

# Περιεχόμενα

---

Περίληψη .....	7
----------------	---

## Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Εφαρμογές και οφέλη ταχείας πρωτοτυποποίησης .....	10
1.3 Δομή της εργασίας .....	11

## Κεφάλαιο 2 Ταχεία πρωτοτυποποίηση

2.1 Ορισμός.....	12
2.2 Μέθοδοι ταχείας πρωτοτυποποίησης.....	12
2.3 Στερεολιθογραφία	
2.3.1 Τεχνολογία πολυμερών.....	20
2.3.2 Τεχνολογίες πολυμερισμού.....	21
2.3.3 Δομή ρητινών με εφαρμογές στην στερεολιθογραφία.....	24
2.3.4 Μηχανισμός πολυμερισμού με την επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας.....	24
2.3.5 Υβριδικό σύστημα ακρυλικού και εποξικού μονομερούς .....	27
2.3.6 Βαθμός πολυμερισμού .....	27
2.3.7 Χαρακτηριστική καμπύλη ρητίνης .....	29
2.3.8 Νόμος Beer -Lambert .....	32
2.3.9 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας με την ύλη .....	34
2.4 Ανάλυση διατάξεων στερεολιθογραφίας τύπου top-down και bottom-up .....	35

## Κεφάλαιο 3 Τρισδιάστατη εκτύπωση στερεολιθογραφίας και τεχνική έκθεση διάταξης

3.1 Κριτήρια επιλογής τρισδιάστατου εκτυπωτή στερεολιθογραφίας.....	37
3.2 Το προτεινόμενο σύστημα .....	40
3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής Haas TM-1 .....	41

3.4 Τεχνολογίες λέιζερ.....	42
3.4.1 Λείζερ ημιαγωγών (διόδου) .....	43
3.4.2 Ημιαγωγοί και προσμίξεις .....	44
3.4.3 Ορθή και ανάστροφη πόλωση στη δίοδο.....	46
3.4.4 Εκπομπή μονοχρωματικής ακτινοβολίας λέιζερ .....	48
3.4.5 Απόκλιση δέσμης.....	49
3.5 Επιλογή υλικών.....	51
3.5.1 Συσκευή λέιζερ .....	51
3.5.2 Συσκευή driver.....	53
3.5.2.1 Σχεδίαση και κατασκευή μηχανισμού στήριξης του λέιζερ στην μηχανή CNC Haas TM-1 .....	55
3.5.3 Υγρή ρητίνη .....	57
3.5.4 Επιλογή αντλίας.....	58
3.5.4.1 Είδη αντλιών .....	58
3.5.4.2 Περισταλτική δοσομετρική αντλία .....	61
3.5.4.3 Έλεγχος λειτουργίας της περισταλτικής αντλίας.....	62
3.5.4.4 Κατασκευή φορητής βάσης στήριξης για τα ηλεκτρονικά της αντλίας .....	63
3.5.4.5 Αντληση ρητίνης με χρήση δοσομετρικής αντλίας .....	66
3.6 Λήψη μέτρων προστασίας .....	67
3.7 Κατασκευή δοχείου.....	68
3.8 Ηλεκτρικό κύκλωμα συνδεσμολογίας θερμοστάτη.....	70

## **Κεφάλαιο 4 Λογισμικά CAD CAM**

4.1 Διαδικασία κατασκευής στην ταχεία προτυποποίηση .....	73
4.2 Λογισμικά Slic3r.....	76

## **Κεφάλαιο 5 Δοκιμή και μελέτη των υλικών στην εργαλειομηχανή Haas TM-1**

5.1 Μελέτη της προβολής της δέσμης του λέιζερ.....	78
5.2 Μελέτη της γραμμικής προβολής της δέσμης λέιζερ .....	79
5.3 Εκτύπωση και σύγκριση τεμαχίων με διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης.....	81
5.4 Εκτύπωση και σύγκριση επίπεδων τεμαχίων με περισσότερες σαρώσεις.....	85
5.5 Σάρωση επιφάνειας.....	86
5.6 Παρουσίαση και μελέτη τελικών τεμαχίων .....	89

## **Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία**

6.1 Συμπεράσματα .....	92
6.2 Μελλοντική εργασία .....	94

Βιβλιογραφία .....	97
Σύνδεσμοι αγορών .....	100
Παράρτημα εικόνων .....	102

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή

# Ευχαριστίες

---

Ολοκληρώνοντας την μεταπτυχιακή εργασία και ταυτόχρονα την πορεία μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο μπόρεσα να έχω την άριστη συνεργασία με τον Καθηγητή Κ. Γιώργο Βοσνιάκο τον οποίο θέλω να ευχαριστήσω θερμά. Με την καθημερινή μας επικοινωνία και την άμεση ανταπόκρισή του όταν χρειάστηκε μπόρεσα να ολοκληρώσω με επιτυχία η διπλωματική μου διατριβή.

Ευχαριστώ επίσης τους παρακάτω συντελεστές:

- Τον Κύριο Νίκο Μελισσά για την βοήθειά του σχετικά με την κατασκευή εξαρτήματος στήριξης του λείζερ
- Τον Κώστα Κερασιώτη για την βοήθειά του σχετικά με την κατασκευή βάσης στήριξης ηλεκτρονικών για την αντλία και την μέριμνά του για την αγορά και προμήθεια μηχανισμού θέρμανσης της ρητίνης
- Τον Γιώργο Παπαζέτη για την βοήθεια του σχετικά με τα λογισμικά solidworks, slic3r και τα εποικοδομητικά σχόλια που βοήθησαν στην εξέλιξη της εργασίας
- Τον Φοίβο Ψαρομμάτη για την καθοδήγησή του ώστε να μπορέσω να χειριστώ την εργαλειομηχανή CNC Haas TM-1 καθώς και για τον σχεδιασμό και την κατασκευή θερμαινόμενου δοχείου ρητίνης
- Τον Φωτεινό Ρογάρη για την βοήθειά του σχετικά με κολλήσεις ηλεκτρονικών και τον σχεδιασμό συστήματος άντλησης ρητίνης με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων arduino

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή

# Περίληψη

---

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ολοκλήρωση και προώθηση μιας καινοτομικής ιδέας που αφορά την απλοποίηση της ιδιαίτερα σύνθετης διάταξης στερεολιθογραφίας τύπου DLP (*direct light projection*) με την χρήση εμπορικών υλικών χαμηλού κόστους. Σκοπός της εργασίας, είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πρόκειται για ένα φορητό σύστημα το οποίο ενσωματώνεται σε μία κεντρική μονάδα κατεργασιών και την ολοκληρώνει δίνοντας της την δυνατότητα επέκτασης της παραγωγής της σε νέα προϊόντα, από υλικά που δεν είναι δυνατόν να επεξεργαστούν με τα συμβατικά εργαλεία κοπής. Η κεντρική μονάδα κατεργασιών, είναι η εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου CNC Haas TM-1, η οποία βρίσκεται στο εργαστήριο της σχολής μηχανολόγων μηχανικών του Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η μηχανή ολοκληρώνεται μετά την ενσωμάτωση σε αυτή του φορητού συστήματος στερεολιθογραφίας που μελετάται, και θα δύναται να επεξεργαστεί φωτοπολυμεριζόμενη υγρή ρητίνη, μέσω εντολών της γλώσσας ελέγχου εργαλειομηχανών G-Code. Η διάταξη είναι εφοδιασμένη με δοσομετρική αντλία, η οποία δύναται να προγραμματιστεί κατάλληλα, ώστε αφού δοθεί στην μηχανή το κατάλληλο αρχείο τύπου stl., η διαδικασία της εκτύπωσης να ολοκληρώνεται αυτόνομα χωρίς την μεσολάβηση του ανθρώπινου παράγοντα. Η δυνατότητα της μηχανής να κατασκευάζει αντικείμενα μέσω της επεξεργασίας υγρής ρητίνης κατοχυρώνεται με την προσθήκη κατάλληλου μηχανισμού ακτινοβολίας στον εργαλειοδέτη της μηχανής. Πρόκειται για μονοχρωματική ακτινοβολία λέιζερ μήκους κύματος 405nm, κατάλληλο για τον συγκεκριμένο τύπο ρητίνης.

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή



# Κεφάλαιο 1

---

## 1.1 Εισαγωγή

Η μετατροπή μιας ιδέας σε σχέδιο και έπειτα σε αντικείμενο με ένα τυποποιημένο μηχανισμό ώστε να μπορεί να επαναληφθεί με οικονομικό και ακριβή τρόπο οδηγώντας στην εύκολη και μαζική παραγωγή, οδήγησε την επιστήμη στο κλάδο της αυτοματοποίησης που ονομάζεται ταχεία προτυποποίηση (*rapid manufacturing*).

Η τεχνική της στερεολιθογραφίας που εξετάζεται στην εργασία διαφέρει από τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής διαφόρων προϊόντων με τη χρήση εργαλείων όπως τόνος, φρέζα ή δρόπανο ενσωματωμένων σε εργαλειομηχανές CNC.

Ενώ οι παραδοσιακές τεχνικές αποσκοπούν στην αφαίρεση υλικού από ακατέργαστα τεμάχια, η τεχνική της στερεολιθογραφίας αποτελεί μέθοδο πρόσθεσης υλικού που πραγματοποιείται με εναπόθεση, συγκόλληση ή στερεοποίηση διαδοχικών λεπτών στρώσεων του υλικού που είναι διαμορφωμένα κατάλληλα σύμφωνα με ειδικά προγράμματα.

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται σε τεχνολογικούς κλάδους συμπεριλαμβανομένων της φυσικής των λέιζερ, της φυσικής των υλικών, της ρομποτικής και της πληροφορικής, εφοδιάζεται η αγορά με ισχυρότερα και πιο ακριβή μηχανήματα, σύνθετα λογισμικά και εργαλεία ελέγχου, καθώς επίσης διευρύνεται και η συμβατότητα των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης με περισσότερα λογισμικά έτσι ώστε να γίνεται προσιτή η κατασκευή και η μελέτη διατάξεων ταχείας προτυποποίησης.

## 1.2 Εφαρμογές και οφέλη ταχείας προτυποποίησης

Οι τομείς της παραγωγής στους οποίους έχουν εισαχθεί τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης αυξάνονται με απροσδόκητους ρυθμούς. Με την χρήση της στερεολιθογραφίας, αρχικά επωφελούμαστε από τις ιδιότητες μη μεταλλικών υλικών τα οποία δεν μπορούν να επεξεργαστούν με τις παραδοσιακές τεχνικές και από τον έλεγχο σε μικροσκοπικό επίπεδο της δομής των υλικών, ο οποίος επιτρέπει την κατασκευή στιβαρότερων τεμαχίων χωρίς ιδιαίτερα μεγάλο βάρος εφόσον είναι δυνατή η επιλεκτική ενίσχυση των περιοχών που είναι αναγκαίο. Μειονέκτημα της μεθόδου θεωρείται οι περιορισμένες διαστάσεις των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν καθώς και η έλλειψη δυνατότητας για επεξεργασία μεταλλικών αντικειμένων.

Για πρώτη φορά παγκοσμίως δόθηκε άδεια από την αρμόδια εποπτική Αρχή Τροφίμων και Φαρμάκων των ΗΠΑ να κυκλοφορήσει το πρώτο τρίμηνο του 2016 στην αγορά ένα φάρμακο σε μορφή χαπιού, το οποίο θα εκτυπώνεται σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Με την κατάλληλη ρύθμιση του λογισμικού που ελέγχει τον τρισδιάστατο εκτυπωτή, το χάπι θα μπορεί να περιέχει δοσολογίες δραστικών ουσιών προσαρμοσμένες ακόμη και στις ανάγκες μεμονωμένων ασθενών, επίσης η εναπόθεση επαναλαμβανόμενων στρώσεων θα επιτρέπει την βραδεία αποδέσμευση των δραστικών ουσιών. *[1]*

Η κατασκευή εργαλείων όπως μήτρες, καλούπια ή λοιπά εργαλεία κατεργασίας μετάλλου, τα οποία με τις παραδοσιακές τεχνικές (CNC) κατασκευάζονται με ιδιαίτερα χρονοβόρες και ακριβές διαδικασίες καθώς απαιτείται πολύ υψηλή ακρίβεια γίνεται πλέον δυνατή με την άμεση κατασκευή του εργαλείου απευθείας από αρχεία CAD. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο χρόνος, το κόστος αλλά και ο χώρος αποθήκευσης των εταιριών κάτι που συνεπάγεται και την μείωση του ανθρώπινου δυναμικού.

Επιπρόσθετα, η κατασκευή πρωτοτύπων διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των συντελεστών των επιχειρήσεων, εφόσον η κατανόηση τρισδιάστατων αντικειμένων είναι ευκολότερη από την ανάγνωση δισδιάστατων σχεδίων και διευκολύνεται η αξιολόγηση της λειτουργικότητας του τελικού προϊόντος.

Τέλος, επιπλέον κατασκευές όπου βρίσκει εφαρμογή η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι κατασκευή καλυμμάτων για ηλεκτρικά συστήματα αγωνιστικών αυτοκινήτων, ηλεκτρονικών και ηλεκτρομηχανικών εξαρτημάτων, κεραμικών φίλτρων υψηλής απορροφητικότητας, βοηθήματα ακοής, ιατρικών εμφυτευμάτων, κατασκευή τρισδιάστατων αρχιτεκτονικών μοντέλων και τοπογραφικών μοντέλων για σχεδιασμό στρατιωτικών επιχειρήσεων, αντίγραφα αρχαιολογικών ευρημάτων και μοντέλων βρεφών λίγο πριν τη γέννησή τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη συναρμολόγηση φορητής διάταξης τρισδιάστατου εκτυπωτή στερεολιθογραφίας, η οποία ολοκληρώνεται μετά την ενσωμάτωσή της σε μηχανή τύπου αριθμητικού προγραμματισμού CNC.

### **1.3 Δομή της εργασίας**

Η δομή που ακολουθήθηκε κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται παρακάτω, όπου δίνεται συνοπτικά το περιεχόμενο του κάθε κεφαλαίου.

- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι ταχείας προτυποποίησης, συγκρίνονται με την στερεολιθογραφία και αναλύεται η τεχνολογία και ο μηχανισμός πολυμερισμού
- Στο κεφάλαιο 3 δίνεται έμφαση στην επιλογή και χρήση των υλικών που επιλέχθηκαν για την κατασκευή της φορητής διάταξης στερεολιθογραφίας καθώς επίσης παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής Haas TM-1
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το λογισμικό slic3r και αναλύονται τα 5 στάδια που περιλαμβάνει η διαδικασία κατασκευής στην ταχεία προτυποποίηση, από την επιλογή του ψηφιακού μοντέλου CAD μέχρι και την τελική κατασκευή του αντικειμένου με την διαδοχική αλληλεπίθεση διατομών
- Στο κεφάλαιο 5 μελετάται η συμπεριφορά της ρητίνης καθώς αυτή ακτινοβολείται με λέιζερ μήκους κύματος 405nm, παρουσιάζονται τα τεμάχια που τυπώθηκαν και αναλύονται τα αποτελέσματα της εκτύπωσης
- Στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από το πειραματικό μέρος και με βάση αυτά δίνονται προτάσεις ώστε η παρούσα εργασία να αποτελέσει καρπό για επιπλέον μελλοντική έρευνα και αναβάθμιση της διάταξης ώστε να δώσει πιο ακριβή και ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

# Κεφάλαιο 2 Ταχεία προτυποποίηση

## 2.1 Ορισμός

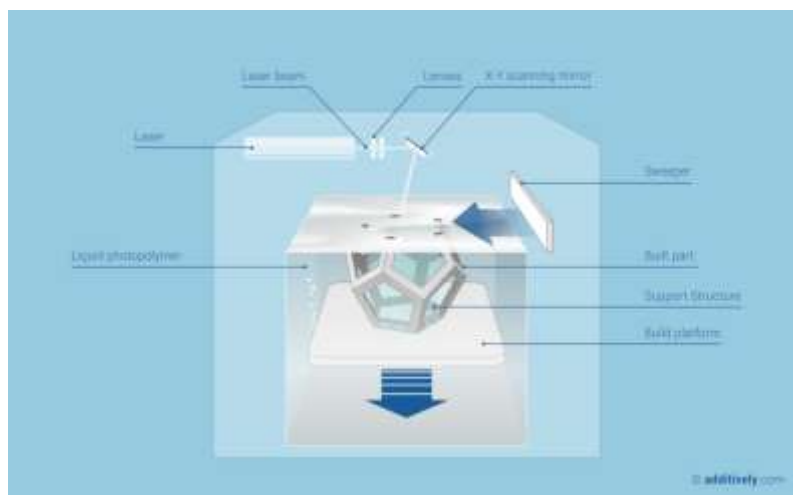
Η ταχεία προτυποποίηση (ΤΠ) εφαρμόζει μία τεχνολογία που παράγει τρισδιάστατα αντικείμενα σε σύντομο χρονικό διάστημα κάποιων ημερών αντί εβδομάδων. Οι μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιούν τα δεδομένα ψηφιακών αρχείων που έχουν σχεδιαστεί ή προκύψει από την σάρωση κάποιου φυσικού αντικειμένου ώστε να τα κατασκευάσουν "εκτυπώνοντας" αυτά.

## 2.2 Μέθοδοι ταχείας προτυποποίησης

Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που είναι διαθέσιμες στην αγορά σήμερα περιλαμβάνουν έξι βασικές τεχνικές από τις οποίες η κάθε μια έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και αξίζει να δοθεί μία σύντομη περιγραφή. Η τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης που θα παρουσιαστούν ακολουθούν την ίδια διαδικασία πέντε σταδίων που αφορά το περιεχόμενο της διαδικασίας από το σχεδιασμό του ψηφιακού μοντέλου μέχρι και το τελικό φινιρίσμα του αντικειμένου. Η διαδικασία των 5 σταδίων αναλύεται στο κεφάλαιο 4.

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης.

### Στερεολιθογραφία (*stereolithography*):

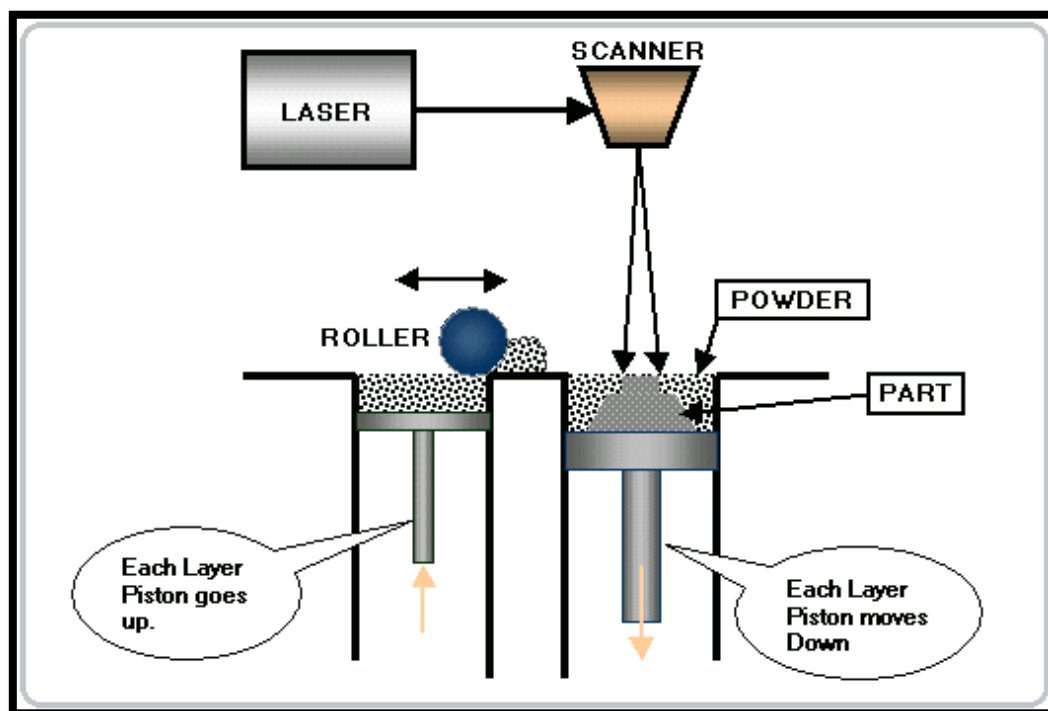


Εικόνα 1 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού στερεολιθογραφίας τύπου top-down

Η τεχνολογία της στερεολιθογραφίας θεωρείται ως η παλαιότερη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης την οποία εφηύρε ο Charles Hall το 1984 και κατοχυρώθηκε το 1986. Οι πρώτες μηχανές στερεολιθογραφίας κατασκευάστηκαν από την εταιρεία 3D Systems το 1988 που εδρεύει στην Καλιφόρνια. Το βασικό πλεονέκτημα της στερεολιθογραφίας που την ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες τεχνικές ταχείας προτυποποίησης είναι η υψηλή ανάλυση εκτύπωσης, εφόσον είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί δέσμη λέιζερ διαμέτρου μέχρι και 100μm για να στερεοποιήσει (πολυμερίζοντας) ένα φωτοευαίσθητο στην υπεριώδη ακτινοβολία πολυμερές υλικό.

Οι διατάξεις της στερεολιθογραφίας είναι τύπου bottom-up και top-down αναλόγως αν το αντικείμενο κατασκευάζεται ανερχόμενο ή κατερχόμενο καθώς ακτινοβολείται από την υπεριώδη ακτινοβολία. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται και συγκρίνονται αναλυτικά οι δύο μηχανισμοί. Όσον αφορά την διάταξη τύπου top-down, το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια βάση, η οποία βυθίζεται σταδιακά μέσα σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή εποξική ή ακρυλική ρητίνη. Αρχικά η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό που είναι ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί. Έπειτα μια κεφαλή λέιζερ υπεριωδών ακτίνων χαμηλής ισχύος κινούμενη στους άξονες x-y διαγράφει το σχήμα της διατομής, όπως ακριβώς υποδεικνύει ένα προσχεδιασμένο ψηφιακό σχέδιο επεξεργασμένο από ειδικά προγράμματα ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή του από τον εκτυπωτή. Το λέιζερ φωτίζει και στερεοποιεί μονάχα τις περιοχές που προβλέπονται σύμφωνα με το αντίστοιχο σχέδιο. Κατόπιν η βάση βυθίζεται μέσα στο δοχείο κατά το πάχος της επόμενης διατομής και ταυτόχρονα μια λεπίδα οριζοντιώνει την επιφάνεια της ρητίνης ώστε η κεφαλή του λέιζερ να διαγράψει πάνω σε αυτήν την επόμενη διατομή. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου και έπειτα το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο, πλένεται, αφαιρούνται τα τυχόν στηρίγματά του και κατόπιν τοποθετείται σε ένα φούρνο υπεριωδών ακτίνων για την τελική σκλήρυνση.

## Selective Laser Sintering (SLS):

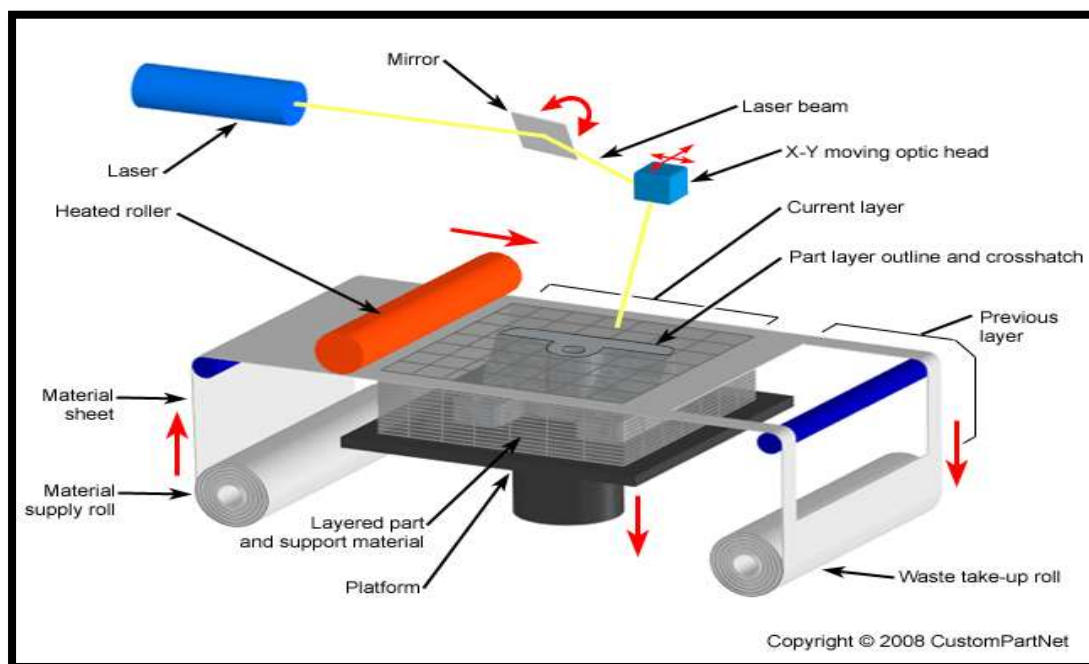


Εικόνα 2 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού Selective Laser Sintering

Η τεχνική SLS έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να προσαρμοστεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εκτύπωσης, εφόσον δεν θέτει ιδιαίτερους περιορισμούς στις διαστάσεις του κατασκευαζόμενου αντικειμένου.

Επίσης θεωρείται σταθερή τεχνική ταχείας προτυποποίησης εφόσον η λειτουργία της δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα εμφανίζουν μεγάλη αντοχή σε μηχανικές φορτίσεις, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και μπορούν να κατασκευαστούν με κινητά μέρη. Στην τεχνική αυτή μια ακτίνα λέιζερ λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά (ελαστομερή ή μέταλλα) τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος στρώνει μια ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους πάνω σε μία επιφάνεια και μία κεφαλή λέιζερ διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής λιώνοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά την σκόνη. Έπειτα η επιφάνεια κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής, τοποθετείται εκ νέου σκόνη την οποία στρώνει ο κύλινδρος και η κεφαλή λέιζερ διαγράφει την επόμενη διατομή στερεοποιώντας την πάνω στην πρώτη. Η περίσσεια σκόνης κάθε στρώματος λειτουργεί σαν υποστήριγμα του κατασκευαζόμενου αντικειμένου.

## Laminated Object Manufacturing (LOM):

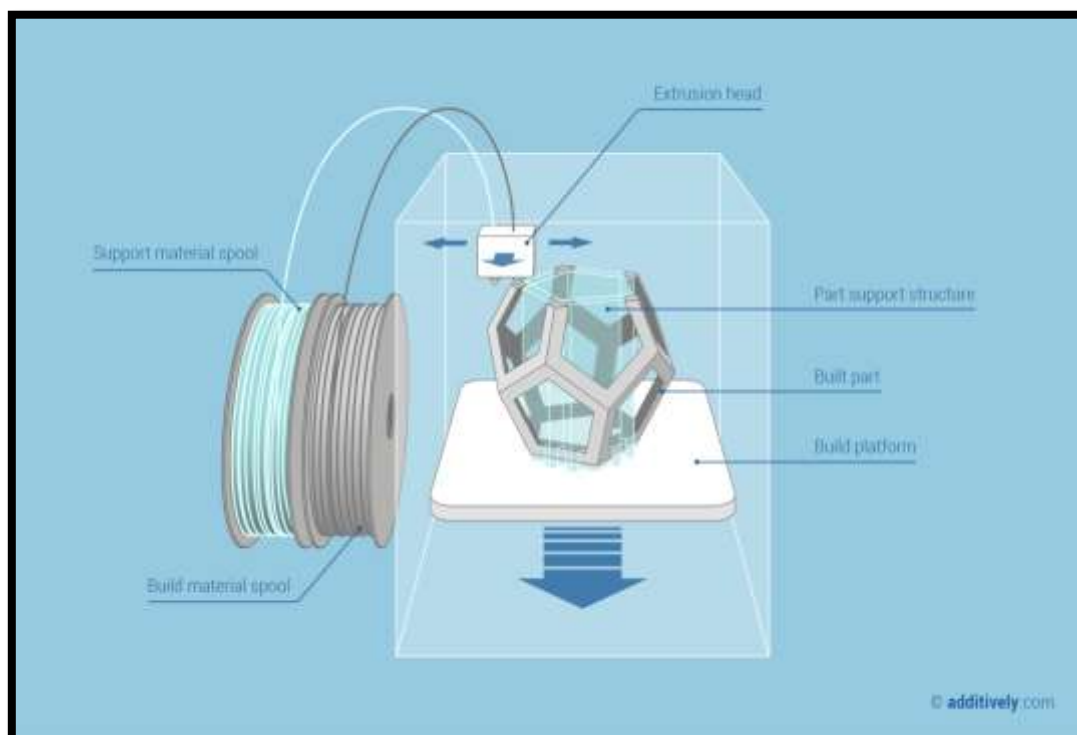


Εικόνα 3 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού Laminated Object Manufacturing

Η τεχνική αυτή βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με την συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού που φέρουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι χαρτί, πλαστικά και λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών. Αρχικά τοποθετείται με ένα μηχανισμό το πρώτο φύλλο χαρτιού πάνω σε μία βάση και κατόπιν ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από αυτό πιέζοντάς το ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν.

Στην συνέχεια μια κεφαλή λέιζερ κόβει το σχήμα της διατομής πάνω στο χαρτί και χαράζει μικρά τετράγωνα στο υπόλοιπο τμήμα του ώστε να διευκολύνει την απόσπαση του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του. Όταν κοπεί το πρώτο στρώμα η βάση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται από την διάταξη τροφοδοσίας και έπειτα η βάση ανέρχεται έως ότου εφαρμόσει σε αυτήν ο κύλινδρος για να πιέσει το δεύτερο φύλλο πάνω στο πρώτο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.

## Fused Deposition Modeling (*FDM*):



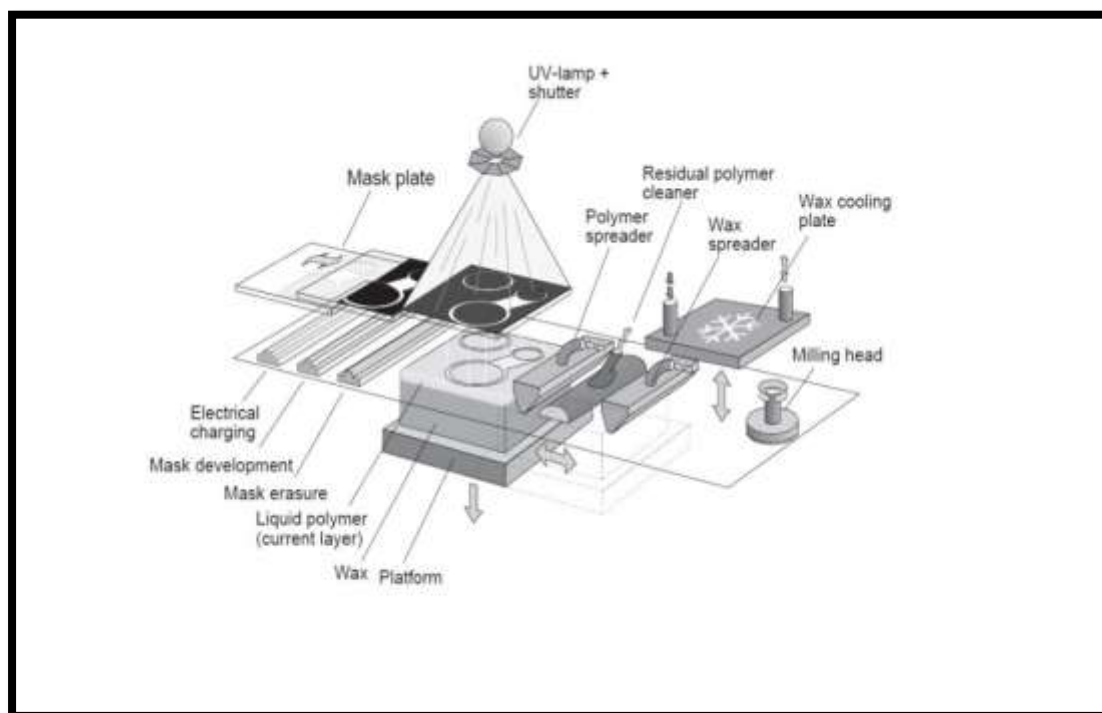
Εικόνα 4 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού Fused Deposition Modeling

Η τεχνολογία Fused Deposition Modeling αναπτύχθηκε από την εταιρεία Stratasys η οποία είναι ακόμα πρωτοπόρος στον τομέα αυτόν. Οι μηχανές που κατασκευάζονται από την εταιρεία είναι δύο εκδόσεων, μία για την ταχεία κατασκευή μοντέλων που αποδίδουν την γενική ιδέα ενός σχεδίου και μία βραδείας εκτύπωσης που επιτρέπει την ακριβή κατασκευή πρωτοτύπων. Η κατασκευή του αντικειμένου στη περίπτωση της τεχνικής *FDM* υλοποιείται με την εξώθηση λιωμένου υλικού πάνω σε ένα αφρώδες υπόστρωμα, διαμέσου ενός στομίου το οποίο κινείται στο επίπεδο x-y. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν διάφορα ελαστομερή και πολυκαρβονικά υλικά.

Το υλικό εισάγεται σε νηματώδη μορφή σε ένα περιστρεφόμενο μηχανισμό και επειδή η θερμοκρασία της βάσης είναι χαμηλότερη από αυτήν του υλικού και δεδομένου ότι το υλικό έχει υψηλό σημείο τήξης στερεοποιείται άμεσα. Έπειτα η βάση κατέρχεται και η κεφαλή εναποθέτει το δεύτερο στρώμα υλικού πάνω στο πρώτο. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο.



## Solid Ground Curing (SGC):



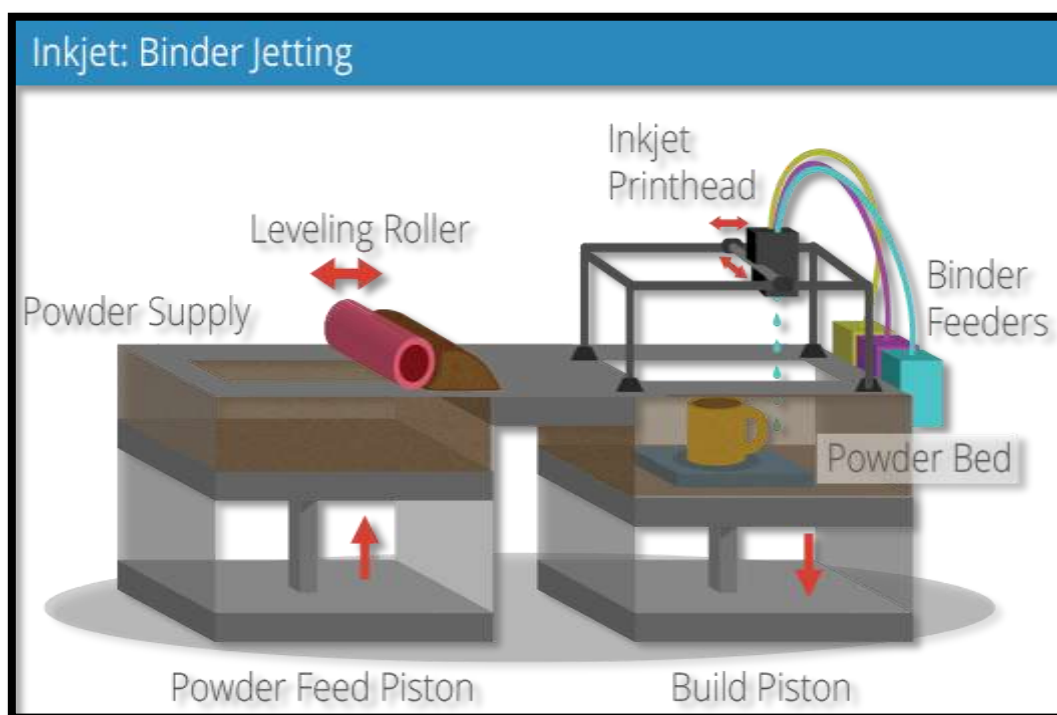
Εικόνα 5 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού Solid Ground Curing

Η τεχνική Solid Ground Curing θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι μια παραλλαγή της στερεολιθογραφίας με τη διαφορά όμως ότι οι υπεριώδεις ακτινοβολίες που χρησιμοποιούνται για την σκλήρυνση φωτοευαίσθητων πολυμερών, φωτίζουν και σκληραίνουν ολόκληρη την επιφάνεια του υλικού και όχι μόνο την διατομή του.

Η διαδικασία ξεκινάει με τον ψεκασμό ενός στρώματος φωτοευαίσθητης ρητίνης πάνω σε μία βάση και έπειτα η μηχανή κατασκευάζει μια φωτομάσκα που διαγράφει την διατομή του μοντέλου. Κατόπιν η φωτομάσκα εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία η οποία διέρχεται μόνο από τα διαφανή τμήματά του σκληραίνοντας τις αντίστοιχες περιοχές στο στρώμα της ρητίνης.

Αφού ολοκληρωθεί η σκλήρυνση του σώματος η μηχανή απομακρύνει την περίσσεια της υγρής ρητίνης και ψεκάζει κερί στη θέση της το οποίο λειτουργεί ως υποστήριγμα του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του. Το πλεονέκτημα των μηχανών SGC είναι ότι έχουν μεγάλο μέγεθος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αντικειμένων μεγάλου όγκου.

### 3D ink-jet Printing:



Εικόνα 6 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού 3D ink-jet Printing

Η τεχνολογία Material jetting είναι μια διαδικασία τρισδιάστατης εκτύπωσης σύμφωνα με την οποία τα υλικά κατασκευής σε υγρή κατάσταση ρέουν μέσα από πολλαπλές κεφαλές εκτόξευσης. Στην τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet τα αντικείμενα κατασκευάζονται πάνω σε μια βάση η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο που περιέχει υλικό σε μορφή σκόνης. Αρχικά η βάση κατέρχεται κατά το πάχος της διατομής και μια διάταξη τροφοδοσίας απλώνει πάνω της μια κατάλληλη ποσότητα σκόνης. Κατόπιν η κεφαλή ink-jet που κινείται κατά τους άξονες x-y ψεκάζει επιλεκτικά ένα συγκολλητικό υγρό το οποίο στερεοποιεί την σκόνη διαγράφοντας το επιθυμητό σχήμα της διατομής. Η σκόνη που δεν στερεοποιείται λειτουργεί σαν υποστήριγμα του προς εκτύπωση αντικειμένου και αυτό αποτελεί πλεονέκτημα της μεθόδου εφόσον δεν υπάρχει η ανάγκη για την χρήση μηχανισμού υποστήριξης. Έπειτα, η βάση κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής και προστίθεται νέα στρώση σκόνης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Κατόπιν το αντικείμενο απομακρύνεται με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα και καθαρίζεται από την περίσσεια σκόνης. Τα τελικά κομμάτια αν χρειαστεί ψεκάζονται με κερί ή με άλλες ουσίες για να αυξηθεί η αντοχή τους. Η τεχνική ink-jet θεωρείται μια υψηλής ταχύτητας τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης με το τυπικό πάχος κάθε διατομής να είναι 0.1mm.

## Σύγκριση μεθόδων ταχείας προτυποποίησης

Στον πίνακα 1, παρουσιάζονται οι δυνατότητες των δημοφιλέστερων τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης Fused Deposition Modeling, στερεολιθογραφίας και Selective Laser Sintering με σκοπό να γίνει η σύγκριση αυτών.

Πίνακας 1 Σύγκριση τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης

	FDM	SLA	LS (Sintratec)
Freeform	×	×	✓
Resolution	●●○○○	●●●●●	●●●●○
Stability	●●●○○	●○○○○	●●●●●
Raw material	Filament	Liquid	Powder
UV resistance	✓	×	✓
Temperature resistance	●●●●○	●○○○○	●●●●●
Suitable for prototyping	✓	✓	✓
Suitable for additive manufacturing	Partly	×	✓

Συνοψίζοντας, σχετικά με την μέθοδο της στερεολιθογραφίας αξίζει να σημειωθεί ότι πλεονεκτεί υπέρ των υπολοίπων στην ακρίβεια, λόγω της μικρής διαμέτρου δέσμης που είναι εφικτή από το λέιζερ και προσεγγίζει τα 100μm.

Επιπλέον πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μηχανική αντοχή των αντικειμένων που εκτυπώνονται καθώς και η δυνατότητα που μας δίνεται να καθορίσουμε εμείς τις ιδιότητες που θα έχει το τελικό υλικό με την επιλογή ή παρασκευή της κατάλληλης ρητίνης. Αντίθετα, όταν το προς εκτύπωση αντικείμενο έχει πολύπλοκη γεωμετρία η ταχύτητα εκτύπωσης είναι περιορισμένη. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι επίσης οι περιορισμένες διαστάσεις των αντικειμένων που εκτυπώνονται λόγω της χρήσης συγκεκριμένων διαστάσεων δοχείου, το γεγονός ότι λόγω της φύσης της ρητίνης τα εκτυπωμένα αντικείμενα είναι ευάλωτα στην χημική διάβρωση καθώς και η αδυναμία μας να επεξεργαστούμε μεταλλικά αντικείμενα.

## 2.3 Στερεολιθογραφία

### 2.3.1 Τεχνολογία πολυμερών

Τα **πολυμερή υλικά** είναι μοριακές ενώσεις, όπου τα μόρια σχηματίζονται με την πολλαπλή επανάληψη στοιχειωδών δομικών μονάδων. Τα μόρια των πολυμερών υλικών, λόγω του μεγάλου τους μεγέθους μπορούν και κρατάνε σταθερές ιδιότητες με την προσθήκη ή αφαίρεση λίγων μονάδων. Τα πολυμερή υλικά ιστορικά δεν έχουν διακριθεί για την υπεροχή τους έναντι των υπόλοιπων υλικών που χρησιμοποιούνται στην ταχεία προτυποποίηση, αλλά οι ρητίνες που παρασκευάζονται πλέον, διακρίνονται για τις βελτιωμένες τους ιδιότητες όπως είναι η αντοχή στην θερμοκρασία, στην διάβρωση ή την μηχανική καταπόνηση.

Επίσης, με την μέθοδο της στερεολιθογραφίας μπορούμε να επιτύχουμε και να χειριστούμε στρώματα πάχους 5-100 μm (κάτι που συνεπάγεται υψηλή ακρίβεια) σε αντίθεση με τις περισσότερες μηχανές εναπόθεσης υλικού *FDM* όπου τα αντίστοιχα πάχη προσεγγίζουν τα 254 μm. B[1]

Ο **πολυμερισμός** είναι η διαδικασία με την οποία μέσω μιας επαναλαμβανόμενης χημικής αντίδρασης οι ενώσεις χαμηλού μοριακού βάρους που ονομάζονται μονομερή ενώνονται προς σχηματισμό μακρομοριακών ενώσεων που είναι τα γνωστά μας πολυμερή. Τα πολυμερή διακρίνονται εκ της προέλευσής τους σε φυσικά πολυμερή και συνθετικά πολυμερή. Τα φυσικά πολυμερή είναι για παράδειγμα το DNA, το καουτσούκ, το άμυλο, η κυτταρίνη, οι πρωτεΐνες, ενώ συνθετικά πολυμερή είναι τα πλαστικά, οι εκρηκτικές ύλες, οι λευκαντικές ουσίες και τα σαπούνια.

Επίσης, διακρίνονται σε **θερμοπλαστικά**, σε **θερμοσκληρυνόμενα**, σε **ελαστομερή** και σε **φωτοπολυμερή**.

Τα **θερμοπλαστικά** πολυμερή είναι τα υλικά τα οποία έχουν γραμμική (*linear*) ή διακλαδωμένη (*branched*) μοριακή δομή, που τους επιτρέπει κατά την θέρμανση τους να μαλακώνουν και να παραμορφώνονται εύκολα, ενώ κατά την ψύξη τους να σκληραίνουν.

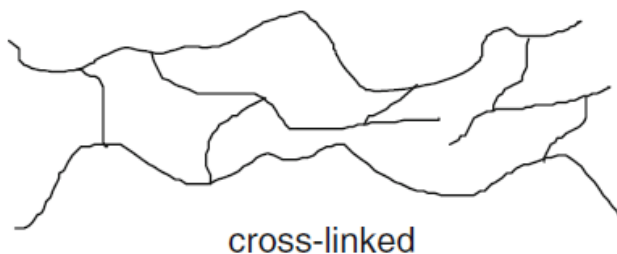
Θερμοπλαστικά υλικά είναι τα παρακάτω: πολυαιθυλένιο (*PE*), πολυβινυλοχλωρίδιο (*PVC*), πολυπροπυλένιο (*PP*) καθώς και τα **ακρυλικά** που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια. B[1]

Τα **θερμοσκληρυνόμενα** πολυμερή παρουσιάζουν τις αντίθετες ιδιότητες με τα θερμοπλαστικά, δηλαδή κατά την θέρμανσή τους σκληραίνουν και παραμορφώνονται με δυσκολία. Θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι οι εποξικές ρητίνες που επίσης θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια.

Τα **ελαστομερή** υλικά είναι μια κατηγορία πολυμερών, που με κατάλληλη επεξεργασία όπως ο βουλκανισμός, παρουσιάζουν πολύ μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις.

Τα **φωτοπολυμερή** υλικά ανήκουν στην κατηγορία των φωτοευαίσθητων υλικών. Οι φορείς που αποδίδουν την ενέργεια σε αυτά τα υλικά είναι φωτόνια κατάλληλης ενέργειας και για αυτό το λόγο η αποτύπωση του σχεδίου στην επιφάνεια αυτών των υλικών ονομάζεται φωτολιθογραφία.

Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά πολυμερή, η μοριακή δομή στα φωτοπολυμερή υλικά έχει την μορφή σταυροδεσμών (*cross-links*) οι οποίοι δεν επιτρέπουν στο υλικό να λιώσει ή να εμφανίζει τάσεις χαλάρωσης B[1].



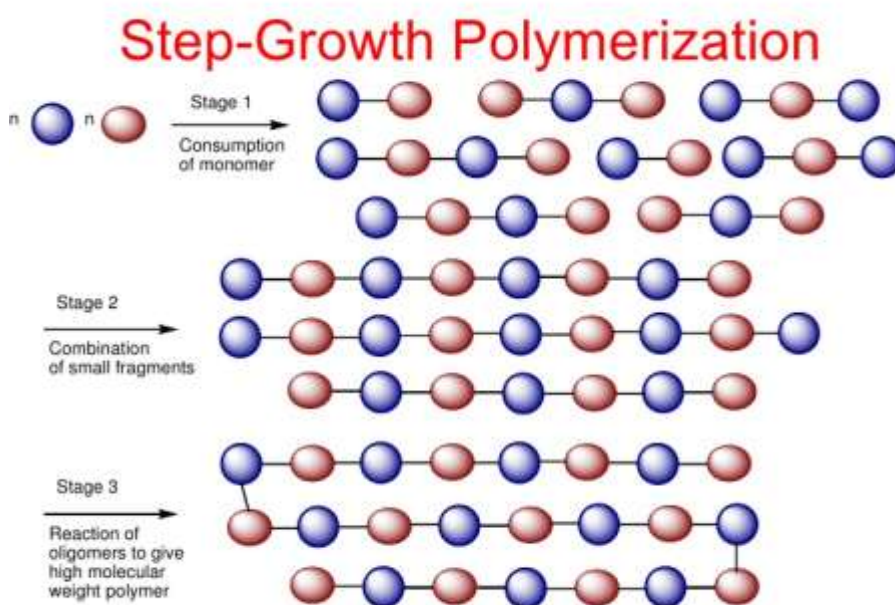
Εικόνα 7 Μοριακή δομή φωτοπολυμερών υλικών - μορφή σταυροδεσμών

Στην στερεολιθογραφία χρησιμοποιούνται φωτοπολυμερή υλικά τα οποία μπορούν να στερεοποιηθούν κατά την έκθεσή τους σε ακτίνες γ, ακτίνες χ, υπεριώδη ακτινοβολία και άλλες, αλλά η πλέον επικρατέστερη είναι η υπεριώδη ακτινοβολία UV, εφόσον το μικρό μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει οδηγεί σε άμεση απορρόφηση από την ρητίνη και σε γρήγορο πολυμερισμό.

### 2.3.2 Τεχνολογίες πολυμερισμού

Οι αντιδράσεις πολυμερισμού κατατάσσονται με βάση το μηχανισμό αντιδράσεων, σε **σταδιακό** και **αλυσωτό πολυμερισμό**.

Ο **σταδιακός πολυμερισμός** είναι μία αργών ρυθμών αντίδραση η οποία συντελείται με την ανεξάρτητη αντίδραση μεταξύ ζευγών μονομερών και σχηματισμό μιας νέας δομικής χαρακτηριστικής μονάδας που δεν προϋπήρχε στο μονομερές ή στα μονομερή. Κατά τον σταδιακό πολυμερισμό συντελείται η τυχαία αντίδραση μεταξύ οποιονδήποτε μοριακών ειδών που υπάρχουν στο μίγμα της αντίδρασης ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Αυτή είναι η αρχή της ίσης δραστηριότητας και ισχύει για αντιδράσεις μεταξύ μακρομορίων. Όπως βλέπουμε στο επόμενο σχήμα, τα προσομοιώματα διαφορετικού χρώματος αντιπροσωπεύουν κατάλληλες χαρακτηριστικές ομάδες όπως:  $-COOH$ ,  $-OH$ . Σε κάθε στάδιο αντιδράνε κάποια ζεύγη των δύο ομάδων με αποτέλεσμα στο τελικό στάδιο να έχει δημιουργηθεί ένα ενιαίο πολυμερές.



Εικόνα 8 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού σταδιακού πολυμερισμού

Ο **αλυσωτός πολυμερισμός** αποτελεί μία ταχύτατη αντίδραση η οποία όμως προαπαιτεί την ύπαρξη ενός δραστικού κέντρου, το οποίο μπορεί να είναι μία ελεύθερη ρίζα ή ένα κατιόν. Σχεδόν με την έναρξη του πολυμερισμού σχηματίζονται υψιπολυμερή, σε χρόνο της τάξης του ενός δευτερολέπτου και αυτό επιτυγχάνεται με την ταχύτατη προσθήκη μονομερών πάνω στο δραστικό κέντρο προς το σχηματισμό της μακρομοριακής αλυσίδας.

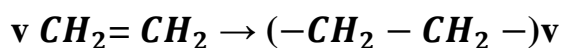
Το μονομερές συνήθως αντιδράει μόνο με την άκρη της αναπτυσσόμενης αλυσίδας του μακρομορίου και επειδή η αλυσίδα αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς, το σύστημα πολυμερισμού περιλαμβάνει μεγάλα μακρομόρια και μονομερή που δεν έχουν αντιδράσει ακόμα. B[2] Στην εικόνα 11, παρουσιάζεται ενδεικτικά ο αλυσωτός πολυμερισμός παρασκευής του πολυαιθυλενίου και έχει τρία στάδια:

**Έναρξη:** Γίνεται η προσθήκη κάποιας ουσίας που ονομάζεται ενεργοποιητής και πραγματοποιείται η μετατροπή του διπλού δεσμού σε απλό καθιστώντας τον ως ενεργό κέντρο σύνδεσης.

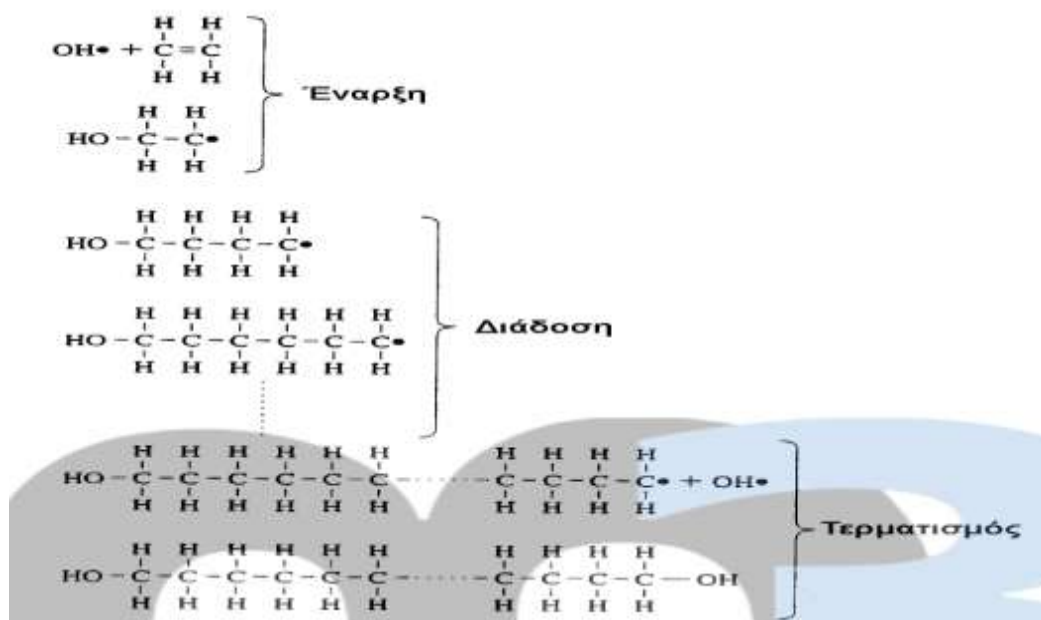
**Διάδοση:** Είναι η αντίδραση σύνδεσης και ανάπτυξης της μακρομοριακής αλυσίδας

**Τερματισμός:** Είναι το στάδιο της διακοπής της αλυσιδωτής αντίδρασης

Η αντίδραση μετατροπής αιθυλενίου σε πολυαιθυλένιο που λαμβάνει χώρα είναι η εξής:



Όπου  $n$ , είναι ο αριθμός των ανεξάρτητων μονομερών αιθυλενίου που θα αντιδράσουν. Το ρόλο του ενεργοποιητή αλλά και του αναστολέα παίζει η ελεύθερη ρίζα του υδροξυλίου ( $\text{OH} \cdot$ ).



Εικόνα 9 Φάσεις αλυσωτού πολυμερισμού πολυαιθυλενίου

### 2.2.3 Δομή ρητινών με εφαρμογές στην στερεολιθογραφία

Τα φωτοπολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται για SLA εφαρμογές αποτελούνται από 3 συνιστώσες. I[2]

- Τη ρητίνη (*UV light Active Monomer*), το μονομερές δηλαδή στο οποίο θα προκαλέσει αλυσωτό πολυμερισμό η υπεριώδης ακτινοβολία.
- Τον φωτοεκκινητή (*Photo initiator*), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας και για την παραγωγή ενεργών ριζών. Η συγκέντρωση του φωτοεκκινητή αυξάνει την ταχύτητα της αντίδρασης αλλά μειώνει το μοριακό βάρος και την πυκνότητα της ρητίνης I[2]. Συχνά οι φωτοεκκινητές χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με φωτοευαισθητοποιητές (*photosensitizers*), οποίοι είναι χρήσιμοι στην περίπτωση που θέλουμε να αυξήσουμε το εύρος απορρόφησης του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.
- Τέλος, προστίθενται επιπλέον συστατικά, τα οποία βελτιώνουν τις ιδιότητες της ρητίνης αναλόγως την χρήση που την θέλουμε. Τέτοια συστατικά μπορεί να είναι ένας διαλύτης, ο οποίος χρειάζεται για την μείωση του ιξώδους της ρητίνης ή ειδική βαφή που προστατεύει τη ρητίνη, αποτρέποντας την διείσδυση της ακτινοβολίας σε μη επιθυμητά επίπεδα. Ελέγχοντας την συγκέντρωση της βαφής μπορούμε να δημιουργήσουμε λεπτότερα ή παχύτερα στρώματα. Μεγάλη συγκέντρωση βαφής προκαλεί λεπτότερα στρώματα αφού αυξάνεται η απορροφητικότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας I[2].

Πλέον, για εμπορικούς λόγους οι βιομηχανίες παράγουν έτοιμες φόρμουλες ρητινών, ιδανικές για ποικίλες εφαρμογές.

### 2.3.4 Μηχανισμός πολυμερισμού με την επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας

Η ρητίνες που χρησιμοποιούνται στην στερεολιθογραφία είναι επιδεκτικές στην αλλαγή των χημικών ιδιοτήτων τους και η στερεοποίηση επιτυγχάνεται με την επιλεκτική απόδοση ενέργειας στις περιοχές που συγκροτούν το σχέδιο.



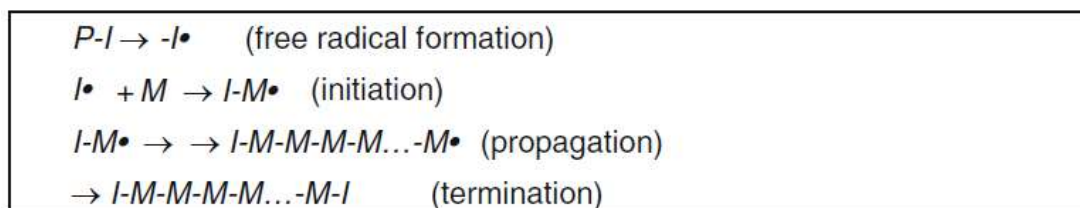
Η εναπόθεση ενέργειας οδηγεί στην ανάπτυξη δικτυώσεων και την δημιουργία σταυροδεσμών (*cross links*) μεταξύ των αλυσίδων, που οδηγεί στην στερεοποίηση της ρητίνης.

Οι δύο βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους επιτυγχάνεται ο φωτοπολυμερισμός, διαφοροποιούνται αναλόγως του είδους του φωτοδιεγέρτη (*photo initiator*) με τον οποίο έχει παρασκευαστή η ρητίνη.

Αν ο φωτοδιεγέρτης είναι **ελεύθερη ρίζα**, δηλαδή πρόκειται για **ακρυλική ρητίνη**, τότε καθώς ακτινοβολείται από την υπεριώδη ακτινοβολία καθίσταται ενεργός και "χτίζεται" με τον μηχανισμό που περιγράφηκε παραπάνω ένα ενιαίο μακρομόριο, το οποίο όταν μεγαλώσει αρκετά είναι πλέον εφικτή η δημιουργία σταυροδεσμών. Τα ακρυλικά φωτοπολυμερή στερεοποιούνται ταχύτατα λόγω της άμεσης αντίδρασης του φωτοδιεγέρτη όταν εκτεθεί στην υπεριώδη ακτινοβολία. Κατά μέσο όρο, ανά δύο φωτόνια του λέιζερ δημιουργείται μια ελεύθερη ρίζα, η οποία μπορεί εύκολα να ενώσει παραπάνω από 1000 μονομερή B[1].

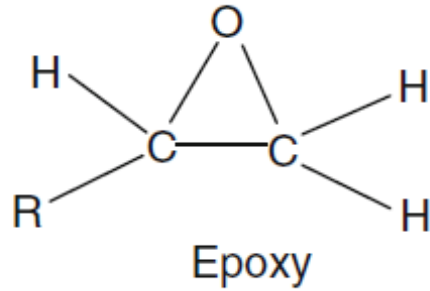
Παρακάτω, παρουσιάζεται πρόχειρα ο μηχανισμός με τον οποίο πολυμερίζεται αλυσωτά μια ακρυλική ρητίνη με ελεύθερη ρίζα, όταν εκτεθεί σε υπεριώδη ακτινοβολία.

Με  $P$  συμβολίζεται ο φωτοδιεγέρτης, με  $-I\bullet$  η ελεύθερη ρίζα και με  $M$  το μονομερές.



Εικόνα 10 Σχηματική αναπαράσταση πολυμερισμού με ελεύθερη ρίζα

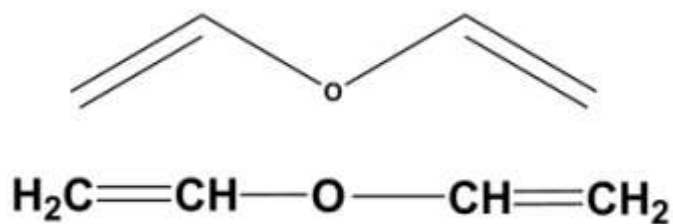
Αν ο φωτοδιεγέρτης έχει την μορφή δακτυλιδιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 13, τότε το φωτοπολυμερές ονομάζεται "κατιονικό", δηλαδή πρόκειται για **εποξική ρητίνη**. Η δομή των δύο μηχανισμών είναι όμοια, απλά στην δεύτερη περίπτωση, ο φωτοδιεγέρτης (*photo initiator*) παράγει ένα κατιόν, το οποίο θα αντιδράσει με το μονομερές για την δημιουργία του πολυμερούς.



Εικόνα 11 Μοριακή δομή εποξικής ρητίνης

Με την έναρξη της αντίδρασης οι δακτύλιοι ανοίγουν και ελευθερώνουν επιπλέον ελεύθερους χημικούς δεσμούς, οι οποίοι εξασφαλίζουν την ελάχιστη παραμόρφωση του τελικού προϊόντος, διότι ο αριθμός των δεσμών και το είδος πριν και μετά την αντίδραση παραμένουν ίδια B[1]. Έτσι τα εποξικά φωτοπολυμερή εμφανίζουν μικρότερη τάση για παραμόρφωση και συρρίκνωση από τα ακρυλικά.

Ο πρώτος μηχανισμός πολυμερισμού που χρησιμοποιήθηκε εμπορικά ήταν πολυμερισμός με ελεύθερη ρίζα και με τον οποίο παρασκευάστηκαν ακρυλικές ρητίνες για τους εκτυπωτές στερεολιθογραφίας. Η ελεύθερες ρίζες ήταν ομάδες βινυλαιθέρων όπως φαίνονται στο σχήμα.



## Vinyl Ether

Εικόνα 12 Ομάδα βινυλαιθέρων

Κατά τον μηχανισμό αυτό, το μονομερές αντιδρά μόνο με την άκρη κάποιων αναπτυσσόμενων αλυσίδων μακρομορίων και όταν αυτές αναπτυχθούν αρκετά, τότε αρχίζει η δημιουργία σταυροδεσμών (*cross links*). Τα ακρυλικά φωτοπολυμερή εμφανίζουν πολύ μεγάλη ταχύτητα επειδή οι αλυσίδες αναπτύσσονται με ταχύτατους ρυθμούς, αλλά εμφανίζουν σημαντικά ποσοστά συρρίκνωσης και παραμόρφωσης.

### **2.3.5 Υβριδικό σύστημα ακρυλικού και εποξικού μονομερούς**

Προκειμένου να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα των ακρυλικών και εποξικών μονομερών, συχνά χρησιμοποιούνται στη μορφή ενός μίγματος. Οι δύο συνιστώσες του μίγματος απευθείας δημιουργούν ένα δίκτυο το οποίο παράγεται από τις ταυτόχρονες αντιδράσεις, με το καθένα μονομερές να υφίσταται ξεχωριστό πολυμερισμό και όχι συμπολυμερισμό.

Παρόλα αυτά, τελικώς τα δύο πολυμερή αλληλοεπηρεάζονται με φυσικό τρόπο. Το ακρυλικό πολυμερές αυξάνει την ταχύτητα του πολυμερισμού και μειώνει το κατώφλι της ενέργειας που χρειάζεται για να λάβει χώρα η αντίδραση του εποξικού πολυμερούς. Τα εποξικά πολυμερή αντίστοιχα, επειδή στερεοποιούνται με πιο αργούς ρυθμούς, συμβάλλουν στην κινητικότητα του μίγματος, διότι παραμένουν σε υγρή κατάσταση ακόμα και όταν τα ακρυλικά έχουν πολυμεριστεί, με αποτέλεσμα να ευνοούν την διάδοση της πολυμερικής αλυσίδας B[1].

Επιπλέον, ο πολυμερισμός του εποξικού πολυμερούς αυξάνει το ιξώδες του μίγματος με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάχυση του οξυγόνου στη ρητίνη και το ακρυλικό πολυμερές να καθίσταται λιγότερο ευαίσθητο στο οξυγόνο B[1].

Επίσης, η αλλαγή της αναλογίας της ακρυλικής και εποξικής συνιστώσας μας επιτρέπει να ελέγξουμε τις ιδιότητες του μίγματος, εφόσον η παρουσία του ακρυλικού πολυμερούς αυξάνει την ταχύτητα της αντίδρασης αλλά ταυτόχρονα οδηγεί τη ρητίνη σε τελική συρρίκνωση, ενώ το εποξικό πολυμερές μειώνει την ταχύτητα αλλά ταυτόχρονα αυξάνει την προσκόλληση των στρωμάτων της ρητίνης και μειώνει την τελική συρρίκνωση.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το υβριδικό σύστημα των ακρυλικών και εποξικών μονομερών πλεονεκτεί έναντι της χρήσης ενός εκ των δύο μονομερών.

### **2.3.6 Βαθμός πολυμερισμού**

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό, ότι ο μηχανισμός του φωτοπολυμερισμού στην στερεολιθογραφία είναι ιδιαίτερα σύνθετος. Στη γενική περίπτωση, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο ρυθμός του φωτοπολυμερισμού, δηλαδή ο ρυθμός κατανάλωσης του

μονομερούς, ελέγχεται από την συγκέντρωση του μονομερούς  $[M]$  και την συγκέντρωση του φωτοδιεγέρτη *photoinitiator*  $[I]$ .

Ο ρυθμός φωτοπολυμερισμού δίνεται από την εξίσωση:

$$R_p = -d[M]/dt * [M] * (k * [I])^{1/2} \quad (1)$$

Όπου η σταθερά  $k$ , είναι χαρακτηριστική για τον φωτοεκκινητή. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός του πολυμερισμού είναι ανάλογος με την συγκέντρωση του μονομερούς αλλά και με την ρίζα της συγκέντρωσης του φωτοδιεγέρτη.

Το μέσο μοριακό βάρος των πολυμερών που παράγονται, που ονομάζεται και μέσου μήκους κινητική αλυσίδα, ισούται με τον λόγο του ρυθμού διάδοσης και του ρυθμού έναρξης του πολυμερισμού και δίνεται από την σχέση:

$$\nu_0 = R_p / R_i * [M] / [I]^{1/2} \quad (2)$$

Οι παραπάνω σχέσεις, έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον πολυμερισμό στην στερεολιθογραφία, καθώς μεγαλύτερος ρυθμός πολυμερισμού μας επιτρέπει την ταχύτερη κατασκευή. Προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός πολυμερισμού, σύμφωνα με την εξίσωση (1) μπορούμε να αυξήσουμε την συγκέντρωση του φωτοδιεγέρτη ή την συγκέντρωση του μονομερούς.

Η δεύτερη περίπτωση είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς η ρητίνη αποτελείται κυρίως από μονομερή υλικά. Ο διπλασιασμός όμως της συγκέντρωσης του φωτοδιεγέρτη, πολλαπλασιάζει τον ρυθμό πολυμερισμού με τον παράγοντα 1.4 και επίσης, από την εξίσωση (2) φαίνεται να μειώνει και το μέσο μοριακό βάρος του πολυμερούς κατά τον ίδιο παράγοντα  $B[1]$ .

Η παραπάνω ανάλυση αναφέρεται κυρίως στις ακρυλικές ρητίνες. Στις εποξικές ρητίνες η διαδικασία είναι πιο σύνθετη διότι ο πολυμερισμός εξελίσσεται με πιο αργούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα να συνεχίζεται και μετά από την έκθεση της ρητίνης στην υπεριώδη ακτινοβολία.

### 2.3.7 Χαρακτηριστική καμπύλη ρητίνης

Πιο συγκεκριμένα, στην στερεολιθογραφία το πάχος των στρωμάτων *cure depth Cd* ελέγχεται από τη μέση ενέργεια έκθεσης στην επιφάνεια της ρητίνης  $E(mJ/cm^2)$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_d = D_p \ln(E_{max} / E_c) \quad (3)$$

Όπου,

- $D_p(cm)$ : το βάθος διείσδυσης, δηλαδή το βάθος στο οποίο η ακτινοβολία έχει μειωθεί στο 1/e της έντασης της δέσμης όσο είναι στην επιφάνεια της ρητίνης
- $E_c(mJ/cm^2)$ : η κρίσιμη ενέργεια, δηλαδή η μέγιστη ενέργεια μέχρι την οποία το υλικό παραμένει σε υγρή μορφή, χωρίς να υποστεί πολυμερισμό
- $E_{max}(mJ/cm^2)$ : η μέση ενέργεια έκθεσης στην επιφάνεια της ρητίνης

Στην επιφάνεια της ρητίνης και στο κέντρο της προβολής της δέσμης υπολογίζεται

$$E_{max} = \frac{P_L}{W_0 V_s} \left(\frac{2}{\pi}\right)^{0.5} \quad (4)$$

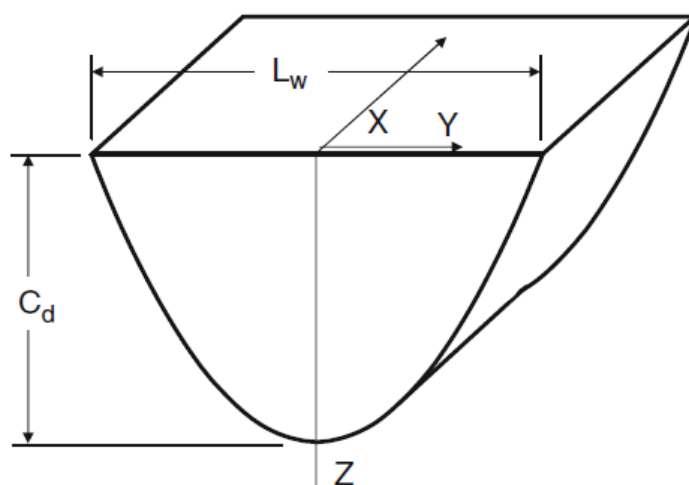
- $P_L (W)$ : η ισχύς του λέιζερ
- $V_s (mm/s)$ : η ταχύτητα σάρωσης του λέιζερ
- $W_0 (mm)$ : η ακτίνα της προβολής της δέσμης

Από την εξίσωση (4), βλέπουμε την εξάρτηση της μέσης ενέργειας έκθεσης  $E_{max}$  και άρα και του πάχους των στρωμάτων  $Cd$  από το αντίστροφο της ταχύτητας του λέιζερ, που σημαίνει ότι δεδομένης της περιορισμένης ταχύτητας που μπορεί να δώσει η εργαλειομηχανή θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μικρής ισχύος λέιζερ ώστε να μπορέσουμε να ελέγξουμε το πάχος των στρωμάτων.

Από το σύστημα των εξισώσεων (3) και (4) προκύπτει η σχέση

$$C_d = D_p \ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_L}{W_0 V_s E_c}\right) \quad [5]$$

Το πλάτος της γραμμής που χαράζει το λέιζερ στην επιφάνεια της ρητίνης, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας καθώς καθορίζει το πάχος των στρωμάτων, όπως βλέπουμε στην εικόνα 15. Η μέγιστη τιμή του  $L_w$  ισούται με  $2y_{max}$  και, αν θεωρήσουμε ορθογώνιο σύστημα αναφοράς με αρχή το κέντρο της προβολής της δέσμης πάνω στην επιφάνεια της ρητίνης, η μέγιστη τιμή του  $L_w$  λαμβάνεται για  $z=0$ .



Εικόνα 13 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά cured line

Σύμφωνα με την εξίσωση (6), το πάχος των στρωμάτων που επιθυμούμε είναι ανάλογο του τετραγώνου του λόγου του πλάτους της γραμμής  $L_w$  προς την ακτίνα της δέσμης  $W_0$ .

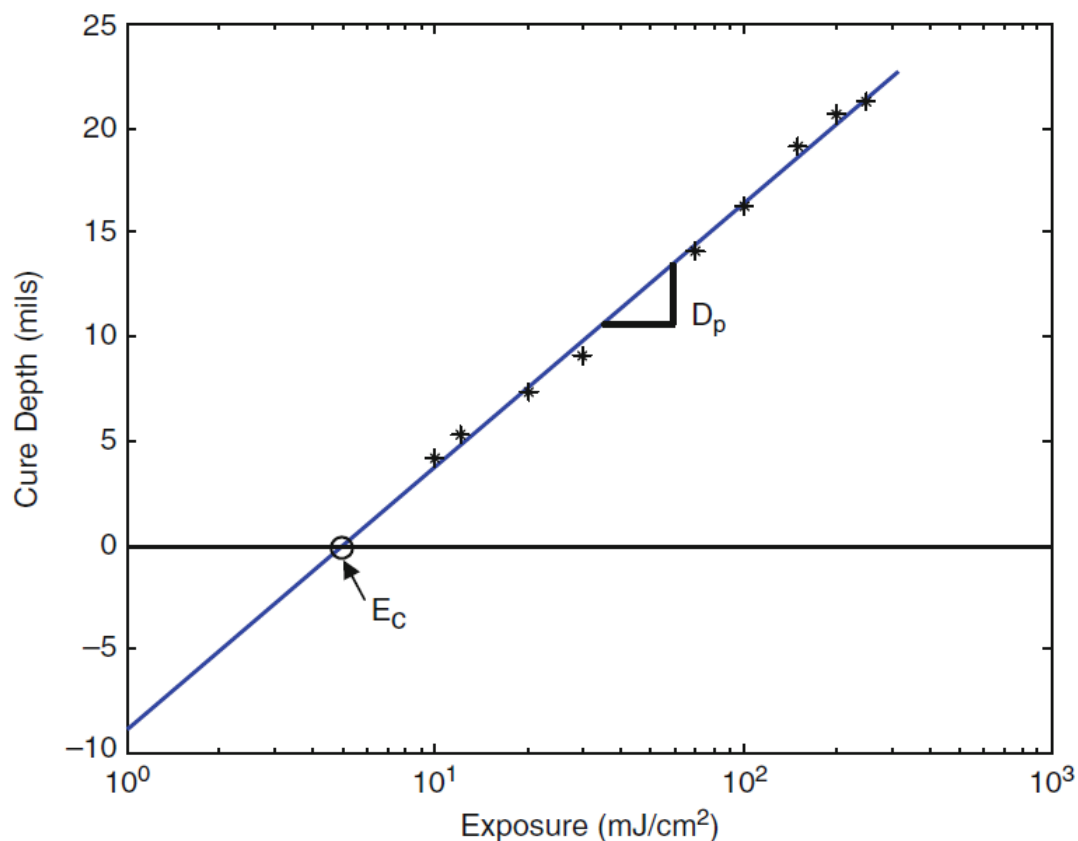
$$C_D = \frac{L_w^2 D_p}{2W_0^2} \quad (6)$$

Όταν η δέσμη του λέιζερ σκανάρει την επιφάνεια της ρητίνης με ταχύτητα  $V_s$ , στερεοποιεί την ρητίνη σε βάθος  $C_D$ , μόνο αν η ταχύτητα επιτρέπει την απορρόφηση ενέργειας η οποία υπερβαίνει το ελάχιστο κατώφλι πολυμερισμού  $E_c$  ( $mJ/mm^2$ ), που είναι αποκλειστικό χαρακτηριστικό της ρητίνης.

Επίσης, το ημιλογαριθμικό διάγραμμα 1 που περιγράφει τη σχέση των μεγεθών  $C_D$  και  $E_{max}$ , και προκύπτει από την γραμμικοποίηση της σχέσης (3) είναι χαρακτηριστικό για την κάθε ρητίνη. Από την κλίση της ευθείας μπορούμε να

υπολογίσουμε απευθείας το βάθος διείσδυσης  $D_p$  που αντιστοιχεί στο μήκος κύματος της ακτινοβολίας του λέιζερ.

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ενώ το βάθος διείσδυσης ( $D_p$ ) και η κρίσιμη ενέργεια ( $E_c$ ) είναι χαρακτηριστικά της ρητίνης, είναι εφικτό αλλάζοντας την ταχύτητα του λέιζερ να επιτύχουμε διαφορετικές τιμές συγκέντρωσης ενέργειας στην επιφάνεια της ρητίνης και άρα διαφορετικά πάχη στρωμάτων.



Διάγραμμα 1 Χαρακτηριστική καμπύλη ρητίνης

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα με την οποία το λέιζερ σαρώνει την επιφάνεια της ρητίνης, τόσο μειώνεται το πάχος των στρωμάτων που δημιουργούνται.

Η εξάρτηση του πάχους των στρωμάτων από την ταχύτητα σάρωσης, είναι χαρακτηριστική της κάθε ρητίνης καθώς σχετίζεται με τις παραμέτρους  $D_p$  και  $E_c$ .

Επιλύνοντας την σχέση [4] ως προς  $V_s$  παίρνουμε μία νέα σχέση που συνδέει την ταχύτητα σάρωσης του λέιζερ με το πάχος των στρωμάτων που δημιουργούνται και τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της ρητίνης.

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_l}{W_0 E_c} e^{-C_D/D_p}$$

Από την παραπάνω σχέση καταλαβαίνουμε ότι μπορούμε να ελέγξουμε την ακρίβεια της εκτύπωσης μέσω της ταχύτητας σάρωσης.

### 2.3.8. Νόμος Beer - Lambert

Ο νόμος του Beer - Lambert συνδέει την ένταση του φωτός που προσπίπτει σε ένα διάλυμα, με την ένταση του φωτός που απορροφάται από αυτό σε κάποιο βάθος και την συγκέντρωση του διαλύματος.

Συγκεκριμένα εκφράζεται από τον τύπο:

$$A = \epsilon l c$$

$$A = -\log (I/I_0)$$

Όπου:

- $A$ : ο λογάριθμος του λόγου της εντάσεως της προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την ακτινοβολία που διαπερνάει το μήκος  $l$
- $\epsilon$ : συντελεστής μοριακής απορρόφησης
- $l$ : το μήκος του δείγματος (πάχος κυψελίδας σε cm)
- $c$ : η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας (σε mole/l)
- $I_0$ : η ένταση του προσπίπτοντος φωτός
- $I$ : η ένταση του φωτός που εξέρχεται από την κυψελίδα



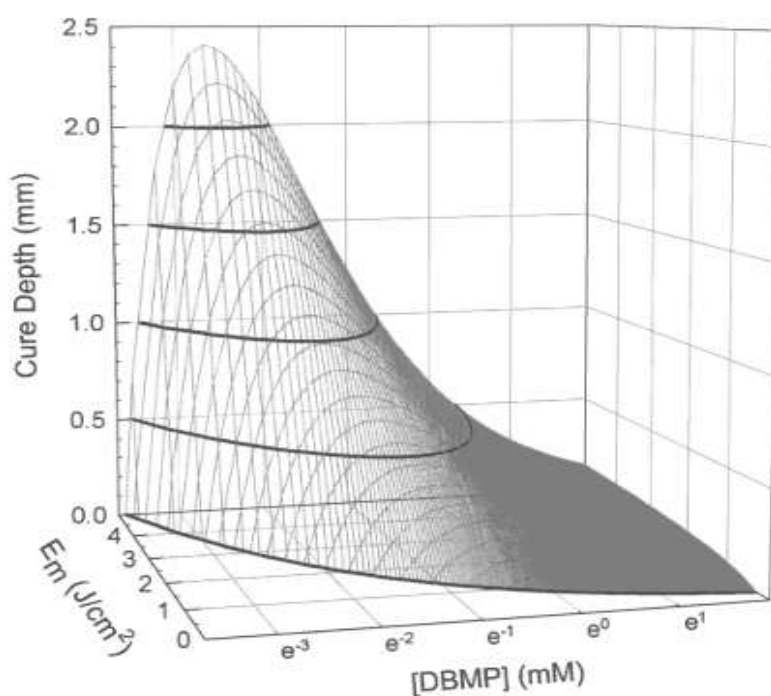
Σύμφωνα με τον νόμο της εκθετικής εξασθένησης του Beer's, η ένταση ακτινοβολίας του λέιζερ σε βάθος  $z$  από την επιφάνεια της ρητίνης δίνεται:

$$I_z = I_0 10^{-\varepsilon [PI]z} \quad I[4]$$

Όπου:

- $I_z$ : η ένταση ακτινοβολίας του λέιζερ σε βάθος  $z$
- $I_0$ : η ένταση ακτινοβολίας του λέιζερ στην επιφάνεια της ρητίνης
- $\varepsilon$ : μοριακός συντελεστής απορρόφησης ( $M^{-1}L^{-1}$ )
- $[PI]$ : μοριακή συγκέντρωση του φωτοδιεγέρτη (M)

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η εξάρτηση του βάθους διείσδυσης ακτινοβολιών διαφόρων ενεργειών, όπως μελετήθηκε στο πολυμερές DBMP [ 2-benzyl-2-N,N-(di-methylamino)-1-(4-morpholinophenyl)-1-butanone ].  $I[4]$



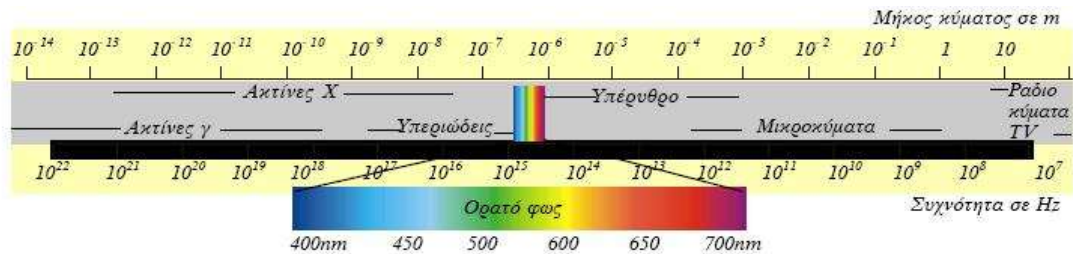
Εικόνα 14 Εξάρτηση βάθους διείσδυσης από ενέργεια ακτινοβολίας και συγκέντρωση

Παρατηρούμε ότι το βάθος διείσδυσης αυξάνεται εκθετικά όταν αυξάνεται η ένταση ακτινοβολίας του λέιζερ.

Επίσης, ενώ αρχικά το βάθος διείσδυσης βλέπουμε να αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του φωτοδιεγέρτη, αφού προσεγγίσει μία μέγιστη τιμή, έπειτα μειώνεται εκθετικά μέχρι τον μηδενισμό του.

### 2.3.9 Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας με την ύλη

Οι ακτινοβολίες ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων τους αλληλεπιδρούν με διαφορετικό τρόπο με την ύλη. Η ορατή ακτινοβολία είναι γνωστό ότι έχει ενέργεια 1-3eV και, πιο συγκεκριμένα λέιζερ 405 nm αντιστοιχεί σε ενέργεια φωτονίου



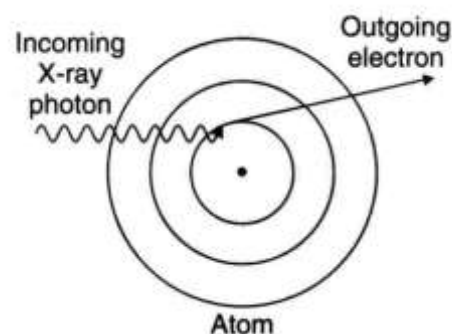
Εικόνα 15 Φάσμα ορατής ακτινοβολίας

$$E = h \frac{c}{\lambda} = 2,8 \text{ eV}$$

- h: σταθερά του Planck
- c: η ταχύτητα του φωτός στο κενό
- λ: το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

Για ενέργειες φωτονίων μικρότερες από 100keV, κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη κυριαρχεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. E[1]

Κατά τη διάρκεια του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, το προσπίπτον στο άτομο φωτόνιο, απορροφάται πλήρως από ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας. Το ηλεκτρόνιο αποκτά τότε ενέργεια ίση με τη διαφορά της ενέργειας του φωτονίου με την ενέργεια σύνδεσης (η οποία εξαρτάται από τη στιβάδα που βρίσκεται) και αποδεσμεύεται. Δηλαδή, η κινητική ενέργεια του παραγόμενου φωτοηλεκτρονίου είναι:  $K = E - \Phi$ .



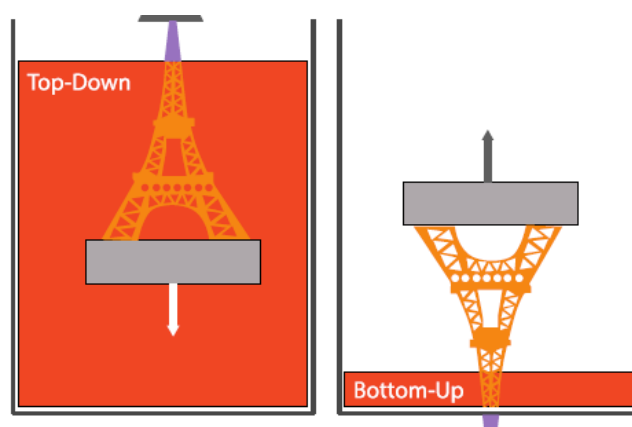
Εικόνα 16 Παραγωγή φωτοηλεκτρονίου

Για μεγαλύτερες ενέργειες φωτονίων κυριαρχούν άλλα φαινόμενα αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη.

1. Σκέδαση Compton ( $0,1 \text{ MeV} < \text{ενέργειες ακτινοβολίας} < 1 \text{ MeV}$ ):
2. Δίδυμη γένεση (ενέργειες ακτινοβολίας  $> 1,02 \text{ MeV}$ ):

## 2.4 Ανάλυση διατάξεων στερεολιθογραφίας τύπου top-down και bottom-up

Οι διατάξεις τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσω στερεολιθογραφίας διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής τους. Οι δύο μηχανισμοί αυτοί είναι γνωστοί με τις ορολογίες bottom-up και top-down ανάλογα με τον τρόπο που ακτινοβολείται η ρητίνη. Και οι δύο μηχανισμοί έχουν πλεονεκτήματα καθώς και προβλήματα τα οποία θα παρουσιαστούν παρακάτω.



Εικόνα 17 Διατάξεις στερεολιθογραφίας τύπου Top-Down και Bottom-Up

Στην **τεχνολογία top-down**, η πλατφόρμα πάνω στην οποία κατασκευάζεται το αντικείμενο αρχικά βρίσκεται στην κορυφή του δοχείου και σταδιακά κατεβαίνει βυθίζοντας το αντικείμενο ολόκληρο στην ρητίνη. Στην διάταξη αυτή, το βάθος του δοχείου περιορίζει το ύψος του αντικειμένου. Το λέιζερ πολυμερίζει κάθε φορά μόνο το στρώμα της ρητίνης που βρίσκεται στην κορυφή του δοχείου, αλλά το δοχείο πρέπει να είναι συμπληρωμένο με τη ρητίνη εξ αρχής. Το μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας top-down είναι η ευκολία στην κατασκευή καθώς δεν χρειάζεται κάποιος μηχανισμός που να καλύπτει το κενό ανάμεσα στη ρητίνη και το αντικείμενο, όπως θα δούμε ότι χρειάζεται στην τεχνολογία bottom-up.

Στην **τεχνολογία bottom-up**, το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι μόνο ένα μικρό μέρος της ρητίνης βρίσκεται στον πυθμένα του δοχείου και δεν χρειάζεται το δοχείο να είναι συμπληρωμένο με ρητίνη. Επίσης, το αντικείμενο σταδιακά φέρεται προς τα πάνω και το δοχείο στην περίπτωση αυτή δεν περιορίζει τις διαστάσεις του αντικειμένου. Βασικό μειονέκτημα του μηχανισμού bottom-up είναι ότι εφόσον η ρητίνη είναι τοποθετημένη πάνω στην πλατφόρμα, αυτή πρέπει να είναι

κατασκευασμένη από υλικό διαφανές, αντικολλητικό καθώς και διαπερατό στα μήκη κύματος που απορροφάει η ρητίνη. Επίσης αναπτύσσεται ένα κενό ανάμεσα στο κάτω μέρος του αντικειμένου και στην επιφάνεια της πλατφόρμας, το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί με τον κατάλληλο μηχανισμό. Η τεχνολογία bottom-up είναι πιο σύνθετη και η κατασκευή της όχι τόσο οικονομική όσο της τεχνολογίας top-down.

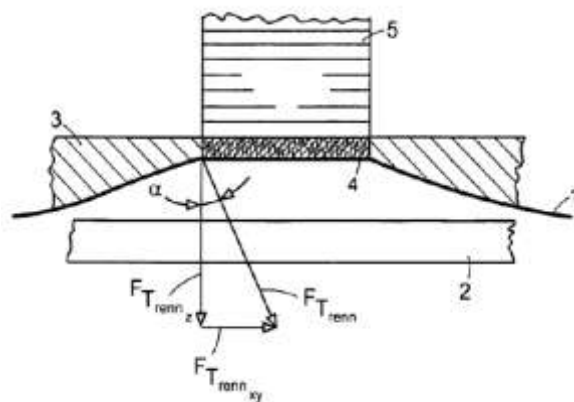
Ο εκτυπωτής Envisiontec Perfactory τεχνολογίας *DLP* μπορεί να κατασκευάζει αντικείμενα διαστάσεων 192 x 120 x 230 mm σε ανάλυση προβολής 100 μm και ανάλυση κίνησης στον κατακόρυφο άξονα 25-150 μm. Επίσης ο εκτυπωτής Envisiontec Perfactory περιλαμβάνει ένα κουτί χρώματος πορτοκαλί δεδομένου ότι τα χαμηλότερα



Εικόνα 18 Εκτυπωτής Envisiontec Perfactory

μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε άλλα χρώματα, απορροφούνται από την ρητίνη. Η διάταξη είναι τύπου bottom-up συνεπώς χρειάζεται ο μηχανισμός του παρακάτω σχήματος που είναι τοποθετημένος στην πλατφόρμα για να "ξεκολλάει" τη πολυμερισμένη ρητίνη από αυτήν.

Ένα λεπτό και ευέλικτο φιλμ (1) είναι τοποθετημένο έτσι ώστε να είναι σε επαφή με το στρώμα της ρητίνης που θα πολυμεριστεί (4), μία διαφανής στα μήκη κύματος εκπομπής του προτζέκτορα πλατφόρμα (2) είναι τοποθετημένη κάτω από το φιλμ.



Εικόνα 19 Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού αποκόλλησης στερεοποιημένης ρητίνης στην τεχνολογία DLP

# Κεφάλαιο 3

---

## Τρισδιάστατη εκτύπωση στερεολιθογραφίας και τεχνική έκθεση διάταξης


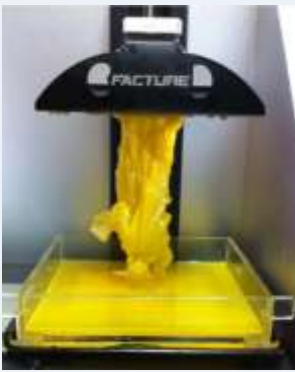

### 3.1 Κριτήρια επιλογής τρισδιάστατου εκτυπωτή στερεολιθογραφίας




Η επιλογή ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή στερεολιθογραφίας θα πρέπει να γίνει βάσει των απαιτήσεων που αφορούν το μέγεθος και το είδος της παραγωγής που επιθυμούμε.

Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα κριτήρια επιλογής ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή στερεολιθογραφίας και βάσει αυτών θα γίνει έπειτα η σύγκριση μεταξύ των πιο γνωστών τρισδιάστατων εκτυπωτών (πίνακας 2) που κυκλοφόρησαν το 2016.

- Το **επιθυμητό μέγεθος εκτύπωσης** είναι ίσως η βασικότερη παράμετρος της επιλογής, εφόσον περιορίζει το μέγεθος και την ποσότητα εκτύπωσης που επιθυμούμε. Το μέγεθος εκτύπωσης ανήκει στο εύρος περίπου από 2mm μέχρι 20mm και είναι σημαντικό να επιλεγθεί ο κατάλληλος εκτυπωτής που να μας επιτρέπει την εκτύπωση αντικειμένου κάθε μεγέθους.
- Το **ελάχιστο επιθυμητό πάχος στρώματος** αποτελεί επίσης βασική παράμετρο επιλογής, εφόσον λεπτά στρώματα δημιουργούν στιβαρά και ταυτόχρονα ακριβή αντικείμενα, με το μειονέκτημα όμως ότι αυξάνεται ο χρόνος της παραγωγής αυτών. Τυπικές τιμές ελαχίστου πάχους στρωμάτων που είναι δυνατές με τους σύγχρονους εκτυπωτές στερεολιθογραφίας είναι από 25 μέχρι 100 μm.
- Η **ταχύτητα εκτύπωσης** είναι παράμετρος που αφενός εξαρτάται από την πολυπλοκότητα και το μέγεθος του προς εκτύπωση αντικειμένου, αλλά και από την δυνατότητα του εκτυπωτή. Η ταχύτητα εκτύπωσης υπολογίζεται σε εκατοστά ανά ώρα ή στρώματα ανά ώρα. Συνηθισμένες τιμές ταχυτήτων εκτύπωσης είναι μέχρι 2 ίντσες ανά ώρα.
- Η **συμβατότητα** του εκτυπωτή με λογισμικά 3D design πολλές φορές είναι περιορισμένη καθώς κάποιοι εκτυπωτές είναι συμβατοί μονάχα με λογισμικά του κατασκευαστή τους και δεν επιτρέπουν την επεξεργασία και εκτύπωση σχεδίων από άλλα προγράμματα.

Πίνακας 2 Τεχνικά χαρακτηριστικά σύγχρονων εκτυπωτών τεχνολογίας *Digital Light Processing (DLP)*

			
	<b>XYZ Printing Nobel 1.0</b>	<b>3D FACTURE</b>	<b>FSL3D Pegasus Touch</b>
<b>Τιμή €</b>	1500	1.799	2750
<b>Όγκος δοχείου(ίντσες)</b>	-	-	-
<b>Διαστάσεις εκτύπωσης (ίντσες)</b>	5 L x 5 W x 7.9 H	7.1 L x 3.9 W x 8.7 H	7.0 L x 7.0 W x 9.0 H
<b>Ελάχιστο μέγεθος εκτύπωσης (μm)</b>	-	100	250
<b>Ελάχιστο πάχος στρώματος (μm)</b>	25	10	5
<b>Ακρίβεια κίνησης στο xy επίπεδο (μm)</b>	300	37 - 90	-
<b>Ταχύτητα εκτύπωσης (ίντσες/ώρα)</b>	-	1.8 ίντσες/ώρα	-
<b>Φορμάτ αρχείων</b>	.stl, .XYZ format	-	-
<b>Λειτουργικό σύστημα</b>	Windows 7, Mac OS X 10.8	-	-

			
	<b>Form 1+ SLA 3D Printer</b>	<b>DWSLab Xfab</b>	<b>B9Creator</b>
<b>Τιμή €</b>	3300	5000	5495
<b>Όγκος δοχείου(ίντσες)</b>	4.9 L x 4.9 W x 6.5 H	-	-
<b>Διαστάσεις εκτύπωσης (ίντσες)</b>	12 L x 11 W x 18 H	9 x 9	4.0 L x 3.0 W x 8.1 H
<b>Ελάχιστο μέγεθος εκτύπωσης (μm)</b>	300	250	-
<b>Ελάχιστο πάχος στρώματος (μm)</b>	25	10	5
<b>Ακρίβεια κίνησης στο xy επίπεδο (μm)</b>	-	-	30-70
<b>Ταχύτητα εκτύπωσης (ίντσες/ώρα)</b>	0.6	-	0.47 - 0.8
<b>Φορμάτ αρχείων</b>	.stl, .obj	.stl, .slc, .nauta, .fictor, .mkr, .3dm, .3ds, .ply, .obj, .lwo, .x	-
<b>Λειτουργικό σύστημα</b>	XP (SP3+), Mac OS X (10.6.8+), OpenGL 2.1	Windows 7	-
<b>Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)</b>	18-28	-	-

### 3.2 Το προτεινόμενο σύστημα

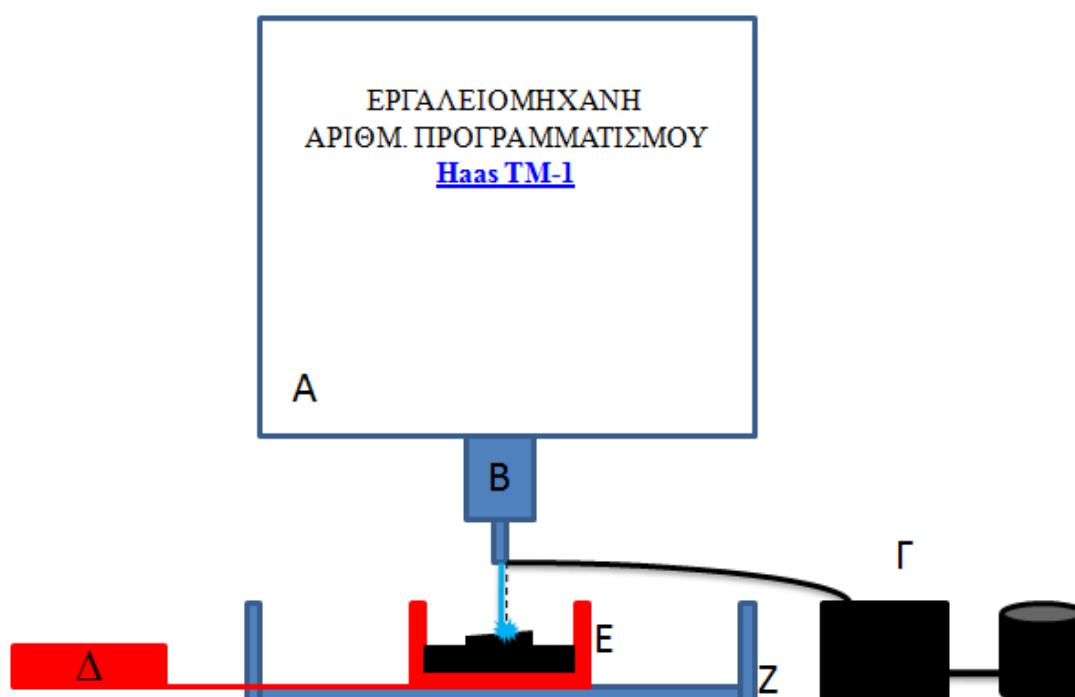
Τα βασικά μέρη του συστήματος που προτείνεται παρουσιάζονται παρακάτω:

A. Εργαλειομηχανή CNC Haas TM-1: Η κεντρική μονάδα κατεργασιών στην οποία θα ενσωματωθεί το φορητό σύστημα στερεολιθογραφίας.

B. Σύστημα ακτινοβολίας της ρητίνης: Το σύστημα ακτινοβολίας αποτελείται από λέιζερ ισχύος 20 mW, μονοχρωματικής ακτινοβολίας 405 nm, τον αντίστοιχο driver και την βάση στήριξης με την οποία αναρτάται στον εργαλειοδέτη της μηχανής CNC Haas TM-1.

Γ. Σύστημα άντλησης της ρητίνης: Το σύστημα άντλησης της ρητίνης αποτελείται από την δοσομετρική αντλία περισταλτικού τύπου και το ολοκληρωμένο κύκλωμα arduino με το οποίο προγραμματίζεται η λειτουργία της.

Δ,Ε. Σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας της ρητίνης: Το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας της ρητίνης αποτελείται από το θερμικά αγωγίμο δοχείο αλουμινίου και τον ψηφιακό θερμοστάτη θερμοζεύγους.



Εικόνα 20 A: CNC Haas TM-1, B: Σύστημα ακτινοβολίας, Γ: Σύστημα άντλησης, Δ: Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας, E: Δοχείο SLA, Z: Τραπέζι εργαλειομηχανής



### 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής Haas TM-1

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα υλικά που επιλέχθηκαν για την κατασκευή της διάταξης, θα δοκιμαστούν σε μια ήδη υπάρχουσα εργαλειομηχανή αριθμητικού προγραμματισμού CNC, που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία μεταλλικών κομματιών στο εργαστήριο των μηχανολόγων μηχανικών. Για τις ανάγκες της εργασίας, θα αφαιρεθεί το κοπτικό εργαλείο και θα γίνει η προσάρτηση της συσκευής λείζερ που επιλέχθηκε, με σκοπό να προσομοιωθεί η φορητή μονάδα στερεολιθογραφίας που θα κατασκευαστεί.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής Haas TM-1 που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο για την υλοποίηση του εργαστηριακού μέρους της εργασίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά όπως θα δούμε παρακάτω, θέτουν κάποιους περιορισμούς στην επιλογή των υλικών.

Επιτρεπτά μήκη τροχιών ανά άξονα

TRAVELS	S.A.E.	METRIC
X Axis	30"	762 mm
Y Axis	12"	305 mm
Z Axis	16"	406 mm
Spindle Nose to Table (- max)	20"	508 mm
Spindle Nose to Table (- min)	4"	102 mm

Διαστάσεις της πλατφόρμας

TABLE	S.A.E.	METRIC
Length	47.75"	1213 mm
Width	10.5"	267 mm
T-Slot Width	5/8"	16 mm
T-Slot Center Distance	4.00"	101.6 mm
Number of Std T-Slots	3	3
Max Weight on Table (evenly distributed)	1000 lb	454 kg

## Ταχύτητες πρόωσης ανά άξονα

FEEDRATES	S.A.E.	METRIC
Rapids on X	200 in/min	5.1 m/min
Rapids on Y	200 in/min	5.1 m/min
Rapids on Z	200 in/min	5.1 m/min
Max Cutting	200 in/min	5.1 m/min

### 3.4 Τεχνολογίες λέιζερ

Οι τεχνολογίες λέιζερ διαιρούνται σε ομάδες σύμφωνα με την κατάσταση του ενεργού υλικού (*στερεό, υγρό ή αέριο*), καθώς και την ζώνη του μήκους κύματος στο οποίο εκπέμπουν (*ορατό, υπέρυθρο ή υπεριώδες*). Εμείς θα περιοριστούμε στα λέιζερ στερεάς κατάστασης και μάλιστα στα λέιζερ ημιαγωγών ή διόδων, διότι τα άτομα στη στερεά κατάσταση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν ευκολότερα. Γι' αυτό, το εύρος των γραμμών στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης των λέιζερ στερεάς κατάστασης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των λέιζερ αερίων και υγρών. Ευρύ φάσμα απορρόφησης σημαίνει πως η προσφορά ενέργειας μπορεί να γίνει από πηγή φωτός, η οποία δεν είναι απαραίτητα μονοχρωματική ακτινοβολία [5]. Τα λέιζερ στερεάς κατάστασης χωρίζονται σε λέιζερ μονωτών και ημιαγωγών (*διόδων*).

Τα τελευταία χρόνια εξελίχθηκε η τεχνολογία των λέιζερ διόδων, τα οποία σε αντίθεση με τα κλασικά λέιζερ στερεάς κατάστασης έχουν μικρές διαστάσεις και παρέχουν την δυνατότητα παραγωγής διαφορετικών μηκών κύματος ανάλογα με την δίοδο που χρησιμοποιείται. Τα λέιζερ αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε ποικιλία καταναλωτικών προϊόντων μεταξύ των οποίων είναι και οι εκτυπωτές λέιζερ, καθώς επίσης και σε πολλές διατάξεις επεξεργασίας υλικών με ταχεία προτυποποίηση.

Επιπλέον, έχουν ισχύ μέχρι μερικές δεκάδες  $mW$  και, ως εκ τούτου, οι ακτινοβολίες τους δεν προκαλούν μακροχημικές αντιδράσεις με την ύλη και παραγωγή θερμότητας [5].

### 3.4.1 Λείζερ ημιαγωγών (διόδου)

Μια διόδος, είναι με απλά λόγια η επαφή ανάμεσα σε έναν ημιαγωγό τύπου p και έναν ημιαγωγό τύπου n. Το βασικό χαρακτηριστικό της διόδου, το οποίο την κάνει τόσο δημοφιλή σε όλη την τεχνολογία, είναι ότι η ένωση αυτή δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαχωρίζει τους φορείς των ζευγών ηλεκτρονίων - οπών (ZHO).

Το ενεργό υλικό που χρησιμοποιείται στα λείζερ ημιαγωγών, είναι συνήθως εμπλουτισμένο με ιόντα άλλων υλικών, που ονομάζονται υλικά πρόσμιξης. Τα ιόντα των υλικών πρόσμιξης αντικαθιστούν άτομα του υλικού βάσης και είναι αυτά που παρέχουν τα κατάλληλα ενεργειακά επίπεδα για την παραγωγή μονοχρωματικής ακτινοβολίας λείζερ. Το στερεό ενεργό υλικό που διεγείρεται με οπτική ακτινοβολία είναι κρύσταλλος ή γυαλί, συνήθως σε σχήμα κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο.

Η ενέργεια εισέρχεται από την παράπλευρη επιφάνεια, ενώ η δέσμη λείζερ εξέρχεται, από τις βάσεις.

Παρακάτω ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή των ημιαγωγών, η οποία είναι απαραίτητη για την κατανόηση της λειτουργίας των λείζερ διόδων.

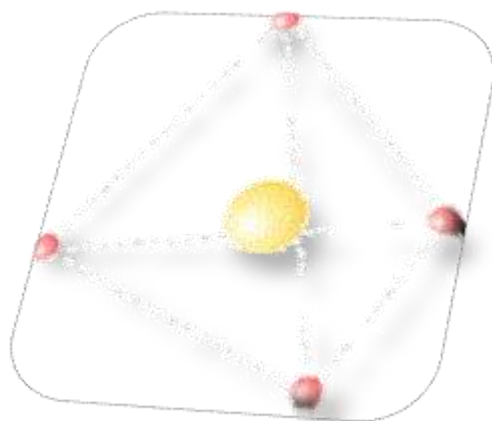
## Ημιαγωγοί

Τα κρυσταλλικά στερεά διακρίνονται ανάλογα με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες σε τρεις κατηγορίες:

- Αγώγιμα στερεά, τα οποία είναι τα μέταλλα αλλά και τα κράματά τους. Στους αγωγούς, οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται στο κρυσταλλικό πλέγμα και για τον λόγο αυτό τα μέταλλα παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν εφαρμοστεί σε αυτά ηλεκτρικό πεδίο.
- Ημιαγώγιμα υλικά, των οποίων η αγωγιμότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τον εμπλουτισμό τους με φορείς μειονότητας και του βαθμού κατάληψης των ενεργειακών τους ζωνών με ηλεκτρόνια.
- Μη αγώγιμα στερεά ή μονωτές, τα οποία δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, διότι τα ηλεκτρόνιά τους είναι δέσμια στα άτομα που τους αποτελούν.

### 3.4.2 Ημιαγωγοί και προσμίξεις

Κάθε άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 ηλεκτρόνια αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα περιλαμβάνει τα υπολειπόμενα 4 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου σχηματίζοντας την κρυσταλλική πυραμιδική δομή του καθαρού πυριτίου B[3].



Εικόνα 21 Η τετραεδρική δομή του ατόμου του Si. Οι κόκκινες σφαίρες αντιπροσωπεύουν τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας, ενώ η κίτρινη τον πυρήνα.

Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού καθώς δεν υπάρχουν ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια όπως στην περίπτωση του μεταλλικού πλέγματος.

Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο κρυσταλλικό πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται, σπάζουν τους δεσμούς τους και απομακρύνονται προς τα γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας διαθέσιμες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Οι θέσεις αυτές καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό.

Ο αριθμός όμως των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν είναι σημαντικά περιορισμένος για να χρησιμεύσει στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό εισάγονται άτομα από άλλα υλικά στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου. Τα άτομα πρόσμιξης πρέπει να έχουν στην εξωτερική στοιβάδα περισσότερα ή λιγότερα ηλεκτρόνια από αυτά που έχουν τα άτομα του υλικού βάσης, για να διευκολυνθεί η κίνηση των φορέων μειονότητας όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

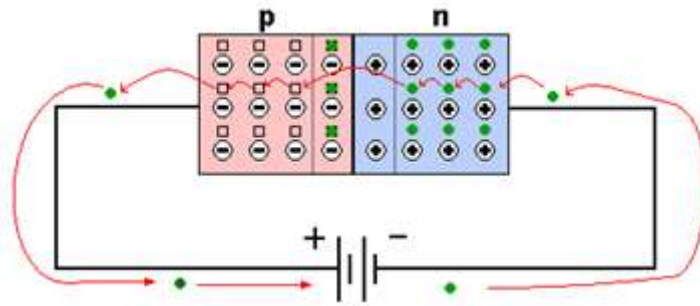
- Το **πεντασθενές αρσένιο ( $As$ )** διαθέτει ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στιβάδα από το πυρίτιο. Το ηλεκτρόνιο αυτό δεν μπορεί να ενταχθεί σε ομοιοπολικό δεσμό με τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων πυριτίου και παραμένει σε τροχιά γύρω από το ιοντικό κέντρο  $As^+$  (για αυτό βλέπουμε στην εικόνα 21 θετικά ιόντα αρσενικού και ελεύθερα ηλεκτρόνια στην ουδέτερη περιοχή  $n$ )
- Το **τρισθενές Βόριο ( $B$ )** διαθέτει τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στιβάδα, δηλαδή ένα λιγότερο από τα ηλεκτρόνια σθένους του πυριτίου. Όταν ενταχθούν τα άτομα του Βορίου στο πλέγμα του πυριτίου, ένας ομοιοπολικός δεσμός από τα 4 γειτονικά άτομα του πυριτίου θα έχει ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο, γεγονός που ισοδυναμεί με την ύπαρξη μίας οπής. Η οπή με βάση το φαινόμενο της σήραγγας μπορεί να καλυφθεί από γειτονικά ηλεκτρόνια αλλά και πάλι θα έλκεται από το ιοντικό κέντρο  $B^-$  με αποτέλεσμα να περιστρέφεται γύρω από αυτό (για αυτό βλέπουμε στην εικόνα 21 αρνητικά ιόντα και οπές στην ουδέτερη περιοχή  $p$ ).

Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς τύπου  $n$  και τύπου  $p$  σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο με τον εξής μηχανισμό:

Τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου  $n$ , λόγω της κλίσης της συγκέντρωσής τους, κινούνται προς τις κενές θέσεις (οπές) του ημιαγωγού τύπου  $p$  για να τις καλύψουν. Τα ηλεκτρόνια όμως, που εγκαταλείπουν την  $n$  περιοχή κοντά στην ένωση δημιουργούν μια περιοχή με θετικά φορτισμένα ιόντα δοτών, απογυμνωμένα από ηλεκτρόνια, με συγκέντρωση  $N_d$ .

Αντίστοιχα, οι οπές του ημιαγωγού τύπου  $p$ , λόγω της κλίσης της συγκέντρωσής τους εισέρχονται στην περιοχή  $n$  και επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται κοντά στην ένωση. Αλλά οι οπές που εγκαταλείπουν την  $p$  περιοχή κοντά στην ένωση, δημιουργούν μια περιοχή με αρνητικά φορτισμένα ιόντα αποδεκτών, με συγκέντρωση  $N_a$ .

Υπάρχει λοιπόν, γύρω από την μεταλλουργική ένωση, μια περιοχή φορτίου χώρου η οποία καλείται και **περιοχή απογύμνωσης**.



Εικόνα 22 Περιοχή απογύμνωσης σε δίοδο p-n

Η κατάσταση αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου επιτευχθεί κατάσταση “ισορροπίας”, στην οποία οι οπές που διαχέονται προς τα δεξιά λόγω της κλίσης της συγκέντρωσης εξισορροπούνται από τις οπές που ολισθαίνουν προς τα αριστερά λόγω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου  $E_o$ . Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν σύστημα ηλεκτρικά φορτισμένων παράλληλων πλακών επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο τύπου p στο n αλλά όχι αντίστροφα B[3].

Όπως γίνεται κατανοητό υπάρχουν δύο παράγοντες δυνάμεων σε μία δίοδο:

1. **ο παράγοντας της διάχυσης**, που οφείλεται στις συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων στις περιοχές τύπου p και n αντίστοιχα και ο οποίος διαχέει τις οπές στην περιοχή n και τα ηλεκτρόνια στην περιοχή p B[3].
2. **ο παράγοντας του ηλεκτρικού πεδίου**, που προκαλεί την ολίσθηση των οπών στην p-περιοχή και των ηλεκτρονίων στην n περιοχή, δηλαδή αντιτίθεται στον παράγοντα της διάχυσης.

### 3.4.3 Ορθή και ανάστροφη πόλωση στη δίοδο

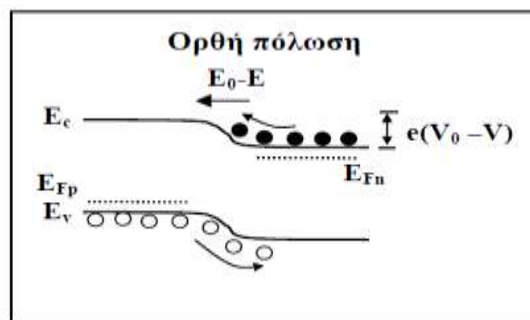
Όταν εφαρμόσουμε τάση σε μία ένωση p-n, τότε παύουν να είναι ευθυγραμμισμένες οι στάθμες Fermi ( $E_F$ ) των δύο ημιαγωγικών υλικών και για αυτό το λόγο μεγαλώνουν ή μικραίνουν οι πιθανότητες να περάσουν ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p.

Σε γενικές γραμμές ισχύει ότι για θερμοκρασίες μεγαλύτερες του μηδενός οι ενεργειακές στάθμες με  $E < E_F$  είναι οι περισσότερες κατειλημμένες, κάθε ενεργειακή στάθμη με  $E = E_F$  έχει πιθανότητα 50% να είναι κατειλημμένη, ενώ οι ενεργειακές στάθμες με  $E > E_F$  είναι οι περισσότερες κενές. Δηλαδή, η ενέργεια Φέρμι

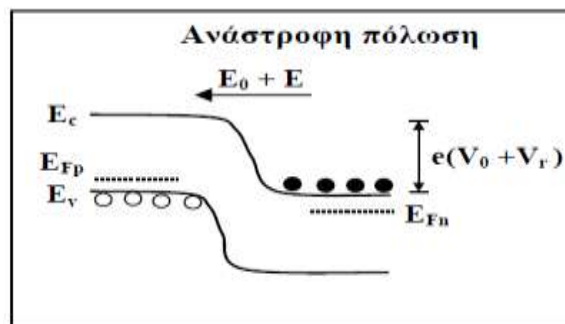
αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί στο ημιαγωγίμο υλικό ώστε ένα ηλεκτρόνιο να μεταβεί στην ζώνη αγωγιμότητας.

Αυτό το φαινόμενο μας επιτρέπει να ελέγξουμε την κατεύθυνση του ρεύματος ή μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη δίοδο ως διακόπτη και άλλες εφαρμογές.

Όταν πολωθεί ορθά η δίοδος, δηλαδή όταν συνδέσουμε τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής στον ημιαγωγό τύπου n, η αρνητική πολικότητα της παροχής θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του φράγματος δυναμικού  $V_o$  κατά  $V$ , δηλαδή η ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου n θα πλησιάσει την ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου p και θα μπορεί να μεταβεί το ηλεκτρόνιο στην άλλη περιοχή με μεγαλύτερη ευκολία B[3].



Εικόνα 23 Ενεργειακό διάγραμμα ορθής πόλωσης



Εικόνα 24 Ενεργειακό διάγραμμα ανάστροφης πόλωσης

Αντίθετα, όταν η ένωση πολωθεί ανάστροφα, δηλαδή ο αρνητικός ακροδέκτης της πηγής συνδεθεί στον ημιαγωγό τύπου p και ο θετικός ακροδέκτης στον ημιαγωγό τύπου n, τότε ο αρνητικός πόλος έλκει τις οπές της p περιοχής και τις απομακρύνει από την περιοχή φορτίου χώρου και ο θετικός πόλος έλκει τα ηλεκτρόνια από την περιοχή φορτίου χώρου δημιουργώντας περισσότερους απογυμνωμένους θετικούς δότες.

Στη περίπτωση αυτή, η ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου  $n$  και του ημιαγωγού τύπου  $p$  θα απομακρυνθούν με αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο να μην μπορεί να μεταβεί στην άλλη περιοχή με ευκολία B[3].

### 3.4.4 Εκπομπή μονοχρωματικής ακτινοβολίας λέιζερ

Στα λέιζερ διόδου η άντληση επιτυγχάνεται με την εφαρμογή τάσης ορθής πόλωσης στην ημιαγωγό διάταξη και έτσι έχουμε διαρκή επαναφορά ηλεκτρονίων αγωγιμότητας στην πλευρά  $n$  με ταυτόχρονη αναστροφή πληθυσμών κατά μήκος του οριακού στρώματος της επαφής.

Στα λέιζερ διόδου, η αναστροφή πληθυσμών πραγματοποιείται μεταξύ των ενεργειακών ζωνών αγωγιμότητας και σθένους και επομένως το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θα εξαρτάται από το εύρος του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού.

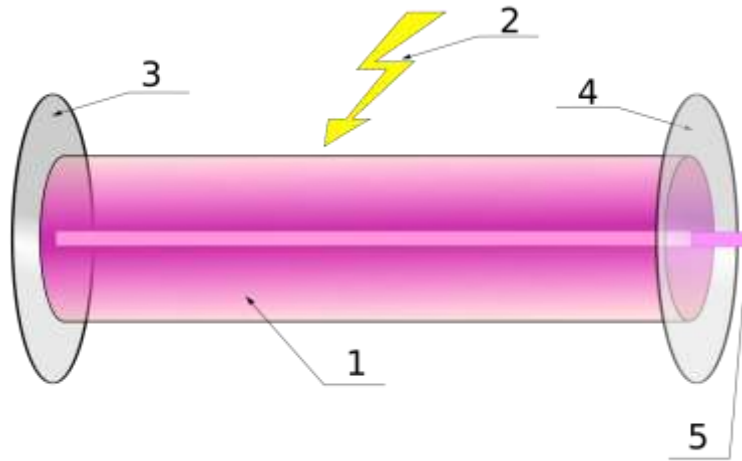
Συγκεκριμένα, αν η δίοδος πολωθεί ορθά, τότε μέσα από αυτή θα περάσει ηλεκτρικό ρεύμα, με αποτέλεσμα κάποια ηλεκτρόνια να αποκτούν αρκετή ενέργεια ώστε να μεταπηδούν από τη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου  $n$  στην ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου  $p$  δημιουργώντας έτσι μια διεγερμένη κατάσταση μέσα στη δίοδο I[6].

Κάτω απ' αυτές τις συνθήκες, ένα ηλεκτρόνιο επανασυνδέεται αυθόρμητα με μια οπή στην  $p$  περιοχή, ελευθερώνοντας ενέργεια υπό μορφή φωτονίου:

$$E_g = h\nu$$

Τα παραγόμενα φωτόνια συντονίζονται μεταξύ τους και διαδίδονται μέσα στο οπτικό αντηχείο.





Εικόνα 25 Αρχή λειτουργίας του λέιζερ: 1. Ενεργό υλικό του λέιζερ 2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης 3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο 4. Διάταξη εξόδου δέσμης 5. Δέσμη Λέιζερ

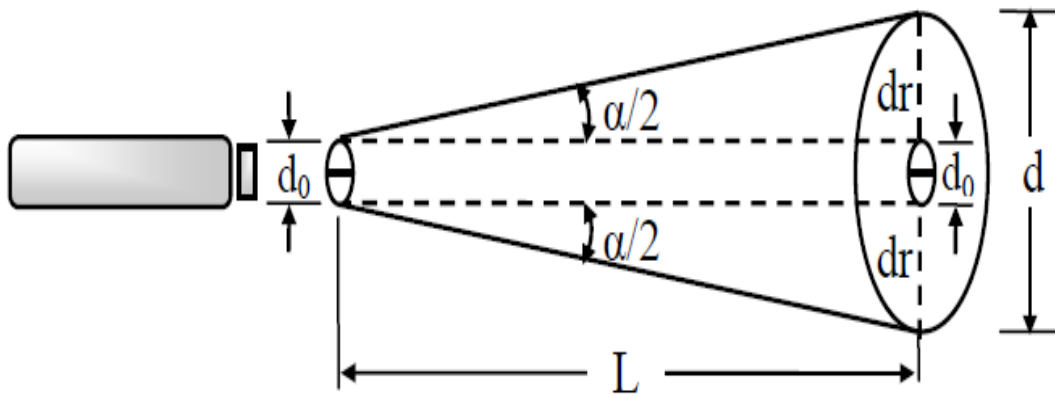
Το οπτικό αντηχείο δημιουργείται στην κρυσταλλοδίοδο με την κατάλληλη λείανση των επιφανειών της επαφής p-n, ώστε αυτές ν' αντιστοιχούν σε οπτικά επίπεδες επιφάνειες που σε συνδυασμό με τους υψηλούς δείκτες διάθλασης των υλικών των ημιαγωγών να δημιουργούνται ικανοποιητικές ανακλάσεις I[6].

Τελικώς, τα φωτόνια παγιδεύονται μεταξύ δυο κατόπτρων, από τα οποία το ένα είναι αδιαφανές και το άλλο ημιδιαφανές. Τα φωτόνια που ξεφεύγουν από το ημιδιαφανές κάτοπτρο δημιουργούν τη δέσμη λέιζερ.

### 3.4.5 Απόκλιση δέσμης

Το φως που εκπέμπεται από το λέιζερ είναι περιορισμένο σε μία στενή δέσμη η οποία σταδιακά διευρύνεται και αποκλίνει καθώς απομακρύνεται από την έξοδο του λέιζερ.

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την απόκλιση μιας δέσμης σε κυκλική τομή.



Εικόνα 26 Απόκλιση δέσμης σε κυκλική τομή

$d_0$ : η διάμετρος της δέσμης κατά την έξοδό της από το λέιζερ

$d$ : η διάμετρος της δέσμης σε απόσταση  $L$  από την έξοδο του λέιζερ

$\alpha$ : η γωνία απόκλισης της δέσμης

$$dr = d - d_0 \text{ άρα } dr = (d - d_0)/2$$

$$\epsilon\varphi(\alpha/2) = dr/L, \text{ και για μικρές γωνίες ισχύει η προσέγγιση } \alpha/2 = dr/L$$

$$\text{συνεπώς } \alpha = \frac{d-d_0}{L}$$

Όταν η δέσμη παρουσιάζει ιδανική χωρική συμφωνία, η απόκλισή της οφείλεται μόνο στα φαινόμενα περίθλασης που αναπτύσσονται κατά την διέλευσή της από το κυκλικό διάφραγμα εξόδου διαμέτρου  $d_0$ . [12]

Στην περίπτωση αυτή, η γωνιακή απόκλιση δηλαδή η ελάχιστη γωνία απόκλισης  $\Delta\theta$ , προσδιορίζεται, σύμφωνα με το κριτήριο Rayleigh, από τη σχέση:

$$\Delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d_0}$$

Όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του λέιζερ.

## 3.5 Επιλογή υλικών

### 3.5.1 Συσκευή λέιζερ

Η επιλογή του λέιζερ βασίστηκε κυρίως στην απαίτηση του άμεσου πολυμερισμού της ρητίνης, κάτι που συνεπάγεται γρήγορη απορρόφηση της ακτινοβολίας και άρα μικρό μήκος κύματος.

Επίσης, λέιζερ μεγαλύτερης ισχύος θα μπορούσαν να καταστρέψουν την ρητίνη, και ιδίως στην περίπτωση της διάταξης μας, η οποία δεν είναι σχεδιασμένη να επιτυγχάνει μεγάλες ταχύτητες.

Τέλος, τα λέιζερ τύπου ημιαγωγών έχουν υψηλή αξιοπιστία, μεγάλη απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής και γενικότερα είναι πρακτικά καθώς έχουν μικρό όγκο και βάρος.

Επίσης το μήκος κύματος εκπομπής του λέιζερ, πρέπει να αντιστοιχεί στο μήκος κύματος στο οποίο είναι ευαίσθητος ο φωτοεκκινητής (*photo initiator*), διαφορετικά μήκη κύματος που δεν προκαλούν τον πολυμερισμό οδηγούν στην αύξηση της θερμοκρασίας της ρητίνης.

Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ανεπιθύμητη καθώς οδηγεί το υλικό σε συρρίκνωση κάτι που συνεπάγεται περιορισμό της ακρίβειας στην εκτύπωση. Επιπλέον, μήκη κύματος τα οποία δεν προκαλούν τον πολυμερισμό, ενδεχομένως θα εστιάζονται σε διαφορετική απόσταση από το λέιζερ κάτι που θα προκαλέσει την έντονη διασπορά της ακτινοβολίας που επίσης οδηγεί σε περιορισμένη ακρίβεια. I[10]

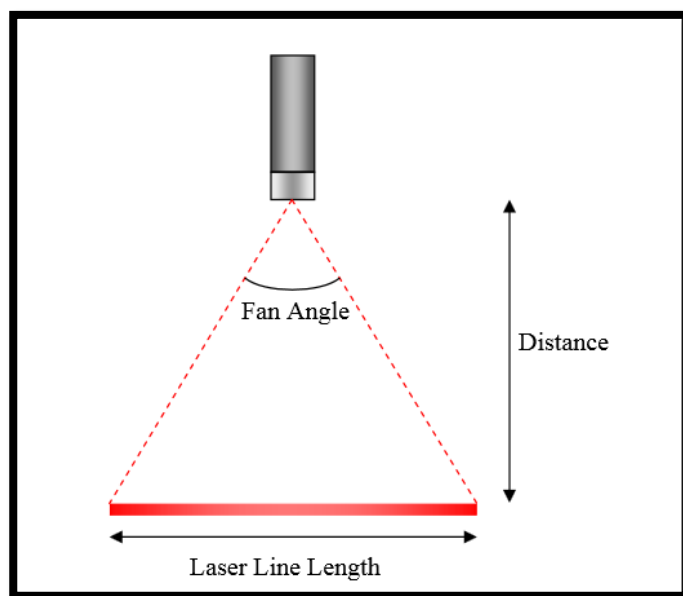


Εικόνα 27 Συσκευή λέιζερ 405 nm

Επιλέχθηκε συσκευή λέιζερ συνεχούς λειτουργίας, μήκους κύματος 405 nm, ισχύος 20mW, με μέγιστη κατανάλωση ρεύματος 80mA υπό σταθερή τάση λειτουργίας  $V = 5V$ . Το λέιζερ περιλαμβάνει εσωτερικό driver ίδιων χαρακτηριστικών με αυτών που θα συνδεθεί σε σειρά με το λέιζερ.

Τα λέιζερ ισχύος  $5 < P < 500$  mW ανήκουν στην κατηγορία 3B, και είναι επικίνδυνα για τα μάτια συνεπώς χρειάζονται ειδικά προστατευτικά από την υπεριώδη ακτινοβολία γυαλιά.

Το λέιζερ που επιλέχθηκε συνοδεύεται με τρεις κεφαλές dot (κηλίδα), line (γραμμική) και cross (σχηματισμός σταυρού). Ο σκοπός της επιλογής ήταν να μελετηθεί και η γραμμική προβολή της δέσμης λέιζερ, καθώς με αυτήν γίνεται εφικτή η σάρωση επιφανειών αλλά και κυκλικών διατομών με λιγότερες και πιο απλές κινήσεις.



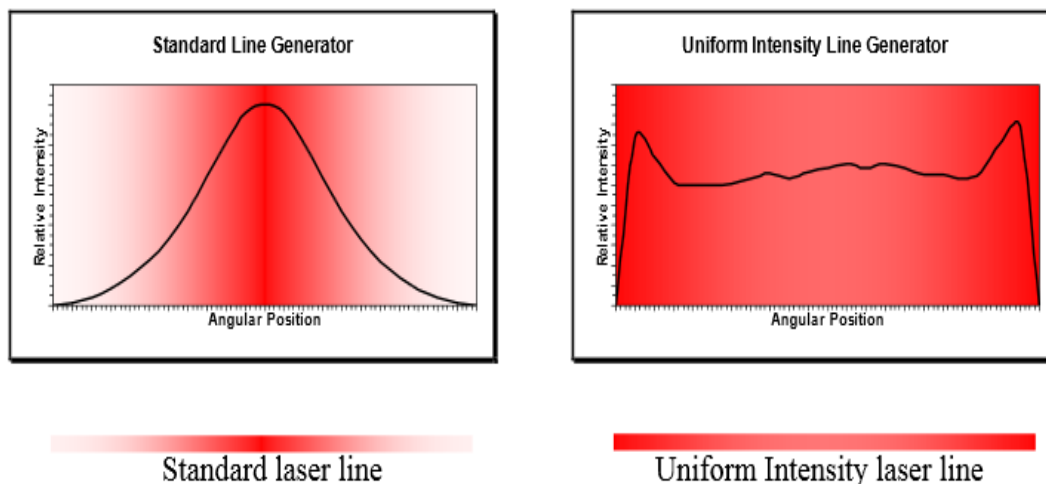
Εικόνα 28 Γραμμική προβολή της δέσμης λέιζερ

Το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος ορίζεται ως το γινόμενο της απόστασης του λέιζερ από την επιφάνεια κατεργασίας και του παράγοντα L.L.F. (*line length factor*).

$$\text{Line Length} = D * L.L.F.$$

Ο L.L.F. είναι μία συνάρτηση της γωνίας προβολής της δέσμης του λέιζερ και είναι γραμμική εφόσον δεν υπάρχει παραμόρφωση της προβολής λόγω ανάκλασης.

Τα line λέιζερ μπορούν να λειτουργήσουν σε Standard laser line mode και σε Uniform Intensity laser line mode, αναλόγως αν θέλουμε να έχουμε κανονική ή ομοιόμορφη κατανομή δέσμης.



### 3.5.2 Επιλογή συσκευής driver

Ο ρόλος του driver των διοδικών λέιζερ είναι να παρέχει σταθερή ρυθμιζόμενη τάση αλλά και σταθερό ρεύμα το οποίο θα τροφοδοτεί το λέιζερ. Το λέιζερ δεν μπορεί να τραβήξει περισσότερα mA από όσα αντιστοιχούν στην ονομαστική του τιμή, αν συμβεί αυτό τα ηλεκτρονικά του driver μπορεί να καούν.

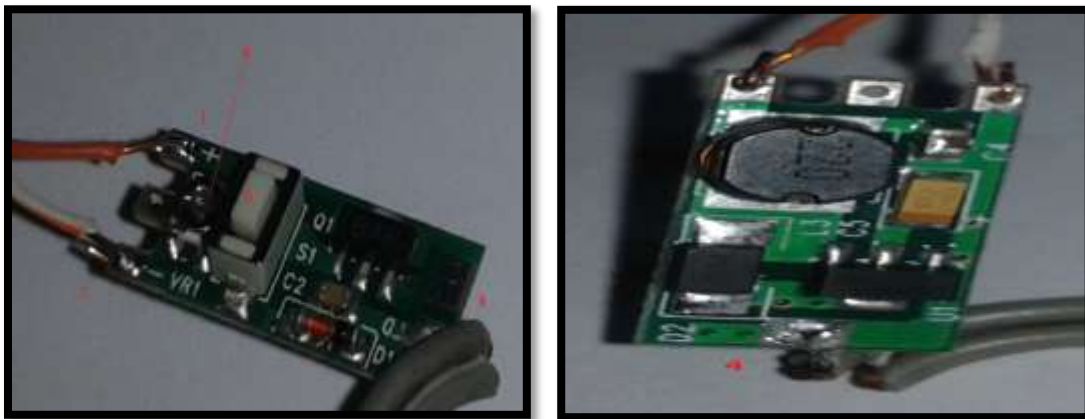
Επιλέχθηκε συσκευή driver λέιζερ διόδου μήκους κύματος 405nm και ισχύος 20mW-300mW, με σταθερή τάση εισόδου 3.7-5.5V, διαστάσεων 20mm x 10mm. Η συσκευή αυτή μπορεί να παρέχει μέχρι 750mA, ενώ το λέιζερ που επιλέξαμε μπορεί να τραβήξει μέχρι τα 80mA.

#### Έλεγχος της έντασης του λέιζερ μέσω της συσκευής driver

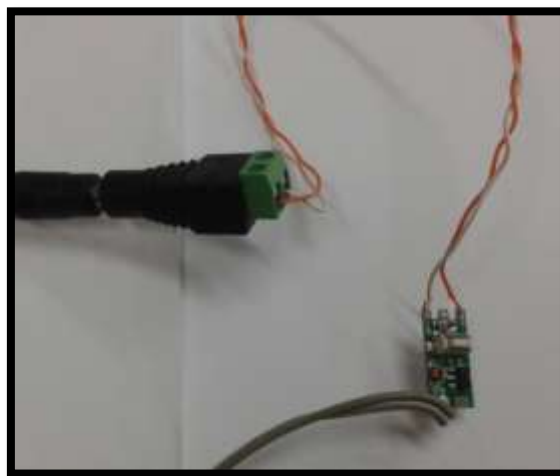
Προκειμένου λοιπόν να ρυθμιστεί η ένταση της δέσμης, απογυμνώθηκε το καλώδιο του τροφοδοτικού και συνδέθηκε σε σειρά με το λέιζερ η συσκευή του driver.

Η κόλληση έγινε στο εργαστήριο της σχολής και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε καλώδια, κολλητήρι και πολύμετρο.

- Το σημείο 1 (*power +*) συνδέθηκε μέσω του κόκκινου καλωδίου με το θετικό ακροδέκτη του τροφοδοτικού
- Το σημείο 2 (*power -*) συνδέθηκε μέσω του λευκού καλωδίου με τον αρνητικό ακροδέκτη του τροφοδοτικού
- Το σημείο 3 συνδέθηκε μέσω του γκρι καλωδίου με τον θετικό ακροδέκτη της συσκευής του λέιζερ
- Το σημείο 4 συνδέθηκε μέσω του γκρι καλωδίου με τον αρνητικό ακροδέκτη της συσκευής του λέιζερ
- Στο σημείο 5 βρίσκεται διακόπτης on/off του λέιζερ
- Στο σημείο 6 βρίσκεται το ποτενσιόμετρο ελέγχου της έντασης της δέσμης



Εικόνα 29 Συνδεσμολογία driver α) Αριστερά: Όψη 1 , β) Δεξιά: Όψη 2



Εικόνα 30 Σύνδεση driver σε σειρά με το λέιζερ

### 3.5.2.1 Σχεδίαση και κατασκευή μηχανισμού στήριξης του λέιζερ στην μηχανή CNC Haas TM-1

Επόμενο βήμα ήταν κατασκευή βάσης για το λέιζερ, με σκοπό να αναρτηθεί στον εργαλειοδέκτη της εργαλειομηχανής αριθμητικού προγραμματισμού CNC Haas TM-1.

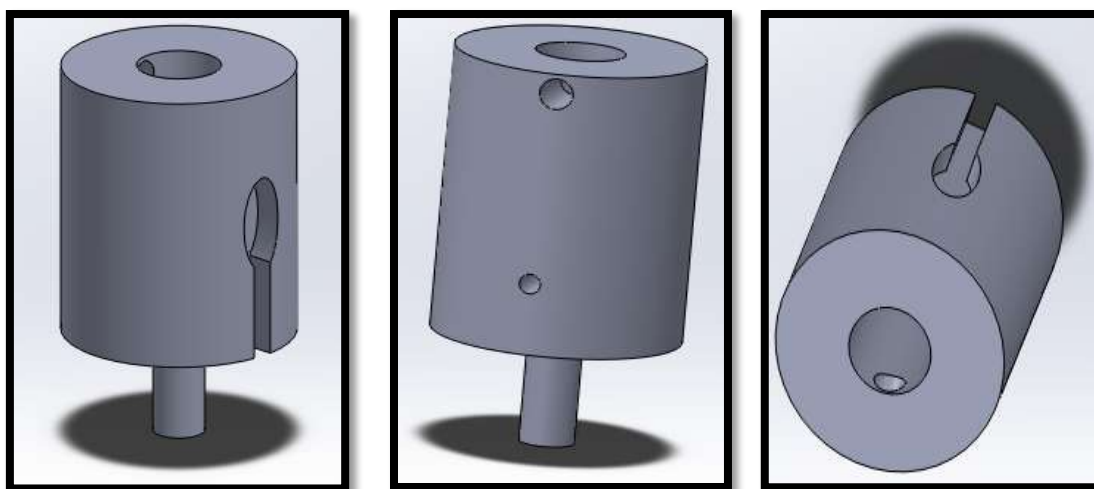
Η βάση σχεδιάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος solidworks από σωλήνα πολυαμιδίου (ερταλόν), ο οποίος για πρακτικούς λόγους κόπηκε με τη βοήθεια χειροκίνητου τόρνου στο εργαστήριο κατεργασιών, ώστε να τηρεί τις προδιαγραφές που αναφέρονται παρακάτω.

Το ertalon προσφέρει το βέλτιστο συνδυασμό της μηχανικής αντοχής, ακαμψίας, σκληρότητας καθώς και μηχανικές ιδιότητες απόσβεσης και αντίσταση στη φθορά.

Οι ιδιότητες αυτές, σε συνδυασμό την καλή ηλεκτρική μονωτική ικανότητα και την αντίσταση στην ακτινοβολία κάνει το ertalon ιδανικό για την κατασκευή της βάσης.



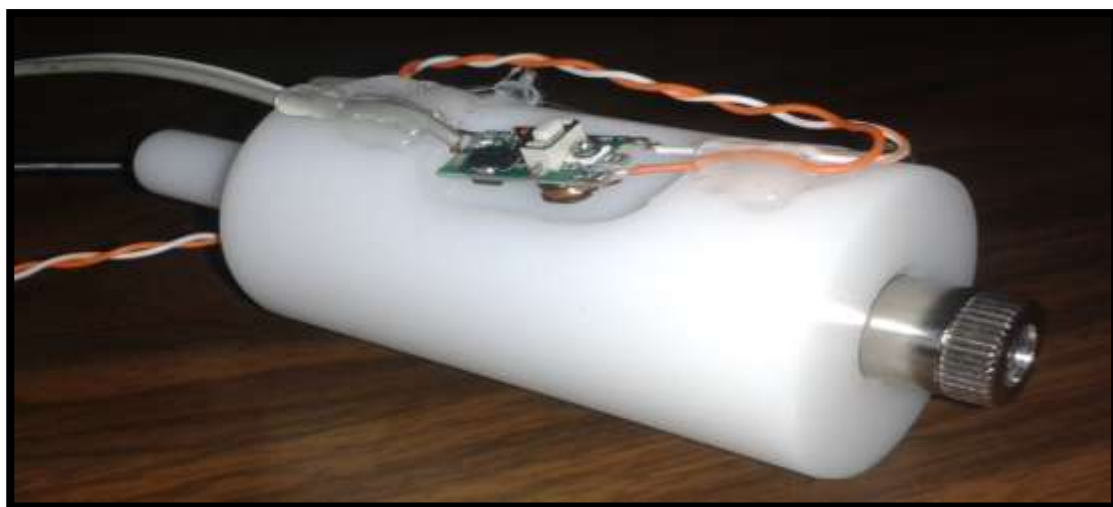
Εικόνα 31 Σωλήνες πολυαμιδίου



Εικόνα 32 Μοντέλο κυλινδρικής βάσης του λέιζερ

Τέλος, η βάση κατασκευάστηκε σε μορφή κυλίνδρου, ο οποίος στο εσωτερικό του έφερε εσωτερική κυλινδρική κοιλότητα της οποίας ο άξονας να ταυτίζεται με τον άξονα z της κατακόρυφης κίνησης της εργαλειομηχανής. Η βάση σχεδιάστηκε με τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

- Η εξωτερική και εσωτερική της διάμετροι σχεδιάστηκαν 3.5cm και 1.2cm αντίστοιχα.
- Στο πίσω μέρος η εξωτερική διάμετρος ελαττώθηκε κατά 2.5 cm, ώστε να γίνει εφικτή η ανάρτησή της στον εργαλειοδέτη της Haas TM-1, μέσω ενός μικρότερου συμπαγούς κυλίνδρου μήκους 3cm.
- Το συνολικό μήκος του μηχανισμού σχεδιάστηκε 10 cm.
- Στην εξωτερική επιφάνεια της βάσης σχεδιάστηκε κοιλότητα υποδοχής και στήριξης του driver που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της έντασης της δέσμης του λέιζερ.
- Η κοιλότητα του driver σχεδιάστηκε με διαστάσεις ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτόν και με τρόπο ώστε ο driver να μην ακουμπάει στο υλικό και να αερίζεται πλήρως.
- Σχεδιάστηκε ευθύγραμμη εγκοπή για το πέρασμα του καλωδίου σύνδεσης του driver και του λέιζερ.
- Σχεδιάστηκε ειδική υποδοχή για τοποθέτηση βίδας, η οποία κατά την επαφή της με το λέιζερ το εφαρμόζει απόλυτα στην εσωτερική κοιλότητα αλλά και δίνει την επιλογή της μετακίνησής του.



• Εικόνα 33 Τοποθέτηση του λέιζερ και του driver στην βάση στήριξης



### 3.5.3 Υγρή ρητίνη

Οι ρητίνες που κυκλοφορούν στο εμπόριο για εφαρμογές στην στερεολιθογραφία, διακρίνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους όπως ιξώδες, πυκνότητα, σκληρότητα, ελαστικότητα, χρώμα, αντοχή στην θερμοκρασία και στο χρόνο, βαθμός συρρίκνωσης, επίσης διακρίνονται ανάλογα και με τις εφαρμογές τους όπως στην οδοντοτεχνία, στην χύτευση ή ακόμα και στην αρχιτεκτονική καταναλωτικών προϊόντων. Η επιλογή της κατάλληλης ρητίνης σε συνδυασμό και με την κατάλληλη συσκευή λέιζερ έχουν καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο του πάχους των στρωμάτων του υλικού.

Αυτή η ρητίνη δημιουργήθηκε για χρήστες που θέλουν να εκτυπώσουν μεγάλες ποσότητες αντικειμένων ή μεγάλα αντικείμενα με μία συντηρητική τιμή, συγκρατώντας χαρακτηριστικά όπως ταχύτητα σκλήρυνσης και χαμηλό ιξώδες.

Λόγω της πειραματικής μας διάταξης, όπου η κάθε στρώση της ρητίνης απλώνεται σταδιακά πάνω στην προηγούμενη, η αύξηση της θερμοκρασίας της ρητίνης για την ομοιόμορφη κατανομής της σε όλη την έκταση της διατομής του δοχείου είναι αναπόφευκτη. Συνεπώς, επιθυμούμε μία φωτοσκληρυνόμενη ρητίνη η οποία δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και είναι δοκιμασμένη σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Η ρητίνη *FUNTODO I*[11] επιλέχθηκε με βασικό κριτήριο την καθαρά φωτοσκληρυνόμενη φύση της και την αντοχή της σε θερμοκρασίες από  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Το χαμηλό κόστος, το μήκος κύματος στο οποίο απορροφάει η ρητίνη καθώς και το ιδιαίτερα μικρό ποσοστό συρρίκνωσης που δεν είναι μεγαλύτερο από 0.5% ήταν επιπλέον κριτήρια της επιλογής μας. Τα μήκη κύματος που απορροφάει η ρητίνη ανήκουν στο εύρος  $225\text{ nm} - 415\text{ nm}$ , η πυκνότητα της είναι  $1004\text{ gr/dm}^3$ , το ιξώδες της σε θερμοκρασία δωματίου ( $25^{\circ}\text{C}$ ) είναι περίπου  $0.1\text{ Pa s}$  και η

	Extra Soft	Soft	Medium Soft	Medium Hard	Hard	Extra Hard
Shore A	0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100					
Shore D	20 30 40 50 60 70 80 90					

Εικόνα 34 Κλίμακα σκληρότητας Shore A και Shore D

σκληρότητα της πολυμερισμένης ρητίνης μετρημένη σε κλίμακα shore D είναι 75.

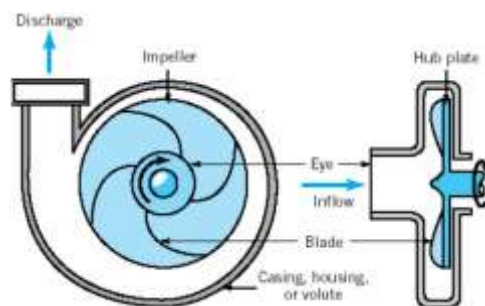
Πρόκειται για μια εμπορική ρητίνη γενικών εφαρμογών, η οποία λόγω της μεγάλης τιμής σκληρότητας που την χαρακτηρίζει είναι ιδανική για ποικίλες εφαρμογές και επιπλέον, μετά τον πολυμερισμό εξακολουθεί να παραμένει αναλλοίωτη από την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και από την προσπίπτουσα ακτινοβολία μέχρι το τέλος της εκτύπωσης.

### 3.5.4 Επιλογή αντλίας

#### 3.5.4.1 Είδη αντλιών

Οι αντλίες διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους σε αντλίες θετικής εκτόπισης (*Positive displacement pumps*) και φυγοκεντρικές αντλίες (*Centrifugal pumps*).

- Στις **φυγοκεντρικές αντλίες** ο βασικός τρόπος λειτουργίας είναι η πρόσθεση ενέργειας κατά την ροή του ρευστού από τη αξονική περιοχή προς την περιφέρεια.



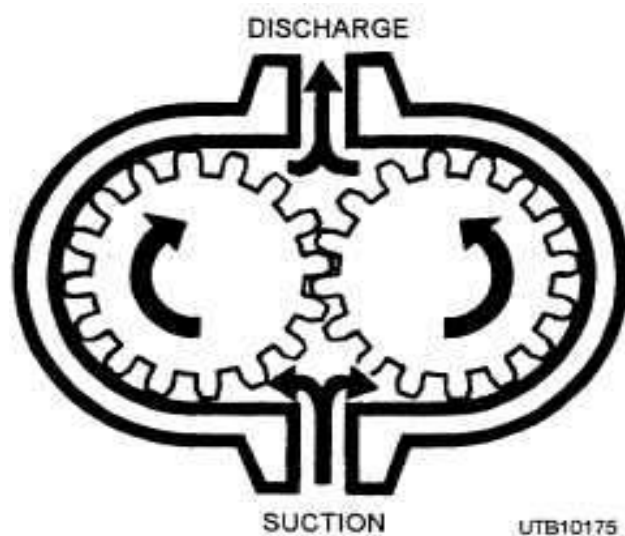
Εικόνα 35 Φυγοκεντρική αντλία ακτινικής ροής

Η πίεση και η απόλυτη ταχύτητα του ρευστού αυξάνονται με την αύξηση της ενέργειας αυτής. Οι φυγοκεντρικές αντλίες είναι περισσότερο διαδεδομένες καθώς έχουν χαμηλό κόστος αγοράς και λειτουργίας, μικρό όγκο και βάρος, έχουν ομοιόμορφη και συνεχή κίνηση έτσι ώστε η πίεση και η παροχή να μην παρουσιάζουν διακυμάνσεις. Διακρίνονται σε ακτινικής, αξονικής και μικτής ροής,

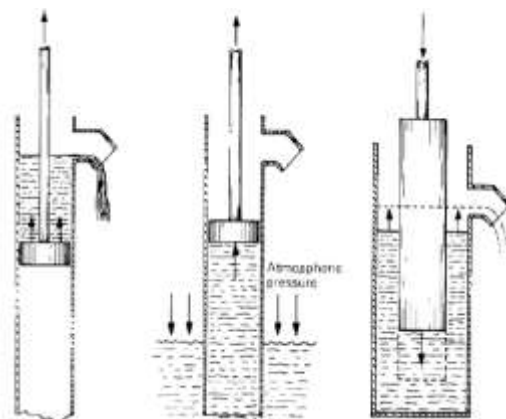
αναλόγως αν εφαρμόζονται για μεγάλα μανομετρικά, μεγάλες παροχές ή μέσες παροχές και μανομετρικά αντίστοιχα.

- Στις **αντλίες θετικής εκτόπισης**, ο βασικός τρόπος λειτουργίας είναι η παραλαβή του υγρού από το σωλήνα αναρρόφησης και η μετατόπιση αυτού στο σωλήνα κατάθλιψης με κάποιο κινούμενο στερεό σώμα που κινείται μέσα σε ειδικό περίβλημα. Το υγρό εξαναγκάζεται να μετατοπιστεί ανεξάρτητα από την υδραυλική αντίσταση των σωλήνων μεταφοράς. Η παροχή μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις λόγω της παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου.

Οι αντλίες θετικής μετατόπισης διακρίνονται σε περιστροφικού τύπου (*Rotary pumps*) και παλινδρομικού τύπου (*Reciprocating Pumps*). Οι αντλίες θετικής μετατόπισης **περιστροφικού τύπου** θέτουν το υγρό σε κίνηση μέσω ενός περιστροφικού μηχανισμού κίνησης (*ρότορας*), ο οποίος καθώς στρέφεται το υγρό εξωθείται προς την έξοδο της αντλίας.



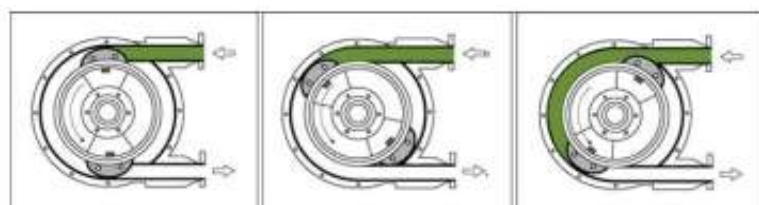
Εικόνα 36 Αντλία θετικής μετατόπισης περιστροφικού τύπου



Εικόνα 29 Αντλία θετικής εκτόπισης παλινδρομικού τύπου

- Οι αντλίες θετικής μετατόπισης **παλινδρομικού τύπου** πρόκειται για αντλίες στις οποίες ένα πιστόνι, διάφραγμα ή έμβολο εκτελεί μία ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση μέσα σε ένα θάλαμο συνήθως κυλινδρικού σχήματος πληρώνοντας και εκκενώνοντας διαδοχικά το θάλαμο με το αντλούμενο υγρό.

Μια κατηγορία των αντλιών θετικής μετατόπισης περιστροφικού τύπου είναι οι **περισταλτικές αντλίες**. Οι αντλίες αυτές λειτουργούν χρησιμοποιώντας την αρχή της περισταλτικής κίνησης για να αντλήσουν ρευστά μέσω ενός σωλήνα.



Εικόνα 30 Περισταλτική αντλία

Ένας ελαστικός σωλήνας εφαρμόζει γύρω από ένα ρότορα με ράουλα, ο οποίος όταν περιστρέφεται, πιέζει ένα τμήμα του ελαστικού σωλήνα. Η πίεση στο συγκεκριμένο τμήμα απελευθερώνεται καθώς ο ρότορας περιστρέφεται και ο ελαστικός σωλήνας ανακτά το αρχικό του σχήμα. Έτσι δημιουργείται στιγμιαία μια υποπίεση η οποία προκαλεί επαναπλήρωση του ελαστικού σωλήνα με υγρό.

Η συμπίεση που ασκείται στον ελαστικό σωλήνα προκαλεί μία προσωρινή στεγανοποίηση και καθώς ο ρότορας περιστρέφεται, το αντλούμενο υγρό προωθείται και εκτοπίζεται από το στόμιο εξόδου της αντλίας. Από αυτή τη συνδυασμένη λειτουργία στην αναρρόφηση και στην κατάθλιψη προκύπτει μία αντλία θετικής εκτόπισης με ικανότητα αρνητικής αναρρόφησης.

### 3.5.4.2 Περισταλτική δοσομετρική αντλία

Κριτήρια για την επιλογή της αντλίας, ήταν η δυνατότητα να αντλεί υγρά υψηλού ιξώδους καθώς και η δυνατότητα να παρέχει σταθερή ροή σε χαμηλές ταχύτητες ώστε να μην διαταράσσετε η ηρεμία της ρητίνης στο δοχείο. Επίσης, η επιλογή έγινε δεδομένου ότι η δόση που πρέπει να χειριστούμε είναι μικρότερη από 10 ml, συνεπώς αναζητήσαμε ένα μηχανισμό ο οποίος να παρέχει δυνατότητα ρύθμισης στροφών του κινητήρα ή ακόμα καλύτερα, έλεγχο της δόσης με αναγωγή της ακρίβειας σε αριθμό βημάτων που αντιστοιχούν σε κάθε στροφή του κινητήρα.

Δεδομένου του υψηλού ιξώδους της ρητίνης, των υψηλών πιέσεων που θα χρειαστούν καθώς επίσης και της σταθερής και χαμηλού ρυθμού ροής που επιθυμούμε για την πλήρωση του δοχείου, ο τύπος αντλίας που επιλέχθηκε ανήκει στην κατηγορία των αντλιών θετικής μετατόπισης *Positive displacement pumps* περιστροφικού τύπου και πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε περισταλτική δοσομετρική αντλία με ενσωματωμένο βηματικό κινητήρα.



Εικόνα 39 Περισταλτική δοσομετρική αντλία

Πρόκειται για αντλία μικρού βάρους και σχήματος, με εύκαμπτους σωλήνες που την καθιστούν πρακτική για την εφαρμογή μας.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της:

- Το συνολικό βάρος είναι 480 g
- Ο ρυθμός ροής ανήκει στο εύρος 0 - 160 mL/min.
- Η ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται στο εύρος 1.0 - 50.0 rpm με έλεγχο 0.1rpm.

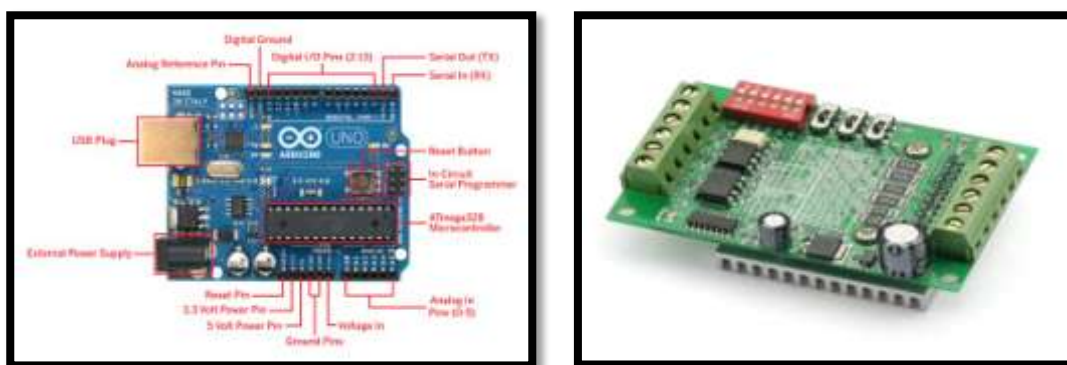
- Η ισχύς λειτουργίας είναι μικρότερη από 10W
- Η θερμοκρασία λειτουργίας ανήκει στο εύρος 0-40 C.

Οι αντλίες αυτού του τύπου είναι αποδοτικότερες από τις κλασσικές φυγόκεντρες αντλίες όταν πρόκειται για υγρά μεγάλου ιξώδους τα οποία δημιουργούν μεγαλύτερη αντίσταση. Η ροή που παρέχει ο στροφικός μηχανισμός είναι σταθερή σε αντίθεση με τον αντίστοιχο μηχανισμό των παλινδρομικών αντλιών.

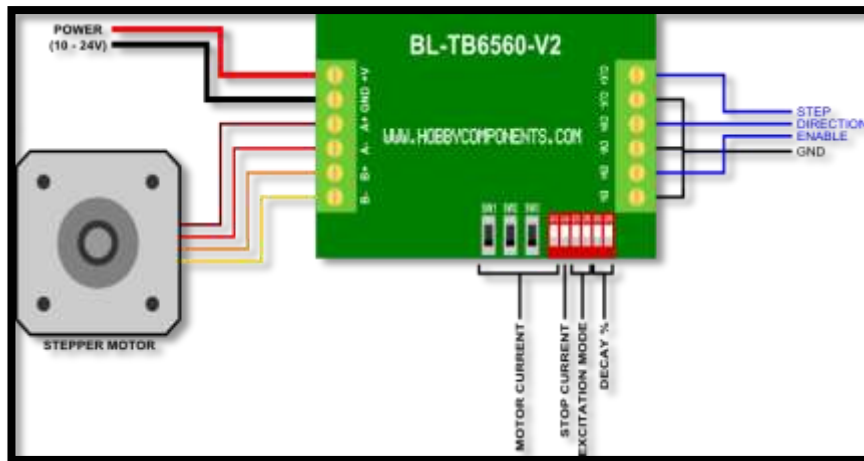
### 3.5.4.3 Έλεγχος λειτουργίας της περισταλτικής αντλίας

Για να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε τις δυνατότητες της αντλίας και να ελέγξουμε την ταχύτητα, την φορά και την ακρίβεια περιστροφής χρησιμοποιήσαμε την πλακέτα *arduino UNO* καθώς και τον driver *bl-tb6560-v2.0* που είναι απαραίτητος για βηματικούς κινητήρες.

- Η είσοδος *CLK+ (step)* του driver συνδέθηκε με τον ψηφιακό ακροδέκτη *pin 9* της πλακέτας *arduino UNO* ο οποίος ορίστηκε ως ψηφιακή έξοδος
- Η είσοδος *CW+ (direction)* του driver συνδέθηκε με τον ψηφιακό ακροδέκτη *pin 8* της πλακέτας *arduino UNO* ο οποίος ορίστηκε ως ψηφιακή έξοδος
- Η είσοδος *CLK- (ground)* του driver συνδέθηκε με την γείωση *GND* στην πλακέτα *arduino UNO*
- Η είσοδος *CW- (ground)* του driver συνδέθηκε με την γείωση *GND* στην πλακέτα *arduino UNO*
- Οι έξοδοι *A+, A-, B+, B-* του driver συνδέθηκαν απευθείας στην αντλία
- Η πλακέτα *arduino UNO* συνδέθηκε μέσω καλωδίου *USB* με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή



Εικόνα 40 α. Πλακέτα *arduino UNO* (αριστερά), β. Driver *bl-tb6560-v2.0* (δεξιά)



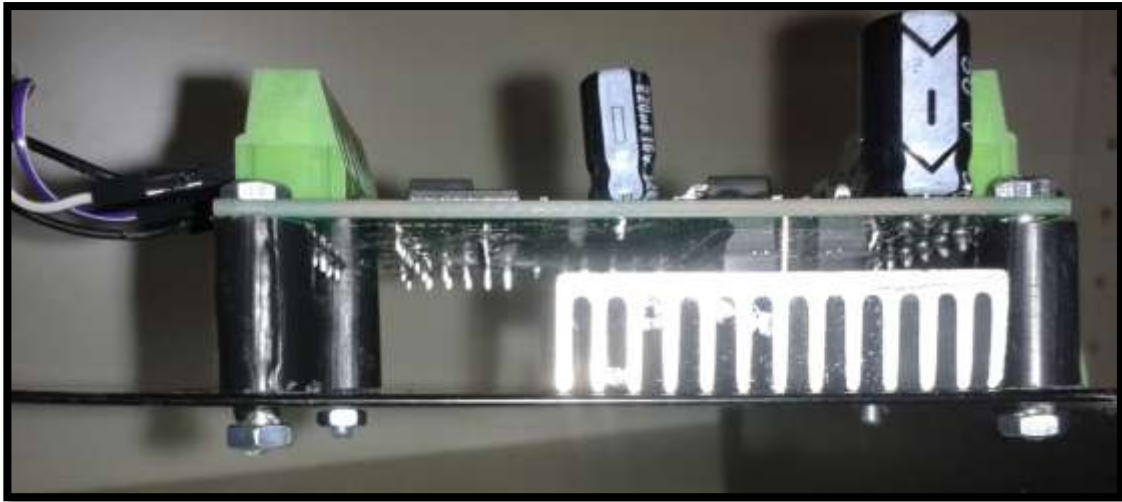
Εικόνα 41 Συνδεσμολογία εισόδων και εξόδων του Driver bl-tb6560-v2.0

### 3.5.4.4 Κατασκευή φορητής βάσης στήριξης για τα ηλεκτρονικά της αντλίας

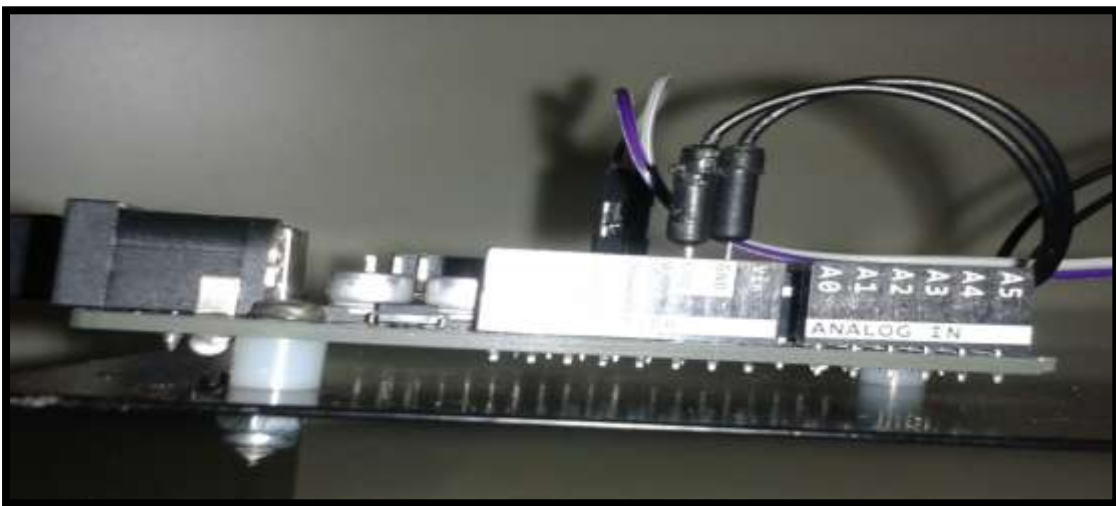
Προκειμένου να έχουμε μία μονοκόμματα και φορητή διάταξη για τα ηλεκτρονικά της αντλίας κατασκευάστηκε βάση στήριξης για τον μικροεπεξεργαστή *arduino UNO* καθώς για και τον driver *bl-tb6560-v2.0*.

Οι δύο πλακέτες βιδώθηκαν πάνω σε σιδερένια επιφάνεια υλικού που μας παραχωρήθηκε από την αποθήκη του εργαστηρίου.

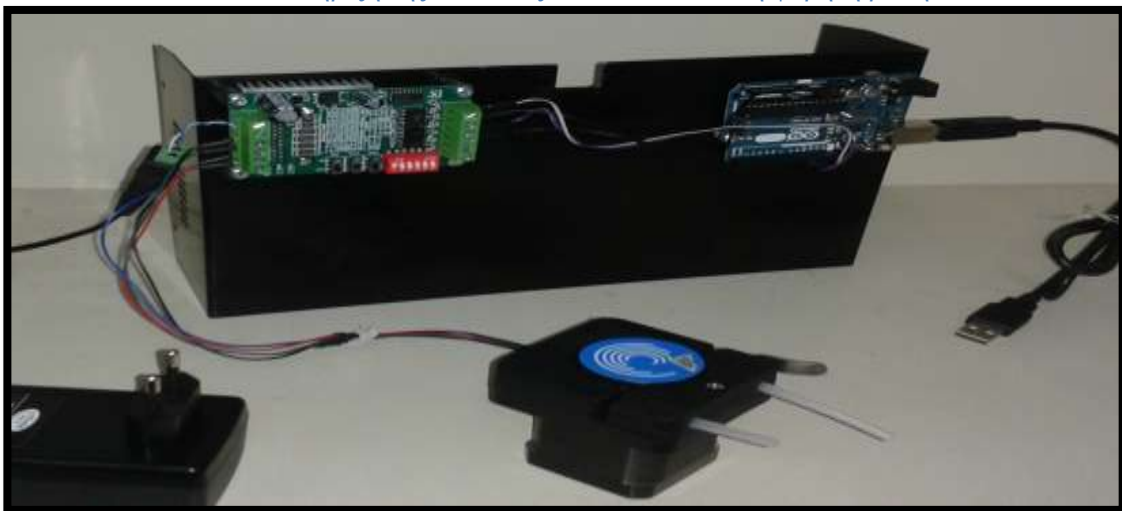
- Η στήριξη του driver *bl-tb6560-v2.0* έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται σε επαφή με το σιδερένιο υλικό μονάχα η ψύκτρα. Με τον τρόπο αυτό θα διαχέεται η θερμότητα σε μεγαλύτερο όγκο θερμικά αγωγίμου υλικού και θα ενισχυθεί η ιδιότητά της
- Η στήριξη της πλακέτας *arduino UNO* έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε η να μην έρχεται σε επαφή με το υλικό και να μπορεί να αερίζεται πλήρως



Εικόνα 42 Στήριξη του driver *bl-tb6560-v2.0* στη φορητή βάση



Εικόνα 43 Στήριξη της πλακέτας *arduino UNO* στη φορητή βάση



Εικόνα 44 Φορητή βάση των ηλεκτρονικών της αντλίας



## Προγραμματισμός της πλακέτας *arduino UNO* σε C++

Επειδή το λογισμικό επεξεργασίας του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί δεν είναι σχεδιασμένο για εκτυπώσεις στερεολιθογραφίας αλλά για εκτυπώσεις τεχνολογίας Fused Deposition Modeling, δεν υπάρχει η δυνατότητα προγραμματισμού του driver του λέιζερ ούτε και της αντλίας μέσω του Slicer ώστε να προσαρμοστεί η λειτουργία τους με βάση τις απαιτήσεις του προς εκτύπωση αντικειμένου. Έτσι λοιπόν, η αντλία χρησιμοποιήθηκε μόνο για να παρέχει τη σταθερή δόση ρητίνης που αντιστοιχεί στο πάχος που επιθυμούμε να έχει η κάθε στρώση.

Η αντλία πρέπει να προγραμματιστεί:

- Να εκτελεί συγκεκριμένο αριθμό περιστροφών που θα αντιστοιχούν σε άντληση ρητίνης σταθερού όγκου. Η δόση αυτή καθορίζεται και από τις διαστάσεις της διατομής του δοχείου
- Να ξεκινάει η διαδικασία της άντλησης μετά από χρονική καθυστέρηση  $\Delta t$  μετρημένη από την ολοκλήρωση της άντλησης της προηγούμενης δόσης

Στο πλαίσιο των προδιαγραφών αυτών γράφηκε το αντίστοιχο κομμάτι του κώδικα σε C++. Η λειτουργία της αντλίας μελετάται στο κεφάλαιο 5.

```
while (i < 2) {  
  
    myStepper.step ( $\alpha$ ); // εντολή να εκτελέσει τόσες περιστροφές όσες αντιστοιχούν  
    στην αντλούμενη δόση  
  
    delay ( $\Delta t$ ); // εντολή να καθυστερήσει την συνέχεια της δομής επανάληψης για  
    χρονικό διάστημα  
  
    i++; }  
}
```

### 3.5.4.5 Αντληση ρητίνης με χρήση δοσομετρικής αντλίας

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 η περισταλτική αντλία που χρησιμοποιήθηκε είναι δοσομετρική, περιστροφικού τύπου με ενσωματωμένο βηματικό κινητήρα. Προκειμένου να παρέχει τη σταθερή δόση ρητίνης που αντιστοιχεί στο πάχος που επιθυμούμε να έχει η κάθε στρώση, μελετήθηκε η λειτουργία της υπό διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.

- Μία πλήρη περιστροφή του ρότορα μπορεί να διαιρεθεί σε 800 βήματα του κινητήρα. Χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση: `myStepper.step( $\alpha$ )` ;
  - Ταχύτητα περιστροφής (*1 περιστροφή ανά δευτερόλεπτο*) μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια 1/250. Δόθηκε η εντολή: `myStepper.setSpeed( $\beta$ )` ;
- Όπου  $\alpha$  και  $\beta$ , είναι αριθμός βημάτων του κινητήρα.

Η αντλούμενη δόση της ρητίνης που αντιστοιχεί σε μία περιστροφή του ρότορα εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και το ιξώδες της ρητίνης.

Διαπιστώθηκε ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής του ρότορα αντλείται μικρότερη ποσότητα ρητίνης για τον ίδιο αριθμό περιστροφών.

Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι προκειμένου να επιτύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια αντλούμενου όγκου πρέπει η αντλία να δουλεύει σε υψηλές ταχύτητες ώστε να απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός βημάτων για την άντληση δεδομένης ποσότητας υλικού.

Στο παρακάτω πίνακα μελετάται η λειτουργία της αντλίας για θερμοκρασία δωματίου ( $25^{\circ}C$ ), όπου το ιξώδες της ρητίνης δίνεται  $0.1 Pa s$ .

Μελέτη λειτουργίας της αντλίας			
Ταχύτητα περιστροφής (περιστροφές/ δευτερόλεπτο)	Βήματα κινητήρα	Αριθμός περιστροφών	Όγκος άντλησης (ml)
1	4000	5.00	1.0
2	4000	5.00	0.8
3	4000	5.00	0.4
4	4000	5.00	0.2

Η αντλία προγραμματίστηκε με βάση τις διαστάσεις του δοχείου να παρέχει δόση ρητίνης 2 ml για δημιουργία στρώσης πάχους 300 μm.

Η άντληση πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα περιστροφής του ρότορα (2 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο) και συνολικά 10.000 βήματα του κινητήρα. Με την ταχύτητα περιστροφής που επιλέχθηκε, η ακρίβεια της αντλούμενης ποσότητας είναι  $2\text{ml}/10.000 \text{ βήματα} = 0.0002 \text{ ml}$ .

### 3.6 Λήψη μέτρων προστασίας

Όπως προαναφέρθηκε, επειδή το λέιζερ που επιλέχθηκε ανήκει στην κατηγορία 3B, δηλαδή των λέιζερ ισχύος  $5 < P < 500 \text{ mW}$ , είναι απαραίτητη η χρήση γυαλιών προστασίας από την υπεριώδη ακτινοβολία εφόσον η άμεση ή η έμμεση έκθεση του κερατοειδή στην δέσμη αυτή θα μπορούσε να προκαλέσει ανεπανόρθωτη ζημιά.

Επιλέχθηκαν τα παρακάτω γυαλιά τα οποία μειώνουν την ακτινοβολία του μήκους κύματος εκπομπής του λέιζερ που χρησιμοποιήσαμε σε ασφαλή επίπεδα, επιτρέποντας ταυτόχρονα την διέλευση ορατού φωτός σε ποσοστό περίπου 40%, ώστε να είναι πρακτικά κατά την χρήση.

Τα φίλτρα είναι κατάλληλα για λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας UV αλλά και για λέιζερ νεοδυμίου Nd:YAG. Όπως διαπιστώνεται από το παρακάτω διάγραμμα, τα μήκη κύματος τα οποία περιορίζονται είναι μεταξύ 190-548nm και ο δείκτης οπτικής πυκνότητας κοντά στα 405nm.



Εικόνα 45 Γυαλί προστασίας από ακτινοβολία 405 nm

### 3.7 Κατασκευή δοχείου

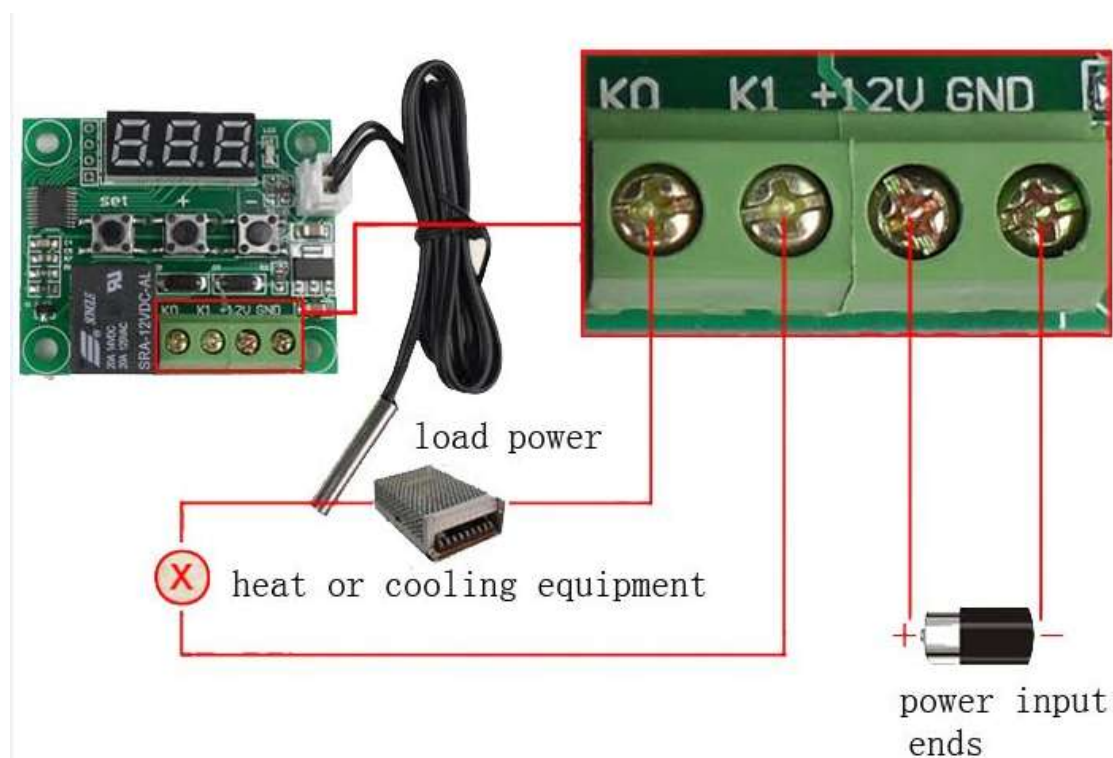
Για την κατασκευή του δοχείου στην περίπτωση μας δεν έχουμε ιδιαίτερες απαιτήσεις γιατί η διάταξη είναι top - down.

Στην περίπτωση που ήταν bottom-up, το δοχείο πρέπει να είναι κατασκευασμένο από υλικό με μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση, πρέπει να είναι σκληρό στην επιφάνεια και ταυτόχρονα τραχύ σε μικροσκοπική κλίμακα ώστε η ρητίνη να μπορεί να κολλήσει σε υγρή μορφή και ταυτόχρονα να μπορεί να ξεκολλήσει με τον κατάλληλο μηχανισμό αφού στερεοποιηθεί.

Ένα υλικό ιδανικό για την κατασκευή του δοχείου είναι το ανοδιωμένο αλουμίνιο που θα μας εξασφαλίσει ισχυρές αντιδιαβρωτικές ιδιότητες. Επίσης, το αλουμίνιο παρέχει μηχανική σταθερότητα, ακαμψία καθώς και μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.

Το δοχείο τετραγωνικής διατομής θα έχει διαστάσεις 80 mm X 80 mm X 30 mm. Για ύψος στρώσης 400 μm, ο όγκος μιας δόσης ρητίνης που πρέπει να διακινήσει η αντλία είναι 3 ml.

Στο δοχείο θα ενσωματωθεί ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης και ελέγχου της θερμοκρασίας, ώστε να εξασφαλίσουμε την μόνιμη μείωση του ιξώδους της ρητίνης.

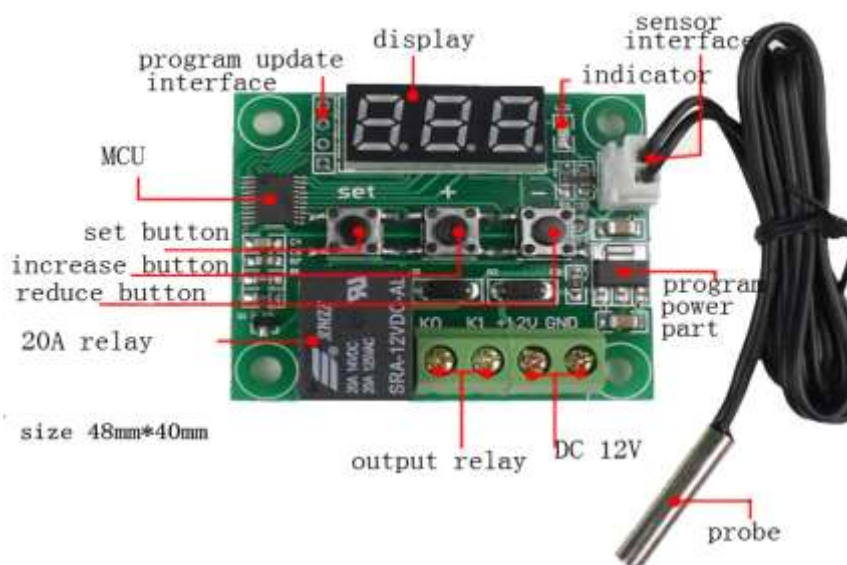


Εικόνα 46 Ψηφιακός θερμοστάτης XH-W1209

## Ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης και ελέγχου θερμοκρασίας μεταλλικού δοχείου

Ο θερμοστάτης που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει ψηφιακή είσοδο για μέτρηση θερμοκρασίας με χρήση θερμοζεύγους, ενσωματωμένο ρελέ 20 A και έξοδο προς το θερμαντικό στοιχείο (*heater*). Ο έλεγχος της θερμοκρασίας γίνεται με ακρίβεια 0.1° C και επίσης υπάρχει πλήρες μενού δίνοντας στο χρήστη τις δυνατότητες επιλογής επιθυμητού εύρους θερμοκρασιών, ελάχιστη απόκλιση θερμοκρασίας για την ενεργοποίηση του ρελέ, ελάχιστο χρονικό διάστημα έπειτα από το οποίο θα ενεργοποιηθεί το ρελέ αφού ξεπεραστεί η επιθυμητή θερμοκρασία, η επιλογή ενεργοποίησης σήματος ειδοποίησης στην οθόνη όταν η θερμοκρασία υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο καθώς και η επιλογή για το αν θα λειτουργήσει σε heat ή cool mode.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι επιλογές προγραμματισμού του θερμοστάτη.



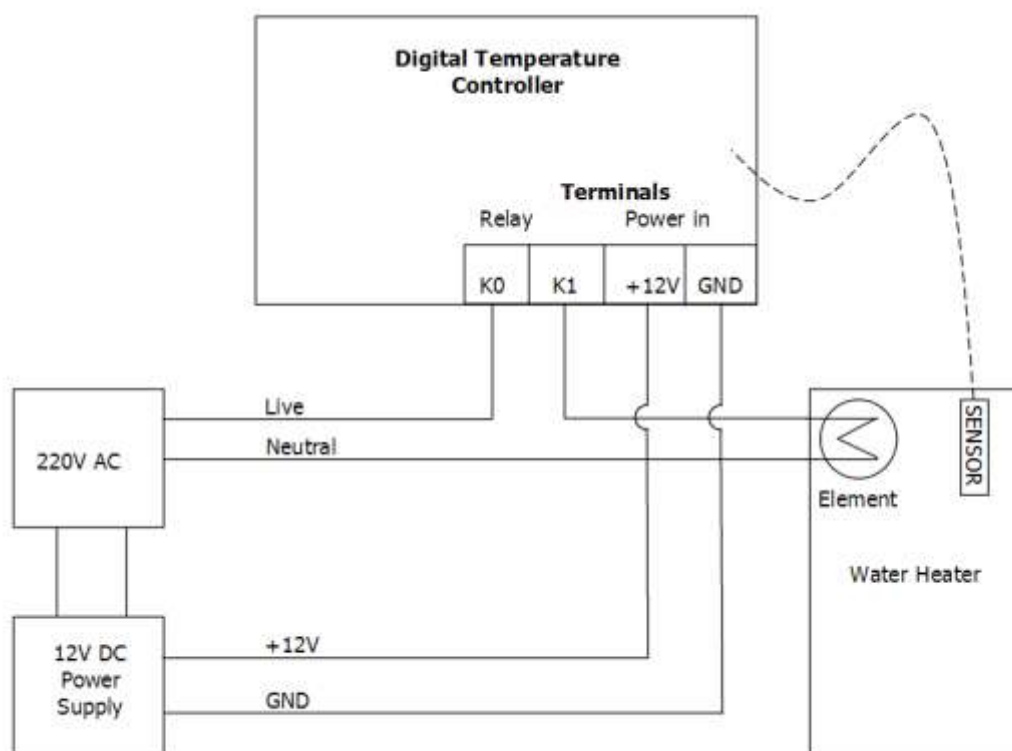
setting chart			
long press SET can go into the menu			
code	description	range	default value
P0	heat/cooking	C/H	C
P1	backlash set	0.1-15	2
P2	upper limit	110	110
P3	lower limit	-50	-50
P4	correction	-7.0~7.0	0
P5	delay start time	0-10 min	0
P6	high temp alarm	0-110	OFF
long press +- will reset to default value			

Εικόνα 47 Ταμπλό θερμοστάτη και επιλογές ρύθμισης λειτουργίας

### 3.8 Ηλεκτρικό κύκλωμα συνδεσμολογίας θερμοστάτη

Στο παρακάτω διάγραμμα περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο συνδέθηκαν τα παρακάτω ηλεκτρικά στοιχεία:

- Digital Temperature Controller: Θερμοστάτης
- 220 V AC: Παροχή τάσης δικτύου
- 12 V DC Power Supply: Τροφοδοτικό σταθερής τάσης 12 V
- Element: Θερμαντικό στοιχείο (*heater*)
- Sensor: αισθητήρας θερμοζεύγους



Εικόνα 48 Συνδεσμολογία κυκλώματος θερμοστάτη με τροφοδοτικό

Το τροφοδοτικό χρησιμοποιήθηκε διαθέτει τρεις εξόδους προς 12 V DC. Η μία χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία του θερμοστάτη και η άλλη για την τροφοδοσία του ρελέ.

Η έξοδος του ρελέ (*output relay*) συνδέθηκε με κλειστό κύκλωμα, το οποίο περιλάμβανε την σύνδεση σε σειρά του τροφοδοτικού και του θερμαντικού στοιχείου. Επιλέχθηκε η λειτουργία heat mode, ώστε ο θερμοστάτης να απενεργοποιεί την

τροφοδοσία ρεύματος του θερμαντικού στοιχείου, μόνο όταν η θερμοκρασία του θερμίστορ υπερβεί την επιθυμητή τιμή.

Το δοχείο κατασκευάστηκε με χρήση εργαλειομηχανής CNC του εργαστηρίου έτσι ώστε να ολοκληρώνεται, μετά την ενσωμάτωσή του σε αυτό, δύο θερμαντικών στοιχείων (*heater*) 40 W και ενός μετρητικού θερμοκρασίας (*thermistor*) τύπου *NTC(10K)*.



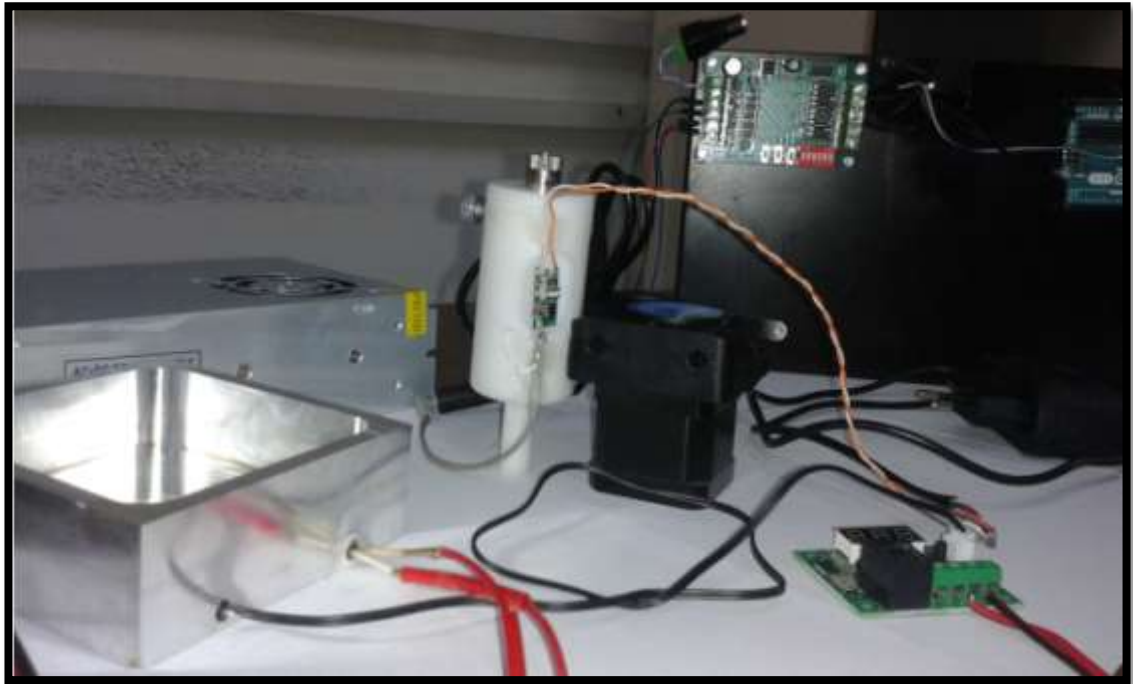
Εικόνα 49 Θερμικά αγωγίμο δοχείο από αλουμίνιο



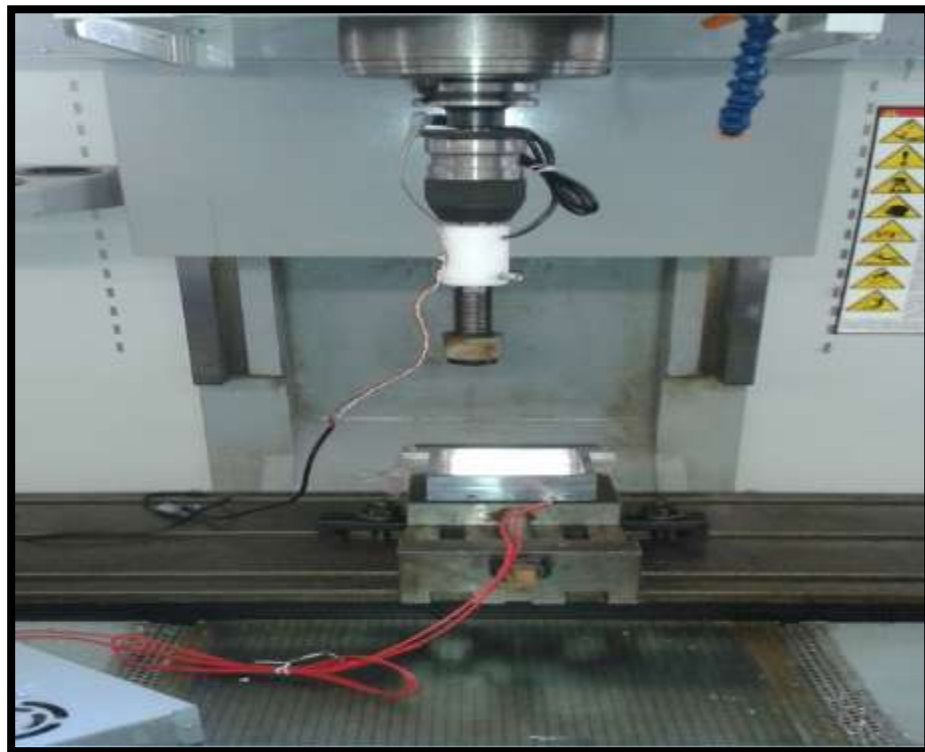
Εικόνα 50 Έλεγχος και μέτρηση θερμοκρασίας με χρήση του θερμοστάτη XH-W1209

Τα καλώδια των στοιχείων περάστικαν σε θερμομονωτικό σωλήνα (*soft tube vw-1*), προκειμένου να προφυλαχθούν κατά την επαφή τους με το μεταλλικό δοχείο. Στα βήσματα των στοιχείων τοποθετήθηκε θερμικά αγωγίμη πάστα, ώστε να εφαρμόσουν 100% πάνω στο μέταλλο.

Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες της φορητής διάταξης στερεολιθογραφίας και της εργαλειομηχανής με ενσωματωμένη την διάταξη.



Εικόνα 51 Φορητή διάταξη στερεολιθογραφίας



Εικόνα 52 Άποψη εργαλειομηχανής CNC μετά την ενσωμάτωση του λέιζερ και του δοχείου



## Κεφάλαιο 4 Λογισμικά CAD, CAM

### Εισαγωγή

Το πρόγραμμα CAD (*Computer-Aided Design*), αποτελεί την σύνδεση της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών με την σχεδίαση προϊόντων και συστημάτων. Το λογισμικό αυτό διαθέτει εργαλεία υπολογιστικής γεωμετρίας και γραφικής σχεδίασης, που καθιστούν εφικτή την παραγωγή κάθε αντικειμένου που είναι δυνατό να σχεδιαστεί στο πλαίσιο δυνατοτήτων που παρέχει στο χρήστη.

### 4.1 Διαδικασία κατασκευής στην ταχεία προτυποποίηση

Όλες οι τεχνικές τρισδιάστατης σχεδίασης που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2, ακολουθούν μια κοινή διαδικασία 5 σταδίων η οποία περιγράφεται στην εικόνα 45.

- δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD του σχεδίου ή του σκαναρισμένου αντικειμένου
- μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL

Τα αρχεία stl είναι τρισδιάστατα μοντέλα τα οποία μπορούν να εξαχθούν από οποιοδήποτε πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης.

- τεμαχισμό του αρχείου STL με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού σε λεπτές διατομές ελαχίστου πάχους
- κατασκευή του αντικειμένου με την διαδοχική αλληλεπίθεση διατομών
- καθαρισμός και τελικό φινίρισμα του μοντέλου

Το πρώτο βήμα της τρισδιάστατης εκτύπωσης συνίσταται στη περιγραφή του αντικειμένου με βάση ένα μοντέλο, η γεωμετρία του οποίου θα μεταφερθεί από το χρήστη στο πρόγραμμα CAD.

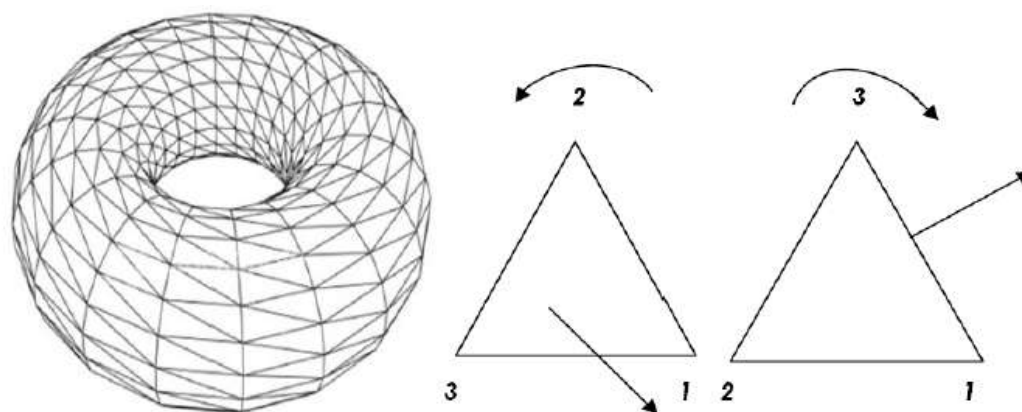
Πλέον, οι περισσότερες τεχνολογίες ταχείας προτυποποίησης δέχονται αρχεία διαμορφωμένα σε STL (*Standard Triangulation Language*) φορμάτ.

Η διαδικασία μετατροπής των αρχείων σε STL φορμάτ, αποτελεί το δεύτερο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης και στα περισσότερα συστήματα CAD γίνεται αυτόματα, αλλά υπάρχει πιθανότητα λάθους, έτσι πολλά προγράμματα έχουν σχεδιαστεί προκειμένου να το εντοπίζουν και να το διορθώνουν, με τη δυσκολία

όμως ότι δεν είναι πάντα εφικτή η διάκριση ενός σφάλματος από κάποια ίσως επιθυμητή ανωμαλία στο αντικείμενο.

Αυτή η μορφή αρχείων, αναπαριστά μια τρισδιάστατη επιφάνεια ως ένα σύνολο στοιχειωδών επίπεδων τριγώνων που θυμίζουν την πολυεδρική όψη της επιφάνειας ενός ακατέργαστου διαμαντιού, συμβάλλοντας στην εύκολη μαθηματική περιγραφή της επιφάνειας, με τα αντικείμενα να αναπαρίσταται όπως το πλέγμα συνδεδεμένων τριγώνων.

Η φορά περιγραφής των κορυφών κάθε τριγώνου μας προσδιορίζει το κάθετο διάνυσμα το οποίο πρέπει να κατευθύνεται προς τα έξω του εξαρτήματος. Το μέγεθος και η ακρίβεια της διαίρεσης καθώς και το μέγεθος των τριγώνων μπορεί να ελεγχθεί από το χρήστη με βασικό κανόνα το μέγεθος του τριγώνου να είναι μικρότερο από την ακρίβεια της μηχανής B[1].



Εικόνα 53 Πρωτότυπο διαμορφωμένο σε φορμάτ STL (*Standard Triangulation Language*)

Επειδή τα αρχεία STL χρησιμοποιούν μόνο στοιχειώδη επίπεδα, προκειμένου να περιγραφούν καμπύλες επιφάνειες πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των επιπέδων, κάτι όμως που συνεπάγεται και την αύξηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του αρχείου.

Μεγάλα αρχεία, σημαίνει αύξηση του χρόνου επεξεργασίας και κατασκευής συνεπώς οι κατασκευαστές πρέπει να εξισορροπήσουν της απαιτήσεις ακρίβειας με τις κατάλληλες προδιαγραφές του μοντέλου, ώστε να παραχθεί ένα αρχείο STL που να δώσει το κατάλληλο μοντέλο με τον ελάχιστο δυνατό κόπο.

Το **τρίτο βήμα** της τρισδιάστατης εκτύπωσης συνίσταται στο "τρέξιμο" ενός προγράμματος το οποίο προετοιμάζει την κατασκευή του αντικειμένου που αναπαριστά το αρχείο *STL*.

Το λογισμικό του προγράμματος αυτού διαιρεί το ψηφιακό μοντέλο σε έναν αριθμό λεπτών εγκάρσιων διατομών, ενώ μπορεί να δημιουργήσει και μια σταθερή δομή για τη στήριξη του πρωτοτύπου κατά την διάρκεια της κατασκευής του.

Το αρχείο *STL* έπειτα στέλνεται στη μηχανή απευθείας (τις περισσότερες φορές) και παρέχεται στο χρήστη από το πρόγραμμα η δυνατότητα επεξεργασίας του αντικειμένου για ακόμα μια φορά ώστε να αλλάξει αν επιθυμεί την διεύθυνση κτισίματος του αντικειμένου μέσα στη μηχανή.

Στις περισσότερες μηχανές υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής περισσότερων κομματιών ανά εκτύπωση κάνοντας αντιγραφή του αρχείου ή χρησιμοποιώντας περισσότερα από ένα αρχεία *STL*.

Έπειτα, η κάθε μηχανή επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει μεταξύ κάποιων παραμέτρων με τις οποίες θα διαμορφωθεί το αντικείμενο, η διαδικασία αυτή λέγεται *setup*, τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι -αναλόγως την μηχανή- η ανάλυση ή το πάχος του στρώματος.

Το **τέταρτο στάδιο** είναι η κατασκευή του φυσικού αντικειμένου κατά την οποία γίνεται η κατασκευή μίας-μίας των διατομών στις οποίες διαιρέθηκε το μοντέλο στο στάδιο 3. Η διαδικασία κτισίματος διακόπτεται, ανάλογα με την μηχανή που χρησιμοποιείται, είτε όταν ολοκληρωθεί είτε όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο υλικό προς εκτύπωση και ενημερώνεται απευθείας ο χρήστης.

Το **τελικό στάδιο** περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αντικειμένου από την μηχανή και την απόσπασή του από τυχόν στηρίγματα. Το αντικείμενο πλέον είναι έτοιμο προς χρήση, αλλά χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη διαδικασία που θα γίνει η αποκόλληση του αντικειμένου από την πλατφόρμα, καθώς και το καθάρισμά του από τυχόν επικαθίσεις υγρής ρητίνης που έχει εγκλωβιστεί στις κοιλότητες της επιφάνειας.

## 4.2 Λογισμικά Slic3r

Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής δεν μπορεί να επεξεργαστεί κατευθείαν τα αρχεία που προέρχονται από κάποιο πρόγραμμα CAD. Τα τρισδιάστατα αρχεία ή τα αρχεία CAD πρέπει πρώτα να περάσουν από μια επεξεργασία πριν



Το πρόγραμμα Slic3r βοηθάει στην υλοποίηση του τρίτου σταδίου της τρισδιάστατης εκτύπωσης, δηλαδή τον "τεμαχισμό" του μοντέλου σε λεπτές εγκάρσιες διατομές και την δημιουργία μονοπατιών για την παραγωγή του κώδικα G του μοντέλου που είναι προς εκτύπωση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται slicing.

Πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα, το οποίο αναλαμβάνει να επεξεργαστεί ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο και να το αποθηκεύσει σε μορφή G κώδικα που να μπορεί να γίνει δεκτή από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ο κώδικας G περιέχει πληροφορίες για το πώς, που και το πόσο γρήγορα θα κάνει τις κινήσεις ο τρισδιάστατος εκτυπωτής.

Στην αγορά κυκλοφορούν διάφορα τέτοια προγράμματα τα οποία συνήθως προσφέρουν στον χρήστη τη δυνατότητα να ρυθμίσει το μέγεθος, τη θέση ή και τον προσανατολισμό του ψηφιακού μοντέλου.

Το πρόγραμμα δίνει στον χρήστη επίσης την δυνατότητα να ορίσει και τις ρυθμίσεις της εκτύπωσης, όπως είναι στην περίπτωση των μηχανών *FDM*, η διάμετρος του νήματος ή η πυκνότητα του υλικού που εναποτίθεται.

Έπειτα, το πρωτότυπο υποβάλλεται σε μία διαδικασία κατά την οποία χωρίζεται σε οριζόντιες στρώσεις και για κάθε στρώση υπολογίζεται η δόση του υλικού που θα εναποτεθεί με βάση τις ρυθμίσεις που έχουν αποθηκευθεί.

Επειδή στις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης οι ιδιότητες των αντικείμενων δεν είναι όμοιες και στις τρεις συντεταγμένες, καθώς στη κατακόρυφη συντεταγμένη z τα

αντικείμενα τείνουν να είναι λιγότερο ακριβή και όχι τόσο στιβαρά από ότι στο επίπεδο  $xy$ , ο προσανατολισμός του αντικειμένου παίζει καθοριστικό ρόλο.

Επίσης, οι κατασκευαστές επιλέγουν την μικρότερη δυνατή διάσταση να βρίσκεται στον άξονα  $z$  μειώνοντας έτσι τον αριθμό των διαδοχικών λεπτών διατομών που θα εναποτεθούν η μία πάνω στην άλλη, μειώνοντας έτσι και τον συνολικό χρόνο κατασκευής.

Το λογισμικό Slic3r αποθηκεύει αρχεία έτσι ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν και από άλλα προγράμματα όπως τα ακόλουθα *Pronterface*, *Repetier-Host*, *ReplicatorG* τα οποία επεκτείνουν τις ιδιότητές του εφόσον προσφέρουν μια άποψη της εκτύπωσης με βάση την επεξεργασία του αντικειμένου που έχει γίνει από το λογισμικό Slic3r.

## Κεφάλαιο 5

### Δοκιμή και μελέτη των υλικών στην εργαλειομηχανή Haas TM-1

#### 5.1 Μελέτη της προβολής της δέσμης του λέιζερ

Στην κλίμακα των αποστάσεων που αφορούν το πείραμα η εκθετική εξασθένηση της ακτινοβολίας, λόγω της παρεμβολής του αέρα είναι παράγοντας που δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της εκτύπωσης. Αντίθετα, η ταχύτητα σάρωσης της επιφάνειας της ρητίνης αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα από τον οποίο εξαρτάται η ακρίβεια και κατά συνέπεια η ποιότητα της εκτύπωσης.

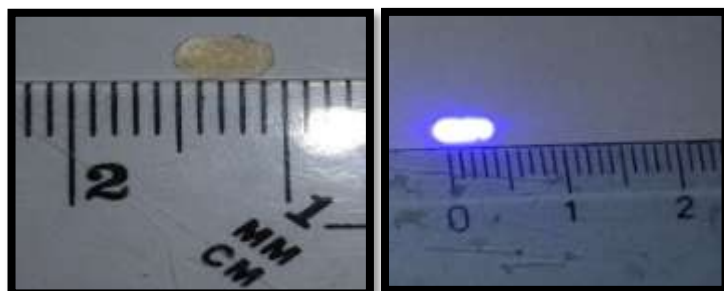
Ακτινοβολήθηκε στρώμα ρητίνης πάχους  $d = 1$  mm από ύψος  $h = 19,5$  cm για διαφορετικά χρονικά διαστήματα.



Εικόνα 54 Εκτίμηση διαστάσεων προβολής της δέσμης λέιζερ για διαφορετικούς χρόνους εστίασης

Όπως φαίνεται στην εικόνα 43 το περίγραμμα της προβολής της δέσμης του λέιζερ δεν είναι ορατό στην επιφάνεια της ρητίνης όταν ακτινοβολείται για χρόνους μεγαλύτερους από 1s διότι παρατηρείται το φαινόμενο πολυμερισμού της ρητίνης που βρίσκεται και εκτός αυτής.

Για να αποφύγουμε το φαινόμενο αυτό και να γίνει εφικτή η εκτύπωση με την ακρίβεια που μας επιτρέπει το σχήμα της προβολής της δέσμης του λέιζερ θα περιοριστούμε σε όσο το δυνατόν μικρότερα πάχη στρώματος.



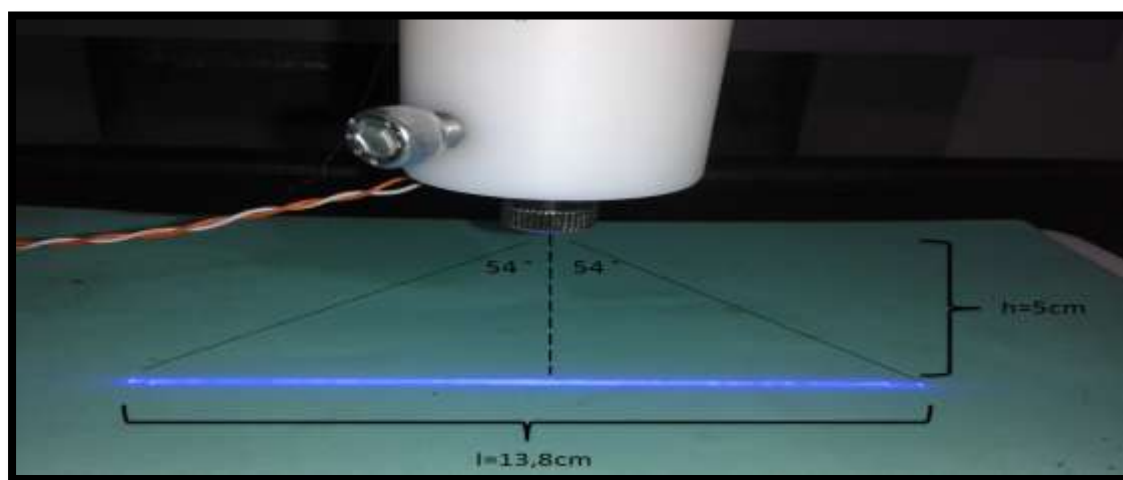
Εικόνα 55 Οι πραγματικές διαστάσεις της κηλίδας αποτυπώνονται στην ρητίνη για χρόνο εστίασης 1s

## 5.2 Μελέτη της γραμμικής προβολής της δέσμης λέιζερ

Η κεφαλή line του λέιζερ καθιστά εφικτή την σάρωση ορθογώνιων αλλά και κυκλικών επιφανειών σε χρόνο συγκριτικά μικρότερο από τον αντίστοιχο που θα χρειαζότανε με την κεφαλή dot.

Επίσης ο κώδικας που εφαρμόζεται είναι απλούστερος και μηχανή εκτελεί λιγότερες και πιο απλές κινήσεις.

Το μήκος της γραμμικής προβολής της δέσμης του λέιζερ εξαρτάται γραμμικά από το ύψος ακτινοβολήσης και η γωνία ανοίγματος της δέσμης είναι  $108^\circ$ .



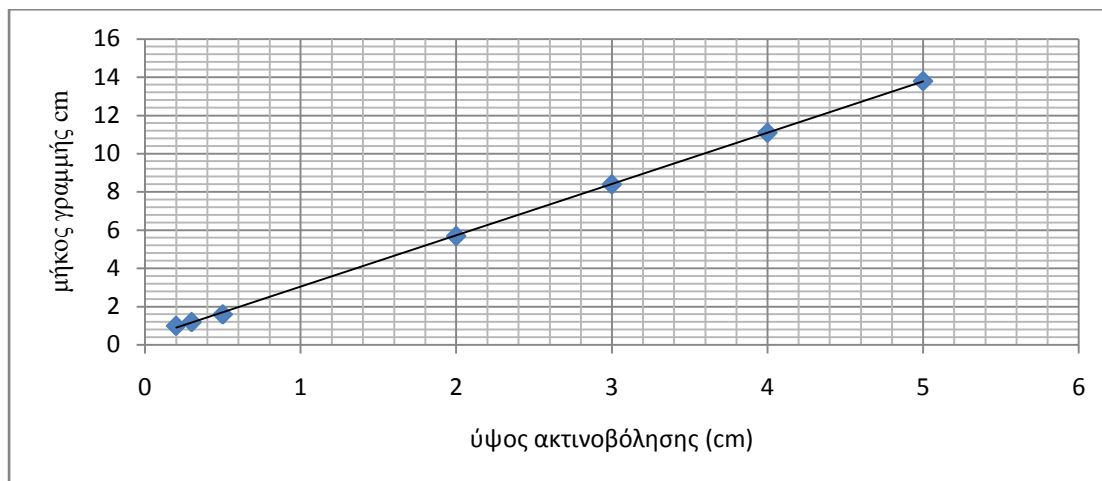
Εικόνα 56 Άνοιγμα γραμμικής δέσμης

Σε ύψη ακτινοβολήσης μικρότερα από 2 cm λόγω αύξησης του ποσοστού ανάκλασης της ακτινοβολίας η προβολή της δέσμης θολώνει και τα όριά της δεν είναι τα πραγματικά.

ύψος ακτινοβολή σης $h$ (cm)	μήκος γραμμής $l$ (cm)	μήκος γραμμής /2	$\epsilon\phi(\theta/2)$	$\theta/2$ ( $^\circ$ )	$\theta$ ( $^\circ$ )
5	13,8	6,9	1,38	54,21	108,42
4	11,1	5,55	1,3875	54	108,42
3	8,4	4,2	1,4	54,5	109
2	5,7	2,85	1,425	54,94	109,88
1					
0,5	1,6	0,8	1,6	57,99	115,98
0,3	1,2	0,6	2	63,43	126,86
0,2	1	0,5	2,5	68,19	136,38

Για να μελετήσουμε την ποιότητα των τεμαχίων εκτύπωσης με χρήση της γραμμικής προβολής της δέσμης λέιζερ και την εξάρτηση του πάχους των στρώσεων από τον χρόνο εστίασης, συγκρίθηκαν τα παρακάτω τεμάχια. Παρατηρούμε ομοίως την

εμφάνιση του φαινομένου, ότι για μεγάλους χρόνους εστίασης, η γραμμική προβολή του λέιζερ δεν δίνει ακριβές σχήμα τεμαχίου και επιπλέον πολυμερίζεται η ρητίνη των γειτονικών στρωμάτων με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πλάτος της λωρίδας. Για χρόνους συγκρίσιμους με το 1 second το πλάτος διατηρεί τις διαστάσεις τις δέσμης αλλά το περίγραμμα της λωρίδας εξακολουθεί να μην είναι ακριβές.



Εικόνα 57 Χρόνος ακτινοβολίας  $\Delta t = 1s$



Εικόνα 58 Χρόνος ακτινοβολίας  $\Delta t = 3s$



Εικόνα 59 Χρόνος ακτινοβολίας  $\Delta t = 5s$



### 5.3 Εκτύπωση και σύγκριση επίπεδων τεμαχίων με διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης

Η ταχύτητα σάρωσης της ρητίνης θα αποτελέσει τον βασικότερο παράγοντα που θα μας απασχολήσει για την ποιότητα της εκτύπωσης.

Επιθυμούμε μεγάλη ταχύτητα σάρωσης ώστε το αποτύπωμα του λέιζερ να έχει τις διαστάσεις της δέσμης. Επιπλέον γνωρίζουμε από το κεφάλαιο 3 ότι το πάχος των στρωμάτων μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης όπως προβλέπει ο παρακάτω τύπος.

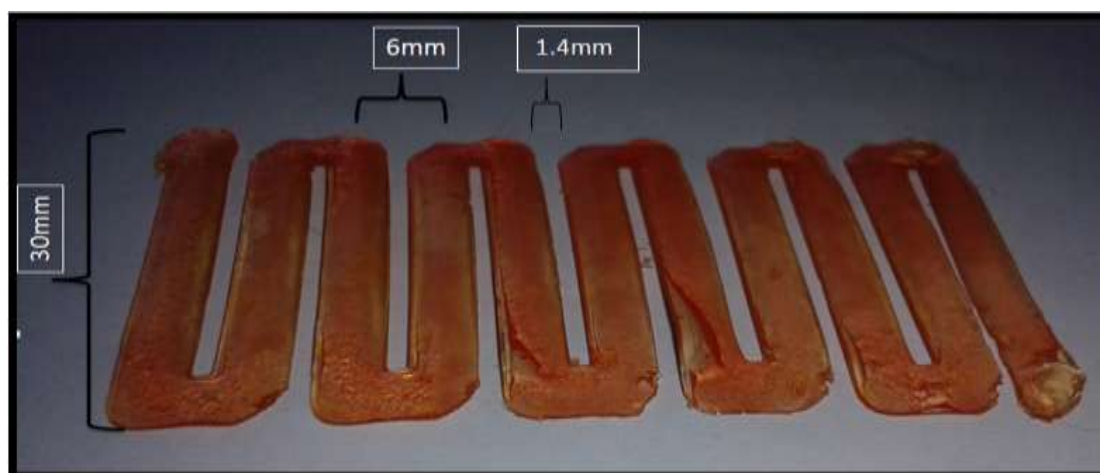
$$C_d = D_p \ln\left(\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_l}{W_0 V_s E_c}\right) \quad [5]$$

Συνεπώς, η μέγιστη ταχύτητα σάρωσης πρέπει να προσδιοριστεί με βάση το ελάχιστο πάχος στρωμάτων που μπορούμε να πετύχουμε με την δεδομένη πειραματική διάταξη.

Για το σκοπό αυτό τυπώθηκε το ίδιο τεμάχιο σε αρκετή στρώση ρητίνης περίπου 500  $\mu\text{m}$  ώστε να γίνει εφικτή η αποκόλληση του από το πάτο του δοχείου χωρίς να αλλοιωθεί και να καταγραφούν οι παρατηρήσεις. Η εκτύπωση πραγματοποιήθηκε με διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης.

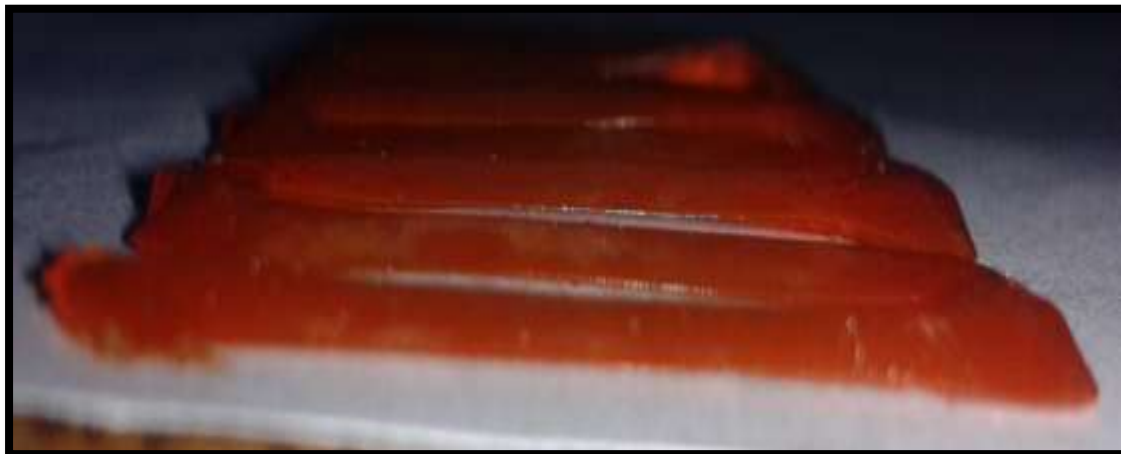
Τυπώθηκε τεμάχιο διαστάσεων όπως φαίνονται στην εικόνα 60 με ταχύτητες σάρωσης 1.7 m/min (τεμάχιο  $\alpha 1$ ), 1.5 m/min (τεμάχιο  $\beta 1$ ), 1.3 m/min (τεμάχιο  $\gamma 1$ ), 0.5 m/min (τεμάχιο  $\delta 1$ ).

#### Μελέτη τεμαχίου $\alpha 1$ - Ταχύτητα σάρωσης 1.7 m/min



Εικόνα 60 Εκτύπωση δοκιμαστικού τεμαχίου με ταχύτητα σάρωσης 1.7 m/min

Σε σημεία όπου η αλλαγή της πορείας της δέσμης επιφέρει και αλλαγή στην ταχύτητα σάρωσης λόγω επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης παρατηρούμε παραμόρφωση του τεμαχίου η οποία επηρεάζει και την στερεοποίηση της ενδιάμεσης έκτασης δημιουργώντας μία κοιλότητα προς τα πάνω. Στα πλαίσια A και B παρατηρούμε την παραμορφωμένη περιοχή ενώ η διακεκομμένη γραμμή καθιστά δυνατή την παρατήρηση της κοιλότητας που δημιουργείται μεταξύ των περιοχών αυτών.



Η ανάποδη όψη των τεμαχίων είναι επίπεδη αν εξαιρέσουμε τα ίδια σημεία τα οποία είναι παραμορφωμένα λόγω της αλλαγής της ταχύτητας σάρωσης.



Εικόνα 61 Ανάποδη όψη τεμαχίου α1

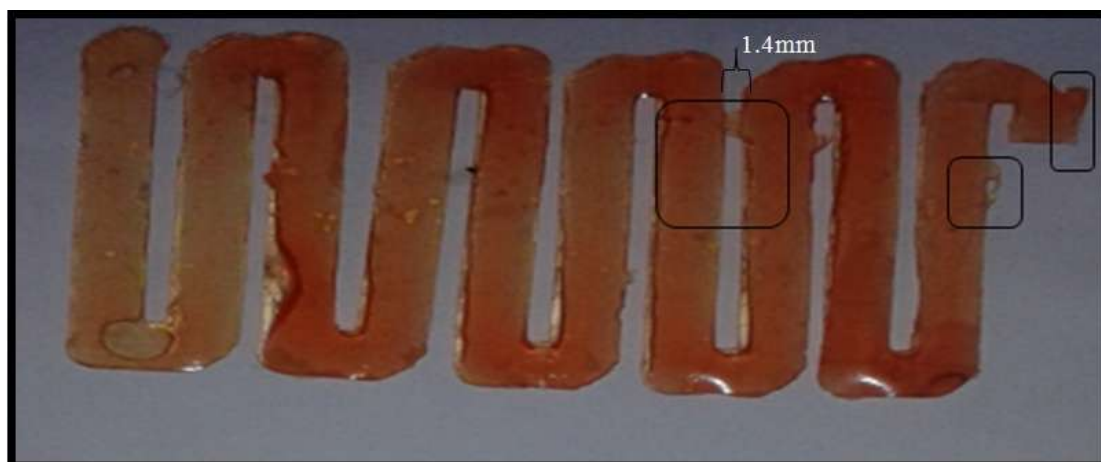
Μελέτη τεμαχίου α2 - Ταχύτητα σάρωσης 1.5 m/min



Εικόνα 62 Εκτύπωση δοκιμαστικού τεμαχίου με ταχύτητα σάρωσης 1.5 m/min

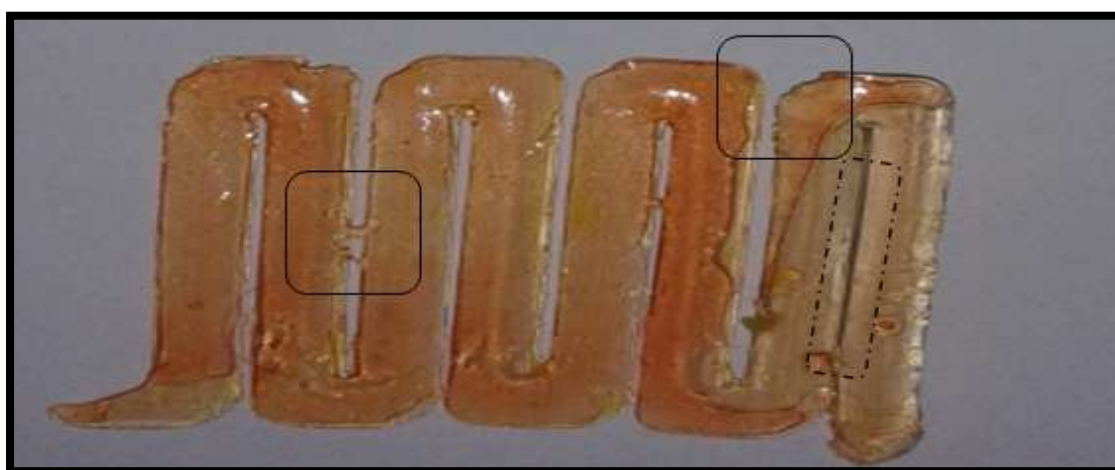
Το τεμάχιο α2 τυπώθηκε με ταχύτητα σάρωσης μόλις 0.2 m/min μικρότερη από του α1 και είναι εύκολο να παρατηρήσουμε περιοχές όπου το περίγραμμα είναι έντονα αλλοιωμένο.

Μελέτη τεμαχίου α3 - Ταχύτητα σάρωσης 1.3 m/min



Εικόνα 63 Εκτύπωση δοκιμαστικού τεμαχίου με ταχύτητα σάρωσης 1.3 m/min

Μελέτη τεμαχίου α4 - Ταχύτητα σάρωσης 0.5 m/min



Εικόνα 64 Εκτύπωση δοκιμαστικού τεμαχίου με ταχύτητα σάρωσης 0.5 m/min

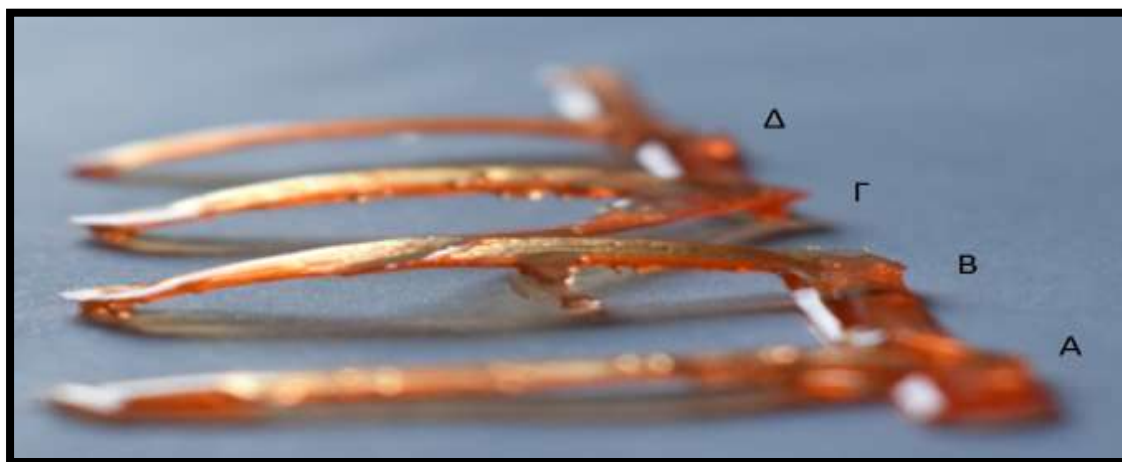
Για ταχύτητες μικρότερες από 1.3 m/min παρατηρούμε ότι δεν γίνεται δυνατή εκτύπωση με ακρίβεια την ακρίβεια που μας επιτρέπουν οι διαστάσεις της προβολής της δέσμης εφόσον δεν μπορούμε να τυπώσουμε ανεξάρτητες γραμμές με απόσταση μικρότερη από 1.4 mm.

Είναι προφανές ότι για μεγάλες ταχύτητες σάρωσης το τεμάχιο είναι περισσότερο ακριβές και ιδανικό για την κατασκευή που θέλουμε. Η ταχύτητα με την οποία τυπώθηκε το πιο ακριβές τεμάχιο (α1) είναι 1.7 m/min. Ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτήν μπορεί να έδιναν πιο ακριβές περίγραμμα αλλά δεν θα πολυμέριζαν την ρητίνη στο βάθος που θέλουμε και επιπλέον μεγάλη ταχύτητα μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις στην επιφάνεια της ρητίνης με αποτέλεσμα να μειωθεί η ακρίβεια της εκτύπωσης.

## 5.4 Εκτύπωση και σύγκριση επίπεδων τεμαχίων με περισσότερες σαρώσεις

Ένα ερώτημα που δημιουργείται είναι πως επηρεάζεται το πάχος αλλά και η ποιότητα του τεμαχίου το οποίο υπόκειται σε παραπάνω από μία σαρώσεις.

Η πολυμερισμένη ρητίνη δεν επηρεάζεται ούτε από την ακτινοβολία αλλά ούτε και την τυχόν αύξηση της θερμοκρασίας. Πριν όμως ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός είναι ενδιαφέρον να δούμε ποιο θα είναι το αποτέλεσμα επιπλέον σαρώσεων της δέσμης πάνω στο τεμάχιο.



Εικόνα 65 Εκτύπωση όμοιων επίπεδων τεμαχίων με διαφορετικό αριθμό σαρώσεων

Το τεμάχιο A εκτυπώθηκε με 2 ευθύγραμμες σαρώσεις ενώ τα τεμάχια B,Γ και Δ με παραπάνω από 4 ευθύγραμμες σαρώσεις.

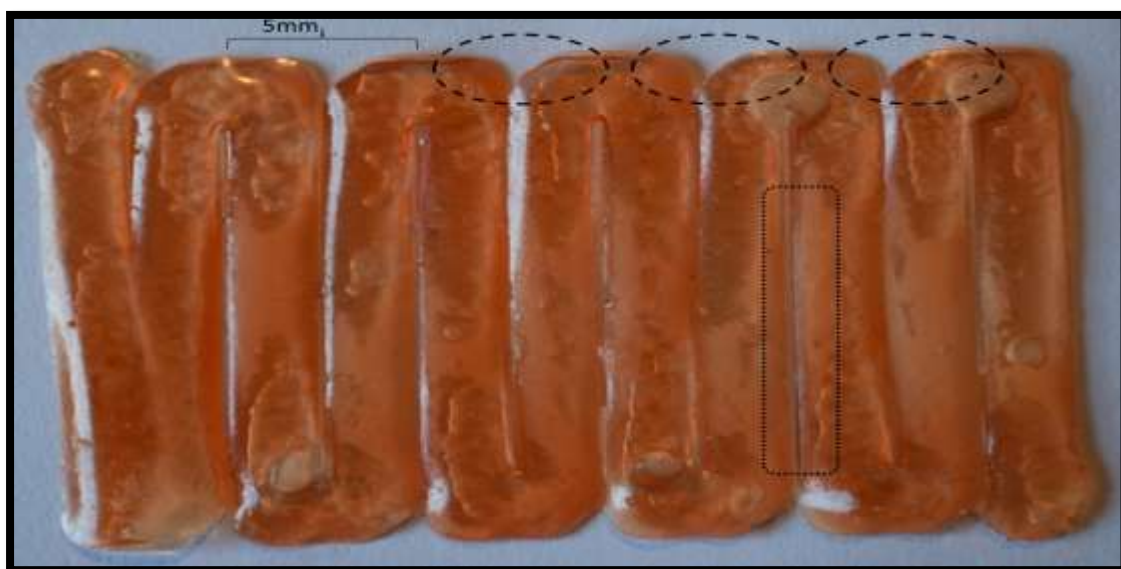
Το αποτέλεσμα περισσότερων σαρώσεων είναι η κύρτωση του ευθύγραμμου τεμαχίου και η δημιουργία μίας κοιλότητας μεταξύ των περιοχών όπου αλλάζει η πορεία της δέσμης, δηλαδή το ίδιο φαινόμενο που είχε παρατηρηθεί κατά την μελέτη τεμαχίων υπό διαφορετικές ταχύτητες αλλά σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα. Το πάχος και η ποιότητα εκτύπωσης των τεμαχίων παραμένει στα ίδια επίπεδα

Το φαινόμενο της κύρτωσης ονομάζεται *warpage* και οφείλεται στην διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ των περιοχών του τεμαχίου και στον διαφορετικό ρυθμό ψύξης αυτών. [15]

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την εκτύπωση επιφάνειας που θέλουμε να τυπώσουμε, κατά την οποία οι σαρώσεις της δέσμης ενδεχομένως να έχουν κάποιο ποσοστό επικάλυψης προκειμένου να μην υπάρχει κενό ανάμεσά τους.

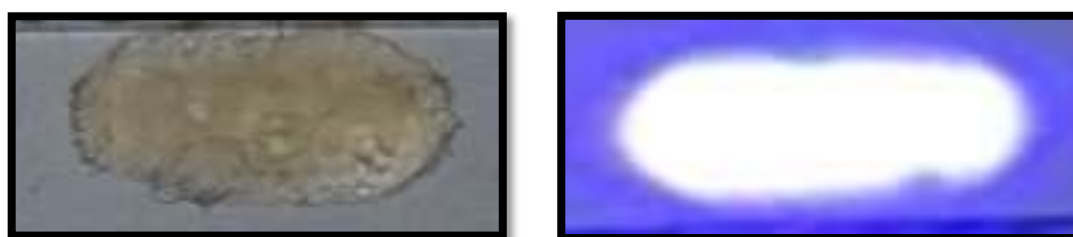
## 5.5 Σάρωση επιφάνειας

Σκοπός της παραγράφου είναι η σάρωση επιφάνειας διατομής ορθογωνίου παραλληλογράμμου χωρίς να υπάρχουν υπολείμματα άκαυτης υγρής ρητίνης και κενά μέσα σε αυτήν. Προκειμένου να γίνει εφικτό, πρέπει η κάθε κατακόρυφη σάρωση να "ακουμπάει" στην επόμενη ή να υπάρχει κάποιο ελάχιστο ποσοστό επικάλυψης μεταξύ τους, ώστε να μην παρατηρείται το φαινόμενο της κύρτωσης που είδαμε ότι συμβαίνει όταν ξανασαρώνεται ένα τεμάχιο. Το παρακάτω τεμάχιο τυπώθηκε με ύψος 30 mm και με οριζόντια μετατόπιση δέσμης 5 mm κάθε φορά ως προς την προηγούμενη. Λαμβάνοντας υπόψη το μήκος της κηλίδας που είναι 4.6 mm, αναμένουμε να σχηματίζεται κενό πλάτους 0.4 mm ανάμεσα στις κατακόρυφες σαρώσεις. Το ποσοστό επικάλυψης μεταξύ των γειτονικών στρώσεων είναι 0%.



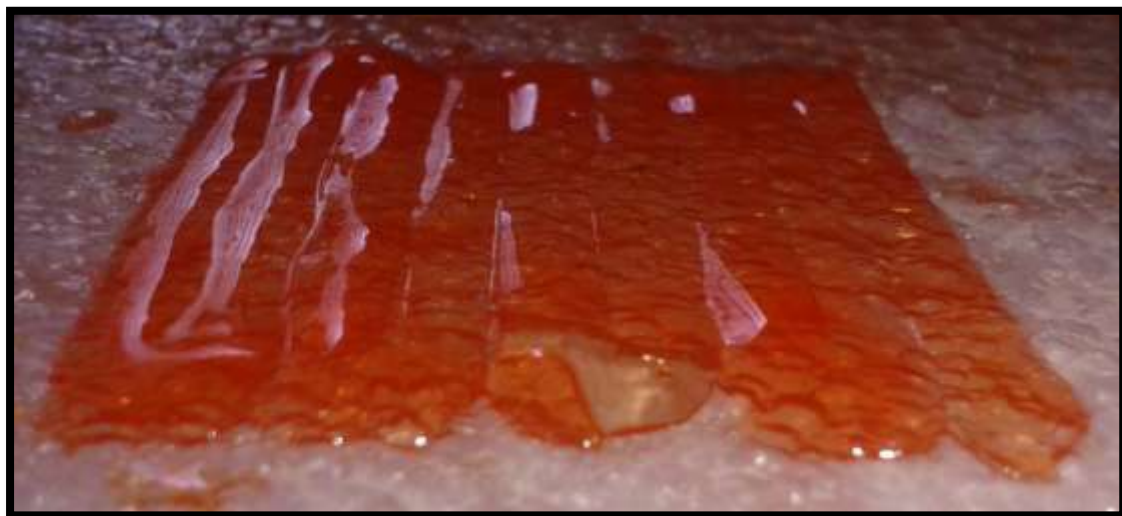
Εικόνα 66 Τεμάχιο με οριζόντια μετατόπιση δέσμης 5 mm

Αρχικά, παρατηρούμε τις αναμενόμενες περιοχές που δεν καλύπτονται από τις σαρώσεις στα σημεία που αλλάζει η πορεία της δέσμης. Επίσης, αυτές οι περιοχές βλέπουμε ότι δεν έχουν γεωμετρική συμμετρία, γεγονός που θα μπορούσαμε να εξηγήσουμε αν δούμε την ασύμμετρη προβολή της δέσμης του λέιζερ καθώς και το αποτύπωμά της στη ρητίνη. Το παρακάτω τεμάχιο τυπώθηκε με ύψος 30 mm και με



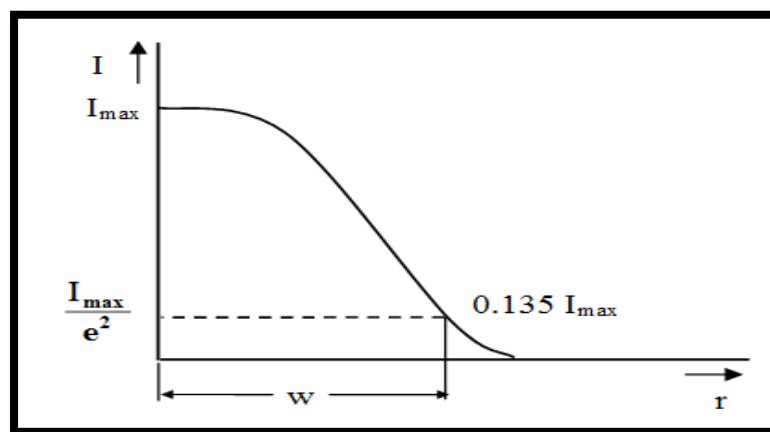
Εικόνα 67 Διαστάσεις κηλίδας

οριζόντια μετατόπιση δέσμης 4 mm κάθε φορά ως προς την προηγούμενη, ώστε η κάθε κάθετη σάρωση καλύπτει κατά 0.6 mm την γειτονική της. Το ποσοστό επικάλυψης υπολογίστηκε 13%.



Εικόνα 68 Εκτύπωση βάσης με επικάλυψη 13%

Παρατηρήθηκε ότι για επικάλυψη μέχρι 13%, το αποτέλεσμα της εκτύπωσης είναι η δημιουργία οριακά αποκομμένων γραμμών, παρά το γεγονός ότι οι σαρώσεις επικαλύπτονται κατά 0.6 mm. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται αν λάβουμε υπόψη την κατανομή της δέσμης.



Εικόνα 69 Κατανομή της έντασης ακτινοβολίας του λέιζερ

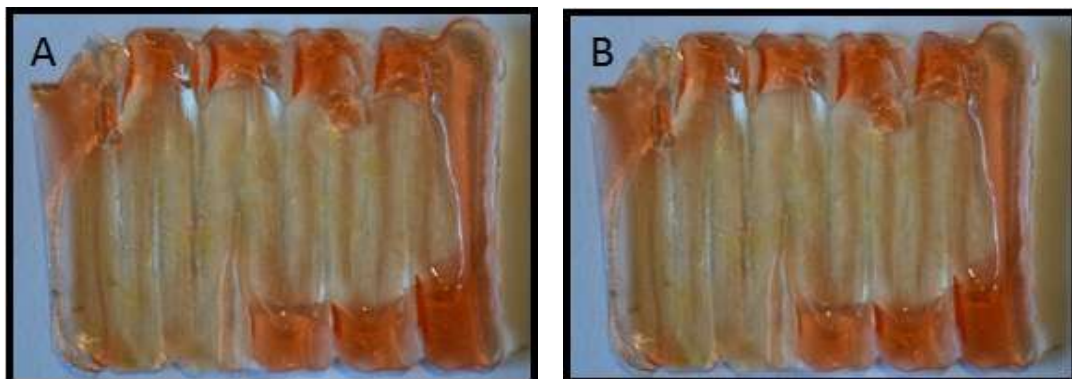
Το προφίλ, δηλαδή η κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας που παρουσιάζει μία τομή της δέσμης ενός λέιζερ φαίνεται στο σχήμα. Παρατηρούμε ότι η ένταση μειώνεται βαθμιαία όσο αυξάνει η ακτίνα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε επακριβώς την ακτίνα στο όριο μηδενικής έντασης, αλλά θεωρούμε ως ακτίνα της δέσμης ( $w$ ) την απόσταση από το κέντρο της δέσμης ( $I_{max}$ )

μέχρι το σημείο που η ένταση ακτινοβολίας μειώνεται στο  $\frac{1}{e^2}$  της  $I_{max}$ , δηλαδή στο  $0.135I_{max}$ . Το 94 % της ενέργειας της δέσμης είναι συγκεντρωμένο εντός της περιοχής που ορίζει η ακτίνα w. [7]



Εικόνα 70 Εκτύπωση βάσης με επικάλυψη 16%

Επίσης διαπιστώθηκε ότι για μεγαλύτερο ποσοστό επικάλυψης, με το οποίο επιτυγχάνεται ένωση των γραμμών, αρχίζει να παρατηρείται πάλι το φαινόμενο της κύρτωσης που είχε παρατηρηθεί όταν μία επιφάνεια σαρωνόταν για παραπάνω από 2 φορές.



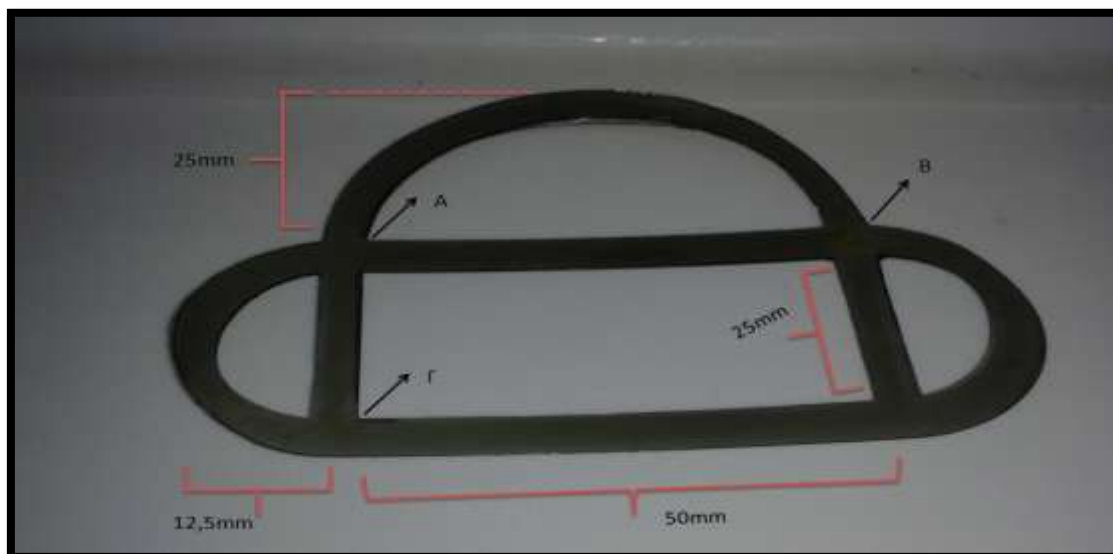
Εικόνα 71 Εκτύπωση βάσης A και B με επικάλυψη 25% και 30% αντίστοιχα

Συμπερασματικά λοιπόν, αποφασίστηκε η οριζόντια μετατόπιση της δέσμης για την δημιουργία επιφάνειας να είναι 4 mm ώστε οι σαρώσεις να επικαλύπτονται κατά 0.6 mm και το ποσοστό επικάλυψης να είναι 13%.



## 5.6 Παρουσίαση και μελέτη τελικών τεμαχίων

### Μελέτη τεμαχίου 3 στρώσεων ύψους 900μm



Εικόνα 72 Δοκιμαστικό τεμάχιο ύψους 0.9 mm 3 στρώσεων

- Το τελικό πάχος του τεμαχίου, λόγω του φαινομένου warpage, δεν είναι σταθερό, αλλά κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,75 - 0,91 mm, αναλόγως την περιοχή και την μέση συγκέντρωση της ρητίνης στην περιοχή αυτή
- Η διάσταση AB εκτυπώθηκε με προδιαγραφές μήκους 50 mm και μετρήθηκε 49 mm, γεγονός που αποδεικνύει την συρρίκνωση της ρητίνης κατά ποσοστό 2%
- Η διάσταση ΑΓ εκτυπώθηκε με προδιαγραφές μήκους 25 mm και μετρήθηκε 24,5 mm, γεγονός που αποδεικνύει την συρρίκνωση της ρητίνης ομοίως, κατά ποσοστό 2%

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι οι διαστάσεις του τεμαχίου αποκλίνουν από αυτές που δόθηκαν στην μηχανή CNC κατά σταθερό ποσοστό 2%, που οφείλεται στην συρρίκνωση της ρητίνης κατά μήκος της γραμμής που εκτυπώνεται.

Παρουσίαση του Γ κώδικα που δόθηκε στην μηχανή CNC για την εκτύπωση τεμαχίου ύψους 900μm

G91 ; // επιλογή σχετικού συστήματος συντεταγμένων

G21 ; // επιλογή χιλιοστών ως μονάδα μέτρησης

F1700. ; // δήλωση ταχύτητας 1700mm/min

G01 X50. ; // ευθύγραμμη κίνηση

G02 X-50. R25. ; // διαγραφή τόξου

G01 Y25. ; // ευθύγραμμη κίνηση

X50. ; // ευθύγραμμη κίνηση

Y-25. ; // ευθύγραμμη κίνηση

X-50. ; // ευθύγραμμη κίνηση

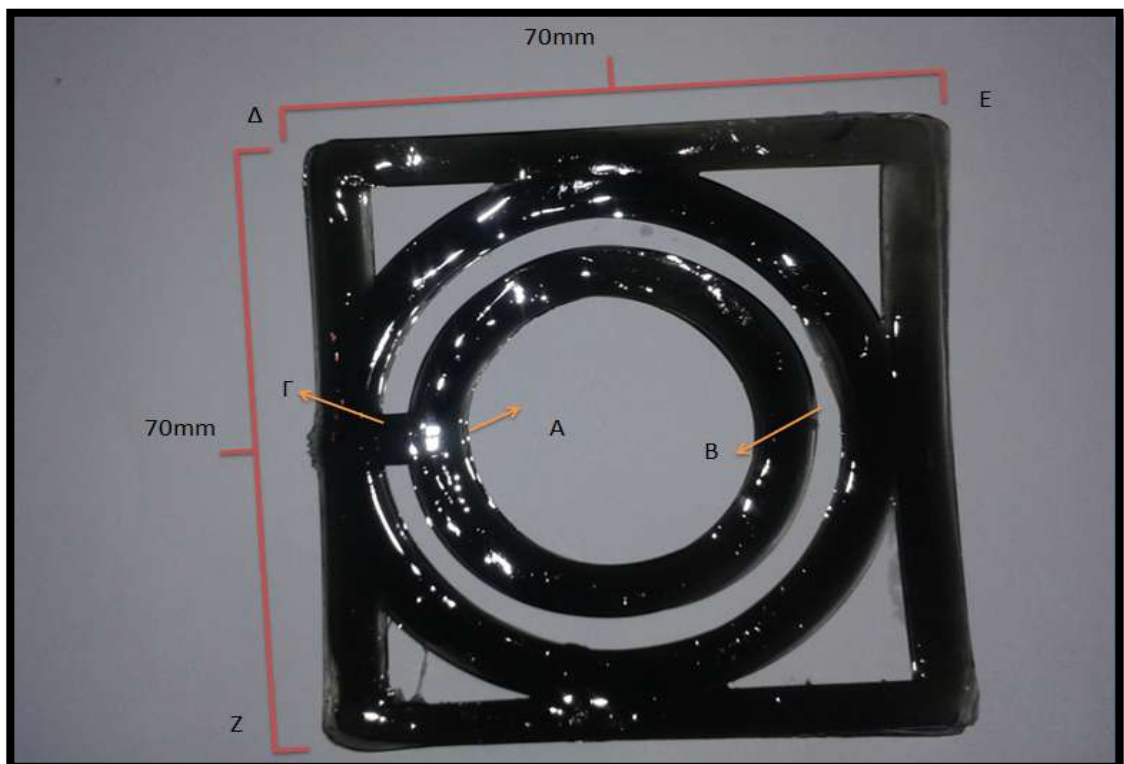
G02 Y25. R12.5 ; // διαγραφή τόξου

G01 X50. ; // ευθύγραμμη κίνηση

G02 Y-25. R12.5 ; // διαγραφή τόξου

G01 X-50. ; // ευθύγραμμη κίνηση

Μελέτη τεμαχίου 5 στρώσεων ύψους 1500μm



Εικόνα 73 Δοκιμαστικό τεμάχιο ύψους 1.5 mm 5 στρώσεων

- Το πάχος του τελικού τεμαχίου, λόγω του φαινομένου warpage δεν είναι σταθερό, αλλά κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,24 - 3,21 mm αναλόγως την περιοχή και την μέση συγκέντρωση της ρητίνης στην περιοχή αυτή
- Η διάσταση AB εκτυπώθηκε με προδιαγραφές μήκους 40 mm
- Η διάσταση ΑΓ εκτυπώθηκε με προδιαγραφές μήκους 15 mm
- Οι διαστάσεις ΔΕ και ΔΖ εκτυπώθηκαν με προδιαγραφές μήκους 70 mm
- Κατά την διάρκεια της εκτύπωσης, το τεμάχιο αποκολλήθηκε από τον πάτο του δοχείου λόγω φαινομένου warpage, με αποτέλεσμα το περίγραμμά του να είναι παραμορφωμένο και χωρίς συμμετρία. Για τον λόγο αυτό, δεν μελετήθηκε περαιτέρω η απόκλιση των διαστάσεων του τελικού τεμαχίου λόγω συρρίκνωσης, από αυτές που δόθηκαν στην μηχανή CNC.

Παρουσίαση του Γ κώδικα που δόθηκε στην μηχανή CNC για την εκτύπωση τεμαχίου ύψους 1500μm	
G91 ; // επιλογή σχετικού συστήματος συντεταγμένων	G01 X-15. ; // ευθύγραμμη κίνηση
G21 ; // επιλογή χιλιοστών ως μονάδα μέτρησης	G01 Y35. ; // ευθύγραμμη κίνηση
F1700. ; // δήλωση ταχύτητας 1700mm/min	G01 X70. ; // ευθύγραμμη κίνηση
G02 X60. R30. ; // διαγραφή τόξου	G01 Y-70. ; // ευθύγραμμη κίνηση
G02 X-60. R30. ; // διαγραφή τόξου	G01 X-70. ; // ευθύγραμμη κίνηση
G01 X15. ; //ευθύγραμμη κίνηση	G01 Y35. ; // ευθύγραμμη κίνηση
G02 X40. R20. ; // διαγραφή τόξου	
G02 X-40. R20. ; // διαγραφή τόξου	

## Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία

### 6.1 Συμπεράσματα

Οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου CNC, είναι πλέον πολύ διαδεδομένες καθώς απευθύνονται σε μικρές και μεγάλες επιχειρήσεις, εργοστάσια, βιομηχανίες αλλά ακόμα και σε ιδιώτες που ασχολούνται ερασιτεχνικά με τον σχεδιασμό καταναλωτικών προϊόντων. Η διάταξη που κατασκευάστηκε, είναι σχεδιασμένη ώστε να ολοκληρώνεται μετά την ενσωμάτωσή της σε οποιαδήποτε εργαλειομηχανή CNC, δίνοντας την δυνατότητα επέκτασης της παραγωγής της σε νέα προϊόντα, από υλικά που δεν είναι δυνατόν να επεξεργαστούν με τα συμβατικά εργαλεία κοπής. Μια εργαλειομηχανή CNC λοιπόν, μετά την ενσωμάτωση της φορητής διάταξης στερεολιθογραφίας, αποκτάει άμεσα διπλή ταυτότητα, εφόσον μπορεί να ανταγωνιστεί την παραγωγή μηχανών ταχείας προτυποποίησης και μάλιστα μηχανών που δεν μπορούν να λειτουργήσουν με την αντίστοιχη ακρίβεια κίνησης. Θα μπορούσε λοιπόν, η συγκεκριμένη διάταξη, να αποτελέσει μία ιδιαίτερα ελκυστική πρόταση εμπορικού χαρακτήρα, για επιχειρήσεις που διαθέτουν μηχανές CNC.

Το κόστος των υλικών που αγοράστηκαν για την φορητή διάταξη, πλην της ρητίνης που θεωρείται αναλώσιμο, δεν ξεπερνάει τα 66 Ευρώ. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε αναλυτικά το κόστος του εξοπλισμού.

<b>Πάγια έξοδα φορητής διάταξης</b>	
Εξαρτήματα άντλησης ρητίνης	
Δοσομετρική περισταλτική αντλία	35€
Driver bl-tb6560-v2.0	8.5 €
Πλακέτα arduino uno	4.5 €
Εξαρτήματα ακτινοβολήσης ρητίνης	
Laser διόδου 20mW 405 nm, 3 in 1 (Dot, Line, Cross)	7€
Driver Laser διόδου 20mW 405 nm	5 €
Σύστημα θέρμανσης δοχείου	
Ψηφιακός θερμοστάτης XH-W1209	6 €
<b>Συνολικό κόστος πάγιων εξόδων</b>	<b>66 €</b>

Μετά την κατασκευή της βάσης και την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Μονοχρωματική δέσμη ακτινοβολίας λέιζερ διόδου 405nm και ισχύος μόλις 20mW, είναι αρκετή για να προκαλέσει άμεσα πολυμερισμό σε στρώση ρητίνης ακρυλικού τύπου.
- Η ταχύτητα σάρωσης της ρητίνης αποδείχθηκε ο βασικότερος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η ποιότητα των τεμαχίων. Μεγάλη ταχύτητα σάρωσης εκτυπώνει τεμάχια με ακριβές περίγραμμα, ενώ μικρότερες ταχύτητες παραμορφώνουν τα τεμάχια με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να τυπώσουμε με την ακρίβεια που μας επιτρέπουν οι διαστάσεις της προβολής της δέσμης.
- Τεμάχια τα οποία σαρώνονται για παραπάνω από 1 φορά, εμφανίζουν το φαινόμενο της κύρτωσης και την δημιουργία μίας κοιλότητας μεταξύ των περιοχών όπου αλλάζει η πορεία της δέσμης.
- Για την εκτύπωση επιφάνειας με κατακόρυφες παράλληλες σαρώσεις, εκτιμήθηκε ότι πρέπει να επικαλύπτονται κατά το 13% της διαμέτρου της δέσμης, δηλαδή κατά 6mm, διαφορετικά δεν γίνεται εφικτή η ένωση τους.
- Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε, είναι ιδανική για θερμοκρασίες χαμηλότερες από 150 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ξεκινάει η παραγωγή ελεύθερων ριζών ακριβώς όπως θα συνέβαινε με την ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 405 nm και στερεοποιείται άμεσα.
- Το ιξώδες της ρητίνης μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο διαχειρίσιμη. Επίσης, τα στερεοποιημένα στρώματα ρητίνης δεν επηρεάζονται από την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά ούτε και από την προσπίπτουσα ακτινοβολία του λέιζερ.

Έχει αναφερθεί, ότι το φαινόμενο *sla warpage* είναι το αποτέλεσμα διαφορετικού ρυθμού ψύξης των περιοχών της ρητίνης, κάτι που συνεπάγεται τον διαφορετικό ρυθμό συρρίκνωσης των μορίων του πολυμερούς. Το φαινόμενο γίνεται πιο εμφανές σε περιοχές που περιλαμβάνουν τρύπες ή γωνίες, οι οποίες ψύχονται ταχύτερα και είναι οι πρώτες που αποκολλώνται από τον πυθμένα του δοχείου λόγω επιφανειακών τάσεων που δημιουργούνται σε αυτές. [24]

Θα μπορούσαμε να μειώσουμε το φαινόμενο *sla warpage* ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια της διάταξης, είτε επεμβαίνοντας στην υπάρχουσα διάταξη

συμπληρώνοντας την με μηχανισμό ελέγχου της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της ρητίνης, είτε ακλουθώντας ένα νέο πλαίσιο με κανόνες που ορίζουν ένα μοτίβο συνεχόμενων σαρώσεων.

Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να τοποθετηθούν λάμπες υπεριώδους ακτινοβολίας οι οποίες θα διατηρούν την θερμοκρασία στην επιφάνεια της ρητίνης σε σταθερά επίπεδα χωρίς να επηρεάζουν την ποιότητα και το αποτέλεσμα της εκτύπωσης.

Στην δεύτερη περίπτωση πρέπει να γίνει προσέγγιση μέσα από το σχεδιαστικό μέρος, που αφορά την εκτύπωση μέσω κυκλικών σαρώσεων έτσι ώστε να περιορίζονται οι γωνίες, ή η εκτύπωση ενός αρχικού στρώματος κυκλικής διατομής πάνω στο οποίο θα μπορούσε να εκτυπωθεί κάθε τύπου επιφάνεια χωρίς να εμφανίζεται τόσο έντονο το φαινόμενο *sla warpage*.

Επιπλέον, μία ενδιαφέρουσα πρόταση, είναι να γίνει μελέτη για το πως θα μπορούσε να μειωθεί το φαινόμενο της αποκόλλησης από τον πυθμένα του δοχείου, μέσω της χρήσης δύο δεσμών λέιζερ οι οποίες θα σαρώνουν αντιδιαμετρικά την επιφάνεια, έτσι ώστε η στερεοποίησή της να πραγματοποιείται σε ελαφρώς υψηλότερη μέση τιμή θερμοκρασίας. I[25]

## 6.2 Μελλοντική εργασία

Ορισμένες ιδέες για την επέκταση και την βελτίωση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας είναι οι ακόλουθες:

1. Κατασκευή βάσης συγκλίνοντα φακού ή διαφράγματος ίριδας και προσαρμογή στο λέιζερ (για μείωση της διαμέτρου της δέσμης, αύξηση της ακρίβειας και εκτύπωση μικρότερων τεμαχίων)
2. Χρήση driver για το λέιζερ με διακόπτη on/off και προγραμματισμός για την απενεργοποίηση του κατά την διαδικασία της εκτύπωσης
3. Εκτύπωση τρισδιάστατων μοντέλων με χρήση γραμμικής δέσμης λέιζερ (*line lazer*)

Η εκτύπωση μέσω της κεφαλής line του λέιζερ, θα μπορούσε να απλοποιήσει σημαντικά την όλη διαδικασία, καθώς καθιστά εφικτή την σάρωση ορθογώνιων αλλά και κυκλικών επιφανειών σε χρόνο συγκριτικά μικρότερο από τον αντίστοιχο που θα

χρειαζότανε με την κεφαλή dot. Επίσης ο κώδικας που εφαρμόζεται είναι απλούστερος και μηχανή εκτελεί λιγότερες και πιο απλές κινήσεις.

#### 4. Παρασκευή ρητίνης με χρήση μαγνητικού αναδευτήρα. I[8],I[9]

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, η ρητίνη αποτελεί μίγμα ενός μονομερούς, ενός φωτοδιεγέρτη και πρόσθετων ουσιών με τα οποία βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά της. Είναι εφικτό να παρασκευαστεί ρητίνη με επιθυμητές ιδιότητες, όπως ιξώδες, πυκνότητα και έλεγχο απορροφητικότητας της ακτινοβολίας. Η παρασκευή της ρητίνης είναι μία πολύ οικονομική λύση, συγκριτικά με την χρήση της εμπορικής.

#### 5. Κατασκευή αντίστοιχης βάσης για το λέιζερ από αλουμίνιο (για μεγαλύτερη μηχανική σταθερότητα)





# Βιβλιογραφία

---

## *BIBΛΙΑ*

- B[1] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, "Additive Manufacturing Technologies", 2010, pp 41 - 99
- B[2] Π.Α. Ταραντίλη, "Τεχνολογία πολυμερών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2013, pp 9-20
- B[3] S.O. Kasap, "Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2004, pp 466 -492
- B[4] Ε. Χριστοφόρου, "Αισθητήρες", Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , 2011, pp 26-37
- B[5] J. W.Gardner, "Μικροαισθητήρες", Εκδόσεις Τζιόλα, 2000, pp 165-173
- B[6] Δ. Τσουκαλάς, "Τεχνολογία Μικροσυστημάτων", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2007, pp 20-35
- B[7] Η. Ζουμπούλης, Σ. Μαλτέζος, Μ. Φωκίτης, Γ. Θεοδώνης, Β. Λυκοδήμος, Ε. Χρύσου, Λ. Δρακάκη, Λ. Αναστασοπούλου, Θ. Κοντός, Π. Μουσιδης, "Εργαστηριακές ασκήσεις φυσικής συμπυκνωμένης ύλης", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005, pp 32-35

## *ΕΡΓΑΣΙΕΣ*

- E[1] Ε.Γρηγοριάδης, Γ. Καρελιώτης, "PET/CT - Τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίου-Αξονικός τομογράφος", Προπτυχιακή εργασία, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, Ε.Μ.Π., 2012
- E[2] Ε.Κυριακόπουλος, "Κατασκευή μηχανής επιλεκτικής τήξης πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS-SLM): Έλεγχος συστήματος εναπόθεσης σκόνης, έλεγχος και παραμετροποίηση διάταξης laser ", Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Διατμηματικό πρόγραμμα: Συστήματα αυτοματισμού, Ε.Μ.Π., 2016

- E[3] Π.Αβράμπος, Β. Βασιλόπουλος, Σ. Γιαννουλίδης, "Εργαλειομηχανές χαμηλού κόστους για κατεργασίες με λέιζερ προερχόμενα από DVD Writers ", Προπτυχιακή εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., 2013

#### *INTERNET-ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ*

- [1] M.B. Kumbhare, "Effect of Initiator-Monomer Ratio in Polymerization of Vinyl Acetate", International Journal of Chemical Sciences and Applications, Vol 5, Issue: 2, 2014, pp 80-83
- [2] E. MacDonald, "Integrating Stereolithography and Direct Print Technologies for 3D Structural Electronics Fabrication", Rapid prototyping journal, Vol 23, Issue: 2, 2017, pp 217-226
- [3] R.L. Leung, F. Johnston, "Post irradiation Polymerization of Visible Light - activated Composite Resin", The university of Michigan, Vol 62, Issue: 3, 1983, pp 363 - 365
- [4] J.H. Lee, R.K. Prud'homme, I.A. Aksa, " Cure depth in photopolymerization: Experiments and theory " , Department of Chemical Engineering and Princeton Materials Institute, Princeton University, Vol 16, Issue: 12, 2001, pp 3536-3544
- [5] V.Canellidis, J.Giannatsis, V.Dedoussis, "Genetic Algorithm Based Multi-Objective Optimization of the Build Orientation in Stereolithography", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 45, Issue: 7, 2009, pp 714-730
- [6] J.Giannatsis, V.Dedoussis, "V. Decision support tool for selecting fabrication parameters in stereolithography", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol 33, Issue: 7, 2007, pp 706-718
- [7] T. Wohlers, "Additive Manufacturing Advances", Manufacturing Engineering, Vol 148, Issue: 4, 2012, pp 55–56
- [8] D.T. Pham ,C. Ji, "Design for stereolithography", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol 214, Issue: 5, 2000, pp 635-640

- [9] L.Murr, S.Gaytan, D.Ramirez, "Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies," *Journal of Materials Science & Technology*, Vol 1, Issue:1, 2012, pp 42-54
- [10] M.Yaszemski, W.Shanfeng, "Poly(propylenefumarate) Bone Tissue Engineering Scaffold Fabrication Using Stereolithography: Effects of Resin Formulations and Laser Parameters", *Biomacromolecules*, Vol 8, Issue:4, 2007, pp 1077-84
- [11] Y.Shoufeng, D.Zhaohui, C.K. Chua, "The Design of Scaffolds for Use in Tissue Engineering", *Tissue engineering*, Vol 8, Issue:1, 2004, pp 1-11
- [12] <http://essay.utwente.nl/67685/1/Paper%20Exzeed%20DLP%20Reinout%20Holt%20rup.pdf>
- [13] <http://panacea.med.uoa.gr/topic.aspx?id=908>
- [14] [http://physics.teiath.gr/physics/opto\\_lab/cosmetology/pdf/LASER%205.pdf](http://physics.teiath.gr/physics/opto_lab/cosmetology/pdf/LASER%205.pdf)
- [15] <https://www.3dhubs.com/talk/thread/does-resin-shrink>
- [16] <http://hackaday.com/2013/10/09/3d-printing-you-want-uv-resin/>
- [17] <http://bucktownpolymers.de/mixing-tutorials/standard-mix/>
- [18] [http://www.analytika.gr/index.asp?mod=eshop\\_item&ID=5&p=1795](http://www.analytika.gr/index.asp?mod=eshop_item&ID=5&p=1795)
- [19] <http://www.ilios3d.com/el/shop/shop-3d-printing/3d-printing-materials/industrial-resin-42-detail>
- [20] <https://www.rairarubiabooks.com/related-pdf-grey-photoreactive-resins-datasheet.html>
- [21] <https://all3dp.com/best-sla-3d-printers/>
- [22] [http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg\\_doc/develop/process/physics/b3500001.htm](http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process/physics/b3500001.htm)
- [23] [http://physics.teiath.gr/physics/opto\\_lab/pdf%20files/LASER%201.pdf](http://physics.teiath.gr/physics/opto_lab/pdf%20files/LASER%201.pdf)
- [24] [http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg\\_doc/develop/process/physics/b3500001.htm](http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/process/physics/b3500001.htm)
- [25] <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/1994/1994-25-Ullett.pdf>

## Σύνδεσμοι αγορών:

---

- Περισταλτική δοσομετρική αντλία περιστροφικού τύπου:

[http://www.ebay.com/itm/New-Peristaltic-Pump-Dosing-Pump-With-42-Stepper-Motor-Tubing-Hose-Pump/121855366000?\\_trksid=p2047675.c100005.m1851&\\_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D1%26asc%3D20131003132420%26meid%3D5f318e7c53f145b38a412da3fe3ed0d3%26pid%3D100005%26rk%3D1%26rkt%3D6%26sd%3D291558287032](http://www.ebay.com/itm/New-Peristaltic-Pump-Dosing-Pump-With-42-Stepper-Motor-Tubing-Hose-Pump/121855366000?_trksid=p2047675.c100005.m1851&_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D1%26asc%3D20131003132420%26meid%3D5f318e7c53f145b38a412da3fe3ed0d3%26pid%3D100005%26rk%3D1%26rkt%3D6%26sd%3D291558287032)

- Σωλήνας σιλικόνης

Εμπορία σωλήνων σιλικόνης - Σπύρου Πάτση 127 βοτανικός

- Driver 20-300 mW για λέιζερ 405nm:

<http://www.ebay.com/itm/405nm-20mW-300mW-Laser-Diode-Driver-3V-5-5V-1-PCS-/331514189615?hash=item4d2fc9172f%3Ag%3ATYYAAOxy2HFSaLe8%C3%8E%C2%9A%C3%8F%C2%8C%C3%8F%C2%83%C3%8F%C2%84%C3%8E%C2%BF%C3%8F%C2%82%3A%20%2414.50>

- Λέιζερ διόδου 405nm/20mW:

<http://www.ebay.com/itm/3in1-Dot-Line-Cross-405nm-20mW-Violet-Blue-Laser-Module-Laser-Diode-w-Adapter-/252142454281?hash=item3ab4dc8609:g:s3kAAOSwJkJWjNqA>

- Ακρυλική ρητίνη funtodo:

<http://www.ilios3d.com/el/shop/shop-3d-printing/3d-printing-materials/industrial-resin-42-detail>

- Θερμοστάτης 12V DC:

<https://www.cableworks.gr/ilektronika/arduino-and-microcontrollers/modules/12v-digital-led-thermostat-temperature-relay-control-module-xh-w1209/>

- Τροφοδοτικό σταθερής τάσης 12 V DC

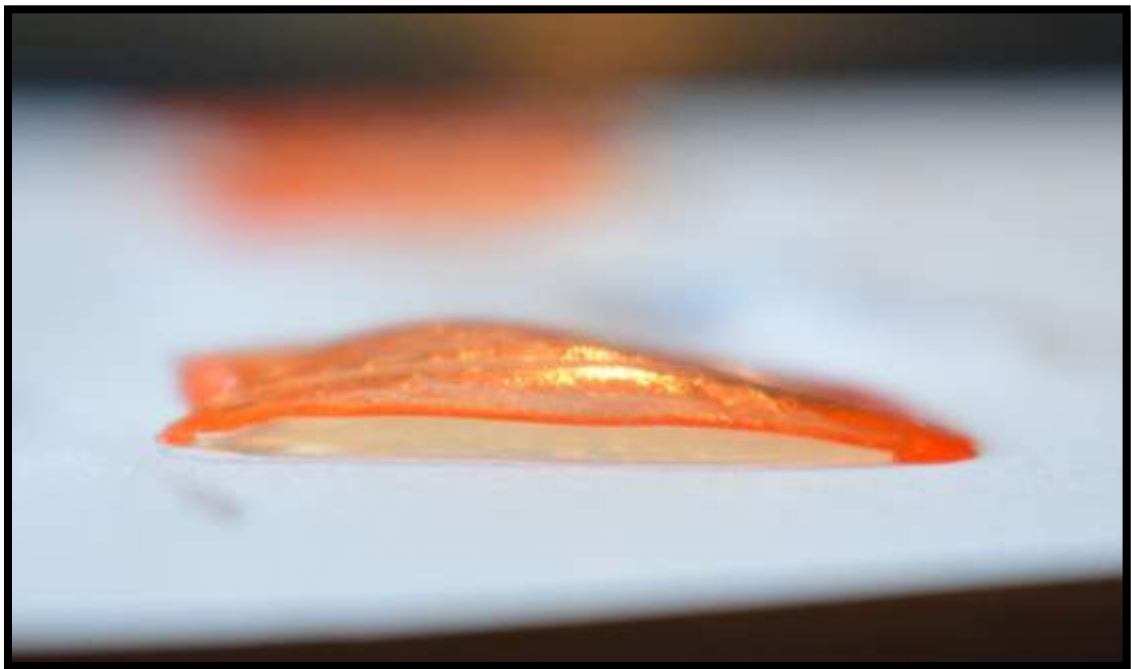
[http://www.ebay.co.uk/itm/MEAN-WELL-S-60-12-RQAUS1-S6012/391609425963?\\_trksid=p2047675.c100623.m-1&\\_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D2%26asc%3D20160323102634%26meid%3D2f10ee90e1554dedbfa5898d7b3ddb1e%26pid%3D100623%26rk%3D2%26rkt%3D4%26sd%3D391609432316](http://www.ebay.co.uk/itm/MEAN-WELL-S-60-12-RQAUS1-S6012/391609425963?_trksid=p2047675.c100623.m-1&_trkparms=aid%3D222007%26algo%3DSIC.MBE%26ao%3D2%26asc%3D20160323102634%26meid%3D2f10ee90e1554dedbfa5898d7b3ddb1e%26pid%3D100623%26rk%3D2%26rkt%3D4%26sd%3D391609432316)

## Παράρτημα εικόνων:

---



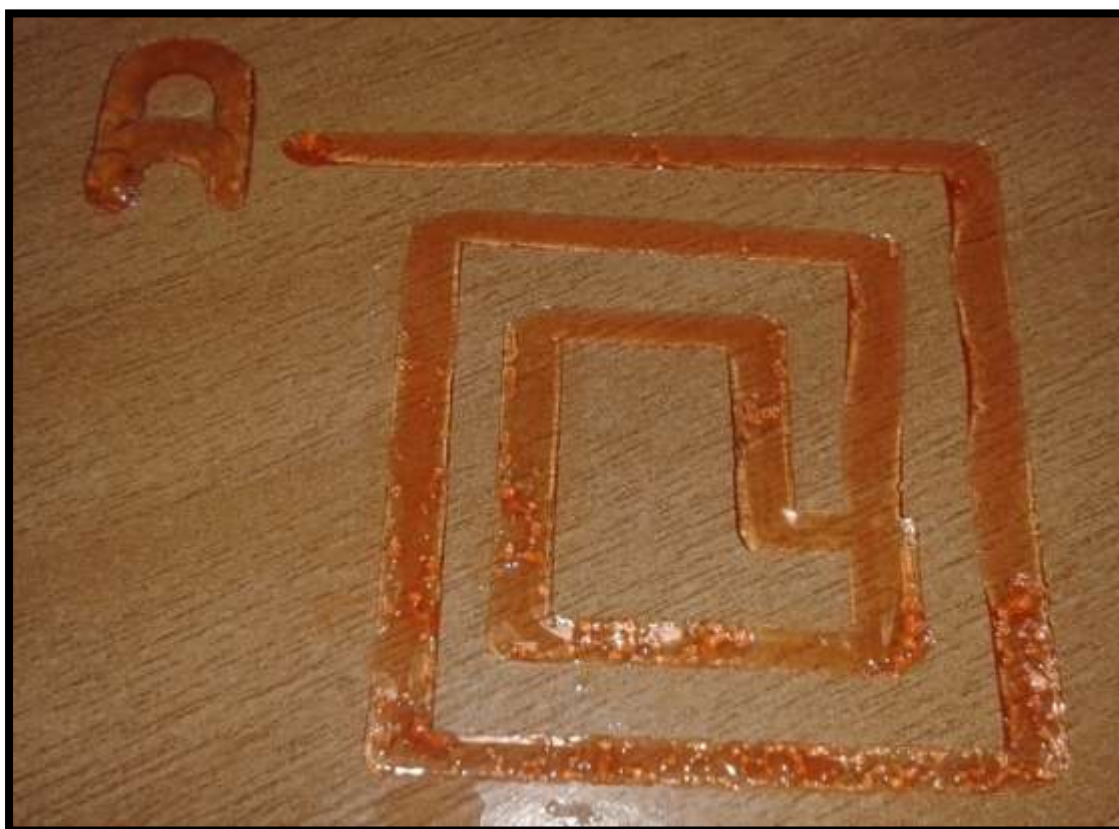
Εικόνα 74 Φαινόμενο κύρτωσης λόγω επαναλαμβανόμενων σαρώσεων



Εικόνα 75 Φαινόμενο κύρτωσης λόγω επαναλαμβανόμενων σαρώσεων



Εικόνα 76 Συλλογή τεμαχίων



Εικόνα 77 Συλλογή τεμαχίων

