



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Φορητή Συσκευή Στερεολιθογραφίας

Σέργης Βασίλειος

Επιβλέπων Καθηγητής: Βοσνιάκος Γεώργιος - Χριστόφορος

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Περίληψη

Στη σύγχρονη βιομηχανία, τα προϊόντα προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικά πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται με αντικρουόμενους στόχους, όπως η ελαχιστοποίηση του χρόνου και του κόστους παραγωγής και ταυτόχρονα η αύξηση της ποιότητας και της ευελιξίας των προϊόντων. Η κατεργασία μέσω αριθμητικά ελεγχόμενων εργαλειομηχανών CNC είναι ίσως η κύρια δραστηριότητα στις βιομηχανίες μαζικής παραγωγής, καθώς παρέχουν αύξηση παραγωγικότητας, μείωση του χρόνου παραγωγής και μεγαλύτερη ακρίβεια κατεργασίας. Ωστόσο, πρόσφατες τεχνικές βελτιώσεις στις διαδικασίες παραγωγής μέσω της τεχνολογίας πρόσθεσης υλικού συμβάλλουν στην κατασκευή πραγματικών λειτουργικών τεμαχίων και όχι απλών πρωτοτύπων με σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής.

Οι τεχνολογίες αφαίρεσης και πρόσθεσης υλικού δε πρέπει να θεωρούνται αντίθετες ή ανταγωνιστικές διαδικασίες. Αντιθέτως, αυτές οι δύο τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν. Αυτός ο συνδυασμός ή η μετατροπή μιας μηχανής CNC από αφαίρεσης υλικού σε μηχανή πρόσθεσης υλικού είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί χωρίς τροποποίηση της υπάρχουσας μονάδας ελέγχου της μηχανής CNC, αλλά με την προσθήκη μιας εξωτερικής συσκευής. Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία, έγινε προσπάθεια να συνδυαστεί μια αριθμητικά ελεγχόμενη εργαλειομηχανή με μια φορητή συσκευή στερεολιθογραφίας προκειμένου να επεκταθούν οι δυνατότητές της υπάρχουσας εργαλειομηχανής. Επιπλέον, αυτή η συσκευή SLA έχει σχεδιαστεί να είναι φορητή ώστε να μεταφέρεται εύκολα και να μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε μηχανή CNC. Οι περισσότερες εργαλειομηχανές CNC διαθέτουν θύρα RS232, η οποία επιτυγχάνει την επικοινωνία μεταξύ της μηχανής και της φορητής συσκευής. Για την επικοινωνία, ήταν επίσης απαραίτητες λειτουργίες όπως ο μακροπρογραμματισμός, το MDC, και FNC. Ακόμα, η φορητή συσκευή SLA αποτελείται από δύο κύρια μέρη, το μηχανολογικό και το ηλεκτρολογικό μέρος. Πιο αναλυτικά, η φορητή συσκευή SLA αποτελείται από ένα εργαλείο συγκράτησης λέιζερ, ένα δοχείο ρητίνης, έναν μικροελεγκτή και διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπως αισθητήρες, επενεργητές και διόδους. Ένα ακόμη σημαντικό μέρος της διαδικασίας ήταν η φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη, η οποία καθόρισε το κατάλληλο μήκος κύματος της διόδου λέιζερ.

Επιπλέον, ο προγραμματισμός ήταν ένα σημαντικό μέρος για την υλοποίηση αυτής της εργασίας. Για τον μικροελεγκτή, ο αλγόριθμος και οι βιβλιοθήκες που αναπτύχθηκαν έγιναν σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Όσον αφορά τον G-κώδικα, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Ο πρώτος συνεργάζεται με ένα εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό τεμαχισμού (slicer), προκειμένου να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις του εξαγόμενου G-κώδικα. Ο δεύτερος αλγόριθμος διαβάζει απευθείας ένα αρχείο STL και παράγει τον G-κώδικα. Κάθε ένας χρησιμοποιείται για διαφορετικές διαδικασίες εκτύπωσης και διαφορετικά σχήματα της δέσμης λέιζερ. Τέλος, ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας φορητής συσκευής στερεολιθογραφίας χαμηλού κόστους με επαναληψιμότητα και ακρίβεια σε κάθε εκτύπωση.

Λέξεις-κλειδιά:

Τεχνολογία Πρόσθεσης Υλικού, Στερεολιθογραφία, CNC, G-Κώδικας, Arduino, C++, MATLAB, Μακροεντολές, Φωτοπολυμερή

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	2
Κατάλογος Σχημάτων	4
Κατάλογος Πινάκων	5
Ονοματολογία	5
Σκοπός Εργασίας	6
1. Φορητή Συσκευή Στερεολιθογραφίας	7
1.1. Τρόπος Λειτουργίας	7
1.1.1. Βήματα Υλοποίησης Εκτύπωσης	7
1.1.2. Κέντρο Κατεργασίας Φρέζας Haas.....	9
1.1.3. Φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη	10
1.2. Ηλεκτρολογικό Μέρος	11
1.2.1. Τροφοδοσία.....	11
1.2.2. Μικροελεγκτής.....	12
1.2.3. Δίοδος Λείζερ	13
1.2.4. Περισταλτική Αντλία	15
1.2.1. Σερβοκινητήρας	16
1.2.2. Θερμαντικό Στοιχείο Σιλικόνης.....	17
1.2.3. RS232.....	18
1.2.4. Αισθητήρες	19
1.2.5. Συνδεσμολογία.....	21
1.2.6. Υποσυστήματα.....	22
1.3. Μηχανολογικό μέρος	23
1.3.1. Εργαλείο Συγκράτησης Λείζερ.....	23
1.3.2. Δοχείο	28
1.4. Αλγόριθμοι.....	29
1.4.1. Προγραμματισμός Μικροελεγκτή	29
1.4.2. Αλγόριθμοι Matlab	32
2. Αποτελέσματα.....	36
2.1. Χρησιμοποιώντας τη δίοδο λείζερ 20mW	36
2.1.1. Χωρίς τον αισθητήρα απόστασης.....	37
2.1.2. Με τον αισθητήρα απόστασης.....	39
2.2. Χρησιμοποιώντας τη δίοδο λείζερ 100mW	40
3. Συμπεράσματα	43
Βιβλιογραφία	45

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1.1 Βήματα υλοποίησης τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	7
Σχήμα 1.1.2 CNC Εργαλειομηχανή φρέζας Haas TM1.....	9
Σχήμα 1.1.3 Φάσμα απορρόφησης FTD.....	10
Σχήμα 1.1.4 Ρητίνη FTD.....	10
Σχήμα 1.2.1 Τροφοδοτικό 12V DC, 20A	11
Σχήμα 1.2.2 LM2596 step-down	11
Σχήμα 1.2.3 Μικροελεγκτής Arduino.....	12
Σχήμα 1.2.4 Λογισμικό Arduino (IDE)	12
Σχήμα 1.2.5 Μονάδα λέιζερ.....	13
Σχήμα 1.2.6 Δίοδος λέιζερ	13
Σχήμα 1.2.7 Οδηγός λέιζερ διόδου	14
Σχήμα 1.2.8 Συγκεντρωτικός φακός	14
Σχήμα 1.2.9 Ακρυλικοί φακοί.....	14
Σχήμα 1.2.10 N-MOSFET IRF520N	14
Σχήμα 1.2.11 Περισταλτική αντλία	15
Σχήμα 1.2.12 EasyDriver A3967	15
Σχήμα 1.2.13 Σερβοκινητήρας SG90.....	16
Σχήμα 1.2.14 Τρανζίστορ BD140 PNP	16
Σχήμα 1.2.15 Θερμαντικό στοιχείο σιλικόνης 12V.....	17
Σχήμα 1.2.16 Ρελέ.....	17
Σχήμα 1.2.17 RS232 to TTL.....	18
Σχήμα 1.2.18 Ρυθμίσεις RS-232	18
Σχήμα 1.2.19 Θερμίστορ 3950 NTC.....	19
Σχήμα 1.2.20 Αισθητήρας TCRT5000	20
Σχήμα 1.2.21 Αισθητήρας Hall A3144E	20
Σχήμα 1.2.22 Συνδεσμολογία	21
Σχήμα 1.2.23 Υποσυστήματα	22
Σχήμα 1.3.1 Εργαλείο συγκράτησης λέιζερ.....	23
Σχήμα 1.3.2 Ανάπτυγμα εργαλείου συγκράτησης λέιζερ	24
Σχήμα 1.3.3 Σχέδιο θήκης “σώμα”	24
Σχήμα 1.3.4 Σχέδιο θήκης “κεφαλή”	25
Σχήμα 1.3.5 Θέσεις σχημάτων δέσμης “σταυρός”, “τελεία”, “γραμμή”.....	25
Σχήμα 1.3.6 Απόκλιση δέσμης λέιζερ	26
Σχήμα 1.3.7 Στένωση Δέσμης.....	26
Σχήμα 1.3.8 Σχέδιο βάσης ακρυλικών φακών	27
Σχήμα 1.3.9 Σχέδιο γρاناζιών μηχανισμού τροποποίησης δέσμης.....	27
Σχήμα 1.3.10 Σχέδιο δοχείου	28
Σχήμα 1.4.1 Λογική αλγορίθμου μικροελεγκτή	31
Σχήμα 1.4.2 Μονοπάτι σάρωσης 1 ^{ης} στρώσης.....	34
Σχήμα 1.4.3 Μονοπάτι σάρωσης 2 ^{ης} στρώσης.....	35

Σχήμα 2.1.1 Κατασκευασμένα αντικείμενα με τη δίοδο λέιζερ 20mW	36
Σχήμα 2.1.2 Ανάλυση απόκλισης κυλίνδρου	37
Σχήμα 2.1.3 Ανάλυση απόκλισης κύβου	37
Σχήμα 2.1.4 Ανάλυση απόκλισης πτερωτής.....	38
Σχήμα 2.1.5 Ανάλυση απόκλισης κύβου με οπές.....	38
Σχήμα 2.1.6 Ανάλυση απόκλισης γκραναζιού.....	39
Σχήμα 2.1.7 Ανάλυση απόκλισης δαχτυλιδιού.....	39
Σχήμα 2.1.8 Ανάλυση απόκλισης κύβου με οπή.....	40
Σχήμα 2.2.1 Κατασκευασμένα αντικείμενα με τη δίοδο λέιζερ 100mW	40
Σχήμα 2.1.9 Ανάλυση απόκλισης στο ορθ. παραλλ.	41
Σχήμα 2.1.10 Ανάλυση απόκλισης στο καπάκι με σπείρωμα	41
Σχήμα 2.1.11 Ανάλυση απόκλισης δαχτυλιδιού (II).....	42

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά Haas TM1	9
Πίνακας 1.2 Χαρακτηριστικά Sony SLD3235VF	13
Πίνακας 2.1.1 Παράμετροι εκτύπωσης κύβου, κυλίνδρου.....	37
Πίνακας 2.1.2 Παράμετροι εκτύπωσης πτερωτής	38
Πίνακας 2.1.3 Παράμετροι εκτύπωσης κύβου με οπές	38
Πίνακας 2.1.4 Παράμετροι εκτύπωσης γκραναζιού	39
Πίνακας 2.1.5 Παράμετροι εκτύπωσης δαχτυλιδιού	39
Πίνακας 2.1.6 Παράμετροι εκτύπωσης κύβου με οπή.....	40
Πίνακας 2.1.7 Παράμετροι εκτύπωσης ορθ. παραλλ.....	41
Πίνακας 2.1.8 Παράμετροι εκτύπωσης για το καπάκι με σπείρωμα	41
Πίνακας 2.1.9 Παράμετροι εκτύπωσης δαχτυλιδιού (II).....	42
Πίνακας 3.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων	43

Ονοματολογία

AM	Additive Manufacturing
SLA	Stereolithography
CAD	Computer-aided Design
CNC	Computer Numerical Control
MDC	Machine Data Collection
HSM	High Speed Machining
FNC	File Numeric Control
IDE	Integrated Development Environment
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
TTL	Transistor-Transistor Logic
IR	Infrared

Σκοπός Εργασίας

Η μεταπτυχιακή εργασία αποσκοπούσε στην επέκταση των δυνατοτήτων μιας αριθμητικά ελεγχόμενης εργαλειομηχανής και μετατροπή της από τεχνολογία αφαίρεσης υλικού σε πρόσθεσης υλικού. Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως μια φορητή συσκευή στερεολιθογραφίας ή ακόμα και ως ένα υβριδικό σύστημα. Επιπλέον, αυτή η συσκευή SLA σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για να είναι φορητή ώστε να μεταφέρεται εύκολα και να τοποθετείται σε οποιαδήποτε μηχανή CNC. Είναι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο, αυτόνομο σύστημα, όπου οι βασικές ιδιότητες του είναι η υψηλή ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και το συνολικό χαμηλό κόστος.

1. Φορητή Συσκευή Στερεολιθογραφίας

1.1. Τρόπος Λειτουργίας

1.1.1. Βήματα Υλοποίησης Εκτύπωσης

Η μετάβαση από το εικονικό τρισδιάστατο μοντέλο CAD στο πραγματικό αντικείμενο, που προκύπτει από μια συσκευή πρόσθεσης υλικού (AM) ή τρισδιάστατης εκτύπωσης, περιλαμβάνει διάφορα βήματα. Το κάθε αντικείμενο απαιτεί ξεχωριστή προσοχή, με χρήση διαφορετικών παραμέτρων εκτύπωσης και εν γένει διαφορετική στρατηγική εκτύπωσης.[2] Όπως στα περισσότερα συστήματα AM, η διαδικασία που ακολουθείται για το σύστημα της φορητής συσκευής SLA περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:



Σχήμα 1.1.1 Βήματα υλοποίησης τρισδιάστατης εκτύπωσης (Deloitte University Press)

Σχεδιασμός Τρισδιάστατου Μοντέλου CAD

Ως πρώτο βήμα, γίνεται ο σχεδιασμός ενός 3D μοντέλου που περιγράφει επαρκώς την εξωτερική γεωμετρία του επιθυμητού αντικειμένου. Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα λογισμικά CAD που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά το αποτέλεσμα πρέπει να είναι ένα τρισδιάστατο συμπαγές αντικείμενο ή γενικά τρισδιάστατες κλειστές γεωμετρίες. Ακόμη, ο μηχανισμός αντίστροφης μηχανικής μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία του επιθυμητού αντικειμένου, όπως η χρήση ενός τρισδιάστατου σαρωτή.

Μετατροπή σε STL

Σχεδόν κάθε σύστημα CAD μπορεί να εξάγει αρχείο σε μορφή STL και σχεδόν οποιοδήποτε λογισμικό τεμαχισμού δέχεται τέτοια μορφή αρχείου. Μια μορφή αρχείου STL αναδημιουργεί την γεωμετρία της επιφάνειας ενός συμπαγούς μοντέλου χρησιμοποιώντας μια σειρά συνδεδεμένων τριγώνων. Αν η ανάλυση αυξηθεί, θα

δημιουργηθούν περισσότερα τρίγωνα με καλύτερη προσέγγιση των επιφανειών του 3D μοντέλου, ωστόσο θα αυξηθεί και το μέγεθος του αρχείου STL.

Λογισμικό Τεμαχισμού (Slicer)

Στη συνέχεια, ένα λογισμικό τεμαχισμού μετατρέπει το αρχείο STL σε G-κώδικα, το οποίο παρέχει οδηγίες στη συσκευή εκτύπωσης σχετικά με τον τρόπο εκτύπωσης κάθε στρώματος ανάλογα με τις προκαθορισμένες παραμέτρους. Επιπλέον, ονομάζεται λογισμικό τεμαχισμού επειδή κόβει το τρισδιάστατο μοντέλο STL σε πολλαπλά δισδιάστατα επίπεδα 2D, το πλήθος των οποίων εξαρτάται από τις διαστάσεις του μοντέλου και το πάχος της κάθε στρώσης.

Τροποποίηση G-κώδικα

Το αρχείο G-κώδικα το οποίο δημιουργείται από το λογισμικό τεμαχισμού πρέπει να τροποποιηθεί πριν μεταφερθεί στην CNC εργαλειομηχανή. Αυτή η τροποποίηση είναι πολύ σημαντική, καθώς η σωστή σύνταξη του G-κώδικα για μια εργαλειομηχανή CNC διαφέρει από αυτή ενός συστήματος AM. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό το βήμα θα υπάρξει μια γενική αλλαγή τμημάτων του αρχείου μέσω αλγορίθμου έτσι ώστε να έχει τη σωστή σύνταξη καθώς και να προστεθούν οι κατάλληλες μακροεντολές προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ της εργαλειομηχανής και της φορητής συσκευής SLA. Ο αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί μέσω MATLAB.

Μεταφορά του κώδικα στη εργαλειομηχανή, μέσω θύρας USB

Ο τροποποιημένος G-κώδικας είναι έτοιμος να μεταφερθεί στη CNC εργαλειομηχανή. Κάθε CNC εργαλειομηχανή έχει ενσωματωμένο χώρο μνήμης, ωστόσο όταν ένα πρόγραμμα είναι πολύ μεγάλο για να χωρέσει, υπάρχει και η επιλογή του FNC.

Προετοιμασία CNC εργαλειομηχανής

Η CNC εργαλειομηχανή πρέπει να ρυθμιστεί σωστά πριν από τη διαδικασία εκτύπωσης. Αυτές οι ρυθμίσεις αφορούν τη σωστή τοποθέτηση του εργαλείου συγκράτησης λέιζερ στο τσοκ, την κατάλληλη τοποθέτηση του δοχείου στο τραπέζι της μηχανής στο οποίο εισέρχεται η ρητίνη ώστε να πραγματοποιηθεί η εκτύπωση, την σύνδεση του καλωδίου RS232 για την επικοινωνία μεταξύ μικροελεγκτή και CNC εργαλειομηχανής καθώς και η ρύθμιση παραμέτρων της εργαλειομηχανής, όπως η ενεργοποίηση της δυνατότητας προγραμματισμού μέσω μακροεντολών και του MDC.

Κατασκευή του Αντικειμένου

Αυτό το βήμα είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία. Μόνο μια μικρή εποπτεία της διεργασίας χρειάζεται για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν προβλήματα, όπως για παράδειγμα προβλήματα στη τροφοδοσία, δυσλειτουργία του λογισμικού, εάν η δόση της ρητίνης έχει εφαρμοστεί ομοιόμορφα κατά τη πρώτη στρώση ή εάν έχει εξαντληθεί το υλικό.

Μεταφορά Αντικειμένου

Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή και η μη πολυμερισμένη ρητίνη απομακρυνθεί αυτόματα από την δεξαμενή, το αντικείμενο μπορεί επίσης να αφαιρεθεί. Για λόγους ασφαλείας, αυτό πρέπει να γίνεται μόνο όταν δεν υπάρχουν ενεργά κινούμενα μέρη και όταν η δίοδος λέιζερ είναι απενεργοποιημένη.

Περεταίρω Επεξεργασία

Το αντικείμενο έπειτα από τη μεταφορά του από το δοχείο, χρειάζεται επιπλέον καθαρισμό. Το αντικείμενο καλύπτεται με ρητίνη σε αυτό το στάδιο ή μπορεί επίσης να έχει υποστηρίγματα που πρέπει να αφαιρεθούν. Ως εκ τούτου, αυτό το βήμα είναι συνήθως χρονοβόρο, απαιτεί προσοχή και χειρωνακτική εργασία.

1.1.2. Κέντρο Κατεργασίας Φρέζας Haas

Η διαθέσιμη εργαλειομηχανή φρέζας στο εργαστήριο “Τεχνολογίας των Κατεργασιών” της σχολής μηχανολόγων μηχανικών είναι η εργαλειομηχανή TM1 της Haas. Η συγκεκριμένη εργαλειομηχανή εμπεριέχει εξαιρετικές λειτουργίες όπως MDC, HSM, FNC και δυνατότητα μακροπρογραμματισμού. Αυτά τα χαρακτηριστικά ήταν απαραίτητα για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ της εργαλειομηχανής και της φορητής συσκευής SLA.



Σχήμα 1.1.2 CNC Εργαλειομηχανή φρέζας Haas TM1

Τα χαρακτηριστικά της φρέζας TM1 αναφέρονται παρακάτω:

TM1	Αγγλοσαξονικό	Μετρικό
Άξονας X	30 "	762 mm
Άξονας Y	12 "	305 mm
Άξονας Z	16 "	406 mm
Μέγιστο Βάρος	1000 lb	454 kg
Μέγιστη Ισχύς	7.5 hp	5.6 kW
Μέγιστη Ταχύτητα	4000 rpm	4000 rpm
Μ. Πρόωση σε X, Y, Z	200 in/min	5.1 m/min
Απαιτούμενη Πίεση	4 scfm, 100 psi	113 L/min, 6.9 bar

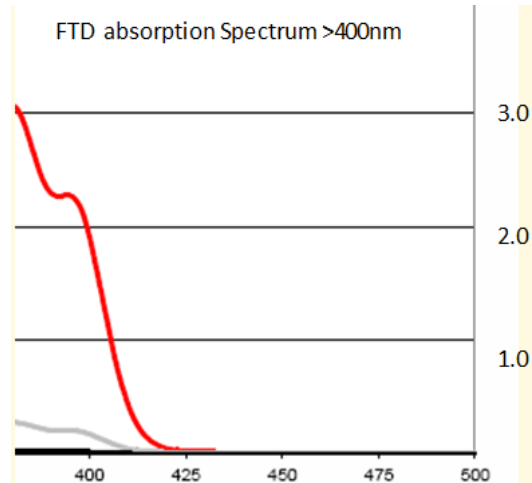
Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά Haas TM1[3]

1.1.3. Φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη

Η ρητίνη που έχει επιλεγεί είναι η FunToDo Industrial Blend λόγω της ευρείας γκάμας αντιδραστικότητας και της λογικής τιμής της.[1] Η ρητίνη FunToDo Industrial Blend έχει αναπτυχθεί κυρίως για ορισμένους βιομηχανικούς πελάτες που χρειάζονται ρητίνη που είναι ιδιαίτερα σκληρή και θα διατηρήσει τη δομική της ακεραιότητα ενώ εκτίθεται σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες. [4]

Οι ρητίνες FunToDo (FTD) έχουν ένα ευρύ φάσμα αντιδραστικότητας το οποίο εκτείνεται από τα πολύ μικρά μήκη κύματος 225 nm έως τα σχεδόν ορατά μήκη κύματος 415 nm.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι αυτές οι ρητίνες έχουν εξαιρετικά χαμηλή συρρίκνωση, περίπου 0,5%. Επιπλέον, έχουν φυσική αντοχή στο νερό και υψηλή αντοχή στις χημικές ουσίες.



Σχήμα 1.1.3 Φάσμα απορρόφησης FTD [4]

Για παράδειγμα, έχει δοκιμαστεί στις ακόλουθες χημικές ουσίες:

- Λευκό αλκοόλ / Αιθυλική αλκοόλη
- Υδροχλωρικό οξύ και διάφορα άλλα οξέα
- Θεικό οξύ
- Ακετόνη
- Βενζίνη
- Ισοβουτανόλη
- Ξυλένιο
- Λάδι λαδιού / Λάδι κινητήρα / Ελαιόλαδο / Υγρά φρένων
- Νερό



Σχήμα 1.1.4 Ρητίνη FTD

Επίσης, μερικές επιπλέον ιδιότητες της ρητίνης αναφέρονται παρακάτω: [4]

- Η σκληρότητα όταν έχει πολυμεριστεί πλήρως είναι 75 shore D.
- Το ιξώδες της ρητίνης είναι 100 Mpas
- Η πυκνότητα είναι 1004 gr/dm^3 και
- Η ανοχή θερμοκρασίας είναι από $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $+225 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.2. Ηλεκτρολογικό Μέρος

1.2.1. Τροφοδοσία

Το τροφοδοτικό είναι ένα από τα πιο κρίσιμα μέρη ενός έργου. Η επιλογή ενός ποιοτικού τροφοδοτικού μπορεί να κάνει τη διαφορά μεταξύ ενός συστήματος με καλή λειτουργία και ενός συστήματος που υποφέρει από βλάβες και αποτυχίες εκκίνησης. Κάθε τμήμα της συσκευής πρόκειται να έχει τις δικές του ανάγκες σε ενέργεια, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η συνολική ισχύς και η ειδική ισχύς των επιμέρους εξαρτημάτων. Όλα τα εξαρτήματα που περιλαμβάνονται στη φορητή συσκευή SLA λειτουργούν σε συνεχές ρεύμα. Ωστόσο, ορισμένα από αυτά χρειάζονται τάση εισόδου 12V και άλλα 5V.



Σχήμα 1.2.1 Τροφοδοτικό 12V DC, 20A

Για το λόγο αυτό, το τροφοδοτικό που έχει επιλεγεί είναι της εταιρεία TRP Traders. Τα χαρακτηριστικά του τροφοδοτικού είναι:

- Τάση εισόδου: AC 110 - 220V 50 / 60Hz
- Τάση εξόδου: 12V DC, 20A, και 240Watt
- Τάση εξόδου: Εύρος ρύθμισης: $\pm 20\%$
- Τύπος τάσης εξόδου - συνεχές ρεύμα

Όσον αφορά τα εξαρτήματα που λειτουργούν σε τάση εισόδου 5V, ένας μετατροπέας buck ή step down μπορεί να δώσει την απαιτούμενη παροχή. Ένας step down μετατροπέας ισχύος DC-to-DC μειώνει την τάση εισόδου από την είσοδο του προς την έξοδο του. Οι μετατροπείς step down είναι υψηλής απόδοσης, πάνω από 90%, καθιστώντας τους χρήσιμους για εργασίες όπως η μετατροπή της κύριας τάσης τροφοδοσίας σε χαμηλότερες τάσεις.

Ο μετατροπέας step-down που έχει επιλεγεί είναι η μονάδα LM2596, οι προδιαγραφές του οποίου είναι:

- DC-DC step-down power module
- Τάση εισόδου 3.2V ~ 40V
- Τάση εξόδου 1.25V ~ 35V
- Ρεύμα εξόδου 3A (μέγιστο)
- Απόδοση μετατροπής 92% (μέγιστη)
- Συχνότητα μεταγωγής 65KHz
- Θερμοκρασία λειτουργίας -45 °C ~ +85 °C



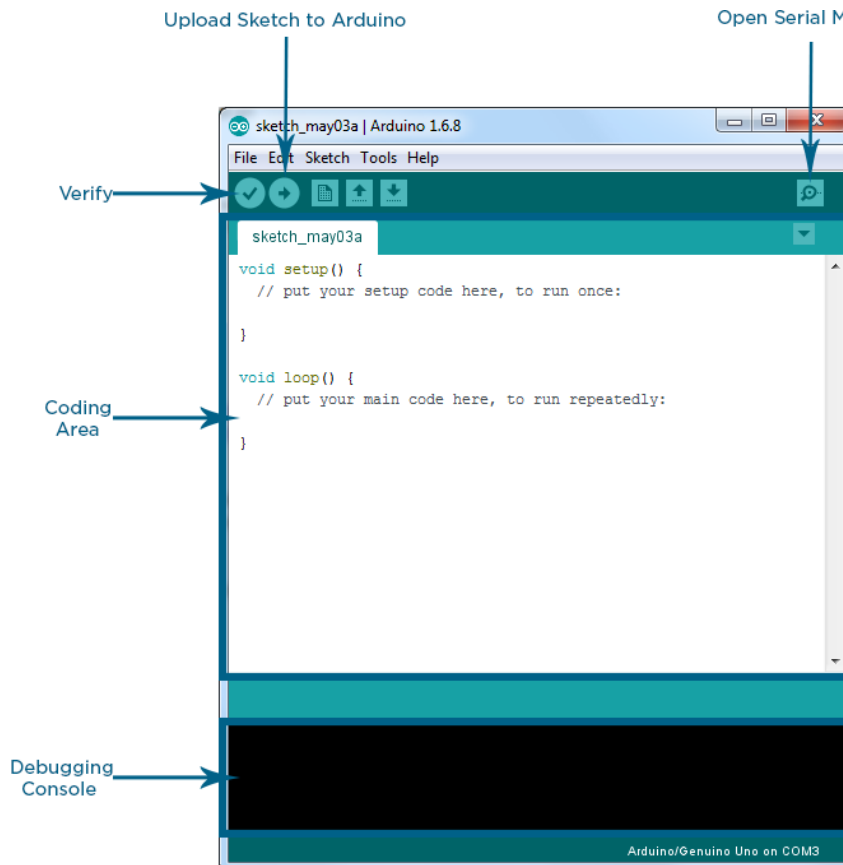
Σχήμα 1.2.2 LM2596 step-down

1.2.2. Μικροελεγκτής

Το Arduino είναι μια μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ανεξάρτητων διαδραστικών αντικειμένων. Το Arduino αποτελείται από ένα μικροελεγκτή, αλλά και από ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE), το οποίο χρησιμοποιείται για την εγγραφή και την αποστολή κώδικα στη πλακέτα. Το περιβάλλον είναι φιλικό προς το χρήστη, γραμμένο σε γλώσσα Java και βασίζεται στο Processing και άλλα λογισμικά ανοικτού κώδικα. Επιπλέον, αυτό το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιοδήποτε πλακέτα Arduino.[5]



Σχήμα 1.2.3 Μικροελεγκτής Arduino



Σχήμα 1.2.4 Λογισμικό Arduino (IDE) (core-electronics.com)

Η πλακέτα που επιλέχθηκε είναι το Arduino UNO R3. Αυτή η έκδοση διαθέτει 14 ακροδέκτες εισόδου / εξόδου, έξι από τους οποίους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έξοδοι PWM, έξι αναλογικές εισόδους, θύρα USB, υποδοχή τροφοδοσίας, κουμπί επαναφοράς και πολλά άλλα.

1.2.3. Δίοδος Λείζερ

Η εφαρμογή είναι αυτή που καθορίζει τις σημαντικές παραμέτρους μιας διόδου λείζερ, όπως το μήκος κύματος και την ισχύ εξόδου. Για την κατασκευή της φορητής συσκευής SLA, η ρητίνη που έχει ήδη επιλεγεί ορίζει τη σωστή δίοδο λείζερ. Στην αρχή του έργου, λαμβάνοντας υπόψη μια οικονομική λύση, προτιμήθηκε μια μονάδα λείζερ 20mW 405nm.[1] Ορισμένα από τα στοιχεία που συμπεριλήφθηκαν στη συσκευασία αναφέρονται παρακάτω:

- Δίοδος λείζερ
- Οδηγός διόδου λείζερ
- Μεταλλική θήκη
- Συγκεντρωτικός φακός
- Μερικοί ακρυλικοί φακοί λείζερ



Σχήμα 1.2.5 Μονάδα λείζερ

Δίοδος λείζερ

Η δίοδος λείζερ που συμπεριλήφθη στη συσκευασία έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- TO-18
- Μήκος κύματος: 405nm
- Ισχύς εξόδου: 20mW
- Τάση λειτουργίας: 3V-5V
- Θερμοκρασία λειτουργίας: +15 °C ~ + 35 °C



Σχήμα 1.2.6 Δίοδος λείζερ

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών που έγιναν στο εργαστήριο “Τεχνολογίας των Κατεργασιών” της σχολής μηχανολόγων μηχανικών, διάφορα αντικείμενα τυπωθήκαν με αυτή τη δίοδο λείζερ. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά καλά, αν και η δίοδος λείζερ είχε τους περιορισμούς της. Τα αποτελέσματα θα συζητηθούν περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο, αλλά η δίοδος λείζερ αντικαταστάθηκε αφού τα αντικείμενα, ανεξάρτητα από τις παραμέτρους, δεν είχαν πολυμεριστεί πλήρως ή σε επιθυμητό βαθμό.

Η δίοδος λείζερ που επιλέχθηκε για να την αντικαταστήσει ήταν η Sony SLD3235VF TO-18, οι προδιαγραφές της οποίας αναφέρονται παρακάτω:

	Min	Typ	Max	Unit
Optical Output Power	-	100	-	mW
Peak Wavelength	400	405	410	nm
Threshold Current	-	155	160	mA
Operating Current	-	155	165	mA
Operating Voltage	-	5.3	5.5	V
Operating Temperature	10	-	80	°C

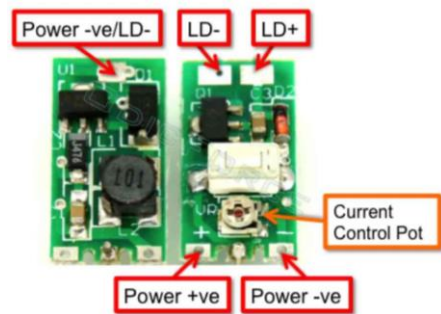
Πίνακας 1.2 Χαρακτηριστικά Sony SLD3235VF

Οδηγός διόδου λείζερ

Ο οδηγός (driver) της διόδου που συμπεριελήφθη στη συσκευασία έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- Μήκος κύματος: 405nm
- Ρεύμα εξόδου: 20 ~ 300 mA
- Τάση εισόδου: 3 ~ 5V
- Τάση εξόδου: 5 ~ 5.5V

Αυτός ο οδηγός διαθέτει μια μεταβλητή αντίσταση για τη ρύθμιση του επιθυμητού ρεύματος εξόδου. Έτσι, μετά την αντικατάσταση της διόδου δεν υπήρχε ανάγκη για άλλο οδηγό.

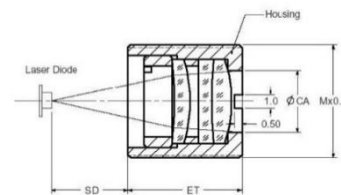


Σχήμα 1.2.7 Οδηγός λείζερ διόδου

Συγκεντρωτικός φακός

Ο συγκεντρωτικός φακός που συμπεριελήφθη στη συσκευασία έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- Μήκος κύματος: 405-450nm
- Υλικό φακού: γυαλί
- Μέγεθος φακού: ~ 0.7cm
- Μήκος εστίασης: ~ 8mm
- Μέγεθος κοχλία M9 P0.5



Part No	Coating /nm	Diode Focal length (SD) /mm	Numerical Aperture (NA)	CA/mm	Thread Diameter (M) / mm	Effective Focal Length (EFL) /mm	Edge Thickness (ET)
OFL161	400-450	3.1	0.26	5.0	9.0	8.3	10

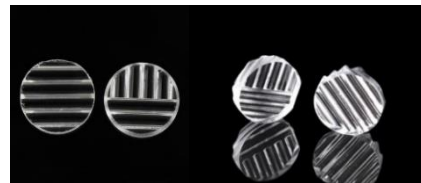
Σχήμα 1.2.8 Συγκεντρωτικός φακός

Πρόκειται για φακό τριπλής εστίασης και έχει επίσης επίστρωση αντι-ανακλάσεως υψηλής απόδοσης.

Ακρυλικοί φακοί λείζερ

Οι ακρυλικοί φακοί λείζερ που περιλαμβάνονται στη συσκευασία έχουν τις ακόλουθες προδιαγραφές:

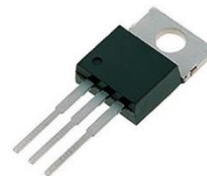
- Σχήμα: γραμμή, σταυρός
- Γωνία: 120
- Διαστάσεις: 8x2,3mm



Σχήμα 1.2.9 Ακρυλικοί φακοί

Επιπλέον, ένα άλλο σημαντικό στοιχείο για να μπορεί ο μικροελεγκτής να ελέγχει την κατάσταση (ενεργοποίηση / απενεργοποίηση) της διόδου λείζερ, είναι το τρανζίστορ N-MOSFET τύπου IRF520N. Οι προδιαγραφές του IRF520N αναφέρονται παρακάτω:

- Drain-source voltage: 100V
- Drain current: 9.7 A
- Power: 48W
- Gate-source voltage: 20V



Σχήμα 1.2.10 N-MOSFET IRF520N

1.2.4. Περισταλτική Αντλία

Ως τύπος αντλίας θετικής μετατόπισης, μια περισταλτική αντλία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άντληση μιας ποικιλίας υγρών. Αυτός ο τύπος αντλίας έχει έναν εύκαμπτο σωλήνα τοποθετημένο μέσα σε ένα κυκλικό περίβλημα της αντλίας. Αυτός ο εύκαμπτος σωλήνας, ο οποίος περιέχει ρευστό, συμπιέζεται από έναν δρομέα με ορισμένους "κυλίνδρους" προσαρτημένους στην εξωτερική του περιφέρεια. Καθώς στρέφεται ο ρότορας, αυτοί οι "κύλινδροι" συμπιέζουν ένα μέρος του σωλήνα και αναγκάζουν το υγρό να μετακινηθεί περαιτέρω μέσω του σωλήνα. Οι περισταλτικές αντλίες μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, ή μπορούν να ελεγχθούν μέσω μερικών περιστροφών για την παροχή συγκεκριμένων ποσοτήτων υγρού.[6]

Η περισταλτική αντλία που έχει επιλεγεί είναι μια περισταλτική αντλία 12V με μονάδα βηματικού κινητήρα, οι προδιαγραφές της οποίας είναι:

- Παροχή: 0 ~ 160 ml / λεπτό
- Ταχύτητα: 1 ~ 50.0 rpm αντιστρεπτή
- Κατανάλωση: ~ 10W
- Θερμοκρασία λειτουργίας: 0 ~ 40 °C
- Σχετική υγρασία: <80%

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της αντλίας είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει με μερικές περιστροφές και να παρέχει μια συγκεκριμένη ποσότητα ρητίνης.[1] Στόχος είναι να μεταφέρεται σε κάθε νέα στρώση μια δόση ρητίνης προς το δοχείο. Η ποσότητα της ρητίνης εξαρτάται από την επιθυμητή ποιότητα του τελικού εκτυπωμένου αντικειμένου, δηλαδή το πάχος της στρώσης.



Σχήμα 1.2.11 Περισταλτική αντλία

Επιπλέον, προκειμένου να επιτευχθεί έλεγχος ακριβείας του κινητήρα και της επιθυμητής ποσότητας κάθε δόσης, ο οδηγός βηματικού κινητήρα που έχει επιλεγεί είναι ο EasyDriver A3967, οι προδιαγραφές του οποίου είναι:

- Οι επιλογές ανάλυσης (microstepping) είναι: πλήρες, μισό, τέταρτο και όγδοο βήμα (προεπιλεγμένο το όγδοο)
- Συμβατό με βηματικούς κινητήρες τεσσάρων, έξι και οκτώ-καλωδίων οποιασδήποτε τάσης
- Ρυθμιζόμενος έλεγχος ρεύματος από 150mA / φάση έως 750mA / φάση
- Η παροχή ρεύματος κυμαίνεται από 7V έως 30V. Με υψηλότερη τάση μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ροπή σε υψηλές ταχύτητες



Σχήμα 1.2.12 EasyDriver A3967

1.2.1. Σερβοκινητήρας

Ένας σερβοκινητήρας είναι ένας περιστροφικός επενεργητής που επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της γωνιακής θέσης. Αποτελείται από έναν κινητήρα συνδεδεμένο σε ποτενσιόμετρο ή αισθητήρα για ανάδραση θέσης (encoder). Ο σχεδιασμός του εργαλείου συγκράτησης λέιζερ πραγματοποιήθηκε στοχεύοντας σε διάφορα χαρακτηριστικά. Ένα από αυτά ήταν η δέσμη λέιζερ να έχει τη δυνατότητα να αλλάζει σχήμα. Σε συνδυασμό με τους ακρυλικούς φακούς λέιζερ που αναφέρθηκαν νωρίτερα, το σχήμα μπορεί να είναι τελεία, γραμμή είτε σταυρός. Για να επιτευχθεί αυτό οι ακρυλικοί φακοί τοποθετήθηκαν σε μια βάση, η γωνιακή θέση της οποίας μπορεί να ελεγχθεί με έναν κινητήρα σέρβο. Τόσο το εργαλείο συγκράτησης λέιζερ όσο και η βάση των φακών θα αναλυθούν περαιτέρω στις επόμενες ενότητες. Εκτός από το σχήμα, μπορεί να ελεγχθεί και η διεύθυνση της δέσμης μέσω ενός δεύτερου σερβοκινητήρα.

Ο τύπος σερβοκινητήρα που έχει επιλεγεί είναι ο SG90 micro servo, οι προδιαγραφές του οποίου είναι:

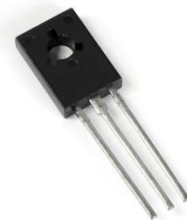
- Διαστάσεις: 22mm x 11.5mm x 22.5mm
- Ταχύτητα: 0,12 δευτερόλεπτα / 60degree (4.8V χωρίς φορτίο)
- Ροπή (4.8V): 17.5oz / in (1kg / cm)
- Εύρος θερμοκρασίας: -30 έως +60
- Τάση λειτουργίας: 3.0V ~ 7.2V



Σχήμα 1.2.13 Σερβοκινητήρας SG90

Επιπλέον, ένα άλλο σημαντικό στοιχείο για τον έλεγχο του σερβοκινητήρα με ακρίβεια είναι το τρανζίστορ BD140 PNP. Το τρανζίστορ ελέγχει την κατάσταση (ενεργοποίηση / απενεργοποίηση) του σερβοκινητήρα, για να μην επηρεάζεται από παράγοντες όπως η πτώση τάσης του κυκλώματος ενώ λειτουργεί ένα άλλο ηλεκτρικό εξάρτημα. Οι προδιαγραφές του BD140 αναφέρονται παρακάτω:

- Τάση συλλέκτη-βάσης: -100V
- Τάση συλλέκτη-εκπομπού: -80V
- Τάση εκπομπού-βάσης: -5V
- Ρεύμα συλλέκτη: -1,5A
- Συνολική απορρόφηση σε $T_c \leq 25^\circ \text{C}$: 12,5 W



Σχήμα 1.2.14 Τρανζίστορ BD140 PNP

1.2.2. Θερμαντικό Στοιχείο Σιλικόνης

Η χρήση θερμαντικού στοιχείου από σιλικόνη ως πηγής θέρμανσης είναι ιδανική, καθώς έχει εμφανή πλεονεκτήματα έναντι άλλων μορφών θέρμανσης. Το υλικό αυτό έχει εξαιρετικές ιδιότητες όπως χαμηλή θερμική μάζα, στιβαρή κατασκευή και άριστη μόνωση. Επιπλέον, έχει γρήγορη απόκριση για ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας και μπορεί να λειτουργήσει σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας, από -60 έως 230 °C. Όλες αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν μια καλή επιλογή για πολλές εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη και ακριβής θέρμανση, όπως η φορητή συσκευή SLA.

Το θερμαντικό στοιχείο είναι απαραίτητο για τη μείωση του ιξώδους της ρητίνης σε χαμηλό επίπεδο. Όπως έδειξε το στάδιο των δοκιμών, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο περισσότερο βοηθάει τη διαδικασία του πολυμερισμού. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το θερμαντικό στοιχείο σιλικόνης είναι πιθανώς μία από τις καλύτερες επιλογές, καθώς έχει ταχεία απόκριση στην αλλαγή θερμοκρασίας και μπορεί να παρέχει ακριβή και σταθερή θέρμανση, ομοιόμορφα σε μια περιοχή.

Το θερμαντικό στοιχείο που έχει επιλεγεί είναι από υλικό σιλικόνης με τάση λειτουργίας 12V, του οποίου οι προδιαγραφές είναι:

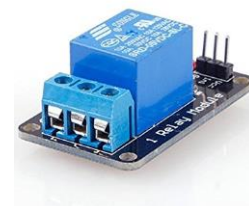
- Τάση: 12V
- Ισχύς: 120W
- Μέγεθος: 120 mm x 120 mm
- Μήκος Λευκού Καλωδίου: ~ 50cm
- Μήκος γραμμής δικτύου: ~ 93cm
- Θερμοκρασία: Μέγ. 240 ° C



Σχήμα 1.2.15 Θερμαντικό στοιχείο σιλικόνης 12V

Ακόμα, για να μπορεί ο μικροελεγκτής να ελέγχει την κατάσταση (ενεργοποίηση / απενεργοποίηση) του θερμαντικού στοιχείου σιλικόνης, χρησιμοποιείται μια μονάδα ρελέ. Οι προδιαγραφές του ρελέ αναφέρονται παρακάτω:

- Τάση λειτουργίας: 5V
- Ρεύμα: 15-20mA
- AC: 250V 10A
- DC: 30V 10A
- Διαστάσεις: 4.7 x 2.9 x 1.8 εκατοστά
- Ελέγχεται απευθείας από τον μικροελεγκτή
- Ασφαλές και αξιόπιστο



Σχήμα 1.2.16 Ρελέ

1.2.3. RS232

Ένα εξίσου σημαντικό μέρος της εργασίας ήταν η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ της μηχανής CNC και του μικροελεγκτή Arduino. Η διαθέσιμη μηχανή CNC του εργαστηρίου διαθέτει δύο τύπους θύρας επικοινωνίας: USB και RS232 (DB25 θηλυκό). Η επικοινωνία μπορεί να γίνει μέσω της θύρας RS232 με τη χρήση της μακροεντολής DPRNT και της εντολής “E” του MDC, ακόμη και όταν εκτελείται ένα πρόγραμμα.

Ωστόσο, ο μικροελεγκτής Arduino UNO δεν διαθέτει θύρα RS232, αλλά έχει έναν ενσωματωμένο ασύγχρονο δέκτη / πομπό (UARTs) που χρησιμοποιείται για να μεταδίδει και να λαμβάνει σειριακά δεδομένα. Οι UARTs μεταδίδουν ένα bit κάθε φορά με καθορισμένο ρυθμό δεδομένων, όπως 9600bps ή 115200bps. Αυτή η μέθοδος σειριακής επικοινωνίας είναι επίσης γνωστή ως σειριακή λογική τρανζίστορ-τρανζίστορ (TTL). Ως εκ τούτου, για την ολοκλήρωση της επικοινωνίας, τα δεδομένα που λαμβάνονται και αποστέλλονται από το Arduino πρέπει να μετατραπούν μέσω ενός κατάλληλου μετατροπέα.[7]

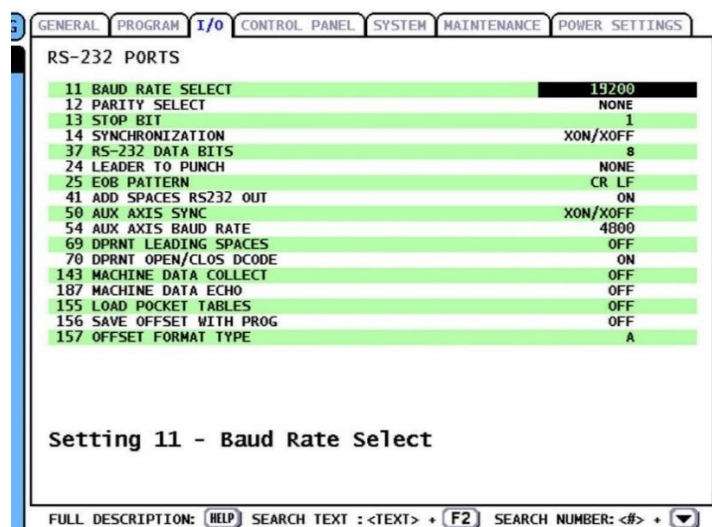
Ο μετατροπέας που έχει επιλεγεί είναι ο RS232 to TTL, οι προδιαγραφές του οποίου είναι:

- Control chip: MAX3232
- Τάση λειτουργίας: 3.3V
- Ρεύμα λειτουργίας: 6 mA
- Θερμοκρασία λειτουργίας 0 - 70 ° C
- Ακροδέκτες: TXD, RXD, GND, VCC
- RS232: DB9 θηλυκό



Σχήμα 1.2.17 RS232 to TTL

Οι ρυθμίσεις ρυθμού μετάδοσης που έχουν επιλεγεί τόσο για το μετατροπέα όσο και για τη θύρα RS232 του CNC είναι οι εξής:



Σχήμα 1.2.18 Ρυθμίσεις RS-232

1.2.4. Αισθητήρες

Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα σύστημα ελέγχου, απαιτεί τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την αυτοματοποιημένη διαδικασία. Ο αισθητήρας είναι μια συσκευή που αντιλαμβάνεται τις μεταβολές ενός φυσικού μεγέθους σε μια διεργασία, όπως η απόσταση, η θερμοκρασία ή ένα μαγνητικό πεδίο. Στη συνέχεια, ο αισθητήρας στέλνει ένα ηλεκτρικό σήμα στο σύστημα ελέγχου, το οποίο αποφασίζει για τις επόμενες ενέργειες στη διαδικασία. Για τη συσκευή SLA, οι αισθητήρες που επιλέχθηκαν είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας, ένας αισθητήρας απόστασης και ένας αισθητήρας Hall.

Αισθητήρας θερμοκρασίας

Όπως υποδηλώνει το όνομά του, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας είναι μια συσκευή που παρέχει τη μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω ενός ηλεκτρικού σήματος. Για παράδειγμα, εδώ ο αισθητήρας στέλνει ένα σήμα στον μικροελεγκτή και ο μικροελεγκτής αποφασίζει για την κατάσταση του θερμαντικού στοιχείου σιλικόνης. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που έχει επιλεγεί είναι ένα θερμίστορ 3950 NTC, οι προδιαγραφές του οποίου είναι:

- Τύπος: NTC 10k \pm 1% 3950
- Εύρος μέτρησης: -20 έως 105 ° C
- Θήκη από ανοξείδωτο ατσάλι
- Αδιάβροχος αισθητήρας
- Μήκος καλωδίου: 1 μέτρο
- Μέγεθος θήκης: 5 x 25 mm



Σχήμα 1.2.19 Θερμίστορ 3950 NTC

Ο θερμίστορ αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (NTC) είναι μια συσκευή ανίχνευσης θερμοκρασίας η οποία είναι φτιαγμένη από υλικό ημιαγωγού που περιλαμβάνει ένα μείγμα διαφορετικών μεταλλικών οξειδίων. Αυτά τα υλικά έχουν φορείς φόρτισης που επιτρέπουν στο ρεύμα να ρέει μέσω του θερμίστορ επιφέροντας σημαντικές μεταβολές στην αντίσταση σε μικρές αλλαγές θερμοκρασίας. Οι NTC θερμίστορ παράγουν χαμηλή αντίσταση σε υψηλή θερμοκρασία. Καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται η αντίσταση του θερμίστορ και αντιστρόφως. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου θερμίστορ είναι ότι ακόμη και η μικρότερη αλλαγή θερμοκρασίας μπορεί να εντοπιστεί άμεσα, λόγω της σημαντικής μεταβολής της αντίστασης ανά βαθμό Κελσίου.[8]

Υπέρυθρος αισθητήρας απόστασης

Ο αισθητήρας υπέρυθρων (IR) είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς αισθητήρες. Αυτή η συσκευή αποτελείται από ένα πομπό και ένα δέκτη. Ο πομπός είναι ένα IR LED και ο δέκτης είναι μια φωτοδίοδος IR που είναι ευαίσθητη στην υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από το IR LED. Όταν η φωτοδίοδος ανιχνεύει την υπέρυθρη ακτινοβολία, η αντίσταση και η τάση εξόδου αλλάζουν ανάλογα με το μέγεθος της ακτινοβολίας που λαμβάνεται. Για την εργασία αυτή, ο αισθητήρας έχει τοποθετηθεί

στο εργαλείο συγκράτησης λέιζερ και μετρά την απόσταση μεταξύ του εργαλείου και της στάθμης της ρητίνης στο δοχείο. Με αυτόν τον τρόπο, επαληθεύεται ότι έχει εισαχθεί η σωστή ποσότητα ρητίνης σε κάθε στρώση. Ο αισθητήρας υπερύθρων που επιλέχθηκε είναι ο ανακλαστικός οπτικός αισθητήρας TCRT5000, οι προδιαγραφές του οποίου είναι:

- Απόσταση ανίχνευσης: 12 mm
- Λειτουργία Μήκος κύματος: 950 nm
- Αντίστροφη τάση: 5V
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -25 °C ~ + 85 °C
- Ύψος συσκευασίας: 7 mm



Σχήμα 1.2.20 Αισθητήρας TCRT5000

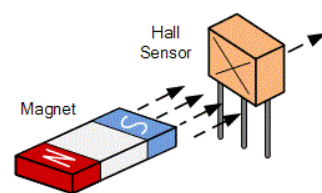
Ωστόσο, υπάρχουν διάφορες πηγές θορύβου που μπορούν να επηρεάσουν τη μέτρηση του αισθητήρα TCRT5000.[9] Κάποιοι από αυτούς είναι:

- Ο ήλιος: Ο ήλιος μεταδίδει ένα σημαντικό μέρος της IR ακτινοβολίας, την οποία αντλαμβάνεται η φωτοδίοδος IR.
- Φωτισμός εσωτερικού χώρου: Η φωτοδίοδος IR δεν επηρεάζεται μόνο από το IR, αλλά και από τη φωτεινότητα του χώρου.
- Πηγή θερμότητας: Η φωτοδίοδος IR επηρεάζεται από τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πηγή θερμότητας.
- Τάση: Η πτώση τάσης του κυκλώματος μπορεί να οδηγήσει σε λάθος πληροφορία.
- Χρώμα επιφανείας: Το χρώμα της επιφάνειας που αντανακλά το IR LED επηρεάζει επίσης τη μέτρηση.

Συνεπώς, είναι απαραίτητο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης να παρέχονται σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες προκειμένου να μειωθούν αυτά τα σφάλματα, τα οποία αναπόφευκτα προστίθενται στη μέτρηση.

Αισθητήρας Hall Effect

Ένας αισθητήρας Hall μεταβάλλει την τάση εξόδου του όταν βρεθεί εντός μαγνητικού πεδίου. Πιο αναλυτικά, ο αισθητήρας Hall περιέχει ένα μεταλλικό έλασμα το οποίο όταν εισέρχεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο δημιουργείται στα άκρα του ελάσματος διαφορά δυναμικού.[10]



Για τη φορητή συσκευή SLA, ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος στο εργαλείο συγκράτησης λέιζερ και ανιχνεύει τη γωνιακή θέση του ακρυλικού φακού λέιζερ μέσω μικρών μαγνητών που έχουν τοποθετηθεί σε ένα γρανάζι που συγκρατεί το φακό. Με αυτόν τον τρόπο, όταν χρησιμοποιείται η γραμμή ή ο σταυρός, ο μικροελεγκτής μπορεί να ρυθμίσει την προτιμώμενη διεύθυνση της δέσμης όπως οριζόντια, κάθετη, διαγώνια.

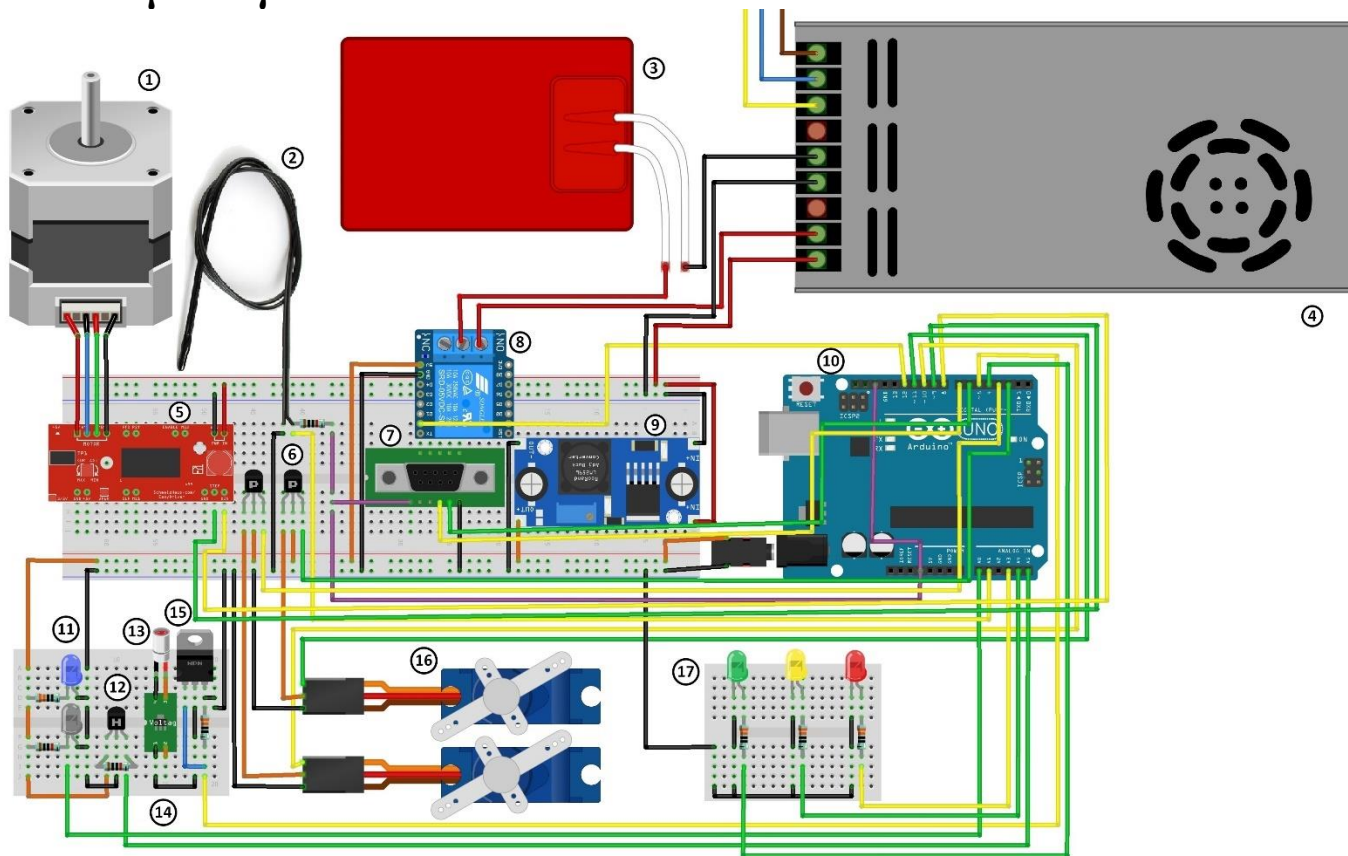
Ο αισθητήρας Hall Effect που επιλέχθηκε είναι ο αισθητήρας A3144E, οι προδιαγραφές του οποίου είναι:

- Τάση λειτουργίας: 5V ~ 24V
- Ρεύμα λειτουργίας: 4,5 ~ 9mA
- Υψηλή ακρίβεια, υψηλή αξιοπιστία



Σχήμα 1.2.21 Αισθητήρας Hall A3144E

1.2.5. Συνδεσμολογία



Σχήμα 1.2.22 Συνδεσμολογία

- | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| (1) Περισταλτική αντλία | (2) NTC Θερμίστορ | (3) Θερμαντικό στοιχ. | (4) Τροφοδοσία | (5) Οδηγός κινητήρα | (6) Τρανζίστορ |
| (7) RS232 σε TLL | (8) Ρελέ | (9) Step-down | (10) Μικροελεγκτής | (11) IR Αισθητήρας | (12) Hall Αισθητήρας |
| (13) Δίοδος Λείζερ | (14) Οδηγός Διόδου | (15) N-MOSFET | (16) Σεροκινητήρας | (17) LED | |

1.2.6. Υποσυστήματα

Η φορητή συσκευή SLA μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα υποσυστήματα: άντλησης, θέρμανσης, δέσμης και επικοινωνίας.

Υποσύστημα Άντλησης	Υποσύστημα Δέσμης	Υποσύστημα Θέρμανσης	Υποσύστημα Επικοινωνίας
Περισταλτική αντλία Οδηγός κινητήρα IR Αισθητήρας Σωλήνας σιλικόνης	Δίοδος Λέιζερ 405nm Οδηγός διόδου Συγκεντρωτικός φακός Ακρυλικοί φακοί (x 2) N-MOSFET Σερβοκινητήρας (x2) PNP Τρανζίστορ Αισθητήρας Hall	Θερμαντικό στοιχείο σιλικόνης Ρελέ NTC Θερμίστορ	Μετατροπέας RS232 to TTL Καλώδιο DB9 to DB25 CNC Θύρα RS232

Σχήμα 1.2.23 Υποσυστήματα

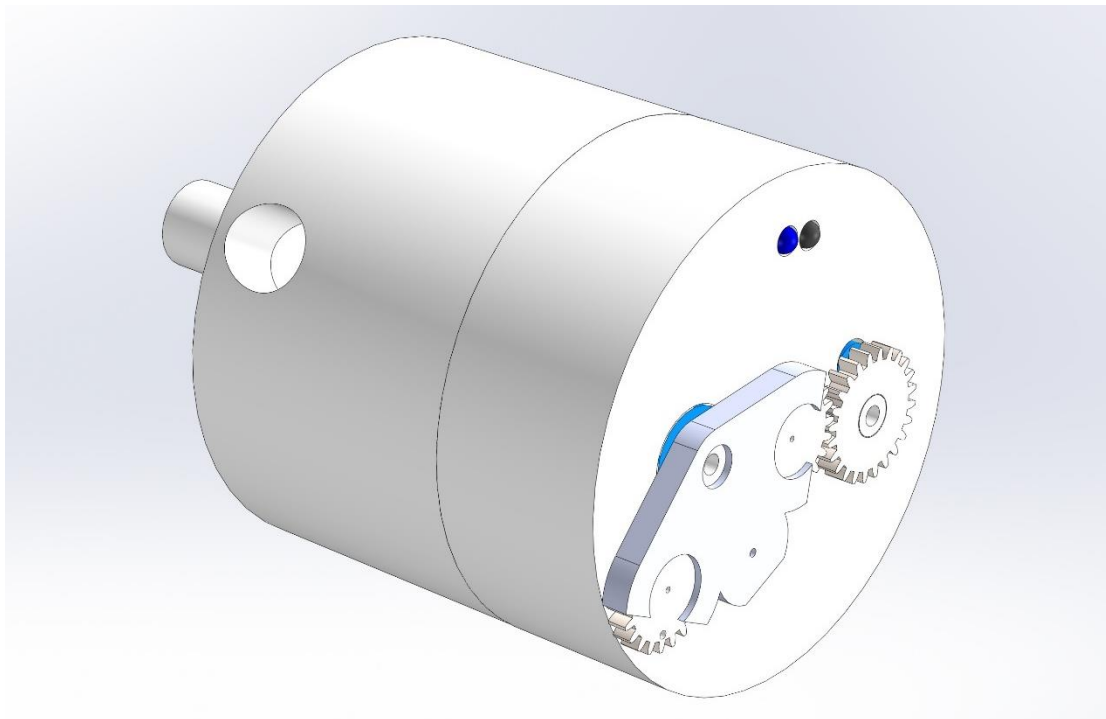
1. Ο σκοπός του υποσυστήματος άντλησης είναι να τροφοδοτεί την δεξαμενή με τη φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να μεταφέρει την ακριβή ποσότητα ρητίνης που χρειάζεται ανάλογα με το πάχος της στρώσης.
2. Ο σκοπός του υποσυστήματος θέρμανσης είναι η μείωση του ιξώδους της ρητίνης και η διατήρηση του δοχείου σε σταθερή θερμοκρασία. Η τελική θερμοκρασία που επιλέχθηκε είναι 85 °C.
3. Ο στόχος του υποσυστήματος επικοινωνίας είναι η έγκαιρη μετάδοση των πληροφοριών από τη μηχανή CNC στον μικροελεγκτή και αντιστρόφως. Κυρίως, χρησιμοποιείται η μακροεντολή "DPRNT" και η εντολή "E?" από το MDC.
4. Τέλος, ο στόχος του υποσυστήματος δέσμης είναι να παρέχει μια εστιασμένη δέσμη λέιζερ με την κατάλληλη ένταση. Σε συνδυασμό με το μηχανισμό "τροποποιητή δέσμης", που θα συζητηθεί στην επόμενη ενότητα, αυτό το υποσύστημα μπορεί να καθορίσει το σχήμα και τη διεύθυνση της δέσμης λέιζερ.

1.3. Μηχανολογικό μέρος

1.3.1. Εργαλείο Συγκράτησης Λείζερ

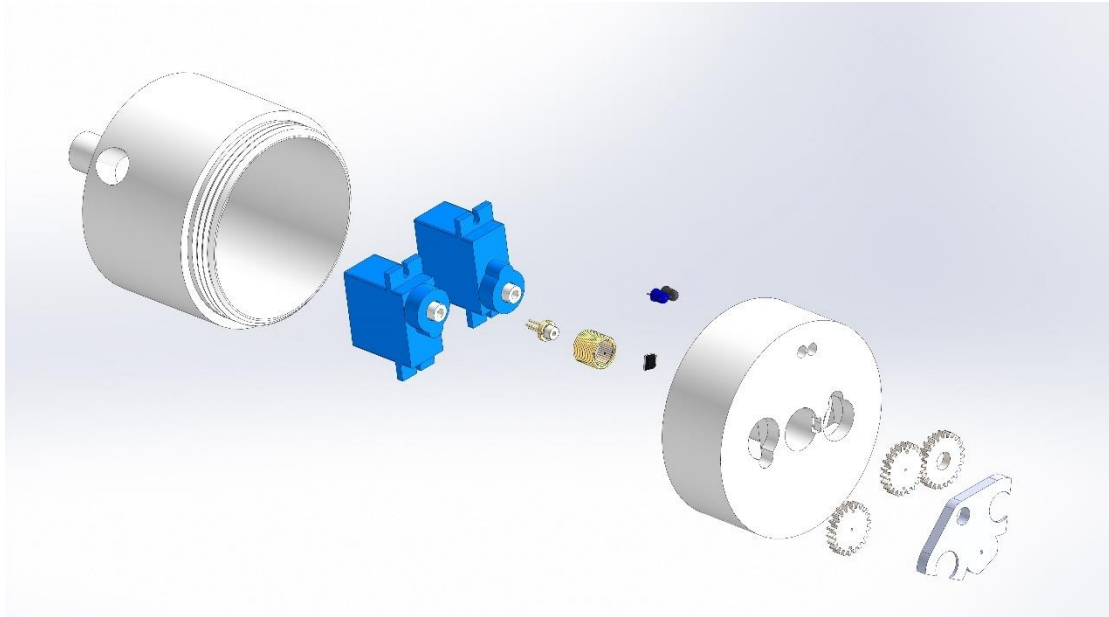
Το βασικό εργαλείο για αυτή τη συσκευή SLA είναι το εργαλείο συγκράτησης λέιζερ. Το εργαλείο αυτό συγκρατεί τη δίοδο λέιζερ καθώς και τα υπόλοιπα εξαρτήματα του υποσυστήματος “δέσμης”. Επίσης, είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να τοποθετείται εντός ενός εργαλειοδέτη και όχι απευθείας με το τσοκ της εργαλειομηχανής. Το τσοκ διαφέρει από εργαλειομηχανή σε εργαλειομηχανή απαιτώντας διαφορετικό εργαλειοδέτη, άρα με αυτή τη σχεδίαση, το εργαλείο συγκράτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εργαλειομηχανή φρέζας. Το εργαλείο συγκράτησης αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- Τη θήκη (κεφάλι, σώμα) και
- Το τροποποιητή δέσμης (γρανάζια, βάση ακρυλικών φακών)



Σχήμα 1.3.1 Εργαλείο συγκράτησης λέιζερ

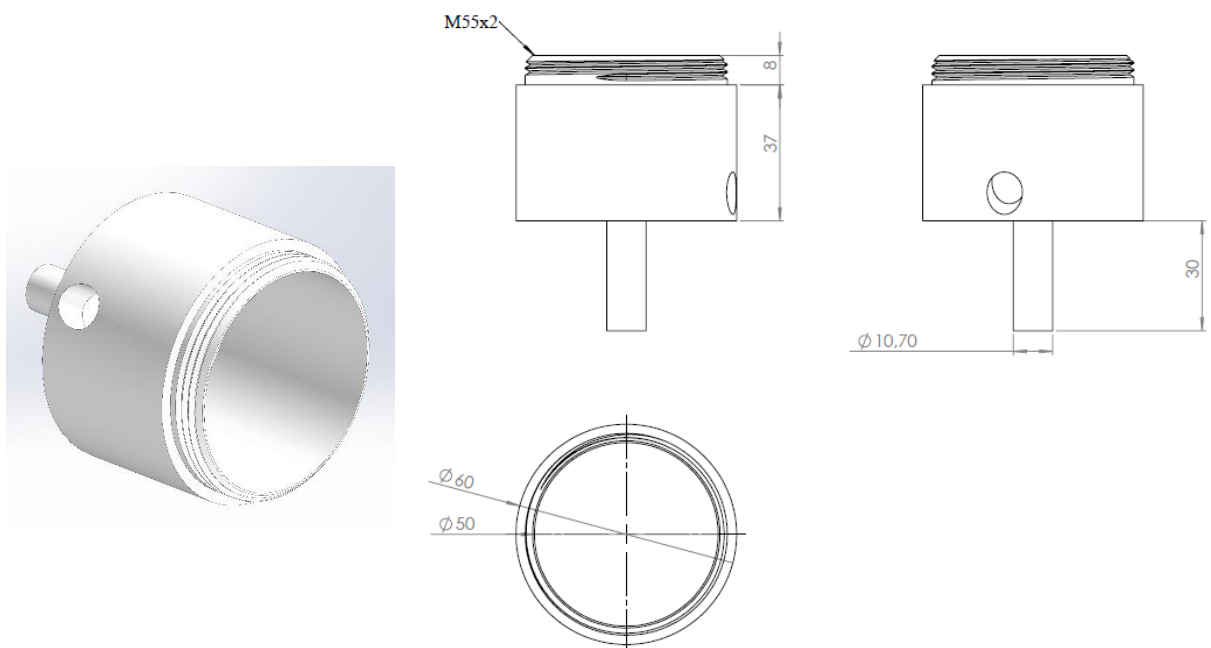
Αρχικά, ο σχεδιασμός του εργαλείου συγκράτησης έγινε έχοντας ως στόχο να είναι λειτουργικός. Αποτελείται από δύο μέρη τα οποία ενώνονται μέσω σπειρώματος, δίνοντας τη δυνατότητα για πρόσβαση στο εσωτερικό του σε περίπτωση που χρειαστεί επίβλεψη ή συντήρηση κάποιου εξαρτήματος. Ακόμη, ο κυριότερος σκοπός ήταν να κρατήσει το λέιζερ σταθερό στο κέντρο του άξονα της ατράκτου της εργαλειομηχανής. Επίσης, περιλαμβάνει ένα μηχανισμό που μπορεί να αλλάξει το σχήμα και την διεύθυνση της δέσμης όποτε αυτό ζητηθεί, μεταξύ των σχημάτων τελεία, γραμμή και σταυρό. Τέλος, συγκρατεί τον αισθητήρα απόστασης για να γίνουν οι κατάλληλες μετρήσεις μετά από κάθε νέα στρώση.



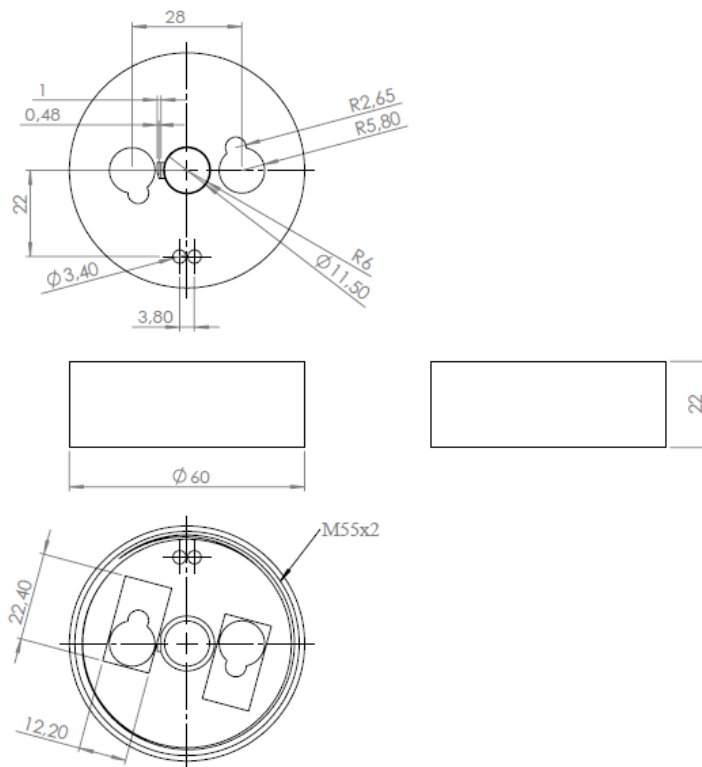
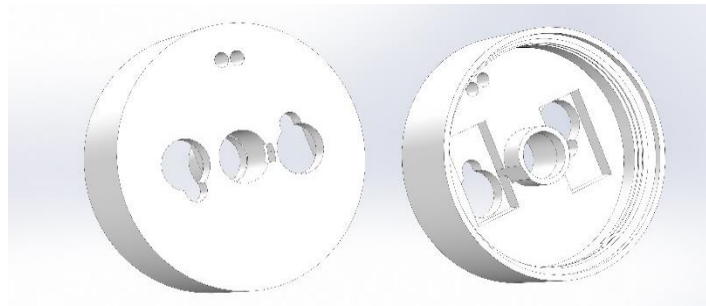
Σχήμα 1.3.2 Ανάπτυγμα εργαλείου συγκράτησης λείζερ

Θήκη

Η θήκη αποτελείται από δύο μέρη, τη “κεφαλή” και το “σώμα”. Οι διαστάσεις της θήκης είναι 90mm x 60mm, συμπεριλαμβανομένου και του λαιμού που προστέθηκε για επαρκή συγκράτηση από τον εργαλειοδέτη. Είναι φτιαγμένο από πλαστικό καθώς έχει κατασκευαστεί εξολοκλήρου από 3D εκτυπωτή όπως και τα υπόλοιπα μέρη του εργαλείου συγκράτησης. Επίσης είναι κούφιο εσωτερικά έτσι ώστε να χωράει όλες τις απαραίτητες ηλεκτρονικές συσκευές καθώς και τα καλώδια. Τα σχέδια του “σώματος” και της “κεφαλής” παρουσιάζονται παρακάτω:



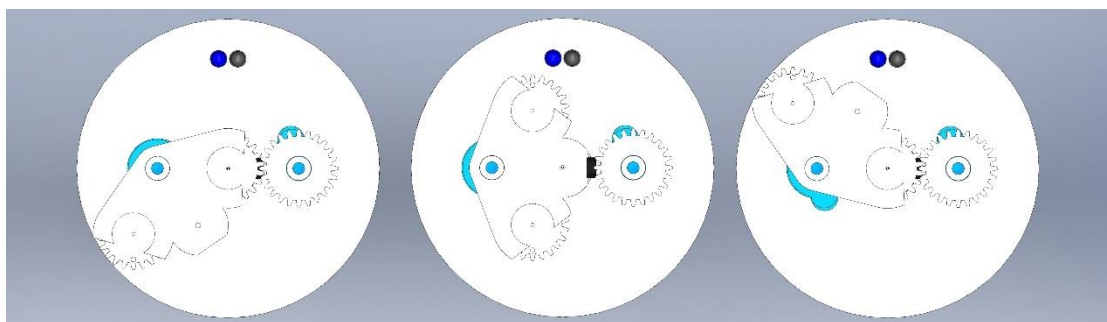
Σχήμα 1.3.3 Σχέδιο θήκης “σώμα”



Σχήμα 1.3.4 Σχέδιο θήκης “κεφαλή”

Τροποποιητής δέσμης

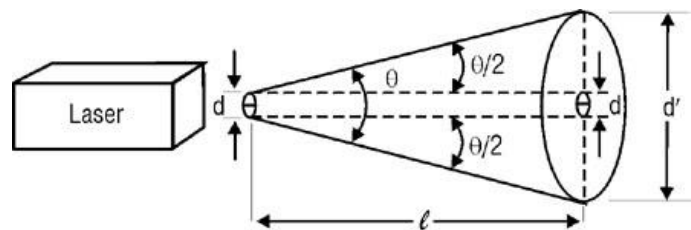
Ο τροποποιητής δέσμης είναι ένας μηχανισμός που ελέγχει το σχήμα και την διεύθυνση της δέσμης λέιζερ. Τα διαθέσιμα σχήματα είναι η τελεία, η γραμμή και ο σταυρός. Αυτές οι τρεις γωνιακές θέσεις του σερβοκινητήρα αποθηκεύονται στον μικροελεγκτή, ο οποίος μέσω μιας συγκεκριμένης εντολής από το G-κώδικα ελέγχει τη γωνιακή θέση του κινητήρα και άρα τη βάση των ακρυλικών φακών.



Σχήμα 1.3.5 Θέσεις σχημάτων δέσμης “σταυρός”, “τελεία”, “γραμμή”

Όσον αφορά την διεύθυνση της γραμμής, μπορεί να επιτευχθεί οποιαδήποτε γωνία, ωστόσο προς το παρόν μόνο δύο διευθύνσεις είναι καταχωρημένες στον μικροελεγκτή, η οριζόντια (0°) και η κάθετη (90°). Επιπλέον, κάθε φορά που επιλέγεται η γραμμή ή ο σταυρός, ο μικροελεγκτής πραγματοποιεί μια αρχικοποίηση της γωνιακής θέσης της δέσμης στην οριζόντια διεύθυνση. Η αρχικοποίηση επιτυγχάνεται με τη συνεργασία του δεύτερου σερβοκινητήρα, του αισθητήρα Hall και του μικροελεγκτή. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ο αισθητήρας Hall είναι ευθυγραμμισμένος με το κέντρο της διόδου λέιζερ καθώς και με τα κέντρα των άξονων των δύο σερβοκινητήρων. Επίσης, έχει τοποθετηθεί ακριβώς πάνω από τα δόντια του γραναζιού το οποίο συγκρατεί τον ακρυλικό φακό. Ακόμα, έχουν τοποθετηθεί μικροί μαγνήτες σε συγκεκριμένα σημεία σε αυτά τα γρανάζια και επομένως, όταν ο αισθητήρας Hall και ένας μαγνήτης συμπίπτουν, ο μικροελεγκτής λαμβάνει τη πληροφορία από τον αισθητήρα ότι έχει επιτευχθεί η οριζόντια διεύθυνση.

Επιπλέον, κάτι εξίσου σημαντικό που ελήφθη υπόψη ήταν το μέγεθος της δέσμης λέιζερ. Οι μονάδες λέιζερ, όπως και αυτή που χρησιμοποιείται εδώ, διαθέτουν συγκεντρωτικό φακό ο οποίος χρησιμοποιείται για να εστιάσει τη δέσμη λέιζερ. Παρόλα αυτά, ακόμα και αν είναι σωστά εστιασμένη, η διάμετρος της δέσμης λέιζερ εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της πηγής φωτός και του σημείου στόχευσης. Η γωνιακή μεταβολή, λόγω της αύξησης της διαμέτρου της δέσμης με την απόσταση, ονομάζεται απόκλιση δέσμης. Συνήθως, οι δίοδοι λέιζερ χαμηλού κόστους που περιλαμβάνονται σε αυτές τις μονάδες λέιζερ έχουν σημαντική απόκλιση που προκαλεί προβλήματα ακρίβειας.



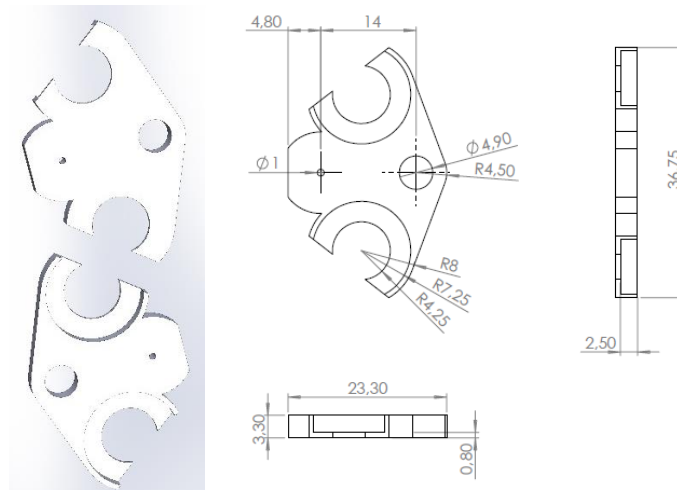
Σχήμα 1.3.6 Απόκλιση δέσμης λέιζερ (physics.stackexchange.com)

Ωστόσο, ένας τρόπος να μειωθεί η διάμετρος της δέσμης και να αποφευχθεί η απόκλιση είναι να χρησιμοποιηθεί μία στένωση. Ακόμα κι αν αυτή η στένωση μειώνει τη φωτεινότητα του λέιζερ, καθώς κόβει ένα μέρος από τη δέσμη, μπορεί να είναι ωφέλιμη όσον αφορά την ακρίβεια.[11]



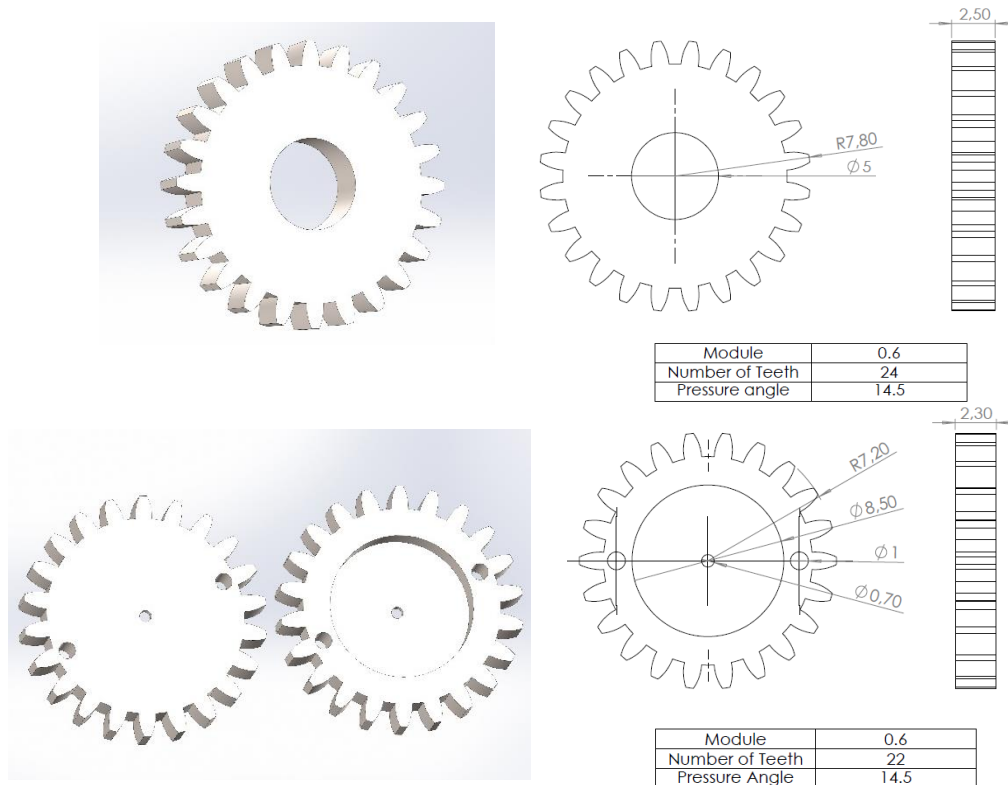
Σχήμα 1.3.7 Στένωση Δέσμης

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εστίαση της δέσμης στοχεύοντας στο άδειο δοχείο από απόσταση λίγων εκατοστών και ο συγκεντρωτικός φακός ρυθμίστηκε μέχρις ότου το πλάτος της δέσμης ήταν όσο το δυνατόν στενότερο σε αυτή την απόσταση. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε ένα άνοιγμα στη βάση των φακών αλλά και στα γρανάζια που συγκρατούν τους ακρυλικούς φακούς, για να περνά μόνο ένα μέρος της δέσμης και να μειωθεί η απόκλιση της. Τέλος, η διάμετρος της τελείας ή κηλίδας είναι λιγότερο από 1mm και το μέγεθος της γραμμής είναι περίπου 7mm x 1mm. Τα σχέδια της βάσης των φακών παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 1.3.8 Σχέδιο βάσης ακρυλικών φακών

Επιπλέον, τα σχέδια των γραναζιών παρουσιάζονται παρακάτω:

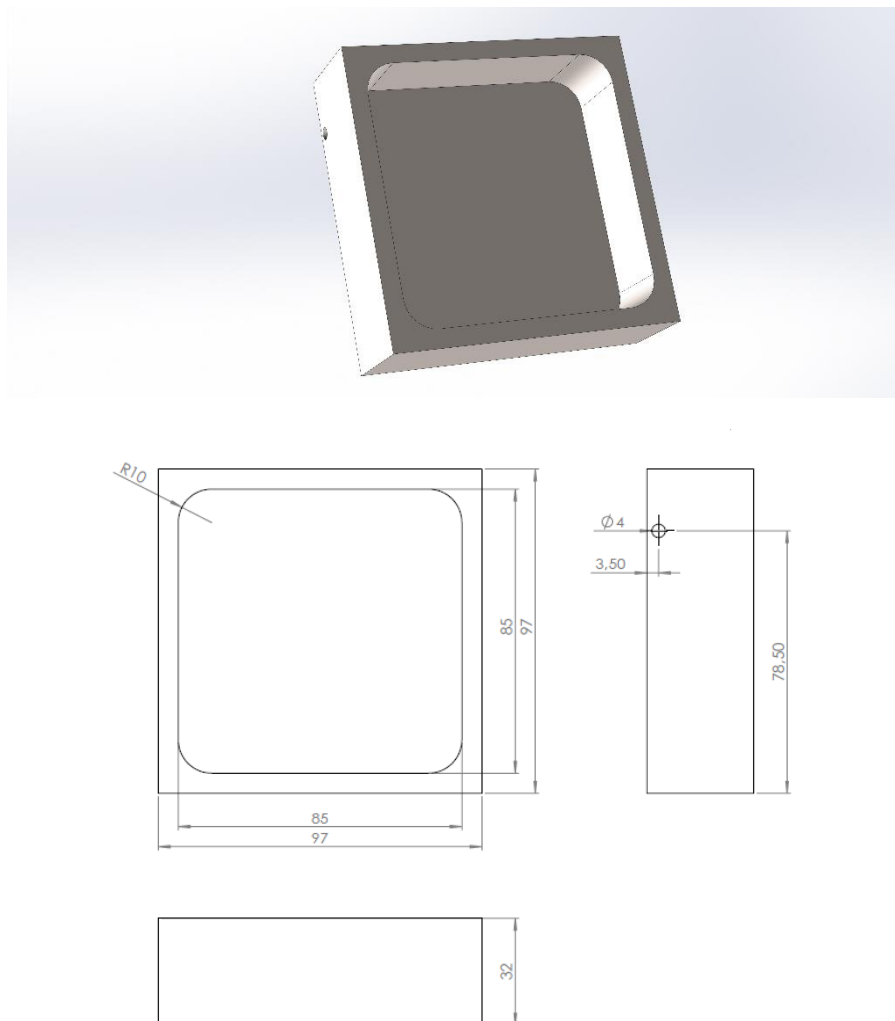


Σχήμα 1.3.9 Σχέδιο γραναζιών μηχανισμού τροποποίησης δέσμης

1.3.2. Δοχείο

Το δοχείο όπου πραγματοποιείται η εκτύπωση είναι πολύ πιο σημαντικό από ό,τι δείχνει η πρώτη ματιά. Είναι από αλουμίνιο και έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο της σχολής.[1] Ωστόσο, δεν είναι απλά ένα δοχείο για να συγκρατεί τη ρητίνη στη θέση της, αλλά λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων του αλουμινίου, έχει επίσης εξαιρετική θερμική αγωγιμότητα καθώς και θερμική θερμοχωρητικότητα. Αυτές οι ιδιότητες είναι σημαντικές καθώς το δοχείο μπορεί να θερμανθεί μέσω μιας εξωτερικής πηγής θέρμανσης, όπως είναι το θερμαντικό στοιχείο σιλικόνης, και απαιτεί λιγότερη ενέργεια για τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας στο δοχείο μπορεί να βελτιώσει τόσο τον απαιτούμενο χρόνο έκθεσης όσο και τον βαθμό πολυμερισμού του τελικού αντικειμένου.

Ακόμη, το μέγεθος του δοχείου καθορίζει το μέγιστο μέγεθος των εκτυπώσιμων αντικειμένων. Για τη φορητή συσκευή SLA, οι εξωτερικές διαστάσεις του δοχείου είναι 97mm x 97mm x 32mm και οι εσωτερικές διαστάσεις 85mm x 85mm x 25 mm. Πιο αναλυτικά τα σχέδια παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 1.3.10 Σχέδιο δοχείου

1.4. Αλγόριθμοι

1.4.1. Προγραμματισμός Μικροελεγκτή

Η γλώσσα προγραμματισμού του Arduino είναι βασισμένη στη C++, εμπεριέχοντας ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, αναπτυγμένες επίσης στην C++. Μέχρι σήμερα, η κοινότητα Arduino έχει συμβάλει σημαντικά δημιουργώντας πολλές βιβλιοθήκες, ωστόσο εξακολουθούν να υπάρχουν εφαρμογές που χρειάζονται βιβλιοθήκες με ειδικά χαρακτηριστικά. Για τη φορητή συσκευή SLA, έχουν δημιουργηθεί μια σειρά βιβλιοθηκών για να γίνει ο κώδικας πολύ πιο οργανωμένος και εύκολος στην επεξεργασία ή στην διόρθωση, αν χρειαστεί. Γενικά, αυτές οι βιβλιοθήκες λειτουργούν ως υπορουτίνες του κύριου αλγορίθμου. Χρησιμοποιούνται προκειμένου τα υποσυστήματα να λειτουργούν σωστά. Για τα δύο υποσυστήματα “άντλησης” και “δέσμης”, έχουν οριστεί συνολικά έντεκα εντολές. Κάθε εντολή δεν είναι τίποτα περισσότερο από ένα μόνο χαρακτήρα, που αποστέλλεται από τη μηχανή CNC στον μικροελεγκτή μέσω της εντολής DPRNT και του υποσυστήματος “επικοινωνίας”.

Για το υποσύστημα “άντλησης” υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές εντολές:

1. Η πρώτη με το χαρακτήρα “I”, χρησιμοποιείται κατά την εκκίνηση κάθε εκτύπωσης. Αυτή η εντολή ενεργοποιεί την αντλία έως ότου το σωληνάκι σιλικόνης να γεμίσει με ρητίνη μέχρι το άλλο άκρο του. Μετά από αυτή την εντολή, το υποσύστημα άντλησης μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης σε κάθε νέα στρώση με ακρίβεια, όποτε αυτή ζητηθεί.
2. Η εντολή με το χαρακτήρα “E”, χρησιμοποιείται στο τέλος κάθε εκτύπωσης. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει την υπόλοιπη μη πολυμερισμένη ρητίνη από το δοχείο μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης. Μετά από αυτήν την εντολή, το αντικείμενο μπορεί να αφαιρεθεί με ασφάλεια.
3. Η εντολή με το χαρακτήρα “N”, χρησιμοποιείται στην αρχή κάθε νέας στρώσης. Αυτή η εντολή παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης για κάθε νέα στρώση. Η ποσότητα της ρητίνης εξαρτάται από την ποιότητα της εκτύπωσης, δηλαδή από το προκαθορισμένο πάχος στρώσης.
4. Η εντολή με το χαρακτήρα “S”, χρησιμοποιείται στην αρχή κάθε νέας στρώσης. Μέσω αυτής της εντολής μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι η απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης έχει εισέλθει μέσα στο δοχείο, χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα απόστασης για να πραγματοποιηθεί μέτρηση της στάθμης της ρητίνης. Εάν υπάρχει λιγότερη ρητίνη από ότι απαιτείται, το υποσύστημα άντλησης παρέχει ρητίνη μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποσότητα. Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής στέλνει μια εντολή “E?” στην εργαλειομηχανή CNC μέσω της λειτουργίας MDC, για να τη βγάλει από τη λειτουργία αναμονής και να συνεχίσει τη διαδικασία εκτύπωσης.

Για το υποσύστημα “δέσμης” έχουν οριστεί επτά εντολές:

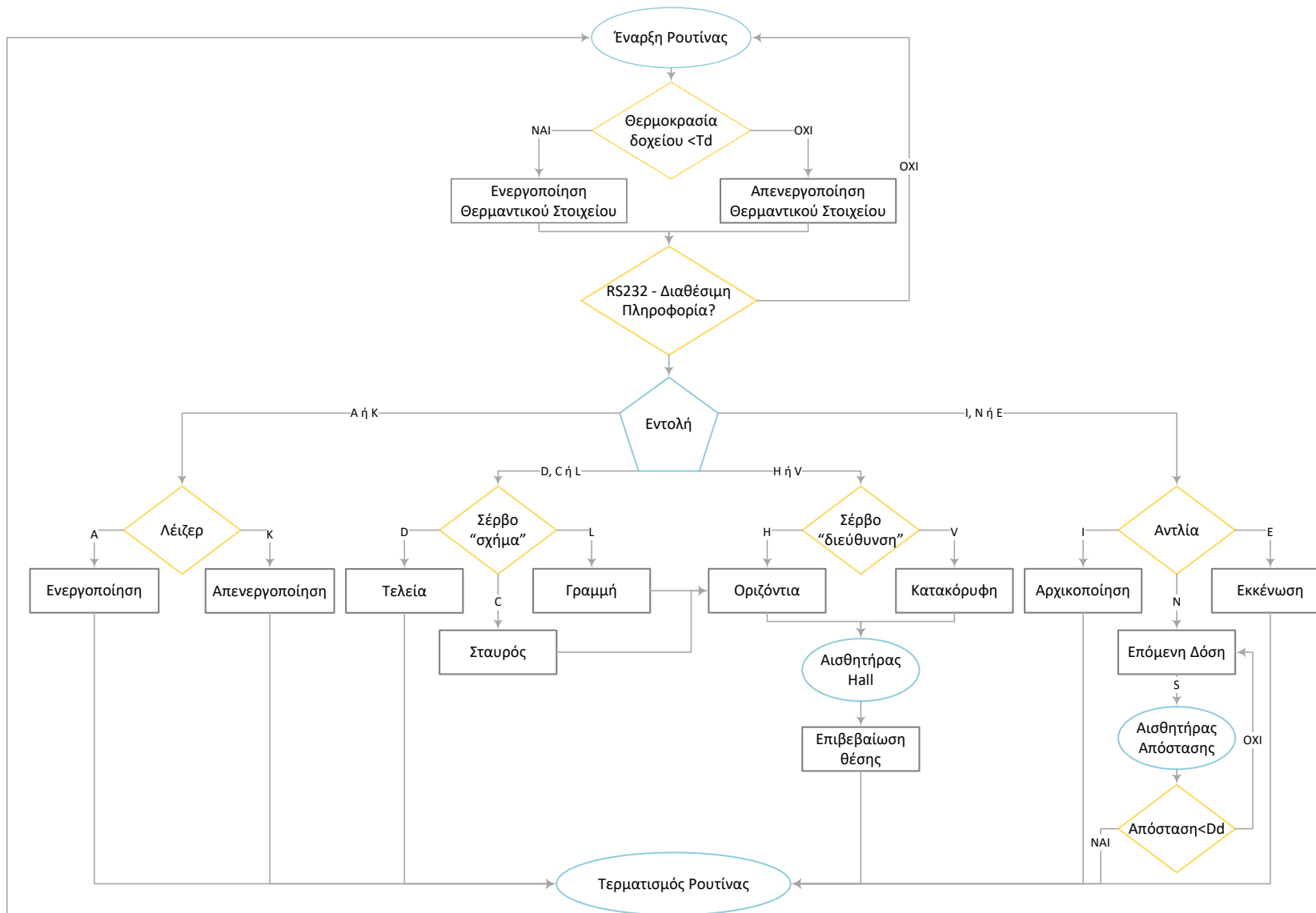
1. Η εντολή με το χαρακτήρα “H”, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο από μία φορά σε ένα πρόγραμμα, ανάλογα με τη διαδικασία. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της δέσμης λέιζερ στην οριζόντια διεύθυνση ή με κλίση μηδέν μοίρες (0°).
2. Η εντολή με το χαρακτήρα “V”, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο από μία φορά σε ένα πρόγραμμα, ανάλογα με τη διαδικασία. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της δέσμης λέιζερ στην κατακόρυφη διεύθυνση ή με κλίση ενενήντα μοίρες (90°). Συνήθως, οι εντολές “H” και “V” χρησιμοποιούνται εναλλάξ στην αρχή κάθε νέας στρώσης.
3. Η εντολή με το χαρακτήρα “D”, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο από μία φορά σε ένα πρόγραμμα, ανάλογα με τη διαδικασία. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της δέσμης λέιζερ σε σχήμα τελείας ή κηλίδας.
4. Η εντολή με το χαρακτήρα “L”, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερες από μία φορές σε ένα πρόγραμμα, ανάλογα με τη διαδικασία. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της δέσμης λέιζερ σε σχήμα γραμμής. Μετά από αυτήν την εντολή, η δέσμη είναι στην οριζόντια διεύθυνση.
5. Η εντολή με το χαρακτήρα “C”, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περισσότερο από μία φορά σε ένα πρόγραμμα, ανάλογα με τη διαδικασία. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της δέσμης λέιζερ σε σχήμα σταυρού.

Επιπλέον, για την κατάσταση λειτουργίας του λέιζερ υπάρχουν δύο εντολές:

1. Η εντολή με το χαρακτήρα “A”, χρησιμοποιείται επανειλημμένα σε ένα πρόγραμμα. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του λέιζερ.
2. Τέλος, η εντολή με το χαρακτήρα “K”, χρησιμοποιείται επανειλημμένα σε ένα πρόγραμμα. Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται για την απενεργοποίηση του λέιζερ και χρησιμοποιείται πάντα στο τέλος του προγράμματος για λόγους ασφαλείας, για να βεβαιωθεί ότι το λέιζερ είναι κλειστό.

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υποσυστήματα, για το υποσύστημα “θέρμανσης” δεν υπάρχει ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ του μικροελεγκτή και της εργαλειομηχανής CNC. Ανάλογα με τη μέτρηση του θερμίστορ, ο μικροελεγκτής αποφασίζει για την κατάσταση (ενεργοποίηση / απενεργοποίηση) του θερμαντικού στοιχείου σιλικόνης.

Στην επόμενη σελίδα, η δομή του κύριου αλγορίθμου παρουσιάζεται σε ένα μπλοκ διάγραμμα.



Σχήμα 1.4.1 Λογική αλγορίθμου μικροελεγκτή

1.4.2. Αλγόριθμοι Matlab

Δύο αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν σε κώδικα MATLAB, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως βήματα πριν από τη διαδικασία εκτύπωσης. Ο ένας τροποποιεί το αρχείο G-code το οποίο έχει παραχθεί από το λογισμικό τεμαχισμού Cura και ο άλλος αλγόριθμος μετατρέπει ένα αρχείο STL απευθείας σε G-code.

Μετατροπή G-κώδικα “Cura σε CNC”

Αρχικά, το Cura είναι μια εφαρμογή ανοιχτού κώδικα. Προσφέρει περισσότερες από 300 ρυθμίσεις για μέγιστο έλεγχο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από πολλούς 3D εκτυπωτές. Ωστόσο, η κατάλληλη σύνταξη του G-κώδικα για μια εργαλειομηχανή CNC διαφέρει από αυτή μιας μηχανής AM. Για το λόγο αυτό, το αρχείο του G-κώδικα που εξάγεται από το λογισμικό τεμαχισμού πρέπει να τροποποιηθεί πριν μεταφερθεί στην εργαλειομηχανή CNC. Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε τροποποιεί το αρχείο έτσι ώστε να έχει σωστή σύνταξη, καθώς επίσης προσθέτει τις εντολές ή τις μακροεντολές DPRNT. Πιο αναλυτικά, σε αυτόν τον αλγόριθμο:

- Η σύνταξη του G-κώδικα τροποποιείται

Ο G-κώδικας που παράγεται από το λογισμικό τεμαχισμού, αποτελείται από εντολές G και M μαζί με σχόλια και ρυθμίσεις για το υλικού. Το μεγαλύτερο μέρος του κώδικα αντικαθίσταται, εκτός από τις συντεταγμένες του άξονα X και Y και τη συνολική στρατηγική εκτύπωσης. Για παράδειγμα, η αρχική θέση του άξονα Z έχει επιλεγεί με βάση την απόσταση με τη καλύτερη εστίαση της δέσμης λέιζερ. Έπειτα, ως στρατηγική εκτύπωσης με πολλαπλές στρώσεις, σε κάθε βήμα το πάχος της στρώσης προστίθεται στον άξονα Z προκειμένου να διατηρηθεί αυτή η απόσταση σταθερή.

- Προστίθενται δύο ενότητες στην αρχή και στο τέλος του προγράμματος

Προστίθενται μερικές γραμμές κώδικα για να πραγματοποιείται σωστή εκκίνηση και τερματισμός του προγράμματος. Αυτές οι ενότητες περιέχουν το σύμβολο “%” για να υποδηλώσει την αρχή και το τέλος του προγράμματος, τον αριθμό του προγράμματος “O”, το όνομα του αρχείου, τη μονάδα μέτρησης του συστήματος και της πρόωσης, το σύστημα συντεταγμένων, την αρχή συντεταγμένων, την προτιμώμενη λειτουργία HSM και την εντολή M30 στο τέλος του προγράμματος. Για παράδειγμα:

```
%
O00106;
(TEST);
G21 G54 G90 G94.
G187 P3;
...
M30;
%
```


- Προστίθενται μακροεντολές DPRNT

Οι εντολές χαρακτήρων όπως A, K, N, S, οι οποίες αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προστίθενται επίσης στον κώδικα. Οι μόνες εξαιρέσεις είναι οι εντολές L, C, V, H, καθώς η διαδικασία λειτουργεί μόνο με τη δέσμη σχήματος τελείας, “D”. Για τη σωστή εκτέλεση κάθε εντολής, προστίθενται δύο ακόμη μπλοκ. Αρχικά, προστίθεται ο χαρακτήρας της καθέτου “/” πριν από την εντολή για να περιοριστεί η λειτουργία “lookahead” της εργαλειομηχανής. Έπειτα, μετά από την εντολή προστίθεται μια καθυστέρηση για να δοθεί ο απαιτούμενος χρόνος για ολοκλήρωση της εντολής. Η διάρκεια αυτής της καθυστέρησης ή αναμονής της μηχανής, επιλέγεται ανάλογα την εντολή. Για παράδειγμα:

```
...
/;
DPRNT [N];
G04 P11.0;
...
```

- Προστίθενται συνθήκες και βρόγχοι

Κάθε φορά που ολοκληρώνεται μια στρώση, το εργαλείο μετακινείται σε θέση ασφαλείας μακριά από το δοχείο. Στη συνέχεια, μια νέα δόση ρητίνης εισάγεται μέσα στο δοχείο. Για να απλωθεί ομοιόμορφα η νέα δόση ρητίνης, αλλά και για να επιτευχθεί ομοιόμορφη θερμοκρασία στο δοχείο, γίνονται μικρές επαναλαμβανόμενες κινήσεις για να προκληθούν δονήσεις. Καθώς προστίθενται περισσότερες στρώσεις, σταδιακά μειώνεται η ένταση των δονήσεων. Έπειτα από αυτή τη διαδικασία ανάμιξης, το εργαλείο μετακινείται πάνω από το δοχείο και μπαίνει μέσα σε αυτό, μερικά χιλιοστά πάνω από τη στάθμη της ρητίνης. Στη συνέχεια, καθώς η εργαλειομηχανή CNC βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, η εντολή “S” ενεργοποιεί τον αισθητήρα υπερύθρων για μέτρηση της στάθμης. Και οι δύο παραπάνω ενέργειες υλοποιούνται με τη χρήση της συνθήκης WHILE ... DO ... END. Η σωστή σύνταξη είναι η εξής:

```
...
WHILE ["συνθήκη"] DOn;
...
ENDn;
...
```

- Προστίθενται επίσης εξισώσεις

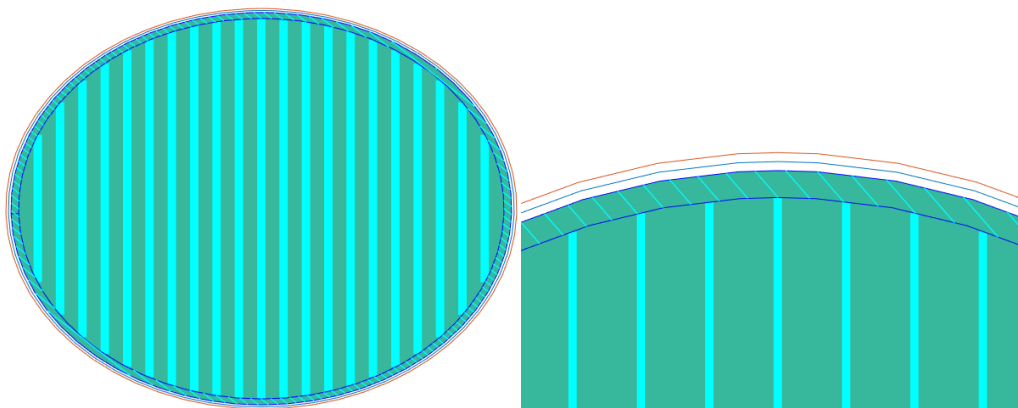
Τέλος, εκτελούνται επίσης κάποιες εξισώσεις κατά τη διάρκεια που ο G-κώδικας τρέχει, προκειμένου να ενημερώνεται ο χρήστης/χειριστής για τον εναπομείναντα χρόνο εκτύπωσης και το ποσοστό του ήδη εκτυπωμένου αντικειμένου, σε λεπτά και επί τοις εκατό % αντίστοιχα. Αυτές οι δύο εξισώσεις χρησιμοποιούν τη συνάρτηση ROUND και τη μεταβλητή συστήματος #3001, η οποία είναι χρονομετρητής σε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Και τα δύο αποτελέσματα των εξισώσεων εμφανίζονται στη κεντρική οθόνη της εργαλειομηχανής CNC “Χρονοδιακόπτες & μετρητές”. Τα αποτελέσματα ανανεώνονται στο τέλος κάθε στρώσης.

Μετατροπή STL σε G-code

Ο παραγόμενος G-κώδικας μέσω αυτού του αλγορίθμου χρησιμοποιεί την ίδια σύνταξη με το κώδικα που προκύπτει από το προηγούμενο αλγόριθμο, συμπεριλαμβανομένων όλων των πρόσθετων χαρακτηριστικών. Ωστόσο, αυτός ο αλγόριθμος κάνει και τη διαδικασία τεμαχισμού. Δέχεται ως είσοδο ένα αρχείο STL και γενικά, έχει κάποιες ομοιότητες με ένα κοινό λογισμικό τεμαχισμού. Όμως, η στρατηγική και η διαδρομή που ακολουθεί το εργαλείο αλλάζει καθώς χρησιμοποιούνται και τα δύο σχήματα δέσμης, τελεία και γραμμή. Το κύριο πλεονέκτημα με τη χρήση της γραμμής κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, είναι ότι μειώνει τον χρόνο εκτύπωσης καθώς σαρώνει μια πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια με ένα μόνο πέρασμα. Έτσι, απαιτεί λιγότερο πυκνή διαδρομή. Επιπλέον, σε αυτή τη διεργασία τα αντικείμενα που δημιουργούνται έχουν παχύ τοίχωμα και είναι 100% συμπαγή στο εσωτερικό τους. Η στρατηγική είναι η ακόλουθη:

Ως πρώτο βήμα, επιλέγεται το σχήμα τελείας. Αρχικά, σχηματίζεται το τείχος το οποίο αποτελείται από ένα εσωτερικό και τρία εξωτερικά κελύφη. Γενικά, ένα πάχος τοιχώματος δύο ή τριών κελυφών είναι ικανοποιητικό. Κάθε κέλυφος δημιουργείται πλήρως πριν ξεκινήσει το επόμενο. Στη συνέχεια, η περιοχή μεταξύ του εσωτερικού κελύφους και του πρώτου εξωτερικού κελύφους σαρώνεται πλήρως με γραμμικές κινήσεις υπό γωνία -45° .

Ως δεύτερο βήμα, επιλέγεται το σχήμα γραμμής. Η διεύθυνση της γραμμής είναι οριζόντια, από προεπιλογή. Άρα, η υπόλοιπη περιοχή μέσα από το εσωτερικό κέλυφος σαρώνεται με γωνία 90° . Για παράδειγμα, εάν το αντικείμενο είναι ένας κύλινδρος, η διαδρομή στη πρώτη στρώση φαίνεται παρακάτω:

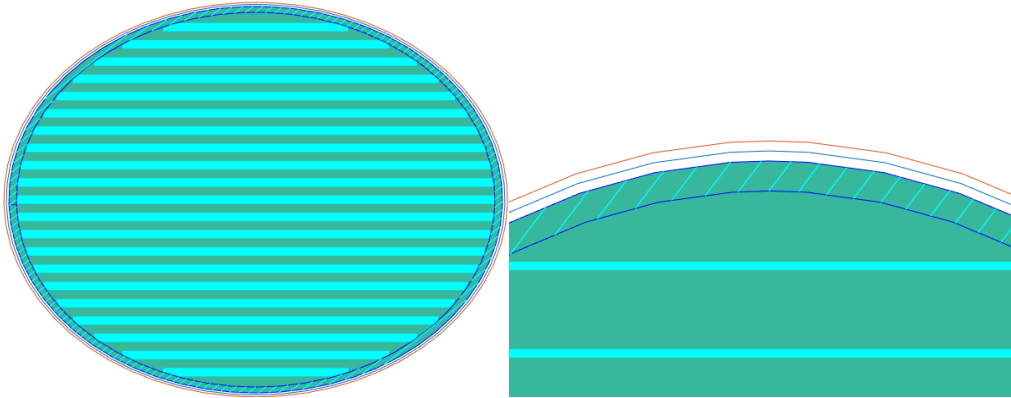


Σχήμα 1.4.2 Μονοπάτι σάρωσης 1^{ης} στρώσης

όπου,

Κόκκινες, μπλε γραμμές:	Η διαδρομή για το τοίχωμα
Λεπτές κυανές γραμμές:	Η διαδρομή γεμίσματος “τελείας”
Παχύτερες κυανές γραμμές:	Η διαδρομή γεμίσματος “γραμμής”

Αυτά τα δύο βήματα επαναλαμβάνονται σε κάθε στρώση της διαδικασίας εκτύπωσης, αλλά με μια μικρή διαφορά. Η γωνία γέμισματος εναλλάσσεται με τη μέθοδο ζιγκ-ζαγκ, δηλαδή με τη τελεία το γέμισμα γίνεται με γραμμικές κινήσεις υπό γωνία $[-45^\circ, 45^\circ]$ εναλλάξ ενώ η γραμμή $[90^\circ, 0^\circ]$. Επομένως, για το ίδιο παράδειγμα, η διαδρομή στη δεύτερη στρώση φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 1.4.3 Μονοπάτι σάρωσης 2^{ης} στρώσης

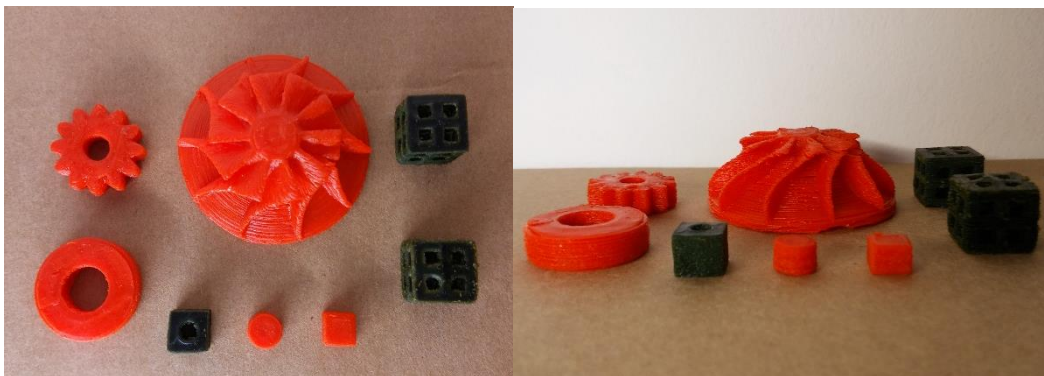
Για την ανάπτυξη αυτού του αλγορίθμου έχουν χρησιμοποιηθεί δύο βιβλιοθήκες από τη κοινότητα MATLAB.[12], [13] Αυτή η μέθοδος εκτύπωσης παρέμεινε μόνο στην ανάπτυξη του λογισμικού χωρίς να προχωρήσει στο πειραματικό στάδιο λόγω έλλειψης χρόνου. Έγιναν μόνο λίγες δοκιμές χρησιμοποιώντας την εργαλειομηχανή CNC για να ελεγχθεί ο παραγόμενος κώδικας, ο οποίος δουλεύει αρκετά ικανοποιητικά.

2. Αποτελέσματα

Συχνά, η μέτρηση ενός πολύπλοκου τρισδιάστατου αντικειμένου με ακρίβεια είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Άρα, για καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε η χρήση ενός τρισδιάστατου σαρωτή και πιο συγκεκριμένα η μέθοδος σάρωσης λευκού φωτός. Έπειτα από τη διαδικασία της σάρωσης ακολούθησε η ανάλυση των αποτελεσμάτων μέσω του λογισμικού Geomagic Studio και η σύγκριση του τρισδιάστατου μοντέλου που είχε αρχικά σχεδιαστεί σε πρόγραμμα CAD και του του τρισδιάστατου μοντέλου που προέκυψε από τη σάρωση.

2.1. Χρησιμοποιώντας τη δίοδο λέιζερ 20mW

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, κατασκευάστηκαν πολλά διαφορετικά αντικείμενα. Οι παράμετροι της κάθε εκτύπωσης επηρέαζαν σημαντικά τις τελικές ιδιότητες των εξαρτημάτων. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν, μαζί με τα συνολικά χαρακτηριστικά του κάθε αντικειμένου, θα συζητηθούν για κάθε εκτύπωση ξεχωριστά. Πέρα από τις παραμέτρους της κάθε εκτύπωσης, η ισχύς εξόδου της δίοδου λέιζερ, καθώς και η χρήση του υπέρυθρου αισθητήρα απόστασης, είχαν σημαντική επίδραση στα χαρακτηριστικά των τελικών αντικειμένων. Οι περισσότερες προσπάθειες έγιναν με τη δίοδο λέιζερ 20mW. Μερικά από τα εκτυπωμένα αντικείμενα παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 2.1.1 Κατασκευασμένα αντικείμενα με τη δίοδο λέιζερ 20mW

Η φορητή συσκευή SLA κατάφερε να εκτυπώσει διάφορα αντικείμενα τόσο με απλή όσο και με σύνθετη δομή, ωστόσο είχε κάποιους περιορισμούς. Προκειμένου να ξεπεραστούν κάποια μειονεκτήματα στις διαστάσεις, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας απόστασης υπέρυθρης ακτινοβολίας. Μια πιο λεπτομερής συζήτηση γίνεται στις επόμενες σελίδες.

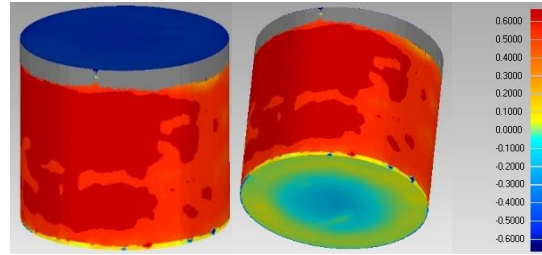
2.1.1. Χωρίς τον αισθητήρα απόστασης

Κύλινδρος

Διαστάσεις μοντέλου: 6 x 5.4 mm

Μέση απόκλιση: ± 0.18 mm

Μέγιστη απόκλιση: ± 0.66 mm



Σχήμα 2.1.2 Ανάλυση απόκλισης κυλίνδρου

Η απουσία τόσο της λειτουργίας lookahead όσο και του αισθητήρα απόστασης οδήγησε σε κακή ακρίβεια διαστάσεων. Η συνολική ποιότητα του εξαρτήματος είναι χαμηλή, διότι αν και η κρίσιμη έκθεση E_c επιτεύχθηκε, δεν ήταν αρκετή για πολυμερισμό της ρητίνη σε υψηλό βαθμό.

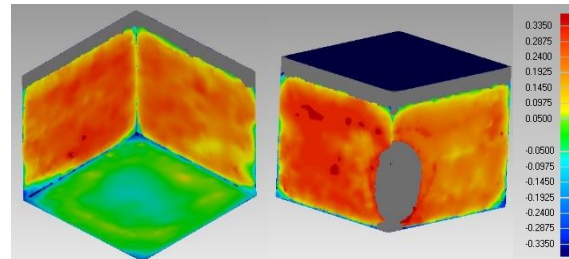
- Με την λειτουργία lookahead ενεργοποιημένη και το HSM στη λειτουργία “φινιρίσματος” η επιφάνεια θα μπορούσε να είναι πολύ πιο ομαλή καθώς τα ευθύγραμμα τμήματα του αρχείου STL θα μπορούσαν να μετατραπούν σε τόξα.
- Χωρίς ανάδραση για τη στάθμη της ρητίνης στο εσωτερικό του δοχείου, η απόκλιση στο ύψος ήταν αναπόφευκτη.

Κύβος

Διαστάσεις μοντέλου: 6 x 6 x 6 mm

Μέση απόκλιση: ± 0.12 mm

Μέγιστη απόκλιση: -0.6 mm



Σχήμα 2.1.3 Ανάλυση απόκλισης κύβου

Η διαδικασία εκτύπωσης ήταν ίδια με αυτή του κυλίνδρου. Εδώ η απουσία του χαρακτηριστικού lookahead δεν φαίνεται να έχει ιδιαίτερη επιρροή στη διαδικασία, αν και εξακολουθεί να υπάρχει μια κακή ποιότητα επιφάνειας.

- Πιθανότατα, εκτός από το χαρακτηριστικό lookahead, οι διαθλούμενες ακτίνες της δέσμης λέιζερ μπορεί να προκαλούν την απόκλιση των διαστάσεων.
- Υπάρχει ελαφρά συρρίκνωση στο κάτω μέρος του τμήματος. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να βοηθήσει.

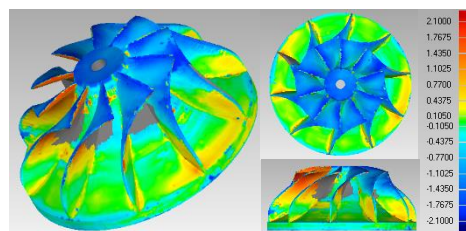
Οι παράμετροι εκτύπωσης και των δύο αντικειμένων είναι οι εξής:

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	1200	mm/min
Πρόωση Κελύφους	600	mm/min
Πρόωση Γεμίματος	600	mm/min
Θερμοκρασία	45	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.6	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.4	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.1 Παράμετροι εκτύπωσης κύβου, κυλίνδρου

Πτερωτή

Διαστάσεις μοντέλου: 41.9 x 18.3 mm
 Μέση απόκλιση: +0.35, -0.58 mm
 Μέγιστη απόκλιση: ± 2.1 mm



Σχήμα 2.1.4 Ανάλυση απόκλισης πτερωτής

Μετά από αρκετά αντικείμενα με απλή γεωμετρία, έγινε μια προσπάθεια να εκτυπωθεί μια πτερωτή. Γενικά, το αποτέλεσμα ήταν εντυπωσιακό καθώς ο εκτυπωτής κατόρθωσε να διαμορφώσει μια πολύπλοκη γεωμετρία χωρίς τη χρήση κάποιας στήριξης.

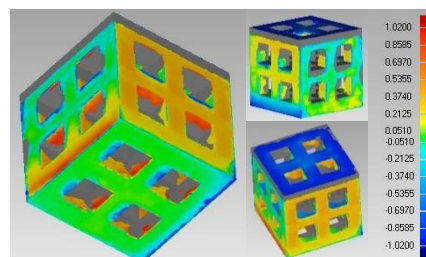
Σε αυτήν τη διαδικασία εκτύπωσης, η λειτουργία lookahead ήταν ενεργοποιημένη. Επιπλέον, επιλέχθηκε αύξηση τόσο στην ταχύτητα εκτύπωσης όσο και στη θερμοκρασία του δοχείου.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	2000	mm/min
Πρόωση Κελύφους	1800	mm/min
Πρόωση Γεμίματος	1800	mm/min
Θερμοκρασία	60	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.6	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.4	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.2 Παράμετροι εκτύπωσης πτερωτής

Κύβος με οπές

Διαστάσεις μοντέλου: 12 x 12 x 12 mm
 Διαστάσεις οπών: 3 x 3 mm
 Μέση απόκλιση: +0.26, -0.37 mm
 Μέγιστη απόκλιση: ± 1 mm



Σχήμα 2.1.5 Ανάλυση απόκλισης κύβου με οπές

Σε αυτή τη διαδικασία εκτύπωσης, η ταχύτητα του κελύφους ήταν υψηλότερη από την ταχύτητα γεμίματος. Ως αποτέλεσμα, η ακρίβεια στις διαστάσεις βελτιώθηκε με ταυτόχρονη βελτίωση του βαθμού πολυμερισμού του αντικειμένου, καθώς αυξήθηκε ο χρόνος έκθεσης.

- Για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, η χρήση του αισθητήρα απόστασης είναι αναπόφευκτη.
- Η διαφορετική ταχύτητα γεμίματος και κελύφους οδήγησε σε ένα αποδεκτό βαθμό πολυμερισμού.

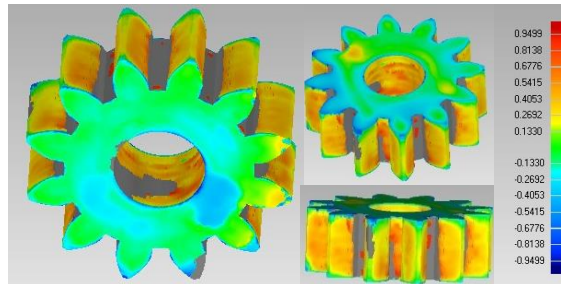
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	800	mm/min
Πρόωση Κελύφους	2500	mm/min
Πρόωση Γεμίματος	300	mm/min
Θερμοκρασία	60	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.6	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.4	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.3 Παράμετροι εκτύπωσης κύβου με οπές

2.1.2. Με τον αισθητήρα απόστασης

Γρανάζι

Διαστάσεις μοντέλου: 18.7 x 6.3 mm
 Εσωτερική Διάμετρος: 6.3 mm
 Μέση απόκλιση: +0.35, -0.18 mm
 Μέγιστη απόκλιση: ± 0.94 mm



Σχήμα 2.1.6 Ανάλυση απόκλισης γραναζιού

Οι παράμετροι της εκτύπωσης που επιλέχθηκαν ήταν όμοιοι με αυτούς της περωτής. Ωστόσο, αυτή τη φορά το αντικείμενο κατασκευάστηκε έχοντας ανάδραση από τον αισθητήρα απόστασης.

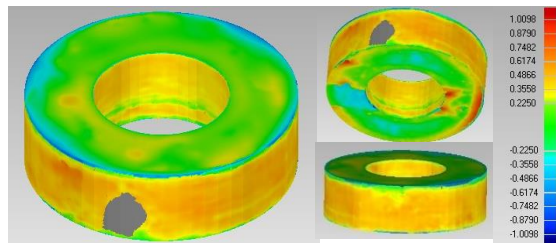
- Η χρήση του αισθητήρα είχε σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα. Οι άνω και κάτω επιφάνειες φαίνεται να έχουν απόκλιση μικρότερη από 0.1 mm (πράσινη περιοχή).
- Ίσως διαφορετική ταχύτητα γεμίσματος και κελύφους θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	2000	mm/min
Πρόωση Κελύφους	1800	mm/min
Πρόωση Γεμίσματος	1800	mm/min
Θερμοκρασία	60	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.6	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.4	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.4 Παράμετροι εκτύπωσης γραναζιού

Δαχτυλίδι

Διαστάσεις μοντέλου: 20 x 6 mm
 Εσωτερική Διάμετρος: 10 mm
 Μέση απόκλιση: +0.31, -0.19 mm
 Μέγιστη απόκλιση: ± 1 mm



Σχήμα 2.1.7 Ανάλυση απόκλισης δαχτυλιδιού

Σε αυτή τη διαδικασία εκτύπωσης, η ταχύτητα του κελύφους ήταν υψηλότερη από τη ταχύτητα γεμίσματος.

- Για μία ακόμη φορά, η χρήση του αισθητήρα βοηθά στην επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων. Και οι άνω και κάτω επιφάνειες φαίνεται να έχουν απόκλιση μικρότερη από 0.1 mm (πράσινη περιοχή).
- Υπάρχει μια μικρή συρρίκνωση στο κάτω μέρος του αντικειμένου. Αύξηση της θερμοκρασίας ίσως βοηθήσει.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	2000	mm/min
Πρόωση Κελύφους	2500	mm/min
Πρόωση Γεμίσματος	1500	mm/min
Θερμοκρασία	70	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.6	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.4	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.5 Παράμετροι εκτύπωσης δαχτυλιδιού

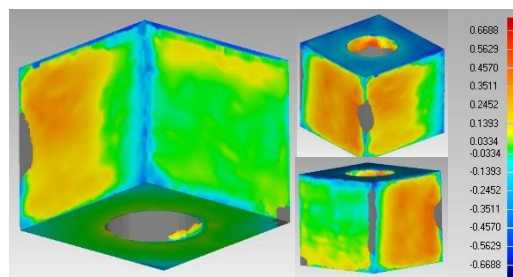
Κύβος με οπή

Διαστάσεις μοντέλου: 7.2 x 7.2 x 7.2 mm

Διαστάσεις οπών: 4 mm

Μέση απόκλιση: ± 0.13 mm

Μέγιστη απόκλιση: ± 0.66 mm



Σχήμα 2.1.8 Ανάλυση απόκλισης κύβου με οπή

Σε σύγκριση με τις προηγούμενες δοκιμές, σημειώθηκε μείωση της ταχύτητας εκτύπωσης, άρα αυξήθηκε ο χρόνος έκθεσης.

- Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων έδωσε καλύτερα αποτελέσματα μεταξύ των δοκιμών που επιχειρήθηκαν. Ένα μεγάλο μέρος του αντικειμένου φαίνεται να έχει απόκλιση μικρότερη από 0.03 mm (πράσινη περιοχή).
- Υπάρχει εμφανής στρέβλωση στο κάτω μέρος του αντικειμένου.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	2000	mm/min
Πρόωση Κελύφους	900	mm/min
Πρόωση Γεμίματος	600	mm/min
Θερμοκρασία	70	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.6	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.4	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.6 Παράμετροι εκτύπωσης κύβου με οπή

2.2. Χρησιμοποιώντας τη δίοδο λέιζερ 100mW

Η δίοδος λέιζερ με ισχύ εξόδου 20mW αντικαταστάθηκε με μία των 100mW. Αυτή η αναβάθμιση ήταν εμφανής στα νέα αντικείμενα καθώς επιτεύχθηκε επαρκής βαθμός πολυμερισμού σε συνδυασμό με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες των αντικειμένων. Μερικά από τα αντικείμενα που κατασκευάστηκαν φαίνονται παρακάτω.

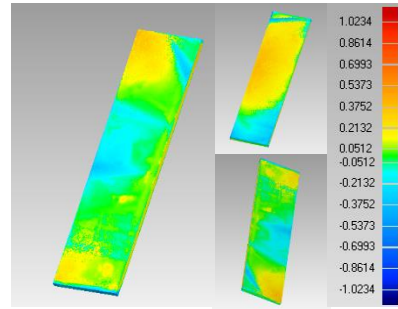


Σχήμα 2.2.1 Κατασκευασμένα αντικείμενα με τη δίοδο λέιζερ 100mW

Στις προηγούμενες δοκιμές, μερικές παράμετροι παρέμειναν σταθερές. Η διάμετρος της δέσμης και το πάχος κελύφους είναι δύο από αυτές, οι οποίες άλλαξαν συμβάλλοντας σημαντικά στη βελτίωση της διαστασιολογικής ακρίβειας. Ακόμη, ένα άλλο πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίστηκε ήταν η στρέβλωση στο κάτω μέρος του αντικειμένου.

Ορθογώνιο παραλληλόγραμμο

Διαστάσεις μοντέλου: 10 x 40 x 0.9 mm
 Μέση απόκλιση: ± 0.1 mm
 Μέγιστη απόκλιση: +0.39 , -1 mm



Σχήμα 2.1.9 Ανάλυση απόκλισης στο ορθ. παραλλ.

Με την αλλαγή της διόδου λέιζερ, οι παράμετροι εκτύπωσης άλλαξαν αισθητά. Επιλέχθηκε αύξηση της θερμοκρασίας για καλύτερη προσκόλληση του αντικειμένου στο δοχείο, καθώς επίσης πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στο πάχος κελύφους και στη διάμετρο του λέιζερ με στόχο την καλύτερη ακρίβεια.

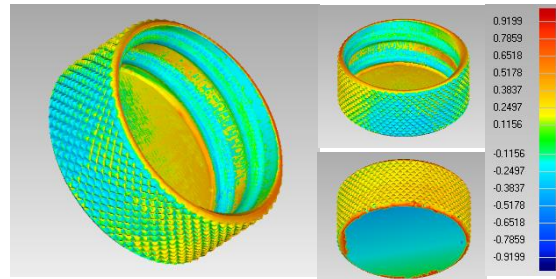
- Η νέα διόδος λέιζερ έφερε την ελάχιστη μέση απόκλιση μέχρι στιγμής και ένα σχετικά υψηλό βαθμό πολυμερισμού.
- Ωστόσο, η στρέβλωση ήταν ένα σημαντικό πρόβλημα που οδήγησε στη παραμόρφωση του αντικειμένου.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	2000	mm/min
Πρόωση Κελύφους	900	mm/min
Πρόωση Γεμίματος	500	mm/min
Θερμοκρασία	85	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.8	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.2	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.7 Παράμετροι εκτύπωσης ορθ. παραλλ.

Καπάκι με σπείρωμα

Διαστάσεις μοντέλου: 18.45 x 7.8 mm
 Μέση απόκλιση: + 0.25, -0.16 mm
 Μέγιστη απόκλιση: ± 0.91 mm



Σχήμα 2.1.10 Ανάλυση απόκλισης στο καπάκι με σπείρωμα

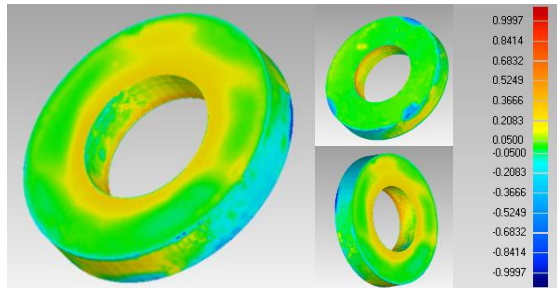
Έγιναν διάφορες προσπάθειες για μείωση της στρέβλωσης. Μια από αυτές ήταν με τη χρήση μιας βάσης κάτω από το αντικείμενο. Το πρόβλημα της στρέβλωσης είχε αντιμετωπιστεί, ωστόσο, το μέρος της βάσης το οποίο ήταν σε επαφή με το αντικείμενο, δεν μπορούσε να διαχωριστεί από αυτό και ως αποτέλεσμα, αυτή η τεχνική για την αποφυγή της στρέβλωσης είχε αποτύχει όσον αφορά την ακρίβεια.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	2000	mm/min
Πρόωση Κελύφους	900	mm/min
Πρόωση Γεμίματος	500	mm/min
Θερμοκρασία	85	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.8	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.2	mm
Πυκνότητα Γεμ.	100	%

Πίνακας 2.1.8 Παράμετροι εκτύπωσης για το καπάκι με σπείρωμα

Δαχτυλίδι (II)

Διαστάσεις μοντέλου: 20 x 3.3 mm
 Εσωτερική Διάμετρος: 10 mm
 Μέση απόκλιση: +0.084 mm
 Μέγιστη απόκλιση: ± 0.99 mm

**Σχήμα 2.1.11** Ανάλυση απόκλισης δαχτυλιδιού (II)

Τέλος, σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες προσπάθειες, οι αρχικές τιμές της πρόωσης κελύφους, και γεμίσματος επιλέχθηκαν να είναι διαφορετικές από την υπόλοιπη διαδικασία εκτύπωσης. Αυτό ήταν το τελευταίο αντικείμενο που κατασκευάστηκε με τη δίοδο λέιζερ ισχύος 100mW.

- Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων έδωσε την καλύτερη διαστασιολογική ακρίβεια ανάμεσα σε όλα τα πειράματα που επιχειρήθηκαν. Επιπλέον, επετεύχθη ο υψηλότερος βαθμός πολυμερισμού και ταυτόχρονα η αντιμετώπιση όλων των προβλημάτων, όπως η στρέβλωση και η συρρίκνωση.
- Τα μόνα μειονεκτήματα ήταν μερικές ατέλειες (μπλε στίγματα) που προκλήθηκαν λόγω απρόσεκτου χειρισμού κατά την αφαίρεση του αντικειμένου από το δοχείο.

Οι παράμετροι της διαδικασίας εκτύπωσης είναι οι εξής:

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Γρήγορη Πρόωση	1500	mm/min
Πρόωση Κελύφους (1 ^{ης} Στρώσης)	300	mm/min
Πρόωση Γεμίσματος (1 ^{ης} Στρώσης)	100	mm/min
Πρόωση Κελύφους	600	mm/min
Πρόωση Γεμίσματος	300	mm/min
Θερμοκρασία	85	°C
Πάχος Στρώσης	0.3	mm
Πάχος Κελύφους	0.8	mm
Διάμετρος Δέσμης	0.2	mm
Πυκνότητα Γεμίσματος	100	%

Πίνακας 2.1.9 Παράμετροι εκτύπωσης δαχτυλιδιού (II)

3. Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας φορητής συσκευής στερεολιθογραφίας και αποδείχθηκε η λειτουργικότητά της παρουσιάζοντας αρκετά απλά και σύνθετα κατασκευασμένα αντικείμενα. Η φορητή συσκευή SLA περιλαμβάνει μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα, συνθέτοντας ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα. Αυτό το σύστημα συνεργάζεται με μια εργαλειομηχανή CNC φρέζας ως εξωτερική συσκευή για τη δημιουργία αντικειμένων τρισδιάστατης εκτύπωσης ως μηχανή AM. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είχε σχετικά υψηλό βαθμό ακρίβειας και δούλεψε όπως αναμενόταν. Επίσης, κάθε υποσύστημα λειτουργούσε όπως είχε σχεδιαστεί. Η τροποποίηση στο υποσύστημα άντλησης προσθέτοντας τον αισθητήρα απόστασης ήταν εξαιρετικά σημαντική. Το υποσύστημα θέρμανσης διατήρησε το δοχείο στην επιθυμητή θερμοκρασία και τα υποσυστήματα δέσμης και επικοινωνίας συνεργάστηκαν σχεδόν άψογα. Η εργασία περιλάμβανε επίσης τον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων για τη διαδικασία εκτύπωσης. Κάθε παράμετρος μπορούσε εύκολα να τροποποιηθεί προσαρμόζοντας τον αλγόριθμο, όπως η ταχύτητα έκθεσης ή εκτύπωσης, η θερμοκρασία και το πάχος της στρώσης. Επιπλέον, η αντιμετώπιση προβλημάτων, η μείωση των σφαλμάτων κατά την κατασκευή, ο έλεγχος του αλγορίθμου και γενικά η προσπάθεια βελτίωσης της λειτουργίας της συσκευής SLA ήταν επίσης ένα μεγάλο μέρος της εργασίας.

Το στάδιο των δοκιμών έδειξε ότι ο βαθμός πολυμερισμού που προκλήθηκε από τη δίοδο λέιζερ 100mW είναι σαφώς μεγαλύτερος από αυτόν της δίοδου λέιζερ 20mW. Η διαστασιολογική ακρίβεια βελτιώθηκε μέσα από δοκιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία εκτύπωσης. Προκειμένου να εξεταστούν οι δυνατότητες της φορητής συσκευής SLA, κατασκευάστηκαν διάφορα αντικείμενα, με στόχο τόσο τη βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας όσο και της ακρίβειας των διαστάσεων. Όλα τα πειράματα που διεξήχθησαν συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

	Ταχύτητα Εκτύπωσης Κλφ Γμσ		Ισχύς (mW)	B.Π.	Πάχος Κελύφους	Διάμετρος Δέσμης	Πάχος Στρώσης	HSM	Αισθ. Απόστασης	Μέση Απόκλιση	°C	Συρρίκνωση/ Στρέβλωση
Κύλινδρος	600	600	20	L	0.6	0.4	0.3	Χ	Χ	±0.18	45	S
Κύβος	600	600	20	L	0.6	0.4	0.3	Χ	Χ	±0.12	45	S
Πτερωτή	1800	1800	20	L	0.6	0.4	0.3	F	Χ	+0.35, -0.58	60	S
Κύβος με Οπές	2500	300	20	M	0.6	0.4	0.3	F	Χ	+0.26, -0.37	60	Χ
Γρανάζι	1800	1800	20	L	0.6	0.4	0.3	F	✓	+0.35, -0.18	60	S
Δαχτυλίδι	2500	1500	20	M	0.6	0.4	0.3	F	✓	+0.31, -0.19	70	S
Κύβος με Οπή	900	600	20	RH	0.6	0.4	0.3	F	✓	±0.13	70	W
Ορθογ. Παρ.	900	500	100	RH	0.8	0.2	0.3	F	Χ	±0.1	85	W
Καπάκι με Σπείρωμα	900	500	100	RH	0.8	0.2	0.3	F	✓	+0.25, -0.16	85	Χ
Δαχτυλίδι (II)	600	300	100	H	0.8	0.2	0.3	F	✓	±0.084	85	Χ

Πίνακας 3.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

όπου,

L, M, RH, H: Χαμηλός, Μεσαίος, Σχετικά Υψηλός, Υψηλός Βαθμός Πολυμερισμού
S, W: Συρρίκνωση, Στρέβλωση
F: Λειτουργία Φινιρίσματος

Οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση ενός τρισδιάστατου σαρωτή και με τη μέθοδο σάρωσης λευκού φωτός. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόκλιση μειώθηκε σημαντικά με τις τελευταίες παραμέτρους που επιλέχθηκαν.

Γενικά, η φορητή συσκευή SLA απέδωσε καλά αποτελέσματα. Επιπλέον, το κύριο πλεονέκτημα αυτής της συσκευής είναι ότι μπορεί να συνεργαστεί με οποιοδήποτε εργαλειομηχανή CNC φρέζας. Ακόμη και αν υπάρχει διαφορά στη σύνταξη των μακροεντολών, μπορούν να γίνουν αλλαγές στον αλγόριθμο για να επιτευχθεί σωστή επικοινωνία. Ακόμη, μπορούν να κατασκευαστούν εξαρτήματα μεγαλύτερης κλίμακας αντικαθιστώντας το δοχείο με ένα μεγαλύτερο. Ωστόσο, οι βέλτιστες παράμετροι θα αλλάξουν ελαφρώς καθώς εξαρτώνται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, οι διαστάσεις του δοχείου καθορίζουν την ποσότητα ρητίνης που απαιτείται σε κάθε στρώση. Στην εργασία αυτή, έχουν επιτευχθεί τα ακόλουθα:

- Σχεδιασμός και κατασκευή μιας αυτοματοποιημένης φορητής συσκευής SLA
- Συσκευή χαμηλού κόστους που μπορεί να συνεργαστεί με κάθε φρέζα CNC
- Μέση απόκλιση ± 0.084 mm με τις βέλτιστες ρυθμίσεις
- Μεγάλος βαθμός πολυμερισμού χωρίς την ανάγκη για μεταγενέστερη επεξεργασία

Ο στόχος αυτού του έργου έχει επιτευχθεί, παρόλο που, λόγω χρονικών περιορισμών, δεν υπήρχε αρκετός χρόνος για τη δοκιμή της δεύτερης στρατηγικής εκτύπωσης με τον συνδυασμό των σχημάτων δέσμης τελείας και γραμμής. Συνεπώς, απαιτείται περαιτέρω έρευνα και συνεχή βελτίωση της συσκευής, ώστε να κατασκευάζονται προϊόντα υψηλής ακρίβειας και από τις δύο διαδικασίες εκτύπωσης. Μερικές από αυτές τις βελτιώσεις θα μπορούσαν να είναι:

- Έλεγχος της διαδικασίας εκτύπωσης τελείας-γραμμής
- Αύξηση της διαστασιολογικής ακρίβειας και αντικατάσταση του αισθητήρα απόστασης υπέρυθρων με έναν πιο αξιόπιστο αισθητήρα
- Αύξηση της ταχύτητας εκτύπωσης επιλέγοντας μια νέα πηγή φωτός πιθανότατα με ακόμη μεγαλύτερη ισχύ
- Καλύτερη λύση για ομοιόμορφη κατανομή της ρητίνης στο δοχείο στη 1^η στρώση
- Προσθήκη συστήματος ψύξης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της διόδου λείζερ και διεύρυνση της διάρκειας ζωής της
- Έλεγχος PID για ακριβή έλεγχο θερμοκρασίας στο υποσύστημα θέρμανσης.

Τέλος, η δυνατότητα εκτύπωσης αντικειμένων μέσα από μια εργαλειομηχανή CNC μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα ωφέλιμη για τη βιομηχανία. Η τεχνολογία πρόσθεσης υλικού εξελίσσεται συνεχώς. Ο συνδυασμός των τεχνολογιών πρόσθεσης και αφαίρεσης υλικού ανοίγει την πόρτα σε νέες ιδέες σε αυτούς τους συνεχώς αναπτυσσόμενους τομείς σπουδών.

Βιβλιογραφία

- [1] Ε. Γρηγοριάδης, “Ανάπτυξη φορητής διάταξης στερεολιθογραφίας (SLA),” 2017.
- [2] B. S. Ian Gibson, David W. Rosen, *Additive Manufacturing Technologies - Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2010.
- [3] “Haas TM-1 | Haas Automation, Inc. | CNC Machine Tools,” 2018. [Online]. Available: https://int.haascnc.com/mt_spec1.asp?intLanguageCode=1033&id=TM-1&webID=TOOLROOM_MILL_VMC.
- [4] FunToDo, “Properties,” *FunToDo*. [Online]. Available: <http://www.funto.do.net/properties.html>.
- [5] *Arduino*, 2018. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [6] Wikipedia, “Peristaltic pump,” 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Peristaltic_pump.
- [7] Jimb0, “RS-232 vs. TTL Serial Communication,” SparkFun Electronics, 2010. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/tutorials/215>.
- [8] Ametherm Inc, “NTC Thermistor Temperature Sensors,” Ametherm, 2015. [Online]. Available: <http://info.ametherm.com/lp/ntc-thermistor-temperature-sensors>.
- [9] Abhilash Patel, “Using IR Sensor (TCRT 5000) With Arduino and Program to Remove Noise: 5 Steps,” *Instructables*, 2017. [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Using-IR-Sensor-TCRT-5000-With-Arduino-and-Program/>.
- [10] “Hall Effect Sensor and How Magnets Make It Works,” *Electronics Tutorials*, 2014. [Online]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
- [11] Petteri Aimonen, “Giving a cheap diode laser a sharper beam,” Essential scrap, 2015. [Online]. Available: http://essentialscrap.com/tips/laser_collimation/.
- [12] “slice_stl_create_path(triangles,slice_height),” Mathworks.com. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62113-slice_stl_create_path-triangles-slice_height.
- [13] “Hatchfill2,” Mathworks.com. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53593-hatchfill2>.