσιμοι μέχρι το 2012 ήταν προσθετικοί, διαφέροντας κυρίως στον τρόπο που χτίζονται οι στρώσεις για να δημιουργηθεί το τελικό αντικείμενο. Οι selective laser sintering (SLS) και fused deposition modeling (FDM) είναι οι πιο κοινές τεχνολογίες. Άλλη μία μέθοδος εκτύπωσης είναι η χρήση υγρών υλικών, που στερεοποιούνται με διαφορετικές τεχνολογίες. Η πιο κοινή τεχνολογία που χρησιμοποιεί αυτή τη μέθοδο είναι η στερεολιθογραφία (SLA). [3]

Η τεχνολογία SLS χρησιμοποιεί ένα laser υψηλής ισχύος για τη συγχώνευση μικρών σωματιδίων σκόνης πλαστικού, μετάλλου, κεραμικού ή γυαλιού, σε μία μάζα που έχει το επιθυμητό τριδιάστατο σχήμα. Μετά το σάρωμα κάθε τομής, το στρώμα σκόνης μειώνεται

κατά μία στρώση πάχους. Στη συνέχεια μία νέα στρώση υλικού εφαρμόζεται στη κορυφή και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.

Η τεχνολογία FDM λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα πλαστικό νήμα ή ένα μεταλλικό σύρμα, το οποίο ξετυλίγεται από ένα πηνίο και εφοδιάζει τα υλικά σε ένα στόμιο εξώθησης, το οποίο μπορεί είτε να επιτρέψει, είτε να εμποδίσει τη ροή. Το στόμιο θερμαίνεται, ώστε να λιώσει το υλικό, μπορεί να κινηθεί οριζόντια η κάθετα και είναι άμεσα ελεγχόμενο από ένα computer-aided manufacturing (CAM) λογισμικού. Το αντικείμενο παράγεται εκβάλλοντας το λιωμένο υλικό, ώστε να σχηματιστούν στρώσεις, καθώς το υλικό σκληραίνει κατευθείαν μετά την εξώθηση από το στόμιο. [4]

Η τεχνολογία SLA είναι η κύρια τεχνολογία, στην οποία χρησιμοποιείται ο φωτοπολυμερισμός για τη παραγωγή ενός στερεού εξαρτήματος από ένα υγρό. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί μία υγρή, σκληρυνόμενη, φωτοπολυμερική ρητίνη και ένα υπεριώδες laser για να χτίσει τις στρώσεις του αντικειμένου, μία τη φορά. Για κάθε στρώμα, η ακτίνα laser σχεδιάζει μία τομή του σχεδίου του εξαρτήματος στην επιφάνεια της υγρής ρητίνης. Έκθεση στο υπεριώδες φως του laser σκληραίνει και στερεοποιεί το σχέδιο που δημιουργήθηκε στη ρητίνη και το ενώνει με την από κάτω στρώση.



Σχήμα 1: Τριδιάστατος εκτυπωτής.[5]

1.2 Μοντελοποίηση – Σχεδιασμός Αρχείου CAD

Τα 3D εκτυπώσιμα μοντέλα δημιουργούνται σε πρόγραμμα σχεδίασης στον υπολογιστή, το κυριότερο εκ των οποίων είναι το CAD, μέσω ενός 3D σαρωτή, ή μέσω ενός απλού ψηφιακού φωτογραφικού μηχανήματος και λογισμικού φωτογραμμετρίας. Τα τριδιάστατα τυπωμένα μοντέλα που δημιουργούνται με CAD οδηγούν σε μειωμένα σφάλματα και μπορούν να διορθωθούν πριν από την εκτύπωση, επιτρέποντας την επαλήθευση του σχεδιασμού του αντικειμένου πριν εκτυπωθεί. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους [6]. Η τριδιάστατη σάρωση είναι μια διαδικασία συλλογής ψηφιακών δεδομένων

σχετικά με το σχήμα και την εμφάνιση ενός πραγματικού αντικειμένου, δημιουργώντας ένα ψηφιακό μοντέλο βασισμένο σε αυτό.

Τα μοντέλα CAD αποθηκεύονται στη μορφή αρχείου STL, μια ειδική μορφή αρχείου για τη χρήση σε τριδιάστατο εκτυπωτή, που αποθηκεύει δεδομένα που βασίζονται σε τριγωνισμούς της επιφάνειας των μοντέλων CAD. Το STL αρχείο, επεξεργάζεται στον υπολογιστή με συγκεκριμένο πρόγραμμα το οποίο ονομάζεται simplify3D. Το πρόγραμμα αυτό, επιτρέπει να ρυθμιστούν συγκεκριμένα δεδομένα σχετικά της τριδιάστατης εκτύπωσης του υλικού, όπως η ταχύτητα της εκτύπωσης, το ποσοστό σε infill και ο αριθμός στρώσεων που θα χρησιμοποιηθούν ως βάση της εκτύπωσης. [7]

Μόλις ολοκληρωθεί η εξωτερική όψη του μοντέλου, η προσοχή στρέφεται στην εσωτερική δομή του. Αφού οριστούν τόσο οι εσωτερικές όσο και οι εξωτερικές λεπτομέρειες, το μοντέλο είναι σχεδόν πλήρες. Η τελική φάση ονομάζεται υφή και περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των χρωμάτων, των επιφανειακών μοτίβων, των τελειωμάτων και άλλων λεπτομερειών που είναι επιθυμητό να έχει το αντικείμενο. Παρομοιάζεται ως ένα είδος περίπλοκου, τριδιάστατου χρωματισμού. Όταν το μοντέλο είναι πλήρες, μετατρέπεται στην τελική εικόνα. Το πρόγραμμα CAD, προσφέρει τη δυνατότητα για εύκολη και γρήγορη επεξεργασία του σχεδιασμένου μοντέλου, όπως τη μεγέθυνση ορισμένων μερών του, την περιστροφή τους και την αποκοπή τους. Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι τα σχέδια CAD μπορούν να μετατραπούν αυτόματα σε οδηγίες παραγωγής για εργοστασιακές μηχανές, γεγονός που μειώνει σημαντικά το συνολικό χρόνο που απαιτείται για να μετατραπούν τα νέα σχέδια σε τελικά προϊόντα. Έτσι και στη χρήση του CAD στην τριδιάστατη εκτύπωση, το μοντέλο που σχεδιάζεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί γρήγορα και σε πολλούς υπολογιστές ταυτόχρονα. [6]

1.2.1 Εκτύπωση

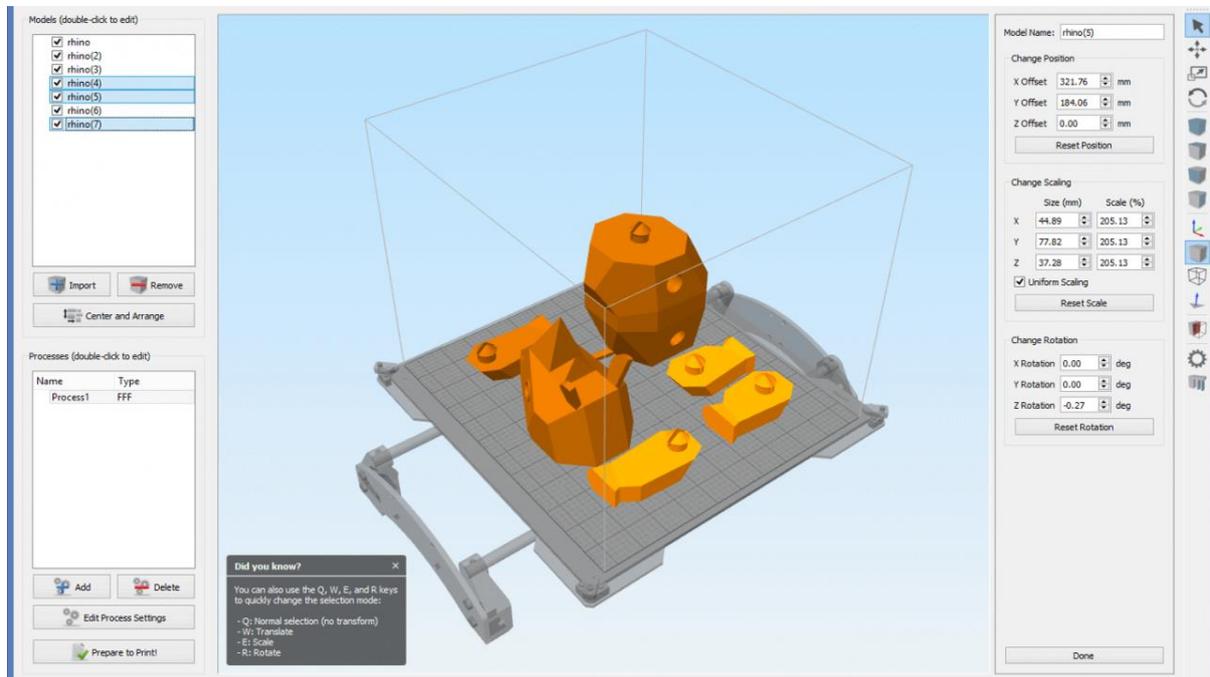
Πριν από την εκτύπωση ενός 3D μοντέλου από ένα αρχείο STL, πρέπει πρώτα να εξεταστεί για σφάλματα. Οι περισσότερες εφαρμογές CAD παράγουν σφάλματα στα αρχεία STL εξόδου, των ακόλουθων τύπων:

- τρύπες
- αυτο-διασταυρώσεις.
- περιβλήματα
- πολλαπλά σφάλματα

Ένα βήμα στο αρχείο STL γνωστό ως "επισκευή" καθορίζει τέτοια προβλήματα στο αρχικό μοντέλο. Γενικά, τα STL αρχεία που έχουν παραχθεί από ένα μοντέλο που λαμβάνεται μέσω τριδιάστατης σάρωσης συχνά έχουν περισσότερα σφάλματα από όσα προαναφέρθηκαν. Αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η τριδιάστατη σάρωση. [8]

Αφού ολοκληρωθεί, το αρχείο STL μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία από λογισμικό που ονομάζεται simplify3D, το οποίο μετατρέπει το μοντέλο σε μια σειρά λεπτών στρώσεων και παράγει ένα αρχείο G-code που περιέχει οδηγίες προσαρμοσμένες σε ένα συγκεκριμένο τύπο 3D εκτυπωτή (FDM). Αυτό το αρχείο G-code μπορεί στη συνέχεια να εκτυπωθεί με άλλο λογισμικό 3D εκτύπωσης, το οποίο φορτώνει τον G-κώδικα και το χρησιμοποιεί για να καθοδηγήσει τον 3D εκτυπωτή κατά τη διαδικασία εκτύπωσης 3D. Δηλαδή το αρχείο STL, μετά την κατασκευή του σε αρχείο CAD και την επεξεργασία του με άλλο λογισμικό

επεξεργασίας STL αρχείων όπως το simplify3D, στέλνεται σε τρίτο λογισμικό για την εκτύπωσή του.



Σχήμα 2: Simplify3D.

Η κατασκευή ενός μοντέλου με σύγχρονες μεθόδους μπορεί να χρειαστεί από αρκετές ώρες έως αρκετές ημέρες, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του μοντέλου. [9]

Οι παραδοσιακές τεχνικές όπως η χύτευση με έγχυση μπορούν να είναι λιγότερο δαπανηρές για την παραγωγή πολυμερών προϊόντων σε μεγάλες ποσότητες, αλλά η παρασκευή προσθέτων μπορεί να είναι ταχύτερη, πιο ευέλικτη και λιγότερο δαπανηρή όταν παράγονται σχετικά μικρές ποσότητες μερών. Οι 3D εκτυπωτές δίνουν στους σχεδιαστές και τις ομάδες ανάπτυξης ιδεών τη δυνατότητα να παράγουν εξαρτήματα και μοντέλα χρησιμοποιώντας έναν εκτυπωτή μεγέθους γραφείου.

1.2.2 Finishing

Αν και η ανάλυση που παράγεται από τον εκτυπωτή είναι αρκετή για πολλές εφαρμογές, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια εκτυπώνοντας μια ελαφρώς υπερμεγέθη έκδοση του επιθυμητού αντικειμένου σε τυπική ανάλυση και στη συνέχεια αφαιρώντας υλικό, χρησιμοποιώντας μια αφαιρετική διαδικασία υψηλότερης ανάλυσης. [10]

Ορισμένα εκτυπώσιμα πολυμερή, όπως το ABS, επιτρέπουν την εξομάλυνση και βελτίωση της τελικής επιφάνειας χρησιμοποιώντας διαδικασίες χημικών ατμών με βάση ακετόνη ή παρόμοιους διαλύτες. Ορισμένες τεχνικές κατασκευής προσθέτων είναι ικανές να χρησιμοποιούν πολλαπλά υλικά κατά την κατασκευή των μερών. Αυτές οι τεχνικές είναι σε θέση να εκτυπώνουν ταυτόχρονα σε πολλαπλά χρώματα και συνδυασμούς χρωμάτων και δεν απαιτούν αναγκαστικά το χρωματισμό μετά την εκτύπωση.

Ορισμένες τεχνικές εκτύπωσης απαιτούν την κατασκευή εσωτερικών στηριγμάτων για την επικάλυψη χαρακτηριστικών κατά την κατασκευή. Αυτά τα στηρίγματα πρέπει να αφαιρεθούν ή να διαλυθούν μηχανικά μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης. Όλοι οι εμπορικοί μεταλλικοί 3D εκτυπωτές περιλαμβάνουν την κοπή του μεταλλικού συστατικού από το μεταλλικό υπόστρωμα μετά την εναπόθεση. [11]

1.3 Ιστορική Αναδρομή

Ο πρώτος εξοπλισμός και υλικά πρώτης προσθετικής παρασκευής αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1980. Το 1981, ο Hideo Kodama του Ινστιτούτου Δημοτικής Βιομηχανικής Έρευνας της Nagoya εφηύρε δύο πρόσθετες μεθόδους για την κατασκευή τριδιάστατων πλαστικών μοντέλων με θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές φωτο-σκλήρυνσης, όπου η περιοχή έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία ελέγχεται από ένα πρότυπο μάσκας ή έναν πομπό σάρωσης ίνας. [12]

Στις 16 Ιουλίου 1984, ο Alain Le Méhauté, ο Olivier de Witte και ο Jean Claude André κατέθεσαν το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τους για τη διαδικασία στερεολιθογραφίας (Jean-Claude, 2012). Η εφαρμογή των Γάλλων εφευρετών εγκαταλείφθηκε από τη γαλλική εταιρεία General Electric (τόρα Alcatel-Alsthom) και την CILAS (The Consortium Laser). Ο λόγος που επικαλέστηκε η εταιρεία ήταν "για έλλειψη επιχειρησιακής προοπτικής". [13]

Τρεις εβδομάδες αργότερα το 1984, ο Chuck Hull της εταιρείας 3D Systems Corporation κατέθεσε το δικό του δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για ένα σύστημα κατασκευής στερεολιθογραφίας, στο οποίο προστίθενται στιβάδες με την επεξεργασία φωτοπολυμερών με λέιζερ υπεριώδους φωτός. Ο Hull χαρακτήρισε τη διαδικασία ως ένα "σύστημα δημιουργίας τριδιάστατων αντικειμένων δημιουργώντας ένα πρότυπο διατομής του προς δημιουργία αντικειμένου". Η συμβολή του Hull ήταν η μορφή αρχείου STL (Stereolithography) και οι στρατηγικές ψηφιακής κοπής και πληρώσεως που είναι κοινές σε πολλές διαδικασίες σήμερα. [14]

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται από τους περισσότερους τριδιάστατους εκτυπωτές μέχρι σήμερα είναι η σύντηξη μοντέλων εναπόθεσης, μια ειδική εφαρμογή πλαστικής εξώθησης, που αναπτύχθηκε το 1988 από τον S. Scott Crump και εμπορεύτηκε από την εταιρεία Stratasys στον πρώτο εκτυπωτή FDM το 1992. [14]

Ο όρος τριδιάστατη εκτύπωση αναφέρεται αρχικά σε μια διαδικασία κλίνης σε σκόνη που χρησιμοποιεί τυποποιημένες και προσαρμοσμένες κεφαλές εκτύπωσης inkjet, που αναπτύχθηκαν στο MIT το 1993 και διατέθηκαν στο εμπόριο από τις Soligen Technologies, Extrude Hone Corporation και Z Corporation. Το 1993 υπήρξε επίσης η έναρξη μιας εταιρείας που ονομάζεται Solidscape, εισάγοντας ένα σύστημα κατασκευής υψηλής ακρίβειας πολυμερούς εκτόξευσης με διαλυτές υποστηρικτικές δομές (κατηγοριοποιημένες ως τεχνική "dot-on-dot"). Το 1995 το Ινστιτούτο Fraunhofer ανέπτυξε την επιλεκτική διαδικασία τήξης του λέιζερ. Τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας για τη διαδικασία εκτύπωσης με μέθοδο σύντηξης με αποικοδομητική εναπόθεση (FDM) έληξαν το 2009. Δεδομένου ότι η τεχνολογία ωρίμασε, αρκετοί συγγραφείς είχαν αρχίσει να υποθέτουν ότι η τριδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να βοηθήσει στην αιεφόρο ανάπτυξη στον αναπτυσσόμενο κόσμο. [15]

Το 2012, η Filabot αναπτύσσει ένα σύστημα το οποίο επιτρέπει σε οποιονδήποτε εκτυπωτή FDM ή FFF 3D να εκτυπώνει με ένα ευρύτερο φάσμα πλαστικών. Ένα χρόνο αργότερα, οι υπάλληλοι της NASA Samantha Snabes και Matthew Fiedler δημιουργούν το πρώτο πρωτότυπο τριδιάστατου εκτυπωτή μεγάλου μεγέθους, Gigabot. Το 2012, αναπτύσσεται ένα σύστημα που χρησιμοποιεί πλαστικούς κόκκους pellet που μπορούν να κατασκευαστούν με λείανση πλαστικών απορριμμάτων. [16]

1.4 Σύγχρονες και μελλοντικές εφαρμογές

Η τριδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες και διάφορους τομείς.

Ένας από τους τομείς τους οποίους βρίσκει εφαρμογή η τριδιάστατη εκτύπωση είναι η αυτοκινητοβιομηχανία. Τον Σεπτέμβριο του 2014 η Local Motors, μία κατασκευάστρια αυτοκινήτων μικρού όγκου από την Αριζόνα των ΗΠΑ, υποβοηθούμενη από το κοινό, καινοτόμησε με το Strati, το πρώτο 3D εκτυπωμένο αυτοκίνητο πλήρους μεγέθους. Η εκτύπωση διήρκεσε 44 ώρες και έλαβε χώρα στο Σικάγο, μπροστά σε κοινό. Γενικότερα, πολλά εξαρτήματα αυτοκινήτου, όπως εξωτερικοί καθρέπτες και μοχλοί κλειδαριών είναι πλέον εκτυπώσιμα. [17]



Σχήμα 3 : Το πρώτο 3D εκτυπωμένο αυτοκίνητο. [17]

Μερικά από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα στη 3D αυτοκινητοβιομηχανική εκτύπωση είναι οι οικονομίες από την προμήθεια υλικών και η εξάλειψη ορισμένων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, που θα προέκυπταν από τη μεταφορά προϊόντων στις εγκαταστάσεις παραγωγής.

Ακόμα ένας τομέας στον οποίο χρησιμοποιείται ευρέως η 3D εκτύπωση είναι η αρχιτεκτονική. Εκτός από την εξοικονόμηση χρόνου που προσφέρουν τα 3D εκτυπωμένα μοντέλα, ένα ακόμα πλεονέκτημά τους είναι ότι επιτρέπει στους αρχιτέκτονες να πειραματιστούν με σύνθετα σχήματα και πολύπλοκες μορφές.

Τα τελευταία χρόνια, η τριδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται επίσης στις κατασκευές. Οι κατασκευαστικές εταιρείες είναι σε θέση να δημιουργήσουν σχήματα, τα οποία δεν μπορούν να παραχθούν με άλλον τρόπο πέραν της προσθετικής κατασκευής. Ακόμα, οι εταιρείες μπορούν, πέρα από εξαρτήματα, να εκτυπώσουν και τα εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούν. Τέλος, δεν χρειάζεται η μετακίνηση εφοδίων, καθώς μπορούν πλέον να δημιουργηθούν εξαρτήματα επί ζήτησης, από την εταιρεία μέσω ενός τριδιάστατου εκτυπωτή. Αυτό βοηθάει στην οικονομικότερη και γρηγορότερη παραγωγή των εξαρτημάτων. [18]

Τομέα στον οποίο η 3D εκτύπωση βρίσκει εφαρμογή και αναπτύσσεται συνεχώς αποτελεί η υγεία. Η 3D εκτύπωση έχει ήδη φέρει επανάσταση στις αντικαταστάσεις αρθρώσεων. Οι ασθενείς με κατάλληλα προσαρμοσμένα γόνατα δεν χρειάζεται να χάσουν επιπλέον μήκος από το κόκκαλο. Αντί αυτού, ο χειρουργός μπορεί να κάνει τομή στο ιδανικό σημείο, κάτι που οδηγεί σε γρηγορότερη ανάρρωση και καλύτερη λειτουργικότητα. Δυνατές, ευλύγιστες νέες αρθρώσεις που μιμούνται οστά και χόνδρους μπορούν να εκτυπωθούν με νάιλον. Αυτές οι χειρουργικές επεμβάσεις είναι διαθέσιμες σε κορυφαίες ιατρικές εγκαταστάσεις, όπως η Mayo Clinic. Τα περισσότερα ακουστικά βαρηκοΐας είναι ήδη 3D εκτυπωμένα, καθώς αυτά πάντα ήταν προσαρμοσμένα στον χρήστη και το σκανάρισμα, η μοντελοποίηση και η εκτύπωση εξοικονομούν χρόνο σε σχέση με το να δημιουργηθεί χειροποίητο καλούπι του έσω αυτιού. Παρομοίως, η δημιουργία οδοντικών εμφυτευμάτων είναι πλέον μια διαδικασία μερικών ωρών, συγκριτικά με παλιότερα που χρειαζόταν δύο εβδομάδες. [19]

Άλλες αξιοσημείωτες σύγχρονες εφαρμογές της 3D εκτύπωσης περιλαμβάνουν την τέχνη, τον ρουχισμό, την κατασκευή οικιακών ειδών, τον αθλητισμό (π.χ. αναπηρικές καρέκλες παραολυμπιακών αγώνων) και την ψυχαγωγία (π.χ. εκτύπωση gadgets και παιχνιδιών).

Η τριδιάστατη εκτύπωση έχει εισέλθει στον κόσμο της ένδυσης. Στην εμπορική παραγωγή, η Nike χρησιμοποιεί 3D εκτύπωση στην κατασκευή του παπουτσιού ποδοσφαίρου Vapor Laser Talon 2012 για τους παίκτες του αμερικανικού ποδοσφαίρου και η New Balance παράγει παπούτσια προσαρμοσμένα σε τριδιάστατη κατασκευή για τους αθλητές. Η τριδιάστατη εκτύπωση έφτασε στο σημείο όπου οι επιχειρήσεις εκτυπώνουν γυαλιά προστασίας καταναλωτών με προσαρμοσμένη εφαρμογή και στυλ κατά παραγγελία (αν και δεν μπορούν να εκτυπώσουν τους φακούς).

Οι εφαρμογές της τριδιάστατης εκτύπωσης, δεν αφορούν μόνο το παρόν αλλά και το μέλλον. Συγκεκριμένα, το προσδόκιμο ζωής θα αυξηθεί κατακόρυφα, το κόστος μαζικής παραγωγής θα μειωθεί σημαντικά και οι παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής και παραγωγής τροφίμων θα είναι πλέον παρωχημένες. Ένας τομέας ο οποίος θα ενισχυθεί μελλοντικά είναι η αεροδιαστημική. Ενώ μικρότερα εξαρτήματα αεροσκαφών ήδη αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τεχνικές 3D εκτύπωσης, οι εταιρίες οραματίζονται την κατασκευή μεγαλύτερων εξαρτημάτων στο μέλλον, όπως ένα ολόκληρο φτερό. Άλλες εφαρμογές στην αεροδιαστημική περιλαμβάνουν κατασκευή πολύπλοκων εξαρτημάτων μηχανής, εκτύπωση εξαρτημάτων στο διάστημα (μείωση κόστους αποστολής από τη γη) και εναέρια μη επανδρωμένα συστήματα. Όπως προαναφέρθηκε, τομέας ο οποίος αναμένεται να βοηθηθεί σημαντικά από την τριδιάστατη εκτύπωση είναι η υγεία. Αν και προς το παρόν αποτελεί φουτουριστικό όνειρο, πανεπιστημιακά εργαστήρια και ιδιωτικές επιχειρήσεις έχουν ήδη λάβει τα πρώτα βήματα στην δημιουργία 3D εκτυπωμένων οργάνων από τα κύτταρα των

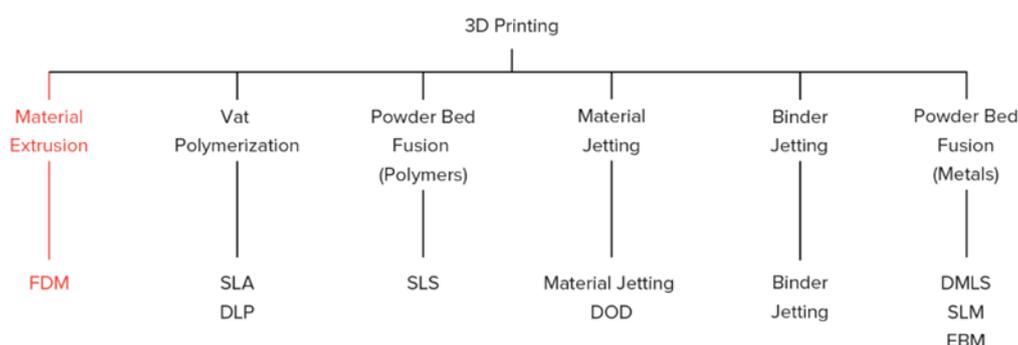
ασθενών. Αυτό μπορεί μελλοντικά να σημαίνει ότι οι ασθενείς δεν θα χρειάζεται να περιμένουν στην ουρά για δότες. Η δυνατότητα βιοεκτύπωσης πλήρως λειτουργικών οργάνων εξαρτάται από την εύρεση τρόπου ένωσης των οργάνων με τα μικρά και τα μεγάλα αιμοφόρα αγγεία, τα οποία θα εφοδιάζουν το όργανο με αίμα, 5 πλούσιο σε συστατικά, ώστε να μείνει ο ιστός ζωντανός. [20]

Κεφάλαιο 2. Διαδικασίες Εκτύπωσης και Πρώτες Ύλες

2.1 Τεχνολογίες 3D εκτύπωσης (Μέθοδοι τριδιάστατης εκτύπωσης)

Ένας μεγάλος αριθμός διαδικασιών προσθετικής κατασκευής είναι διαθέσιμος. Οι κύριες διαφορές μεταξύ των διαδικασιών είναι στον τρόπο με τον οποίο τα στρώματα εναποτίθενται για τη δημιουργία τμημάτων αλλά και στα υλικά που χρησιμοποιούνται. Κάθε μέθοδος έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι βασικές προϋποθέσεις στην επιλογή μιας μηχανής εκτύπωσης είναι η ταχύτητα, το κόστος του, η επιλογή και το κόστος των πρώτων υλών που απαιτεί και οι δυνατότητες χρωμάτων. Οι εκτυπωτές που λειτουργούν με μέταλλα είναι ακριβότερους από αυτούς που λειτουργούν με πολυμερή. Ωστόσο, οι λιγότερο δαπανηροί εκτυπωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν ένα καλούπι, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεταλλικών μερών. [21] Οι κυριότερες μέθοδοι τριδιάστατης εκτύπωσης είναι η fused deposition modeling FDM, selective laser sintering SLS και stereolithography SLA. [22]

2.1.1 Fused Deposition Modeling (FDM)



Σχήμα 4: Μέθοδοι τριδιάστατης εκτύπωσης. [23]

Η Fused deposition modeling (FDM) ή Fused filament fabrication (FFF) είναι μια διαδικασία παρασκευής προσθέτων που ανήκει στην οικογένεια εξώθησης υλικού. Στο FDM, ένα αντικείμενο κατασκευάζεται από την επιλεκτική απόθεση του λιωμένου υλικού σε μια προκαθορισμένη διαδρομή στρώσεων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι θερμοπλαστικά πολυμερή και έρχονται σε μορφή νημάτων. Το FDM είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία 3D Printing, αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη βάση 3D εκτυπωτών παγκοσμίως και είναι συχνά η πρώτη τεχνολογία στην οποία εκτίθενται οι άνθρωποι. Ένας σχεδιαστής πρέπει να έχει κατά νου τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της τεχνολογίας κατά την κατασκευή ενός μοντέλου με το FDM, καθώς αυτό θα τον βοηθήσει να επιτύχει το καλύτερο αποτέλεσμα. [23]

Τρόπος λειτουργίας FDM

Ένα καρούλι από θερμοπλαστικό νήμα φορτώνεται πρώτα στον εκτυπωτή. Μόλις το ακροφύσιο φθάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία, το νήμα τροφοδοτείται στην κεφαλή εξώθησης και στο ακροφύσιο όπου λιώνει.

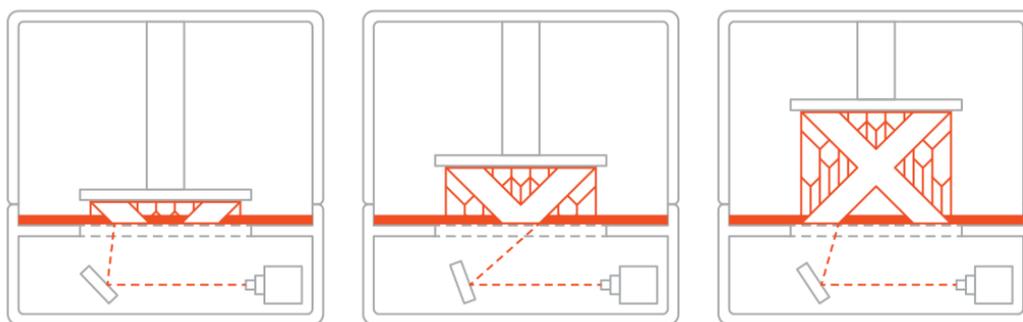
Η κεφαλή εξώθησης προσαρτάται σε ένα σύστημα τριών αξόνων που του επιτρέπει να κινείται στις κατευθύνσεις X, Y και Z. Το τετηγμένο υλικό εξωθείται και εναποτίθεται στρώμα-στρώμα σε προκαθορισμένες θέσεις, όπου ψύχεται και στερεοποιείται. Μερικές φορές η ψύξη του υλικού επιταχύνεται μέσω της χρήσης ανεμιστήρων ψύξης προσαρτημένων στην κεφαλή εξώθησης.[24]

Για να γεμίσει μια περιοχή, απαιτούνται πολλαπλά περάσματα. Όταν ολοκληρωθεί ένα στρώμα, η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται προς τα κάτω (ή σε άλλες ρυθμίσεις του μηχανήματος, η κεφαλή εξώθησης κινείται προς τα επάνω) και τοποθετείται ένα νέο στρώμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. [25]

2.1.2 Stereolithography SLA

Η Στερεολιθογραφία (SLA) είναι μια διαδικασία παρασκευής προσθέτων που ανήκει στην οικογένεια Φωτοπολυμερισμού Vat. Στο SLA, ένα αντικείμενο δημιουργείται με την επιλεκτική σκλήρυνση ενός στρώματος από στρώμα πολυμερούς ρητίνης χρησιμοποιώντας μία υπεριώδη (UV) δέσμη λέιζερ. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο SLA είναι φωτοευαίσθητα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που έρχονται σε υγρή μορφή. Η SLA φημίζεται για την πρώτη τεχνολογία 3D Printing: ο εφευρέτης της κατοχύρωσε την τεχνολογία από το 1986. Αν χρειάζονται μέρη με πολύ υψηλή ακρίβεια ή λεία τελική επιφάνεια, το SLA είναι η οικονομικά πιο αποδοτική διαθέσιμη τεχνολογία εκτύπωσης 3D. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν ο σχεδιαστής εκμεταλλεύεται τα οφέλη και τους περιορισμούς της διαδικασίας κατασκευής. Το SLA έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την Άμεση Επεξεργασία Φωτός (DLP), μια άλλη τεχνολογία εκτύπωσης 3D Φωτοπολυμερισμού. Για απλότητα, οι δύο τεχνολογίες μπορούν να αντιμετωπίζονται ως ίσες. [26]

Τρόπος λειτουργίας SLA

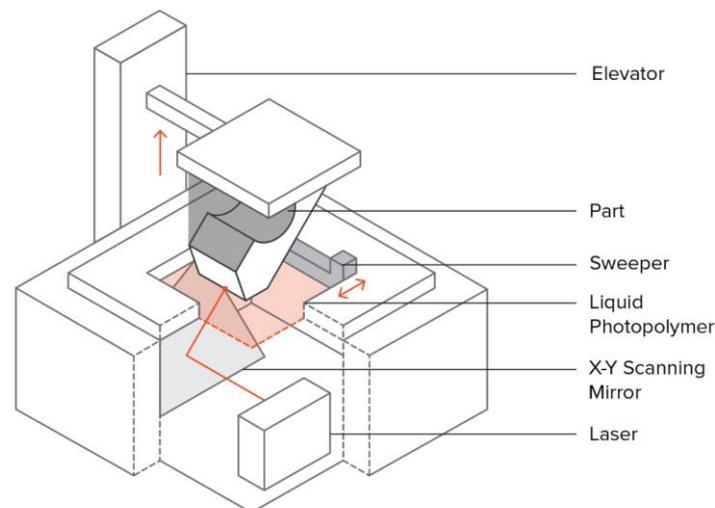


Σχήμα 5: Διαδικασία παραγωγής SLA [27]

Η πλατφόρμα κατασκευής τοποθετείται πρώτα στη δεξαμενή υγρού φωτοπολυμερούς, σε απόσταση ενός ύψους στρώματος από την επιφάνεια του υγρού. Στη συνέχεια ένα λέιζερ UV δημιουργεί το επόμενο στρώμα με επιλεκτική σκλήρυνση και στερεοποίηση της φωτοπολυμερούς ρητίνης. Η ακτίνα λέιζερ επικεντρώνεται στην προκαθορισμένη διαδρομή χρησιμοποιώντας ένα σύνολο καθρεπτών, που ονομάζονται galvos. Όταν ολοκληρωθεί η

στρώση, η πλατφόρμα μετακινείται σε ασφαλή απόσταση και η λεπίδα επανακαλύπτει την επιφάνεια. Στη συνέχεια, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. [27]

Η υγρή ρητίνη στερεοποιείται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται φωτοπολυμερισμός: κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης οι μονομερείς αλυσίδες άνθρακα που συνθέτουν την υγρή ρητίνη ενεργοποιούνται από το φως του υπεριώδους λέιζερ και καθίστανται στερεές, δημιουργώντας ισχυρούς δεσμούς. Η διαδικασία φωτοπολυμερισμού είναι μη αναστρέψιμη και δεν υπάρχει τρόπος να μετατραπούν τα εξαρτήματα SLA πίσω στη υγρή τους μορφή. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υλικά που παράγονται με SLA είναι κατασκευασμένα από θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιεί το FDM.



Σχήμα 6: Χαρακτηριστικά του SLA [27]

Στα συστήματα SLA, οι περισσότερες παράμετροι εκτύπωσης καθορίζονται από τον κατασκευαστή και δεν μπορούν να τροποποιηθούν. Οι μόνες εισοδοί είναι το ύψος του στρώματος και ο προσανατολισμός αντικειμένου (ο τελευταίος καθορίζει τη θέση υποστήριξης). Το τυπικό ύψος στρώματος στο SLA κυμαίνεται μεταξύ 25 και 100 μικρά. Τα ύψη χαμηλότερου στρώματος καταγράφουν τις καμπύλες γεωμετρίας με μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά αυξάνουν το χρόνο κατασκευής (και το κόστος) και την πιθανότητα μιας αποτυχημένης εκτύπωσης. Ένα ύψος στρώματος 100 μικρών είναι κατάλληλο για τις περισσότερες κοινές εφαρμογές. Το μέγεθος κατασκευής είναι μια άλλη παράμετρος που είναι σημαντική για τον σχεδιαστή. Το μέγεθος κατασκευής εξαρτάται από τον τύπο του μηχανήματος SLA. Υπάρχουν δύο βασικές ρυθμίσεις μηχανής SLA: ο προσανατολισμός από πάνω προς τα κάτω και ο προσανατολισμός από τη βάση προς τα κάτω. Οι εκτυπωτές SLA από την κορυφή προς τα κάτω τοποθετούν την πηγή λέιζερ πάνω από τη δεξαμενή και το τμήμα είναι κατασκευασμένο προς τα πάνω. Η πλατφόρμα κατασκευής ξεκινά από την κορυφή της δεξαμενής ρητίνης και κινείται προς τα κάτω μετά από κάθε στρώση.

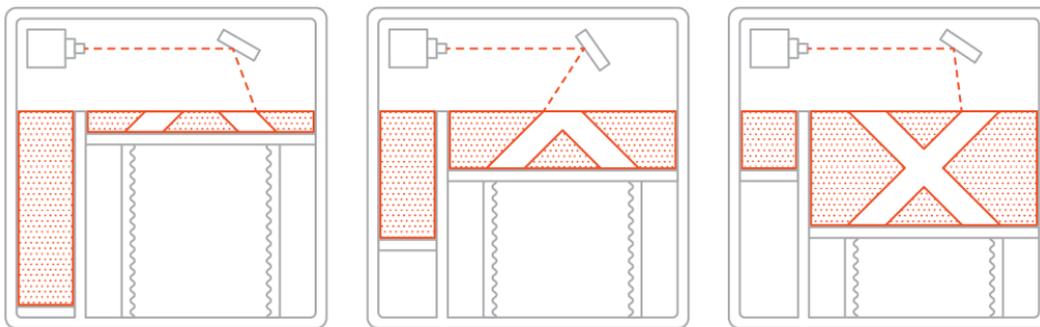
Οι εκτυπωτές SLA bottom-up τοποθετούν την πηγή φωτός κάτω από τη δεξαμενή ρητίνης και το τμήμα είναι κατασκευασμένο στραμμένο προς τα επάνω. Η δεξαμενή έχει έναν διαφανή πυθμένα με επίστρωση σιλικόνης που επιτρέπει στο φως του λέιζερ να περάσει, αλλά

σταματάει τη συγκολλημένη ρητίνη να κολλήσει σε αυτήν. Μετά από κάθε στρώση, η σκληρυμένη ρητίνη αποσπάται από τον πυθμένα της δεξαμενής, καθώς η πλατφόρμα κατασκευής κινείται προς τα πάνω. [26][27]

2.1.3 Selective Laser Sintering (SLS)

Το selective laser sintering (SLS), είναι μια διαδικασία πρόσθετης παρασκευής που ανήκει στην οικογένεια Powder Bed Fusion. Στον SLS, ένα λέιζερ συντήκει επιλεκτικά τα σωματίδια μιας πολυμερούς κόνεως, συγχωνεύοντάς τα μαζί και κατασκευάζοντας ένα αντικείμενο στρώση-στρώση. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις SLS είναι θερμοπλαστικά πολυμερή που έρχονται σε κοκκώδη μορφή.

Η SLS 3D Printing χρησιμοποιείται τόσο για πρωτότυπα λειτουργικών πολυμερών στοιχείων όσο και για μικρές παραγωγικές διαδικασίες, καθώς προσφέρει πολύ υψηλή ελευθερία σχεδιασμού, υψηλή ακρίβεια και παράγει μέρη με καλές και συνεπείς μηχανικές ιδιότητες, σε αντίθεση με το FDM ή το SLA. Οι δυνατότητες της τεχνολογίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο έπακρο, μόνο όταν ο σχεδιαστής λαμβάνει υπόψη τα βασικά οφέλη και τους περιορισμούς του. [28]



Σχήμα 7: Η SLS διαδικασία εκτύπωσης [30]

Τρόπος λειτουργίας SLS

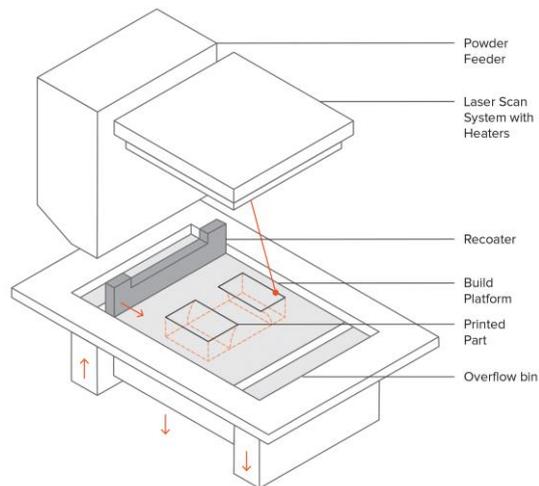
Η δεξαμενή κόκκων και η περιοχή κατασκευής αρχικά θερμαίνονται ακριβώς κάτω από τη θερμοκρασία τήξης του πολυμερούς και μια λεπίδα απλώνει ένα λεπτό στρώμα σκόνης πάνω από την πλατφόρμα κατασκευής.

Στη συνέχεια, ένα λέιζερ CO₂ ανιχνεύει το περίγραμμα της επόμενης στρώσης και συσσωρεύεται επιλεκτικά (ασφαλίζει μαζί) τα σωματίδια της σκόνης πολυμερούς. Ολόκληρη η διατομή του στοιχείου σαρώθηκε, οπότε το τμήμα είναι χτισμένο στερεό.

Όταν ολοκληρωθεί η στρώση, η πλατφόρμα κατασκευής κινείται προς τα κάτω και η λεπίδα επαλείφει εκ νέου την επιφάνεια. Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ολόκληρο το αντικείμενο.

Μετά την εκτύπωση, τα εξαρτήματα είναι πλήρως καυσιωμένα στην μη προδιαγεγραμμένη σκόνη και ο κάδος σκόνης πρέπει να κρυώσει πριν τα τμήματα μπορούν να αποσυσκευαστούν. Αυτό μπορεί να διαρκέσει αρκετό χρόνο (έως και 12 ώρες). Τα μέρη στη συνέχεια καθαρίζονται με πεπιεσμένο αέρα ή άλλα μέσα εκτόξευσης και είναι έτοιμα να

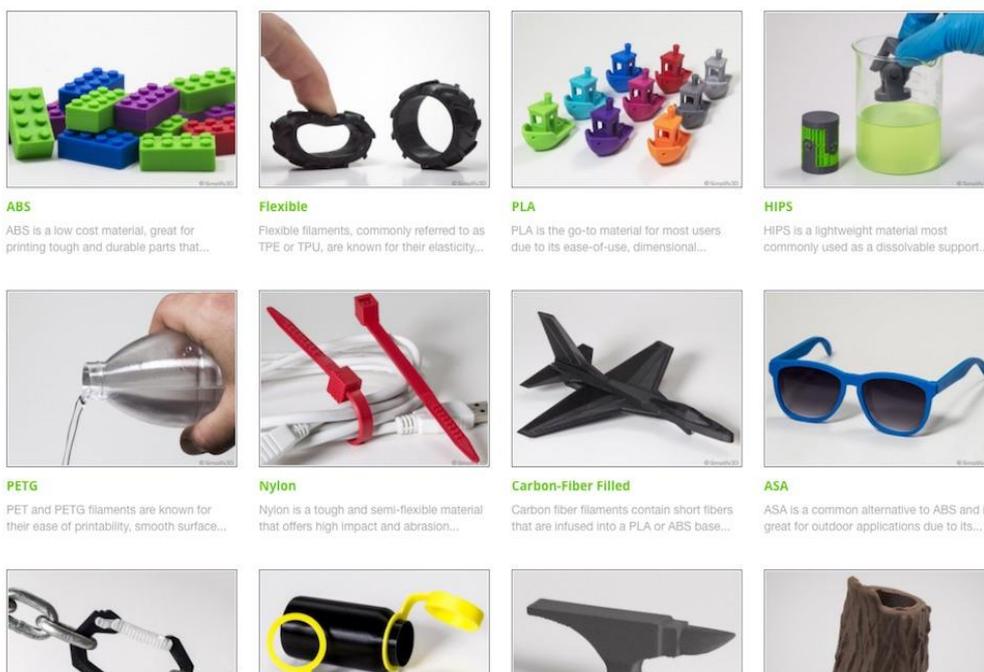
χρησιμοποιηθούν ή να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία. Η υπόλοιπη σκόνη που δεν έχει υποστεί ανάμιξη συλλέγεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί (η σκόνη SLA είναι μόνο 50% ανακυκλώσιμη εν τούτοις). [30]



Σχήμα 8: Χαρακτηριστικά της SLS [30]

2.2 Πρώτες Ύλες (Filaments)

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση των υλικών για εφαρμογές 3D εκτύπωσης. Κάθε υλικό έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και αδυναμίες, οπότε η επιλογή του σωστού είναι ένα απαιτητικό έργο, το οποίο βασίζεται στις διάφορες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μεταξύ των υλικών. Τα κυριότερα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στην τριδιάστατη εκτύπωση αποτελούν το Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), θερμοπλαστικά ελαστομερή, πολυγαλακτικό οξύ (PLA), Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG). [31][32]



Σχήμα 9: Νέα υλικά για εφαρμογές 3D εκτύπωσης [32]

2.2.1 Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

Το ABS (στυρόλιο βουταδιενίου ακρυλονιτριλίου) έχει μακρά ιστορία στον κόσμο 3D εκτύπωσης. Αυτό το υλικό ήταν ένα από τα πρώτα πλαστικά που χρησιμοποιήθηκαν με βιομηχανικούς εκτυπωτές 3D. Πολλά χρόνια αργότερα, το ABS εξακολουθεί να είναι ένα πολύ δημοφιλές υλικό χάρη στο χαμηλό κόστος και τις καλές μηχανικές του ιδιότητες. Το ABS είναι γνωστό για την ανθεκτικότητα και την αντοχή σε κρούση, επιτρέποντάς να εκτυπωθούν ανθεκτικά εξαρτήματα. Το ABS έχει επίσης υψηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, πράγμα που σημαίνει ότι το υλικό μπορεί να αντέξει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες προτού αρχίσει να παραμορφώνεται. Αυτό καθιστά το ABS εξαιρετική επιλογή για εξωτερικές εφαρμογές ή εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Το ABS τείνει επίσης να συστέλλεται αρκετά καθώς ψύχεται, οπότε ο έλεγχος της θερμοκρασίας του όγκου κατασκευής και του εσωτερικού μέρους μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη. [33]

2.2.2 Thermoplastic elastomers (TPE)

Τα εύκαμπτα νήματα κατασκευάζονται από θερμοπλαστικά ελαστομερή (TPE) που είναι ένα μίγμα από σκληρό πλαστικό και καουτσούκ. Όπως υποδηλώνει το όνομα, το υλικό αυτό είναι ελαστικό και επιτρέπει στο πλαστικό να τεντώνεται και να καμφθεί εύκολα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι TPE, όπου η θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU) είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μεταξύ των νημάτων εκτύπωσης 3D. Σε πολλές περιπτώσεις, οι όροι αυτοί χρησιμοποιούνται εναλλακτικά, μαζί με δημοφιλή εμπορικά σήματα όπως το Ninjaflex. Ο βαθμός ελαστικότητας στο πλαστικό εξαρτάται από τον τύπο του TPE και τη χημική σύνθεση που χρησιμοποιείται από τον κατασκευαστή. Για παράδειγμα, μερικά νήματα μπορούν να είναι μερικώς εύκαμπτα, όπως ένα ελαστικό αυτοκινήτου, άλλα μπορεί να είναι ελαστικά και πλήρως εύκαμπτα σαν μια ελαστική ταινία. [34]

2.2.3 Polylactic acid (PLA)

Το πολυγαλακτικό οξύ, κοινώς γνωστό ως PLA, είναι ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση 3D. Είναι το προεπιλεγμένο νήμα επιλογής για τους περισσότερους εκτυπωτές 3D που βασίζονται σε εξώθηση επειδή μπορεί να εκτυπωθεί σε χαμηλή θερμοκρασία. Το PLA είναι ένα πρώτο υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως καθώς είναι εύκολο να εκτυπωθεί, πολύ φθινό και δημιουργεί αντικείμενα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Είναι επίσης ένα από τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον νήματα στην αγορά σήμερα. Προερχόμενη από καλλιέργειες όπως το καλαμπόκι και το ζαχαροκάλαμο, το PLA είναι ανανεώσιμο και, κυρίως, βιοαποικοδομήσιμο. [35]

2.2.4 High Impact Polystyrene (HIPS)

Το HIPS ή το πολυστυρένιο υψηλής επίδρασης είναι ένα διαλυτό υλικό υποστήριξης που χρησιμοποιείται συνήθως με ABS. Όταν χρησιμοποιείται ως υλικό υποστήριξης, το HIPS μπορεί να διαλυθεί σε d-Limonene, αφήνοντας την εκτύπωση απαλλαγμένη από τυχόν σημάψεις που προκαλούνται από την αφαίρεση του στηρίγματος. Το HIPS έχει πολλές από τις ίδιες ιδιότητες εκτύπωσης με το ABS. Όχι μόνο είναι το HIPS εξαιρετικό για την υποστήριξη των εκτυπώσεων ABS, είναι επίσης πιο διαστασιακά σταθερό και ελαφρώς ελαφρύτερο από το ABS, καθιστώντας την εξαιρετική επιλογή για εξαρτήματα που θα

καταλήξουν να φθαρούν ή να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που μπορούν να επωφεληθούν από το ελαφρύτερο βάρος. [36]

2.2.5 Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG)

Το PETG είναι μια τροποποιημένη με γλυκόλη έκδοση του τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET), η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή φιαλών νερού. Είναι ημι-άκαμπτο υλικό με καλή αντοχή στην κρούση, αλλά έχει ελαφρώς μαλακότερη επιφάνεια που το καθιστά επιρρεπές σε φθορά. Το υλικό επωφελείται επίσης από μεγάλα θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά, επιτρέποντας στο πλαστικό να ψύχεται αποτελεσματικά. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτού του υλικού στην αγορά, συμπεριλαμβανομένων των PETG, PETE και PETT. [37]

2.2.6 Nylon

Το νάυλον (γνωστό και ως Πολυαμίδιο) είναι ένα δημοφιλές υλικό στη βιομηχανία πλαστικών, γνωστό για την ανθεκτικότητα και την ευελιξία του. Τα νήματα από νάυλον τυπικά απαιτούν θερμοκρασίες εξώθησης κοντά στους 250 °C, ωστόσο, ορισμένα εμπορικά σήματα επιτρέπουν την εκτύπωση σε θερμοκρασίες χαμηλές έως 220 °C λόγω της χημικής σύνθεσής τους. Μία μεγάλη πρόκληση με νήματα Νάυλον είναι ότι είναι υγροσκοπικά, πράγμα που σημαίνει ότι απορροφούν εύκολα την υγρασία από το περιβάλλον τους. Η εκτύπωση του νάυλον μετά την απορρόφηση της υγρασίας θα οδηγήσει σε πολλά ζητήματα ποιότητας εκτύπωσης, επομένως η αποθήκευση νήματος καθίσταται πολύ σημαντική και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. [38]

2.2.7 Νήματα Από Ίνες Άνθρακα

Τα νήματα από ίνες άνθρακα χρησιμοποιούν μικροσκοπικές ίνες που εγχύονται σε ένα υλικό βάση για να βελτιώσουν τις ιδιότητες αυτού του υλικού. Αρκετά δημοφιλή νημάτια μπορούν να αγοραστούν με γεμίσματα από ανθρακονήματα, συμπεριλαμβανομένων των PLA -το οποίο αποτελεί το συνηθέστερο-, PETG, Nylon, ABS, και Polycarbonate. Αυτές οι ίνες είναι εξαιρετικά ισχυρές και προκαλούν την αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας του νήματος. Αυτό σημαίνει επίσης ότι τα τριδιάστατα τυπωμένα μέρη θα είναι πολύ ελαφρύτερα και πιο διαστατικά σταθερά, καθώς οι ίνες θα βοηθήσουν στην αποτροπή συρρίκνωσης του εξαρτήματος καθώς ψύχεται. Οι ρυθμίσεις εκτύπωσης, όπως η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα, η προσκόλληση της κλίνης και οι ταχύτητες διέλασης, θα είναι πολύ παρόμοιες με τις κανονικές ρυθμίσεις που χρησιμοποιούνται για το υλικό βάση στις οποίες προστέθηκαν οι ίνες (για παράδειγμα, οι ρυθμίσεις PLA αποθέματος θα ήταν ένα καλό σημείο εκκίνησης για PLA με βάση ίνες άνθρακα). Ωστόσο, λόγω των πρόσθετων ινών, αυτά τα ειδικά υλικά είναι πιο πιθανό να φράξουν και μπορεί να απαιτήσουν ειδικό υλικό για να αποφευχθεί η βλάβη του εκτυπωτή. [39]

2.2.8 Acrylonitrile styrene acrylate (ASA)

Το ASA, επίσης γνωστό ως ακρυλικό στυρόλιο ακρυλονιτρίλιο, είναι ένα 3D εκτυπώσιμο πλαστικό με ιδιότητες παρόμοιες με το ABS. Αρχικά αναπτύχθηκε ως εναλλακτική λύση στο ABS που θα ήταν πιο ανθεκτική στην υπεριώδη ακτινοβολία αλλάζοντας τον τύπο του καουτσούκ που χρησιμοποιείται στη σύνθεση. Το ASA είναι γνωστό για υψηλή αντοχή στην κρούση, υψηλότερη αντοχή στη θερμοκρασία και αυξημένη δυσκολία εκτύπωσης. Χρησιμοποιείται συνήθως σε εξωτερικές εφαρμογές αντί για ABS λόγω της ανώτερης

αντίστασής του στην υπεριώδη ακτινοβολία και τις σκληρές καιρικές συνθήκες. Η ASA διατηρεί ακόμα πολλά από τα ίδια μειονεκτήματα της εκτύπωσης που παρατηρούνται με το ABS. [40]

2.2.9 Polycarbonate (PC)

Το πολυανθρακικό (PC) είναι ένα υλικό υψηλής αντοχής που προορίζεται για σκληρά περιβάλλοντα και εφαρμογές μηχανικής. Έχει εξαιρετικά υψηλή εκτροπή θερμότητας και αντίσταση στην κρούση. Το πολυανθρακικό έχει επίσης υψηλή θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου 150 ° Celsius. Αυτό σημαίνει ότι θα διατηρήσει τη δομική της ακεραιότητα μέχρι αυτή τη θερμοκρασία, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Μπορεί επίσης να κάμπτεται χωρίς σπάσιμο και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές όπου απαιτείται κάποια μικρή ευελιξία. Τα περισσότερα διαθέσιμα πολυκαρβονικά νημάτια περιέχουν πρόσθετα που επιτρέπουν την εκτύπωση του νήματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το πολυανθρακικό είναι εξαιρετικά υγροσκοπικό, πράγμα που σημαίνει ότι θα απορροφήσει την υγρασία από τον αέρα, γεγονός που θα επηρεάσει την απόδοση εκτύπωσης και τη δύναμή του. Θα πρέπει να φυλάσσεται σε αεροστεγή δοχεία χωρίς υγρασία μετά το άνοιγμα. Απαιτεί επίσης πολύ υψηλές θερμοκρασίες για την εκτύπωση και θα εμφανίσει διαχωρισμό στρώματος εάν εκτυπωθεί σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία ή με ενεργοποιημένη την υπερβολική ψύξη. Το πολυανθρακικό συχνά εκτυπώνεται καλύτερα σε μια μηχανή που έχει έναν κλειστό όγκο κατασκευής και είναι ικανός να χειρίζεται υψηλές θερμοκρασίες κλίνης και εξωθητήρα. [41]

2.2.10 Πολυπροπυλένιο

Το πολυπροπυλένιο είναι ένα ημισκληρο και ελαφρύ υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως στις εφαρμογές αποθήκευσης και συσκευασίας. Η ημι-κρυσταλλική δομή του υλικού αναγκάζει τα τριδιάστατα τυπωμένα μέρη να στρεβλωθούν σε μεγάλο βαθμό κατά την ψύξη, καθιστώντας δύσκολη την εκτύπωση 3D. Το πολυπροπυλένιο είναι σκληρό και έχει καλή αντοχή στην κόπωση, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές χαμηλής αντοχής, όπως ζωντανοί μεντεσέδες, μάντες, λουριά κλπ. Μερικοί κατασκευαστές έχουν δημιουργήσει μίγματα πολυπροπυλενίου που έχουν βελτιωμένη αντοχή καθιστώντας το κατάλληλο για πρακτική χρήση. [42]

2.2.11 Polyvinyl alcohol (PVA)

PVA ή πολυβινυλική αλκοόλη, είναι ένα μαλακό και βιοδιασπώμενο πολυμερές που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην υγρασία. Όταν εκτίθεται σε νερό, το PVA διαλύεται στην πραγματικότητα, γεγονός που το καθιστά ένα πολύ χρήσιμο υλικό δομής υποστήριξης για 3D εκτύπωση. Κατά την εκτύπωση εξαιρετικά πολύπλοκων σχημάτων ή με μερικώς κλειστές κοιλότητες, τα υποστηρίγματα PVA μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αφαιρεθούν εύκολα με διάλυση σε ζεστό νερό. Οι τυπικές υποστηρίξεις μπορεί να ήταν δύσκολο να εκτυπωθούν ή να αφαιρεθούν σε αυτές τις περιπτώσεις. Το PVA μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως υλικό μοντέλου εάν υπάρχει ανάγκη να γίνουν γρήγορα πρωτότυπα. [43]

Κεφάλαιο 3. Έξυπνα Σύνθετα Υλικά

3.1 Smart Technologies

Ο όρος έξυπνες (ή ευφρείς) τεχνολογίες (Smart-Tech) νοείται ως γενίκευση της έννοιας των έξυπνων δομών. Οι έξυπνες τεχνολογίες περιλαμβάνουν μηχανικά συστήματα εξοπλισμένα με αισθητήρες, ενεργοποιητές και προγραμματισμένους προγραμματιστές, οι οποίοι επιτρέπουν σε μια δομή να προσαρμόζεται σε απρόβλεπτες εξωτερικές συνθήκες φόρτισης και επιβάρυνσης. Η έννοια των έξυπνων τεχνολογιών απαιτεί τη γνώση για το ίδιο το μηχανικό σύστημα, τους ενσωματωμένους αισθητήρες και τις ελεγχόμενες συσκευές (συνήθως βασισμένες σε έξυπνα υλικά) και την ηλεκτρονική οδήγηση με ενσωματωμένο λογισμικό, το οποίο προσθέτει την ευφυΐα στο σύστημα. [44]

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των έξυπνων υλικών (τροποποιώντας τις ιδιότητές τους, π.χ. λόγω της διαφοροποίησης του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου) και των υπολογιστικών τεχνικών έχουν φθάσει σε ένα σημείο όπου η συνέργειά τους έχει σημαντικό αντίκτυπο στην εφαρμογή των διεπιστημονικών εννοιών των έξυπνων τεχνολογιών. Η επιστήμη των υλικών έχει οδηγήσει στη θεωρητική και πειραματική ανάπτυξη πολυλειτουργικών υλικών (π.χ. πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, κράματα μνήμης σχήματος, μαγνητοθεωρητικά ρευστά (MRFs), μαγνητοσυστολικά υλικά). Επιπλέον, η ανάπτυξη μικροεπεξεργαστών και μικρογραφίας επέτρεψε τον σχεδιασμό ενσωματωμένων συστημάτων με δυνατότητες καταναμημένου ελέγχου. Το τελικό ολοκληρωμένο προϊόν αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

(1) ένα σύστημα καταναμημένης ανίχνευσης (π.χ. με βάση πιεζοηλεκτρικούς μορφοτροπείς) ικανό να παρακολουθεί τη δομική απόκριση.

(2) ενεργοποιητές, ικανούς να τροποποιήσουν τις δομικές ιδιότητες π.χ. χρησιμοποιώντας MRFs (Μαγνητοθεωρητικά υγρά), τα οποία είναι έξυπνα υγρά που όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο, αυξάνεται δραστικά το ιξώδες τους σε σημείο που γίνονται ιξωδοελαστικά υγρά και

(3) μονάδες ελέγχου ικανές να υλοποιήσουν μια προκαθορισμένη στρατηγική.

Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικά σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης της δομικής υγείας, της απορρόφησης των μηχανικών κρουσμάτων, της απόσβεσης των κραδασμών και της μείωσης του θορύβου.

Υπάρχουν ορισμένα είδη έξυπνων υλικών, τα οποία είναι ήδη κοινά και χρησιμοποιούνται ευρέως. Μερικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι υλικά που παράγουν τάση όταν εφαρμόζεται πίεση. Εφόσον το φαινόμενο αυτό ισχύει και αντίστροφα, μια τάση στο δείγμα θα προκαλέσει μεταβολή στην πίεση στο δείγμα. Καταλλήλως σχεδιασμένες κατασκευές κατασκευασμένες από αυτά τα υλικά μπορούν επομένως να κατασκευαστούν ώστε να κάμπτονται, να επεκτείνονται ή να συστέλλονται όταν εφαρμόζεται μία τάση.
- Τα κράματα μνήμης σχήματος και τα πολυμερή μνήμης σχήματος είναι υλικά στα οποία μπορεί να προκληθεί μεγάλη παραμόρφωση και να ανακτηθεί μέσω αλλαγών θερμοκρασίας ή τάσης (ψευδοελαστικότητα). Η επίδραση της μνήμης σχήματος

προκύπτει λόγω αντίστοιχης αλλαγής της μαρτενσιτικής φάσης και επαγόμενης ελαστικότητας σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

- Τα φωτοβολταϊκά υλικά ή η οπτο-ηλεκτρονικά μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα.
- Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή (EAP) αλλάζουν τον όγκο τους με τάση ή ηλεκτρικά πεδία.
- Τα μαγνητοσυστολικά υλικά παρουσιάζουν μια αλλαγή στο σχήμα υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου και επίσης παρουσιάζουν μια αλλαγή στο μαγνητισμό τους υπό την επίδραση της μηχανικής καταπόνησης.
- Τα κράματα μνήμης μαγνητικού σχήματος είναι υλικά που αλλάζουν το σχήμα τους σε απόκριση σε μια σημαντική αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο.
- Έξυπνα ανόργανα πολυμερή που δείχνουν συντονισμένες και ανταποκρινόμενες ιδιότητες.
- Τα ευαίσθητα στο pH πολυμερή είναι υλικά που αλλάζουν σε όγκο όταν μεταβάλλεται το pH του περιβάλλοντος.
- Τα πολυμερή με ευαισθησία στην θερμοκρασία είναι υλικά τα οποία υφίστανται αλλαγές στη θερμοκρασία.
- Τα αλοχρωμικά υλικά είναι συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά που αλλάζουν το χρώμα τους ως αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης οξύτητας.
- Τα χρωμογόνα συστήματα αλλάζουν χρώμα σε απόκριση σε ηλεκτρικές, οπτικές ή θερμικές αλλαγές.
- Τα φερορευόμενα είναι μαγνητικά ρευστά (επηρεασμένα από μαγνήτες και μαγνητικά πεδία).
- Τα φωτομηχανικά υλικά αλλάζουν σχήμα υπό έκθεση στο φως.
- Η πολυκαπρολακτόνη (πολύμορφη) μπορεί να μορφοποιηθεί με εμβάπτιση σε ζεστό νερό.
- Τα αυτοελαστικά υλικά έχουν την εγγενή ικανότητα να αποκαθιστούν ζημιές λόγω της κανονικής χρήσης, διευρύνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του υλικού.
- Τα διηλεκτρικά ελαστομερή (DEs) είναι συστήματα έξυπνων υλικών τα οποία παράγουν μεγάλα στελέχη (έως και 500%) υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.
- Τα μαγνητοσυστολικά υλικά είναι ενώσεις που υφίστανται αναστρέψιμη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την έκθεση σε ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.
- Τα θερμοηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συσκευών που μετατρέπουν τις διαφορές θερμοκρασίας σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα.
- Τα χημειοαντιδραστικά υλικά αλλάζουν το μέγεθος ή τον όγκο υπό την επίδραση εξωτερικών χημικών ή βιολογικών ενώσεων.

Οι ευφυείς δομές έγιναν αντικείμενο επιστημονικής έρευνας ως αποτέλεσμα νέων απαιτήσεων που προήλθαν από τη διαστημική μηχανική στη δεκαετία του 1970 και του 1980. Για παράδειγμα, το πρόβλημα της διατήρησης του σχήματος μιας παραβολικής κεραίας, που ξεκίνησε στο διάστημα. Το θερμικό σοκ που συμβαίνει κατά τη διέλευση από τη σκιά της Γης μπορεί να προκαλέσει δονήσεις, οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να αποσβεστούν. Αυτές οι

δονήσεις προκαλούνται λόγω της μεγάλης ευελιξίας των διαστημικών δομών, με αποτέλεσμα τη χαμηλή φυσική απόσβεσή τους. Ως λύση, ευφυή συστήματα, ικανά να μετριάσουν αυτές τις δονήσεις, έπρεπε να εφευρεθούν.

Στη δεκαετία του 1990, η έννοια της έξυπνης δομής αναπτύχθηκε μέσω διαφόρων εργαστηριακών επιδείξεων πλήρως ενεργοποιημένων, αλλά πολύ ευέλικτων συστημάτων, δυναμικά ελεγχόμενων με piezopatches. Τα προσαρμοστικά (ημι-ενεργά) συστήματα εφαρμόστηκαν επίσης αποτελεσματικά σε πολύ μεγάλες πραγματικές πολιτικές δομές (π.χ. ψηλά κτίρια σε σεισμικές περιοχές ή γέφυρες ανάρτησης με αποσβεστήρες ελεγχόμενης από το MRF). [45-49]

3.2 Composite Materials

Η λέξη “σύνθετο” (composite) σε ένα σύνθετο υλικό υποδηλώνει ότι δύο ή περισσότερα υλικά συνδυάζονται σε μακροσκοπική κλίμακα προς σχηματισμό ενός χρήσιμου υλικού. Το κλειδί αποτελεί η μακροσκοπική εξέταση του υλικού. Διάφορα υλικά μπορούν να συνδυασθούν σε μικροσκοπική κλίμακα, όπως σε κράματα, αλλά το υλικό που προκύπτει, μακροσκοπικά εξεταζόμενο, είναι ομογενές. Το πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι ότι συνήθως επεδεικνύουν τις καλύτερες ιδιότητες των συστατικών τους και συχνά εμφανίζουν κάποιες ιδιότητες που δεν έχει κανένα από τα συστατικά τους. Οι ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν με σχηματισμό ενός συνθέτου υλικού περιλαμβάνουν: αντοχή, ακαμψία, αντίσταση σε διάβρωση, αντίσταση σε τριβή, βάρος / πυκνότητα, όριο κοπώσεως, θερμοκρασιακά εξαρτώμενη συμπεριφορά, θερμική μόνωση, θερμική αγωγιμότητα, και ακουστική μόνωση. Σημειώνεται ότι δεν βελτιώνονται ταυτόχρονα όλες οι προηγούμενες ιδιότητες, όμως συχνά ούτε αυτό αποτελεί απαίτηση να γίνει. [50]

Τα σύνθετα υλικά είναι το αποτέλεσμα της προόδου της χημείας πολυμερών τα τελευταία 100 χρόνια, συμπεριλαμβανομένων της αναπτύξεως συνθετικών ινών και τεχνικών χυτεύσεων. Ιστορικές ημερομηνίες για την εξέλιξη των σύνθετων υλικών εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα. Αν και τα πρώτα σύνθετα θλιβά (τεχνητά παραγόμενα) κατασκευάστηκαν περί το 1920, όμως η πραγματική βιομηχανική παραγωγή των σύνθετων υλικών ξεκίνησε από τα μέσα της δεκαετίας του 1950, όταν επετεύχθη σημαντική πρόοδος στην χημεία των πολυμερών (εμπορική διάθεση εποξεικών – πολυεστερικών ρητινών) καθώς και με την παραγωγή ινών ενισχύσεως υάλου. [51]

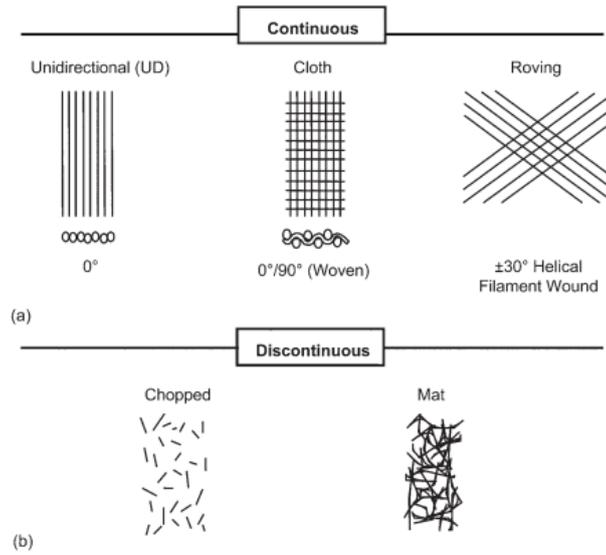
Ένα τυπικό σύνθετο υλικό αποτελείται από μια συνεχή μήτρα (matrix) του ενός συστατικού, μέσα στην οποία είναι διεσπαρμένο το δεύτερο συστατικό με την μορφή σωματιδίων ή ινών. Ανάλογα με την φύση της μήτρας τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε σύνθετα υλικά με μήτρα μέταλλο, κεραμική ή πολυμερές. Η τελευταία περίπτωση είναι και η συνηθέστερη.

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις της σύγχρονης τεχνολογίας, σε πολλές περιπτώσεις δεν μπορούν να ικανοποιούνται από τα παραδοσιακά υλικά, πράγμα που οδήγησε στην ανάπτυξη νέων υλικών, όπως τα σύνθετα. Με συνδυασμό και ειδική διάταξη διαφόρων συστατικών επιτυγχάνεται η δημιουργία νέων υλικών, με βελτιωμένες ιδιότητες ως προς τα αρχικά τους. Ιδιαίτερος πλεονεκτικές ιδιότητες εμφανίζουν τα υλικά που ενισχύονται με ίνες οπλισμού. Τα υλικά αυτά δημιουργούνται με συνδυασμό υλικού από ίνες υψηλών αντοχών που χρησιμεύει ως φορέας της αντοχής και ενός φέροντος υλικού (μήτρας). Το τελευταίο μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί και χρησιμεύει για την προστασία και συγκράτηση των ινών, ενώ μπορεί να μεταδίδει τις εμφανιζόμενες καταπονήσεις προς τις ίνες οπλισμού. [52]

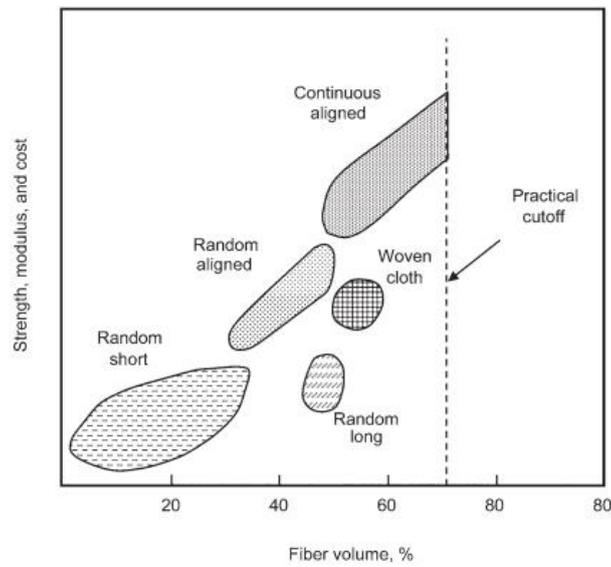
Περί το 1950 άρχισε να μια ευρεία τεχνική εφαρμογή των ενισχυμένων πολυμερών με ίνες υάλου. Έτσι δημιουργείται ένα νέο δομικό υλικό με συνδυασμό ινών υάλου, οι οποίες έχουν υψηλή αντοχή εφελκυσμού μαζί με εποξεική ρητίνη ως μήτρα. Το νέο αυτό υλικό συνδυάζει προσθετικά τις ιδιότητες αμφοτέρων των συστατικών από τα οποία προέρχεται. Λόγω και του χαμηλότερου ειδικού βάρους του, αυτό το υλικό αποτελεί υποψήφιο υλικό για την αντικατάσταση μετάλλων σσσε ελαφριές κατασκευές. Οι ίνες υάλου εμφανίζουν πράγματι υψηλές αντοχές εφελκυσμού, αλλά όμως το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι πολύ χαμηλό, περίπου 3 φορές χαμηλότερο από το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, πράγμα που εμποδίζει την χρησιμοποίησή τους σε ελαφριές κατασκευές μεγάλων ανοιγμάτων. Σε αντίθεση με τις ίνες υάλου, οι ίνες άνθρακα και οι αραμιδικές ίνες έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας πέραν από την υψηλή αντοχή τους. Γενικότερα τέτοιες ίνες αποτελούνται κυρίως από ελαφριά στοιχεία, όπως βόριο, άνθρακα και βηρύλλιο, καθώς επίσης από καρβίδια, νιτρίδια, πυριτίδια και οξειδία. Επίσης αυτές οι ίνες εμφανίζουν και ανθεκτικότητα σε υψηλότερες θερμοκρασίες έναντι των ινών υάλου, οι οποίες αντιθέτως δεν πρέπει να καταπονούνται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 400 °C. [53]

Το φέρον υλικό, το οποίο αρχικά ήταν θερμοπλαστικό παρουσιάζει ομοίως περιορισμούς κατά την χρησιμοποίηξη του στην πράξη, κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθεις πολυεστερικές ρητίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα μόνο μέχρι 100 °C, ενώ εποξεικές ρητίνες “υψηλών θερμοκρασιών” μόνο μέχρι περίπου 200 °C. Μεταγενέστερα αναπτυχθείσες ρητίνες είναι κατάλληλες μέχρι 400 °C για μικρό χρονικό διάστημα και μέχρι 300 °C για μακροχρόνια έκθεση. Για υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται ως φέροντα υλικά, τόσο ελαφριά μέταλλα, όπως αλουμίνιο, καθώς επίσης κράματα ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και κεραμικά υλικά, όπως καρβίδιο του πυριτίου, άνθρακας κλπ.

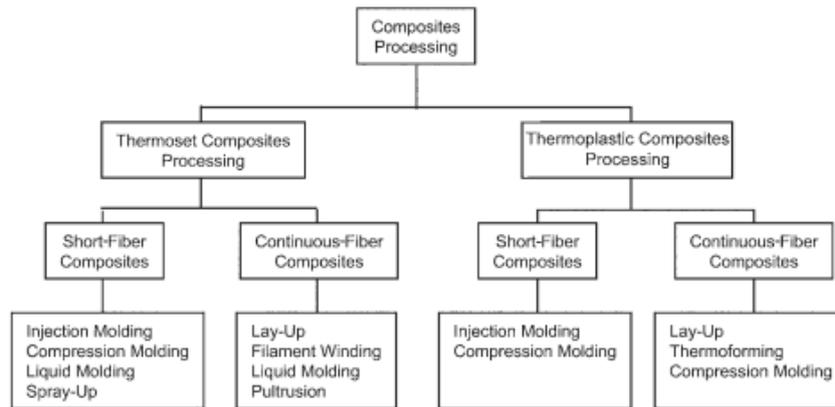
Κυρίως τα σύνθετα υλικά που έχουν ως ίνες οπλισμού ίνες άνθρακα και αραμιδικές χρησιμοποιούνται από ετών σε μεγάλη τεχνική κλίμακα. Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες υάλου χρησιμοποιούνται σε πολλές κατασκευές που απαιτούν ένα υλικό κυρίως με υψηλή αντοχή και συγχρόνως με χαμηλό ειδικό βάρος και μια καλή ανθεκτικότητα σε μια περιοχή μετρίων θερμοκρασιών, χωρίς να είναι αναγκαίο ένα υψηλό μέτρο ελαστικότητας (π.χ. κατασκευή δεξαμενών, κατασκευή σκαφών κλπ). Στις κατασκευές αεροπλάνων και διαστημοπλοίων, όπου ενδιαφέρουν όχι μόνο μια ελάττωση του βάρους, αλλά επίσης και μια μεγάλη ακαμψία της κατασκευής χρησιμοποιούνται σήμερα εποξεικές ρητίνες ενισχυμένες με ίνες βορίου. Επίσης ίνες άνθρακα με θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή ευρίσκουν ήδη τεχνολογική εφαρμογή (κατασκευή αεροπλάνων, ελικοπτέρων, εξοπλισμό για σπορ κλπ). [54]



Σχήμα 9: Τύποι ενίσχυσης [51]



Σχήμα 10: Επίδραση του τύπου και της ποσότητας ενίσχυσης στις σύνθετες επιδόσεις [54]



Σχήμα 11: Μεγάλες διεργασίες σύνθετης κατασκευής πολυμερούς μήτρας [53]

3.2.1 Εφαρμογές

Σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού και μήτρα πολυμερές (συνήθως ρητίνη ακόρεστου πολυεστέρα) χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές της συμβατικής τεχνολογίας, ενώ τα σύνθετα υλικά με αραμιδικές ίνες ή ίνες άνθρακα και μήτρα συνήθως εποξειδική ρητίνη χρησιμοποιούνται κυρίως στην διαστημική τεχνολογία και στην αεροναυπηγική. Πάντως οι εφαρμογές και των δύο τελευταίων κατηγοριών συνθέτων υλικών (τα οποία είναι πολύ ακριβότερα από αυτά με ίνες γυαλιού), ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, επεκτείνονται συνεχώς και σε τομείς της συμβατικής τεχνολογίας (π.χ. στον οικοδομικό τομέα). Τα σύνθετα υλικά με ανόργανες ίνες, όπως ίνες βορίου, είναι σαφώς ακριβότερα από όλες τις προηγούμενες κατηγορίες σύνθετων υλικών με αποτέλεσμα τον περιορισμό των εφαρμογών τους μόνο για ειδικές κατασκευές.

Γενικά οι τεχνολογικές εφαρμογές των σύνθετων υλικών με ανόργανες ίνες (ίνες άνθρακα, ίνες βορίου) γίνονται προς δύο κατευθύνσεις: για πολύ ελαφριές κατασκευές (όπου χρησιμοποιούνται επίσης και αραμιδικές ίνες) και για υψηλές θερμοκρασίες. Κριτήρια για την επιλογή της ίνας ενισχύσεως του σύνθετου υλικού δεν αποτελεί μόνο η τιμή της, η οποία δίδει σημαντικότατο προβάδισμα στις ίνες γυαλιού, αλλά και οι τιμές των ειδικών μηχανικών αντοχών τους. Υψηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλή πυκνότητα συνηγορούν υπέρ των ινών άνθρακα και των ινών βορίου. Εάν απαιτείται μόνο υψηλή αντοχή με μικρό βάρος, τότε μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και ίνες γυαλιού.

Γενικά οι ίνες μετάλλων, παρά την υψηλή αντοχή και το υψηλό μέτρο ελαστικότητας τους, καθώς και την καλή θερμική σταθερότητά τους, παρουσιάζουν περιορισμένη πρακτική εφαρμογή λόγω της μεγάλης πυκνότητάς τους και ως εκ τούτου των σχετικά χαμηλών ειδικών μηχανικών ιδιοτήτων τους (αντοχή εφελκυσμού ή μέτρο ελαστικότητας ανοιγμένα προς την πυκνότητα).

Στον τομέα των μεταφορικών μέσων, πέραν από της αεροναυπηγικής, σύνθετα υλικά και κυρίως αυτά με ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σιδηροδρόμων, πλοίων (λόγω και της σταθερότητας τους έναντι διαβρώσεως) και αυτοκινήτων. Προκειμένου για αγωνιστικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα για την ενίσχυση τμημάτων, που καταπονούνται έντονα. Στην οικοδομική μόνο οι ίνες γυαλιού βρίσκουν ήδη σημαντική εφαρμογή, όπως σε πλάκες φωτισμού, θόλους φωτισμού, σε ψυκτικούς χώρους, σε πισίνες και σε χώρους μεγάλης υγρασίας του αέρα. Σύνθετα υλικά βασιζόμενα σε πολυμερείς ίνες και κεραμικά, μπορούν να εφαρμοστούν σε έργα όπως γέφυρες και υδατοφράγματα. Δομικά

στοιχεία τέτοιων υλικών ή σε συνδιασμό τους με μπετόν οδηγούν σε ανθεκτικότερες κατασκευές κτιρίων, που ασφαλώς είναι και ανθεκτικότερες έναντι σεισμών.

Στη χημική βιομηχανία χρησιμοποιούνται ήδη δοχεία, σωλήνες και σιλό από σύνθετα υλικά ινών γυαλίου και πολυμερών. Υφάσματα από πολυκρυσταλλικές ίνες ανόργανων οξειδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα διήθησεως για θερμά διαβρωτικά αέρια, υγρά ή τήγματα μετάλλων. Σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα μπορούν να βρουν ευρεία πρακτική εφαρμογή στη κατασκευή συσκευών, καθόσον τοποθετούμενα ως επιφανειακές επικαλύψεις είναι πολύ ανθεκτικά έναντι ισχυρών οξέων και βάσεων. Μια μελλοντική χρήση τους ως “επιφανειακών” υλικών θα ήταν για παράδειγμα στη κατασκευή αντιδραστήρων, οι οποίοι θα μπορούν να θερμαίνονται απευθείας λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του επιφανειακού υλικού πράγμα το οποίο τεχνικά είναι δυνατό, όμως δυσχεραίνεται η πρακτική εφαρμογή λόγω του υψηλού κόστους του σύνθετου υλικού. Στην ηλεκτροτεχνία αναμένεται τεχνολογική εφαρμογή των ινών άνθρακα σε σύνθετα υλικά όπως στις μοντέρνες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου λόγω ελαττώσεως του βάρους των ροτόρων μπορεί να αυξηθεί ο αριθμός των στροφών και η ισχύς. Ένας άλλος τομέας εφαρμογής των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα ή αραμιδικές είναι ο τομέας των σπορ. [55]

Νέες εφαρμογές CFRP

Μια νέα εφαρμογή των σύνθετων υλικών ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ενδιαφέρονται να αναπτύξουν επιστήμονες για λογαριασμό της Nasa. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός είναι η αντικατάσταση των δεξαμενών αλουμινίου και τιτανίου που αποθηκεύονται κρυογονικά υγρά (όπως το οξυγόνο ή το υδρογόνο) με εποξικές δεξαμενές ενισχυμένες με ίνες άνθρακα. Τέτοιες όμως δεξαμενές δεν αντέχουν την τόσο χαμηλή θερμοκρασία και εμφανίζουν αστοχίες που είναι καταστροφικές. Επιστήμονες μελετούν την εφαρμογή εποξειδικών μητρών βασισμένες σε ιοντικά υγρά, κάτι το οποίο βάσει πειραμάτων αποδεικνύει ότι καταστέλλει και περιορίζει τέτοια ανεπιθύμητα φαινόμενα.

Τέλος μια ακόμα πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή των ινών άνθρακα είναι σε δωμάτια χωρίς ηχώ (anechoic chamber). Τα δωμάτια χωρίς ηχώ είναι 2 κατηγοριών. Τα πρώτα παγιδεύουν τα ηχητικά κύματα και έτσι όταν αυτά χτυπάνε στα τοιχώματα του δωματίου δεν μπορούν να διαδοθούν μέσα στο χώρο. Η δεύτερη κατηγορία των anechoic chambers αφορούν την παγίδευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με την ίδια λογική των προαναφερθέντων. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τέτοια δωμάτια είναι συνήθως αφροί πολυουρεθάνης ενισχυμένοι με «σκόνες» άνθρακα. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν πως η αντικατάσταση αυτών των σύνθετων υλικών με εποξικούς αφρούς ενισχυμένους με ίνες άνθρακα βελτιώνουν την απόδοση αυτών των δωματίων.

Συμπερασματικά, τα σύνθετα υλικά έχουν ήδη σημαντικό παρόν και αναμένεται να εμφανίσουν σημαντικότερο μέλλον. Πολλοί θεωρούν ότι τα υλικά του μέλλοντος θα είναι σύνθετα λόγω των απεριόριστων δυνατοτήτων που εμφανίζονται από τον συνδυασμό ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών. Προϋπόθεση για μια ευρύτερη ανάπτυξη και εφαρμογή τους αποτελεί όχι μόνο η μείωση του κόστους, ιδιαίτερα για τα σύνθετα υψηλών αποδόσεων, αλλά και η βελτίωση της τεχνολογίας κατασκευής τους. [56]

3.2.2 Πλεονεκτήματα Και Μειονεκτήματα

i. Πλεονεκτήματα

Τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι πολλαπλά, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων όμως το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε δύο κυρίως περιοχές: το μικρό βάρος, πιστοποιούμενο από τις υψηλές ειδικές ιδιότητες (λόγος τιμής ιδιότητας προς ειδικό βάρος) και την αντοχή στη διάβρωση.

Βασικό πλεονέκτημα είναι επίσης η δυνατότητα τοποθέτησης των ενισχυτικών ινών εκεί όπου ακριβώς χρειάζεται, χρησιμοποιώντας έτσι το λιγότερο αναγκαίο υλικό και περιορίζοντας συνεπώς το βάρος της κατασκευής. Ένα άλλο εξαιρετικό χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η αντοχή τους στη διάβρωση. Τα FRP δεν διαβρώνονται, δεν σαπίζουν και γενικά δεν αλλοιώνονται με κανένα τρόπο εάν εκτεθούν για αρκετά μακρύ χρονικό διάστημα σε θαλασσινό νερό ή αέρα. Παρ' όλα αυτά πρέπει να εξετάζονται για την χρόνια παραμονή τους σε οξειδωτικές συνθήκες. Εξαιρετική συμπεριφορά παρουσιάζεται παρουσιάζουν και έναντι χημικών ενώσεων. Για την πραγματοποίηση μιας επιτυχούς σχεδίασης, πρέπει να δοθεί προσοχή στις λεπτομέρειες έτσι ώστε να αποκλειστεί πιθανή διείσδυση του υγρού μέσα στο σύνθετο υλικό, όπου μπορεί να έχει καταστροφική επίδραση στη διεπιφάνεια ίνας-ρητίνης, καθώς και στις ίδιες τις ιδιότητες των ινών. Μοναδικό χαρακτηριστικό αποτελεί ακόμη και η ευελιξία στην κατασκευή. Μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές μπορούν να κατασκευαστούν μονοκόμματοες, σε ένα κομμάτι, ελαχιστοποιώντας το κόστος της μηχανικής επεξεργασίας και αποφεύγοντας την ύπαρξη ενώσεων και συνδέσμων. Το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της κατασκευής, το ίδιο το υλικό διαμορφώνεται ταυτόχρονα με το τεμάχιο, παρέχει τεράστια περιθώρια πρωτοποριακών κατασκευών, χωρίς τους περιορισμούς των συμβατικών διαδικασιών διαμόρφωσης και μηχανικής επεξεργασίας για τα μέταλλα.

Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα αναφέρονται επιγραμματικά όπως, οι θερμικές, κόπωση, ηλεκτρικές ιδιότητες, απουσία ραφών και συγκολλήσεων, χαρακτηριστικά απόσβεσης, επισκευασιμότητα, μηχανολογικός εξοπλισμός, μικρή συντήρηση, μικρή δυσκαμψία.

ii. Μειονεκτήματα

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, υπάρχουν κυρίως δύο που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή:

Η έλλειψη ολκιμότητας και η δυνατότητα επιθεώρησής τους. Τα σύνθετα υλικά δεν είναι όλκιμα, δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή και η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων τους είναι γραμμική μέχρι τη θραύση. Επομένως τα σύνθετα υλικά συγχωρούν τα λιγότερα κατασκευαστικά λάθη.

Η δυσκολία στην επιθεώρηση των κατασκευών από σύνθετα υλικά δεν σχετίζεται τόσο πολύ με τις τεχνικές και τις μεθόδους επιθεώρησης, όσο με την έκταση της απαιτούμενης εργασίας. Τα μεταλλικά κατασκευαστικά μέρη διατίθενται σε τυποποιημένες μορφές και συνοδεύονται συνήθως από ένα πιστοποιητικό ποιότητας. Έτσι η επιθεώρηση της τελικής κατασκευής περιορίζεται στις συγκολλήσεις και στις εν γένει ενώσεις. Από την άλλη μεριά, τα κατασκευαστικά μέρη από σύνθετα υλικά, ως αποτέλεσμα των αναγκαστικά μη σταθερών συνθηκών κατασκευής, απαιτούν επιθεώρηση ολόκληρης της επιφάνειάς τους, με αποτέλεσμα έκταση εργασίας πολύ μεγαλύτερης κλίμακας από ότι προηγουμένως.

Άλλα σημαντικά μειονεκτήματα αναφέρονται επιγραμματικά όπως, ο ερπυσμός, αντοχή σε τριβή, ευπάθεια στη φωτιά, συνδέσεις και εγκατάσταση εξαρτημάτων, μέθοδοι παραγωγής.[57]

Κεφάλαιο 4. Ψύξη Επεξεργαστή

4.1 Ψύκτρα Συμβατική

Ένας ψύκτης θερμότητας είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που μεταφέρει τη θερμότητα που παράγεται από μια ηλεκτρονική ή μια μηχανική συσκευή σε ένα ρευστό μέσο, αέρα ή ένα υγρό ψυκτικό, όπου διαχέεται μακριά από τη συσκευή, επιτρέποντας έτσι τη ρύθμιση της θερμοκρασίας της συσκευής σε βέλτιστα επίπεδα. Στους υπολογιστές, οι ψύκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για την ψύξη κεντρικών μονάδων επεξεργασίας ή επεξεργαστών γραφικών. Οι ψύκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται με συσκευές ημιαγωγών υψηλής ισχύος όπως τρανζίστορ ισχύος και οπτοηλεκτρονικά όπως λέιζερ και δίοδοι εκπομπής φωτός (LED), όπου η ικανότητα διάχυσης της θερμότητας του ίδιου του κατασκευαστικού στοιχείου είναι ανεπαρκής για να ελέγξει τη θερμοκρασία του. [58] [59]

Ένας ψύκτης θερμότητας έχει σχεδιαστεί για να μεγιστοποιήσει την επιφάνεια του σε επαφή με το μέσο ψύξης που το περιβάλλει, όπως ο αέρας. Η ταχύτητα του αέρα, η επιλογή του υλικού, ο σχεδιασμός των προεξοχών και η επιφανειακή επεξεργασία αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της ψύκτρας. Οι μέθοδοι προσάρτησής της και τα υλικά θερμικής διασύνδεσης επηρεάζουν επίσης τη θερμοκρασία της μήτρας του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Το θερμικό συγκολλητικό ή θερμικό γράσο βελτιώνει την απόδοση της γεμίζοντας κενά αέρα μεταξύ αυτής και της συσκευής διάχυσης θερμότητας στη συσκευή. Ένας ψύκτης είναι συνήθως κατασκευασμένος από χαλκό ή αλουμίνιο. Ο χαλκός χρησιμοποιείται επειδή έχει πολλές επιθυμητές ιδιότητες για θερμικώς αποδοτικούς και ανθεκτικούς εναλλάκτες θερμότητας. Πρώτα απ' όλα, ο χαλκός είναι ένας εξαιρετικός αγωγός θερμότητας. Αυτό σημαίνει ότι η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του χαλκού επιτρέπει στη θερμότητα να περάσει μέσα από αυτό γρήγορα. Οι ψύκτες αλουμινίου χρησιμοποιούνται ως χαμηλού κόστους, ως εναλλακτική λύση για τους ψύκτες θερμότητας χαλκού και έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα από τον χαλκό. [58][60]

4.1.1 Αρχή μεταφοράς θερμότητας

Ένας ψύκτης θερμότητας μεταφέρει τη θερμική ενέργεια από μια συσκευή υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα ρευστό μέσο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Το ρευστό μέσο είναι συχνά αέρας, αλλά μπορεί επίσης να είναι νερό, ψυκτικά ή έλαια. Εάν το υγρό μέσο είναι νερό, ο ψύκτης θερμαίνεται συχνά σαν ψυχρή πλάκα. Στη θερμοδυναμική, ένας ψύκτης θερμότητας είναι μια δεξαμενή θερμότητας που μπορεί να απορροφήσει μια αυθαίρετη ποσότητα θερμότητας χωρίς να αλλάζει σημαντικά τη θερμοκρασία. Οι πρακτικοί ψύκτες θερμότητας για ηλεκτρονικές συσκευές πρέπει να έχουν θερμοκρασία υψηλότερη από το περιβάλλον για τη μεταφορά θερμότητας με τη μεταφορά, την ακτινοβολία και την αγωγιμότητα. Οι ηλεκτρικές τροφοδοσίες των ηλεκτρονικών δεν είναι 100% αποδοτικές, έτσι παράγεται επιπλέον θερμότητα που μπορεί να είναι επιζήμια για τη λειτουργία της συσκευής. [59]

Ο νόμος της αγωγιμότητας θερμότητας του Fourier, απλοποιημένος σε μια μονοδιάστατη μορφή στην κατεύθυνση x , δείχνει ότι όταν υπάρχει βαθμίδα θερμοκρασίας σε ένα σώμα, η θερμότητα μεταφέρεται από την περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας στην περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα μεταφέρεται με

αγωγιμότητα, q_k , είναι ανάλογος με το προϊόν της θερμοκρασιακής κλίσης και την περιοχή εγκάρσιας διατομής μέσω της οποίας μεταφέρεται θερμότητα.

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

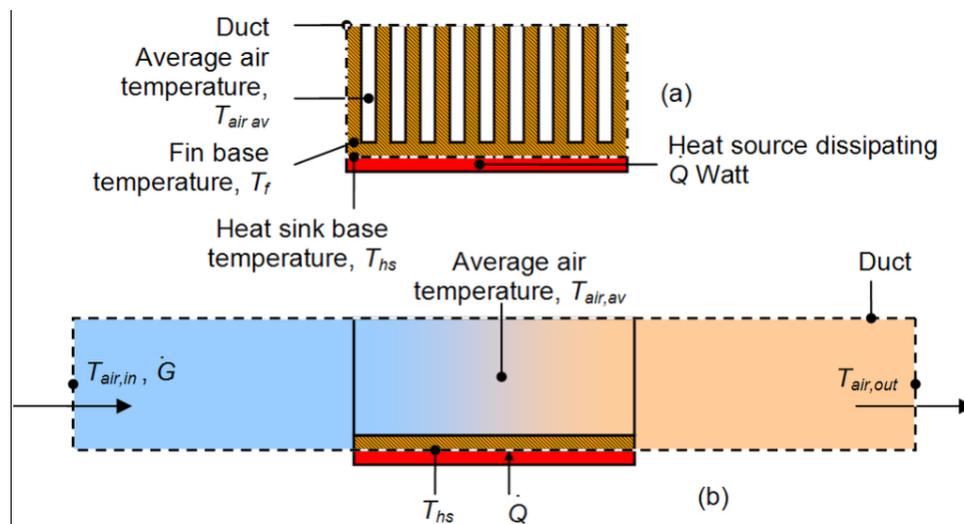
Εξετάζοντας μια ψύκτρα σε έναν αγωγό, όπου ο αέρας ρέει μέσω του αγωγού. Θεωρείται ότι η βάση της ψύκτρας είναι υψηλότερη σε σχέση με τον αέρα. Η εφαρμογή της διατήρησης της ενέργειας, για σταθερές συνθήκες, και ο νόμος ψύξης του Νεύτωνα στους κόμβους θερμοκρασίας που φαίνονται στο διάγραμμα δίνουν την ακόλουθη σειρά εξισώσεων:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_{p,in}(T_{air,out} - T_{air,in}) \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \frac{T_{hs} - T_{air,av}}{R_{hs}} \quad (3)$$

Όπου,

$$T_{air,av} = \frac{T_{air,in} + T_{air,out}}{2} \quad (4)$$



Σχήμα 15: Διάταξη ενός ψύκτη θερμότητας σε έναν αγωγό που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των εξισώσεων που διέπουν τη διατήρηση της ενέργειας και του νόμου του Νεύτωνα.[60]

Η χρήση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα είναι μια υπόθεση που ισχύει για σχετικά μικρές δεξαμενές θερμότητας. Όταν υπολογίζονται συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας, χρησιμοποιείται η μέση λογαριθμική θερμοκρασία αέρα. \dot{m} * είναι η παροχή μάζας αέρα σε kg / s.

Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν ότι :

- Όταν μειώνεται η ροή του αέρα μέσω της ψύκτρας, αυτό οδηγεί σε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα. Με τη σειρά του αυξάνεται η θερμοκρασία βάσης της ψύκτρας. Επιπλέον, η θερμική αντίσταση της ψύκτρας θα αυξηθεί επίσης. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι μια υψηλότερη θερμοκρασία βάσης θερμότητας νεροχύτη.
- Η αύξηση της θερμικής αντίστασης της ψύκτρας με μείωση της παροχής.
- Η θερμοκρασία του αέρα εισόδου σχετίζεται έντονα με τη θερμοκρασία βάσης της ψύκτρας. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει ανακύκλωση αέρα σε ένα προϊόν, η θερμοκρασία του αέρα εισόδου δεν είναι η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία του αέρα εισόδου του ψύκτη είναι συνεπώς υψηλότερη, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη θερμοκρασία βάσης θερμότητας.
- Εάν δεν υπάρχει ροή αέρα γύρω από την ψύκτρα, η ενέργεια δεν μπορεί να μεταφερθεί.
- Ο ψύκτης θερμότητας δεν είναι μια συσκευή με τη "μαγική ικανότητα να απορροφά τη θερμότητα σαν σφουγγάρι και να την στείλει σε ένα παράλληλο σύμπαν".
- Η φυσική μεταφορά απαιτεί ελεύθερη ροή αέρα πάνω από τον ψύκτη θερμότητας. Εάν τα πτερύγια δεν ευθυγραμμιστούν κατακόρυφα ή τα πτερύγια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους για να επιτρέψουν επαρκή ροή αέρα μεταξύ τους, η απόδοση της ψύκτρας θα μειωθεί.

Η φυσική μεταφορά απαιτεί ελεύθερη ροή αέρα πάνω από τον ψύκτη θερμότητας. Εάν τα πτερύγια δεν ευθυγραμμιστούν κατακόρυφα ή τα πτερύγια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους για να επιτρέψουν επαρκή ροή αέρα μεταξύ τους, η απόδοση της ψύκτρας θα μειωθεί. [60]

4.1.2 Σχεδιαστικοί Παράγοντες

4.1.2.1 Θερμική αντίσταση

Για τις συσκευές ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία καταναλωτικών και βιομηχανικών ηλεκτρονικών, η ιδέα της θερμικής αντίστασης απλοποιεί την επιλογή των ψυκτών. Η ροή θερμότητας μεταξύ της μήτρας ημιαγωγού και του αέρα περιβάλλοντος διαμορφώνεται ως μια σειρά αντιστάσεων στη ροή θερμότητας, καθώς υπάρχει αντίσταση από τη μήτρα στη θήκη της συσκευής, από την θήκη μέχρι την ψύκτρα και από την ψύκτρα στον περιβάλλοντα αέρα. Το άθροισμα αυτών των αντιστάσεων είναι η συνολική θερμική αντίσταση από την μήτρα προς τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η θερμική αντίσταση ορίζεται ως αύξηση της θερμοκρασίας ανά μονάδα ισχύος, ανάλογη με την ηλεκτρική αντίσταση και εκφράζεται σε μονάδες βαθμών Κελσίου ανά watt ($^{\circ}\text{C} / \text{W}$). Εάν είναι γνωστή η απόσβεση της συσκευής σε watts και υπολογίζεται η συνολική θερμική αντίσταση, μπορεί να υπολογιστεί η άνοδος της θερμοκρασίας της μήτρας πάνω από τον αέρα περιβάλλοντος.

Η ιδέα της θερμικής αντοχής ενός θερμαινόμενου ημιαγωγού είναι μια προσέγγιση. Δεν λαμβάνει υπόψη την ανομοιογενή κατανομή της θερμότητας πάνω σε μια συσκευή ή την ψύκτρα. Προτυποποιεί μόνο ένα σύστημα σε θερμική ισορροπία και δεν λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των θερμοκρασιών με το χρόνο. Ωστόσο, οι κατασκευαστές συγκεντρώνουν τυπικές τιμές θερμικής αντίστασης για τους ψύκτες θερμότητας και τις συσκευές ημιαγωγών, γεγονός που επιτρέπει την απλούστευση της επιλογής εμπορικά κατασκευασμένων θερμαντικών δεξαμενών.[61][62]

4.1.2.2 Υλικά

Τα πιο κοινά υλικά ψύκτρας είναι τα κράματα αλουμινίου. Το κράμα αλουμινίου 1050 έχει μία από τις υψηλότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας στα $229 \text{ W / m} \cdot \text{K}$ αλλά είναι όλκιμο. Τα κράματα αλουμινίου 6060 (χαμηλή τάση), 6061 και 6063 χρησιμοποιούνται συνήθως, με τιμές θερμικής αγωγιμότητας 166 και $201 \text{ W / m} \cdot \text{K}$, αντίστοιχα. Οι τιμές εξαρτώνται από την θερμοκρασία του κράματος. Οι ψύκτες αλουμινίου μπορούν να χυτευθούν ή να εξωθηθούν. [63][64]

Ο χαλκός έχει εξαιρετικές ιδιότητες όσον αφορά τη θερμική του αγωγιμότητα, την αντοχή στη διάβρωση, την ανθεκτικότητα σε βιοσυσσώρευση και την αντιμικροβιακή αντοχή (Βλ. Χαλκό σε εναλλάκτες θερμότητας). Ο χαλκός έχει περίπου την διπλάσια θερμική αγωγιμότητα από αυτή του αλουμινίου, περίπου $400 \text{ W / m} \cdot \text{K}$ για καθαρό χαλκό. Οι κύριες εφαρμογές του είναι σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα ηλιακής θέρμανσης νερού, συστήματα HVAC, θερμοαντήρες αερίου, συστήματα θέρμανσης και ψύξης, γεωθερμική θέρμανση και ψύξη και ηλεκτρονικά συστήματα.

Ο χαλκός είναι τρεις φορές πιο πυκνός και πιο ακριβός από το αλουμίνιο. Οι ψύκτες θερμότητας χαλκού κατεργάζονται και ξεφλουδίζονται. Μία άλλη μέθοδος κατασκευής είναι η συγκόλληση των πτερυγίων στην βάση του ψύκτη θερμότητας. Ο χαλκός είναι λιγότερο όλκιμος από το αλουμίνιο, επομένως δεν μπορεί να εξωθηθεί σε ψύκτρα. [64]

4.1.2.3 Απόδοση λεπτού στρώματος

Η απόδοση του λεπτού στρώματος είναι μία από τις παραμέτρους που καθιστούν σημαντικό το υλικό θερμικής αγωγιμότητας. Ένα πτερύγιο μιας ψύκτρας θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί ως μια επίπεδη πλάκα με τη θερμότητα να ρέει στο ένα άκρο και να διαχέεται στο περιβάλλον υγρό καθώς ταξιδεύει στο άλλο. [65] Καθώς η θερμότητα ρέει μέσω του πτερυγίου, ο συνδυασμός της θερμικής αντίστασης της ψύκτρας που εμποδίζει τη ροή και την απώλεια θερμότητας λόγω της μεταφοράς, η θερμοκρασία του πτερυγίου και συνεπώς η μεταφορά θερμότητας στο ρευστό, θα μειωθεί από τη βάση έως το τέλος του πτερυγίου. Η αποδοτικότητα του πτερυγίου ορίζεται ως η πραγματική θερμότητα που μεταφέρεται από το πτερύγιο, διαιρούμενη με τη μεταφορά θερμότητας, όπου το πτερύγιο είναι ισόθερμο (υποθετικά το πτερύγιο έχει άπειρη θερμική αγωγιμότητα). Οι εξισώσεις 5 και 6 ισχύουν για ευθεία πτερύγια:

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \quad (5)$$

$$mL_c = \sqrt{\frac{2h_f}{kt_f} L_f} \quad (6)$$

Όπου:

- ✓ h_f είναι ο συντελεστής μεταφοράς του πτερυγίου
- ✓ Αέρας: 10 έως $100 \text{ W / (m}^2\text{K)}$
- ✓ Νερό: 500 έως $10.000 \text{ W / (m}^2\text{K)}$
- ✓ k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού πτερυγίων
- ✓ Αλουμίνιο: 120 έως $240 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$
- ✓ L_f είναι το ύψος πτερυγίου (m)
- ✓ t_f είναι το πάχος του πτερυγίου (m)

Η απόδοση του λεπτού φύλλου αυξάνεται με τη μείωση του λόγου πλευρών του πτερυγίου (καθιστώντας τα παχύτερα ή συντομότερα) ή με τη χρήση περισσότερο αγωγίμου υλικού (για παράδειγμα χαλκός αντί αλουμινίου). [62][63]

4.1.2.4 Αντίσταση στην εξάπλωση

Μια άλλη παράμετρος που αφορά την θερμική αγωγιμότητα του υλικού ψύκτρας είναι η αντίσταση εξάπλωσης. Η αντοχή στην εξάπλωση λαμβάνει χώρα όταν η θερμική ενέργεια μεταφέρεται από μια μικρή περιοχή σε μια μεγαλύτερη, σε μια ουσία με πεπερασμένη θερμική αγωγιμότητα. Σε έναν ψύκτη θερμότητας, αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα δεν διανέμεται ομοιόμορφα μέσω της βάσης της ψύκτρας. Το φαινόμενο αντίστασης εξάπλωσης φαίνεται από το πώς η θερμότητα μετακινείται από τη θέση της πηγής θερμότητας και προκαλεί μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της πηγής θερμότητας και των ακμών της ψύκτρας. Αυτό σημαίνει ότι μερικά πτερύγια είναι σε χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι αν η πηγή θερμότητας ήταν ομοιόμορφη κατά μήκος της βάσης του ψύκτη θερμότητας. Αυτή η ανομοιομορφία αυξάνει την αποτελεσματική θερμική αντίσταση της ψύκτρας.

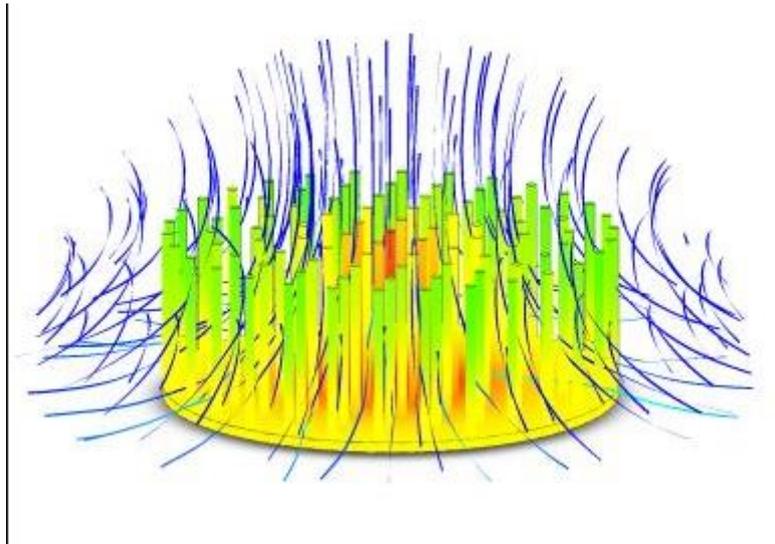
Για να μειωθεί η αντίσταση εξάπλωσης στη βάση μιας ψύκτρας, μπορεί :

- Να αυξηθεί το πάχος της βάσης
- Να επιλεγεί ένα διαφορετικό υλικό με καλύτερη θερμική αγωγιμότητα
- Να χρησιμοποιηθεί ένας θάλαμος ατμού ή σωλήνας θέρμανσης στη βάση της ψύκτρας

4.1.3 Διατάξεις

Ένας ψύκτης με πτερύγια είναι ένας ψύκτης που έχει ακίδες που εκτείνονται γύρω από τη βάση του. Οι ακίδες μπορούν να είναι κυλινδρικές, ελλειπτικές ή τετράγωνες. Είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους ψύκτρας που διατίθενται στην αγορά. Ένας δεύτερος τύπος διάταξης ψύξης είναι τα ευθύγραμμα πτερύγια σε όλο το μήκος της ψύκτρας. Μια παραλλαγή στον ψύκτη θερμότητας με πτερύγια είναι ένας εγκάρσιος ψύκτης θερμότητας. Ένας ευθύς ψύκτης ψύχεται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Γενικά, όσο μεγαλύτερη επιφάνεια έχει μια ψύκτρα, τόσο καλύτερα λειτουργεί. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει πάντα. Η ιδέα ενός ψύκτη με ακίδες γίνεται με στόχο την συσκευασία όσο το δυνατόν περισσότερης επιφάνειας σε έναν δεδομένο όγκο. Επίσης, λειτουργεί καλά σε οποιοδήποτε προσανατολισμό. Ο Korodyban έχει συγκρίνει την απόδοση μιας ακίδας πτερυγίου και ενός ευθύ ψύκτη θερμότητας με παρόμοιες διαστάσεις. Αν και το πτερύγιο ακιδών έχει επιφάνεια 194 cm^2 ενώ το ευθύ πτερύγιο έχει 58 cm^2 , η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της βάσης της ψύκτρας και του αέρα περιβάλλοντος για το πτερύγιο είναι $50 \text{ }^\circ \text{C}$. Για το ευθεία πτερύγιο ήταν $44 \text{ }^\circ \text{C}$ ή $6 \text{ }^\circ \text{C}$ περισσότερο από το πτερύγιο πείρων. Οι επιδόσεις της ψύκτρας των πτερυγίων είναι σημαντικά καλύτερες από τα ευθεία πτερύγια όταν χρησιμοποιούνται στην προβλεπόμενη εφαρμογή τους όπου το ρευστό ρέει αξονικά κατά μήκος των ακίδων (βλέπε σχήμα 16) και όχι μόνο εφαπτόμενα κατά μήκος των ακίδων. [65]



Σχήμα 16: Ρυθμιζόμενη ψύκτρα πτερυγίων με θερμικό προφίλ και ελεύθερες τροχιές ροής μεταφοράς που προβλέφθηκε χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα ανάλυσης CFD [66]



Σχήμα 17: Τύποι ψύκτρων [66]

4.1.4 Αγωγός πυκνής πλάκας μεταξύ της πηγής θερμότητας και της ψύκτρας

Η τοποθέτηση μιας αγωγίμης παχιάς πλάκας ως διασύνδεσης μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας πηγής θερμότητας και ενός ψυχρού ρευστού (ή άλλου ψύκτη θερμότητας) μπορεί να βελτιώσει την απόδοση ψύξης. Σε μια τέτοια διάταξη, η πηγή θερμότητας ψύχεται κάτω από την παχιά πλάκα αντί να ψύχεται σε άμεση επαφή με το ψυκτικό ρευστό. Δείχνεται ότι η παχιά πλάκα μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ της πηγής θερμότητας και του υγρού ψύξης μέσω της μεταφοράς του θερμικού ρεύματος με βέλτιστο τρόπο. Τα δύο πιο ελκυστικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν υπάρχει πρόσθετη ισχύς άντλησης και καμία επιπλέον επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, η οποία είναι αρκετά διαφορετική από τα πτερύγια (εκτεταμένες επιφάνειες). [67]

4.1.5 Μέθοδοι για τον προσδιορισμό της απόδοσης

Γενικά, η απόδοση της ψύκτρας είναι συνάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, των διαστάσεων, του τύπου πτερυγίου, του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, του ρυθμού ροής του αέρα και του μεγέθους του αγωγού. Για να προσδιοριστεί η θερμική απόδοση μιας ψύκτρας, μπορεί να γίνει ένα θεωρητικό μοντέλο. Εναλλακτικά, η θερμική απόδοση μπορεί να μετρηθεί πειραματικά. Λόγω της σύνθετης φύσης της υψηλής ροής 3D στις παρούσες

εφαρμογές, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι ή δυναμική υπολογιστικής ροής (CFD). [67]

4.2 Ψύξη Υπολογιστή

Η ψύξη του υπολογιστή είναι αναγκαία για την αφαίρεση της αχρείαστης θερμότητας που παράγεται από τα εξαρτήματα του υπολογιστή, για να διατηρούνται τα εξαρτήματα εντός των επιτρεπόμενων ορίων θερμοκρασίας λειτουργίας. Τα εξαρτήματα που είναι επιρρεπή σε προσωρινή δυσλειτουργία ή μόνιμη βλάβη σε περίπτωση υπερθέρμανσης περιλαμβάνουν ολοκληρωμένα κυκλώματα όπως κεντρικές μονάδες επεξεργασίας (CPU), chipset, κάρτες γραφικών και μονάδες σκληρών δίσκων.

Τα εξαρτήματα συχνά σχεδιάζονται για να παράγουν όσο το δυνατόν λιγότερη θερμότητα και οι υπολογιστές και τα λειτουργικά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και την επακόλουθη θέρμανση ανάλογα με το φόρτο εργασίας, αλλά μπορεί να παραχθεί ακόμη περισσότερη θερμότητα από ότι μπορεί να αφαιρεθεί χωρίς προσοχή στην ψύξη. Η χρήση ψύκτρων που ψύχονται από τη ροή αέρα μειώνει την αύξηση της θερμοκρασίας που παράγεται από μια δεδομένη ποσότητα θερμότητας. Η προσοχή στα πρότυπα ροής αέρα μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη σημείων εστίασης. Οι ανεμιστήρες υπολογιστών χρησιμοποιούνται ευρέως μαζί με τους ανεμιστήρες ψύξης για τη μείωση της θερμοκρασίας με την ενεργή εξάντληση του ζεστού αέρα. Υπάρχουν επίσης λιγότερο παραδοσιακές τεχνικές ψύξης, όπως η υγρή ψύξη. Όλοι οι σύγχρονοι επεξεργαστές έχουν σχεδιαστεί για να κόβουν ή να μειώνουν την ταχύτητα τάσης ή ρολογιού τους εάν η εσωτερική θερμοκρασία του επεξεργαστή υπερβεί ένα καθορισμένο όριο. [68]

Επειδή οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής ή να προκαλέσουν μόνιμη βλάβη στα εξαρτήματα και η θερμική ισχύς των εξαρτημάτων μπορεί μερικές φορές να υπερβεί την ικανότητα ψύξης του υπολογιστή, οι κατασκευαστές συχνά λαμβάνουν πρόσθετες προφυλάξεις για να εξασφαλίσουν ότι οι θερμοκρασίες παραμένουν εντός ασφαλών ορίων. [69][70]

Η ψύξη μπορεί να σχεδιαστεί για να μειώσει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην περίπτωση ενός υπολογιστή, όπως εξάτμιση ζεστού αέρα ή για ψύξη ενός μόνο συστατικού ή μικρής περιοχής (ψύξη κηλίδων). Τα στοιχεία που συνήθως ψύχονται χωριστά περιλαμβάνουν το CPU, τη μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU). [71]



Σχήμα 19: Μια ψύκτρα ψύξης με πτερόγυια με ανεμιστήρα που έχει συνδεθεί σε CPU, με μικρότερη παθητική ψύκτρα χωρίς ανεμιστήρα στο παρασκήνιο.

4.2.1 Γεννήτριες ανεπιθύμητης θερμότητας

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (π.χ. CPU και GPU) είναι οι κύριες πηγές θερμότητας στους σύγχρονους υπολογιστές. Η παραγωγή θερμότητας μπορεί να μειωθεί με αποτελεσματικό σχεδιασμό και επιλογή παραμέτρων λειτουργίας όπως τάση και συχνότητα, αλλά τελικά, αποδεκτή απόδοση μπορεί συχνά να επιτευχθεί μόνο με τη διαχείριση της σημαντικής παραγωγής θερμότητας. [72]

Η συσσώρευση σκόνης στην ψύκτρα CPU φορητού υπολογιστή (Σχήμα 20) μετά από τρία χρόνια χρήσης έχει καταστήσει το φορητό υπολογιστή άχρηστο λόγω των συχνών διακοπών λειτουργίας. Κατά τη λειτουργία, η θερμοκρασία των εξαρτημάτων του υπολογιστή θα αυξηθεί έως ότου η θερμότητα που μεταφέρεται στο περιβάλλον είναι ίση με τη θερμότητα που παράγεται από το στοιχείο, δηλαδή όταν επιτυγχάνεται θερμική ισορροπία. Για αξιόπιστη λειτουργία, η θερμοκρασία δεν πρέπει ποτέ να υπερβαίνει μια καθορισμένη μέγιστη επιτρεπτή τιμή μοναδική για κάθε στοιχείο. Για τους ημιαγωγούς, η στιγμιαία θερμοκρασία σύνδεσης, παρά η περίπτωση των εξαρτημάτων, η ψύξη ή η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι κρίσιμη.[73]

- **Η σκόνη** λειτουργεί ως θερμικός μονωτής και εμποδίζει τη ροή του αέρα, μειώνοντας έτσι την απόδοση της ψύκτρας και του ανεμιστήρα.
- **Η κακή ροή του αέρα**, συμπεριλαμβανομένης της ανατάραξης που οφείλεται στην τριβή από τα συστατικά που παρεμποδίζουν, όπως τα καλώδια με κορδέλες, ή ο εσφαλμένος προσανατολισμός των ανεμιστήρων, μπορεί να μειώσει την ποσότητα του αέρα που ρέει μέσα από μια θήκη και ακόμη να δημιουργήσει εντοπισμένα στροβιλισμένα ζεστά αέρια στην θήκη. Σε ορισμένες περιπτώσεις εξοπλισμού με κακή θερμική σχεδίαση, ο αέρας ψύξης μπορεί εύκολα να ρεύσει μέσα από τις οπές "ψύξης" πριν να περάσει από θερμά εξαρτήματα. η ψύξη σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί συχνά να βελτιωθεί με αποκλεισμό επιλεγμένων οπών.
- **Κακή μεταφορά θερμότητας λόγω κακής θερμικής επαφής μεταξύ εξαρτημάτων προς ψύξη και συσκευών ψύξης.** Αυτό μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση θερμικών ενώσεων για εξισορρόπηση των επιφανειακών ατελειών, ή ακόμη και με την επικάλυψη. [74]



Σχήμα 20: Η συσσώρευση σκόνης σε ψύκτρα CPU φορητού υπολογιστή.[74]

4.3 Μέθοδοι ψύξης υπολογιστή

4.3.1 Ψύξη υπολογιστή με αέρα

Οι ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται όταν η φυσική μεταφορά δεν επαρκεί για την αφαίρεση της θερμότητας. Οι ανεμιστήρες μπορούν να τοποθετηθούν στην θήκη του υπολογιστή ή να συνδεθούν σε CPU, GPU, chipset, PSU, σκληρούς δίσκους ή ως κάρτες συνδεδεμένες σε μια υποδοχή επέκτασης. Τα κοινά μεγέθη ανεμιστήρων περιλαμβάνουν 40, 60, 80, 92, 120 και 140 mm. 200, 230, 250 και 300 mm ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται μερικές φορές σε προσωπικούς υπολογιστές υψηλής απόδοσης.[76]

4.3.1.1 Απόδοση των ανεμιστήρων στο πλαίσιο του υπολογιστή

Ένας υπολογιστής έχει κάποια αντίσταση στον αέρα που ρέει μέσα από το πλαίσιο και τα εξαρτήματα. Αυτό είναι το άθροισμα όλων των μικρότερων εμποδίων στη ροή του αέρα, όπως τα ανοίγματα εισόδου και εξόδου, τα φίλτρα αέρα, το εσωτερικό πλαίσιο και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Οι ανεμιστήρες είναι απλές αντλίες αέρα που παρέχουν πίεση στον αέρα της πλευράς εισόδου σε σχέση με την πλευρά εξόδου. Αυτή η διαφορά πίεσης μετακινεί αέρα μέσω του πλαισίου, με τον αέρα να ρέει σε περιοχές χαμηλότερης πίεσης.[77]

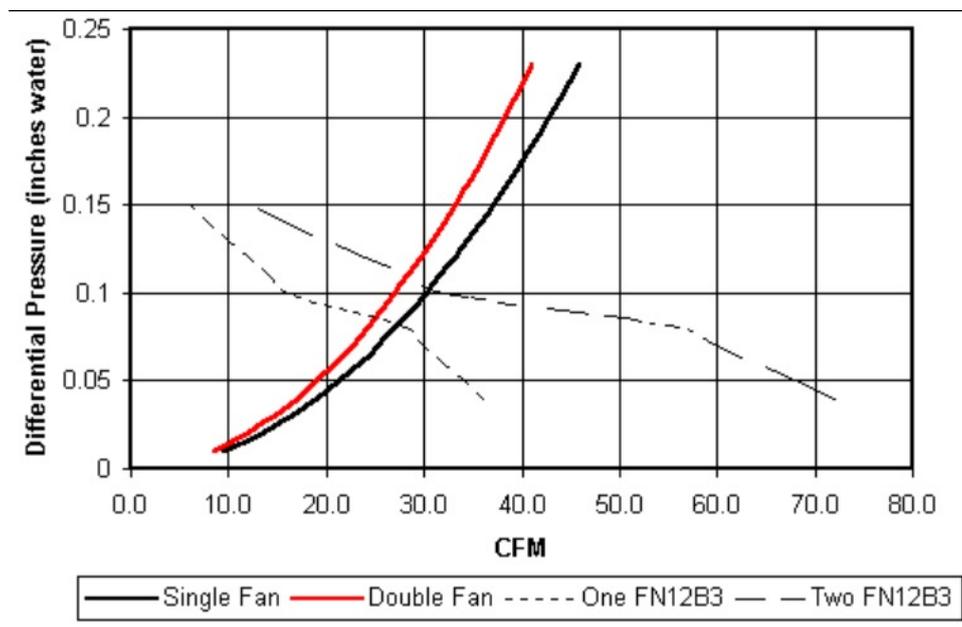
Οι ανεμιστήρες έχουν γενικά δύο προδιαγραφές: ελεύθερη ροή αέρα και μέγιστη διαφορική πίεση. Η ελεύθερη ροή αέρα είναι η ποσότητα αέρα που ο ανεμιστήρας κινείται με μηδενική αντίθετη πίεση. Η μέγιστη διαφορική πίεση είναι η ποσότητα πίεσης που μπορεί να παράγει ένας ανεμιστήρας όταν αποκλείεται τελείως. Μεταξύ αυτών των δύο ακραίων συνθηκών είναι μια σειρά από αντίστοιχες μετρήσεις της ροής έναντι της πίεσης που παρουσιάζεται συνήθως ως γράφημα. Κάθε μοντέλο ανεμιστήρα θα έχει μια μοναδική καμπύλη, όπως οι διακεκομμένες καμπύλες στο σχήμα 21. [78][79]

4.3.1.2 Παράλληλη εγκατάσταση έναντι σε σειρά

Οι ανεμιστήρες μπορούν να εγκατασταθούν παράλληλα μεταξύ τους, σε σειρά, ή σε συνδυασμό και των δύο. Κατά την παράλληλη εγκατάσταση, οι ανεμιστήρες τοποθετούνται ο ένας δίπλα στον άλλο. Κατά την εγκατάσταση ανεμιστήρων σε σειρά, τοποθετούνται ο ένας ανεμιστήρας σε σειρά με άλλο ανεμιστήρα, συνήθως ένας ανεμιστήρας εισόδου αέρα και ένας ανεμιστήρας εξαγωγής αέρα.

Οι παράλληλοι ανεμιστήρες θα παρέχουν διπλάσια ελεύθερη ροή αέρα χωρίς επιπλέον πίεση. Η εγκατάσταση της σειράς, από την άλλη πλευρά, θα διπλασιάσει τη διαθέσιμη στατική πίεση,

αλλά δεν θα αυξήσει την παροχή ελεύθερου αέρα. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει ένα μόνο ανεμιστήρα έναντι δύο ανεμιστήρων παράλληλα με μια μέγιστη πίεση 0,15 ίντσες (3,8 mm) νερού και διπλάσια παροχή περίπου 72 κυβικών ποδών ανά λεπτό ($2,0 \text{ m}^3 / \text{min}$). [78]



Σχήμα 21: Τυπικές καμπύλες ανεμιστήρα και καμπύλες αντίστασης πλαισίου [78]

4.3.2 Υδρόψυξη

Η υδρόψυξη είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος αφαίρεσης της πλεονάζουσας θερμότητας, με το πιο κοινό υγρό μεταφοράς θερμότητας στους επιτραπέζιους υπολογιστές να είναι απεσταγμένο νερό. Τα πλεονεκτήματα της ψύξης νερού κατά την ψύξη του αέρα περιλαμβάνουν την υψηλότερη ειδική θερμότητα του νερού και τη θερμική αγωγιμότητα.

Η αρχή που χρησιμοποιείται σε ένα τυπικό (ενεργό) υγρό σύστημα ψύξης για υπολογιστές είναι ίδια με εκείνη που χρησιμοποιείται σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης ενός αυτοκινήτου, με το νερό να κυκλοφορεί από μια αντλία νερού μέσω ενός υδατοφράκτη τοποθετημένου στην CPU και έξω από έναν εναλλάκτη θερμότητας, συνήθως ένα ψυγείο. Το ίδιο το ψυγείο συνήθως ψύχεται επιπρόσθετα μέσω ανεμιστήρα. Εκτός από έναν ανεμιστήρα, θα μπορούσε επίσης να ψυχθεί με άλλα μέσα, όπως ένα ψυγείο Peltier (αν και τα στοιχεία Peltier τοποθετούνται πιο συχνά απευθείας πάνω από το υλικό που πρόκειται να ψυχθεί και το ψυκτικό χρησιμοποιείται για να μεταφέρει τη θερμότητα μακριά από το θερμό πλευρά του στοιχείου Peltier). Μια δεξαμενή ψυκτικού μέσου συνδέεται επίσης συχνά με το σύστημα.

Εκτός από τα ενεργά συστήματα ψύξης υγρών, μερικές φορές χρησιμοποιούνται παθητικά συστήματα υγρού ψύξης. Τα συστήματα αυτά συχνά απορρίπτουν έναν ανεμιστήρα ή μια αντλία νερού, αυξάνοντας έτσι θεωρητικά την αξιοπιστία του συστήματος και / ή κάνοντάς τον πιο ήσυχο από τα ενεργά συστήματα. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι ότι είναι πολύ λιγότερο αποτελεσματικά στην απόρριψη της θερμότητας και επομένως χρειάζονται επίσης πολύ περισσότερο ψυκτικό μέσο - και επομένως πολύ μεγαλύτερη δεξαμενή ψυκτικού μέσου - (δίνοντας περισσότερο χρόνο στο ψυκτικό να κρυώσει).

Τα υγρά επιτρέπουν τη μεταφορά περισσότερης θερμότητας από τα μέρη που ψύχονται από τον αέρα, καθιστώντας την υγρή ψύξη κατάλληλη για overclocking και εφαρμογές υπολογιστών υψηλής απόδοσης. Σε σύγκριση με την ψύξη του αέρα, η υγρή ψύξη επηρεάζεται επίσης λιγότερο από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το συγκριτικά χαμηλό επίπεδο θορύβου του υγρού ψύξης συγκρίνεται ευνοϊκά με αυτό της ενεργού ψύξης, το οποίο μπορεί να γίνει αρκετά θορυβώδες. [80] [81]

Τα μειονεκτήματα της υγρής ψύξης περιλαμβάνουν την πολυπλοκότητα και την πιθανότητα διαρροής ψυκτικού υγρού. Το διαρρέσιμο νερό (ή το σημαντικότερο, τα πρόσθετα που προστίθενται στο νερό) μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε όλα τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα με τα οποία έρχεται σε επαφή και η ανάγκη δοκιμής και επιδιόρθωσης διαρροών καθιστά πιο περίπλοκες και λιγότερο αξιόπιστες εγκαταστάσεις. [82]

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της δημοτικότητας της υγρής ψύξης σε επιτραπέζιους υπολογιστές που έχουν συναρμολογηθεί, μέτρια έως υψηλή απόδοση. Τα συστήματα στεγανοποίησης ("κλειστού βρόχου") που περιλαμβάνουν ένα μικρό προπληρωμένο ψυγείο, ανεμιστήρα και υδατοφράκτη απλοποιούν την εγκατάσταση και τη συντήρηση της ψύξης νερού με μικρό κόστος στην αποτελεσματικότητα ψύξης σε σχέση με μεγαλύτερες και πιο πολύπλοκες ρυθμίσεις. Η υγρή ψύξη συνδυάζεται συνήθως με την ψύξη του αέρα, χρησιμοποιώντας υγρή ψύξη για τα πιο καυτά εξαρτήματα, όπως CPU ή GPU, διατηρώντας ταυτόχρονα την απλούστερη και φθηνότερη ψύξη του αέρα για λιγότερο απαιτητικά εξαρτήματα.

Το σύστημα Aquasar της IBM χρησιμοποιεί ψύξη με ζεστό νερό για να επιτύχει υψηλή ενεργειακή απόδοση, ενώ το νερό χρησιμοποιείται και για τη θέρμανση των κτιρίων. [83]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 5. Σκοπός

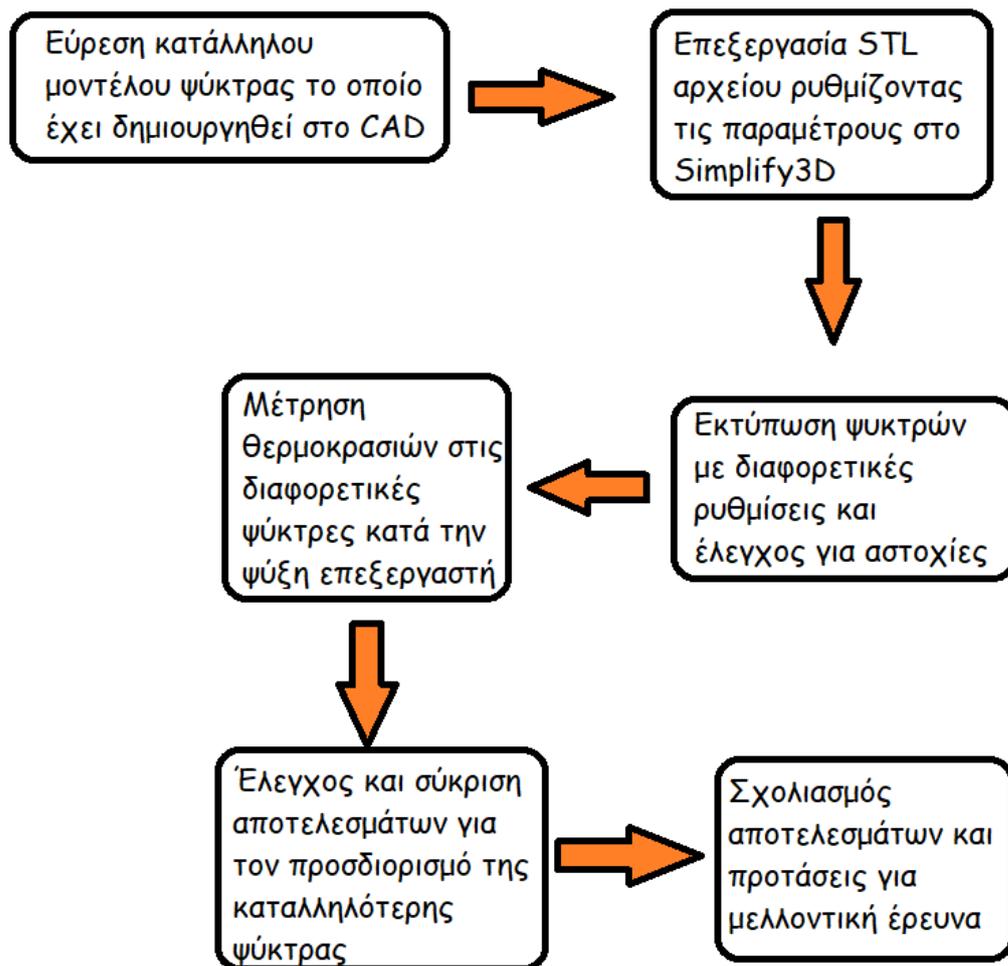
Σκοπός της εργασίας είναι να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες παραγωγής ψύκτρας επεξεργαστή ηλεκτρονικού υπολογιστή μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με την μέθοδο Fused Deposition Modeling και να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα τους στην ψύξη επεξεργαστή που βρίσκεται σε λειτουργία. Επιπροσθέτως, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των εκτυπωμένων με συμβατική ψύκτρα και ψύκτρα από PLA, με στόχο την εύρεση δεδομένων για την καλύτερη ψύξη του επεξεργαστή.

Ως πρώτη ύλη της τριδιάστατης εκτύπωσης της ψύκτρας θα χρησιμοποιηθεί το “CarbonFil”, νήμα το οποίο αποτελείται από πολυμερές PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) ενισχυμένο κατά 20% w/w με ίνες άνθρακα, καθώς οι τελευταίες προσδίδουν στο υλικό αυξημένες μηχανικές ιδιότητες και ακαμψία. Επίσης, λόγω των ινών άνθρακα, τα τριδιάστατα μέρη θα είναι ελαφρύτερα και πιο σταθερά, καθώς βοηθούν στην αποτροπή συρρίκνωσης του εκτυπωμένου υλικού καθώς ψύχεται. Παράλληλα, ο άνθρακας ως θερμικά αγωγίμο υλικό, προσδίδει στην εκτυπωμένη ψύκτρα θερμοαγώγιμες ιδιότητες τις οποίες χρειάζεται ούτως ώστε να μεταφέρει τη θερμότητα από τον επεξεργαστή και να τον ψύχει κατάλληλα. Οι παράμετροι εκτύπωσης, όπως η θερμοκρασία εκτύπωσης, η ταχύτητα, η προσκόλληση της κλίνης και οι ταχύτητες διέλασης, είναι παρόμοιες με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για το PLA.

Αφού επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο ψύκτρας στο CAD, αυτό θα επεξεργαστεί ως αρχείο STL στο πρόγραμμα υπολογιστή Simplify3D με στόχο τη ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης. Στη συνέχεια θα εκτυπωθούν ψύκτρες για τον προσδιορισμό των καταλληλότερων παραμέτρων και η μέτρηση των διαστάσεών τους με παράλληλο έλεγχο για αστοχίες σε αυτές. Η τεχνική εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η FDM (Fused Deposition Modeling) κατά την οποία ο εκτυπωτής ξεκινώντας από τη βάση εκτυπώνει την ψύκτρα προς τα πάνω σε στρώσεις.

Η τεχνική χαρακτηρισμού που θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητας της εκτυπωμένης ψύκτρας αποτελεί η θερμοκάμερα. Αρχικά θα χρησιμοποιηθεί σύστημα υπολογιστή σε λειτουργία, θα τοποθετηθεί η ψύκτρα πάνω στον επεξεργαστή και με τη θερμοκάμερα θα μετρηθεί η θερμοκρασία πάνω στην ψύκτρα σε διαφορετικά της σημεία.

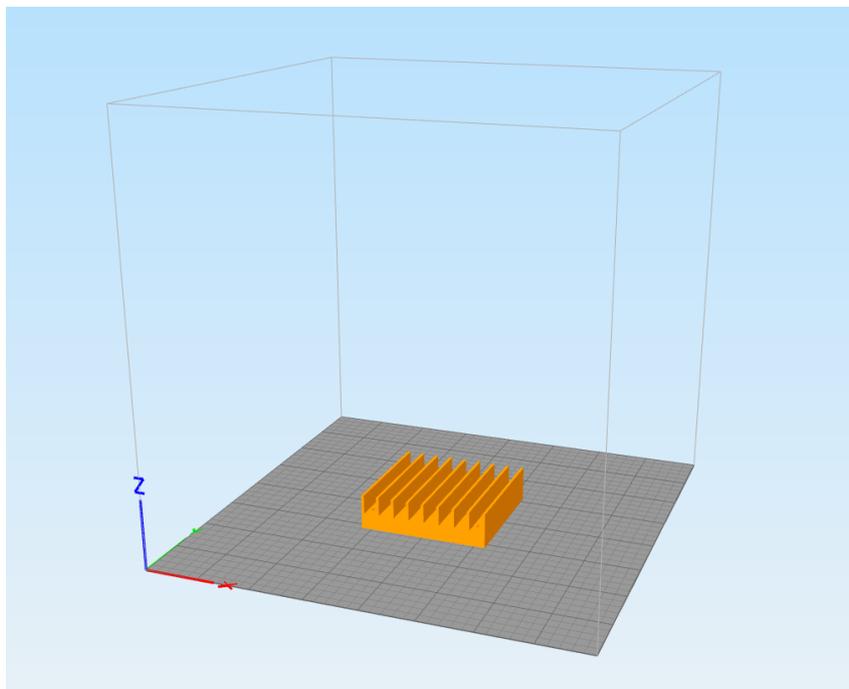
Ακολουθεί το σχήμα όπου παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής για την εκτύπωση και τον χαρακτηρισμό αποτελεσματικότητας της ψύκτρας με τις μετρήσεις θερμοκρασιών σε αυτές.



Σχήμα 22: Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας.

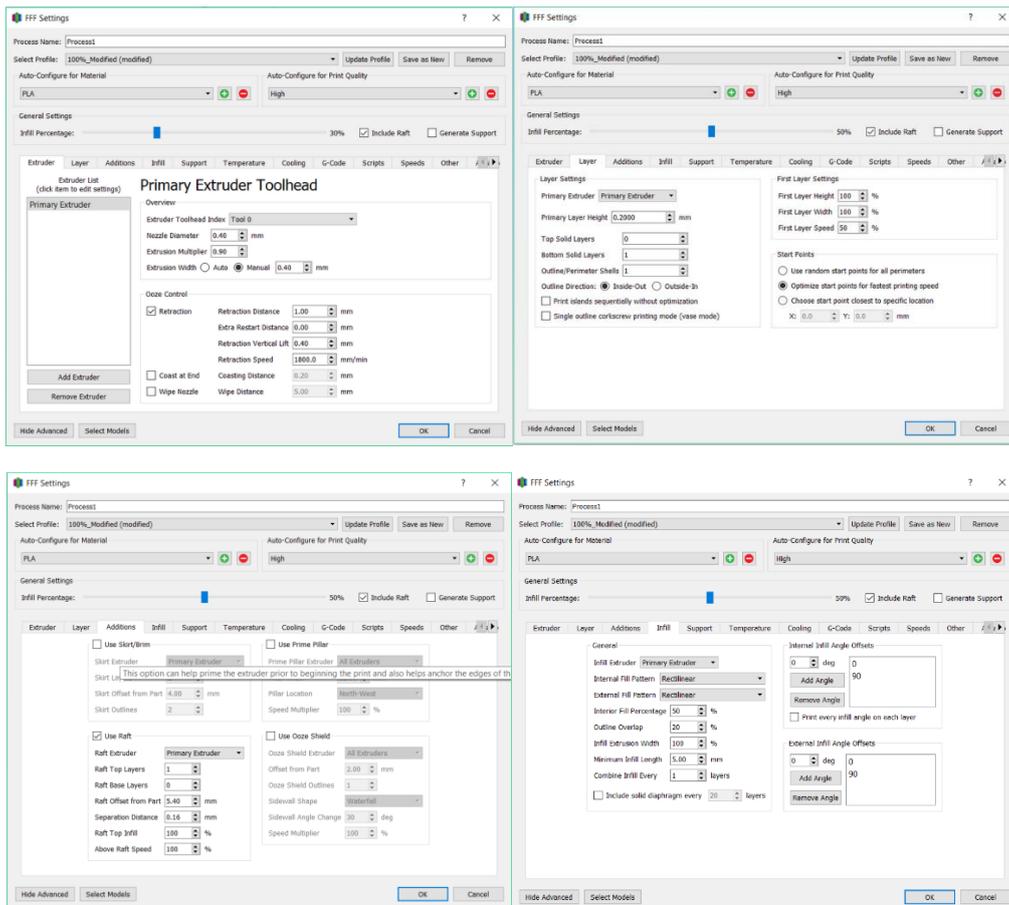
Κεφάλαιο 6. Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας Εκτύπωσης Ψύκτρας

Πριν πραγματοποιηθεί το κάθε πείραμα, δημιουργήθηκαν αρχεία STL τα οποία χρησιμοποιούνται στην τριδιάστατη εκτύπωση. Τα μοντέλα ψύκτρας που χρησιμοποιήθηκαν (Τετράγωνη και κυκλική ψύκτρα), βρέθηκαν στο διαδίκτυο από δημιουργία τους σε πρόγραμμα CAD. Τα συγκεκριμένα αρχεία, επεξεργάστηκαν σε πρόγραμμα υπολογιστή, το Simplify3D, ούτως ώστε οι ψύκτρες που θα εκτυπωθούν να έχουν τα επιθυμητά δεδομένα. Ορισμένα από τα δεδομένα που επεξεργάστηκαν αποτελούν η ταχύτητα εκτύπωσης, οι στρώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για βάση της ψύκτρας (raft) και η οποία αφαιρέθηκε μετά την εκτύπωση καθώς και το infill της κάθε ψύκτρας, δηλαδή η πυκνότητα σε υλικό που θα έχει η ψύκτρα που εκτυπώνεται. Το υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση των ψυκτρών είναι το CarbonFil και η κάθε εκτύπωση έγινε περίπου στους 220°C (Η θερμοκρασία μετρήθηκε από 210°C-221°C). Η εκτύπωση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας FDM τεχνική εκτύπωσης.



Σχήμα 23: Heatsink στο Simplify3D

Στο πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε σε τριδιάστατο εκτυπωτή, εκτυπώθηκαν δύο ψύκτρες, μία κυκλική και μία τετράγωνη. Κύριος σκοπός του πειράματος είναι η εύρεση των κατάλληλων ρυθμίσεων εκτύπωσης που θα χρησιμοποιηθούν σε όλες τις εκτυπώσεις με το συγκεκριμένο υλικό. Πριν την εκτύπωση, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία στα αρχεία stl της κάθε ψύκτρας, ενώ συγκεκριμένα το infill της κάθε ψύκτρας ρυθμίστηκε στο 30%. Ο χρόνος εκτύπωσης της κάθε ψύκτρας ήταν περίπου στα 50 έως 80 λεπτά. Τα δεδομένα αρχείων ρυθμίστηκαν ως εξής:



Σχήμα 24: Παράμετροι εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτύπωση ψύκτρας CarbonFil.

Αρχικά δοκιμάστηκε να πραγματοποιηθεί εκτύπωση με ένα raft, δηλαδή μία στρώση στην οποία στηρίζεται το υλικό που θα εκτυπωθεί, ωστόσο το υλικό δεν στηριζόταν σωστά με αποτέλεσμα να υπάρχουν αστοχίες. Σε επόμενη εκτύπωση χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώσεις raft με τα αποτελέσματα να είναι εμφανώς καλύτερα. Μετά από κάθε εκτύπωση, η βάση (Raft) απομακρύνθηκε προσεκτικά ούτως ώστε να μην υπάρξει φθορά της ψύκτρας στη βάση της.

Όσον αφορά την ταχύτητα εκτύπωσης, έγιναν δοκιμές ούτως ώστε να βρεθεί το σημείο στο οποίο δεν θα έχει αστοχίες το υλικό με συνέπεια να υπάρχει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν:

Πίνακας 1: Δοκιμές εκτύπωσης διαφορετικών ρυθμίσεων.

	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
	Δοκιμή	Δοκιμή	Δοκιμή	Δοκιμή	Δοκιμή
Printng Speed (mm/min)	5600	5600	5200	5200	4800
Temperature (°C)	200	220	200	220	220

Συγκεκριμένα, στην πρώτη δοκιμή εκτυπώθηκε ψύκτρα στους 200°C με ταχύτητα 5600mm/min, ωστόσο παρατηρήθηκε ότι οι στρώσεις μεταξύ τους δεν βρίσκονταν σωστά σε

επαφή, ενώ το υλικό δυσκολευόταν να εξωθηθεί από τον extruder. Για το λόγο αυτό, με την ίδια ταχύτητα δοκιμάστηκε να εκτυπωθεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία και συγκεκριμένα στους 220 °C με τα αποτελέσματα να είναι παρόμοια. Στη συνέχεια με τη θερμοκρασία στους 200 °C δοκιμάστηκε νέα, μικρότερη ταχύτητα 5200mm/min. Η ψύκτρα αρχικά εκτυπώθηκε σωστά, όμως μετά από μερικές στρώσεις άρχισε να παρουσιάζει αστοχίες στην εκτύπωσή της και το υλικό εμφάνιζε δυσκολία να εξωθηθεί. Με τη συγκεκριμένη ταχύτητα και σε θερμοκρασία 220 °C το υλικό εξωθούταν ευκολότερα. Στην τελευταία δοκιμή, η ταχύτητα ορίστηκε στους 4800mm/min και η θερμοκρασία στους 220 °C και η ψύκτρα εκτυπώθηκε χωρίς αστοχίες σε 50 λεπτά χρόνου εκτύπωσης. **Οι συγκεκριμένες παράμετροι εκτιμήθηκαν ως οι καταλληλότερες για εκτύπωση ψύκτρας με υλικό εκτύπωσης το CarbonFil.**



Σχήμα 27: Εκτυπωμένη τετράγωνη ψύκτρα

Για κάθε μία από τις δύο ψύκτρες μετρήθηκαν οι διαστάσεις:

Πίνακας 2: Διαστάσεις τετράγωνης ψύκτρας

Ύψος (mm)	βάσης	6.26	6.43	6.36	6.29	6.28	6.33
Πάχος (mm)	fins	0.97	0.87	0.94	1.02	0.88	0.96
Συνολικό ύψος (mm)	ύψος	13.6	13.39	13.49	13.44	13.49	13.48
Πλάτος (mm)		45.8	47.79	46.7	46.9	46.8	47.79

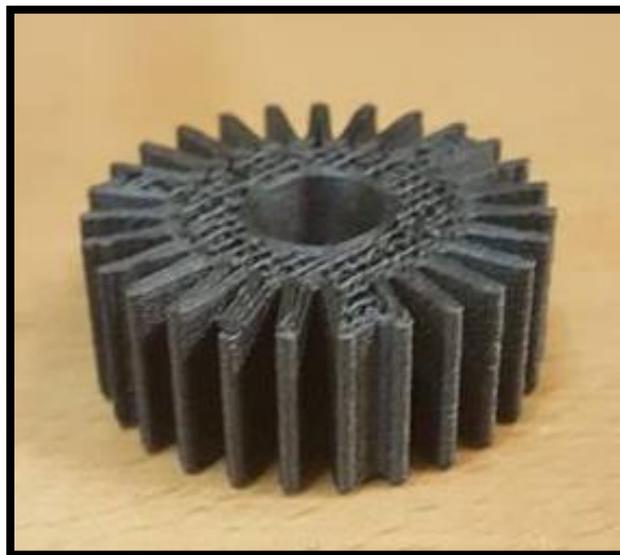
Το μέσο πλάτος της τετράγωνης ψύκτρας μετρήθηκε στα 46.8 με ελάχιστη μέτρηση 45.8mm και μέγιστη μέτρηση 47.79mm το μέσο ύψος της βάσης της 6.33mm με εύρος τιμών 6,26mm-6.43mm, ενώ το συνολικό της ύψος μετρήθηκε στα 13.48mm με εύρος τιμών 13,39mm-13.6mm. Τέλος, το πάχος των πτεργίων της ψύκτρας (Fins) μετρήθηκε 0,96mm με εύρος τιμών 0.87mm-1.02mm.

Όσον αφορά την κυκλική ψύκτρα η οποία εκτυπώθηκε με τις ίδιες ρυθμίσεις με τις οποίες εκτυπώθηκε η τετραγωνη, μετρήθηκαν τα παρακάτω:

Πίνακας 3: Μετρήσεις κυκλικής ψύκτρας

Πάχος fins (mm)	1.43	1.42	1.62	1.50	1.54	1.5
Ύψος (mm)	14.19	14.22	14.3	13.95	14.05	14.14
Διάμετρος (mm)	35.5	35.7	35.3	35.6	35.5	35.52
Διάμετρος μέσα κύκλου (mm)	10.54	10.42	10.69	10.52	10.66	10.57

Συγκεκριμένα, η εσωτερική διάμετρος μετρήθηκε 10.57mm με ελάχιστη τιμή 10.42mm και μέγιστη τιμή 10.69mm, ενώ η εξωτερική διάμετρος της ψύκτρας μετρήθηκε 35.52mm με εύρος τιμών 35.3mm-35.7mm. Το ύψος της ψύκτρας μετρήθηκε 14.14mm με ελάχιστη τιμή 13.95mm και μέγιστη 14.3mm. Τέλος, το πάχος των fins μετρήθηκε 1.5mm με εύρος τιμών 1.42-1.62mm.



Σχήμα 28: Εκτυπωμένη κυκλική ψύκτρα

Παρατηρώντας την κάθε ψύκτρα αλλά και λαμβάνοντας υπ' όψιν το ελάχιστο εύρος τιμών στην κάθε μέτρηση του εκάστοτε μέρους της κάθε ψύκτρας, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν αστοχίες στις εκτυπωμένες με CarbonFil ψύκτρες και οι ρυθμίσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι κατάλληλες.

Στο δεύτερο πείραμα εκτυπώθηκαν μία ακόμα τετράγωνη ψύκτρα με διαφορετική επεξεργασία από την πρώτη στο stl αρχείο όσον αφορά το infill και δύο στήλες με παρόμοια επεξεργασία με την κάθε τετράγωνη ψύκτρα. Πέρα από τις αλλαγές στο infill, τα υπόλοιπα δεδομένα εκτύπωσης ψύκτρας παρέμειναν σταθερά με αυτά που υπολογίστηκαν στις πρώτες εκτυπώσεις. Ο χρόνος κάθε εκτύπωσης ήταν περίπου από 50 έως 80 λεπτά. Η διαφορά στην επεξεργασία του stl αρχείου της κάθε ψύκτρας ήταν στο infill καθώς η μία ψύκτρα εκτυπώθηκε

με 30% infill, ενώ η άλλη με 50% infill, δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στις στήλες που εκτυπώθηκαν.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται μαζί με τα χαρακτηριστικά τους τα υλικά που κατασκευάστηκαν ή πραγματοποιήθηκε η τεχνική του χαρακτηρισμού με την θερμοκάμερα.

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά Υλικών που κατασκευάστηκαν ή χαρακτηρίστηκαν με θερμοκάμερα

A/A	Πολυμερές	Ενίσχυση με ίνες Άνθρακα	Ποσοστό Πλήρωσης (%)	Σχήμα	Χαρακτηρισμός με Θερμοκάμερα
PLA	PLA	X	100	Κυβικό	✓
30% ΚΥΚΛΙΚΗ	PETG	✓	30	Κυλινδρικό	X
30% ΤΕΤΡΑΓΩΝΗ			30	Τετραγωνικό	X
30% ΣΤΗΛΗ			30	Κυβικό	✓
50% ΚΥΚΛΙΚΗ			50	Κυλινδρικό	X
50% ΤΕΤΡΑΓΩΝΗ			50	Τετραγωνικό	X
50% ΣΤΗΛΗ			50	Κυβικό	✓
100% ΣΤΗΛΗ			100	Κυβικό	✓
ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ			-		

Κεφάλαιο 7. Χαρακτηρισμός με Θερμοκάμερα

7.1 Αρχή Λειτουργίας

Κάθε σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν (-273.15 Celsius) εκπέμπει θερμική υπέρυθη ακτινοβολία. Θερμογραφία είναι η επιστήμη της ανάλυσης των θερμικών δεδομένων που συλλέγονται από ειδικές θερμικές κάμερες, οι οποίες ανιχνεύουν θερμική ακτινοβολία και την απεικονίζουν σε ραδιομετρικές εικόνες. Με τη θερμογραφία δεν μετράται απευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας, αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας. Έτσι οι υπό επιφανειακές ανωμαλίες στο υλικό, δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή θερμοκρασία προκαλούμενες από τους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις ζώνες που υπάρχουν ατέλειες. Στις μέρες μας, η επιστήμη της θερμογραφίας λόγω της επιτυχίας που έχει, χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία, σε κτιριακές και οικιακές εφαρμογές, στην ναυτιλία και σε πολλές ακόμα εφαρμογές, όπου τα θερμικά πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων.



Σχήμα 29: Θερμοκάμερα

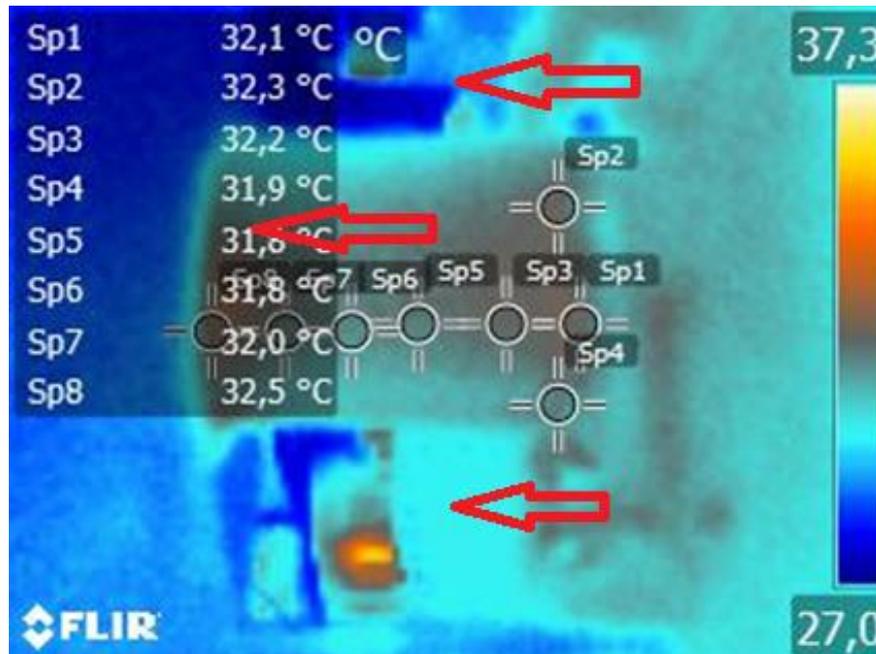
7.2 Μετρήσεις Θερμοκρασίας Ψυκτρών

Μετά από την εκτύπωσή τους, οι στήλες που εκτυπώθηκαν με αντίστοιχα infill, μετρήθηκαν με θερμοκάμερα. Αρχικά η κάθε ψύκτρα τοποθετήθηκε πάνω σε επεξεργαστή σε σύστημα υπολογιστή το οποίο τέθηκε σε λειτουργία. Με ειδικό πρόγραμμα στον υπολογιστή, ο επεξεργαστής δούλευε στο εκατό τοις εκατό ούτως ώστε να παρατηρηθεί η ψύξη του στις ακραίες συνθήκες λειτουργίας του. Έπειτα με τη χρήση θερμοκάμερας μετρήθηκε η θερμοκρασία κάθε στήλης σε διαφορετικά της σημεία κοντά αλλά και μακριά από τον επεξεργαστή ούτως ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο η εκτυπωμένη με CarbonFil ψύκτρα βοηθάει στην ψύξη του επεξεργαστή. Παράλληλα με τις μετρήσεις με τη θερμοκάμερα, με ειδικό πρόγραμμα του υπολογιστή μετρούταν η θερμοκρασία του επεξεργαστή την κάθε χρονική στιγμή. Με το τέλος των μετρήσεων των εκτυπωμένων CarbonFil ψυκτρών, μετρήθηκε με θερμοκάμερα συμβατική ψύκτρα με στόχο τη σύγκρισή της με της εκτυπωμένες καθώς επίσης και μέτρηση ψύκτρας μόνο από PLA για να φανεί η επίδραση των ινών άνθρακα στην ψύξη του επεξεργαστή.

7.3 Αποτελέσματα - Σχολιασμός

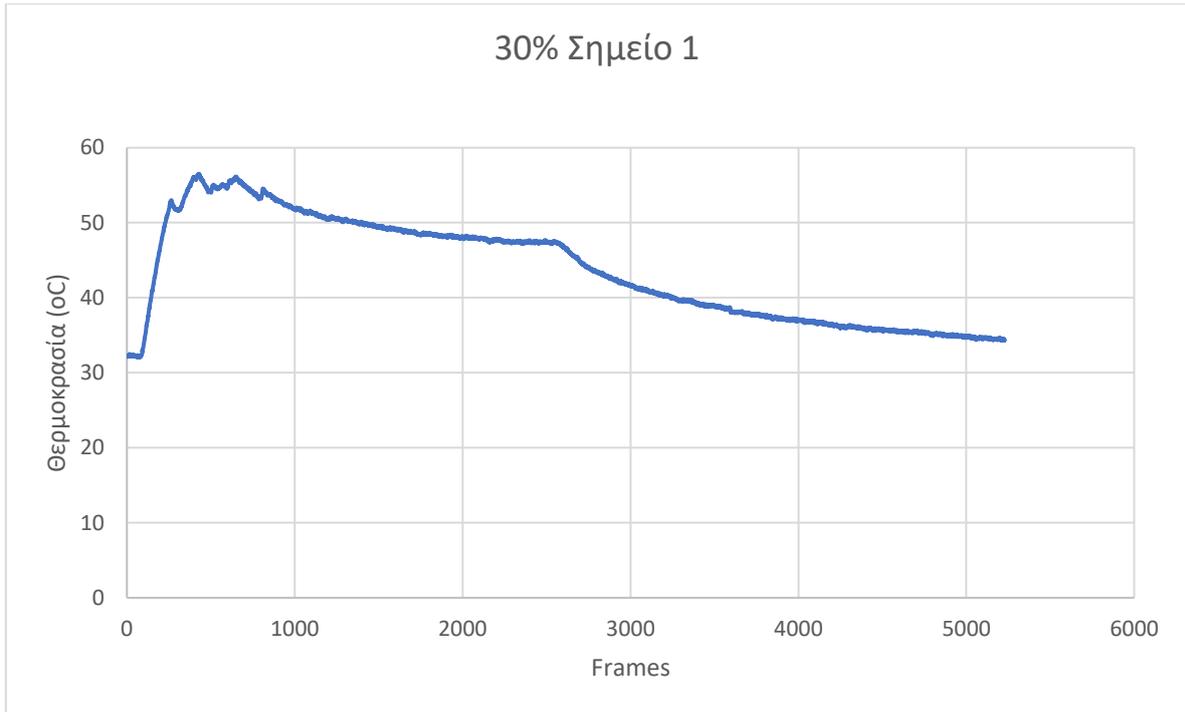
7.3.1 30% Στήλη

Στην 30% infill ψύκτρα, μέσω της θερμοκάμερας παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις θερμοκρασίες του σημείου 1 (sp1, σημείο που ακουμπά στον επεξεργαστή) από το σημείο 8 (sp8, το πιο απομακρυσμένο σημείο από τον επεξεργαστή), δεν έγινε δηλαδή μεταφορά της θερμότητας από τον επεξεργαστή σε ολόκληρη την ψύκτρα, ούτως ώστε να ψυχθεί σωστά.

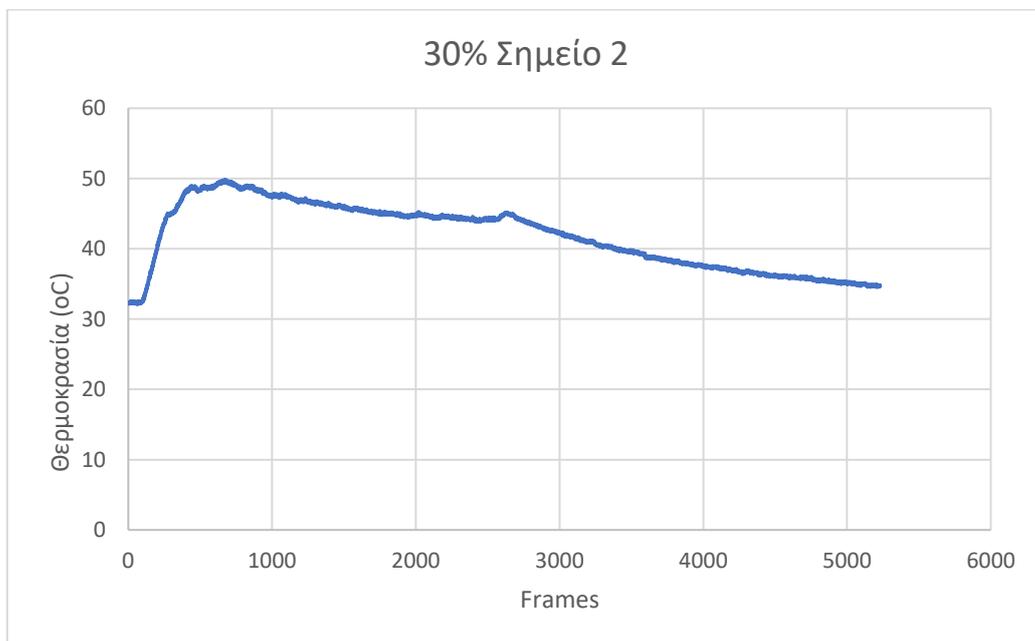


Σχήμα 30: Απεικόνιση της ψύκτρας 30% infill με τη χρήση Θερμοκάμερας.

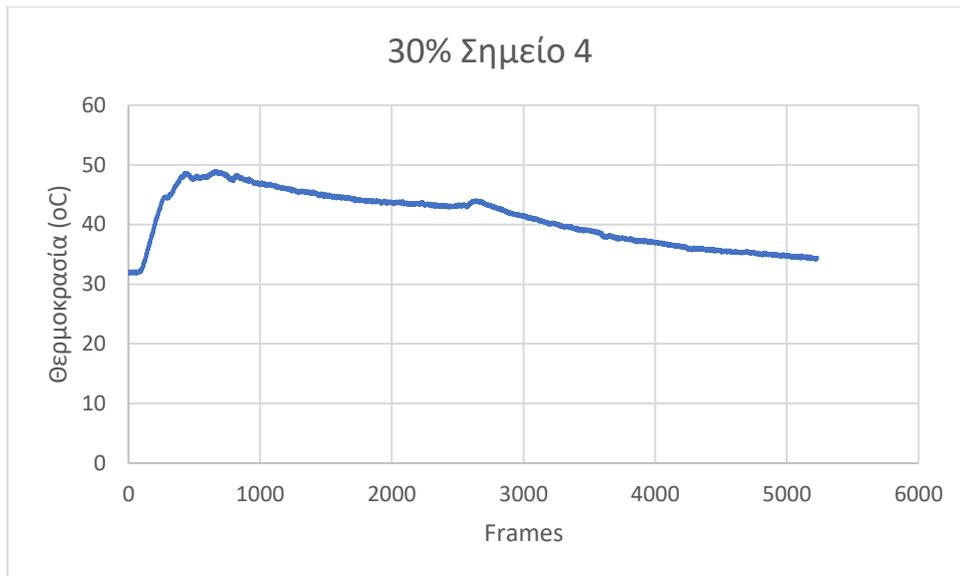
Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται καθαρά τα σημεία στα οποία μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες με τη χρήση της θερμοκάμερας. Αναλυτικά, η μεταβολή της θερμοκρασίας στα σημεία 1 έως 8 για δεκάλεπτη καταγραφή είναι οι εξής:



Διάγραμμα 1: Θερμοκρασίες στο σημείο 1 της ψύκτρας 30% Infill.

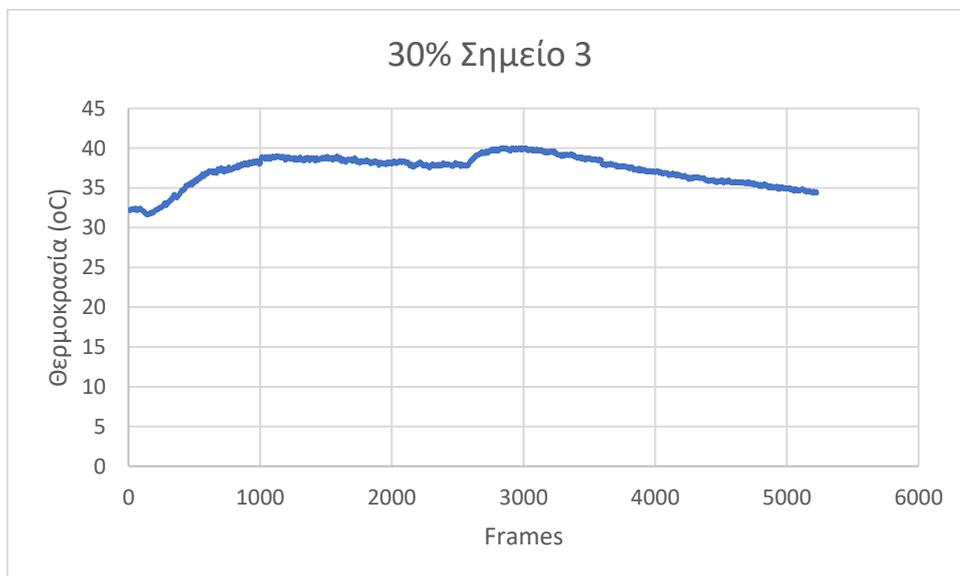


Διάγραμμα 2: Μεταβολή της θερμοκρασίας στο σημείο sp2 της 30% infill ψύκτρας.

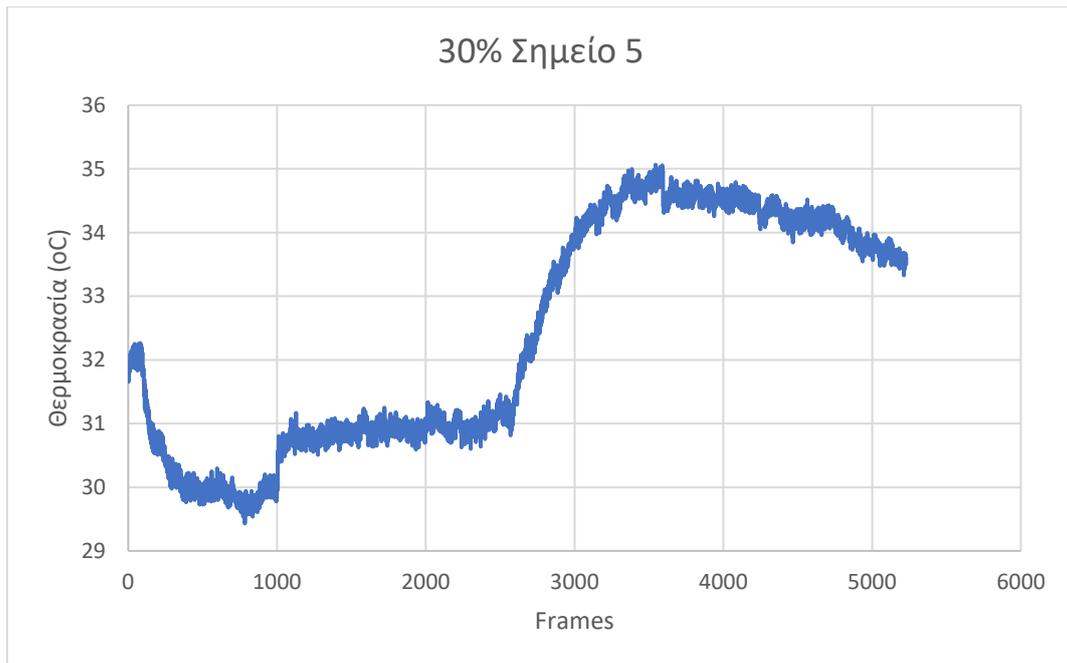


Διάγραμμα 3: Μεταβολή θερμοκρασίας στο σημείο 4 της ψύκτρας 30% infill.

Μέσω των τριών πρώτων διαγραμμάτων , παρατηρείται ότι οι μεταβολές θερμοκρασιών στα τρία αυτά σημεία, είναι παρόμοιες μεταξύ τους. Η θερμοκρασία ξεκινά κοντά στους 30°C και φτάνει στο 1^ο σημείο έως λίγο πάνω από τους 50°C, ενώ στα δύο επόμενα σημεία φτάνει έως και τους 50°C. Αυτό συμβαίνει γιατί τα σημεία αυτά είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και είναι τα κοντινότερα σημεία στον επεξεργαστή που είναι η πηγή θερμότητας. Προχωρώντας ψηλότερα, πιο μακριά από τον επεξεργαστή, η διαφορά θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ψύξης του επεξεργαστή μειώνεται αισθητά, όπως παρατηρείται στα παρακάτω διαγράμματα:

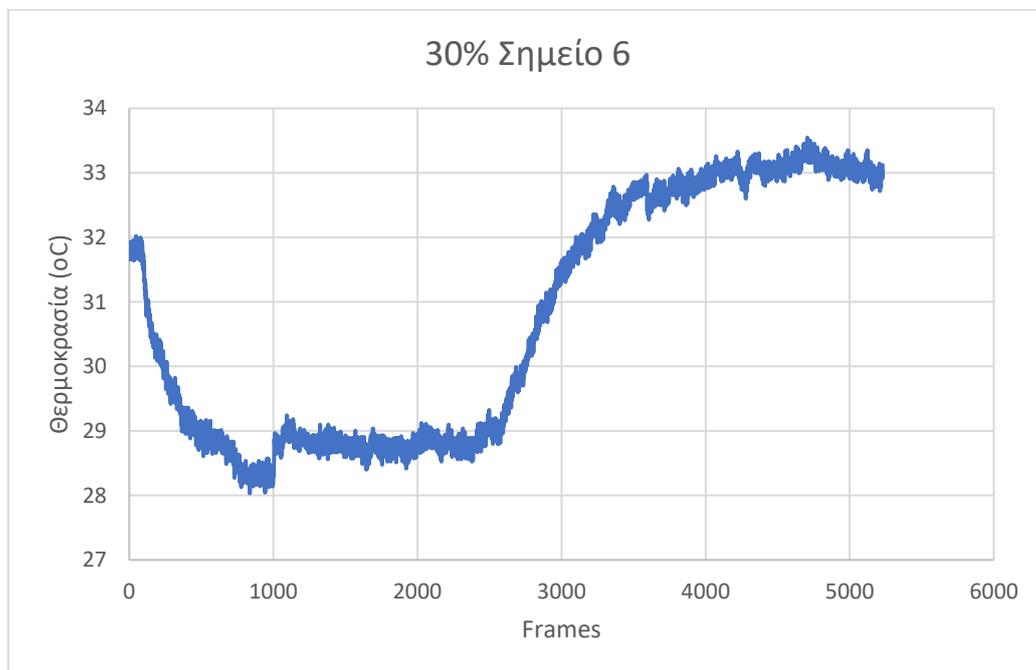


Διάγραμμα 4: Θερμοκρασίες στο σημείο 3 της 30% ψύκτρας.

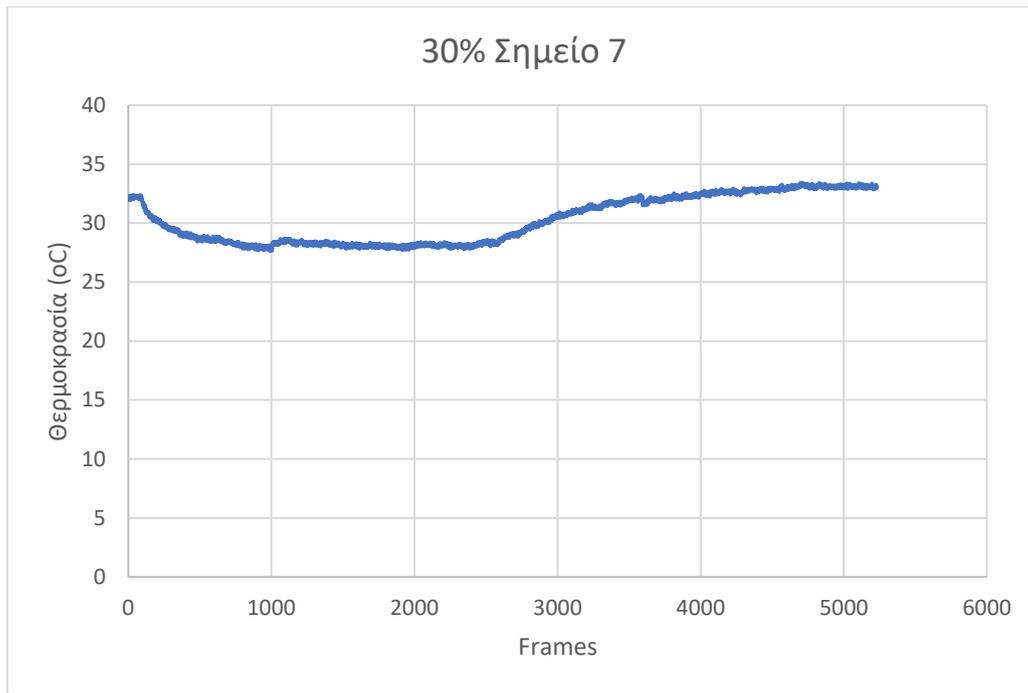


Διάγραμμα 5: Σημείο 5 της 30% infill ψύκτρας.

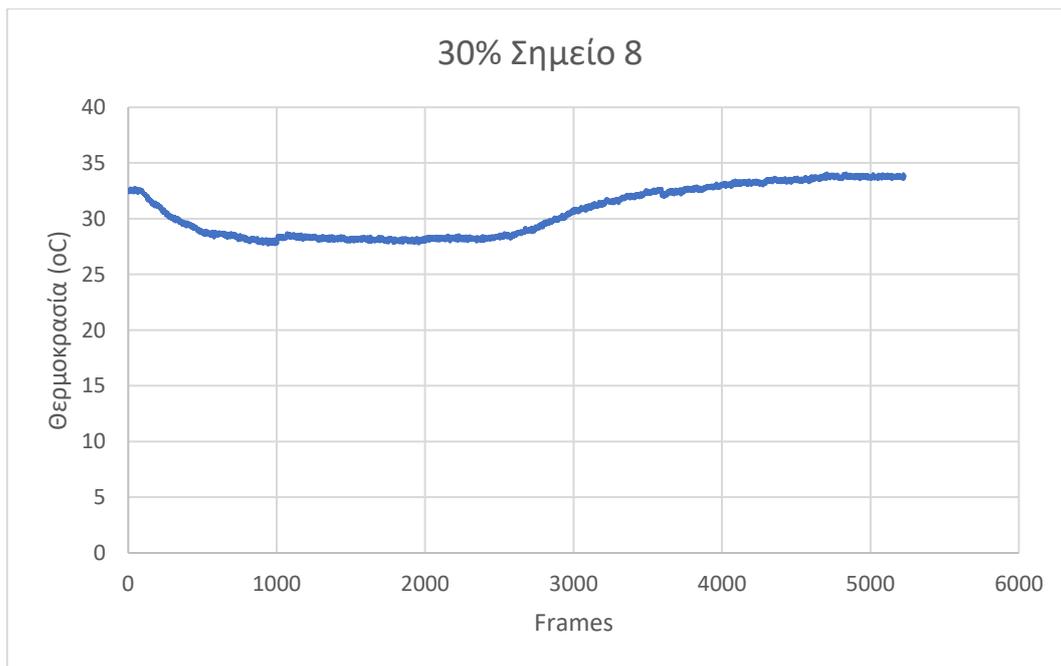
Φαίνεται ότι η μεταβολή στη θερμοκρασία της ψύκτρας μειώνεται αισθητά σε σχέση με τα προηγούμενα σημεία, κυρίως στο σημείο 5, στο οποίο η θερμοκρασία δεν φτάνει ούτε τους 40°C. Στα σημεία ακόμα πιο μακριά από τον επεξεργαστή, οι θερμοκρασίες είναι:



Διάγραμμα 6: Θερμοκρασίες στο σημείο 6 της 30% Infill ψύκτρας.



Διάγραμμα 7: Σημείο 7 της 30% infill ψόκτρας



Διάγραμμα 8: Μεταβολή θερμοκρασίας στο σημείο 8 της 30% infill ψόκτρας.

Φαίνεται πλέον πως η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή στα τρία τελευταία σημεία, περίπου στους 30 με 35 βαθμούς Κελσίου.

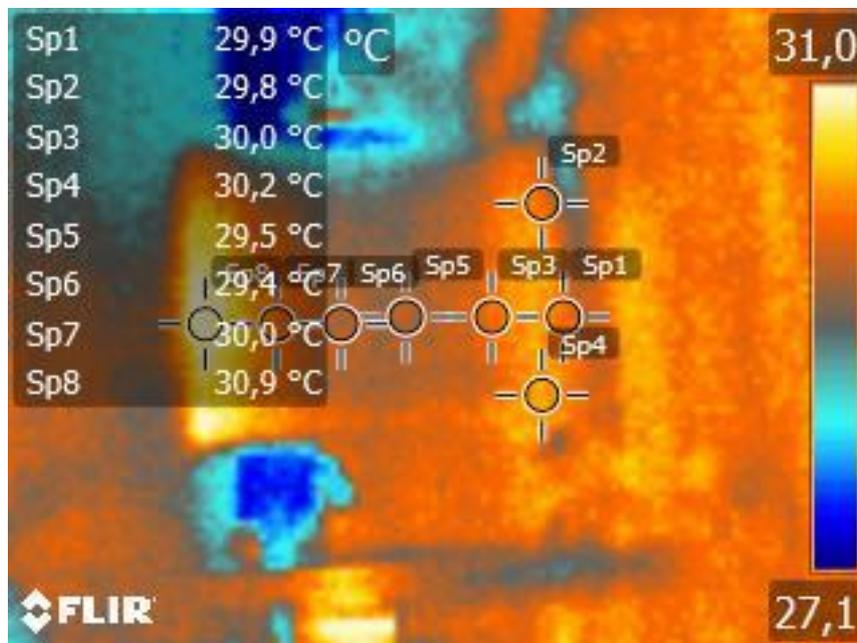
Πίνακας 5: Θερμοκρασίες ψύκτρας (°C) συναρτήσει απόστασης από ψύκτρα και χρόνο.

Σημείο	Frame 1	Frame 1000	Frame 2000	Frame 3000	Frame 4000	Frame 5000
sp1	32.101	51.734	48.057	41.694	37.083	34.918
sp2	32.33	47.448	44.902	42.361	37.362	34.987
sp4	31.88	46.692	43.633	41.5	39.96	34.793
sp3	32.171	29.096	38.196	39.913	36.982	34.839
sp5	31.775	29.989	31.038	33.833	34.657	33.822
sp6	31.763	28.284	28.955	31.319	33.005	33.132
sp7	31.984	27.815	28.128	30.567	32.484	33.166
sp8	32.519	27.875	28.116	30.862	33.005	33.845

Στην 30% infill στήλη, παρατηρείται ότι κοντά στον επεξεργαστή (sp1-sp3) η θερμοκρασία αυξάνεται έως τα 3000 frames ενώ έπειτα μειώνεται. Αντίθετα στα σημεία μακρύτερα από τον επεξεργαστή (sp5-sp8), παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας έως τα 3000 frames ενώ έπειτα αύξηση. Παράλληλα, όσο τα σημεία απομακρύνονται από τον επεξεργαστή ο οποίος αποτελεί την πηγή θερμότητας, η θερμοκρασία που μετράται μειώνεται έως τα 3000 frames. Κοντά στα 4000 frames η θερμοκρασία αρχίζει να σταθεροποιείται στην ίδια τιμή για όλα τα σημεία της ψύκτρας, δηλαδή καθ'όλο τον όγκο της.

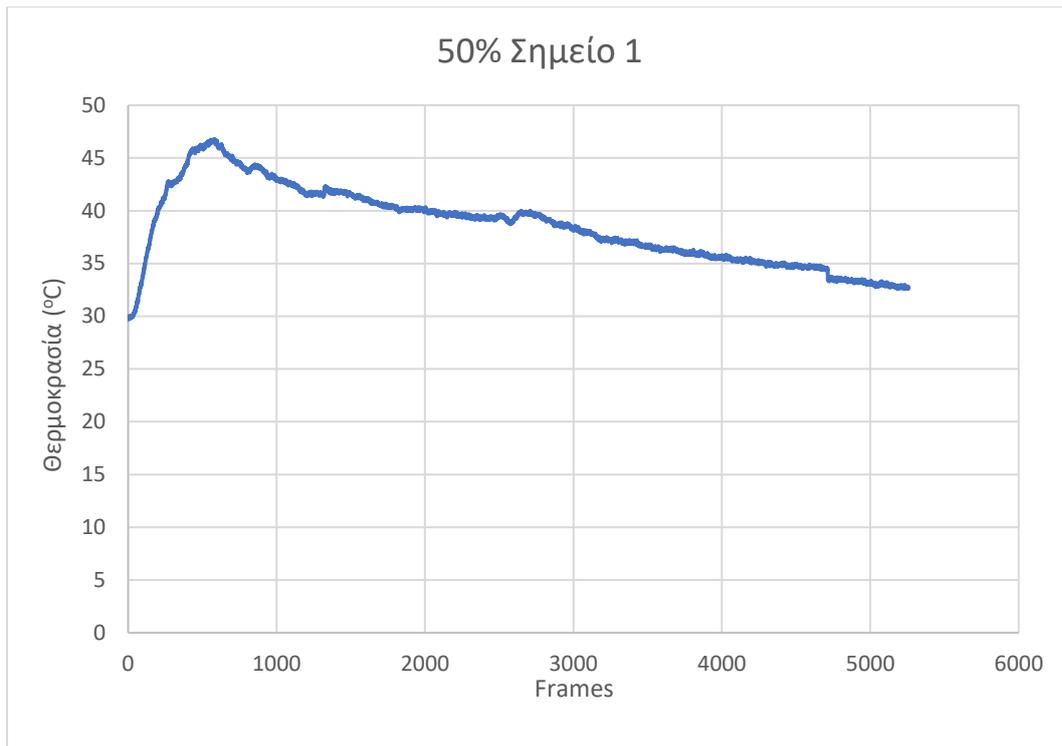
7.3.2 50% Στήλη

Παρόμοια με την περίπτωση της 30% infill ψύκτρας, στην 50% Infill ψύκτρα παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά στην μεταβολή θερμοκρασίας ανάμεσα στα σημεία τα οποία έγιναν οι μετρήσεις με τη χρήση της θερμοκάμερας.

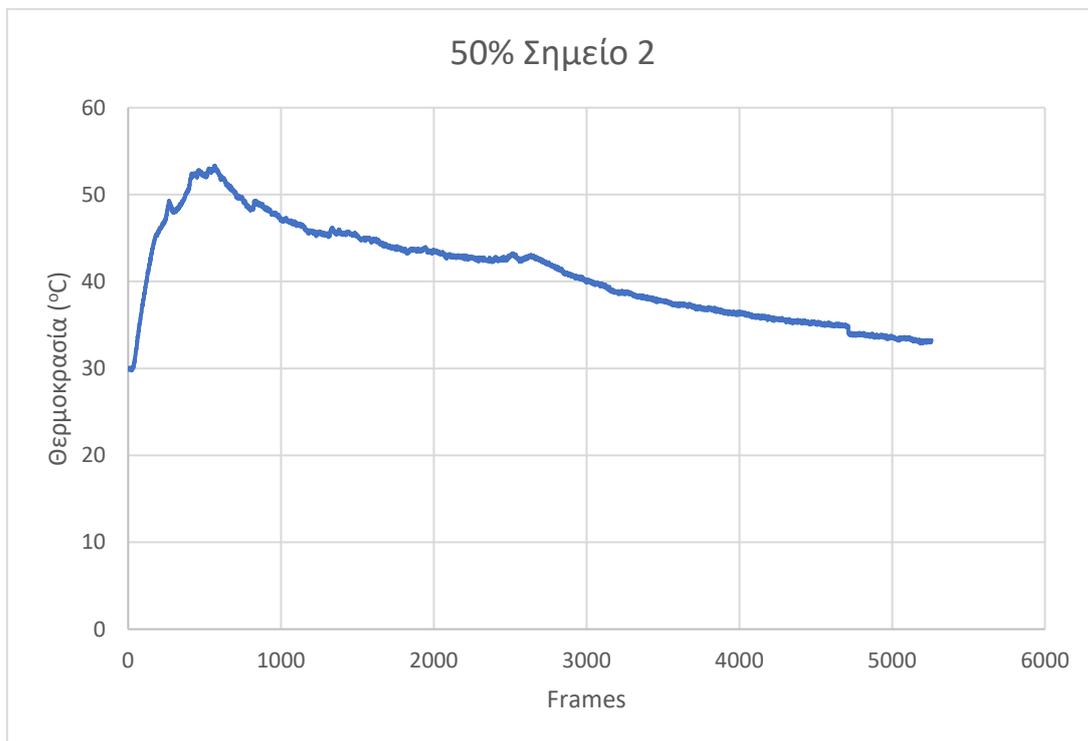


Σχήμα 31: Απεικόνιση της 50% infill ψύκτρας-στήλης με θερμοκάμερα.

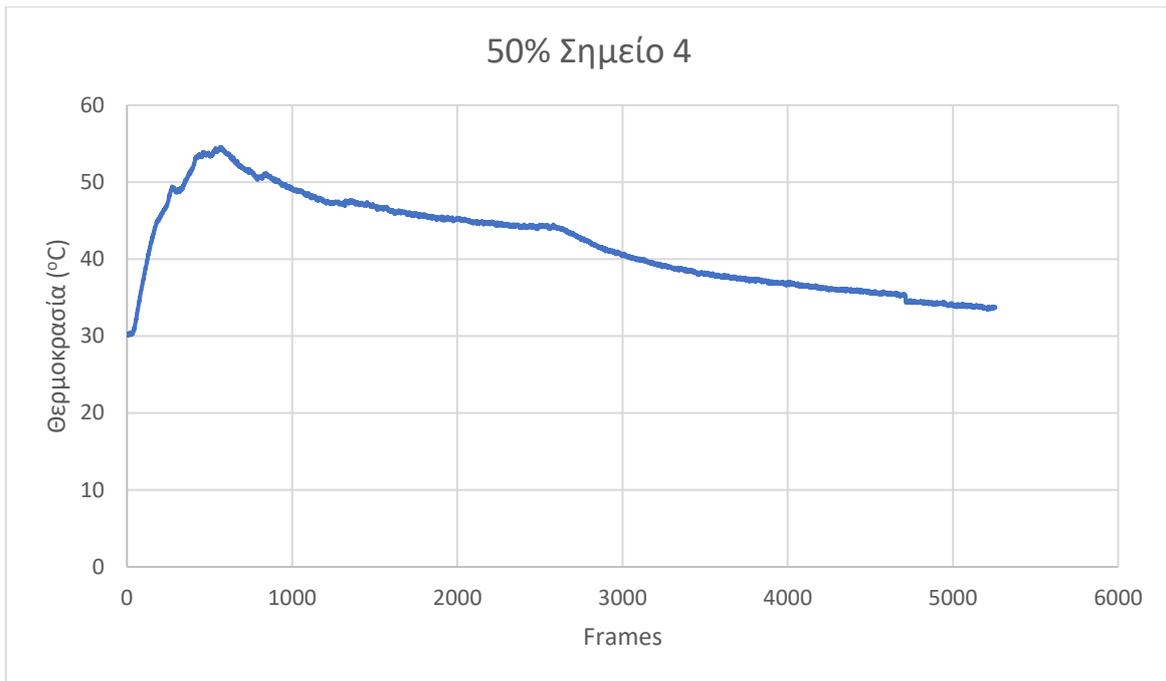
Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα τα οποία έδωσε η θερμοκάμερα είναι τα εξής:



Διάγραμμα 9: Θερμοκρασίες στο σημείο sp1

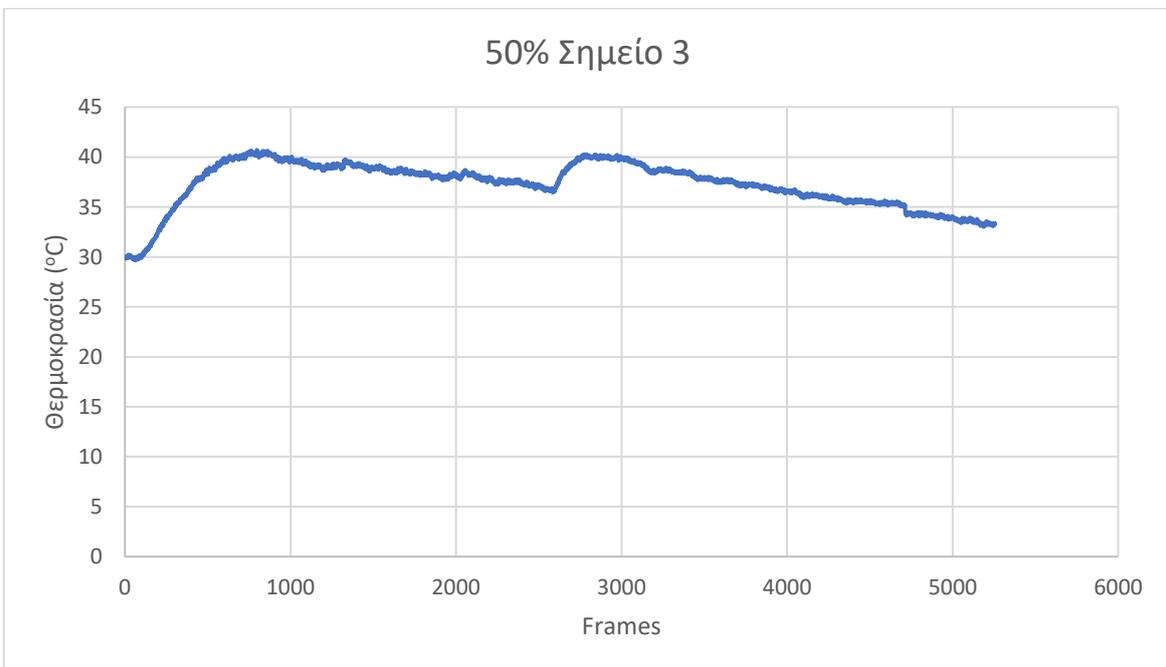


Διάγραμμα 10: Θερμοκρασίες στο σημείο sp2

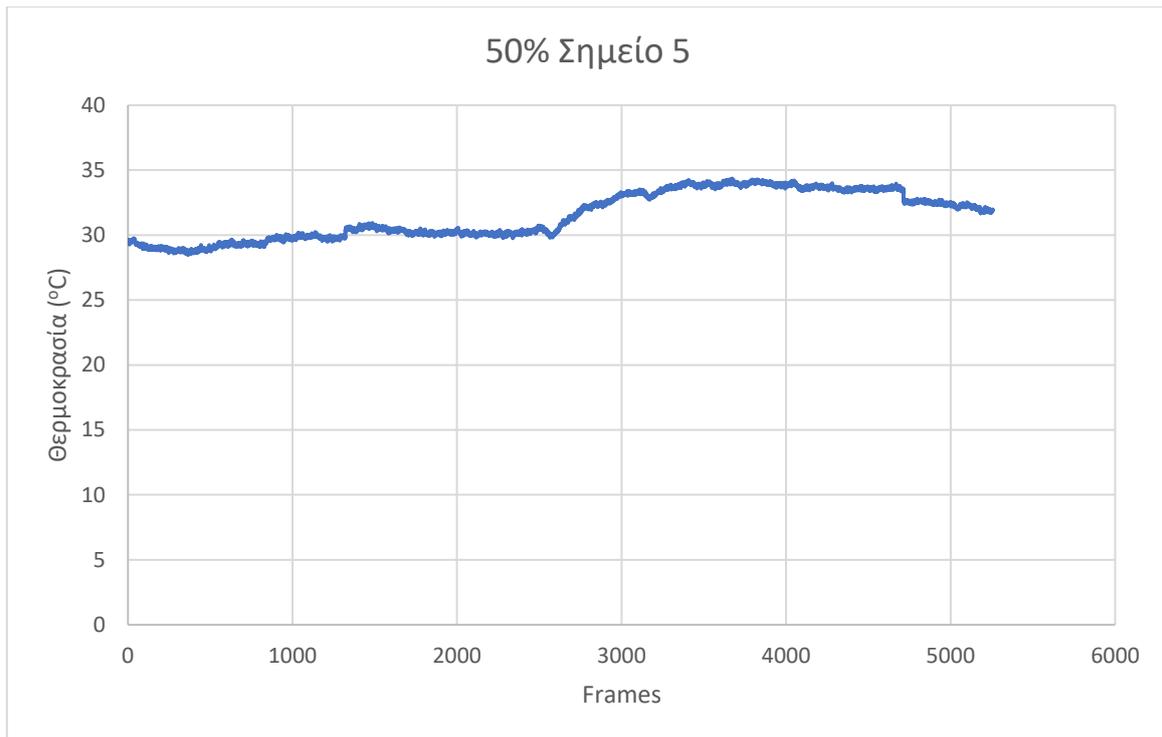


Διάγραμμα 11: Θερμοκρασίες στο σημείο sp4

Όπως αναμενόταν και λόγω των αποτελεσμάτων της 30% infill ψύκτρας, στα σημεία τα οποία βρίσκονται κοντά στην πηγή της θερμότητας που είναι ο επεξεργαστής, η μεταβολή στη θερμοκρασία των σημείων είναι παρόμοια μεταξύ τους και ξεπερνάει ακόμα και τους 50 βαθμούς.

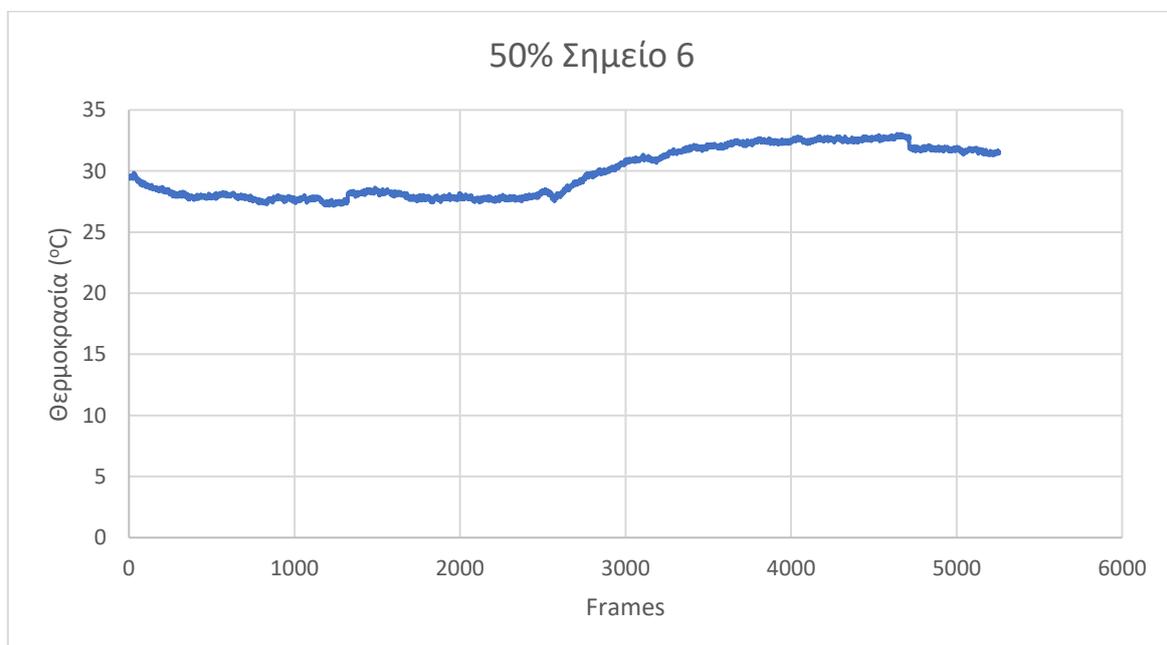


Διάγραμμα 12: Θερμοκρασίες στο σημείο sp3

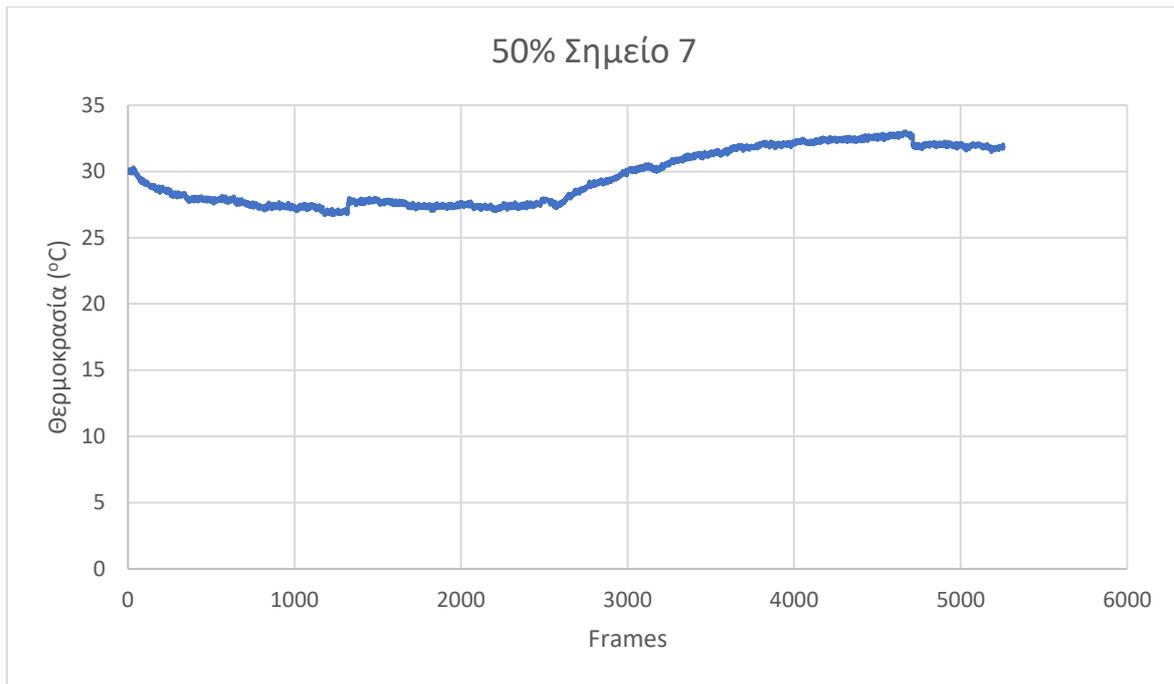


Διάγραμμα 13: Θερμοκρασίες στο σημείο sp5

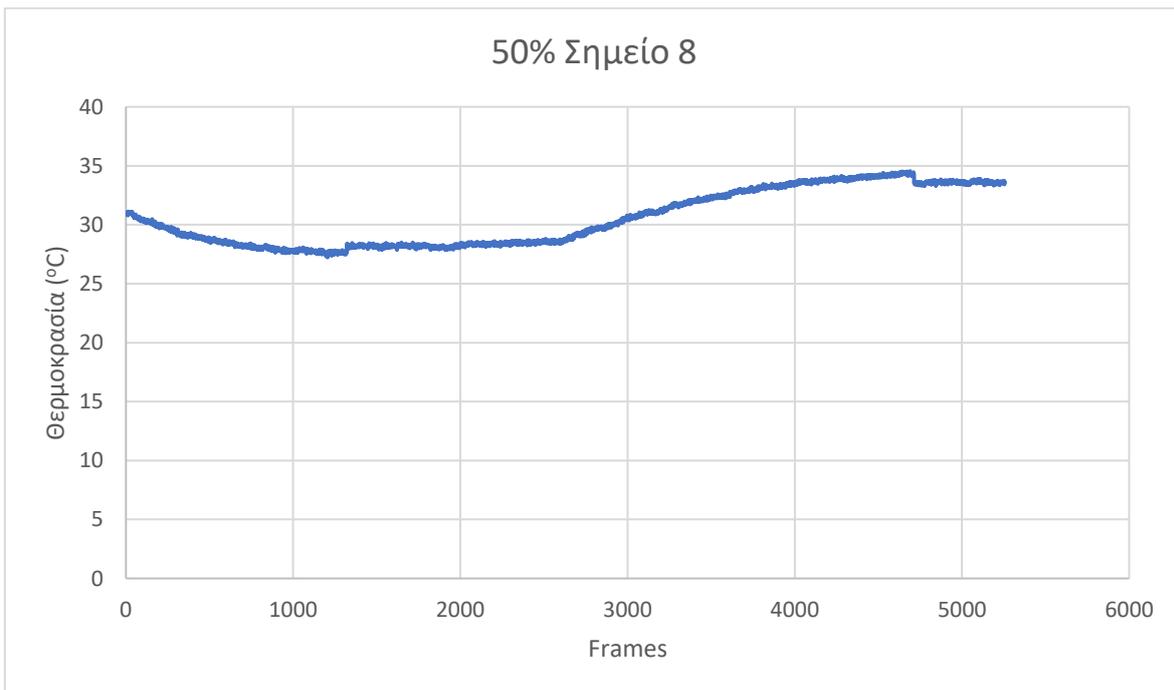
Στο συγκεκριμένο σημείο ξεκινά να γίνεται αντιληπτή η μείωση στη μεταβολή της θερμοκρασίας καθώς η αρχική θερμοκρασία είναι 30°C, ενώ η μέγιστη δεν ξεπερνά τους 34°C.



Διάγραμμα 14: Θερμοκρασίες στο σημείο sp6



Διάγραμμα 15: Θερμοκρασίες στο σημείο sp7



Διάγραμμα 16: Θερμοκρασίες στο σημείο sp8

Στα τρία τελευταία σημεία, η θερμοκρασία μεταβάλλεται ελάχιστα, ενώ η θερμοκρασία στην αρχή πέφτει και κάτω από την αρχική θερμοκρασία που είχε το κάθε σημείο της ψύκτρας. Αυτό σημαίνει ότι ούτε το 50% Infill CarbonFil ψύκτρας είναι ικανό να ψύξει σωστά έναν επεξεργαστή.

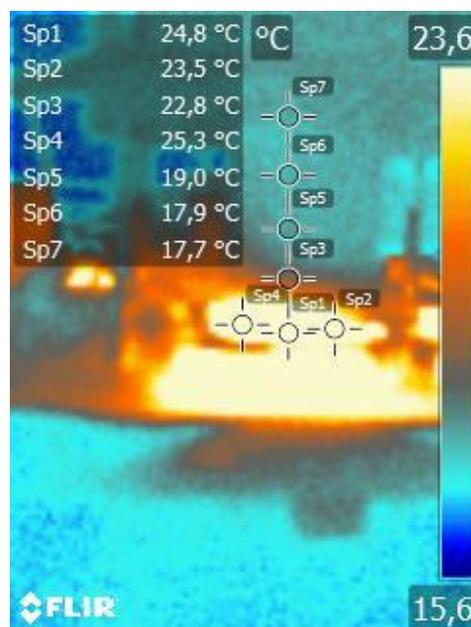
Πίνακας 6: Θερμοκρασίες ψύκτρας (°C) συναρτήσει απόστασης από ψύκτρα και χρόνο.

Σημείο	Frame 1	Frame 1000	Frame 2000	Frame 3000	Frame 4000	Frame 5000
sp1	29.906	42.918	40.175	38.085	35.667	33.213
sp2	29.847	46.962	43.633	39.979	36.489	33.535
sp4	30.237	49.297	45.26	40.589	37.016	34.028
sp3	30.001	39.694	38.229	39.793	36.523	33.856
sp5	39.514	29.586	30.485	33.051	33.868	32.31
sp6	29.407	27.706	28.032	30.944	32.449	31.67
sp7	29.965	27.138	27.634	29.894	32.066	31.915
sp8	30.885	27.803	28.236	30.414	33.615	33.569

Στην 50% infill στήλη, παρατηρείται ξανά αύξηση της θερμοκρασίας έως τα 3000 frames στα σημεία που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τον επεξεργαστή (sp1-sp3), ενώ στα επόμενα frames μειώνεται. Στα σημεία που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον επεξεργαστή (sp5-sp8), η θερμοκρασία αρχικά μειώνεται έως τα 3000 frames, ενώ μετά αυξάνεται ελαφρώς. Και στη συγκεκριμένη ψύκτρα, η θερμοκρασία μειώνεται έως τα 3000 frames όσο μακρύτερα από τον επεξεργαστή γίνονται οι μετρήσεις. Τέλος, μετά τα 4000 frames η θερμοκρασία σταθεροποιείται στην ίδια τιμή σε όλα τα σημεία του επεξεργαστή, κοντά στους 33 °C.

7.3.3 100% Στήλη

Στην 100% infill ψύκτρα παρατηρήθηκαν διαφορετικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τις δύο άλλες στήλες του 30 και 50 τοις εκατό infill. Συγκεκριμένα, στο 1 λεπτό οι θερμοκρασίες στην ψύκτρα είναι οι εξής:

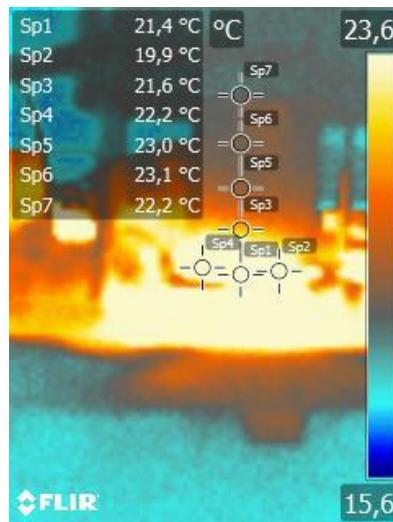


Σχήμα 32: Θερμοκρασίες στην ψύκτρα 1 λεπτό μετά την ενεργοποίηση του συστήματος.

Η Θερμοκρασία στο σημείο sp1 φαίνεται να είναι στους 24.8°C, ενώ στο σημείο sp7 το οποίο είναι το πιο απομακρυσμένο από τον επεξεργαστή του συστήματος καταγράφεται στους 17.7°C. Στα σημεία sp2 και sp3 τα οποία βρίσκονται αρκετά κοντά στο sp1 παρατηρείται

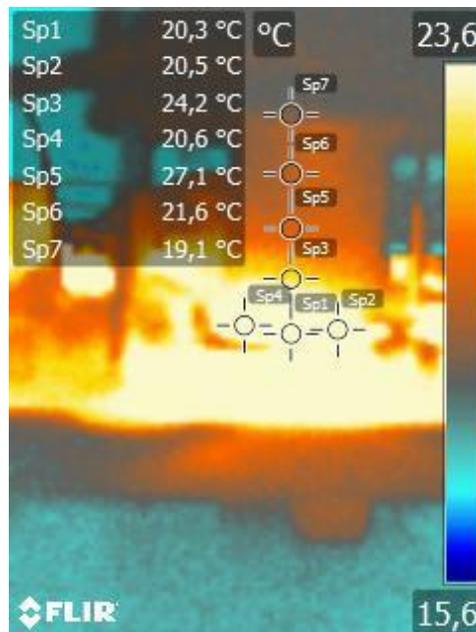
παρόμοια θερμοκρασία 23.5 και 25.3 βαθμοί Κελσίου αντίστοιχα, ενώ όσο τα σημεία απομακρύνονται από τον επεξεργαστή, τόσο μειωμένη παρατηρείται η θερμοκρασία.

Στα 2 λεπτά:



Σχήμα 33: Θερμοκρασίες στην ψύκτρα 2 λεπτά μετά την ενεργοποίηση του συστήματος.

Από τα δεδομένα της θερμοκάμερας, φαίνεται ότι οι θερμοκρασίες στην ψύκτρα έχουν ακόμα διαφορά και φαίνεται ότι στο κάτω μέρος της είναι αρκετά μεγαλύτερες από ότι στο πάνω μέρος της.

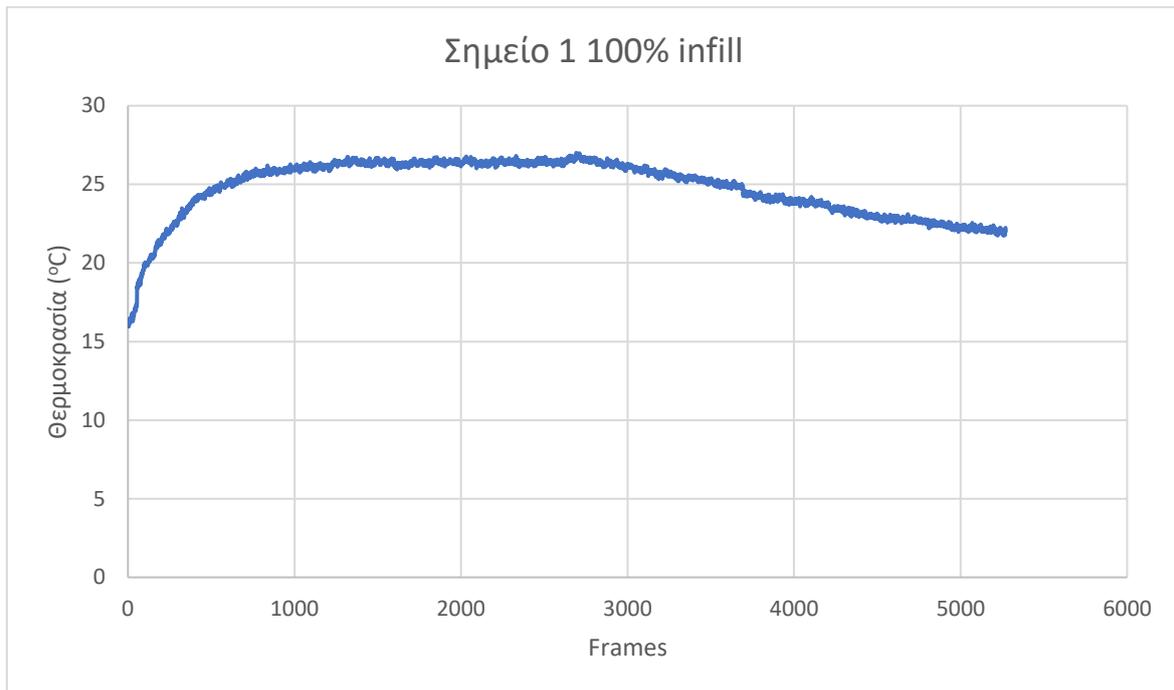


Σχήμα 34: Θερμοκρασίες στην ψύκτρα 3 λεπτά μετά την ενεργοποίηση του συστήματος.

Στην παραπάνω εικόνα θερμοκάμερας μπορεί να παρατηρηθεί η διαφορά θερμοκρασίας που υπάρχει ανάμεσα στα σημεία στα 3 λεπτά μετά την ενεργοποίηση του συστήματος.

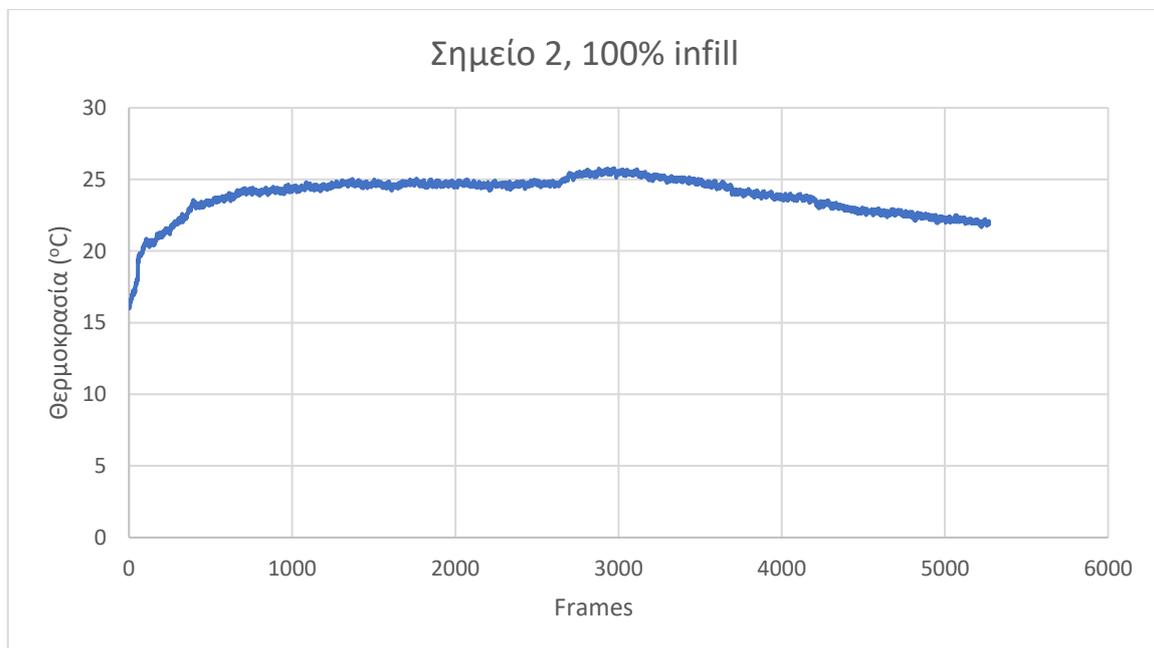
Τα δεδομένα τα οποία λήφθηκαν από τη θερμοκάμερα κατά τη διάρκεια του πειράματος φαίνονται και στα διαγράμματα θερμοκρασιών για κάθε σημείο ξεχωριστά.

Όσον αφορά το sp1:



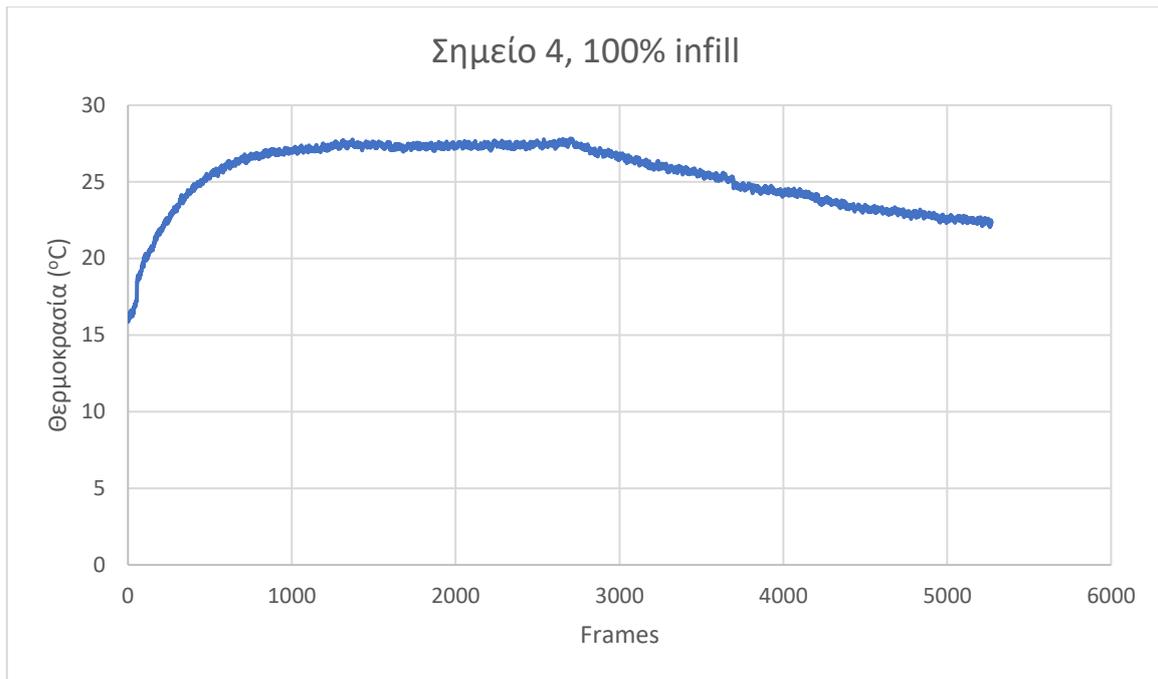
Διάγραμμα 17: Θερμοκρασίες στο σημείο sp1.

Για το σημείο sp2 δόθηκαν οι παρακάτω θερμοκρασίες:



Διάγραμμα 18: Θερμοκρασίες στο σημείο sp2.

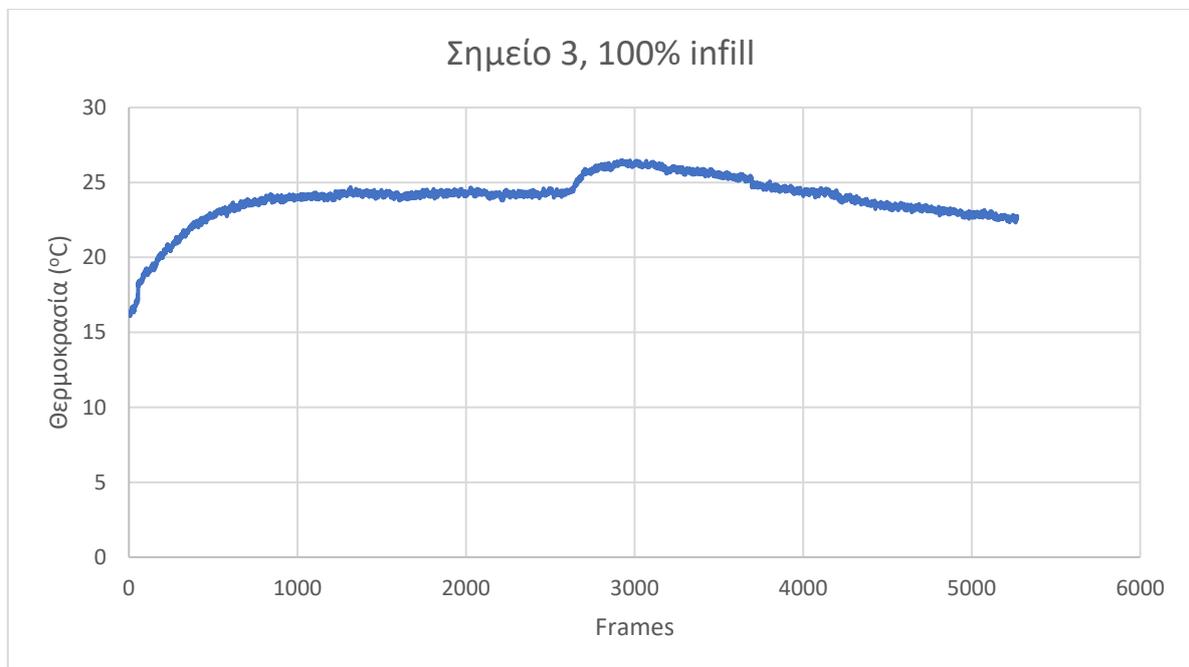
Για το σημείο sp4 οι θερμοκρασίες που έδωσε η θερμοκάμερα είναι οι εξής:



Διάγραμμα 19: Θερμοκρασίες στο σημείο *sp4*.

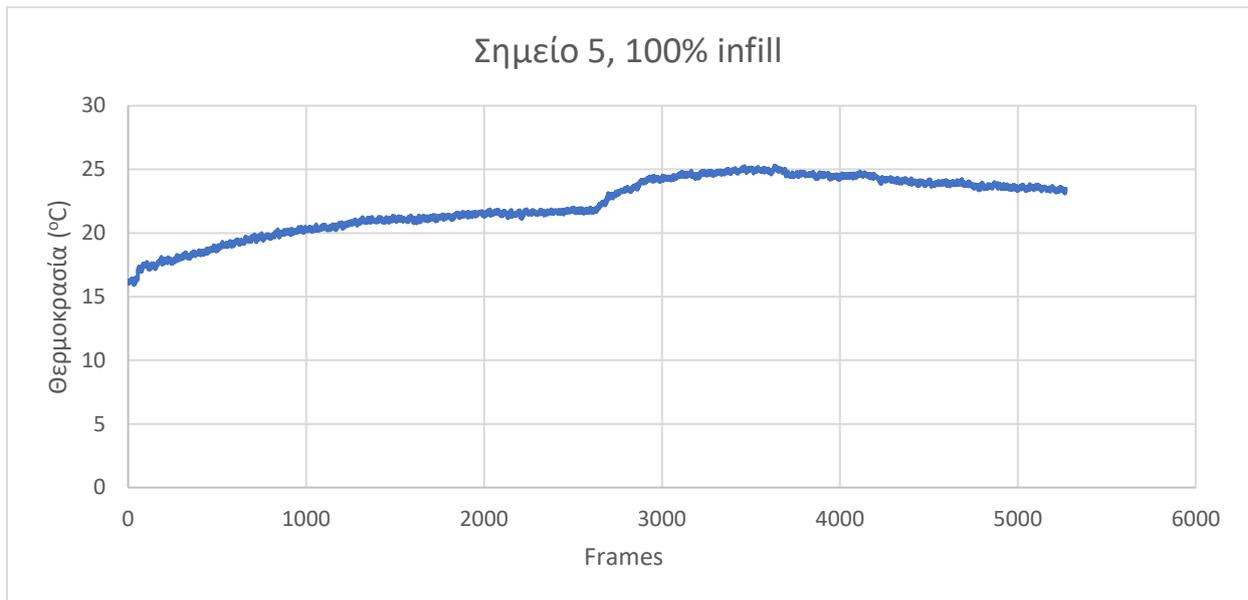
Στα τρία αυτά σημεία οι θερμοκρασίες που παρατηρούνται είναι παρόμοιες όπως και οι μεταβολές στη θερμοκρασία, καθώς τα σημεία αυτά βρίσκονται κοντά το ένα με το άλλο και σε παραπλήσια απόσταση από τον επεξεργαστή.

Όσον αφορά το σημείο *sp3*, το οποίο είναι ψηλότερα από τα 3 προηγούμενα το διάγραμμα θερμοκρασιών είναι το εξής:



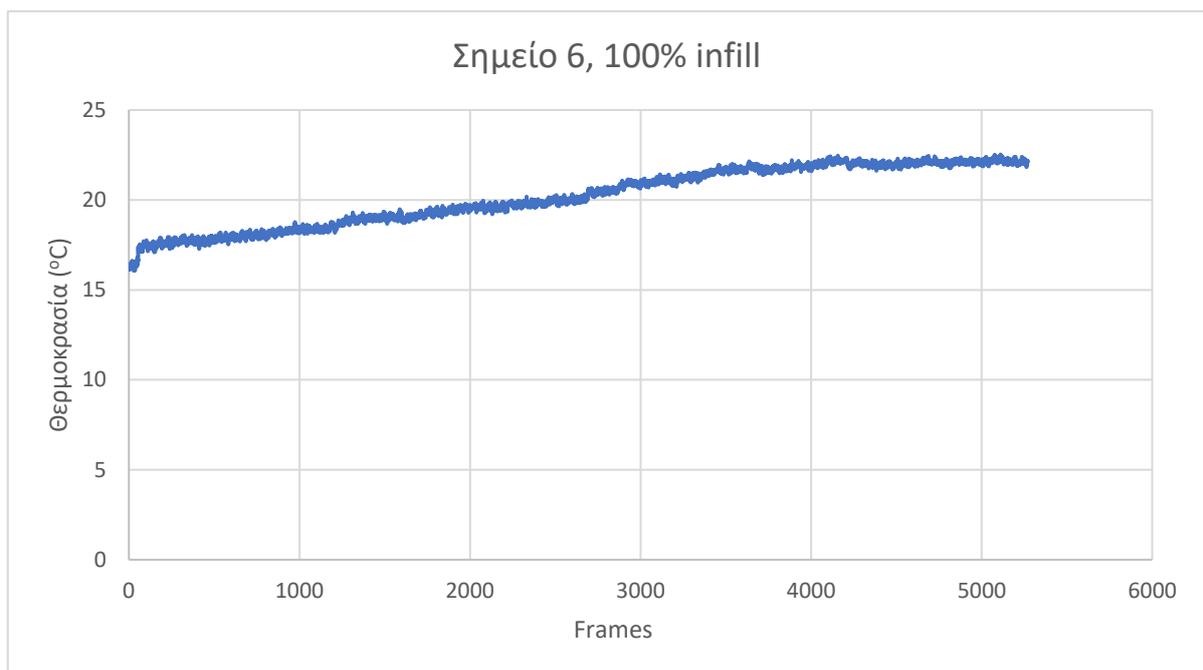
Διάγραμμα 20: Θερμοκρασίες στο σημείο *sp3*.

Για το σημείο 5, τα δεδομένα θερμοκρασιών είναι:



Διάγραμμα 21: Θερμοκρασίες στο σημείο sp5.

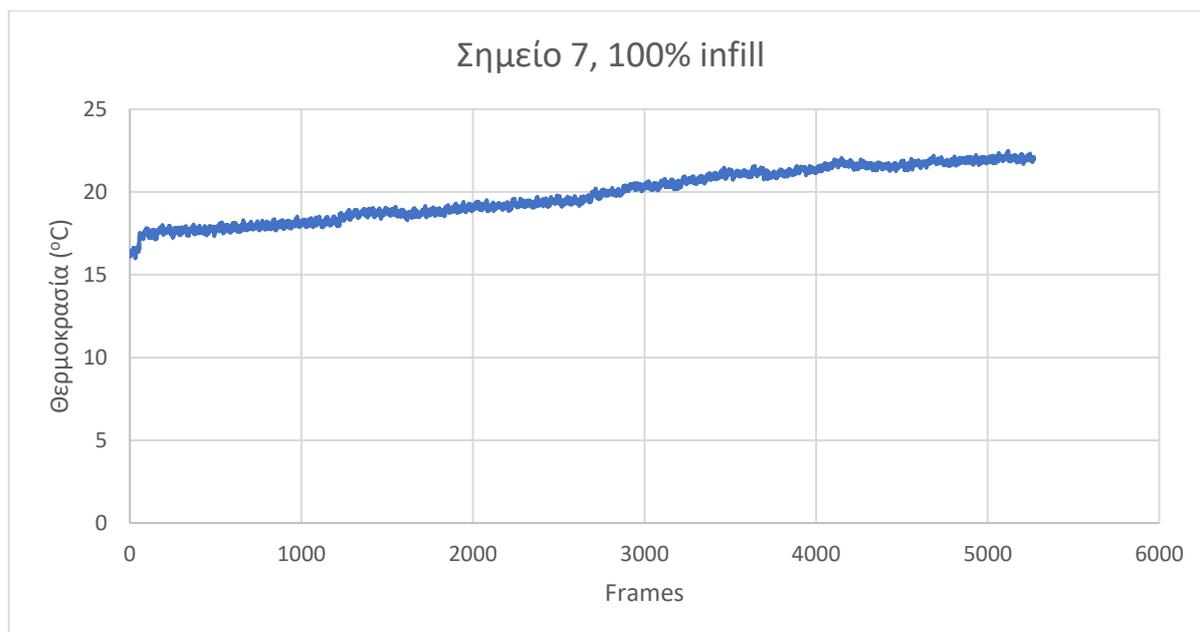
Αντίστοιχα στο σημείο sp6:



Διάγραμμα 22: Θερμοκρασίες στο σημείο sp6.

Φαίνεται πλέον πιο ξεκάθαρα ότι η μέγιστη θερμοκρασία της ψύκτρας όσο τα σημεία απομακρύνονται από τον επεξεργαστή είναι αρκετά χαμηλότερη από ότι στο σημείο 1.

Τέλος για το σημείο sp7 οι θερμοκρασίες που μετρήθηκαν από τη θερμοκάμερα είναι οι εξής:



Διάγραμμα 23: Θερμοκρασίες στο σημείο sp7.

Φαίνεται στην 100% infill ψύκτρα αρκετά περισσότερο η διαφορά θερμοκρασίας ακόμα και στο τελευταίο σημείο. Παράλληλα, και στα 3 τελευταία σημεία (sp5-sp7) Η θερμοκρασία ανεβαίνει καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.

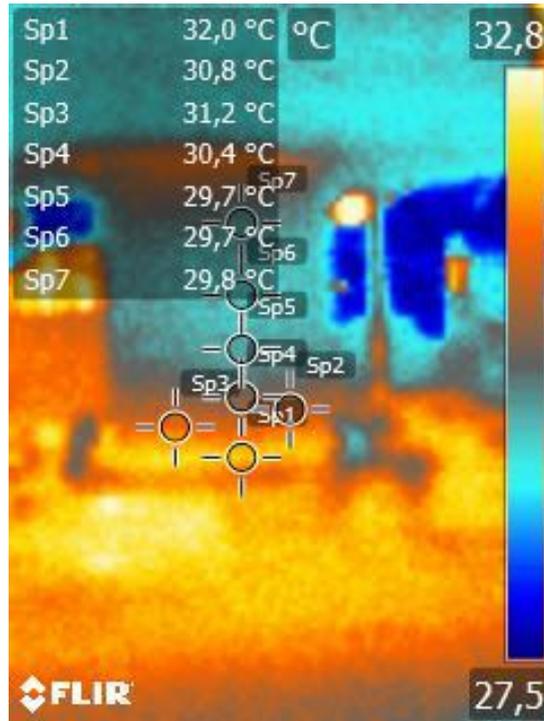
Πίνακας 7: Θερμοκρασίες ψύκτρας (°C) συναρτήσει απόστασης από ψύκτρα και χρόνο.

Σημείο	Frame 1	Frame 1000	Frame 2000	Frame 3000	Frame 4000	Frame 5000
sp1	16.007	25.919	26.433	26.237	23.833	22.184
sp2	16.097	24.216	24.539	25.576	23.805	22.096
sp4	16.004	27.126	27.295	26.664	24.266	22.387
sp3	16.191	23.93	24.179	26.14	24.303	22.954
sp5	16.044	20.205	21.639	24.216	24.39	23.581
sp6	16.311	18.217	19.728	20.86	21.931	21.906
sp7	16.084	18.243	19.027	20.501	21.18	21.855

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες δύο ψύκτρες, στη συγκεκριμένη ανεξάρτητα το σημείο στο οποίο πραγματοποιείται η θερμομέτρηση, η θερμοκρασία της ψύκτρας αυξάνεται για τα 3000 πρώτα frames ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται. Αυτό υποδηλώνει μια καλύτερη θερμική συμπεριφορά καθώς η μεταφορά θερμότητας είναι ομοιόμορφη κατά το πάχος της ψύκτρας.

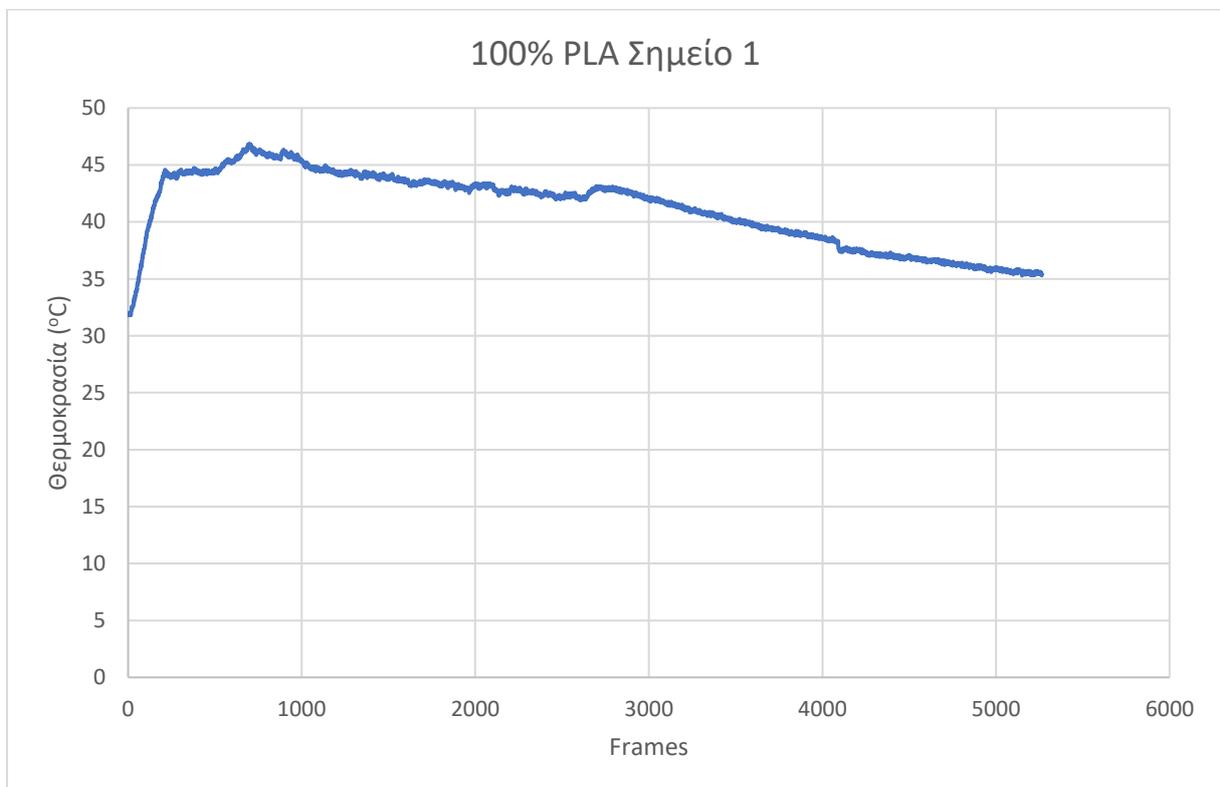
7.3.4 100% PLA

Μετά τις ψύκτρες οι οποίες εκτυπώθηκαν με CarbonFil, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και με ψύκτρα η οποία εκτυπώθηκε με PLA ούτως ώστε να διαπιστωθεί εάν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ των σημείων και ποια είναι καταλληλότερη για ψύξη επεξεργαστή υπολογιστή. Η απεικόνιση της ψύκτρας με τη θερμοκάμερα είναι η παρακάτω:

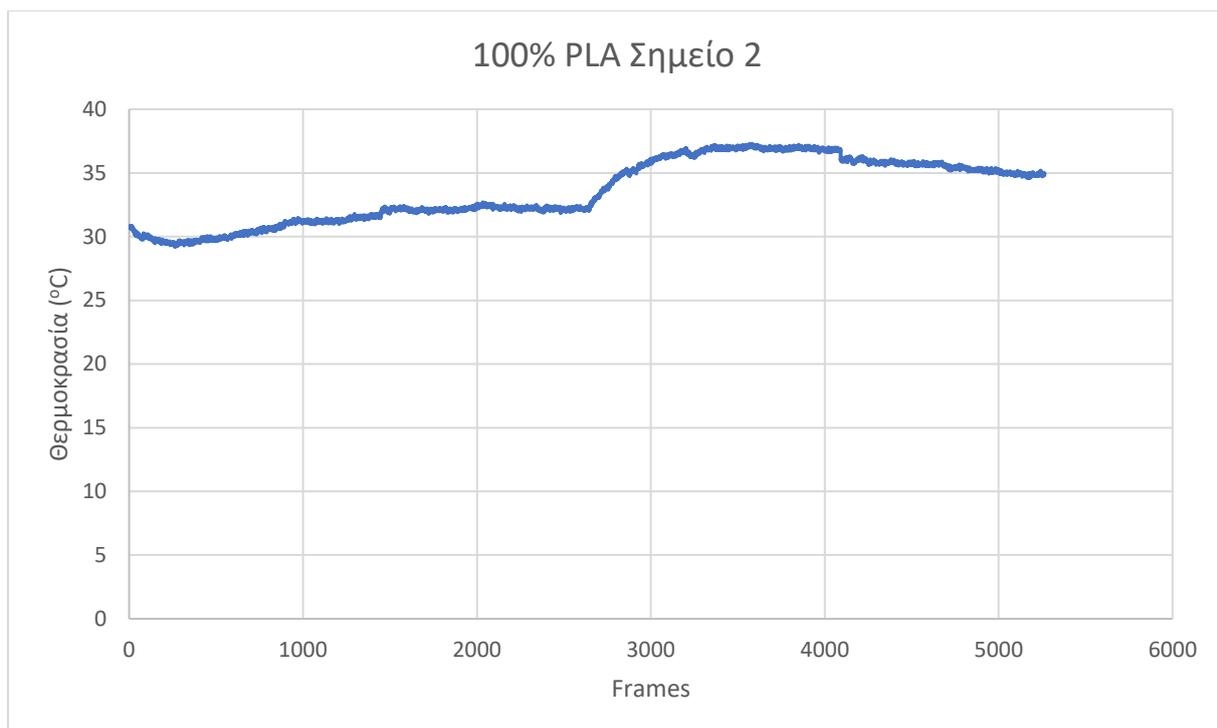


Σχήμα 35: Απεικόνιση της ψύκτρας PLA μέσω θερμοκάμερας.

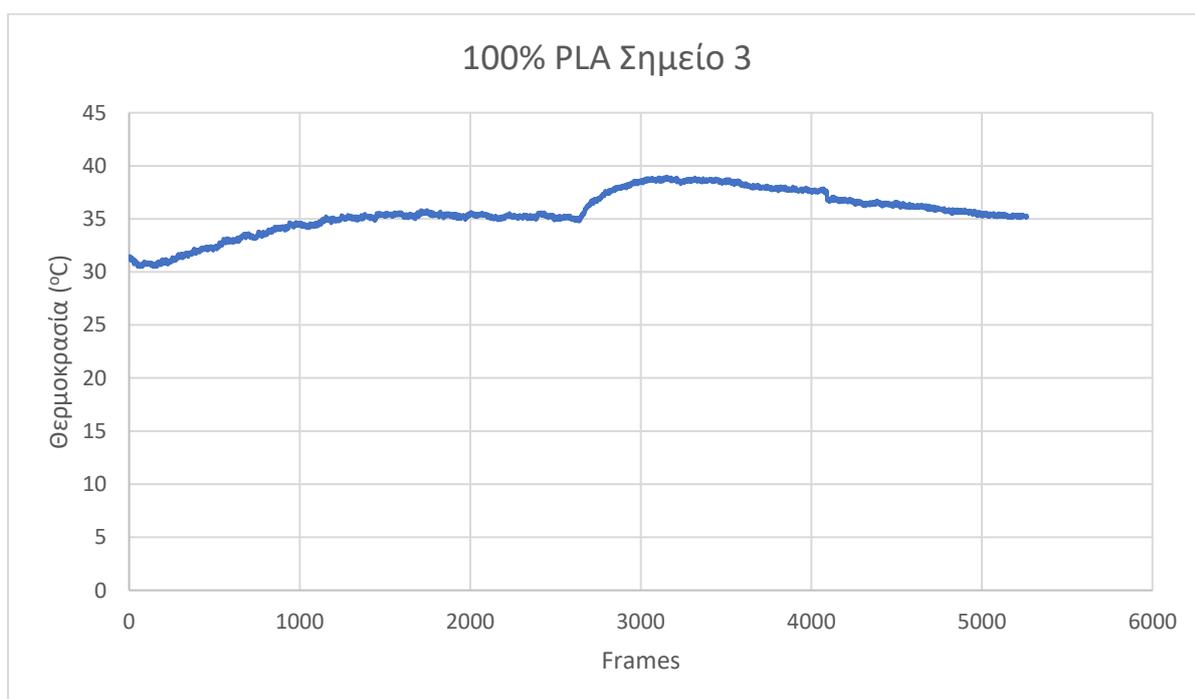
Όπως ακριβώς και στις προηγούμενες ψύκτρες, έτσι και στην ψύκτρα PLA, πάρθηκαν οι θερμοκρασίες σε επτά διαφορετικά σημεία ούτως ώστε να διαπιστωθεί η διαφορά στη μεταβολή των θερμοκρασιών στα διάφορα αυτά σημεία.



Διάγραμμα 24: Θερμοκρασίες στο σημείο sp1

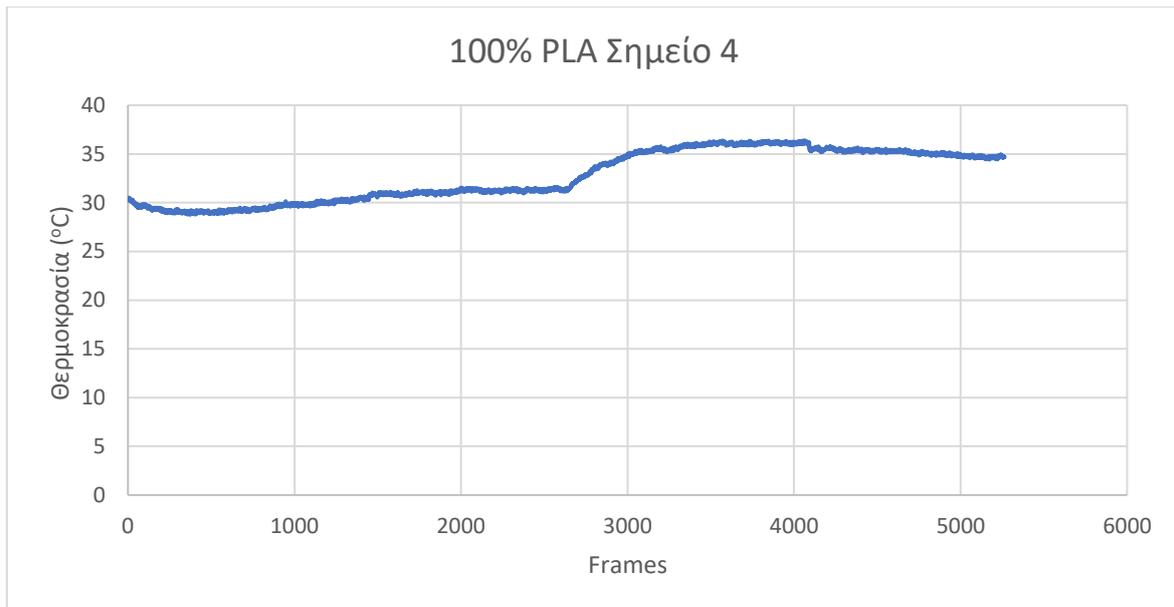


Διάγραμμα 25: Θερμοκρασίες στο σημείο sp2

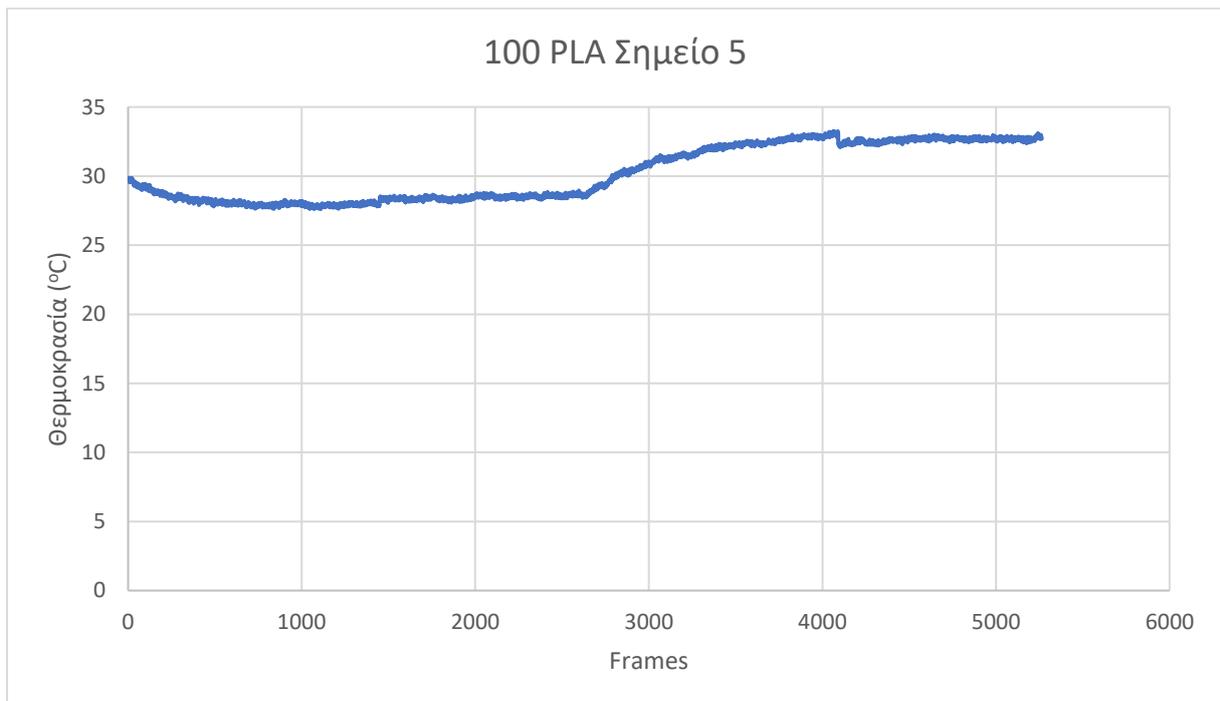


Διάγραμμα 26: Θερμοκρασίες στο σημείο sp3

Στα τρία πρώτα σημεία φαίνεται διαφορά στη μεταβολή των θερμοκρασιών. Αντίθετα με τις ψύκτρες από CarbonFil στη συγκεκριμένη ψύκτρα τα 3 πρώτα σημεία έχουν αισθητή διαφορά στη μεταβολή των θερμοκρασιών τους. Στο σημείο 1 η μεταβολή είναι παρόμοια, ωστόσο στα δύο επόμενα σημεία, παρότι είναι κοντινά μεταξύ τους, η μεταβολή είναι πολύ μικρότερη.

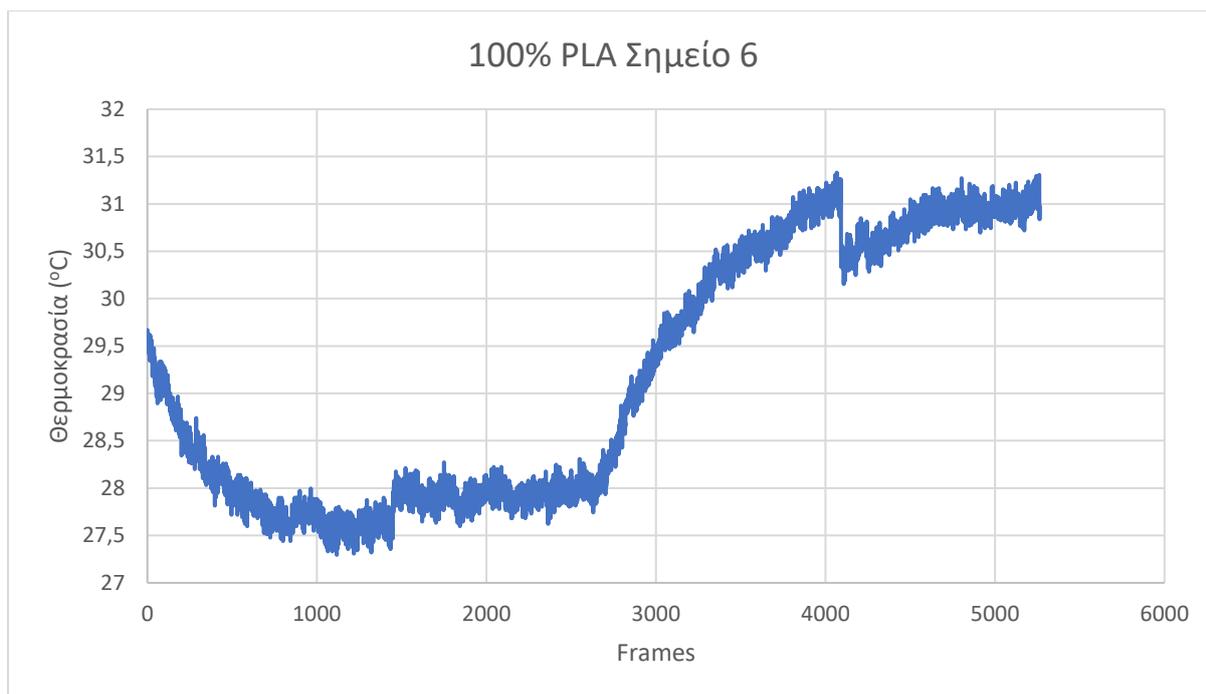


Διάγραμμα 27: Θερμοκρασίες στο σημείο sp4

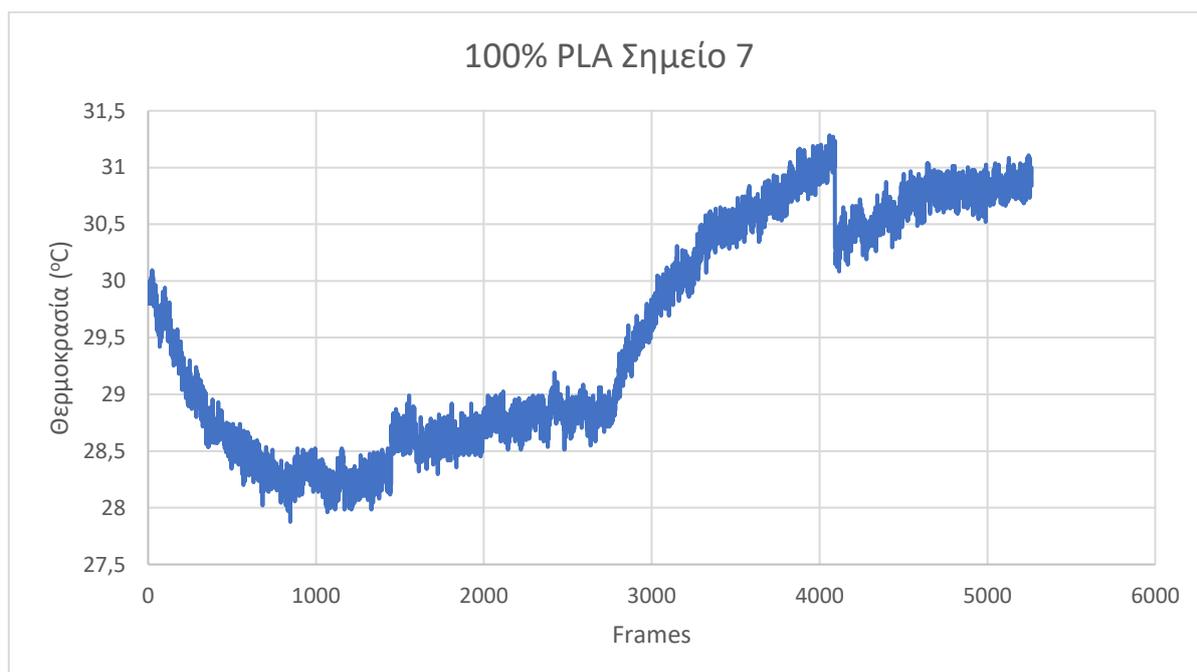


Διάγραμμα 28: Θερμοκρασίες στο σημείο sp5

Στα σημεία 4 και 5, η μεταβολή αρχίζει να γίνεται ακόμα μικρότερη, ενώ παρατηρείται ξανά μία μείωση της θερμοκρασίας στο σημείο 5 κυρίως, όπως ακριβώς στα τελευταία σημεία της 50% infill ψύκτρας.



Διάγραμμα 29: Θερμοκρασίες στο σημείο sp6



Διάγραμμα 30: Θερμοκρασίες στο σημείο sp7

Στα δύο τελευταία σημεία η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι ελάχιστη, ενώ πάλι παρατηρείται και μείωση της θερμοκρασίας. Μάλιστα η διαφορά μεταξύ της αρχικής θερμοκρασίας με την ελάχιστη θερμοκρασία φαίνεται μεγαλύτερη από ότι η διαφορά της αρχικής θερμοκρασίας με τη μέγιστη θερμοκρασία των δύο αυτών σημείων.

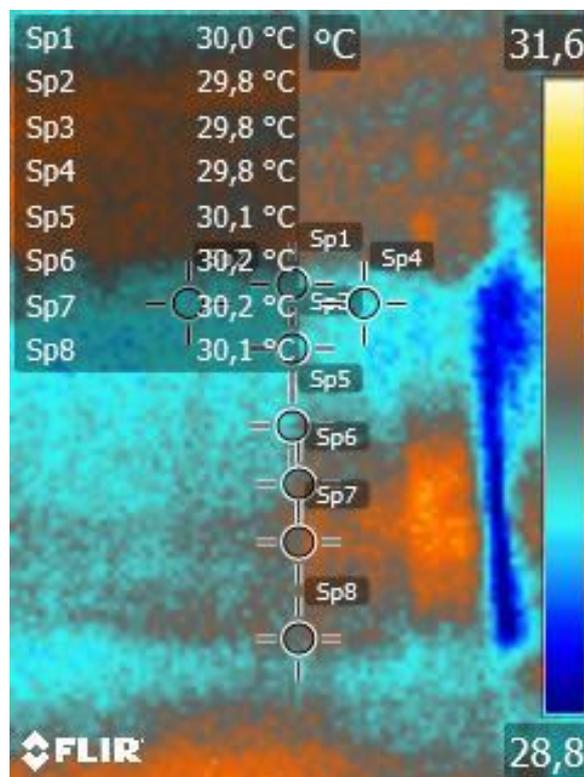
Πίνακας 8: Θερμοκρασίες ψύκτρας (°C) συναρτήσει απόστασης από ψύκτρα και χρόνο.

Σημείο	Frame 1	Frame 1000	Frame 2000	Frame 3000	Frame 4000	Frame 5000
sp1	32.008	45.47	43.324	41.996	38.572	35.881
sp2	30.756	31.214	32.38	35.802	36.77	35.146
sp3	31.214	34.486	35.372	38.649	37.574	35.361
sp4	30.379	29.847	31.342	34.805	36.152	34.839
sp5	29.681	27.839	28.428	30.944	32.82	32.716
sp6	29.669	27.863	28.104	29.396	30.944	30.862
sp7	29.73	28.2	28.962	29.704	30.991	30.779

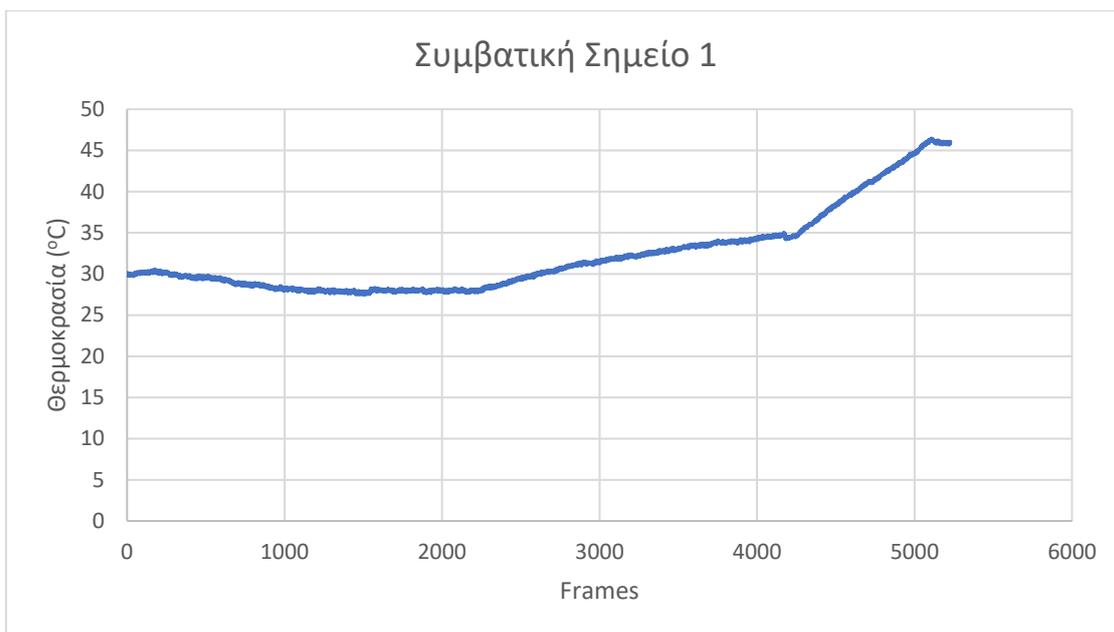
Στην 100% PLA ψύκτρα, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας έως τα 3000 frames στα σημεία που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τον επεξεργαστή (sp1-sp3), ενώ στα επόμενα frames μειώνεται. Στα σημεία που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον επεξεργαστή (sp5-sp8), η θερμοκρασία αρχικά μειώνεται έως τα 3000 frames, ενώ μετά αυξάνεται ελαφρώς. Στη συγκεκριμένη ψύκτρα, η θερμοκρασία μειώνεται έως τα 3000 frames όσο μακρύτερα από τον επεξεργαστή γίνονται οι μετρήσεις. Τέλος για τα σημεία sp6-sp7, τα πιο απομακρυσμένα από τον επεξεργαστή, κατά τη θερμομέτρηση δεν παρατηρείται καμία μεταβολή της θερμοκρασίας υποδηλώνοντας πως η θερμότητα δεν έχει μεταφερθεί προς αυτά τα σημεία.

7.3.5 Συμβατική Ψύκτρα

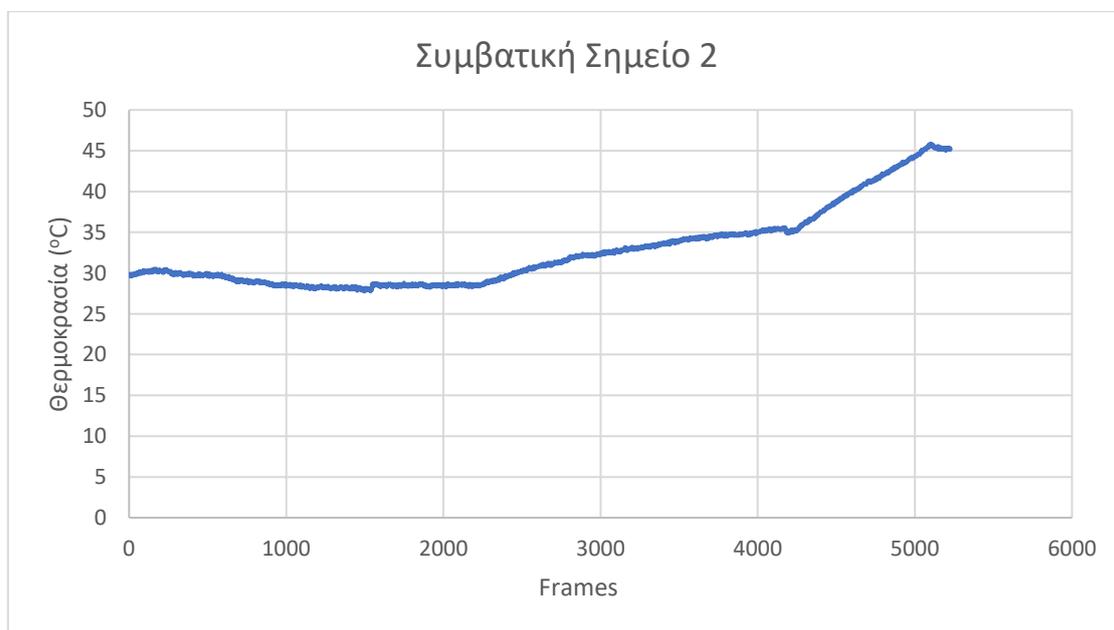
Για να γίνει δυνατή η καλύτερη σύγκριση, κατανόηση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων που έδωσαν οι μετρήσεις με θερμοκάμερα στις εκτυπωμένες ψύκτρες, έγιναν μετρήσεις με θερμοκάμερα σε μία συμβατική ψύκτρα και συγκρίθηκαν με τις υπόλοιπες. Τα αποτελέσματα τα οποία πάρθηκαν, είναι τα εξής:



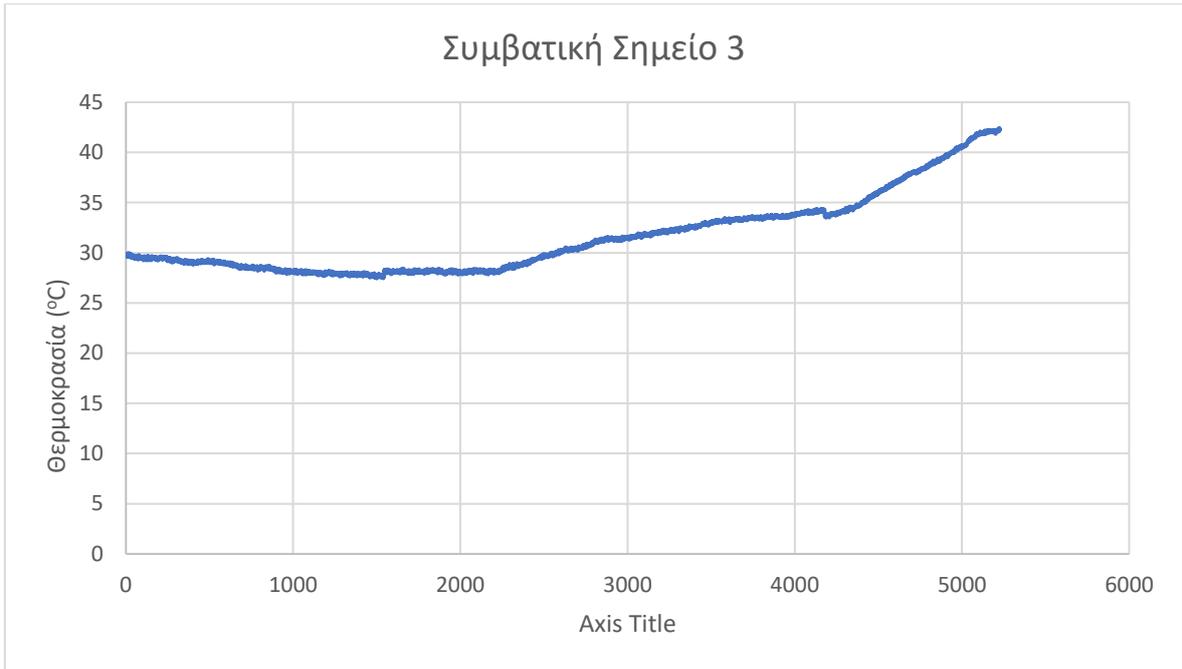
Σχήμα 36: Μέτρηση της συμβατικής ψύκτρας με θερμοκάμερα.



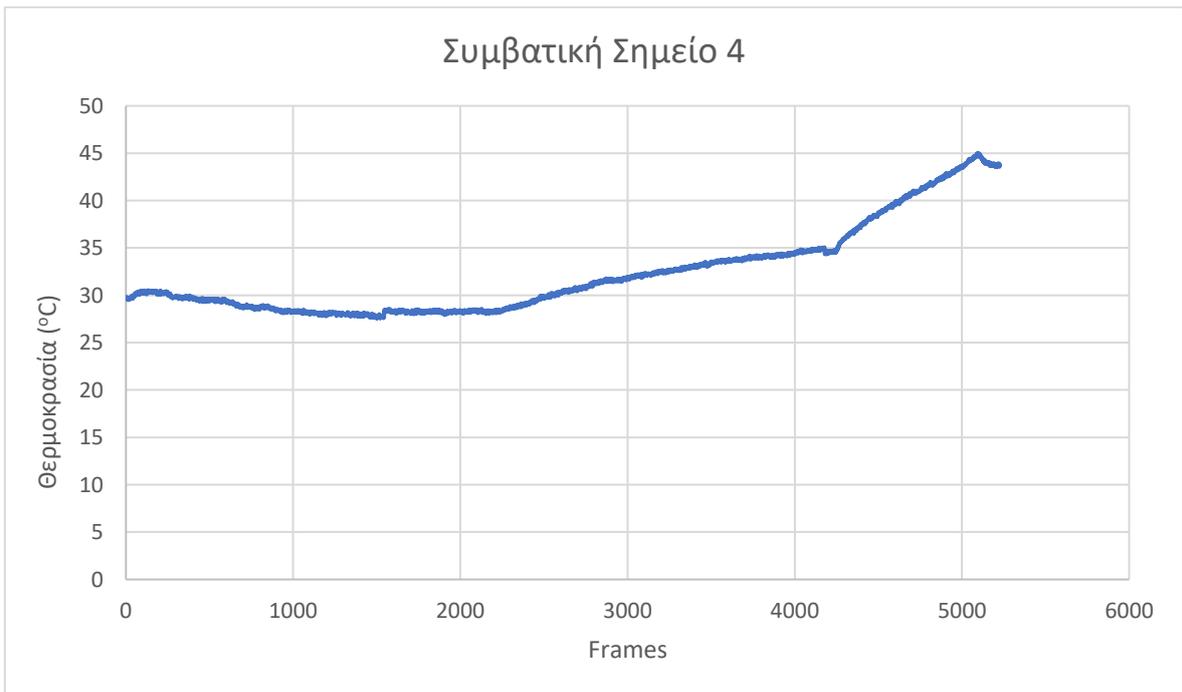
Διάγραμμα 31: Θερμοκρασίες στο σημείο sp1



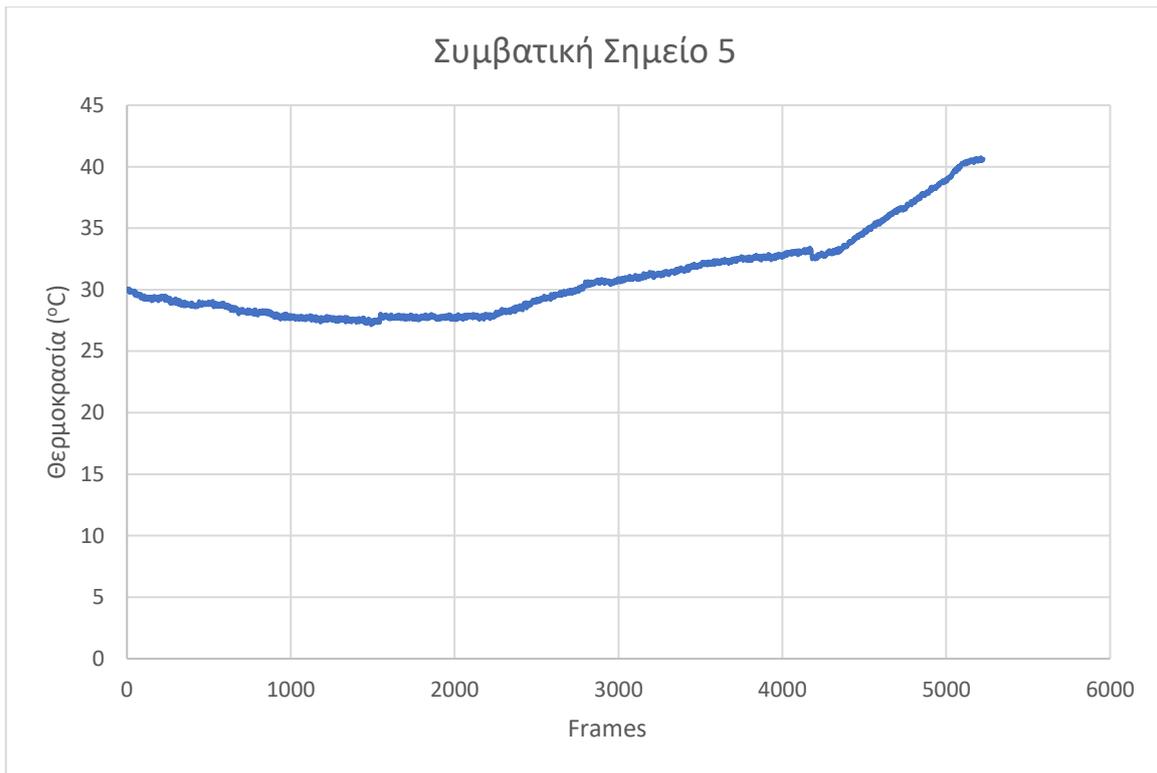
Διάγραμμα 32: Θερμοκρασίες στο σημείο sp2



Διάγραμμα 33: Θερμοκρασίες στο σημείο sp3

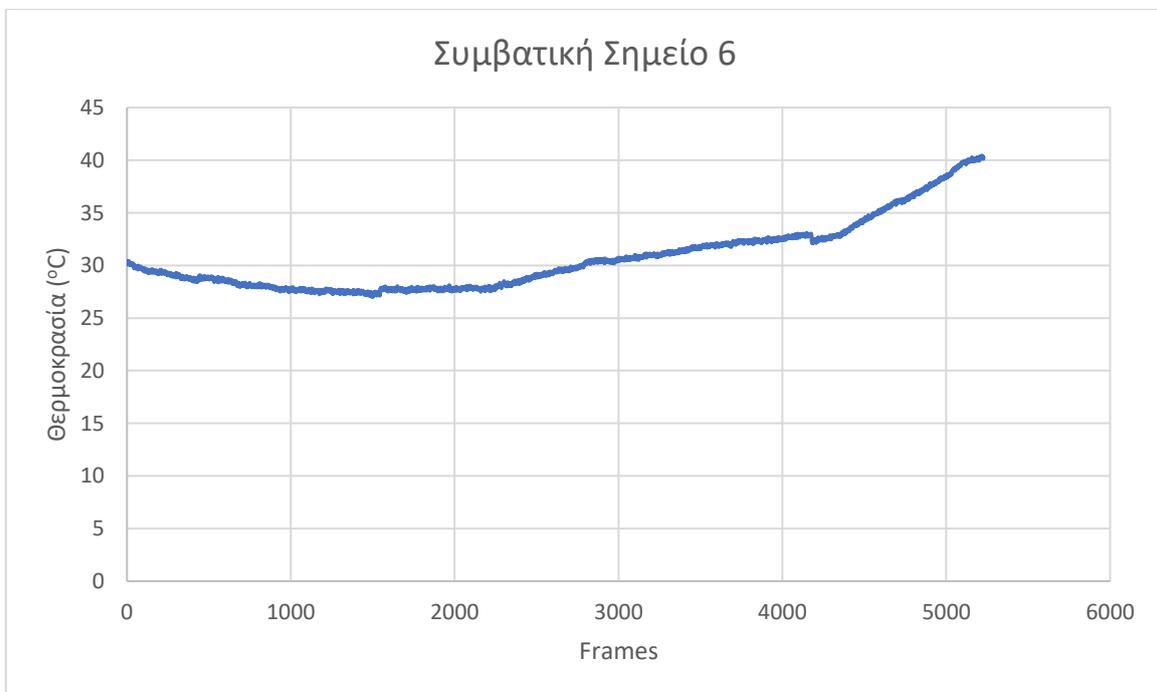


Διάγραμμα 34: Θερμοκρασίες στο σημείο sp4

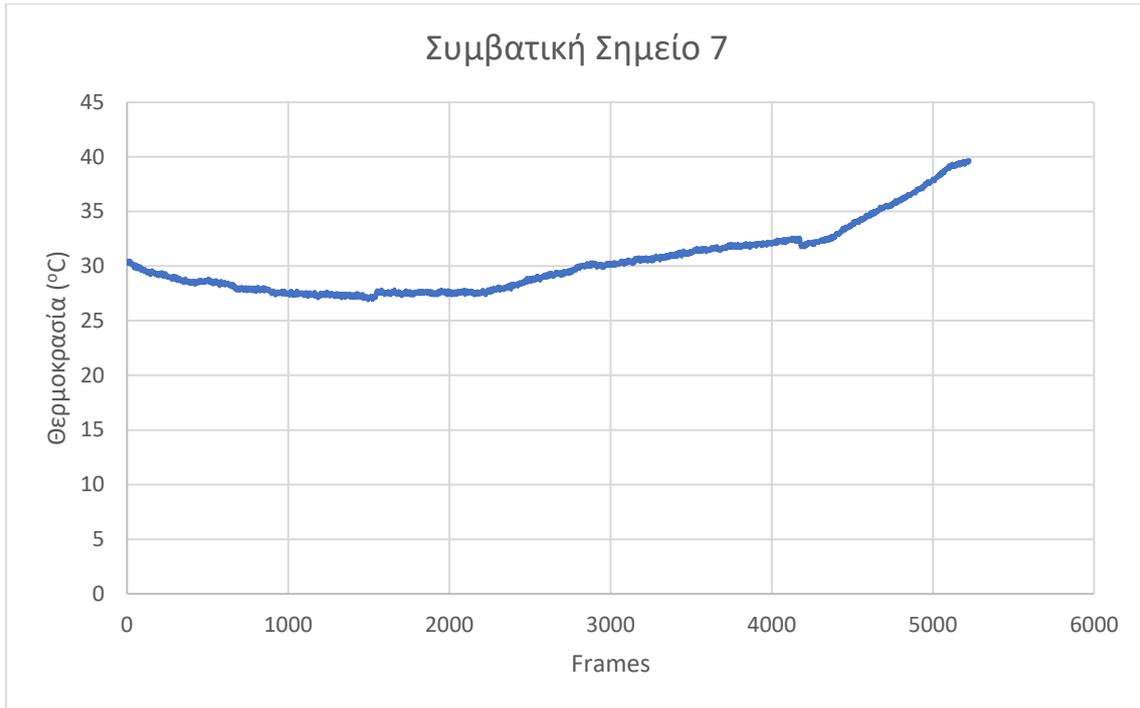


Διάγραμμα 35: Θερμοκρασίες στο σημείο sp5

Στο συγκεκριμένο σημείο, στις υπόλοιπες ψύκτρες παρατηρήθηκε αρκετή απόσταση στις θερμοκρασίες σε σχέση με τα προηγούμενα σημεία. Στη συμβατική ψύκτρα ωστόσο, δεν παρατηρείται καμία απόκλιση.

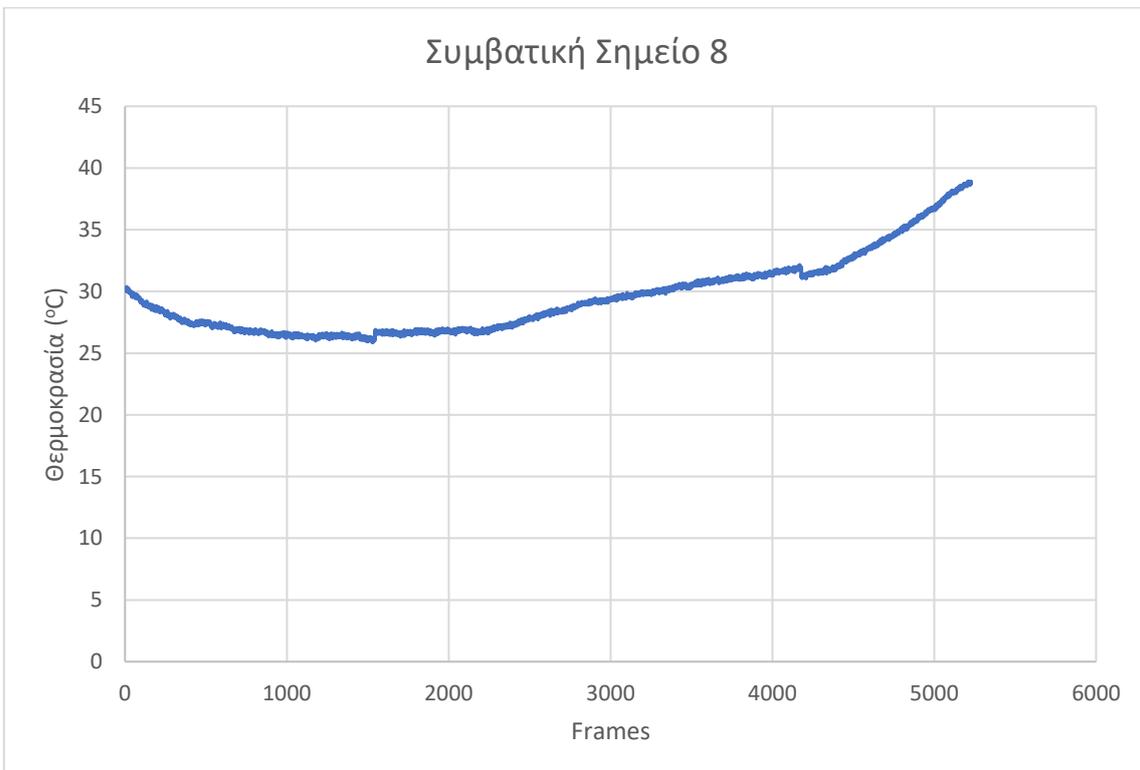


Διάγραμμα 36: Θερμοκρασίες στο σημείο sp6



Διάγραμμα 37: Θερμοκρασίες στο σημείο sp7

Μέχρι και αυτό το σημείο, η μέγιστη θερμοκρασία είναι παρόμοια με τα προηγούμενα σημεία.



Διάγραμμα 38: Θερμοκρασίες στο σημείο sp8

Το συγκεκριμένο σημείο, είναι το μοναδικό σημείο στο οποίο γίνεται αισθητή η διαφορά στη μέγιστη θερμοκρασία.

7.4 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τη μέτρηση θερμοκρασιών σε κάθε ψύκτρα μπορούν να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις.

Αρχικά, συγκρίνοντας τα διαγράμματα ανάμεσα στην 30% και 50% infill ψύκτρα, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά. Αρχικά, παρατηρείται ότι κοντά στον επεξεργαστή (sp1-sp3) η θερμοκρασία αυξάνεται έως τα 3000 frames ενώ έπειτα μειώνεται. Αντίθετα στα σημεία μακρύτερα από τον επεξεργαστή (sp5-sp8), παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας έως τα 3000 frames, ενώ έπειτα αύξηση. Παράλληλα, όσο τα σημεία απομακρύνονται από τον επεξεργαστή ο οποίος αποτελεί την πηγή θερμότητας, η θερμοκρασία που μετράται μειώνεται έως τα 3000 frames. Κοντά στα 4000 frames η θερμοκρασία αρχίζει να σταθεροποιείται στην ίδια τιμή για όλα τα σημεία της ψύκτρας, δηλαδή καθ' όλο τον όγκο της. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ικανοποιητική μεταφορά θερμότητας ούτως ώστε να ψυχθεί ο επεξεργαστής στο επιθυμητό σημείο.

Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τις 30% και 50% CarbonFil με το 100% CarbonFil, παρατηρούνται αισθητές διαφορές σε αντίθεση με τις προηγούμενες. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες δύο ψύκτρες, ανεξάρτητα το σημείο στο οποίο πραγματοποιείται η θερμομέτρηση, η θερμοκρασία της ψύκτρας αυξάνεται για τα 3000 πρώτα frames ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται. Αυτό υποδηλώνει μια καλύτερη θερμική συμπεριφορά καθώς η μεταφορά θερμότητας είναι ομοιόμορφη κατά το πάχος της ψύκτρας.

Συγκρίνοντας την ψύκτρα με PLA με ψύκτρα αποτελούμενη από CarbonFil παρατηρείται αρκετά μεγάλη διαφορά. Η ψύκτρα PLA, παρουσιάζει αρκετά μικρές διαφορές θερμοκρασιών σε σχέση με τις ψύκτρες CarbonFil μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε κάθε σημείο. Από το 4^ο κιάλας σημείο η διαφορά θερμοκρασιών δεν φτάνει ούτε τους 10 βαθμούς Κελσίου. Κυριότερα και πιο συγκεκριμένα στα δύο μακρύτερα από τον επεξεργαστή σημεία, η διαφορά θερμοκρασιών είναι 4°C και 3°C αντίστοιχα, τιμές οι οποίες είναι πολύ μικρές για να θεωρηθεί ότι επηρεάζονται από τη θερμότητα του επεξεργαστή. Αυτό καθιστά την ψύκτρα η οποία εκτυπώθηκε με PLA τη χειρότερη από τις ψύκτρες στις οποίες διεξήχθησαν πειράματα. Η καλύτερη συμπεριφορά της ψύκτρας αποτελούμενης από CarbonFil σε σύγκριση με αυτή από PLA μπορεί να αποδοθεί στην θερμική αγωγιμότητα που προσφέρουν στο υλικό οι ίνες άνθρακα.

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Σκοπός της εργασίας ήταν να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες παραγωγής ψύκτρας επεξεργαστή ηλεκτρονικού υπολογιστή μέσω τριδιάστατης εκτύπωσης με την μέθοδο Fused Deposition Modeling και να μελετηθεί η αποτελεσματικότητά τους στην ψύξη επεξεργαστή που βρίσκεται σε λειτουργία.

Επιπροσθέτως, θα γινόταν σύγκριση μεταξύ των εκτυπωμένων από CarbonFil, PLA και συμβατική ψύκτρα, με στόχο την εύρεση δεδομένων για την καλύτερη ψύξη του επεξεργαστή.

8.1 Συμπεράσματα για την εκτύπωση ψυκτρών

- Οι βέλτιστες παράμετροι για την εκτύπωση ψύκτρας από πολυμερικό νήμα ενισχυμένο με ίνες άνθρακα παρουσιάζονται παρακάτω. Το εκτυπωμένο υλικό εμφάνισε ομοιομορφία στο σύνολο του όγκου του, η εξώθησή του κατά την εκτύπωση πραγματοποιήθηκε χωρίς δυσκολία και δεν εμφάνισε αστοχίες.

Printing Speed 4800mm/min,

Temperature 220°C και

Raft 2

- Το ποσοστό πλήρωσης κατά την εκτύπωση (infill) δεν επηρεάζει τις παραμέτρους εκτύπωσης, παρά μόνο το χρόνο εκτύπωσης.
- Μεγαλύτερα ποσοστά πλήρωσης απαιτούν περισσότερο χρόνο εκτύπωσης (30% infill 50 λεπτά εκτύπωση, 50% infill 65 λεπτά εκτύπωση, 100% infill 80 λεπτά εκτύπωσης).
- Το Fused Deposition Modelling αποτελεί μια κατάλληλη τεχνική για την εκτύπωση πολυμερικών νημάτων ενισχυμένων με ίνες άνθρακα.
- Τα υλικά που παράγονται από την FDM δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία μετά την εκτύπωση και είναι έτοιμα προς χρήση.

8.2 Συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα ψυκτρών στην ψύξη επεξεργαστή

- Η προσθήκη ινών άνθρακα στα πολυμερικά νήματα εκτύπωσης αυξάνει την θερμική αγωγιμότητα του υλικού.
- Υψηλότερα ποσοστά πλήρωσης επιδρούν θετικά στην μεταφορά θερμότητας διαμέσου της ψύκτρας. Αυτό μπορεί να αποδοθεί με τα παρακάτω:

Η μικρότερη μεταβολή ΔT μεταξύ των ακροτάτων σημείων θερμομέτρησης (sp1 και sp8) εμφανίζεται για την ψύκτρα με το μεγαλύτερο ποσοστό πλήρωσης (Infill 100%). Αυτό υποδηλώνει πως ευνοείται η μεταφορά θερμότητας προς τα εξωτερικά στρώματα της ψύκτρας.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' όλη την διάρκεια της θερμομέτρησης για κάθε σημείο είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ψύκτρας. Είναι επιθυμητή η όσο το δυνατόν μικρότερη μεταβολή ανά σημείο, καθώς έτσι η ψύκτρα έχει την δυνατότητα να μεταφέρει θερμότητα από τον επεξεργαστή προς τα έξω. Συγκεκριμένα για την 100% infill παρατηρείται ένα ΔT κοντά στους 2 βαθμούς ανεξαρτήτου σημείου θερμομέτρησης, ενώ για το 30% φτάνει ακόμα και τους 17 βαθμούς.

- Η 100% στήλη αποτελεί την βέλτιστη επιλογή από τα υλικά τα οποία εκτυπώθηκαν.
- Η 100% PLA έδειξε την πιο αδύναμη συμπεριφορά στην μεταφορά θερμότητας από τον επεξεργαστή.

- Η εκτύπωση ψυκτρών από πολυμερικό νήμα ενισχυμένο με ίνες άνθρακα μπορεί να αποδώσει. Υψηλότερα ποσοστά περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα από αυτό που μελετήθηκε μπορεί να προσδώσει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στην εκτυπωμένη ψύκτρα, παρόλα αυτά θα πρέπει να γίνει ξανά παραμετροποίηση των συνθηκών εκτύπωσης.

8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Εκτύπωση ψυκτρών από πολυμερικό νήμα ενισχυμένο με ίνες άνθρακα σε μεγαλύτερο ποσοστό από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, για να εξεταστεί η επίδρασή τους στην θερμική αγωγιμότητα.
- Μελέτη εκτύπωσης ψυκτρών από πολυμερικά νήματα με διαφορετικά μέσα ενίσχυσης όπως νανοσωλήνες άνθρακα, γραφένιο.

Κεφάλαιο 9. Βιβλιογραφία

1. "Additive manufacturing — General Principles — Overview of process categories and feedstock". ISO/ASTM International Standard (17296–2:2015(E)). 2015.
2. Taufik, Mohammad; Jain, Prashant K. (12 January 2014). "Role of build orientation in layered manufacturing: a review". *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 27 (1/2/3): 47–73.
3. "Most used 3D printing technologies 2017–2018 | Statista". Statista. Retrieved 2018-12-02.
4. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing#/what>
5. <https://www.matterhackers.com/store/printer-kits/pulse-3d-printer>
6. Jacobs, PF. *Rapid Prototyping and Manufacturing, Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers, 1992
7. Franco Concli; Andrea Gilioli, Numerical and experimental assessment of the static behavior of 3D printed reticular Al structures produced by Selective Laser Melting: progressive damage and failure, 2018
8. Fausto Bernardini; Holly Rushmeier, *The 3D Model Acquisition Pipeline*, 2002
9. Anne E. McMills, *3D Printing Basics for Entertainment Design*, 2013
10. Delfs, P.; Tows, M.; Schmid, H.-J. , *Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time*, 2016
11. Haselhuhn, Amberlee S.; Gooding, Eli J.; Glover, Alexandra G.; Anzalone, Gerald C.; Wijnen, Bas; Sanders, Paul G.; Pearce, Joshua M., *Substrate Release Mechanisms for Gas Metal Arc Weld 3D Aluminum Metal Printing*, 2014
12. Hideo Kodama, *Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer*, 1981
13. Jean-Claude Andre, *From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing 1: From Concepts to Achievements*, 2014
14. Lind M.; Freedman P., *The impact of 3D printing on trade and FDI*, 2012
15. Mtaho, Adam; Ishengoma, Fredrick, *3D Printing: Developing Countries Perspectives*, 2014
16. Beau Jackson, *Addihive's Powderloop: The Missing Link In Additive Manufacturing Powder Management*, 2018
17. Robarts, Stu (17 September 2014). ""World's first" 3D printed car created and driven by Local Motors". 22 September 2014.
18. Αλέξανδρος Γεώργιος Μουντογιαννάκης, Αχιλλέας Μόσχος, *3D Εκτύπωση: Λειτουργία, Εφαρμογές και Ανησυχίες*, Ιανουάριος 2015
19. <https://www.livescience.com/39885-3d-printing-to-deliver-organs.html>
20. <https://www.theguardian.com/science/2014/jul/04/3d-printed-organs-step-closer>
21. Wohlers T., *History of additive manufacturing*, 2012
22. Woern, Aubrey; Byard, Dennis; Oakley, Robert; Fiedler, Matthew; Snabes, Samantha; Pearce, Joshua, *Fused Particle Fabrication 3-D Printing: Recycled Materials' Optimization and Mechanical Properties*, August 2018

23. Hamzah, Hairul Hisham; Saiful, Arifin Shafiee; Aya, Abdalla; Patel, Bhavik Anil (2018). "3D printable conductive materials for the fabrication of electrochemical sensors: A mini review". *Electrochemistry Communications*. 96: 27–371.
24. Jones, R.; Haufe, P.; Sells, E.; Iravani, P.; Olliver, V.; Palmer, C.; Bowyer, A. (2011). "Reprap-- the replicating rapid prototyper". *Robotica*. 29 (1): 177–191.
25. "Xometry Design Guide: Fused Deposition Modeling"(PDF). Hubspot.net. Xometry. Retrieved December 12, 2018.
26. "The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing". Formlabs. Formlabs, Inc. Retrieved 26 December 2017.
27. Hull, Chuck (2012). "On Stereolithography". *Virtual and Physical Prototyping*. 7 (3): 177.
28. Deckard, C., Method and apparatus for producing parts by selective sintering, September 5, 1989.
29. Housholder, R., Molding Process, January 27, 1981
30. Design Guide: Selective Laser Sintering (SLS), Xometry
31. <https://www.simplify3d.com/blog/>
32. <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
33. Plastic Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Archived May 15, 2010, at the Wayback Machine Small table of ABS properties towards the bottom. Retrieved 7 May 2010
34. Woern, Aubrey L.; Pearce, Joshua M. (2017-10-30). "Distributed Manufacturing of Flexible Products: Technical Feasibility and Economic Viability"
35. Södergård, Anders; Mikael Stolt (2010). "3. Industrial Production of High Molecular Weight Poly(Lactic Acid)". In Rafael Auras; Loong-Tak Lim; Susan E. M. Selke; Hideto Tsuji (eds.). *Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*. pp. 27–41
36. Wypych, George (2012). "PS polystyrene". *Handbook of Polymers*. pp. 541–7
37. Study on Preparation Process and Properties of Polyethylene Terephthalate (PET)". *Applied Mechanics and Materials*. 312: 406–410.
38. Palmer, R. J. 2001. Polyamides, Plastics. *Encyclopedia Of Polymer Science and Technology*
39. Kopeliovich, Dmitri. Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites Archived 14 May 2012 at the Wayback Machine
40. <https://plastics.ulprospector.com/generics/8/acrylonitrile-styrene-acrylate-asa>
41. Volker Serini "Polycarbonates" in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, Weinheim, 2000
42. Kenneth S. Whiteley, T. Geoffrey Heggs, Hartmut Koch, Ralph L. Mawer, Wolfgang Immel (2005). "Polyolefins". *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH.
43. Schnepf, M.J.; Mayer, M.; Kuttner, C.; Tebbe, M.; Wolf, D.; Dulle, M.; Altantzis, T.; Formanek, P.; Förster, S.; Bals, S.; König, T.A.F.; Fery, A. (2017). "Nanorattles with tailored electric field enhancement"
44. Introduction to Smart Technologies, Jan Holnicki-Szulc, Jerzy Motylewski, Przemyslaw Kolakowski, April 2008

45. World Conference on Structural Control and Monitoring, held in Los Angeles (USA), Kyoto (Japan), Como (Italy), San Diego (USA), 4th event in 2006, every 4 years.
46. European Conference on Structural Control, held in Barcelona (Spain), Champs-sur-Marne (France), Vienna (Austria), 3rd event in 2004, every 4 years.
47. International Conference on Noise and Vibration Engineering, held in Katholieke Universiteit Leuven (Belgium), 16th event in 2006, every 2 years.
48. ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, held in Jadwisin (Poland), Lisbon (Portugal), Gdańsk (Poland), 3rd event in 2007, every 2 years.
49. Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures EVACES, held in Bordeaux (France), Porto (Portugal), 2nd event in 2007, every 2 years.
50. M.E. Tuttle, Editor, Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, Marcel Dekker, Inc., New York, USA (2004)
51. Zia, Abdul Wasy; Shah, Atta Ur Rehman; Lee, Seunghun; Song, Jung Il (2015). "Development of diamond-like-carbon coated abaca-reinforced polyester composites for hydrophobic and outdoor structural applications". *Polymer Bulletin*. **72** (11): 2797–2808
52. "The pros and cons of fabric structures | Span Design".
53. Shehzad, Khurram; Xu, Yang; Gao, Chao; Duan, Xiangfeng (2016). "Three-dimensional macro-structures of two-dimensional nanomaterials". *Chemical Society Reviews*. **45** (20): 5541–5588.
54. Kim, Hyoung Seop (September 2000). "On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites". *Materials Science and Engineering: A*. **289** (1–2): 30–33
55. "History of Composite Materials". Mar-Bal Incorporated. 2013-08-19. Archived from the original on 2018-01-04. Retrieved 2018-01-03.
56. M.E. Tuttle, Structural Analysis of Polymeric Composite Materials, Marcel Dekker, Inc., 2004
57. M.C.Y. Niu, Composite Airframe Structures, 2nd ed., Hong Kong Conmilit Press Limited, 2000 3. R.E. Horton and J.E. McCarty, Damage Tolerance of Composites, Engineered Materials Handbook, Vol 1, Composites, ASM International, 1987
58. "GlacialTech announces Igloo FS125S 30W cold forged pin fin heatsink". Eco-Business. Retrieved 2016-01-19.
59. Vaughn, Arlissa. "Overview of Cooling Methods for AC-DC and DC-DC Power Supplies". www.aegispower.com. Retrieved 2017-10-15.
60. "Design Considerations for Thermal Management of Power Supplies" (PDF). www.cui.com. p. 3. Retrieved 2017-10-15.
61. National Semiconductor Voltage Regulator Handbook, National Semiconductor Corp., 1975 chapters 4, 5, 6
62. "Heat sink selection", Mechanical engineering department, San Jose State University [27 January 2010].
63. ""Aluminium Matter Organization UK"".
64. "Copper heatsinks". Cooliance. Archived from the original on 2014-10-11.
65. "Heatsink Design and Selection: Material". ABL Heatsinks.

66. Bisemi C, Rocha LAO, Bejan A. Inverted fins: geometric optimization of the intrusion into a conducting wall. *Int J Heat Mass Transfer* 2004;47:2577–86.
67. Kordyban, T., 1998, Hot air rises and heat sinks – Everything you know about cooling electronics is wrong, ASME Press, NY.
68. Texas Instruments Type 2N3055 N-P-N Single Diffused Mesa Silicon Power Transistor data sheet, Texas Instruments, bulletin number DL-S-719659, August 1967, revised December 1971
69. Sergent, J.; Krum, A. (1998). *Thermal management handbook for electronic assemblies* (First ed.). McGraw-Hill.
70. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 1985, *Introduction to heat transfer*, John Wiley and sons, NY.
71. Forghan, F., Goldthwaite, D., Ulinski, M., Metghalchi, M., 2001, *Experimental and Theoretical Investigation of Thermal Performance of Heat Sinks*, ISME May.
72. Lasance, C.J.M and Eggink, H.J., 2001, *A Method to Rank Heat Sinks in Practice: The Heat Sink Performance Tester*, 21st IEEE SEMI-THERM Symposium.
73. Lorenzini G, Biserni C, Rocha LAO. Geometric optimization of isothermal cavities according to Bejan's theory. *Int J Heat Mass Transfer* 2011;54: 3868–73.
74. Mornhinweg, Manfred. "[Thermal design](#)". ludens.cl.
75. "[Effects of Anodization on Radiational Heat Transfer - heat sinks](#)". www.aavid.com.
76. [Jump up to:](#)^a [b](#) [c](#) [d](#) [e](#) [f](#) [g](#) [h](#) Azar, K, et al., 2008, "[Thermally Conductive Tapes](#)", can-dotape.com, accessed on 3/21/2013
77. Lienard, J. H., IV & V (2004). *A Heat Transfer Textbook* (Third ed.). MIT.
78. Saint-Gobain (2004). "[Thermal management solutions for electronic equipment](#)"(PDF). Archived from [the original](#) (PDF) on 18 October 2006. Retrieved 22 July 2008.
79. Bider, C. (2009). "[Effect of thermal environment on LED light emission and lifetime](#)". *LED Professional Review* May/June 2009.
80. Kim, Seo Young; Koo, Jae-Mo; Kuznetsov, Andrey V. (2001). "Effect of anisotropy in permeability and effective thermal conductivity on thermal performance of an aluminum foam heat sink". *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*. 40 (1): 21–36.
81. Zemansky M, Dittman R. *Heat and Thermodynamics*. 6th ed. Vol. 1981. McGraw-Hill Book Company. pp. 431-442
82. Zhao D, Tan G. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications
83. Hardwidge, *Handbook of Research on Educational Communications and Technology*, 2006