



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**Διερεύνηση και βελτίωση λειτουργίας πρωτότυπης μηχανής
SLS/SLM**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΤΡΙΝΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

Επιβλέπων : Γ.-Χ. Βοσνιάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω κυρίως τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βοσνιάκο Γ.-Χ. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντας μου χώρο στο να αυτοσχεδιάσω με τις ιδέες μου σε ένα πρόβλημα λειτουργικότητας, αρχικώς αρκετά άγνωστο σε μένα, αλλά και για την καθοδήγηση του και για την εξαιρετική διάθεση συνεργασίας που επέδειξε σε όλα τα στάδια της διπλωματικής που ήταν απαραίτητο.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του τομέα, Κώστα Κερασιώτη και Νίκο Μελισσά, για την βοήθεια τους σε οποιοδήποτε τεχνικό κομμάτι της εργασίας τους χρειάστηκα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Σαράφογλου Χαρά από την σχολή των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και την καθηγήτρια κα. Βασιλείου Παναγιώτα από την σχολή των Χημικών Μηχανικών για την διευθέτηση ζητημάτων που είχαν να κάνουν με την χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου για την παρατήρηση δοκιμίων.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων λειτουργικότητας της πρωτότυπης μηχανής επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης-τήξης (SLS/SLM) του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, και η μελέτη και η υλοποίηση βελτιώσεων που θα οδηγήσουν πιο κοντά στην επιτυχή κατασκευή τεμαχίων με την κατεργασία SLS/SLM.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στις αρχές της τεχνολογίας των laser καθώς και στον χώρο της ταχείας και προσθετικής τεχνολογίας (Rapid prototyping και additive manufacturing) με επίκεντρο της τεχνική SLS/SLM. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας της μηχανής του εργαστηρίου μαζί με το προτεινόμενο εγχειρίδιο χρήσης της. Ακολούθως, παρατίθενται τα βασικά πειράματα λειτουργικότητας που έγιναν με την μηχανή με σκοπό να διερευνηθούν οι κατασκευαστικές της δυνατότητες, τόσο σε μία στρώση όσο και σε πολλαπλές, καθώς και για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην λειτουργία της. Με βάση τα παραπάνω, γίνεται μελέτη και υλοποίηση των βασικών βελτιώσεων και διορθώσεων που εντοπίστηκαν πάνω στην μηχανή, ενώ τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και οι μελλοντικές προτάσεις για την τελειοποίηση της λειτουργίας της μηχανής.

Συμπερασματικά, στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι συνολικές λειτουργικές δυνατότητες της μηχανής SLS/SLM του εργαστηρίου, η οποία μέχρι και την έναρξη της παρούσας διπλωματικής δεν είχε λειτουργήσει. Η παρούσα διπλωματική γράφτηκε με γνώμονα να αποτελεί ένα καλό εργαλείο τόσο για την πιο εύκολη χρήση της μηχανής μεταγενέστερα, όσο και για την πρακτική υλοποίηση βελτιώσεων πάνω στο σύστημα της σε μελλοντικό στάδιο, με βάση τις παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν λόγω της πολύωρης και εκτενέστατης χρήσης της· κάτι που επέτρεψε μια συνολική αποσφαλμάτωση της τόσο σε επίπεδο μηχανολογικό και ηλεκτρονικό όσο και σε επίπεδο προγραμματισμού της.

Λέξεις Κλειδιά: Ταχεία Κατασκευή, Προσθετική Κατασκευή, Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting.

Abstract

The scope of this thesis is the investigation of the functional capabilities of the prototype Selective Laser Sintering – Melting (SLS/SLM) machine of the Section of Manufacturing Technology at the School of Mechanical Engineering of NTUA, and the study and implementation of improvements on the machine's system, which will lead to the successful build of products with the SLS/SLM technique.

Initially, an introduction to laser, rapid prototyping and additive manufacturing technology is presented, focusing mainly on the SLS/SLM technique. Afterwards, the function of the prototype SLS/SLM machine is demonstrated in conjunction with its suggested and newly created manual. Subsequently, the basic functionality experiments on the machine, which were implemented for the investigation of the manufacturing capabilities of the system for the building of one-layered and multi-layered products, along with their results are displayed. Based on these experimental observations and results, the study and implementation of the main suggested improvements and corrections on the machine's system are carried out, while at the end, the thesis' conclusions and recommendations for future work are presented.

To sum up, this diploma thesis provides the total functional capabilities of the prototype SLS/SLM machine, which had never worked before, and it has been written in a way that will help the future use and further improvement of the machine. The observations and conclusions on the functionality of the machine are based on its extensive and multi-hour use, a fact that allowed the total debugging of the system, in hardware and software level.

Λέξεις Κλειδιά: Rapid Prototyping, Additive Manufacturing, Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ	8
1.1.1 <i>Συνεισφορά</i>	9
1.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΕΙΜΕΝΟΥ	10
2 LASER	11
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ LASER	11
2.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ LASER	12
2.2.1 <i>Η βασική διάταξη ενός Laser</i>	12
2.2.2 <i>Φαινόμενο εξαναγκασμένης εκπομπής</i>	13
2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ LASER	16
2.4 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER	18
2.5 ΑΣΦΑΛΕΙΑ LASER	19
2.6 ΥΛΙΑ M20	22
2.6.1 <i>Βασικά μέρη και χαρακτηριστικά συστήματος Υλια M20</i>	22
2.6.1.1 <i>Οπτική διάταξη Υλια M20</i>	22
2.6.1.2 <i>Κεφαλή laser Υλια M20</i>	24
2.6.1.3 <i>Χαρακτηριστικά δέσμης laser Υλια M20</i>	26
2.6.1.4 <i>Μονάδα ελέγχου Υλια M20</i>	26
2.6.2 <i>Λειτουργία και ρύθμιση laser Υλια M20</i>	28
2.6.2.1 <i>Παρουσίαση διεπαφής λογισμικού ελέγχου Υλια M20</i>	28
2.6.2.2 <i>Ρύθμιση ισχύος στο Υλια M20 (Extern mode)</i>	33
2.6.2.3 <i>Κανόνες ασφαλείας κατά την χρήση του laser Υλια M20</i>	35
3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SLS/SLM	37
3.1 RAPID PROTOTYPING ΚΑΙ ADDITIVE MANUFACTURING	37
3.1.1 <i>Rapid Prototyping</i>	37
3.1.2 <i>Additive Manufacturing</i>	38
3.1.3 <i>Η διαδικασία του Additive Manufacturing</i>	38
3.2 ΤΕΧΝΙΚΗ SLS/SLM	40
3.2.1 <i>Ορισμός SLS/SLM</i>	40
3.2.2 <i>Τα βασικά μέρη ενός συστήματος SLS/SLM</i>	40
3.2.3 <i>Φαινόμενα ένωσης κόκκων και laser-powder αλληλεπίδραση</i>	42
3.2.3.1 <i>Γενικά για το sintering</i>	42

3.2.3.2	Solid State Sintering	43
3.2.3.3	Liquid Phase Sintering	43
3.2.3.4	Μερική τήξη.....	44
3.2.3.5	Πλήρης τήξη.....	44
3.2.3.6	Χημικώς προκαλούμενη ένωση (Chemical induced binding)	44
3.2.3.7	Laser-powder αλληλεπίδραση	45
3.2.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής SLS/SLM	48
3.3	ΜΗΧΑΝΗ SLS/SLM ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ	49
3.3.1	Βασικά μέρη της μηχανής	49
3.3.2	Σύστημα ελέγχου της μηχανής.....	55
3.3.3	Λογισμικό ελέγχου της μηχανής.....	58
4	ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.....	64
4.1	ΒΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	64
4.2	ΕΠΙΛΥΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ (TROUBLESHOOTING)	77
5	ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	82
5.1	ΣΚΟΝΗ DURAFORM PA.....	82
5.2	ΒΑΣΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....	85
5.2.1	Πειράματα στατικής κεφαλής laser.....	86
5.2.1.1	Πειράματα Μεγέθους – Χρόνου	87
5.2.1.2	Πειράματα Θερμοκρασίας – Χρόνου.....	91
5.2.1.3	Πειράματα Θερμοκρασίας – Μεγέθους – Χρόνου	95
5.2.2	Πειράματα κινούμενης κεφαλής laser.....	101
5.2.2.1	Πειράματα Μεγέθους - Πρόωσης	101
5.2.2.2	Πειράματα αξιολόγησης αποτελέσματος.....	105
5.2.2.3	Πειράματα Μορφολογίας – Πρόωσης.....	135
6	ΜΕΛΕΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΠΑΡΑΛΕΙΨΕΩΝ	141
6.1	ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ	141
6.1.1	Μείωση της διαμέτρου της δέσμης laser.....	141
6.1.1.1	Εισαγωγή στους φακούς των laser.....	142
6.1.1.2	Επιλογή φακών με βάση το σύστημα laser.....	144
6.1.1.3	Φακός μείωσης διαμέτρου της δέσμης laser Ylia M20.....	147
6.1.2	Προθέρμανση σκόνης.....	148
6.1.2.1	Προθέρμανση στο πάνω και κάτω μέρος της σκόνης.....	149
6.1.2.2	Ομοιόμορφη προθέρμανση στο κάτω μέρος της σκόνης	151
6.1.3	Μέτρηση και ρύθμιση παραλληλίας μεταξύ roller – powder bed.....	153
6.2	ΠΑΡΑΛΕΙΨΕΙΣ.....	155
6.2.1	Απομάκρυνση υπολοίπου πούδρας από τον θάλαμο κατεργασίας.....	155
6.2.2	Απαγωγή αερίων	156

6.2.3	Προστασία έναντι οξείδωσης ή και ανάφλεξης	162
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	163
7.1	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	163
7.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	165
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	167
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ C++	169

1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν αντικείμενο την διερεύνηση της λειτουργικότητας και την βελτίωση της πρωτότυπης μηχανής επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης – τήξης με laser (SLS/SLM) του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η συγκεκριμένη μηχανή είναι αποτέλεσμα της διπλωματικής εργασίας του Α. Μπουρνιά-Βαρότση (2013 – σχεδιασμός) [1] και των μεταπτυχιακών εργασιών του Ανδρέα Μιχελή (2013 – control και programming) [2], Φωτεινού Ρογάρη (2016 – κατασκευή και control)[3], Επαμεινώνδα Κυριακόπουλου (2016 – κατασκευή και laser) [4] και Φοίβου Ψαρομμάτη (2016 – διαχείριση πούδρας) [5]. Μέχρι την έναρξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η μηχανή δεν είχε παράξει προϊόντα, είτε σαν αποτέλεσμα τήξης είτε πυροσυσσωμάτωσης, από οποιοδήποτε υλικό πούδρας και επομένως οι λειτουργικές της δυνατότητες ήταν εντελώς άγνωστες.

Με βάση τα παραπάνω, στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων λειτουργικότητας που πραγματοποιήθηκαν στην μηχανή χρησιμοποιώντας πούδρα πολυμερούς. Τα πειράματα αυτά μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Θερμοκρασίας – Χρόνου
2. Μέγεθος προϊόντος – Χρόνου
3. Μέγεθος προϊόντος – Θερμοκρασίας – Χρόνου
4. Μέγεθος προϊόντος – Ταχύτητα κίνησης κεφαλής laser
5. Μορφολογίας προϊόντος (για γεωμετρικές βασικών σχημάτων) – Ταχύτητα κίνησης κεφαλής laser
6. Αξιολόγησης φαινομένου πυροσυσσωμάτωσης – τήξης με δείγματα μίας και πολλαπλών στρώσεων

Τα παραπάνω πειράματα λειτουργικότητας πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στις κατασκευαστικές δυνατότητες της μηχανής, αλλά και την εύρεση τρόπων για την βελτίωσή της καθώς και τυχόν σφαλμάτων ή παραλείψεων που έπρεπε να διορθωθούν.

Τα κυριότερα ζητήματα βελτιώσεων που εντοπίστηκαν και πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

1. Μείωση της διαμέτρου της δέσμης laser που χρησιμοποιείται
2. Προθέρμανση σκόνης για καλύτερη ποιότητα προϊόντων
3. Μέτρηση και ρύθμιση της παραλληλίας μεταξύ roller – powder bed

Οι βασικές παραλείψεις που καταγράφηκαν και μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι οι εξής:

1. Απομάκρυνση υπολοίπου πούδρας από τον θάλαμο κατεργασίας της μηχανής
2. Απαγωγή αερίων – Σύστημα εξαερισμού μηχανής
3. Προστασία της περιοχής κατεργασίας έναντι οξειδωσης (κυρίως μεταλλικής πούδρας) ή και ανάφλεξης

Τέλος, παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο εγχειρίδιο για την συστηματική χρήση της μηχανής για την κατεργασία SLS/SLM μελλοντικά.

1.1.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Έγινε λεπτομερής ανάλυση λειτουργικότητας μιας μηχανής που δεν είχε δουλέψει ποτέ ολοκληρωμένα.
2. Δημιουργήθηκε ένας συστηματικός τρόπος λειτουργίας της μηχανής που δεν υπήρχε μέχρι πρότινος.
3. Πραγματοποιήθηκε μελέτη και υλοποίηση σε βελτιώσεις και παραλείψεις πάνω στο πραγματικό σύστημα της μηχανής στο βαθμό του εφικτού, οικονομικώς και χρονικώς.
4. Έγινε μια συνολική αποσφαλμάτωση της μηχανής (debugging): εντοπίστηκαν λάθη που αφορούσαν την σωστή λειτουργία της μηχανής, κάποια από τα οποία επιλύθηκαν στον βαθμό του εφικτού, ενώ άλλα παρουσιάζονται αναλυτικά με αποτέλεσμα η παρούσα διπλωματική εργασία να είναι ένας καλός οδηγός μελλοντικά για την τελειοποίηση της λειτουργίας της.

1.2 Οργάνωση κειμένου

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας των laser και παρουσιάζεται το σύστημα laser του εργαστηρίου (Ylia M20). Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα ταχείας και προσθετικής τεχνολογίας με επίκεντρο την τεχνική επιλεκτικής τήξης-πυροσυσσωμάτωσης και στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση της λειτουργίας της μηχανής του εργαστηρίου με σκοπό να βοηθήσει τον αναγνώστη να κατανοήσει μετέπειτα ζητήματα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το εγχειρίδιο χρήσης της μηχανής όπως δημιουργήθηκε από την εκτενέστατη χρήση της. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα βασικά πειράματα λειτουργικότητας που πραγματοποιήθηκαν. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η μελέτη και υλοποίηση των βασικών βελτιώσεων που είναι απαραίτητες, καθώς και η μελέτη και η αποκατάσταση βασικών παραλείψεων προηγούμενων εργασιών, στο σύστημα της μηχανής του εργαστηρίου. Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις για την περαιτέρω τελειοποίηση της μηχανής που δεν ήταν δυνατό να υλοποιηθούν κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία.

2

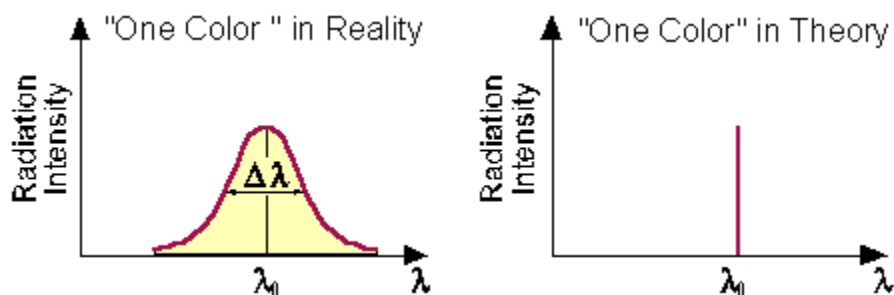
Laser

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αρχικά μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της τεχνολογίας των laser και στην συνέχεια θα παρουσιαστεί το σύστημα laser του εργαστηρίου, Υλια M20.

2.1 Εισαγωγή στα Laser

Ο όρος laser προέρχεται από το ακρωνύμιο του “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” και καλύπτει τις συσκευές που εκπέμπουν φως μέσω μιας διαδικασίας οπτικής ενίσχυσης βασισμένη στην εξαναγκασμένη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πολλές φορές ο όρος laser καλύπτει και την αντίστοιχη εκπεμπόμενη ακτινοβολία.

Τα laser παράγουν συμφασικό, μονοχρωματικό φως, το οποίο διαδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Με τον όρο μονοχρωματικό φως εννοούμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος. Στην πράξη βέβαια, το συγκεκριμένο αυτό μήκος κύματος είναι μια πολύ στενή περιοχή στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που περιλαμβάνει τιμές γύρω από το μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει.



Σχήμα 2.1: Ζώνη μήκους κύματος

Το πρώτο laser κατασκευάστηκε το 1960 από τον Theodore H. Maiman στα ερευνητικά εργαστήρια Hughes στην California των ΗΠΑ βασισμένο στις θεωρητικές εργασίες των

Charles Hard Townes και Arthur Leonard Schawlow και μέχρι σήμερα έχει βρει εφαρμογή σε ένα τεράστιο εύρος βιομηχανικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων πολλών επιστημών.

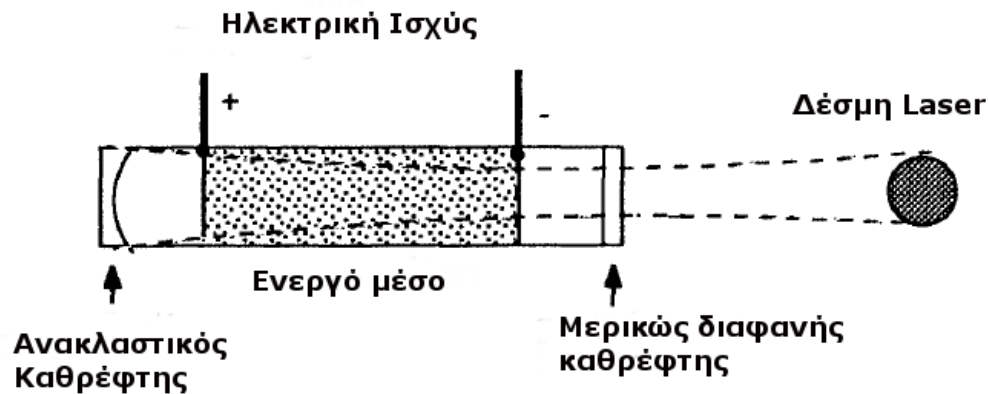
2.2 Αρχές λειτουργίας των Laser

2.2.1 Η βασική διάταξη ενός Laser

Μια απλή διάταξη laser αποτελείται από δύο καθρέφτες οι οποίοι είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Αυτοί οι καθρέφτες αποτελούν έναν οπτικό ταλαντωτή (optical oscillator), δηλαδή έναν θάλαμο μέσα στον οποίο το φως (με την έννοια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος και όχι του ορατού φάσματος) θα είχε ταλαντωτική συμπεριφορά από την μία πλευρά στην άλλη μεταξύ των καθρεφτών επ'άπειρον, αν δεν υπήρχε κάποιος μηχανισμός να το αποτρέψει, όπως η απορρόφηση. Μεταξύ των δύο καθρεφτών υπάρχει ένα ενεργό μέσο (gain medium), το οποίο είναι ικανό να ενισχύει τις ταλαντώσεις φωτός που αναφέρθηκαν, μέσω του μηχανισμού της εξαναγκασμένης εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (stimulated emission of radiation). Από εκεί προέρχεται και ο όρος laser που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο ένας από τους δύο καθρέφτες του οπτικού ταλαντωτή είναι μερικώς διαφανής/διαπερατός έτσι ώστε να επιτρέπει στην ταλαντωτική ισχύ που συσσωρεύεται μέσα στον θάλαμο να μετατραπεί σε λειτουργική δέσμη. Ο άλλος καθρέφτης είναι, όσο το δυνατόν γίνεται, ανακλαστικός, σε τάξη μεγέθους 99.999%. Αυτός ο καθρέφτης είναι συνήθως καμπυλωμένος για να μειωθούν οι απώλειες περίθλασης και διάθλασης που μπορούν να επηρεάσουν την συσσωρευμένη ταλαντωτική ισχύ του φωτός του θαλάμου, καθώς επίσης και για την διευκόλυνση της ευθυγράμμισης των δύο καθρεφτών, το οποίο θα ήταν πιο δύσκολο αν οι δύο καθρέφτες ήταν εντελώς επίπεδοι..

Πέρα από τον οπτικό ταλαντωτή, υπάρχει και ένα άλλο σύστημα, το οποίο ενισχύει το ενεργό μέσο που περιγράφηκε έτσι ώστε να του προσδίδει την ενέργεια που χρειάζεται για να επενεργεί πάνω στο φως. Αυτή η ενίσχυση ονομάζεται άντληση (pump of the active medium) και συνήθως πραγματοποιείται είτε ηλεκτρικά μέσω DC ή RF ισχύος, είτε χημικά, μέσω χημικών αντιδράσεων, είτε μέσω μια εστιασμένης πηγής παλμικού φωτός. Ο τρόπος άντλησης που επιλέγεται διαχωρίζει τον τύπο laser που παίρνουμε και εξαρτάται από το ενεργό μέσο που έχουμε επιλέξει.

Ο γεωμετρικός σχεδιασμός του οπτικού ταλαντωτή, όπως το μήκος του, η ακτίνα καμπύλωσης του ανακλαστικού καθρέφτη, το ποσοστό διαπέρασης του δεύτερου καθρέφτη και ο τύπος του ενεργού μέσου που θα επιλέξουμε είναι κομβικά για το αποτέλεσμα της δέσμης (ενεργειακά) που θέλουμε να επιτύχουμε με την συσκευή μας [6].



Σχήμα 2.2: Οπτικός ταλαντωτής και ενεργό μέσο με άντληση μέσω ηλεκτρικής ισχύος. Μεταξύ των δύο καθρεπτών ορίζεται η κοιλότητα του laser.

2.2.2 Φαινόμενο εξαναγκασμένης εκπομπής

Το γεγονός πως η παραπάνω διάταξη λειτουργεί και παίρνουμε μια δέσμη laser οφείλεται στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής. Το φαινόμενο αυτό προβλέφθηκε από τον Einstein το 1917.

Ας εστιάσουμε την ανάλυση μας στο μόριο του διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο μπορεί να βρεθεί σε διάφορες ενεργειακές καταστάσεις αναλόγως αν περιστρέφεται ή πάλλεται. Αυτές οι ενεργειακές καταστάσεις είναι κβαντισμένες, δηλαδή μπορούν να υπάρχουν σε συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες ή να μην υπάρχουν καθόλου και πάνω σε αυτή την ιδέα βασίζεται η ύπαρξη του ενεργού μέσου που δημιουργεί την ταλαντωτική ισχύ. Το αέριο μείγμα σε ένα laser, που το ενεργό μέσο του αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα, υπόκειται σε μια ηλεκτρική εκκένωση, η οποία προκαλεί το αέριο χαμηλής πίεσης (46 - 66 mbar) να σχηματίσει ένα πλάσμα, δηλαδή ένα αέριο μείγμα με αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και με υψηλά φορτισμένα θετικά ιόντα. Μέσα στο πλάσμα, τα μόρια καταλαμβάνουν διάφορες ενεργειακές καταστάσεις όπως περιγράφεται από την κατανομή Boltzmann:

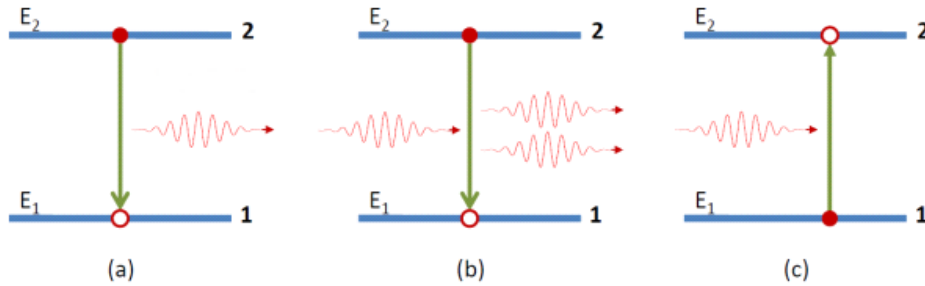
$$n_i = C \cdot e^{-E/kT}$$

Όπου:

- n_i : ο αριθμός των μορίων στην ενεργειακή κατάσταση i
- E : η ενέργεια στην ενεργειακή κατάσταση i
- k : η σταθερά του Boltzmann
- T : η απόλυτη θερμοκρασία
- C : σταθερά

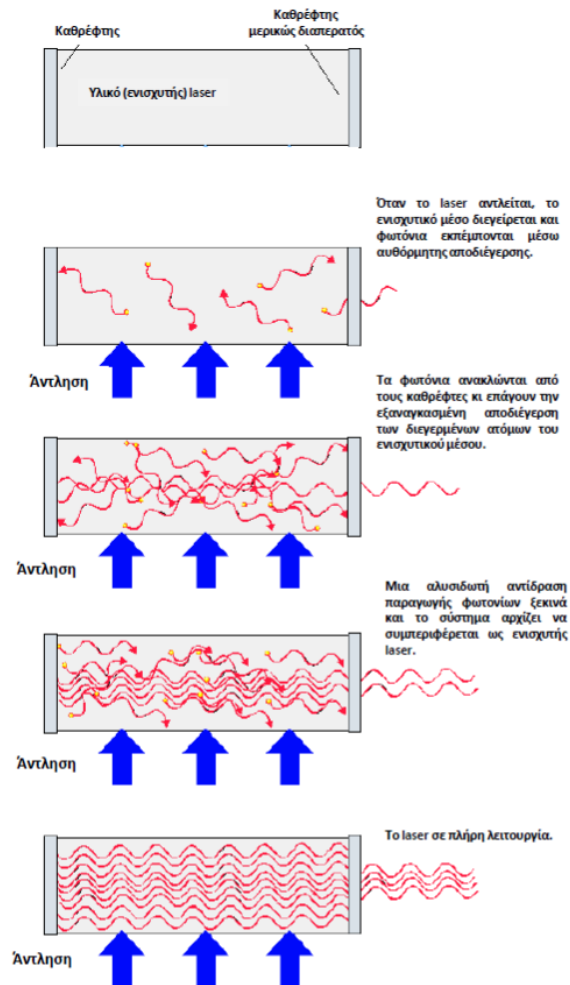
Με βάση τα παραπάνω, περιμένουμε πως κάποια μόρια (ή αντίστοιχα άτομα, αναλόγως το τι ενεργό μέσο χρησιμοποιούμε) θα βρίσκονται σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις που περιγράφονται από μια ασύμμετρη ταλαντωτική συμπεριφορά. Τα μόρια αυτά δύναται να χάσουν, με στοχαστικό τρόπο, μέρος της ενέργειας τους από τυχόν κρούσεις με τα τοιχώματα της κοιλότητας του οπτικού ταλαντωτή (μη-ακτινοβολική ενεργειακή μετάβαση) ή από αυθόρμητες εκπομπές (ακτινοβολική ενεργειακή μετάβαση). Κατά την αυθόρμητη εκπομπή έχουμε μετάπτωση του μορίου σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, με αποτέλεσμα να αποκτά μια συμμετρική ταλαντωτική συμπεριφορά πλέον, ενώ ταυτόχρονα ένα φωτόνιο κάποιου συγκεκριμένου μήκους κύματος εκπέμπεται ($\lambda = 10.6\mu\text{m}$ για ενεργό μέσο διοξειδίου του άνθρακα) και ταξιδεύει σε μια εντελώς τυχαία κατεύθυνση. Ένα από αυτά τα εκπεμπόμενα φωτόνια, λόγω της τυχειότητας της κατεύθυνσης της κίνησής του δύναται να ταξιδέψει πάνω στον οπτικό άξονα της κοιλότητας του οπτικού ταλαντωτή με αποτέλεσμα να αρχίσει να ταλαντώνεται μεταξύ των δύο καθρεφτών. Κατά την διάρκεια αυτού του φαινομένου, αυτό το φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί από τα τριγύρω μόρια που παρουσιάζουν συμμετρική ταλαντωτική συμπεριφορά (χαμηλής ενεργειακής στάθμης) ή μπορεί να περιθλαστεί εκτός διάταξης ή ακόμη και να συγκρουστεί με μόρια που παρουσιάζουν ασύμμετρη ταλαντωτική συμπεριφορά (υψηλής ενεργειακής στάθμης). Στην τελευταία περίπτωση, θα έχουμε ενεργειακή αποδιέγερση αυτών των μορίων, τα οποία πέφτοντας σε μια χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, θα χάσουν ένα φωτόνιο ίδιου μήκους κύματος, το οποίο μάλιστα θα ταξιδέψει στην ίδια κατεύθυνση με το προηγούμενο (που προκάλεσε την σύγκρουση) και με την ίδια ακριβώς φάση. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **εξαγκανασμένη εκπομπή** [7]. Τα δύο πλέον φωτόνια που ταξιδεύουν στην ίδια κατεύθυνση και με την ίδια φάση, κινούνται πλέον μέσα στην κοιλότητα του οπτικού ταλαντωτή, παράγοντας περισσότερα φωτόνια από την κρούση τους με άλλα παρόμοια διεγερμένα μόρια. Όλο αυτό το φαινόμενο συνεχίζεται με αποτέλεσμα όλο και περισσότερη ταλαντωτική ισχύς φωτονίων να συσσωρεύεται μέσα στον θάλαμο και έτσι πολύ γρήγορα οι διάφοροι εμπλεκόμενοι μηχανισμοί (άντληση, ενίσχυση, απώλειες κτλ.) έρχονται σε ισορροπία και το laser τίθεται στην πλήρη λειτουργία του. Αποτέλεσμα του όλου φαινομένου είναι η εξαναγκασμένη ακτινοβολία φωτονίων συγκεκριμένου μήκους κύματος από τον οπτικό ταλαντωτή, τα οποία αποτελούν και την δέσμη laser προς χρήση [6]. Τα φαινόμενα που περιγράφηκαν είναι όλα στοχαστικά και περιγράφονται μαθηματικώς από την στατιστική Maxwell-Boltzmann, η οποία ξεφεύγει από τα πλαίσια του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τα τρία κύρια ενεργειακά φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στην κοιλότητα παρουσιάζονται στα παρακάτω ενεργειακά διαγράμματα:



Σχήμα 2.3: (a) Αυθόρμητη εκπομπή, (b) Εξαναγκασμένη εκπομπή, (c) Απορρόφηση

Όπως είναι φανερό τα φωτόνια της αυθόρμητης εκπομπής ουσιαστικά ξεκινούν την διαδικασία της ενίσχυσης, δηλαδή του laser, πάντα συμβαδίζοντας με την συνθήκη κατωφλίου (threshold condition) μέσα στον οπτικό ταλαντωτή που λέει ότι η ενίσχυση του ενεργού μέσου πρέπει να αντισταθμίζει τις απώλειες της κοιλότητας (απορρόφηση φωτονίων, περίθλαση φωτονίων). Σε διαφορετική περίπτωση δεν έχουμε ενίσχυση της ταλαντωτικής ενέργειας των φωτονίων μέσα στον θάλαμο και η διάταξη πλέον ονομάζεται απορροφητής. Η λειτουργία του laser παρουσιάζεται παραστατικά στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 2.4: Παραστατική λειτουργία laser

2.3 Τεχνολογική κατάταξη των Laser

Τα συστήματα laser μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους, τη «φύση» του οπτικού ενεργού μέσου και το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας [8], [9].

1. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας:

- **Continuous Wave Lasers – CW (laser συνεχούς λειτουργίας):** Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με σταθερό ρυθμό ισχύος της δέσμης. Στα περισσότερα laser μεγάλης ισχύος υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού της, ενώ στα laser αερίων μικρής ισχύος (He – Ne) η ισχύς εξόδου είναι σταθερή εκ κατασκευής και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.
- **Single Pulsed Lasers (laser μονού παλμού):** Τα laser συνήθως έχουν διάρκεια παλμού από μερικές εκατοντάδες microseconds ως μερικά milliseconds. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας αναφέρεται και ως κανονικός τρόπος, ή μακρύς παλμός
- **Single Pulsed Q-Switched (laser μετατροπής Q):** Είναι εκείνα τα συστήματα laser στα οποία μία καθυστέρηση εκτός της κοιλότητας επιτρέπει στο ενεργό μέσο να αποθηκεύσει το μέγιστο της ενέργειας. Έπειτα, από συνθήκες βέλτιστου κέρδους (gain), η εκπομπή συμβαίνει σε μονό παλμό της τάξης του 10^{-8} s. Η ισχύς των παλμών αυτών συνήθως φτάνει σε επίπεδα μεταξύ 10^6 και 10^8 W.
- **Παλμικά lasers:** Είναι τα συστήματα laser που λειτουργούν όπως τα μονού παλμού, με επανάληψη της διαδικασίας με σταθερό ή και μεταβλητό ρυθμό.
- **Mode Locked lasers (laser εγκλειδωσης ρυθμού):** Αυτά λειτουργούν ως αποτέλεσμα των συντονισμένων ρυθμών της οπτικής κοιλότητας, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης δέσμης. Όταν οι φάσεις των διαφορετικής συχνότητας ρυθμών συγχρονίζονται, τότε οι ρυθμοί συμβάλλουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα στενούς επαναλαμβανόμενους παλμούς. Τα laser αυτής της κατηγορίας παράγουν σειρές από παλμούς με διάρκειες από pico- (10^{-12}) ως femto- (10^{-15}) seconds.

2. Ανάλογα με το ενεργό μέσο:

- **Solid State Laser (laser στερεάς κατάστασης):** Είναι τα laser που χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο είτε ένα μονωτικό κρύσταλλο, ή γυαλί. Το υλικό που παράγει την ακτινοβολία laser, συνήθως ιόντα Cr^{3+} , Nd^{3+} , ή Ho^{3+} , είναι διασκορπισμένο σε κρυσταλλικό πλέγμα.

- **Semiconductor Laser (laser ημιαγωγών ή διοδικά):** Ημιαγωγίμες διατάξεις, οι οποίες αποτελούνται από δύο στρώματα ημιαγωγίμου υλικού σε επαφή. Τα laser αυτού του τύπου είναι πολύ μικρών διαστάσεων και ισχύος και μπορούν να τοποθετηθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.
 - **Gas Laser (laser αερίων):** Χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο ένα αέριο ή μείγμα αερίων μέσα σε σωλήνα.
 - **Excimer Laser (laser διεγερμένων διμερών):** Μοριακά laser που εμπλέκουν μεταπτώσεις μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρονικών καταστάσεων. (Υποκατηγορία των laser αερίων).
 - **Chemical Laser (χημικά laser):** Είναι τα laser εκείνα στα οποία η αναστροφή πληθυσμών παράγεται άμεσα μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Συνήθως τα χημικά laser περιλαμβάνουν στο μηχανισμό άντλησης μία αντίδραση μεταξύ αέριων στοιχείων ή ενώσεων. (Υποκατηγορία των Gas lasers).
 - **Dye Laser (laser χρωστικών):** Είναι εκείνα που το ενεργό μέσο αποτελείται από διαλύματα σύνθετων οργανικών χρωστικών σε υγρά όπως η αιθυλική και η μεθυλική αλκοόλη ή το νερό. Κατάλληλη επιλογή της χρωστικής και της συγκέντρωσης της επιτρέπει την παραγωγή δέσμης laser σε μεγάλη περιοχή μηκών κύματος, μέσα και γύρω από το ορατό φάσμα.
 - **Laser Χρωματικών Κέντρων:** Χρωματικά κέντρα σε κρυστάλλους αλογονούχων αλκαλίων, χρησιμοποιούνται ως αποδοτικά, οπτικά αντλούμενα, laser με πλατιά επιλεκτικότητα στο κοντινό υπέρυθρο.
 - **Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων:** Τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα διαμέσου ενός περιοδικού μαγνητικού πεδίου και η διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής προέρχεται από την αλληλεπίδραση του H/M πεδίου της δέσμης laser με τα ηλεκτρόνια. (κυρίως σε πειραματικό στάδιο).
 - **Fiber Laser (laser ινών):** Είναι τα συστήματα laser που έχουν σαν ενεργό μέσο ενίσχυσης μια οπτική ίνα εμπλουτισμένη με κάποια σπάνια γαία, όπως έρβιο, υτέrbιο, νεοδύμιο, δυσπρόσιο, πρασεοδύμιο, θούλιο και όλμιο. Αυτού του είδους τα συστήματα σχετίζονται με τους οπτικούς ενισχυτές ινών, οι οποίοι παρέχουν ενίσχυση φωτός αλληλοεπιδρώντας με τα ενεργειακά διεγερμένα ιόντα των σπάνιων γαιών. Παρέχουν υψηλή ενέργεια σε παλμικά laser με καλή ποιότητα δέσμης, κάτι που τα κάνει κατάλληλα για χρήση σε κατεργασίες υλικών όπως κοπή, χάραξη κ.ά., διατηρώντας υψηλή ταχύτητα κατεργασίας. (Υποκατηγορία των Solid State lasers).
3. Ανάλογα με την περιοχή μήκους κύματος εκπομπής
- UV (Υπεριώδες): 0.200 – 0.400 μm

- VIS (Ορατό): 0.400 – 0.700 μm
- NIR (Εγγύς Υπέρυθρο): 0.700 – 1.400 μm
- FIR (Μακρινό Υπέρυθρο): 1.400-30.0 μm

2.4 Κίνδυνοι προερχόμενοι από την ακτινοβολία laser

Οι κίνδυνοι από τα laser μπορούν να χωριστούν γενικά σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που προέρχονται από την ακτινοβολία και σε αυτούς που δεν προέρχονται από αυτήν, όπως είναι οι ηλεκτρικοί και χημικοί κίνδυνοι. Εμείς εδώ θα ασχοληθούμε μόνο με την πρώτη κατηγορία. Θα αναφερθούμε στην συνέχεια σε:

- a) Βλάβες στα μάτια
- b) Βλάβες στο δέρμα
- c) Όρια έκθεσης

Τα laser που χρησιμοποιούνται λανθασμένα μπορεί ενδεχομένως να γίνουν επικίνδυνα. Οι επιπτώσεις ποικίλουν από τα ελαφρά δερματικά εγκαύματα μέχρι μη αναστρέψιμους τραυματισμούς στο δέρμα και στα μάτια. Η βιολογική βλάβη που προκαλείται από τα laser παράγεται μέσα από φωτοθερμικές, φωτομηχανικές και φωτοχημικές διαδικασίες.

Οι θερμικές επιπτώσεις οφείλονται στην αύξηση της θερμοκρασίας που ακολουθεί την απορρόφηση της ενέργειας του laser. Η σοβαρότητα της βλάβης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας έκθεσης στην ακτινοβολία, του μήκους κύματος της δέσμης, της ενέργειάς της και την περιοχή και το είδος του ιστού που εκτίθεται στη δέσμη.

Οι ακουστικές – μηχανικές επιπτώσεις απορρέουν από ένα έντονο μηχανικό κύμα το οποίο διερχόμενο μέσα από τον ιστό, τελικά τον καταστρέφει.

Η έκθεση στην δέσμη μπορεί επίσης, να προκαλέσει φωτοχημικές επιδράσεις όταν τα φωτόνια αλληλοεπιδρούν με κύτταρα του ιστού. Μια αλλαγή στην χημεία των κυττάρων μπορεί να καταλήξει σε καταστροφή ή αλλαγή του ιστού. Οι φωτοχημικές επιπτώσεις εξαρτώνται κυρίως από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στον πίνακα του σχήματος 2.5 συνοψίζονται οι πιθανές βιολογικές επιπτώσεις της έκθεσης των ματιών και του δέρματος σε διάφορα μήκη κύματος.

Πρέπει να δοθεί πολύ προσοχή και στο εξής: η έκθεση στη δέσμη ενός laser δεν περιορίζεται μόνο στην απευθείας έκθεση. Ιδιαίτερα για laser με υψηλή ισχύ, η έκθεση σε δέσμες προερχόμενες από ανάκλαση μπορεί αλλά να είναι τόσο επιζήμια όσο και η απευθείας έκθεση [8].

Φασματική περιοχή ακτινοβολίας	Φωτοβιολογική δράση Οφθαλμός	Φωτοβιολογική δράση Δέρμα
Υπεριώδες C (200 nm - 280 nm)	Φωτο-κερατίτιδα	Ερύθημα (sunburn) Καρκίνος δέρματος Επιταχυνόμενη γήρανση του δέρματος
Υπεριώδες B (280 nm - 315 nm)	Φωτο-κερατίτιδα	Αυξημένο «μαύρισμα»
Υπεριώδες A (315 nm - 400 nm)	Φωτοχημικός καταρράκτης	Μαύρισμα Έγκαυμα δέρματος
Ορατό (400 nm - 780 nm)	Φωτοχημική και θερμική βλάβη του αμφιβληστροειδούς	Μαύρισμα Αντιδράσεις φωτοευαισθησίας Έγκαυμα δέρματος
Υπέρυθρο A (780 nm - 1400 nm)	Καταρράκτης και έγκαυμα αμφιβληστροειδούς	Έγκαυμα δέρματος
Υπέρυθρο B (1,4 μm – 3,0 μm)	Έγκαυμα κερατοειδούς, αναλαμπές υδατοειδούς, καταράκτης	Έγκαυμα δέρματος
Υπέρυθρο C (3,0 μm - 1000 μm)	Έγκαυμα κερατοειδούς (αποκλειστικά)	Έγκαυμα δέρματος

Σχήμα 2.5: Βιολογικές επιπτώσεις ακτινοβολίας laser σε μάτια και δέρμα.

2.5 Ασφάλεια Laser

Με σκοπό να εξασφαλιστεί μια κοινή βάση για τις απαιτήσεις και τα πρότυπα ασφαλείας, έχει γίνει προσπάθεια ώστε όλα τα laser (ιατρικά, βιομηχανικά κ.ά.) να μπορούν να ταξινομηθούν σε κάποια ορισμένη κατηγορία ή κλάση ή τάξη. Για τα ταξινομηθεί ένα laser πρέπει να είναι γνωστά: το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει, η ισχύς του και η διάρκεια της έκθεσης στην ακτινοβολία. Σημασία έχει το μέγιστο επίπεδο ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει το laser κατά την διάρκεια χρήσης του κάτω από την πλήρη ικανότητά του και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μετά την κατασκευή του. Κάθε τάξη έχει ένα σύνολο από μέτρα ασφαλούς χρήσης, τα οποία οι κατασκευαστές και οι χρήστες πρέπει να τηρούν αυστηρά. Σε κάθε laser ή αντίστοιχο σύστημα πρέπει να επισυνάπτονται σχετικές ετικέτες που αναφέρουν την τάξη και κάποια στοιχεία επικινδυνότητας για την συγκεκριμένη συσκευή. Η κατανόηση της διαδικασίας ταξινόμησης των laser αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση σχετικά με την ασφάλειά τους. Αυτές οι τάξεις αναφέρονται στα διάφορα πρότυπα ασφαλείας των διαφόρων χωρών (π.χ. τα πρότυπα ANSI Z136.1, το IEC κ.ά.). Η ταξινόμηση των βιομηχανικών laser παρέχεται επίσης από τον κατασκευαστή.

Παρακάτω παρουσιάζεται εκτενέστατα η κάθε μία από τις τάξεις στις οποίες ταξινομούνται οι πηγές laser:

- **Class 1 (Τάξη I)**

Η τάξη I περιλαμβάνει συσκευές που δεν εκπέμπουν επιζήμια για τους οφθαλμούς επίπεδα ακτινοβολίας και, επομένως, τα laser που ανήκουν σε αυτήν εξαιρούνται πρακτικά από μέτρα ασφαλείας. Παρόλα αυτά, καλό είναι να αποφεύγεται η άσκοπη έκθεση σε αυτά, αν και σε γενικές γραμμές είναι ασφαλή κάτω από λογική και προβλέψιμη χρήση. Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο έκθεσης σε δέσμη της τάξης αυτής είναι 0.98 mW. Εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα laser αυτής της τάξης είναι τα compact disc (CD) player, οι εκτυπωτές laser και τα CD ROM players.

- **Class 1M (Τάξη 1M) – IEC μόνο**

Στην τάξη αυτή ανήκουν προϊόντα laser τα οποία είναι ασφαλή για το γυμνό μάτι χωρίς προσθήκη οπτικών στοιχείων. Μια ετικέτα πάνω τους θα έλεγε χαρακτηριστικά «μην κοιτάζετε απευθείας μέσα από μεγεθυντικούς φακούς ή μικροσκόπια» για μια αποκλίνουσα δέσμη και «μην κοιτάζετε απευθείας μέσα από κύαλια ή μικροσκόπια» για ευθυγραμμισμένη δέσμη. Εκπέμπουν σε μήκος κύματος 302nm – 4μm.

- **Class 2 (Τάξη II)**

Τα laser της δεύτερης τάξης εκπέμπουν ακτινοβολία στην ορατή περιοχή και έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν βλάβη στα μάτια μέσα από χρόνια έκθεση. Γενικά, το ανθρώπινο μάτι ανοιγοκλείνει μέσα σε 0.25s όταν εκτεθεί σε τέτοιου είδους laser. Αυτή η αντίδραση παρέχει ικανοποιητική προστασία. Ωστόσο, είναι δυνατό, να ξεπεραστεί αυτό το ανοιγοκλείσιμο των βλεφάρων και να κοιτάξει κανείς στην ακτινοβολία από το laser για χρονικό διάστημα αρκετό για να προκαλέσει βλάβη στο μάτι. Η μέγιστη εξερχόμενη ισχύς είναι 1 mW και το μήκος κύματος 400-700 nm. Εφαρμογές που συναντά κανείς τέτοια laser είναι σε ευθυγραμμίσεις και στους σαρωτές των ταμείων των υπερκαταστημάτων, ενώ αντιπροσωπευτικό είναι το laser He-Ne που χρησιμοποιείται σχεδόν παντού. Δεν απαιτούνται ιδιαίτερες προφυλάξεις για τυχαία έκθεση, εκτός από την οφειλόμενη προσοχή στη σκόπευση της δέσμης και στο να μην τη δει κανείς απευθείας.

- **Class 2A (Τάξη IIa) – Δεν χρησιμοποιείται από το πρότυπο ANSI Z136**

Τα laser αυτής της τάξης προορίζονται για ειδικούς σκοπούς και δεν κρίνεται σκόπιμη η παρατεταμένη επαφή με τα μάτια. Η ισχύς τους είναι μικρότερη από 1 mW. Προκαλούν βλάβη σε επαφή με τα μάτια για 1s και οι περισσότεροι αναγνώστες bar-code ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

- **Class 2M (Τάξη 2M) – IEC μόνο**

Η τάξη αυτή περιορίζεται σε laser με μήκος κύματος 302nm-4μm τα οποία είναι ασφαλή στην επαφή με το γυμνό μάτι για 0.25s. Δεν είναι ασφαλή κάτω από ορισμένες συνθήκες όρασης με οπτικά βοηθήματα.

- **Class 3A (Τάξη IIIα)**

Στην τάξη αυτή, τα laser είναι γενικά ακίνδυνα όταν τα κοιτάζουμε στιγμιαία με γυμνό μάτι, αλλά αποτελούν μεγάλο κίνδυνο για τα μάτια όταν κοιταχθούν μέσα από οπτικά όργανα όπως μικροσκόπια και κυάλια. Ισχύουν περίπου τα ίδια με της τάξης II, αλλά τα laser της τάξης IIIα είναι συνεχούς λειτουργίας, έχουν μέγιστη ισχύ εξόδου 5 mW και ακτινοβολία μικρότερη από 25 Wm^{-2} , ενώ εκπέμπουν και αυτά στο ορατό. Πάνω από τα 4 μm συμπεριφέρονται όπως η τάξη I και χρησιμοποιούνται κυρίως σε χειρουργικές διατάξεις και σε στυλοδείκτες (pointer pens).

- **Class 3B (Τάξη IIIβ)**

Η ακτινοβολία των laser της τάξης IIIβ μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό σε απευθείας επαφή με το ανθρώπινο μάτι ή από κατοπτρική ανάκλαση. Αντίθετα, η επαφή με διάχυτα ανακλώμενη σε αντικείμενα ακτινοβολία είναι γενικά ασφαλής, υπό την προϋπόθεση η απόσταση του ματιού από την ανακλώμενη επιφάνεια να είναι μεγαλύτερη από 13cm και η διάρκεια της έκθεσης να είναι μικρότερη από 10s. Τα laser αυτά δίνουν ισχύ 0.5W και μπορεί να εκπέμπουν στο ορατό και μη-ορατό (μήκη κύματος μεγαλύτερα από 315nm). Παράδειγμα αποτελούν τα laser He-Ne που χρησιμοποιούνται σε ορισμένα ερευνητικά εργαστήρια, καθώς και ορισμένα laser ημιαγωγών για εφαρμογές στην φυσιοθεραπεία.

- **Class 4 (Τάξη IV)**

Η τάξη αυτή συμπεριλαμβάνει όλα τα laser με υψηλή ισχύ, δηλαδή με ισχύ πάνω από 500 mW για laser συνεχής λειτουργίας και για όλα τα παλμικά laser με ακτινοβολία ενέργειας άνω των $10\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ [10]. Τα laser της τάξης IV θέτουν κινδύνους για τραυματισμούς στα μάτια και στο δέρμα καθώς και κίνδυνο ανάφλεξης εύφλεκτων υλικών. Το κοίταγμα της δέσμης, ακόμη και ύστερα από διάχυτη ανάκλαση, μπορεί να προκαλέσει σοβαρό τραυματισμό στα μάτια και στο δέρμα. Όλα τα μέτρα ασφαλείας για αυτή την τάξη πρέπει να τηρούνται αυστηρά.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε laser, ανάλογα με την τάξη που ανήκει, πρέπει να σημαίνεται με κατάλληλες ενδείξεις και να συνοδεύεται, αν χρειάζεται, από ένα διάφραγμα ή εξασθενητή δέσμης που θα εξασφαλίζει επίπεδα εξόδου σύμφωνα με τα MPE (maximum permissible exposure). Συνήθως κάθε συσκευή φέρει πάνω της μια ετικέτα στην οποία έχουν καταγραφεί από τον κατασκευαστή κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία. Αν το μέγεθος της συσκευής δεν βοηθάει στην τοποθέτηση της ετικέτας, αυτή συμπεριλαμβάνεται στη συσκευασία. Το χρώμα της είναι μαύρο πάνω σε κίτρινο φόντο. Για τις τάξεις I και IM αναφέρονται η ακτινοβολία που εκπέμπεται και πληροφορίες για τα πρότυπα. Στις τάξεις από II και πάνω αναφέρονται η μέγιστη ισχύς εξόδου, η διάρκεια του παλμού και το εκπεμπόμενο μήκος κύματος. Το άνοιγμα του laser αναφέρεται στις τάξεις IIIβ και IV [8], [9], [10].

2.6 Ylia M20

Το σύστημα laser που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα με την μηχανή SLS/SLM είναι το Ylia M20 της Quantel. Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε στα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος laser, τους τρόπους προστασίας από την ακτινοβολία της δέσμης και τις ρυθμίσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στο σύστημα. Για το τελευταίο, θα βασιστούμε στο ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου του συστήματος που υλοποιήθηκε από τον Επαμεινώνδα Κυριακόπουλο [4].

2.6.1 Βασικά μέρη και χαρακτηριστικά συστήματος Ylia M20

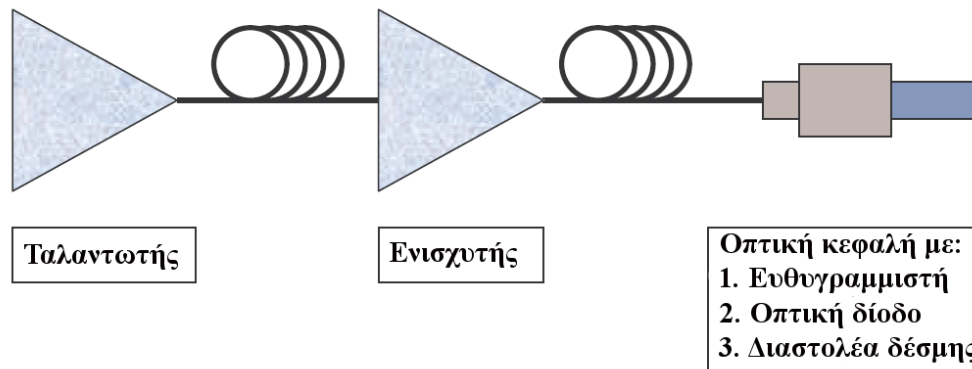
Το Ylia M20 είναι ένα παλμικό laser ινών Υττερβίου. Τα βασικά μέρη του συνολικού συστήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Τα βασικά μέρη του Ylia M20: 1. Το κουτί που περιέχει την μονάδα του laser, 2. Η οπτική κεφαλή του laser, 3. Θωρακισμένο καλώδιο μήκους 3 μέτρων

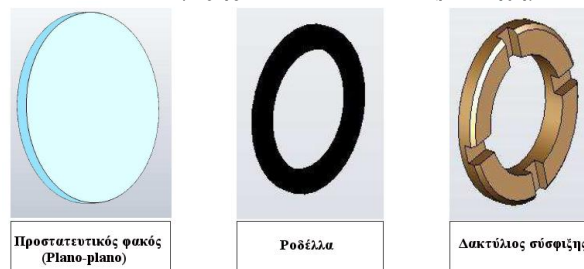
2.6.1.1 Οπτική διάταξη Ylia M20

Η οπτική διάταξη του laser βρίσκεται στην οπτική κεφαλή και πέρα από τον οπτικό ενισχυτή (ταλαντωτής) περιέχει και άλλα οπτικά εξαρτήματα τα οποία παρουσιάζονται στο οπτικό διάγραμμα του σχήματος 2.7.



Σχήμα 2.7: Οπτικό διάγραμμα συστήματος laser Ylia M20.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω οπτικό διάγραμμα [10] η κεφαλή του laser του Ylia M20 πέρα από τον βασική διάταξη του οπτικού ταλαντωτή (oscillator), της οποίας η λειτουργία περιγράφηκε στην αρχή του παρόντος Κεφαλαίου, έχει έναν επιπλέον οπτικό ενισχυτή (booster) για την δημιουργία δέσμης υψηλής ενέργειας η οποία στην συνέχεια διέρχεται από έναν ευθυγραμμιστή (collimator). Ο collimator παραλληλοποιεί τις κινήσεις των φωτονίων που εξέρχονται από τον booster, μειώνοντας ταυτόχρονα και την διάμετρο της συνολικής δέσμης. Μετά τον collimator υπάρχει μια οπτική δίοδος (isolator), η οποία προστατεύει το εσωτερικό σύστημα του laser (oscillator, booster και collimator) από τυχόν καταστροφή λόγω πίσω-ανάκλασης της δέσμης (back reflection). Αυτό το back reflection μπορεί να γίνει από εξωτερικούς παράγοντες, όπως πχ η τοποθέτηση λάθος φακού στην έξοδο της διάταξης του laser. Επομένως, ο isolator πρακτικά προστατεύει το σημαντικότερο κομμάτι του συστήματος του laser. Στην περίπτωση back reflection, η καταστροφή θα επέλθει στον isolator μόνο. Τέλος, η συνολική δέσμη διαστέλλεται μέσω ενός διαστολέα δέσμης (beam expander). Ο beam expander διαστέλλει την δέσμη σε μια τελική διάμετρο 9 mm. Αξίζει να αναφερθεί εδώ, πως μετά το άνοιγμα της κεφαλής στο εργαστήριο, πέρα από τον beam expander στο σημείο εξόδου βρέθηκε να υπάρχει και ένας bi-convex φακός που συγκεντρώνει την δέσμη από 9 mm διάμετρο σε 8 mm σε απόσταση 100 mm από την έξοδο του laser, αλλά αυτό το κομμάτι θα αναλυθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 6. Ο συγκεκριμένος bi-convex φακός προστατεύεται από έναν plano-plano φακό (1/FEN/0049), ο οποίος ασφαρίζεται με μία ροδέλα (3/PLA/0995) και ένα δακτύλιο σύσφιξης (3/MEC/3750) (βλ. Σχήμα 2.8).



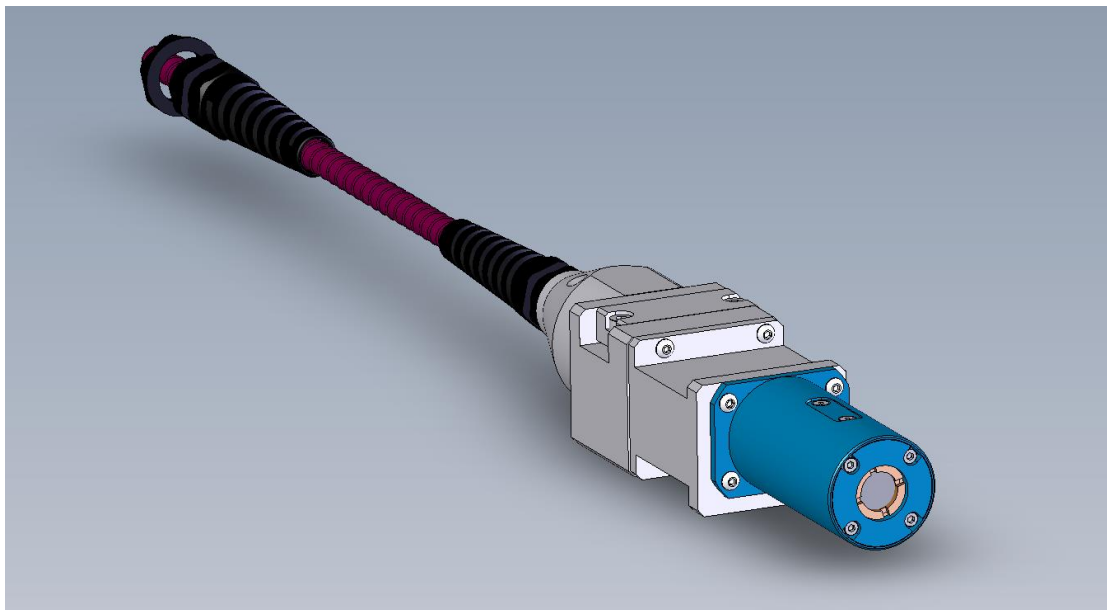
Σχήμα 2.8: Προστασία bi-convex φακού από το περιβάλλον.

2.6.1.2 Κεφαλή laser Ylia M20

Η οπτική κεφαλή του laser Ylia M20 παρουσιάζεται στην εικόνα το σχήματος 2.9, ενώ το 3D σχέδιο του παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10.



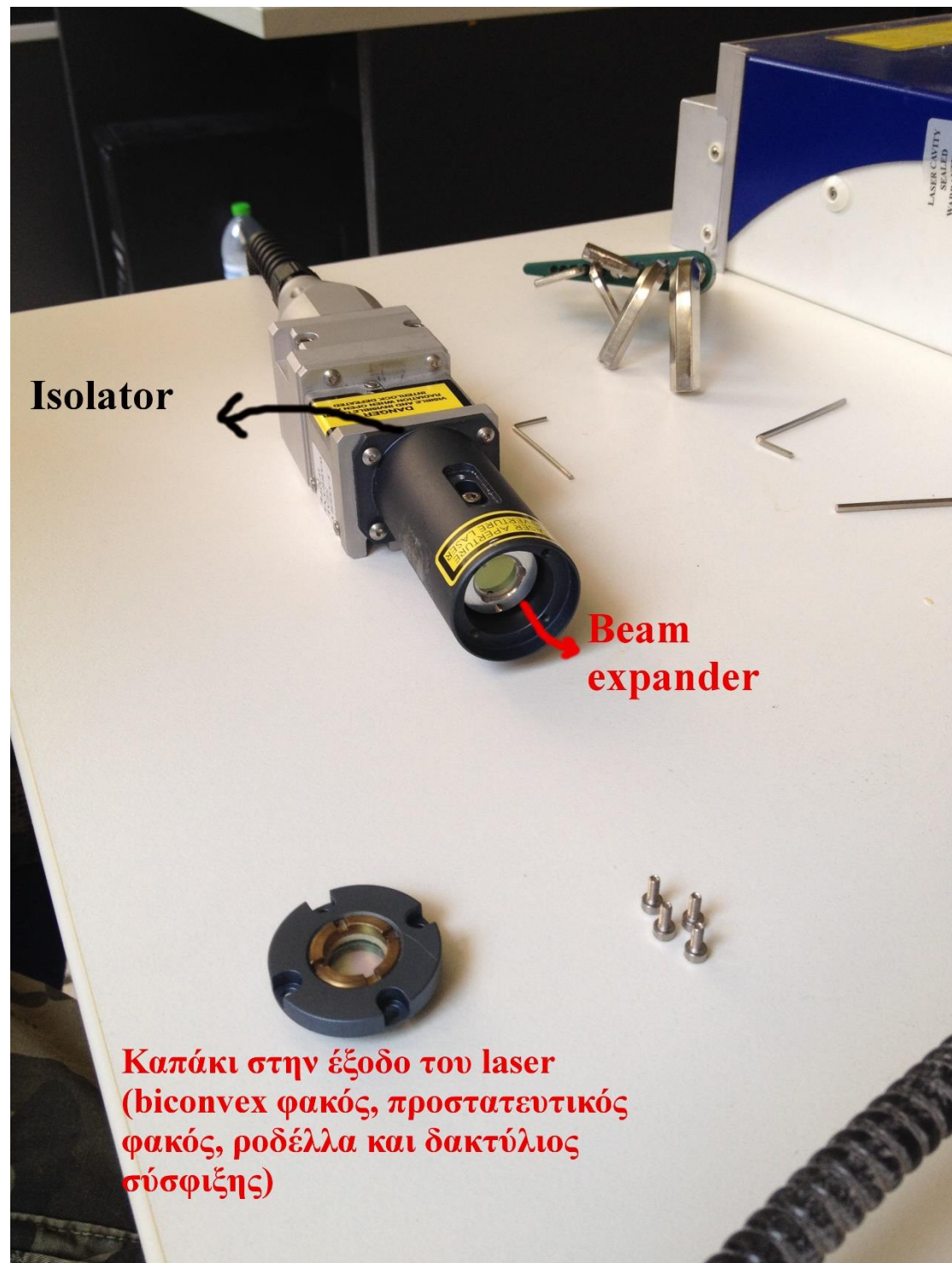
Σχήμα 2.9: Κεφαλή laser Ylia M20.



Σχήμα 2.10: 3D σχέδιο της οπτικής κεφαλής του laser Ylia M20.

Στην περιοχή του μπλε χρώματος βρίσκεται ο beam expander, ενώ ακριβώς πριν από αυτή την περιοχή βρίσκεται ο isolator. Στην έξοδο (laser aperture) διακρίνεται ο δακτύλιος σύσφιξης με τον φακό προστασίας. Το υπόλοιπο σύστημα είναι κλειστό και προτιμήθηκε να μην ανοιχθεί, αφού κρίθηκε ότι δεν θα βοηθούσε στην εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην βελτίωση της χρήσης του laser στα πλαίσια του θέματος της εργασίας. Περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στον κόμματι των φακών παρατίθενται στο Κεφάλαιο 6 της παρούσας εργασίας. Στην εικόνα

του σχήματος 2.11 διακρίνεται ο οπτικός εξοπλισμός της κεφαλής που περιγράφηκε παραπάνω όπως παρατηρήθηκε μετά το άνοιγμα του στο εργαστήριο.



Σχήμα 2.11: Άνοιγμα οπτικής κεφαλής στο εργαστήριο και παρουσίαση των μερών της.

2.6.1.3 Χαρακτηριστικά δέσμης laser Ylia M20

Τα οπτικά χαρακτηριστικά της δέσμης εξόδου από το laser Ylia M20 στην εργοστασιακή οπτική διάταξη που παρουσιάστηκε είναι τα ακόλουθα [10]:

- Μήκος κύματος (nm): 1064
- Μέση ισχύς (W): 20
- Ενέργεια παλμού (mJ): 1.0
- Διάρκεια παλμού (ns): 100
- Μέγιστη ισχύς (kW): 9 (στα 20kHz συχνότητας)
- Συχνότητα επανάληψης παλμών (kHz): 20 με 250
- Switch on/off (μs): 150/9

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης εξόδου από το laser Ylia M20 στην εργοστασιακή οπτική διάταξη είναι τα ακόλουθα:

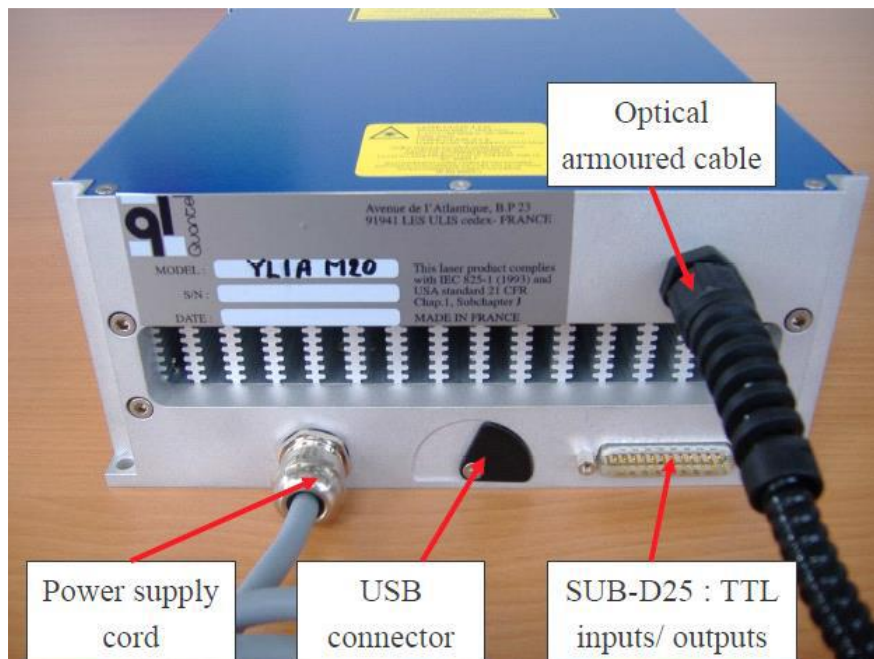
- Ποιότητα δέσμης (4 sigma): 2.3
- Διάμετρος δέσμης εξόδου (99%) (mm): 8
- Απόκλιση διαμέτρου δέσμης εξόδου (mrad): <1

2.6.1.4 Μονάδα ελέγχου Ylia M20

Το κουτί του συστήματος του Ylia M20 περιέχει τα ηλεκτρονικά της μονάδας ελέγχου της δέσμης laser. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρονικά της μονάδας ελέγχου υλοποιούν:

- Την δημιουργία παλμών
- Την ρύθμιση της θερμοκρασίας των διατάξεων διόδων
- Την οδήγηση του ρεύματος της διάταξης άντλησης
- Τον έλεγχο των σταδίων ενίσχυσης στη λειτουργία Αυτόματου ελέγχου Ρεύματος (ACC).
- Διαχειρίζονται εσωτερικές παραμέτρους και συνδέσεις, με στόχο την προστασία της συσκευής και του χειριστή. Έτσι, οι υψηλές και χαμηλές οριακές τιμές των κρίσιμων παραμέτρων και τα κατάφωλα ασφαλείας ελέγχονται από τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά.
- Παρέχουν μια διεπαφή επικοινωνίας USB για απομακρυσμένο έλεγχο και παρακολούθηση.
- Παρέχουν μια TTL είσοδο για την διαχείριση εφαρμογών σήμανσης, με την βοήθεια μικροελεγκτή (βλ. μεταπτυχιακή εργασία Κυριακόπουλου [4]).

Στις εικόνες των σχημάτων 2.12 και 2.13 παρουσιάζεται το μπροστινό και πίσω μέρος της μονάδας laser αντίστοιχα.



Σχήμα 2.12: Μπροστινό τμήμα μονάδας Ylia M20.



Σχήμα 2.13: Πίσω τμήμα μονάδας Ylia M20.

Στο μπροστινό τμήμα, διακρίνονται το καλώδιο τροφοδοσίας (power supply) το οποίο προστατεύεται από πλαστικό κάλυμμα. Το καλώδιο αυτό είναι ασφαλισμένο στο κουτί και δεν μπορεί να αποσυνδεθεί χωρίς επέμβαση στο εσωτερικό του κουτιού. Το ίδιο ισχύει και για το οπτικό καλώδιο (optical armored cable) που συνδέει την μονάδα με την κεφαλή του laser. Η

παροχή ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να μεταφέρει το καλώδιο τροφοδοσίας είναι έως και 250 W και είναι ιδιαίτερα ορισμένη έτσι ώστε να ταιριάζει με την ισχύ του δικτύου και με την τάση και το ρεύμα λειτουργίας του Ylia M20. Διακρίνονται επίσης οι συνδέσεις USB και SUB-D25. Οι συνδέσεις που έγιναν για τον έλεγχο του laser μέσω μικροελεγκτή Arduino μπορούν να βρεθούν με λεπτομέρεια στην μεταπτυχιακή εργασία του Κυριακόπουλου [4].

2.6.2 Λειτουργία και ρύθμιση laser Ylia M20

Το laser μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

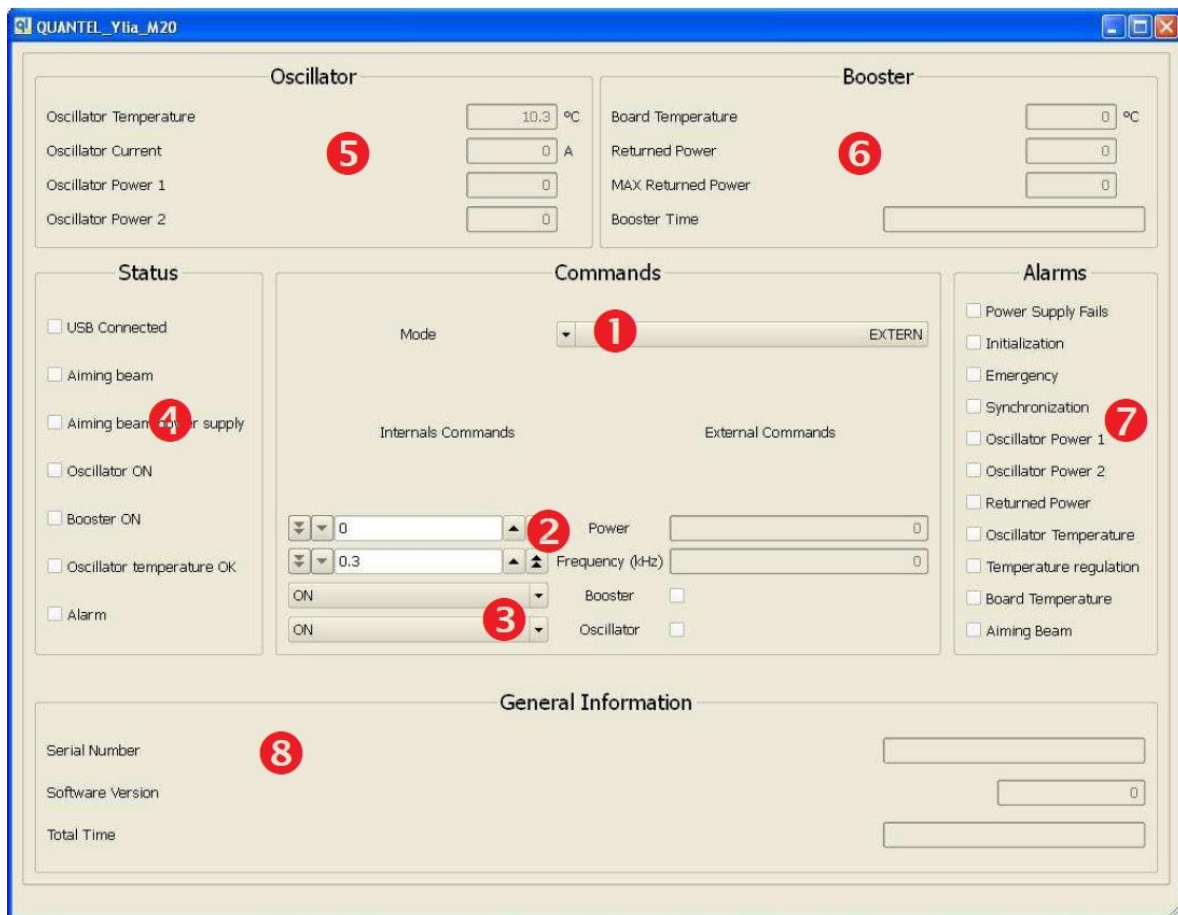
1. Εξωτερική λειτουργία (Extern Mode): το laser ελέγχεται μόνο από τα σήματα της SUB-D25 θύρας.
2. Εσωτερική λειτουργία (Intern Mode): το laser ελέγχεται μόνο από την θύρα USB και την διεπαφή λογισμικού που δίνει η εταιρεία. Για λόγους ασφαλείας, το “Emergency Stop” που έρχεται σαν input από τον SUB-D25 connector είναι μέρος της λειτουργίας.
3. Λειτουργία επίδειξης (Demonstration mode): το laser ελέγχεται από την θύρα USB και την διεπαφή λογισμικού που δίνει η εταιρεία, εκτός από το σήμα διαμόρφωσης booster και το “Emergency Stop”, που παρέχονται από τον SUB-D25 connector.

Επειδή το laser αποτελεί ένα μέρος ενός συνολικού συστήματος ελέγχου της μηχανής που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, επιλέχθηκε η εξωτερική λειτουργία για τον έλεγχό του με ταυτόχρονη χρήση της διεπαφής λογισμικού της εταιρείας, που όπως θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, μας δίνει πληροφορίες για την λειτουργική κατάσταση των τμημάτων του laser (oscillator, booster κτλ.) κατά την λειτουργία του [10].

2.6.2.1 Παρουσίαση διεπαφής λογισμικού ελέγχου Ylia M20

Η Quantel μαζί με το σύστημα laser δίνει και ένα λογισμικό για διεπαφή του χρήστη με το σύστημα. Η εφαρμογή είναι η Ylia M20 1.7 και πέρα από τον έλεγχο του laser σε Intern και Demonstration mode, είναι χρήσιμη για την πληροφόρηση του χρήστη, για την λειτουργική κατάσταση του laser ακόμη και όταν το laser ελέγχεται μέσω Extern mode.

Ανοίγοντας την εφαρμογή εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 2.14 [10], το οποίο μπορεί να χωριστεί σε 8 περιοχές:



Σχήμα 2.14: Η διεπαφή της εφαρμογής της Quantel για το laser Ylia M20.

Οι αριθμημένες περιοχές αναλύονται στην συνέχεια:

1. Mode λειτουργίας laser

- *Extern Mode (default)* – Έλεγχος μέσω SUB-D25
- *Intern Mode* – Έλεγχος μέσω USB και εντολών εφαρμογής. Απαιτείται η χρήση του pin για το “Emergency Stop” του SUB-D25 connector.
- *Demonstration Mode* – Έλεγχος μέσω USB και εντολών εφαρμογής. Εκτός από το σήμα διαμόρφωσης booster και το σήμα για το “Emergency Stop”, που παρέχονται από το SUB-D25 connector.

2. Ρυθμίσεις ισχύος εξόδου δέσμης και συχνότητας παλμών και ανάγνωση τιμών τους

- Οι ρυθμίσεις της ισχύος εξόδου και της συχνότητας παλμών μπορούν να εισαχθούν στο αριστερό τμήμα του παραθύρου. Το μέγιστο επίπεδο ισχύος εξόδου είναι 255 που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ εξόδου. Η ρύθμιση

αυτή καθώς και η ρύθμιση της συχνότητας παλμών είναι διαθέσιμα μόνο στην Intern και Demonstration Mode.

- Η ανάγνωση των τιμών ισχύος εξόδου δέσμης και της συχνότητας παλμών γίνεται στο δεξί τμήμα του παραθύρου. Η ανάγνωση είναι διαθέσιμη μόνο στον Extern Mode λειτουργίας και παρουσιάζουν τις τιμές που έχουν τεθεί μέσω του SUB-D25 connector.

Σημείωση: Αν το laser τεθεί στο Intern Mode λειτουργίας τότε τα ηλεκτρικά σήματα του SUB-D25 connector μπορούν να διαβαστούν από την εφαρμογή, αλλά δεν ελέγχουν το σύστημα laser. Στο δεξί μέρος του παραθύρου δεν παρουσιάζεται η κατάσταση του laser, αλλά μόνο η κατάσταση των ηλεκτρικών σημάτων.

3. Ρυθμίσεις ταλαντωτή (oscillator) και ενισχυτή (booster) και ανάγνωση τιμών τους

- Η ενεργοποίηση του oscillator και του booster μπορεί να γίνει στο αριστερό μέρος αυτής της περιοχής, όταν το laser βρίσκεται σε Intern mode λειτουργίας. Στην Demonstration mode λειτουργίας, μπορεί να γίνει μόνο η ενεργοποίηση του oscillator. Στο Extern mode, ο oscillator και ο booster μπορούν να ενεργοποιηθούν μόνο μέσω ηλεκτρικών σημάτων στο SUB-D25 connector. Αυτό στο υπάρχον σύστημα γίνεται από το μικροελεγκτή του laser.

Σημείωση: (ON) σημαίνει πως η ενεργοποίηση του oscillator και του booster είναι απαραίτητη.

- Η κατάσταση των ηλεκτρικών σημάτων του oscillator και του booster που έρχονται από τον SUB-D25 connector φαίνεται στο δεξί μέρος της περιοχής αυτής. Η ανάγνωση είναι μόνο διαθέσιμη στην Extern λειτουργία και στην Demonstration λειτουργία για τον booster μόνο.

Σημείωση: Αν το laser είναι στην Intern κατάσταση λειτουργίας τότε τα ηλεκτρικά σήματα του SUB-D25 μπορούν να διαβαστούν από την εφαρμογή αυτή, αλλά δεν ελέγχουν την μονάδα. Η δεξιά πλευρά της περιοχής αυτής δεν υποδεικνύει την κατάσταση του laser, αλλά μόνο την κατάσταση των ηλεκτρικών σημάτων (για παράδειγμα: μπορεί τα σήματα του oscillator και του booster να είναι ON, αλλά το laser να είναι κλειστό λόγω σήματος συναγερμού).

4. Πλαίσια κατάστασης (checkboxes)

Τα πλαίσια κατάστασης δείχνουν την κατάσταση λειτουργικά του laser.

Η σημασία του κάθε checkbox παρουσιάζεται παρακάτω:

- **“USB connected”** – Αν είναι ενεργοποιημένο, σημαίνει πως η επικοινωνία USB μεταξύ υπολογιστή και μονάδας laser λειτουργεί.
- **“Aiming beam”** – Αν είναι ενεργοποιημένο, σημαίνει πως η δέσμη στόχευσης είναι ενεργοποιημένη.
- **“Aiming beam power supply”** – Αν είναι ενεργοποιημένο, σημαίνει πως η τα 5V τροφοδοσίας της κόκκινης δέσμης στόχευσης που απαιτούνται είναι σε συμφωνία με τις προδιαγραφές.
Σημείωση: Αν το παραπάνω checkbox δεν είναι ενεργοποιημένο σημαίνει πως η κόκκινη δέσμη στόχευσης δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί και το checkbox συναγερμού (alarm) ανάβει.
- **“Oscillator ON”** – Αν είναι ενεργοποιημένο, σημαίνει πως ο oscillator είναι ενεργοποιημένος και κανένα alarm δεν εμφανίζεται. Το σύστημα εκπέμπει χαμηλής ισχύος δέσμη από την κεφαλή του laser.
- **“Booster ON”** – Αν είναι ενεργοποιημένο, σημαίνει πως ο oscillator και ο booster είναι ενεργοποιημένοι και κανένα alarm δεν εμφανίζεται. Το σύστημα εκπέμπει υψηλής ισχύος δέσμη laser από την κεφαλή του laser. Η ισχύς εξόδου της δέσμης εξαρτάται από τις ρυθμίσεις που έχει επιλέξει ο χειριστής.
- **“ECL Temperature OK”** - Αν είναι ενεργοποιημένο, σημαίνει πως η θερμοκρασία της διόδου του oscillator είναι σε ασφαλή θερμοκρασία λειτουργίας.
- **“Alarm”** – Αν είναι ενεργοποιημένο, σημαίνει πως ένας ή περισσότεροι συναγερμοί έχουν ενεργοποιηθεί στο σύστημα. Για τους συναγερμούς κοιτάξτε την περιοχή 7 του παραθύρου που αναλύεται παρακάτω.

5. Τιμές ανάγνωσης Oscillator

Η περιοχή αυτή δίνει πληροφορίες για την κατάσταση του oscillator.

- **“Oscillator Temperature”** – δίνει πληροφορίες για την θερμοκρασία του oscillator. Η θερμοκρασία ρυθμίζεται από ένα TEC (Temperature Controller Circuit).
- **“Oscillator current”** – δίνει πληροφορίες για την ένταση του ρεύματος λειτουργίας στα στάδια ενίσχυσης του συστήματος laser.
- **“Oscillator power 1”** – δίνει μια σχετική τιμή της ισχύος του oscillator.
- **“Oscillator power 2”** – δίνει μια σχετική τιμή της ισχύος της δέσμης εξόδου από τον oscillator.

6. Τιμές ανάγνωσης Booster

Η περιοχή αυτή δίνει πληροφορίες για την κατάσταση λειτουργίας του booster

- **“Board temperature”** – δίνει την εσωτερική θερμοκρασία του laser.
- **“Returned power”** – δίνει μια σχετική τιμή της οπτικής ισχύος που επιστρέφει το laser.
- **“Max returned power”** – δίνει της μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή οπτικής ισχύος που επιστρέφει το laser μέσα στην περίοδο λειτουργίας του.
- **“Booster time”** – δίνει την συνολική διάρκεια λειτουργίας του booster από όταν εγκαταστάθηκε πρώτη φορά.

7. Checkboxes συναγερμών – Παράθυρο alarm

Αυτή η περιοχή δίνει την κατάσταση των συναγερμών του συστήματος laser. Κάθε φορά που ενεργοποιείται κάποιος συναγερμός, ενεργοποιείται και το αντίστοιχο checkbox.

- **“Power supply fails”** – ενεργοποιείται όταν μία ή περισσότερες εσωτερικές ή/και εξωτερικές τροφοδοσίες είναι εκτός εύρους φυσιολογικών τιμών λειτουργίας.
- **“Initialization”** – ενεργοποιείται όταν το laser είναι ακόμη στην περίοδο προθέρμανσής του (warm-up time). Αυτός ο συναγερμός συμβαίνει για λίγα δευτερόλεπτα αφού δώσουμε τροφοδοσία στο σύστημα laser.
- **“Emergency”** – ενεργοποιείται όταν το ηλεκτρικό σήμα για το emergency stop ενεργοποιείται. Στην περίπτωση της μηχανής μας ενεργοποιείται είτε όταν ο διακόπτης emergency stop είναι πατημένος στο άκρο της μηχανής (διακόπτης μανιτάρι) είτε όταν η πόρτα της μηχανής είναι ανοιχτή αποτρέποντας την λειτουργία του laser. (βλ. Κεφάλαιο 3 και 4 για περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στους διακόπτες κινδύνου της μηχανής).
- **“Synchronization”** – ενεργοποιείται όταν ο ηλεκτρικός συγχρονισμός σήματος δεν είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Αυτός ο συναγερμός εμφανίζεται μόνο στο “Extern” mode λειτουργίας.
- **“Oscillator Power 1”** – ενεργοποιείται όταν η οπτική ισχύς του oscillator είναι χαμηλότερη της εργοστασιακής ισχύς κατωφλίσωσης.
- **“Oscillator Power 2”** - ενεργοποιείται όταν η οπτική ισχύς εξόδου του oscillator είναι χαμηλότερη της εργοστασιακής ισχύς κατωφλίσωσης.
- **“Returned beam”** – ενεργοποιείται όταν η ισχύς που επιστρέφεται από το laser είναι μεγαλύτερη από μια τιμή κατωφλίσωσης που έχει ορίσει ο κατασκευαστής.

- **“Oscillator Temperature”** – ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του oscillator βγαίνει εκτός του $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ εύρους από την θερμοκρασία του oscillator που έχει τεθεί εργοστασιακά.
- **“Temperature regulation”** – ενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία του oscillator βγαίνει εκτός του $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ εύρους για περισσότερο από 20s.
- **“Board temperature”** – ενεργοποιείται όταν η εσωτερική θερμοκρασία του συστήματος laser βγαίνει εκτός από 5°C έως 53°C που είναι το εύρος φυσιολογικής εσωτερικής θερμοκρασίας λειτουργίας.
- **“Aiming beam”** – ενεργοποιείται όταν το σήμα ενεργοποίησης στόχευσης είναι ενεργοποιημένο, ενώ η τροφοδοσία των 5V δεν είναι ενεργοποιημένη ή είναι εκτός των απαιτήσεων τάσης και ρεύματος.

8. Παράθυρο γενικών πληροφοριών

Η περιοχή αυτή δίνει γενικές πληροφορίες σχετικές με την μονάδα του συστήματος laser

- **“Serial number”** – αποτελείται από ορισμένους ASCII χαρακτήρες που είναι ο σειριακός αριθμός του laser.
- **“Software version”** – δίνει την έκδοση του λογισμικού του laser. Είναι στην μορφή v.X. YY όπου το X δηλώνει μια σημαντική αλλαγή και το .YY μιας μικρότερης κλίμακας αλλαγή.
- **“Total time”** – δηλώνει την συνολική διάρκεια λειτουργίας. Αυτός ο χρονομετρητής αυξάνει από την στιγμή που δοθούν τα 24V τροφοδοσίας που χρειάζεται.

2.6.2.2 Ρύθμιση ισχύος στο Ylia M20 (Extern mode)

Το laser του εργαστηρίου βρίσκεται σε κατάσταση Extern λειτουργίας (για να μπορεί να είναι μέρος ενός συνολικού συστήματος ελέγχου της μηχανής που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3) που σημαίνει πως για την ρύθμιση και αλλαγή της ισχύος του πρέπει να επέμβουμε στο ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου με τον μικροελεγκτή Arduino, που δημιούργησε ο Κυριακόπουλος Επαμεινώνδας [4]. Από τα 25 pins του SUB-D25 connector τα πρώτα 8 είναι αυτά που ρυθμίζουν την μέση ισχύ ακτινοβολίας της δέσμης εξόδου του laser, ενώ τα υπόλοιπα έχουν να κάνουν με άλλες λειτουργίες:

- Διακόπτης ρύθμισης ισχύος – Pin 9
- γείωση – Pin 10,11,12,13,14

- alarm σήματος συγχρονισμού – Pin 15
- alarm ταλαντωτή – Pin 16
- εξωτερικής παροχή ισχύος 5V για την ακτίνα στόχευσης - – Pin 17
- ενεργοποίηση ταλαντωτή – Pin 18
- ενεργοποίηση booster – Pin 19
- σήμα συγχρονισμού – Pin 20
- alarm θερμοκρασίας - – Pin 21
- ενεργοποίηση ακτίνας στόχευσης – Pin 22
- alarm emergency stop – Pin 23
- alarm ανακλώμενης ισχύος – Pin 24
- παρακολούθηση ισχύος εξόδου – Pin 25

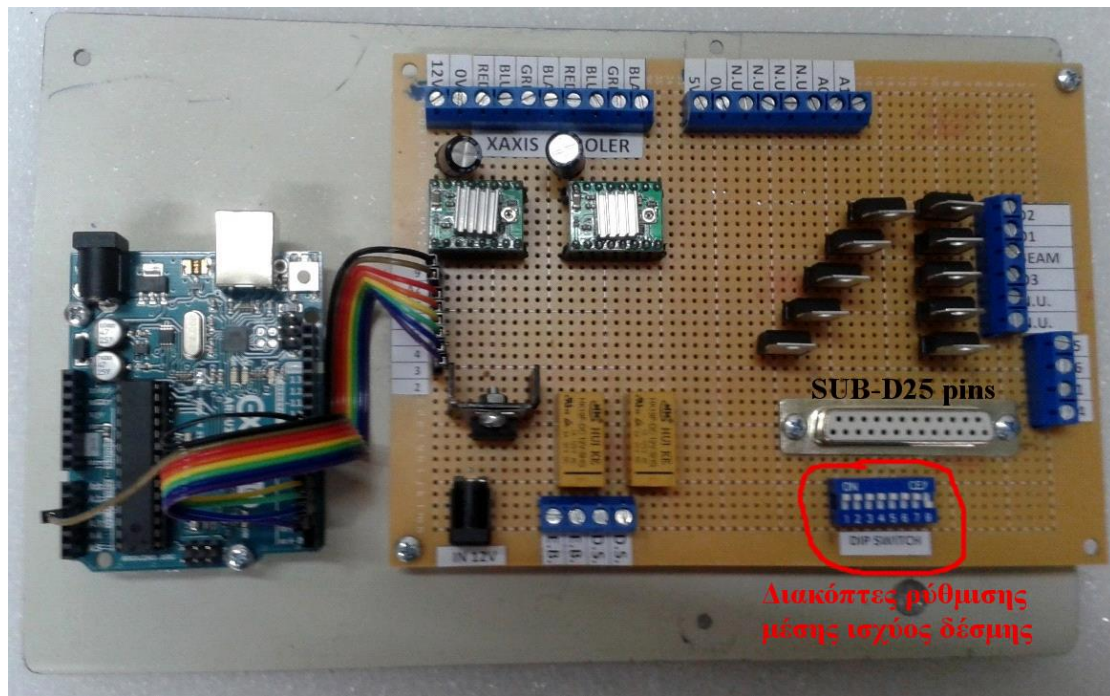
Η λογική αλλαγής και ρύθμισης της ισχύος βασίζεται στον πίνακα του σχήματος 2.15 [10] και υλοποιείται με το βραχυκύκλωμα ή ανοιχτοκύκλωμα των 8 κλεμών που συνδέουν τα πρώτα 8 pins του SUB-D25 connector με τον μικροελεγκτή Arduino του ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου του laser. Όπως είναι επομένως φανερό, η ισχύς στο Extern mode λειτουργίας είναι ένα byte με το 8^ο ψηφίο να είναι το most significant bit.

Σημείωση: Το 9^ο pin έχει τον ρόλο του διακόπτη ρύθμισης. Εάν είναι 1, το laser μπορεί να λειτουργήσει, διαφορετικά όχι και επομένως πρέπει να μένει βραχυκυκλωμένο πάντα.

N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	Comments
0	0	0	0	0	0	0	0	Less than 50 mW output power
0	0	0	0	0	0	1	0	25% of the nominal output power : YLIA M20 : 5W
0	0	0	0	0	0	0	1	50% of the nominal output power : YLIA M20 : 10W
0	0	0	0	0	0	1	1	75% of the nominal output power : YLIA M20 : 15W
1	1	1	1	1	1	1	1	100% of the nominal output power : YLIA M20 : 20W

Σχήμα 2.15: Το βραχυκύκλωμα και ανοιχτοκύκλωμα των πρώτων 8 pin του SUB-D25 connector ρυθμίζει την τιμή μέσης ισχύος της δέσμης εξόδου του laser Ylia M20.

Στην εικόνα του σχήματος 2.16 φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι διακόπτες ρύθμισης της μέσης ισχύος του Ylia M20 από το ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου του laser.



Σχήμα 2.16: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου του laser με μικροελεγκτή Arduino. Με κόκκινο χρώμα διακρίνονται οι dip switches ρυθμίσεως της μείωσης ισχύος του laser.

2.6.2.3 Κανόνες ασφαλείας κατά την χρήση του laser Ylia M20

Το Ylia M20 είναι τάξης IV (Class 4) laser [10], κάτι που κάνει την χρήση του ιδιαίτερα επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία αν δεν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Απρόσεκτη χρήση του Ylia M20 μπορεί να οδηγήσει σε πάρα πολύ σοβαρές και μόνιμες βλάβες για τα μάτια και το δέρμα του χειριστή. Το Ylia M20 είναι ένα laser υψηλής ισχύος και επομένως μπορεί να προκαλέσει πολύ σοβαρές βλάβες ακόμη και με μη απευθείας ακτινοβολία (μέσω ανάκλασης) σε μάτια και δέρμα, όπως τύφλωση και μόνιμη βλάβη στην δομή και λειτουργία των κυττάρων των άνω και των κάτω στιβάδων του δέρματος.

Για τους παραπάνω λόγους, ο θάλαμος της μηχανής που λειτουργεί το laser είναι κλειστός με emergency alarm στο άνοιγμα της πόρτας, έτσι ώστε ποτέ να μην λειτουργεί σε απευθείας έκθεση στον χειριστή. Ο θάλαμος επίσης είναι μαύρου χρώματος για την μείωση των ανακλάσεων. Η μηχανή επίσης φέρει παράθυρο με προστατευτικό τζάμι P1K03 (εικόνα σχήματος 2.17) διαστάσεων 297x210 mm και πάχους 3 mm για την επόπτευση της κατεργασίας από τον χειριστή, χωρίς να τον εκθέτει στους κινδύνους της ακτινοβολίας της δέσμης.

Παρόλα αυτά, είναι επίσης απαραίτητη και η χρήση ειδικών γυαλιών για την προστασία των ματιών από τους χειριστές της μηχανής. Στο εργαστήριο υπάρχουν δύο ζεύγη γυαλιών προστασίας:

- Frame F20 Filter P1CO2 (βλ. εικόνα σχήματος 2.18)

- Frame F18 Filter P1CO2 (βλ. εικόνα σχήματος 2.19)

τα οποία προστατεύουν τα μάτια για το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που έχει η δέσμη του Υλια M20. Η χρήση τους επιβάλλεται πάντοτε κατά τον χειρισμό του laser.



Σχήμα 2.17: Τζάμι P1K03 για την προστασία των ματιών και του δέρματος κατά την επίβλεψη της λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 2.18: Frame F20 Filter P1CO2



Σχήμα 2.19: Frame F18 Filter P1CO2

3

Συστήματα SLS/SLM

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στα συστήματα προσθετικής τεχνολογίας (Additive Manufacturing) για την γρήγορη κατασκευή πρωτοτύπων (Rapid Prototyping) με επίκεντρο την τεχνική της επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης-τήξης με laser (SLS/SLM). Τέλος, γίνεται η αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας της μηχανής SLS/SLM του εργαστηρίου.

3.1 Rapid Prototyping και Additive Manufacturing

3.1.1 Rapid Prototyping

Σαν Rapid Prototyping ορίζουμε το σύνολο των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός αντικειμένου γρήγορα, χρησιμοποιώντας δεδομένα από την τρισδιάστατη γεωμετρία του αντικειμένου από ένα πρόγραμμα σχεδιασμού CAD (computer aided design). Η κατασκευή του αντικειμένου γίνεται με πολλές διαφορετικές τεχνικές, αλλά συνήθως με τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing), η οποία συχνά αναφέρεται και ως τεχνολογία προσθετικής στρώσεων (additive layer manufacturing).

Οι πιο γνωστές τεχνικές για rapid prototyping είναι:

- Στερεολιθογραφία (Stereolithography – SL)
- Εκτύπωση με εναπόθεση νήματος (Fused deposition modelling – FDM)
- Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση – τήξη με laser (Selective Laser Sintering-Melting – SLS/SLM)
- Εδαφικό curing με χρήση υπεριώδους φωτισμού (Solid ground curing - SGC)
- Προσθετική πλαστικοποίηση στρώσεων (Laminated object manufacturing – LOM)

3.1.2 Additive Manufacturing

Ως Additive Manufacturing ή αλλιώς 3D Printing, ονομάζουμε τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων, κατά τις οποίες στρώσεις υλικών δημιουργούνται και ενώνονται μεταξύ τους από κάποια μηχανή. Η μηχανή αυτή ελέγχεται συνήθως με αριθμητικό έλεγχο CNC, όπως οι περισσότερες μηχανές συμβατικών κατεργασιών. Τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι οποιοδήποτε σχήματος ή γεωμετρίας (και πλέον και οποιοδήποτε υλικού) και δημιουργούνται χρησιμοποιώντας δεδομένα από ψηφιακά τρισδιάστατα μοντέλα όπως αναφέρθηκε.

Η διαφορά του Additive Manufacturing σε σχέση με το Rapid Prototyping έγκειται στο ότι το Additive Manufacturing αποτελεί μέρος των τεχνικών του Rapid Prototyping. Το Additive Manufacturing περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές εναπόθεσης στρώσεων (layer-by-layer/drop-by-drop τεχνικές), ενώ αντίθετα το Rapid Prototyping αναφέρεται στην ταχεία κατασκευή τεμαχίων ανεξαρτήτου τεχνολογίας που χρησιμοποιείται. Τα τελευταία χρόνια, οι δύο όροι συγχέονται λόγω της ολοένα αυξανόμενης εφαρμογής τεχνικών προσθετικής στρώσεων για την ταχεία κατασκευή τεμαχίων.

Στην σημερινή εποχή, η προσθετική τεχνολογία έχει βρει εφαρμογή σε τομείς πολλών επιστημών τόσο σε ερευνητικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο [11]. Αν και ξεκίνησε σχετικά νωθρά από άποψη εφαρμογών, από το 2010 και μετά ως μέρος της ταχείας κατασκευής βρήκε εφαρμογή, σε μεγάλο βαθμό, σε βιομηχανικές δραστηριότητες, λόγω της μείωσης κόστους κατασκευής ανά τεμάχιο που έφερε στην γραμμή της παραγωγής. Πλέον, πέρα από την κατασκευή βασικών μερών αυτοκινήτων, φορητών και αεροπλάνων, η προσθετική τεχνολογία βρίσκει εφαρμογή στην δημιουργία τροφίμων μέσω στρώσεων, στην δημιουργία ρούχων και υποδημάτων και στην χειρουργική, ενώ συνεχώς οι εφαρμογές της διευρύνονται.

3.1.3 Η διαδικασία του Additive Manufacturing

Η διαδικασία που ακολουθείται για την ταχεία κατασκευή αντικειμένων με προσθετική τεχνολογία, ανεξαρτήτως της τεχνικής που επιλέγεται, περιλαμβάνει κάποια βασικά βήματα [11]:

1. **Σχεδιασμός του αντικειμένου** που θέλουμε να κατασκευάσουμε με κάποιο πρόγραμμα σχεδιασμού στον υπολογιστή. Αυτό το βήμα, θα μας δώσει το απαραίτητο αρχείο CAD που περιέχει όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τρισδιάστατης μορφής του προς κατασκευή αντικειμένου.

2. **Εξαγωγή STL αρχείου** με βάση το σχέδιο του προηγούμενου βήματος. Τα STL αρχεία περιγράφουν μόνο την γεωμετρία της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου, χωρίς καμία αναπαράσταση άλλων στοιχείων του, όπως χρώμα, βάρος και άλλα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται σε ένα αρχείο CAD. Τα STL αρχεία περιγράφουν την γεωμετρία μιας επιφάνειας μέσω τριγωνικών επιφανειών, οι οποίες δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τα διανύσματα επιφάνειας του αντικειμένου (με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού) σε ένα Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται σε ένα STL αρχείο είναι πάντα θετικές, χωρίς κλιμάκωση και σε αυθαίρετες μονάδες. Το βήμα της εξαγωγής ενός STL αρχείου συνήθως γίνεται αυτόματα, αφού τα περισσότερα σχεδιαστικά προγράμματα της αγοράς προσφέρουν αυτή την δυνατότητα στον χρήστη μετά το πέρας του σχεδιασμού του αντικειμένου.
3. **Μεταφορά του STL αρχείου σε ένα πρόγραμμα προετοιμασίας στρώσεων.** Ένα τέτοιο πρόγραμμα συνήθως «κόβει» την τρισδιάστατη γεωμετρία που φτιάξαμε σε στρώσεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται slicing. Παράλληλα με το slicing, γίνεται επίσης και η δημιουργία τροχιών διακριτών σημείων για την κάθε στρώση σε αρχείο G-κώδικα στην λογική των CNC μηχανών. Όπως είναι φανερό, η δημιουργία και η ένωση των στρώσεων τελικώς θα είναι το επιθυμητό αντικείμενο και ο τρόπος που πραγματοποιείται εξαρτάται ξεκάθαρα από ποια τεχνική προσθετικής τεχνολογίας θα επιλέξουμε. Με βάση τις τροχιές για κάθε στρώση που έχουμε πάρει, πρακτικά έχουμε την περιγραφή της τρισδιάστατης γεωμετρίας του αντικειμένου που θέλουμε να φτιάξουμε σε διακριτά σημεία στον χώρο, τα οποία είναι έτοιμα πλέον να περαστούν στον ελεγκτή της μηχανής.
4. **Ρύθμιση της μηχανής.** Αυτό το βήμα περιλαμβάνει την διαδικασία ρυθμίσεως του συστήματος αναφοράς και της αρχής του στην μηχανή με βάση το μέγεθος του αντικειμένου, καθώς και των παραμέτρων της κατεργασίας (όπως ταχύτητα, βήματα κινήσεως μηχανικών μερών κτλ.). Σε αυτό το στάδιο μπορεί επίσης να περιλαμβάνονται και περαιτέρω ρυθμίσεις που έχουν να κάνουν με την τεχνική που χρησιμοποιεί η κάθε μηχανή (όπως προθέρμανση θαλάμου, προθέρμανση υλικού εναπόθεσης κτλ.). Το βήμα αυτό είναι πολύ χρήσιμο έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν απρόοπτα κατά την διάρκεια του επόμενου βήματος.
5. **Κατασκευή τεμαχίου.** Το βήμα αυτό περιλαμβάνει την εναπόθεση στρώσεων με βάση την εκάστοτε τεχνική και δεν περιλαμβάνει συνήθως την παρέμβαση του χρήστη γιατί είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται στο σύστημα ελέγχου της μηχανής.
6. **Αφαίρεση τεμαχίου από την μηχανή.** Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή το τεμάχιο αφαιρείται με προσοχή, λόγω ενδεχόμενης ευθραυστότητας ή ύπαρξης

επιπρόσθετων κατασκευών βάσεων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της κατεργασίας.

7. **Κατεργασίες αποπεράτωσης.** Σε αυτό το βήμα, το τεμάχιο που κατασκευάστηκε υπόκειται σε κατεργασίες αποπεράτωσης για την τελειοποίηση της γεωμετρίας του ή των χαρακτηριστικών του με βάση την χρήση που προορίζεται. Αυτό το στάδιο μπορεί να περιλαμβάνει διαδικασίες φινιρίσματος, βαφή, αμμοβολή κ.ά.
8. **Τελική χρήση.** Το τεμάχιο είναι πλέον έτοιμο για χρήση.

3.2 Τεχνική SLS/SLM

3.2.1 Ορισμός SLS/SLM

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση ή τήξη με laser (Selective laser sintering or melting) είναι μια τεχνική προσθετικής τεχνολογίας με ολοένα αυξανόμενη εφαρμογή σε συστήματα ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί μια δέσμη laser σαν πηγή ενέργειας για να πυροσυσσωματώσει ή να τήξει σκόνη οποιουδήποτε υλικού. Με αυτό τον τρόπο, το laser σημαδεύοντας σημεία στον χώρο, και ενώνοντάς τα μεταξύ τους δημιουργεί τεμάχια ανά στρώση. Αν και οι τεχνικές SLS και SLM είναι σχεδόν παρόμοιες, τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών είναι διαφορετικά όσο αφορά την κρυσταλλική δομή τους, το πορώδες της κατασκευής κτλ. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στην τεχνική SLS/SLM είναι πολυμερή, παρόλα αυτά η τεχνική έχει βρει εφαρμογή και στην δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων από μέταλλο, κεραμικό ή και γυαλί.

3.2.2 Τα βασικά μέρη ενός συστήματος SLS/SLM

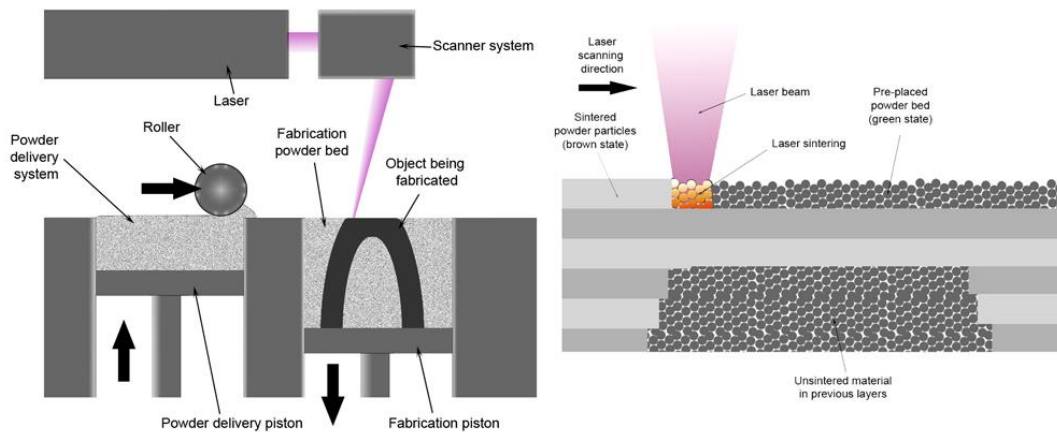
Για την δημιουργία αντικειμένων με την τεχνική SLS/SLM απαιτείται η δημιουργία μιας διάταξης με τα ακόλουθα βασικά μέρη:

1. **Μια κινούμενη κεφαλή laser.** Αυτό το μέρος περιλαμβάνει την δυνατότητα κίνησης της κεφαλής laser σε ένα 2d επίπεδο. Αυτό το επίπεδο αποτελεί το xy-επίπεδο της κατασκευής, δηλαδή το επίπεδο της κάθε στρώσης. Ο έλεγχος των κινητήρων που κινούν το laser γίνεται αριθμητικά (CNC έλεγχος) έτσι ώστε να μπορούν να δεχτούν G-κώδικα για την κίνησή του από σημείο σε σημείο. Το laser είναι συνήθως παλμικό, αφού για την πυκνότητα του κατασκευασμένου τεμαχίου, παίζει κυρίως ρόλο η peak ισχύ του laser, αντί για την διάρκεια πρόσπτωσης της δέσμης πάνω στην σκόνη.

2. **Το κρεβάτι της σκόνης.** Το κρεβάτι της σκόνης (powder bed) είναι το μέρος που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του sintering ή melting. Πολλές φορές αναφέρεται και ως τράπεζα σκόνης και πάνω σε αυτή δημιουργείται το τρισδιάστατο τεμάχιο ανά στρώση. Η κίνηση του powder bed είναι κατακόρυφη προς τα κάτω και αποτελεί τον z-άξονα της συνολικής κατεργασίας. Κάθε φορά που τελειώνει η δημιουργία μιας στρώσης, το powder bed κατεβαίνει ανά ένα πάχος στρώσης χαμηλότερα. Το κενό που δημιουργείται από το κατέβασμα του τραπεζιού, καλύπτεται με σκόνη από το σύστημα εναπόθεσης σκόνης.
3. **Σύστημα εναπόθεσης σκόνης.** Το σύστημα εναπόθεσης σκόνης είναι το σύστημα που καλύπτει και στρώνει την σκόνη στο κενό που δημιουργείται από το κατέβασμα του powder bed κάθε φορά που ολοκληρώνεται μία στρώση. Πρακτικά είναι υπεύθυνο για την στρώση της σκόνης που θα πυροσυσσωματωθεί ή θα τηχθεί στην κάθε φορά επόμενη στρώση. Το σύστημα εναπόθεσης σκόνης αποτελείται από έναν roller που είναι υπεύθυνος για το άπλωμα της σκόνης, καθώς και από ένα δοχείο που περιέχει την προς άπλωμα σκόνη. Οι τεχνικές εναπόθεσης σκόνης από το δοχείο στην τράπεζα είναι πολλές.
4. **Θάλαμος κατεργασίας.** Η όλη κατεργασία πραγματοποιείται σε έναν θάλαμο, ο οποίος έχει πολλαπλούς ρόλους:
 - Προστασία του χειριστή της μηχανής από απευθείας έκθεση στην δέσμη laser.
 - Δημιουργία θερμικού sandwich (προθέρμανση σκόνης από το πάνω και το κάτω μέρος) ή επιβολή ομοιόμορφης θερμοκρασίας μόνο στο κάτω/πάνω μέρος της σκόνης για δύο σκοπούς:
 - α) για προθέρμανση της σκόνης σε SLM μηχανή, έτσι ώστε το laser να μην χρειαστεί να προκαλέσει τεράστια θερμοκρασιακή μεταβολή στην σκόνη.
 - β) είτε σε μηχανές SLS/SLM για την αποφυγή απότομου θερμοκρασιακού gradient που έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση (warping) και καμπύλωση (curling) των τεμαχίων που κατασκευάζονται.
 - Δημιουργία περιβάλλοντος κατεργασίας μονωμένου από το εξωτερικό περιβάλλον για προστασία έναντι οξείδωσης του κατασκευασμένου τεμαχίου (κυρίως για μεταλλική σκόνη). Συνήθως ο θάλαμος είναι γεμάτος με κάποιο αδρανές αέριο όπως αργό για να αποτρέψει αυτά τα φαινόμενα οξείδωσης.
 - Δημιουργία κενού για την αποφυγή του φαινομένου της καύσης σε τεμάχια πολυμερών.

Με βάση τα παραπάνω, είναι φανερό πως κατά την διαδικασία SLS/SLM το τεμάχιο «εκτυπώνεται» προς τα κάτω. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε, είναι αδύνατο να κατασκευαστούν τεμάχια με εσωτερική κοιλότητα ή εντελώς κούφια με την τεχνική SLS/SLM, αφού η σκόνη που θα υπάρχει σε αυτές τις κοιλότητες θα είναι αδύνατο να αφαιρεθεί από το τελικό προϊόν.

Η εικόνα του σχήματος 3.1, δείχνει την συνολική διαδικασία που περιγράφηκε παραστατικά.



Σχήμα 3.1: Η διαδικασία της τεχνικής SLS/SLM παραστατικά.

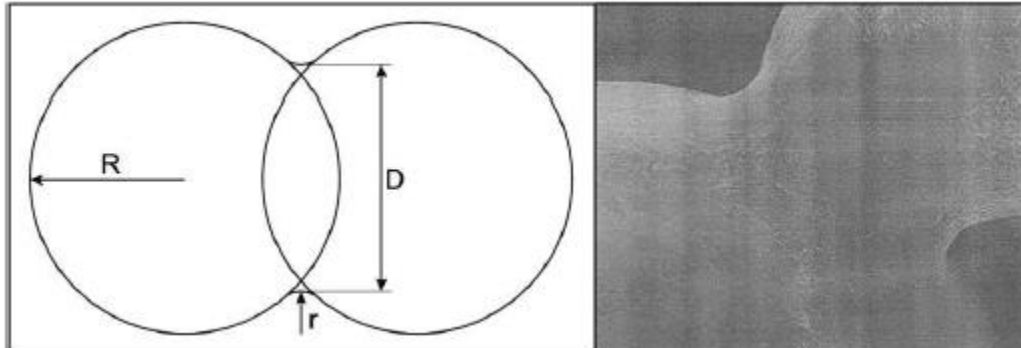
3.2.3 Φαινόμενα ένωσης κόκκων και laser-powder αλληλεπίδραση

3.2.3.1 Γενικά για το sintering

Σαν πυροσυσσωμάτωση (sintering) ορίζουμε την διαδικασία της δημιουργίας μιας στερεής μάζας υλικού μέσω θερμότητας από ανομοιογενή συνήθως και άμορφη σκόνη οποιουδήποτε υλικού, χωρίς όμως να φτάσουμε στο σημείο τήξης του υλικού. Όταν για αυτή την θερμότητα πυροσυσσωμάτωσης χρησιμοποιείται ως πηγή μια δέσμη laser, τότε ορίζουμε την πυροσυσσωμάτωση με laser (laser sintering). Η θερμοκρασία που πραγματοποιείται το sintering είναι αρκετά χαμηλότερη της θερμοκρασίας τήξης. Συνήθως το φαινόμενο ξεκινάει από μια θερμοκρασία 30%-50% της θερμοκρασίας τήξης του υλικού. Παρακάτω γίνεται μια πιο αναλυτική παρουσίαση των βασικότερων μηχανισμών ένωσης κόκκων από την πρόσδοση θερμότητας με ακτινοβολία laser σε αυτούς [12], [13].

3.2.3.2 Solid State Sintering

Κατά το φαινόμενο του solid state sintering παρουσιάζεται η δημιουργία λαιμού μεταξύ γειτονικών κόκκων, οι διαστάσεις του οποίου αυξάνονται με τον χρόνο. Σαν βασικές



Σχήμα 3.2: Η δημιουργία λαιμού μεταξύ γειτονικών κόκκων (δεξιά εικόνα) και οι βασικές του διαστάσεις (αριστερά εικόνα) κατά το φαινόμενο του Solid State Sintering.

διαστάσεις του δημιουργημένου λαιμού ορίζουμε το πάχος D και την ακτίνα ένωσης r του, οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα του σχήματος 3.2. Το φαινόμενο της ένωσης των κόκκων συμβαίνει στην στερεά κατάσταση μετά από την ολοένα αυξανόμενη διάχυση ατόμων των κόκκων. Η διάχυση αυτή, που προκαλείται από την πρόσδοση θερμότητας στους κόκκους, έχει ως συνέπεια μια διάχυση όγκου όσο προχωρά το φαινόμενο. Η διάχυση αυτή όγκου στην πραγματικότητα είναι μια συνολική διάχυση των επιφανειών γειτονικών κόκκων που εν τέλει ενώνονται. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία του λαιμού που αναφέρθηκε. Σε μια τέτοια περίπτωση, όπου το φαινόμενο της ατομικής διάχυσης συμβαίνει σε στερεά κατάσταση κάνουμε λόγο για την πυροσυσσωμάτωση στερεάς καταστάσεως (Solid State Sintering – SSS). Αυτό το φαινόμενο ήταν και το φαινόμενο που θέλαμε να επιτύχουμε με την πρωτότυπη μηχανή SLS/SLM του εργαστηρίου, γιατί διευκολύνει την εμφάνιση πορώδους στο κατασκευασμένο τεμάχιο, ενισχύοντας έτσι κάποιες ιδιότητές του.

3.2.3.3 Liquid Phase Sintering

Όταν η περιοχή ενοποίησης των κόκκων περιλαμβάνει κόκκους που βρίσκονται σε στερεά κατάσταση και ταυτόχρονα κόκκους που έχουν λιώσει τότε αναφερόμαστε στην πυροσυσσωμάτωση υγρής μορφής (Liquid Phase Sintering - LPS). Σε μια τέτοια περίπτωση, το υγροποιημένο υλικό θα απλωθεί ανάμεσα στους στερεούς κόκκους στιγμιαίως. Το φαινόμενο LPS συνήθως χρησιμοποιείται με δύο υλικά: ένα υψηλής θερμοκρασίας τήξης που ονομάζεται δομικό υλικό (structural material) και ένα χαμηλής θερμοκρασίας τήξης που ονομάζεται υλικό ένωσης (binder material). Οι τρόποι που μπορεί να υλοποιηθεί η LPS είναι οι εξής:

1. μείγμα κόκκων δύο διαφορετικών υλικών (ξεχωριστοί κόκκοι δομικού υλικού και ξεχωριστοί κόκκοι υλικού ένωσης)

2. σύνθετοι κόκκοι, που η μικροδομή τους περιέχει το δομικό υλικό και το υλικό ένωσης
3. κόκκοι με επικάλυψη όπου το υλικό ένωσης έχει χρησιμοποιηθεί σαν επίστρωση στους κόκκους του δομικού υλικού. Με αυτόν τον τρόπο, το υλικό της ένωσης που είναι αποτελεί την επίστρωση θα απορροφήσει πρώτο την ακτινοβολία του laser με αποτέλεσμα να λιώσει, ενώ το υλικό εσωτερικά θα παραμείνει στερεό.

Κατά το LPS, ναι μεν έχουμε μείωση στο πορώδες του υλικού σε σχέση με το SSS, αλλά παρόλα αυτά το συνολικό πορώδες παραμένει αρκετά υψηλό.

3.2.3.4 Μερική τήξη

Όταν εφαρμόζεται θερμότητα σε έναν κόκκο, είναι πιθανό η θερμότητα αυτή να μην είναι αρκετή ώστε να λιώσει ολόκληρο τον κόκκο. Σε μια τέτοια περίπτωση έχουμε τήξη της εξωτερικής περιοχής του κόκκου, ενώ το εσωτερικό του παραμένει στερεό. Λόγω αυτού του φαινομένου, έχουμε εμφάνιση λαιμών μεταξύ λιωμένου και στερεού μέρους. Οι λαιμοί αυτοί δεν πρέπει να συγχέονται με τους SSS λαιμούς. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται μερική τήξη των κόκκων και είναι συχνότερο σε κόκκους μετάλλων.

3.2.3.5 Πλήρης τήξη

Είναι ένας βασικός μηχανισμός ενοποίησης των κόκκων που αποτελεί στόχο SLM συστημάτων. Κατά την διάρκεια του φαινομένου, επιθυμούμε πλήρη τήξη των κόκκων με σκοπό την δημιουργία ενός πυκνού (από άποψη πορώδους) υλικού που δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω του sintering . Δύο μειονεκτήματα της πλήρους τήξης είναι τα εξής:

- Τα υψηλά θερμοκρασιακά gradient και ο λόγος πυκνοποίησης προκαλούν υψηλές παραμορφώσεις του υλικού
- Κακή ποιότητα επιφάνειας λόγω dross formation.

Αυτό το φαινόμενο θέλαμε όσο το δυνατόν να το περιορίσουμε με την πρωτότυπη μηχανή SLS/SLM του εργαστηρίου.

3.2.3.6 Χημικώς προκαλούμενη ένωση (*Chemical induced binding*)

Αποτελεί μια κατηγορία ενοποίησης που περιλαμβάνει την δημιουργία προϊόντων, μέσω κάποιας χημικής αντίδρασης, που παίζουν το ρόλο του υλικού ένωσης για την ένωση των κόκκων. Παράδειγμα αποτελεί η θέρμανση με laser κόκκων Al σε περιβάλλον αζώτου και αντίδραση μεταξύ τους, τελικώς δημιουργώντας AlN που λειτουργεί σαν υλικό ένωσης για την διατήρηση των κόκκων Al μεταξύ τους. Συστήματα που επιτυγχάνουν αυτό το φαινόμενο ενοποίησης ονομάζονται Selective Laser Reactive Sintering συστήματα .Αυτή η κατηγορία ξεφεύγει από τα πλαίσια των δυνατοτήτων της μηχανής της παρούσας διπλωματικής εργασίας και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.

3.2.3.7 *Laser-powder αλληλεπίδραση*

Για την θερμική ανάλυση της επαφής της δέσμης laser με τους κόκκους (laser-powder interaction) που βρίσκονται στο powder bed μιας SLS/SLM μηχανής θα πρέπει να ανατρέξουμε πρώτα στην φυσική εξήγηση μιας δέσμης laser. Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 2, μια δέσμη laser αποτελείται από φωτόνια συγκεκριμένου μήκους κύματος και ενέργειας που εξέρχονται από μια οπτική διάταξη που έχει ως αρχή έναν οπτικό ταλαντωτή. Αυτά τα φωτόνια αποτελούν την δέσμη laser που προσπίπτει στην σκόνη ενός υλικού κατά την κατεργασία SLS/SLM. Κατά την πρόσπτωση, τα φωτόνια της δέσμης πρακτικά συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού της πούδρας τα οποία αρχίζοντας να τα απορροφούν διεγείρονται. Αυτή η ενεργειακή διέγερση, μακροσκοπικά εκφράζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή πρόσπτωσης του υλικού. Το φαινόμενο της αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή των κόκκων που προσπίπτει η δέσμη laser είναι η αρχή ενός αλυσιδωτού θερμικού φαινομένου που συμβαίνει κατά την διάρκεια της κατεργασίας SLS/SLM. Οι κόκκοι που θερμαίνονται από την δέσμη laser αρχικά αλληλοεπιδρούν θερμικά με τους γειτονικούς τους διπλανούς και με τους από κάτω τους κόκκους με το φαινόμενο της αγωγής (conduction). Οι διπλανοί κόκκοι κάνουν το ίδιο με τους δικούς τους διπλανούς και από κάτω κόκκους πάλι με το φαινόμενο της αγωγής. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας πολύ μικρής τοπικά περιοχής κόκκων που παρουσιάζει αυξημένη θερμοκρασία σε σχέση με την υπόλοιπη σκόνη. Η αύξηση της θερμοκρασίας στους κόκκους της περιοχής αυτής σημαίνει πρακτικά αύξηση ενέργειας στο ατομικό επίπεδο των κόκκων. Η ενεργειακή αύξηση αυτή (σε κόκκους ενός μόνο υλικού) οδηγεί στην διέγερση των ατόμων του υλικού της σκόνης που με την σειρά της προκαλεί την διάχυσή τους με αποτέλεσμα την ύπαρξη του φαινομένου SSS όπως περιγράφεται παραπάνω. Εντονότερη θέρμανση οδηγεί εν τέλει στην πλήρη τήξη. Όλο το φαινόμενο της θέρμανσης γίνεται περιοδικά για παλμικά laser.

Πέρα όμως από την αγωγή που συμβαίνει μέσα στους κόκκους εμφανίζεται και το φαινόμενο της συναγωγής (convection) μεταξύ των κόκκων και του περιβάλλοντος. Αυτό το φαινόμενο είναι πρακτικά που θα οδηγήσει στην μείωση της θερμοκρασίας (cooling) των κόκκων όσο το laser θα προχωράει από περιοχή σε περιοχή είτε πυροσυσσωματόνοντας, είτε τήκοντας το υλικό των κόκκων. Έτσι πάνω στο powder bed δημιουργείται μια χωρική θερμοκρασιακή κατανομή λόγω της αλληλεπίδρασης του laser με τους κόκκους της κάθε στρώσης.

3.2.3.7.1 *Μαθηματική περιγραφή φαινομένου*

Η μαθηματική περιγραφή του θερμικού φαινομένου ενός συστήματος SLS/SLM πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Fourier [14], [15]:

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \Phi = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Με αρχικές συνθήκες:

$$\text{Αρχική θερμοκρασία: } T(x, y, z, 0) = T_0$$

Και συνοριακές συνθήκες:

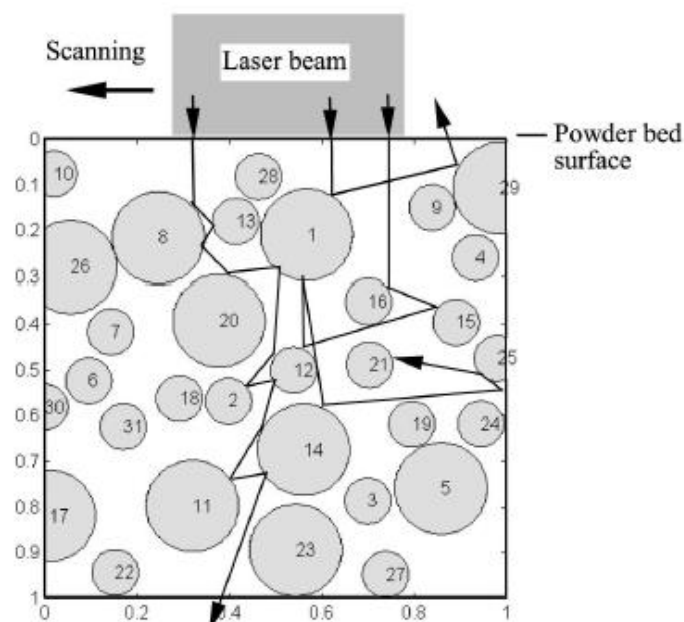
$$\text{Επιφανειακή συναγωγή και ακτινοβολία: } -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \varepsilon_{\theta} \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{\theta}^4) + h \cdot (T - T_{\theta})$$

$$\text{Καμία απώλεια στο κάτω μέρος: } -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$$

Όπου:

- λ : θερμική αγωγιμότητα σκόνης
- ρ : πυκνότητα σκόνης
- c : θερμική χωρητικότητα
- Φ : θερμότητα που απορροφάται από το laser ανά μονάδα επιφάνειας
- T_0 : η αρχική θερμοκρασία της σκόνης
- T_e : η θερμοκρασία περιβάλλοντος
- ε_{θ} : συντελεστής θερμικής ακτινοβολίας
- σ : η σταθερά του Stefan-Boltzmann
- h : ο συντελεστής συναγωγιμότητας της σκόνης

Η τυχαίτητα πρόσπτωσης των φωτονίων της δέσμης laser πάνω στους τυχαία διατεταγμένους και τυχαίου μεγέθους κόκκους της σκόνης (βλ. Σχήμα 3.3) είναι μια βασική δυσκολία του



Σχήμα 3.3: Τυχαίτητα φαινόμενου πρόσπτωσης φωτονίων στους κόκκους της σκόνης.

μοντέλου και επομένως δεν μπορεί να λυθεί με ακρίβεια αριθμητικά ή αναλυτικά για την εύρεση της πραγματικής θερμοκρασίας πάνω στην επιφάνεια των κόκκων. Παραδοχές πάνω στα γεωμετρικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά της δέσμης μπορούν όμως να γίνουν για την εύρεση της θερμοκρασίας που προσδίδεται στην σκόνη. Γενικά μια δέσμη laser μπορεί να χαρακτηριστεί από τρία μεγέθη:

1. ονομαστική διάμετρο
2. ισχύ
3. κατανομή της πυκνότητας ενέργειας.

Σύμφωνα με αυτό και κάνοντας ως παραδοχή πως έχουμε μια Gaussian δέσμη, παίρνουμε την παρακάτω χαρακτηριστική εξίσωση για την πυκνότητα θερμότητας της δέσμης (ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας) πάνω στην επιφάνεια πρόσπτωσης των κόκκων:

$$\Phi(r) = \alpha \cdot \Phi_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{w(z)^2}} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

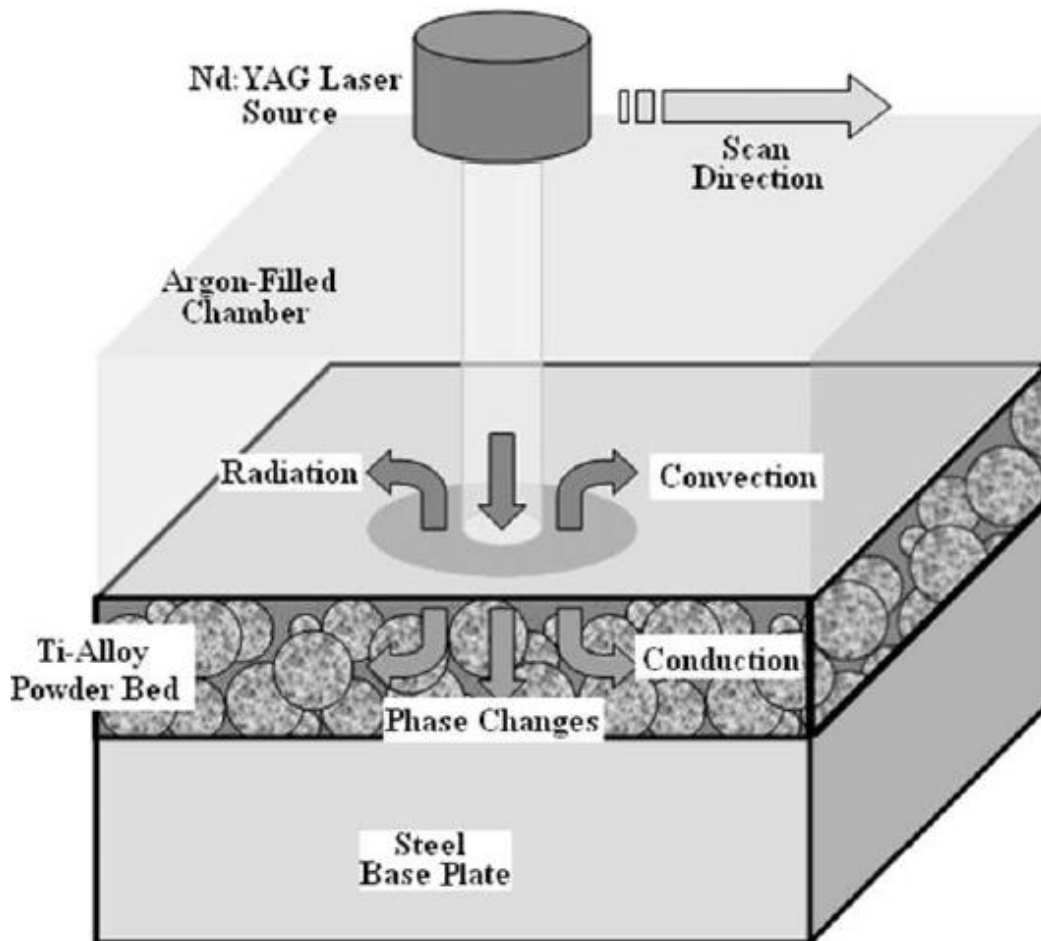
Όπου:

- $w(z)$: είναι η απόσταση από το κεντρικό άξονα της δέσμης μέχρι το σημείο που η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης έχει μειωθεί κατά έναν παράγοντα $1/e^2$ από την τιμή που έχει στον άξονα (τιμή Φ_0). Η εν λόγω απόσταση εξαρτάται από την απόσταση που βρισκόμαστε μπροστά από το laser (απόσταση z) και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας της δέσμης laser.
- r : είναι η ακτινική απόσταση από τον κεντρικό άξονα της δέσμης
- α : συντελεστής απορρόφησης θερμότητας της σκόνης
- Φ_0 : είναι η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης στον κεντρικό άξονα. Ισχύει ότι $\Phi_0 = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot w^2}$, όπου P η συνολική ισχύς της δέσμης laser. Για παλμικό laser, P είναι η ισχύς του κάθε παλμού.

Με βάση αυτά μπορεί να στηθεί ένα απλουστευμένο μοντέλο, που με αριθμητικές μεθόδους και κάνοντας αρκετές παραδοχές πάνω στο σχήμα των κόκκων και την τυχαιότητα της διάταξής τους, να δώσει λύσεις κοντά στην πραγματικότητα μέσα από ένα σύστημα προσομοίωσης.

Παρόλα αυτά αξίζει να σημειώσουμε πως στην τελική θέρμανση της περιοχής των κόκκων από το laser σημαντικότατο ρόλο, πέρα από τα ενεργειακά και την γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης laser που χρησιμοποιείται, παίζει και η ανακλαστικότητα και το χρώμα του υλικού των κόκκων, παράγοντες που είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν σε ένα συνολικό μοντέλο μαθηματικής περιγραφής του συστήματος SLS/SLM. Μεγαλύτερη ανακλαστικότητα και φωτεινότερο χρώμα σημαίνει πως λιγότερη θερμότητα θα απορροφηθεί από τους κόκκους, όπως και αντίστοιχα μεγαλύτερη διάμετρος δέσμης σημαίνει μικρή πυκνότητα ενέργειας, άρα

για μια πιο αργή κατεργασία. Στην εικόνα του σχήματος 3.4 παριστάνεται το συνολικό θερμικό φαινόμενο από το laser-powder interaction ενός συστήματος SLS/SLM.



Σχήμα 3.4: Το θερμικό φαινόμενο στην κατεργασία SLS/SLM παραστατικά.

3.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής SLS/SLM

Με βάση την παραπάνω ανάλυση πάνω στο πως υλοποιείται μια SLS/SLM κατεργασία, παρουσιάζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής:

Πλεονεκτήματα:

- Τα προϊόντα της τεχνικής αυτής φέρουν υψηλή αντοχή και ακαμψία λόγω του υψηλού ποσοστού στο πορώδες τους (για SLS συστήματα) το οποίο μπορεί να φτάσει και το 60% σε τεμάχια με SSS.
- Καλή χημική αντοχή.
- Επιτρέπει την κατεργασία μιας μεγάλης γκάμας υλικών από πολυμερή μέχρι μέταλλα, κεραμικά ή και γυαλί.

- Με κατάλληλες ρυθμίσεις θεωρείται η πιο γρήγορη τεχνική 3D printing για λειτουργικά και ανθεκτικά πρωτότυπα ή τεμάχια για χρήση (end user products).
- Καμία χρήση μηχανισμών στήριξης των τεμαχίων κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. Το τεμάχιο πρακτικά στηρίζεται από μόνο του στην σκόνη. Αυτό δίνει την δυνατότητα για την δημιουργία φοβερά περίπλοκων γεωμετριών που με κάποια άλλη τεχνική 3D printing δεν θα ήταν δυνατό να υλοποιηθούν.

Μειονεκτήματα:

- Πολλές κατασκευαστικές παράμετροι για την σωστή δημιουργία προϊόντος λόγω του περίπλοκου φαινομένου laser-powder interaction και των παράπλευρων φαινομένων που φέρει.
- Τα προϊόντα μετά το πέρας της κατεργασίας απαιτούν συνήθως κάποιο post-processing. Για παράδειγμα φινίρισμα ή για την μείωση του πορώδους την χρήση σφραγιστικού υλικού όπως κυανοακρυλικό.

3.3 Μηχανή SLS/SLM εργαστηρίου

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η παρουσίαση λειτουργίας της μηχανής SLS/SLM του εργαστηρίου. Η κατασκευή των βασικών μερών λειτουργίας έγινε από τους Ρογάρη [3], Κυριακόπουλο [4] και Ψαρομμάτη [5].

3.3.1 Βασικά μέρη της μηχανής

Τα βασικά μέρη της μηχανής του εργαστηρίου είναι τα εξής:

1. Κινούμενη κεφαλή laser

Η διάταξη της κεφαλής laser αποτελείται από ένα γεφυρωτό σύστημα δύο κινητήρων που θα μπορούσε να παρομοιαστεί με ένα καρτεσιανό ρομπότ δύο βαθμών ελευθερίας. Πάνω στο σύστημα υπάρχει βάση για την συγκράτηση της οπτικής κεφαλής του laser Ylia M20 στα 100 mm πάνω από την τράπεζα σκόνης που γίνεται η κατασκευή. Το όλο σύστημα επιτρέπει την κίνηση του laser στο επίπεδο x-y της κατεργασίας. Στις 4 ακραίες θέσεις κίνησης που μπορεί να βρεθεί το laser (δύο για κάθε άξονα) υπάρχουν ειδικοί διακόπτες που κόβουν την τροφοδοσία των κινητήρων έτσι ώστε να αποφευχθεί ζημιά στο σύστημα.

2. Τράπεζα εναπόθεσης σκόνης

Κάτω από το σύστημα της κινούμενης κεφαλής του laser, υπάρχει η τράπεζα της σκόνης. Είναι διαστάσεων 285x285 (mm) και μπορεί να κινηθεί προς τα κάτω κατά 143 mm, αποτελώντας το άξονα z της κατεργασίας. Η τράπεζα στηρίζεται σε τέσσερις κοχλίες κίνησης. Η προς τα κάτω κίνηση γίνεται από ένα σύστημα κινητήρα με ιμάντα, ο οποίος ουσιαστικά βιδώνει/ξεβιδώνει την τράπεζα στους τέσσερις κοχλίες κίνησης με αποτέλεσμα το ανεβοκατέβασμά της. Στην κάτω ακραία θέση κίνησης υπάρχουν διακόπτες που διακόπτουν την τροφοδοσία στον κινητήρα του z άξονα για ασφάλεια.

3. Σύστημα εναπόθεσης σκόνης

Το σύστημα εναπόθεσης σκόνης είναι υπεύθυνο για το άπλωμα της σκόνης της κάθε φορά επόμενης στρώσης πάνω στην τράπεζα. Αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- i. *Το δοχείο της σκόνης.* Είναι ένα κουτί μέσα στο οποίο συγκρατείται η σκόνη και φέρει καπάκι στο κάτω μέρος του. Το καπάκι είναι μέρος ενός κυλίνδρου που στρέφεται από βηματικό κινητήρα μέσω ιμάντα κάθε φορά που θέλουμε να ανοιχτεί και να επιτρέψει στην σκόνη να πέσει στα δοχεία δόσεων του συστήματος απλώματος της σκόνης.
- ii. *Το σύστημα απλώματος.* Το σύστημα απλώματος της σκόνης είναι ένας μηχανισμός με τα παρακάτω μέρη:
 - Δοχεία δόσεων σκόνης (doser). Είναι δοχεία πάνω στα οποία πέφτει η σκόνη κάθε φορά που βρίσκονται κάτω από το καπάκι του μεγάλου δοχείου σκόνης. Σε συγκεκριμένα σημεία που κινείται το συνολικό σύστημα απλώματος, κινητήρας μέσω κάποιας ειδικής βηματικής διαμόρφωσης τα στρέφει με αποτέλεσμα να εναποθέτουν σκόνη μπροστά από το σύστημα του απλώματος. Τα δοχεία είναι δύο σε αριθμό έτσι ώστε να εναποτίθεται σκόνη και στις δύο κατευθύνσεις κίνησης του συνολικού συστήματος.
 - Κύλινδρος απλώματος (roller). Η σκόνη που εναποτίθεται από τα δοχεία απλώνεται πάνω στην τράπεζα μέσω του κυλίνδρου απλώματος. Ο κύλινδρος στρέφεται αντίθετα από την πορεία κίνησης του συνολικού συστήματος έτσι ώστε να εξασφαλίζεται το σωστό άπλωμα της σκόνης.
- iii. *Σύστημα κίνησης.* Το σύστημα απλώματος σκόνης που περιγράφηκε κινείται από την μία άκρη της τράπεζας σκόνης μέχρι την άλλη άκρη της και αντίστροφα. Αυτό γίνεται μέσω ενός κοχλίου κίνησης που στρέφεται από ένα βηματικό κινητήρα. Στην κίνηση που κάνει το σύστημα απλώματος υπάρχουν διακόπτες θέσεως σε κομβικά σημεία, τα οποία με την σειρά είναι:

Κατά την κίνηση προς τα δεξιά:

Το σύστημα αρχίζει την κίνηση του μέχρι το πρώτο σημείο.

1. Όταν ο πρώτος κατά σειρά doser (ο δεξιός) βρίσκεται κάτω από το καπάκι του δοχείου σκόνης, τότε με κατάλληλη επενέργεια το καπάκι του δοχείου ανοίγει και ρίχνεται σκόνη στο doser. Το σύστημα συνεχίζει την κίνηση του μέχρι το επόμενο σημείο.
2. Όταν ο δεύτερος doser (ο αριστερός) βρίσκεται κάτω από το καπάκι του δοχείου, το καπάκι πάλι ανοίγει ρίχνοντας σκόνη. Το σύστημα συνεχίζει να κινείται μέχρι το επόμενο σημείο.
3. Κατά την άφιξη του συστήματος εναπόθεσης σκόνης στην άκρη της τράπεζας σκόνης, ο δεξιά doser περιστρέφεται εναποθέτοντας σκόνη πάνω στην τράπεζα. Το σύστημα συνεχίζει να κινείται με τον roller πλέον να απλώνει την σκόνη που έριξε ο πρώτος doser πάνω στην τράπεζα της μηχανής.
4. Το σύστημα συνεχίζει να κινείται μέχρι την άλλη άκρη της τράπεζας της μηχανής όπου υπάρχει ένας ειδικός διακόπτης σήμανσης. Ο διακόπτης αυτός ονομάζεται RIGHT SWITCH και αλλάζει το περιεχόμενο μιας μεταβλητής στο προγραμματιστικό κομμάτι της μηχανής, που θα αναφερθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην συνέχεια. Η μεταβλητή αυτή είναι η M201. Με την σήμανση του διακόπτη το σύστημα απλώματος έχει φτάσει λίγο έξω από την άκρη του τραπεζιού σκόνης και πλέον πρέπει να επιστρέψει για το άπλωμα της σκόνης που βρίσκεται στον δεύτερο doser (αριστερό). Πριν την επιστροφή του, παρόλα αυτά, το laser μπορεί να έχει προχωρήσει στην δημιουργία μιας στρώσης.

Κατά την κίνηση προς τα αριστερά:

5. Το σύστημα αρχίζει να μετακινείται προς τα αριστερά από την δεξιά άκρη του τραπεζιού σκόνης. Εκεί ο δεύτερος doser στρέφεται για να εναποθέσει το περιεχόμενό του σε σκόνη που έχει από το αρχικό γέμισμα που έγινε στο σημείο 2.
Το σύστημα μετά την εναπόθεση της σκόνης κινείται προς τα αριστερά με τον roller πλέον να απλώνει την σκόνη που εναποθετήθηκε πάνω στην τράπεζα σκόνης της μηχανής.
6. Το σύστημα θα συνεχίσει να κινείται μέχρι το άλλο άκρο της τράπεζας και ακόμη πιο έξω από την τράπεζα μέχρι τον διακόπτη σήμανσης της

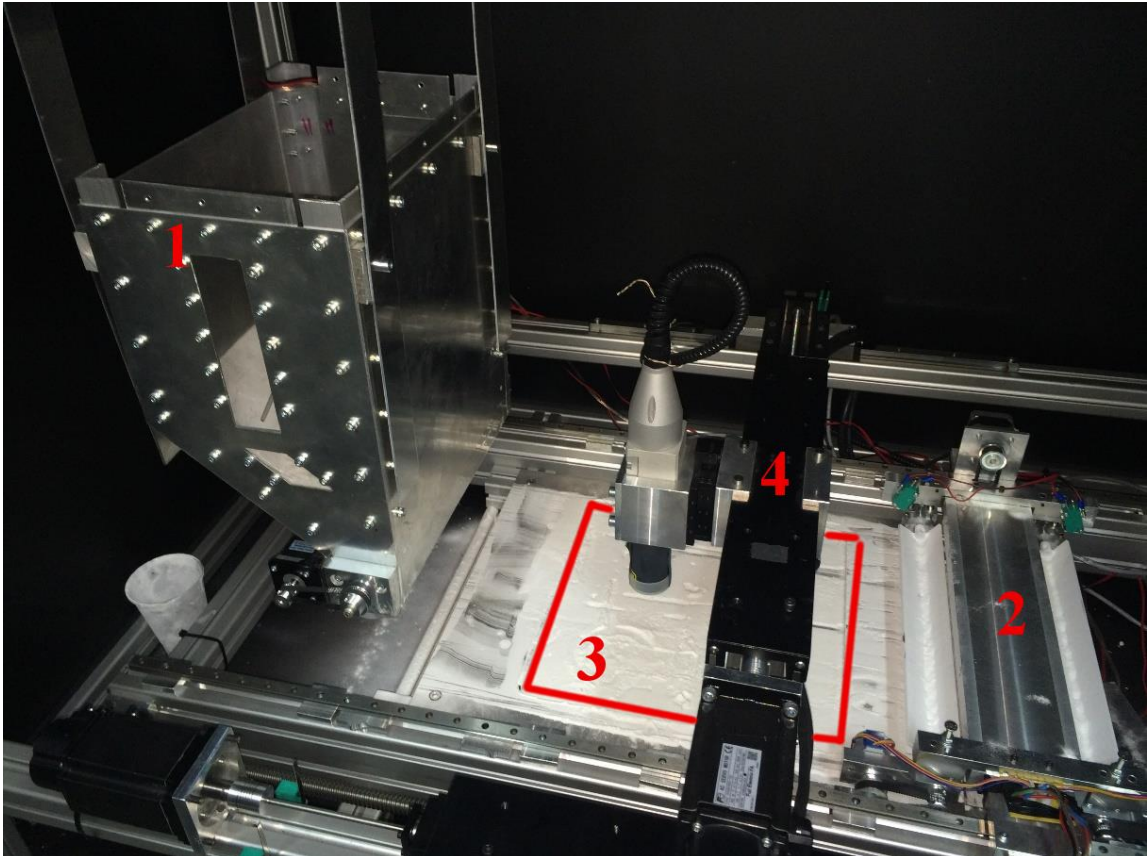
αριστερής πλευράς. Αυτός ο διακόπτης ονομάζεται LEFT SWITCH και αλλάζει παρόμοια με τον αντίστοιχο διακόπτη στα δεξιά το περιεχόμενο μιας μεταβλητής στο σύστημα ελέγχου της μηχανής. Η μεταβλητή αυτή ονομάζεται M200. Όπως θα παρουσιαστεί και στην συνέχεια αυτές οι δύο μεταβλητές είναι πολύ χρήσιμες κατά τον αριθμητικό προγραμματισμό της μηχανής.

Η διαδικασία του συστήματος κίνησης που αναφέρθηκε συμβαίνει πάντα ανά δύο στρώσεις εναποθέτοντας σκόνη για την κάθε φορά επόμενη στρώση κατασκευής. Η αναγνώριση των κομβικών σημείων που πρέπει να γίνουν οι συγκεκριμένες ενέργειες που αναφέρθηκαν γίνεται μέσω ενός αθροιστή, ο οποίος κάθε φορά που φτάνει σε κάποιο σημείο προσθέτει/αυξάνεται κατά ένα. Έτσι το σύστημα γνωρίζει αριθμητικά κάθε φορά που βρίσκεται.

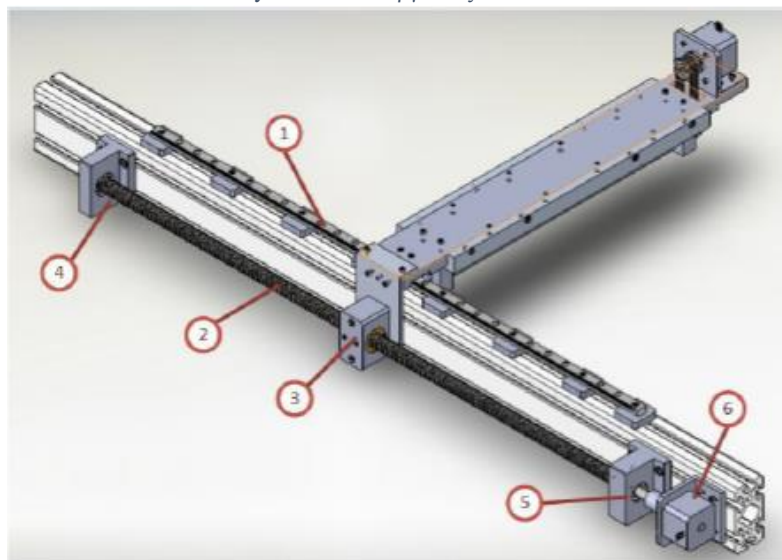
4. Θάλαμος μηχανής

Όλα τα συστήματα που αναφέρθηκαν βρίσκονται μέσα σε στον θάλαμο της μηχανής. Ο θάλαμος αποτελείται από φύλλα σιδήρου πάχους 1 mm μαύρου χρώματος για την μείωση των ανακλάσεων της δέσμης του laser. Τα φύλλα σιδήρου συγκρατούνται από το πλαίσιο του θαλάμου το οποίο είναι κατασκευασμένο από προφίλ αλουμινίου τετραγωνικής διατομής 40x40 (mm). Ο εσωτερικός χώρος του θαλάμου έχει διαστάσεις 840x1160 (mm) και ύψος 800mm. Οι εξωτερικές διαστάσεις του είναι 1240x8800 (mm) και ο θάλαμος βρίσκεται σε ύψος 1700 mm στηριζόμενος από 4 πόδια από προφίλ αλουμινίου. Μεταξύ του φύλλου σιδήρου και του προφίλ αλουμινίου υπάρχει στεγανοποιητικό λάστιχο. Παρόλα αυτά κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας κρίθηκε πως ο θάλαμος πρακτικά δεν είναι στεγανοποιημένος με την υπάρχουσα μορφή του, λόγω της ύπαρξης κενών για να περάσουν οι καλωδιώσεις των κινητήρων, του laser και των διακοπών σήμανσης και διακοπής τροφοδοσίας που χρησιμοποιούνται εντός του προς τον πίνακα ελέγχου που βρίσκεται έξω από την μηχανή. Ο θάλαμος φέρει επίσης πόρτα με διακόπτη διακοπής της τροφοδοσίας του laser όταν αυτή είναι ανοιχτή για ασφάλεια μη απευθείας έκθεσης του χειριστή της μηχανής στην υψηλής ισχύος δέσμη laser, καθώς και παράθυρο στην μία πλευρά του, με τζάμι ειδικής προστασίας (P1K03) για την ακτινοβολία της δέσμης laser, για την επίβλεψη της κατεργασίας. Τέλος, στην μία πλευρά του θαλάμου υπάρχει διακόπτης έκτακτης ανάγκης (διακόπτης μανιτάρι), ο οποίος αν πατηθεί διακόπτει την τροφοδοσία όλων των κινητήρων που αναφέρθηκαν, καθώς και την τροφοδοσία για το laser, με αποτέλεσμα την απότομη διακοπή λειτουργίας της μηχανής.

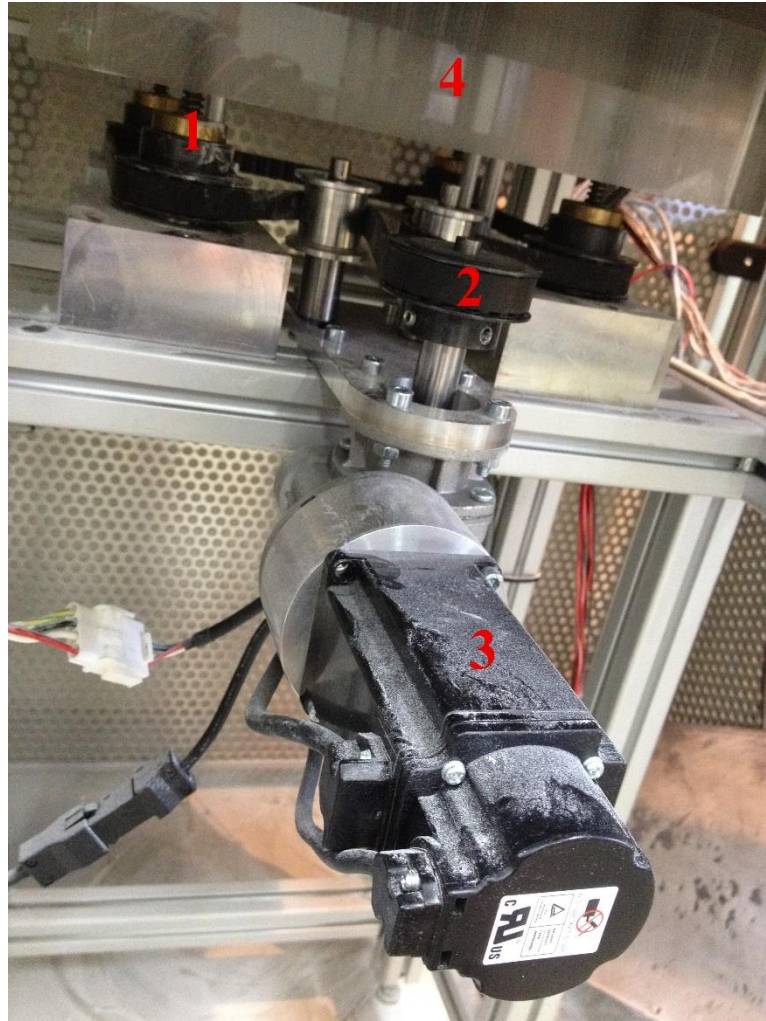
Τα μέρη που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στις εικόνες των παρακάτω σχημάτων.



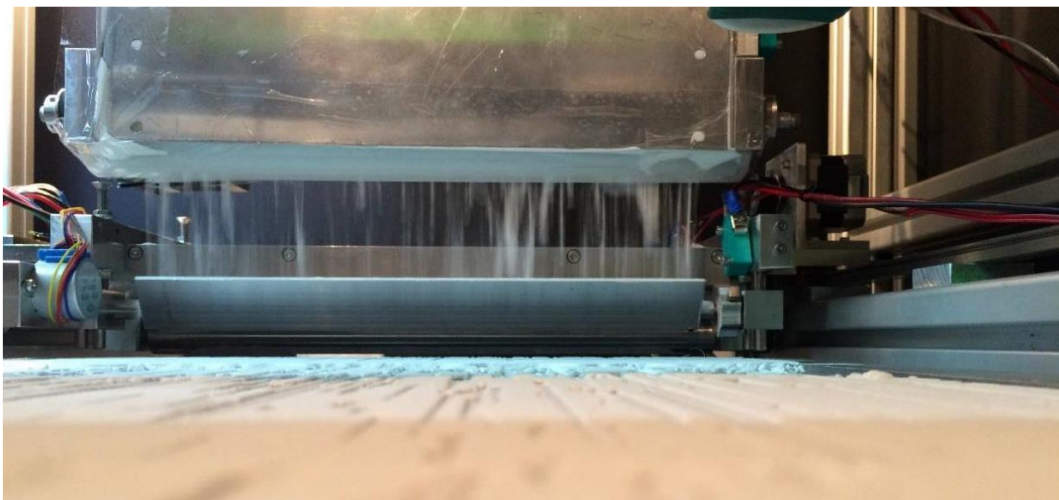
Σχήμα 3.5: Εσωτερικό μηχανής. Εντοπίζονται τα εξής: 1. Δοχείο σκόνης, 2. Σύστημα απλώματος με roller από κάτω και αριστερό και δεξιό doser, 3. Τράπεζα σκόνης, 4. Σύστημα κίνησης της οπτικής κεφαλής του laser Ylia M20 στο x-y επίπεδο κατεργασίας.



Σχήμα 3.6: Σχέδιο με το σύστημα κίνησης του συστήματος απλώματος σκόνης μόνο με τον roller. Εντοπίζονται τα εξής: 1. Ράγες κίνησης του συστήματος. 2. Γραμμικός κοχλίας κίνησης, 3. Συγκράτηση συστήματος απλώματος πάνω στον κοχλία κίνησης. 4. Έδρανο συγκράτησης κοχλία κίνησης στο σώμα της μηχανής, 5. Δεύτερο έδρανο συγκράτησης του κοχλία κίνησης στο σώμα της μηχανής. 6. Βηματικός κινητήρας κίνησης δεξιά ή αριστερά του συστήματος απλώματος



Σχήμα 3.7: Το σύστημα μετακίνησης της τράπεζας σκόνης στον z άξονα. Βρίσκεται εκτός θαλάμου. Εντοπίζοντας τα εξής: 1. Οι τέσσερις κοχλίες κίνησης πάνω στους οποίους είναι στερεωμένη η τράπεζα σκόνης. 2. Ο μάντας που στρέφει τους 4 κοχλίες κίνησης ανεβοκατεβάζοντας την τράπεζα, 3. Ο κινητήρας που επενεργεί πάνω στον μάντα, 4. Plexiglass έτσι ώστε κατεβαίνοντας η τράπεζα, η σκόνη που βρίσκεται πάνω της να συγκρατείται εντός θαλάμου της μηχανής.



Σχήμα 3.8: Άνοιγμα καπακιού δοχείου σκόνης και ρίψη σκόνης στον δεξιό doser. Η ίδια διαδικασία συμβαίνει και για τον αριστερό doser στην αρχή της συνολικής κίνησης του συστήματος απλώματος σκόνης.

3.3.2 Σύστημα ελέγχου της μηχανής

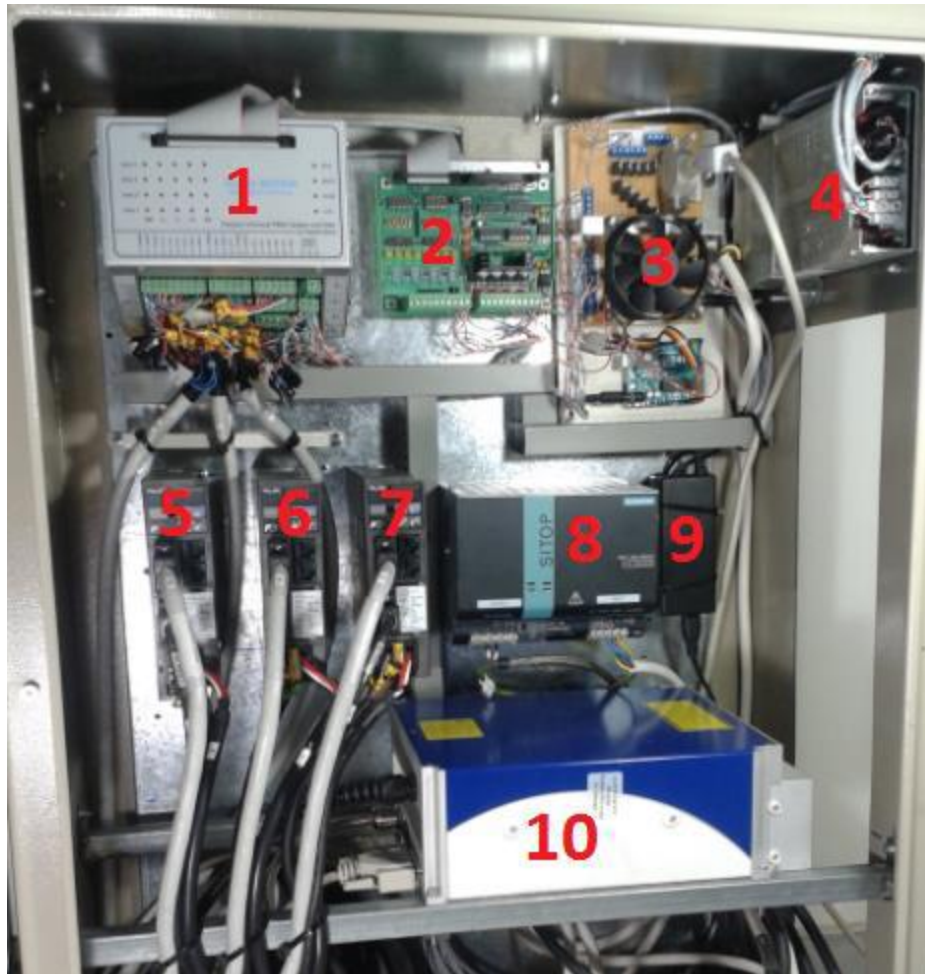
Η ύπαρξη τόσων πολλών κινητήρων για την σωστή λειτουργία των μηχανικών μερών της μηχανής που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ενός εξαιρετικά σημαντικού για την κατεργασία συστήματος laser και διακοπών σήμανσης και ασφάλειας για τον χρήστη και τα μηχανικά μέρη της μηχανής απαιτεί και την παρουσία ενός ενιαίου και αξιόπιστου συστήματος ελέγχου. Αυτό το σύστημα ελέγχου υλοποιείται μέσω του ελεγκτή Pmac-PC [16].

Ο Pmac-PC είναι μια κάρτα αυτομάτου ελέγχου κίνησης υψηλής απόδοσης. Διαθέτει έναν επεξεργαστή Motorola DSP56001, ο οποίος έχει την δυνατότητα χειρισμού πραγματικού εξοπλισμού μεγάλης ταχύτητας, ακρίβειας και επαναληψιμότητας. Ο ελεγκτής αυτός είναι ευέλικτος, κατάλληλος για πολλά και διαφορετικά είδη εφαρμογών σε συνδυασμό με διαφορετικού τύπου αισθητήρων, ενισχυτών και κινητήρων, ενώ έχει την δυνατότητα προσαρμογής στις εκάστοτε απαιτήσεις ενός ελεγχόμενου συστήματος, με χρήση κατάλληλου hardware και λογισμικού. Μπορεί να λειτουργήσει πλήρως αυτόνομα, αλλά και συνδεδεμένος με υπολογιστή, μέσω παράλληλης θύρας ή διαύλου. Ο Pmac-PC είναι διαθέσιμος σε τέσσερις βασικές εκδόσεις. Κάθε έκδοση υποστηρίζεται από διαφορετικά προαιρετικά εξαρτήματα, τα οποία είναι εξειδικευμένα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ τους είναι η ποικιλία προδιαγραφών λειτουργίας, η θωράκιση από εξωτερικές παρεμβολές, ο τύπος των διαύλων επικοινωνίας, η ισχύς τους και η διαφοροποίηση τους ως προς τον τρόπο διασύνδεσης με προαιρετικά εξαρτήματα. Οι τέσσερις εκδόσεις είναι: Pmac-Mini, Pmac-Lite, Pmac-STD και Pmac-VME.

Για την μηχανή του εργαστηρίου, επιλέχθηκε ο ελεγκτής Pmac-PCI-Lite, ο οποίος συνδέθηκε με υπολογιστή μέσω παράλληλης θύρας PCI-Bus. Ο Pmac-PCI-Lite είναι ένας ελεγκτής κατάλληλος για ακριβή έλεγχο σερβομηχανισμών. Διαθέτει επίσης 4MB επανεγράψιμης flash memory για αποθήκευση προγραμμάτων εκτέλεσης και 3MB O-wait-state flash-backed Static RAM για αποθήκευση σημαντικών μεταβλητών κατάστασης, ενώ δίνεται και η δυνατότητα φιλοξενίας προγραμμάτων ταχείας εκτέλεσης. Τέλος, ο ελεγκτής μπορεί να δεχτεί από τον χρήστη και εντολές online ελέγχου.

Το σύστημα ελέγχου της μηχανής πέρα από τον ελεγκτή διαθέτει και τα περιφερειακά εξαρτήματά του, τα οποία του επιτρέπουν πέρα από τον έλεγχο των βασικών κινητήρων και τον έλεγχο του laser και των διακοπών σήμανσης και διακοπής τροφοδοσίας.

Ο πίνακας ελέγχου της μηχανής παρουσιάζεται στην εικόνα του σχήματος 3.9.



Σχήμα 3.9: Πίνακας ελέγχου της μηχανής SLS/SLM του εργαστηρίου. Διακρίνονται τα εξής:
 1. Διάταξη Pmac-CUIF, 2. 8IN/8OUT Board, 3. Διάταξη ελέγχου μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης και laser, 4. Τροφοδοτικό διάταξης Pmac-CUIF, 5. Βαθμίδα ενίσχυσης κινητήρα άξονα X, 6. Βαθμίδα ενίσχυσης κινητήρα άξονα Y, 7. Βαθμίδα ενίσχυσης κινητήρα άξονα Z, 8. Τροφοδοτικό μονάδας laser, 9. Τροφοδοτικό διάταξης ελέγχου μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης και laser, 10. Μονάδα του laser Ylia M20.

Το κάθε εξάρτημα ελέγχει συγκεκριμένα μέρη της μηχανής και έμμεσα ή άμεσα είναι συνδεδεμένο με τον ελεγκτή της Pmac ο οποίος συντονίζει τον έλεγχο αυτό. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της λειτουργίας των βασικών μερών του πίνακα ελέγχου της μηχανής:

1. Pmac-CUIF (Compact Universal PMAC Isolator & Filter)

Η διάταξη αυτή αποτελεί το μέσο επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή Pmac και του περιβάλλοντος. Είναι υπεύθυνη για την προστασία του ηλεκτρονικού του κυκλώματος από εξωτερικές παρεμβάσεις στο σύστημα οδήγησης και παρέχει γαλβανική απομόνωση στα σήματα ενισχυτών-κινητήρων, στα σήματα ανάδρασης και στα σήματα συμβάντων-διακοπών. Διαθέτει διατάξεις φίλτρων ελάττωσης θορύβου στις εισόδους/εξόδους, ενώ παράλληλα προστατεύει τον ελεγκτή από αρνητικές συνέπειες προκαλούμενες από αιχμές ζήτησης, γειώσεις και βραχυκυκλώσεις. Στην διάταξη αυτή

είναι συνδεδεμένοι οι κινητήρες των 3 αξόνων, οι διακόπτες των ακραίων θέσεων τους και ο διακόπτης έκτακτης ανάγκης και της ασφάλειας της πόρτας για το laser.

2. 8IN/8OUT Board

Η κάρτα αυτή αποτελεί ένα μέσο επικοινωνίας του ελεγκτή της Pmac με τον μικροελεγκτή του ηλεκτρονικού κυκλώματος ελέγχου του συστήματος εναπόθεσης σκόνης και του laser. Η χρησιμοποίηση της είναι απαραίτητη λόγω της μη ύπαρξης αρκετών διαθέσιμων θυρών στην Pmac-CUIF. Πιο συγκεκριμένα, στην κάρτα φτάνουν τα σήματα των διακοπών (LEFT και RIGHT SWITCH) του συστήματος εναπόθεσης σκόνης, της ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της δέσμης laser και τα δύο σήματα του κινητήρα που μετακινεί το σύστημα απλώματος της σκόνης (για κίνηση δεξιά και αριστερά).

3. Διάταξη ελέγχου εναπόθεσης σκόνης και laser

Αυτό είναι το κύκλωμα που δημιουργήθηκε από τον Κυριακόπουλο [4] και πρακτικά υλοποιεί τον έλεγχο του laser της μηχανής μέσω του SUB-D25 connector καθώς και τον έλεγχο του κινητήρα που μετακινεί το σύστημα απλώματος σκόνης και του κινητήρα του roller, ο οποίος στρέφεται αντίθετα της φοράς κίνησης του συνολικού συστήματος απλώματος. Ο άμεσος έλεγχος του hardware γίνεται μέσω μικροελεγκτή Arduino, ενώ οι εντολές ελέγχου δίνονται από ελεγκτή της Pmac. Με αυτόν τον τρόπο, τα σήματα ελέγχου του συστήματος εναπόθεσης σκόνης και laser ουσιαστικά έχουν εμφωλευθεί στο σύστημα ελέγχου της Pmac μέσω της κάρτας 8IN/8OUT Board. Σε αυτό το κύκλωμα ο Ψαρομμάτης [5] πρόσθεσε τον έλεγχο των κινητήρων περιστροφής των doser και του κινητήρα που ανοίγει το καπάκι του δοχείου σκόνης με έναν επιπλέον μικροελεγκτή Arduino. Αυτός ο μικροελεγκτής λειτουργεί αυτόνομα κάθε φορά που του δίνεται τροφοδοσία και δεν είναι σε θέση να δεχτεί εντολές από χρήστη, άρα πρακτικά δεν είναι συνδεδεμένος με την κάρτα ελέγχου της Pmac. Κύρια δουλειά του είναι μέσω ενός διακόπτη-counter να ξέρει που βρίσκεται το σύστημα απλώματος σκόνης κάθε φορά έτσι ώστε να δίνεται εντολή ελέγχου στους κατάλληλους κινητήρες. Η εύρεση των συγκεκριμένων θέσεων γίνεται με την αύξηση του counter στα σημεία αυτά. Αυτή η αύξηση γίνεται όταν ο διακόπτης-counter ανοιγοκλείσει λόγω διαμορφώσεων που έχουν τοποθετηθεί στα σημεία που μας ενδιαφέρουν.

4. Βαθμίδα ενίσχυσης κινητήρων

Είναι υπεύθυνη για την οδήγηση και ρύθμιση του κινητήρα του κάθε άξονα. Ο ενισχυτής αυτός είναι της εταιρείας Fuji Electric (κωδικός RYC401D3-VVT2) όπως και ο κινητήρας που της αντιστοιχεί. Διαθέτει πλήκτρα και οθόνη για χειροκίνητο

έλεγχο των κινητήρων καθώς και διάφορες επιλογές παραμετροποίησης τους (επιτάχυνση/επιβράδυνση, χρόνοι επιτάχυνσης/επιβράδυνσης, μέγιστη ταχύτητα, μέγιστο ρεύμα κτλ.).

5. Μονάδα του laser Ylia M20

Η ανάλυση της λειτουργίας έχει γίνει στο Κεφάλαιο 2 των laser.

3.3.3 Λογισμικό ελέγχου της μηχανής

Η αλληλεπίδραση του χρήστη με τον ελεγκτή της Pmac και κατ' επέκταση με την ίδια την μηχανή γίνεται μέσω υπολογιστή με την εφαρμογή PEWIN32PRO [17]. Μέσω αυτής της εφαρμογής ο χρήστης μπορεί να:

1. Παραμετροποιήσει την μηχανή

Σαν παραμετροποίηση της μηχανής, εννοούμε πρακτικά την παραμετροποίηση των βασικών μεταβλητών της κάρτας ελέγχου της Pmac. Οι βασικές μεταβλητές της Pmac είναι:

➤ *Μεταβλητές τύπου I*

Χρησιμεύουν στην ρύθμιση των συνθηκών για την βέλτιστη συμπεριφορά της κάρτας. Οι μεταβλητές αυτού του τύπου αποτελούν δεδομένες θέσεις στην μνήμη της κάρτας και έχουν προκαθορισμένο αρχικοποιημένο περιεχόμενο και εύρος επιτρεπόμενων τιμών.

➤ *Μεταβλητές τύπου P*

Είναι μεταβλητές χρήστη γενικής προσπέλασης με μη προκαθορισμένη λειτουργία. Η παραμετροποίηση τους πρακτικώς σημαίνει την αλλαγή της τιμής προκαθορισμένων θέσεων μνήμης της Pmac. Χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση καθολικού τύπου μεταβλητών (θέσης, απόστασης, ταχύτητας, χρόνου) ή και σαν πίνακες αναζήτησης.

➤ *Μεταβλητές τύπου Q*

Είναι μεταβλητές γενικού σκοπού και ανήκουν και αυτές σε προκαθορισμένες θέσεις μνήμης του ελεγκτή. Η κύρια διαφορά τους σε σχέση με τις μεταβλητές τύπου P είναι ότι αυτές αποτελούν υλοποιήσεις σχετιζόμενες με το σύστημα αναφοράς στο οποίο αναφέρονται. Με αυτές υλοποιείται η μεταβίβαση πληροφορίας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων συντεταγμένων.

➤ *Μεταβλητές τύπου M*

Αυτές οι μεταβλητές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται πολλές φορές από το σύστημα. Μέσω των μεταβλητών τύπου M εξασφαλίζεται συντομότερος χρόνος προσπέλασης των δεδομένων, ενώ παράλληλα η επεξεργαστική δυνατότητα παραμένει διαθέσιμη και τις υπόλοιπες αναγκαίες διαθέσιμες διεργασίες. Αυτές οι μεταβλητές αφορούν την λειτουργία της κάρτας 8IN/8OUT Board. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν 8 μεταβλητές εισόδου (M200-M207) και 8 μεταβλητές εξόδου (M208-M215). Από αυτές τις μεταβλητές, για την μηχανή θα μας απασχολήσουν οι εξής:

- M200 – Μεταβλητή σήμανσης για όταν το σύστημα απλώματος σκόνης φτάνει στην αριστερή ακραία θέση. LEFT SWITCH διακόπτης. Όταν το σύστημα φτάσει στην αριστερή ακραία θέση η μεταβλητή παίρνει την τιμή 0.
- M201 – Μεταβλητή σήμανσης για όταν το σύστημα απλώματος σκόνης φτάνει στην δεξιά ακραία θέση. RIGHT SWITCH διακόπτης. Όταν το σύστημα φτάσει στην δεξιά ακραία θέση η μεταβλητή παίρνει την τιμή 0.
- M208 – Μεταβλητή εντολής για κίνηση του συστήματος απλώματος σκόνης δεξιά. Για την ενεργοποίηση της κίνησης, γίνεται ανάθεση της τιμής 1 στην μεταβλητή. Για την απενεργοποίηση, γίνεται ανάθεση της τιμής 0.
- M209 – Μεταβλητή εντολής για κίνηση του συστήματος απλώματος σκόνης αριστερά. Για την ενεργοποίηση της κίνησης, γίνεται ανάθεση της τιμής 1 στην μεταβλητή. Για την απενεργοποίηση, γίνεται ανάθεση της τιμής 0.
- M210 – Μεταβλητή εντολής ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της δέσμης laser. Με την ανάθεση της τιμής 1, ενεργοποιείται η δέσμη, ενώ με την ανάθεση της τιμής 0, απενεργοποιείται.

Με βάση τις παραπάνω μεταβλητές δημιουργείται ένα αρχείο .cfg, που ουσιαστικά πρέπει να φορτώνεται στον ελεγκτή της μηχανής μέσω της εφαρμογής PEWIN32PRO με το κάθε φορά καινούργιο άνοιγμα της εφαρμογής. Το αρχείο ονομάζεται αρχείο παραμέτρων και μπορεί να δημιουργηθεί σε κάποιον επεξεργαστή κειμένου (editor). Η ανάθεση τιμών στις μεταβλητές των παραμέτρων γίνεται με συγκεκριμένο format που ορίζεται στο manual του ελεγκτή της Pmac και πρακτικά αφορά την ανάθεση ειδικών pointer στις θέσεις μνήμης

που μας ενδιαφέρουν. Η διαδικασία της παραμετροποίησης ονομάζεται backup της μηχανής και ουσιαστικά παραμετροποιεί την όλη διάταξη μέσα στον ελεγκτή. Μετά το backup ο ελεγκτής πλέον γνωρίζει σε ποιες θέσεις μνήμης βρίσκονται οι κινητήρες της μηχανής και που πάνε όλα τα σήματα ελέγχου αυτών και του laser και ο χρήστης μπορεί να την λειτουργήσει μέσω του υπολογιστή και της εφαρμογής PEWIN32PRO. Η διαδικασία του backup για την μηχανή SLS/SLM του εργαστηρίου περιγράφεται στο εγχειρίδιο χρήσης της μηχανής (Κεφάλαιο 4). Η παραμετροποίηση της μηχανής του εργαστηρίου μπορεί να βρεθεί στο CD που δίνεται με την παρούσα διπλωματική εργασία.

2. Εκτελέσει προγράμματα

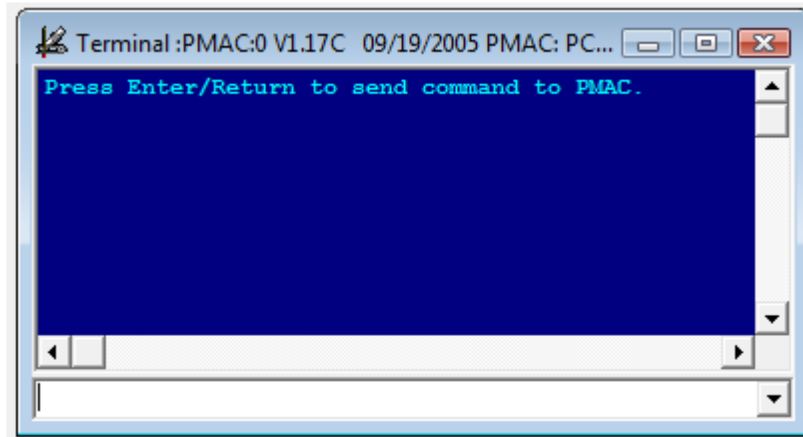
Η PEWIN32PRO σαν εφαρμογή έχει την δυνατότητα εκτέλεσης προγραμμάτων PLC ή PMC. Για την μηχανή του εργαστηρίου μας ενδιαφέρουν μόνο τα προγράμματα PMC. Τα προγράμματα αυτά είναι αριθμητικού ελέγχου και είναι σε G-κώδικα. Μπορούν να γραφούν είτε απευθείας στον editor της εφαρμογής PEWIN32PRO, είτε σε άλλο editor (εξωτερικού περιβάλλοντος της εφαρμογής ή και σε άλλο υπολογιστή) και να αποθηκευτούν με την κατάλληλη επέκταση (.pmc). Στην δεύτερη περίπτωση μπορούν μεταγενέστερα να φορτωθούν στον editor της εφαρμογής και μετά να γίνει το κατέβασμα-φόρτωμα (download) τους σε έναν από τους 256 καταχωρητές (buffer) της κάρτας Pmac για να τα εκτελέσει.

Η κάρτα της μηχανής δέχεται μόνο εντολές γραμμικής παρεμβολής G01, εντολές για τις μεταβλητές εξόδου τύπου M που αναφέρθηκαν και βοηθητικές εντολές όπως την εντολή dwell μαζί με κάποια αριθμητική μεταβλητή χρόνου (σε ms) που επιτρέπει την παύση προγράμματος για τον χρόνο που ορίστηκε. Εντολές ελέγχου ροής προγράμματος (if-endif, while-endwhile, goto, gosub) είναι επίσης διαθέσιμες. Κατά το κατέβασμα του προγράμματος στον καταχωρητή γίνεται έλεγχος για τυχόν συντακτικά λάθη.

Ο ελεγκτής Pmac εκτελεί τα προγράμματα που φορτώνονται στους καταχωρητές του γραμμή-γραμμή, χωρίς να έχει κοιτάξει νωρίτερα για λογικά λάθη τους.

3. Υλοποιήσει online έλεγχο της μηχανής.

Ο online έλεγχος της μηχανής πραγματοποιείται μέσω ενός terminal για το laser και το σύστημα εναπόθεσης σκόνης και μιας διεπαφής για την κίνηση και εποπτεία των κινητήρων. Το terminal των εντολών παρουσιάζεται στην εικόνα του σχήματος 3.10.



Σχήμα 3.10: Terminal εντολών για τον online έλεγχο της μηχανής.

Στην γραμμή του terminal μπορούν να εισαχθούν διάφορου τύπου εντολές για τον online έλεγχο, όπως οι εντολές για την ενεργοποίηση των μεταβλητών τύπου M που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για παράδειγμα, η εντολή M210=1 θα ενεργοποιήσει το laser, ενώ η εντολή M210=0 θα το απενεργοποιήσει. Τα αντίστοιχα ισχύουν και τις υπόλοιπες εντολές του ίδιου τύπου.

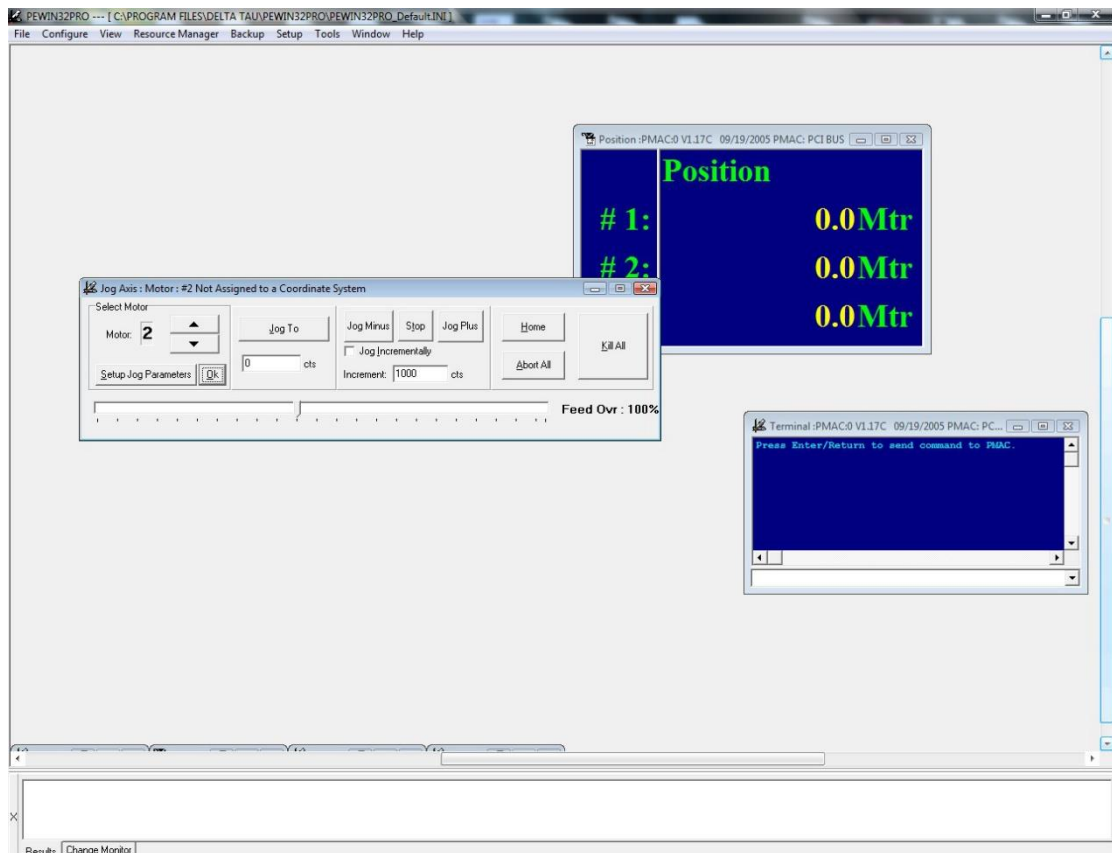
Στην γραμμή του terminal μπορούν να εισαχθούν και εντολές για το τρέξιμο προγραμμάτων, καθώς και εντολές προτεραιότητας για τον έλεγχο της μηχανής όπως:

- Ctrl+A ή &1a – τερματισμός κάθε κίνησης που υλοποιείται από τον ελεγκτή της Pmac. Η ίδια εντολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης πριν το τρέξιμο ενός προγράμματος για να εντάξει τους κινητήρες της μηχανής σε κλειστό βρόχο ελέγχου.
- Ctrl+K – ακινητοποίηση κάθε κινητήρα (Kill Motors)
- Ctrl+Q – εντολή πρόωρου τερματισμού προγράμματος. Όταν ένα πρόγραμμα τρέχει στην μηχανή και έχουν μείνει ορισμένες ακόμη εντολές, τότε αυτές θα ολοκληρωθούν πριν τερματιστεί η εκτέλεση του προγράμματος.
- Ctrl+S ή S – εντολή για την εκτέλεση ενός τμήματος ενός προγράμματος μέχρι πριν την εντολή DWELL που μπορεί να υπάρχει στον κώδικα.
- Ctrl+R ή R – εκτέλεση προγράμματος (Run)

- B – η εντολή αυτή συνοδεύεται με κάποιον αριθμό (συνήθως 1) που σημαίνει φόρτωση προγράμματος καταχωρητή (buffer) με αριθμό τον αριθμό που εισήχθη.

Τέλος, στην οθόνη του τερματικού μπορούν να εμφανιστούν τυχόν λάθη που προέκυψαν κατά την χρήση της κάρτας ελέγχου της Pmac, όπως λάθη επικοινωνίας ή συντακτικά λάθη στον κώδικα ενός προγράμματος.

Ο online έλεγχος των κινητήρων γίνεται από την διεπαφή Jog Axis της εφαρμογής, ενώ η εποπτεία της κίνησής τους από το παράθυρο position. Η διεπαφή αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα του σχήματος 3.11.



Σχήμα 3.11: Διεπαφή ελέγχου και εποπτείας online ελέγχου των κινητήρων της μηχανής.

Μέσω του αριθμού Motor γίνεται η επιλογή του κινητήρα του κάθε άξονα της μηχανής. Για τον άξονα x υπάρχει ο Motor 1, για τον y ο Motor 2 και τον z ο Motor 4. Για κάθε κινητήρα έχουμε τις παρακάτω επιλογές:

- Μέσω του πατήματος των πλήκτρων Jog Minus/Jog Plus έχουμε την κίνηση στα πλην/συν αντίστοιχα των κινητήρων. Η παρατεταμένη χρήση τους, οδηγεί στην συνεχόμενη κίνηση, κάνοντας την συγκεκριμένη διεπαφή κατάλληλη για online έλεγχο.
- Με τις επιλογές Stop, Abort All και Kill All έχουμε την διακοπή κίνησης.

- Με την επιλογή Home έχουμε την εύρεση της θέσης Home για τον κινητήρα που έχουμε επιλέξει. Η θέση Home είναι μία από τις δύο ακραίες των τριών αξόνων για τους τρεις κινητήρες.
- Με την επιλογή Jog Incrementally έχουμε περιστροφή με συγκεκριμένο βήμα παλμών που έχουμε εισάγει στο πλαίσιο.
- Με την επιλογή Jog To έχουμε την περιστροφή μέχρι μια συγκεκριμένη θέση (σε παλμούς).

Από το παράθυρο Position γίνεται η επίβλεψη κίνησης των κινητήρων σε mm. Έτσι για παράδειγμα αν κινήσουμε έναν κινητήρα σε κάποια θέση, αυτή η θέση για τον κινητήρα θα εμφανιστεί σαν αριθμός στο συγκεκριμένο παράθυρο.

Οι επιλογές και τα εργαλεία της εφαρμογής PEWIN32PRO είναι πάρα πολλές [17]. Σε αυτή την ενότητα έγινε μια σύντομη παρουσίαση και εισαγωγή στην χρήση και την λειτουργία της μηχανής. Παρόλα αυτά, η παρουσίαση των σημαντικότερων χρηστοκεντρικά επιλογών με σκοπό να λειτουργήσει κάποιος ολοκληρωμένα και συστηματικά την μηχανή SLS/SLM του εργαστηρίου θα γίνει στο επόμενο Κεφάλαιο.

4

Εγχειρίδιο χρήσης της μηχανής του εργαστηρίου

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται σε βήματα ένα σύντομο και χρηστοκεντρικό εγχειρίδιο χρήσης της μηχανής SLS/SLM του εργαστηρίου για την συστηματική λειτουργία της.

4.1 Βήματα χρήσης της μηχανής

Τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει κάποιος για την χρήση της μηχανής με βάση την παρούσα λειτουργική διαμόρφωσή της είναι τα ακόλουθα:

1. Σχεδιασμός αντικειμένου σε ένα πρόγραμμα CAD και εξαγωγή αρχείου STL

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του αντικειμένου που θέλουμε να κατασκευάσουμε μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD της αγοράς όπως Solidworks, Catia κτλ. Προσοχή χρειάζεται να δοθεί στην επιλογή του άξονα z σχεδιασμού. Πάνω στον άξονα αυτό όπως θα παρουσιαστεί στα επόμενα βήματα θα γίνει η κατασκευή του τεμαχίου ανά στρώση, επομένως αναλόγως την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή του. Ίδιες γεωμετρίες τεμαχίων με διαφορετική ανάθεση αξόνων z σε αυτά μπορεί να παρουσιάζουν πολύ μεγάλες διαφορές στο αποτέλεσμα που θα δώσει η μηχανή.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση αποτελεί ο κύλινδρος. Αν θέλουμε να φτιάξουμε έναν κύλινδρο στην μηχανή είναι πιο φρόνιμο να ανατεθεί ο άξονας z με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να είναι κάθετος στους δίσκους των στρώσεων που θα τον αποτελούν, δηλαδή να αφορά τον άξονα ύψους του κυλίνδρου. Σε διαφορετική ανάθεση του άξονα, ο κύλινδρος δεν θα κατασκευαστεί σαν αλληπάλληλοι δίσκοι στρώσεων που κολλούνται μεταξύ τους, αλλά σαν αλληπάλληλες ορθογωνικές στρώσεις διαφορετικών διαστάσεων, με αποτέλεσμα το

προϊόν να μην έχει την καμπυλότητα που θέλουμε. Η επιλογή του άξονα z στον σχεδιασμό είναι κρίσιμη για την ποιότητα προϊόντος που επιθυμούμε και θέλει ιδιαίτερη προσοχή.

Η εξαγωγή του STL αρχείου είναι μια πολύ απλή διαδικασία και παρέχεται σαν επιλογή στα περισσότερα σχεδιαστικά προγράμματα CAD κατά την αποθήκευση του τρισδιάστατου σχεδίου που έχουμε φτιάξει. Τα αντικείμενα που έχουμε σχεδιάσει πρέπει πάντα να είναι αποθηκευμένα σε μορφή STL αρχείου έτσι ώστε να μπορούν να περαστούν από τα μετέπειτα προγράμματα slicing, που θα αναφερθούν στο επόμενο βήμα.

2. Κόψιμο γεωμετρίας αντικειμένου σε στρώσεις (slicing) για την SLS/SLM τεχνική

Η γεωμετρία του αντικειμένου που θέλουμε να φτιάξουμε πρέπει να χωριστεί σε στρώσεις. Αυτό ονομάζεται slicing. Για την κάθε στρώση πρέπει επίσης να γίνει παραγωγή σε G-κώδικα των διακριτών γεωμετρικών σημείων της διαδρομής (path) που πρέπει να ακολουθηθεί από την κεφαλή του laser για την κατασκευή των στρώσεων. Όπως είναι φανερό η ένωση όλων των αλληπάλληλων στρώσεων θα οδηγήσει στην τελική κατασκευή του αντικειμένου.

Το slicing και η παραγωγή του απαραίτητου G-κώδικα γίνεται από ειδικά προγράμματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα του Kisslicer [18]. Το Kisslicer είναι ένα γρήγορο και εύκολα χρησιμοποιήσιμο πρόγραμμα που δέχεται σαν input STL αρχεία με την τρισδιάστατη γεωμετρία των αντικειμένων που έχουμε σχεδιάσει και θέλουμε να κατασκευάσουμε και επιστρέφει τον G-κώδικα των διαδρομών που πρέπει να ακολουθηθούν για την κατασκευή της κάθε στρώσης.

Το Kisslicer σαν πρόγραμμα όμως παράγει G-κώδικα για μηχανές εναπόθεσης νήματος θερμοπλαστικού υλικού και όχι για μηχανές SLS/SLM. Αυτό σημαίνει πως όλες οι ρυθμίσεις του προγράμματος αφορούν την εναπόθεση του νήματος από τους extruder της τεχνικής αυτής. Για αυτόν τον λόγο δημιουργήθηκε πρόγραμμα σε C++ το οποίο:

- i. Δέχεται σαν είσοδο όλα τα αρχεία που κάνει εξαγωγή ο Kisslicer με τον G-κώδικα. Παρόλα αυτά με τις ρυθμίσεις στον Kisslicer που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια, προτείνεται η χρήση των αρχείων .bfb.
- ii. Καθαρίζει τον G-κώδικα από εντολές που αφορούν την τεχνική εναπόθεσης νήματος, όπως ρύθμιση extruder, ενεργοποίηση/απενεργοποίηση ανεμιστήρα cooling του νήματος, πρόωση extruder κτλ.
- iii. Κάνει παραγωγή κώδικα συμβατού για την μηχανή του εργαστηρίου που αφορά τις ρυθμίσεις παλμών των κινητήρων για κίνηση Imm καθώς και τμημάτων κώδικα που αφορούν το άνοιγμα του buffer του ελεγκτή, τον ορισμό

ταχύτητας πρόωσης της κεφαλής του laser και την ρύθμιση του συστήματος συντεταγμένων.

- iv. Η τεχνική της εναπόθεσης νήματος χτίζει τα τεμάχια προς τα πάνω, ενώ η τεχνική της SLS/SLM προς τα κάτω μέσω της μετακίνησης της τράπεζας της σκόνης προς τα κάτω με την κάθε φορά ολοκλήρωση μιας στρώσης. Το πρόγραμμα λοιπόν αντιστρέφει την λογική κατασκευής, αλλάζοντας τον κώδικα που δίνεται από τον Kisslicer.
- v. Αναγνωρίζει την αλλαγή της κάθε στρώσης, παράγοντας ενδιάμεσα της αλλαγής κομμάτια κώδικα που αφορούν την απενεργοποίηση και ενεργοποίηση της δέσμης laser και της κίνησης του συστήματος απλώματος της σκόνης στην σωστή φορά.
- vi. Κλείνει τον καταχωρητή και το πρόγραμμα επιστρέφοντας αρχείο κειμένου που επιλέγει ο χρήστης. Ο χρήστης μπορεί με το τέλος του προγράμματος να αποθηκεύσει το αρχείο με επέκταση .pmc και έτσι πλέον να έχει τον G-κώδικα προσαρμοσμένο στην τεχνική SLS/SLM, έτοιμο να διαβαστεί από τον ελεγκτή της μηχανής.

Ο κώδικας έχει ελεγχθεί για πολλές περιπτώσεις διαφορετικών γεωμετριών εξαγωγής G-κώδικα μέσω του Kisslicer και χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση πειραμάτων. Παρόλα αυτά επειδή η διαμόρφωση της μηχανής δεν είναι ακόμη στο τελικό στάδιο, το πρόγραμμα μπορεί να χρειαστεί να αλλάξει σε περίπτωση αλλαγής ορισμένων εντολών. Ο κώδικας του προγράμματος που δημιουργήθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα Α και το εκτελέσιμο του μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το CD που δίνεται με την παρούσα διπλωματική εργασία. Στην εικόνα του σχήματος 4.1 παρουσιάζεται η διεπαφή του προγράμματος.

```

***Kisslicer to SLS/SLM PMAC format program***
Created by Patrinos Christos
School of Mechanical Engineering, Section of Manufacturing Technology, NTUA.

Enter the name of the file with the generated G-Code from Kisslicer:
Rectangle.bfb

Preparing G-Code for SLS/SLM Machine...
...

Enter the name of the output file with the cleared G-Code:
RectangleGcode.pmc
...

***** COMPLETED *****

Input File: Rectangle.bfb
Output File: RectangleGcode.pmc

NOTICE: Always check the generated cleared G-Code for logical errors before inputting it in the machine.

Process returned 0 (0x0)   execution time : 17.578 s
Press any key to continue.

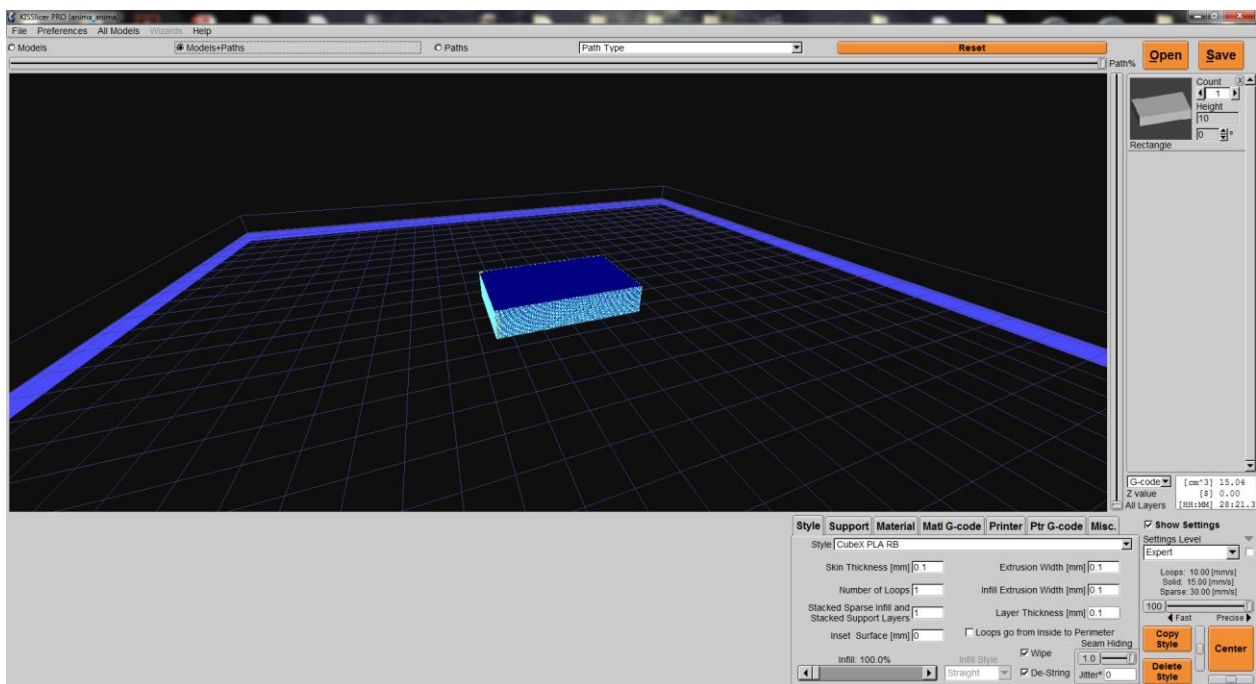
```

Σχήμα 4.1: Παράδειγμα χρήσης του προγράμματος που δημιουργήθηκε για την μετατροπή του G-κώδικα από εκτυπωτή εναπόθεσης νήματος στην μηχανή SLS/SLM του εργαστηρίου

Για την αποτελεσματικότερη χρησιμοποίηση του προγράμματος είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις στο πρόγραμμα του Kisslicer. Αυτές οι ρυθμίσεις πρακτικά διευκολύνουν το πρόγραμμα να παράξει σωστό αποτέλεσμα G-κώδικα και παρουσιάζονται στις εικόνες των παρακάτω σχημάτων. Επακριβής ακολούθηση τους, βοηθάει το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε να παράξει G-κώδικα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση για την μηχανή του εργαστηρίου.

- *Ρυθμίσεις Style*

Για τις ρυθμίσεις Style στον Kisslicer ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις τιμές των παραμέτρων του Infill Extrusion Width [mm] και του Layer Thickness [mm]. Αυτές οι παράμετροι για την τεχνική SLS/SLM εξαρτώνται από την ταχύτητα κίνησης του laser [mm/s] όπως θα αναδειχθεί και στο Κεφάλαιο 5 των πειραμάτων και αφορούν τις διαστάσεις του αποτελέσματος πυροσυσσωμάτωσης/τήξης της σκόνης από την κίνηση της δέσμης laser. Το Layer thickness αφορά το πάχος της κάθε στρώσης. Οι υπόλοιπες παράμετροι πρέπει να παραμείνουν όπως φαίνονται στην εικόνα.

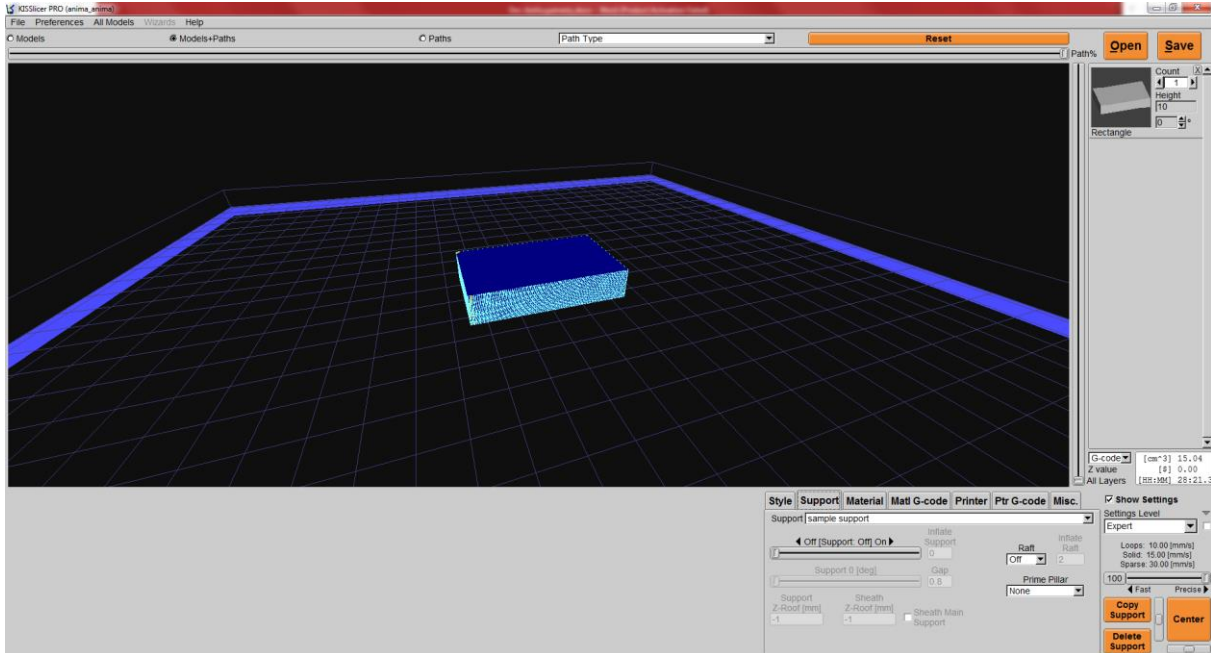


Σχήμα 4.2: Παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις Style για ένα παράδειγμα κατασκευής ενός ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου. Από αυτή την καρτέλα, ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στις τιμές των Infill Extrusion Width και Layer Thickness. Αυτές οι παράμετροι για την τεχνική SLS/SLM εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητα πρόωσης του laser.

- *Ρυθμίσεις Support*

Στην τεχνική χρήσης νήματος για την δημιουργία των στρώσεων χρησιμοποιείται και κάποιου είδους στήριξη για την τύπωση. Αυτή η στήριξη διατηρεί το τεμάχιο σταθερό και

έτσι το αποτέλεσμα βγαίνει καλύτερο. Στην τεχνική SLS/SLM η μόνη στήριξη που υπάρχει στο τεμάχιο είναι αυτή που του παρέχει η περιβάλλουσα σκόνη. Επομένως, δεν επιθυμούμε να έχουμε στον παραγόμενο G-κώδικα διαδρομές που να αντιστοιχούν σε δημιουργία στηρίξεων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των ρυθμίσεων Support στο Kisslicer.



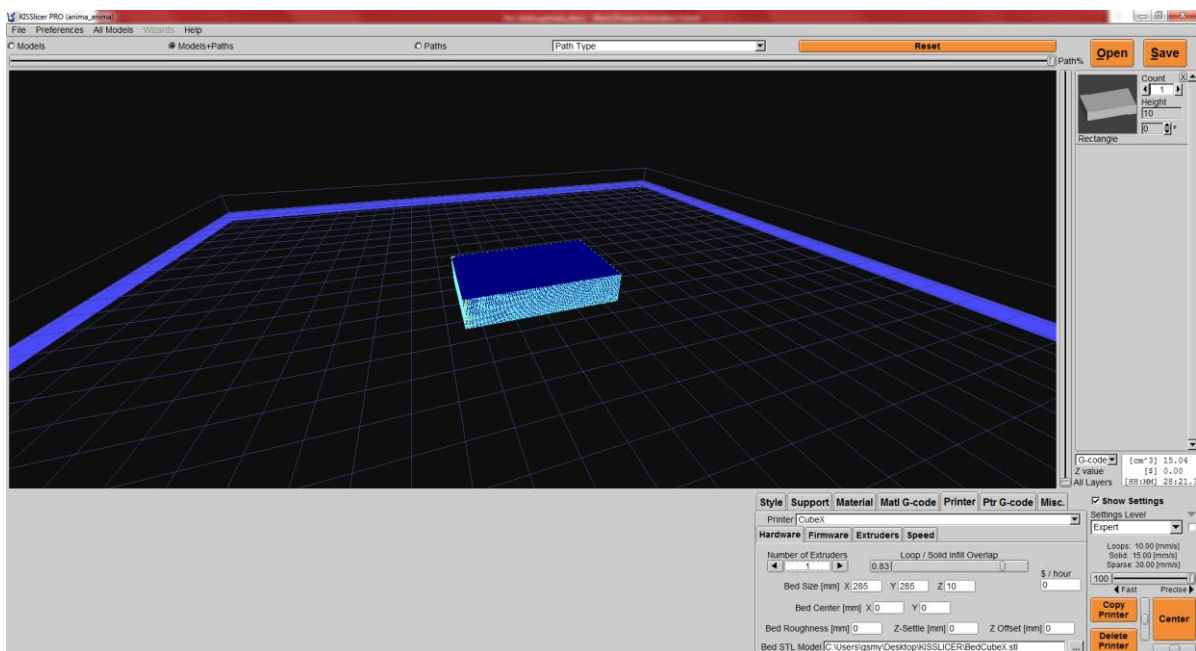
Σχήμα 4.3: Ρυθμίσεις support στο Kisslicer. Στην τεχνική SLS/SLM δεν επιθυμούμε διαδρομές στον παραγόμενο G-κώδικα για την δημιουργία στηρίξεων.

- *Ρυθμίσεις Printer*

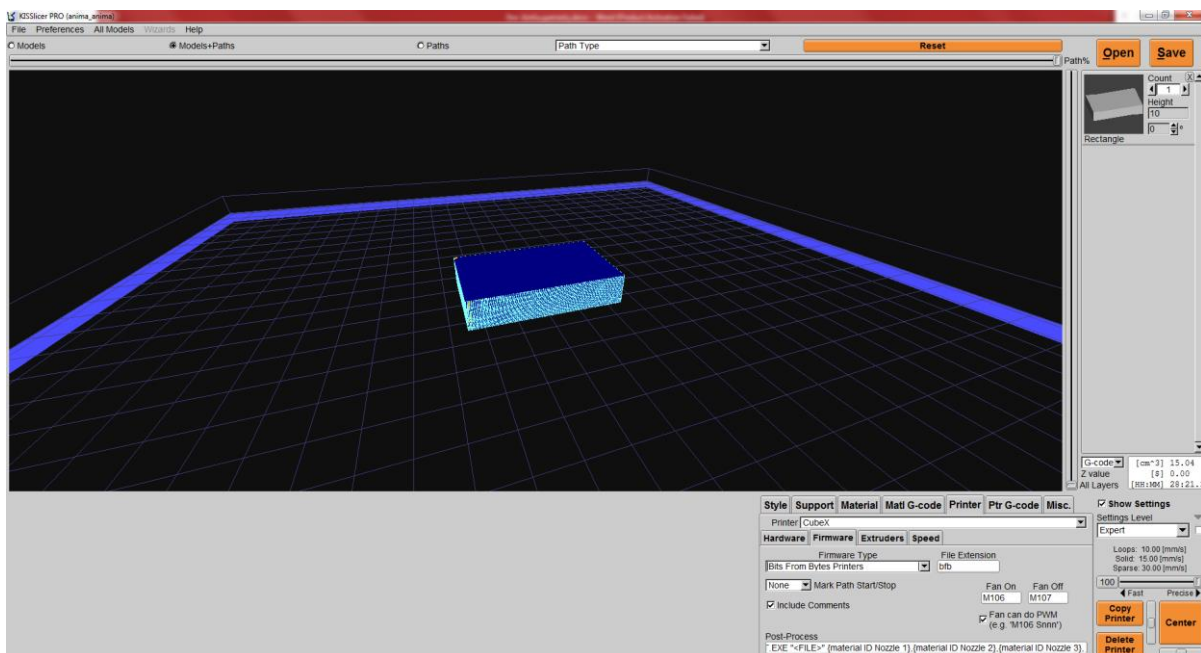
Στις ρυθμίσεις Printer το Kisslicer δίνει την δυνατότητα εισαγωγής ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του 3D printer νήματος. Αυτό γίνεται στην καρτέλα Hardware του προγράμματος. Από αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, για την χρήση της μηχανής, μας ενδιαφέρουν οι διαστάσεις της τράπεζας σκόνης που αντιστοιχούν στις διαστάσεις Bed Size [mm]. Υπενθυμίζουμε πως η τράπεζα σκόνης πάνω στην οποία γίνεται η κατεργασία είναι διαστάσεων 285x285x10 [mm]. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι θα πρέπει να εισαχθούν όπως φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 4.4.

Στην καρτέλα Firmware είναι πολύ σημαντικό να αλλαχθεί ο τύπος του εκτυπωτή σε μορφή Bits from bytes. Αυτό θα επιτρέψει στο Kisslicer να παράξει τον G-κώδικα σε αρχείο με επέκταση .bfb το οποίο έχει ένα format κειμένου που διαβάζεται από το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε χωρίς να απαιτεί καθόλου την παρέμβαση χρήστη. Οι ρυθμίσεις της συγκεκριμένης καρτέλας φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 4.5

Στις υπόλοιπες δύο καρτέλες (Extruders και Speed) οι ρυθμίσεις αφήνονται στις default τιμές τους.



Σχήμα 4.4: Hardware καρτέλα στις ρυθμίσεις Printer στο Kisslicer.



Σχήμα 4.5: Firmware καρτέλα στις ρυθμίσεις Printer στο Kisslicer.

- *Υπόλοιπες ρυθμίσεις*

Στις υπόλοιπες ρυθμίσεις που είναι διαθέσιμες στο Kisslicer, όπως Material, Matl G-code, Ptr G-code και Misc. δεν προτείνεται κάποια αλλαγή.

Με βάση τις παραπάνω ρυθμίσεις, εισάγουμε το STL αρχείο του αντικειμένου που θέλουμε να φτιάξουμε στο Kisslicer, προχωρούμε στο πλήρες slicing με επιθυμητή πυκνότητα διαδρομών που θέλουμε και αποθηκεύουμε το αποτέλεσμα του slicing σε ένα αρχείο .bfb. Το αρχείο αυτό περιέχει τις διαδρομές των διακριτών σημείων της κάθε στρώσης που πρέπει να γίνουν για την υλοποίηση του κομματιού. Το αρχείο όμως με την υπάρχουσα μορφή του προορίζεται για εκτυπωτή νήματος και επομένως πρέπει να προσαρμοστεί στην τεχνική SLS/SLM από το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε. Το τελικό αποτέλεσμα που είναι έτοιμο να περαστεί στον ελεγκτή της μηχανής θα έχει την ακόλουθη μορφή σε G-κώδικα:

Σημείωση: Για την χρήση του προγράμματος θεωρούμε πως η σκόνη είναι στρωμένη πριν την αρχή της λειτουργίας και πως το σύστημα απλώματος σκόνης βρίσκεται στην αριστερή ακραία θέση (πατώντας τον διακόπτη LEFT SWITCH M200).

UNDEFINE ALL

&1	;Ορισμός συστήματος συντεταγμένων 1.
#1->4096X	;Ορισμός κινητήρα 1 ως άξονα X. Το βήμα του κοχλία της γραμμικής διάταξης είναι 2 mm και μια πλήρης περιστροφή του κινητήρα αντιστοιχεί σε 8192 παλμούς (counts), άρα για 1 mm θέλουμε 4096 παλμούς. Ο ορισμός γίνεται με αυτόν τον τρόπο.
#2->4096Y	;Ορισμός κινητήρα 2 ως άξονα Y, με παρόμοια λογική με τον κινητήρα 1.
#4->54613.33Z	;Ορισμός κινητήρα 4 ως άξονα Z. Η κίνηση του τραπεζιού σκόνης πραγματοποιείται από τον κινητήρα, τον μειωτήρα, τον μάντα χρονισμού, των τροχαλιών χρονισμού και των κοχλιών κατακόρυφης κίνησης. Όλες οι τροχαλίες είναι ίδιας διαμέτρου και δεδομένου ότι ο κοχλίας έχει βήμα 3 mm και ο μειωτήρας λόγο 1:20 προκύπτει πως για κίνηση 1 mm του τραπεζιού σκόνης χρειάζεται περιστροφή κινητήρα $(1/3)*8192*20 = 54613.33$ παλμούς (counts).
OPEN PROG 1	;Άνοιγμα καταχωρητή για εισαγωγή προγράμματος με αριθμό 1.
CLEAR	;Διαγραφή υπάρχοντος περιεχομένου καταχωρητή.
G17 G90	;X-Y επίπεδο, κίνηση σε απόλυτες συντεταγμένες.
F0.7	;Ταχύτητα κινήσεως κεφαλής laser στο X-Y επίπεδο. Στο εν λόγω παράδειγμα έχουμε ταχύτητα 0.7 mm/s.
G1 Xα Yβ Zγ	;Μετακίνηση της κεφαλής laser στην θέση $X = \alpha$ mm, $Y = \beta$ mm, $Z = \gamma$ mm. Το α και β είναι πραγματικοί αριθμοί εντός των ορίων της τράπεζας σκόνης και το γ είναι μη θετικός πραγματικός αριθμός.
M210 = 1	;Ενεργοποίηση δέσμης laser.

DWELL10 ;Καθυστέρηση 10 ms. Η εντολή DWELL είναι απαραίτητη να
;τοποθετείται μετά από εντολές M για να δίνεται χρόνος στον
;ελεγκτή της μηχανής να της προσπελάσει.

...Ακολουθεί η διαδρομή της κίνησης της κεφαλής laser στο X-Y επίπεδο για $Z = \gamma$ με
ενεργοποιημένη την δέσμη laser. Οι κινήσεις πραγματοποιούνται από γραμμικές παρεμβολές.
Κινήσεις δηλαδή G1 ή G01...

;-----Change of Layer-----

M210=0 ;Απενεργοποίηση δέσμης laser με την ολοκλήρωση της στρώσης για
; $Z=\gamma$ με σκοπό να ξεκινήσει η κίνηση του συστήματος απλώματος
;σκόνης.

DWELL10 ;Καθυστέρηση για 10 ms.

G1 X_{α_1} Y_{β_1} Z_{γ_1} ;Γίνεται κατέβασμα της τράπεζας στο $Z = \gamma_1$ με βάση το layer
;thickness που έχουμε ορίσει μέσω του Kisslicer. Ταυτόχρονα η
;κεφαλή του laser μετακινείται στις θέσεις που χρειάζονται στο X-
;Y επίπεδο για να αρχίσει η δεύτερη στρώση.

M208=1 ;Ενεργοποίηση κίνησης συστήματος απλώματος σκόνης προς τα
;δεξιά.

While (M201 = 1) WAIT; ;Μέχρι να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης RIGHT SWITCH M201
;γίνεται αναμονή σε ένα While loop.

EndWhile

DWELL10 ;Καθυστέρηση 10 ms.

M208=0 ;Με την ενεργοποίηση του RIGHT SWITCH (M201=0) γίνεται
;έξοδος από το while loop και σταματάει το σύστημα απλώματος
;σκόνης την κίνηση του.

M210=1 ;Πλέον έχει στρωθεί η δεύτερη στρώση και ενεργοποιείται η δέσμη
;laser για την δημιουργία της.

...Ακολουθεί η διαδρομή της κίνησης της κεφαλής laser στο X-Y επίπεδο για $Z = \gamma_1$ με
ενεργοποιημένη την δέσμη laser. Οι κινήσεις πραγματοποιούνται από γραμμικές παρεμβολές.
Κινήσεις δηλαδή G1 ή G01...

;-----Change of Layer-----

M210=0 ;Απενεργοποίηση δέσμης laser με την ολοκλήρωση της στρώσης για
;Z= γ_1 με σκοπό να ξεκινήσει η κίνηση του συστήματος απλώματος
;σκόνης.

DWELL10 ;Καθυστέρηση για 10 ms.

G1 X α_2 Y β_2 Z γ_2 ;Γίνεται κατέβασμα της τράπεζας στο Z = γ_2 με βάση το βήμα που
;έχουμε ορίσει μέσω του Kisslicer. Ταυτόχρονα η κεφαλή του laser
;μετακινείται στις θέσεις του X-Y επιπέδου που χρειάζονται για να
;αρχίσει η τρίτη στρώση.

M209=1 ;Ενεργοποίηση κίνησης συστήματος απλώματος σκόνης προς τα
;αριστερά.

While (M200 = 1) WAIT; ;Μέχρι να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης LEFT SWITCH M200
;γίνεται αναμονή σε ένα While loop.

EndWhile

DWELL10 ;Καθυστέρηση 10 ms.

M208=0 ;Με την ενεργοποίηση του LEFT SWITCH (M200=0) γίνεται
;έξοδος από το while loop και σταματάει το σύστημα απλώματος
;σκόνης την κίνηση του.

M210=1 ;Πλέον έχει στρωθεί η τρίτη στρώση και ενεργοποιείται η δέσμη
;laser για την δημιουργία της.

...Ακολουθεί η διαδρομή της κίνησης της κεφαλής laser στο X-Y επίπεδο για Z = γ_2 με
ενεργοποιημένη την δέσμη laser. Οι κινήσεις πραγματοποιούνται από γραμμικές παρεμβολές.
Κινήσεις δηλαδή G1 ή G01...

Η παραπάνω διαδικασία με την συγκεκριμένη λογική όσο αφορά την αλληλουχία εντολών
συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση όλων των στρώσεων. Ο κώδικας που παρουσιάστηκε είναι
στη μορφή του κώδικα που παράγει το πρόγραμμα μετατροπής από την τεχνική νήματος στην
τεχνική SLS/SLM.

Ο τελικός κώδικας για την μηχανή SLS/SLM πρέπει να είναι αποθηκευμένος σε ένα αρχείο με
επέκταση .pmc.

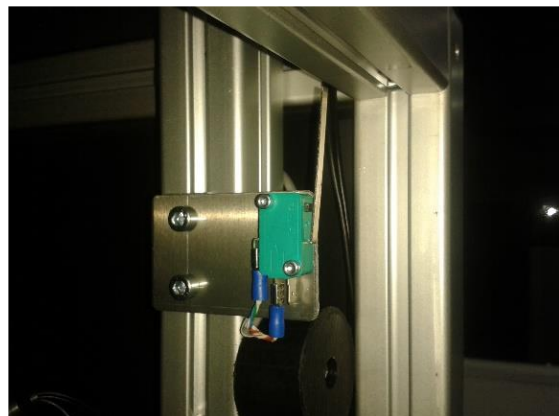
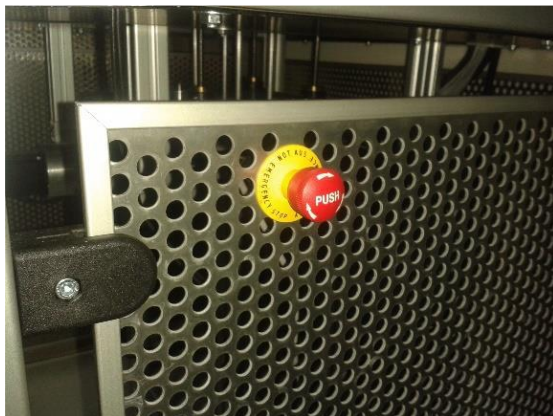
3. Χρήση μηχανής για την κατασκευή του αντικειμένου

Από το προηγούμενο βήμα έχουμε τον τελικό κώδικα για την κατασκευή του επιθυμητού αντικειμένου. Σε αυτό το βήμα θα παρουσιάσουμε τον τρόπο που θα περάσουμε τον τελικό κώδικα στον ελεγκτή της μηχανής.

Αρχικά ανοίγουμε την τροφοδοσία σε όλα τα λειτουργικά μέρη της μηχανής (laser και κινητήρες). Στην συνέχεια ανοίγουμε τις εφαρμογές PEWIN32PRO και Ylia M20 1.7.

Ylia M20 1.7

Περιμένουμε 40 sec μέχρι έως ότου τελειώσει ο χρόνος προθέρμανσης για την δέσμη laser και δεν εμφανίζεται κάποιο alarm στην οθόνη της διεπαφής που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Υπενθυμίζουμε ότι στην πόρτα της μηχανής υπάρχει διακόπτης emergency, ο οποίος δεν επιτρέπει την λειτουργία της δέσμης laser όταν η πόρτα είναι ανοιχτή. Επίσης υπάρχει διακόπτης έκτακτης ανάγκης στα πλάγια της μηχανής, ο οποίος όταν πατηθεί διακόπτει απότομα την κατεργασία. Τυχόν πάτημα των δύο αυτών διακοπών θα σημαίνει emergency alarm στην εφαρμογή του Ylia M20 1.7.



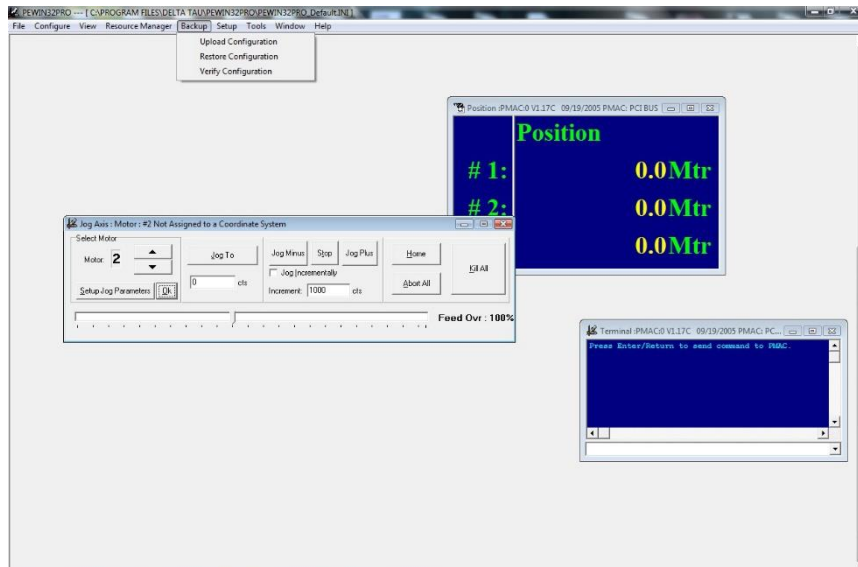
Σχήμα 4.6: Διακόπτης έκτακτης ανάγκης (αριστερά) και διακόπτης κινδύνου για την δέσμη laser στην πόρτα της μηχανής (δεξιά).

PEWIN32PRO

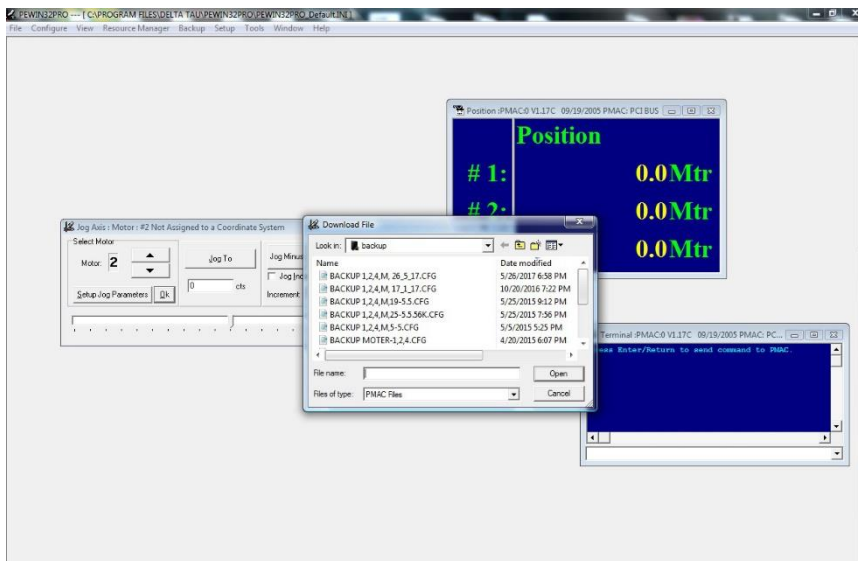
Ανοίγοντας την εφαρμογή PEWIN32PRO αποκτούμε πρόσβαση στον ελεγκτή Pmac της μηχανής. Για την τελική χρήση της μηχανής πρέπει να γίνουν τρία βήματα:

1. Η πρώτη ενέργεια που πρέπει να γίνει με το κάθε καινούργιο άνοιγμα της εφαρμογής είναι το backup της μηχανής. Το backup είναι η διαδικασία παραμετροποίησης της μηχανής και γίνεται μέσω ενός .cfg αρχείου. Το αρχείο αυτό περιέχει όλες τις μεταβλητές παραμέτρων της μηχανής.

Για να κάνουμε backup στην μηχανή πατάμε την επιλογή Backup → Restore Configuration και διαλέγουμε το αρχείο .cfg που θέλουμε. Η διαδικασία του backup παρουσιάζεται στις εικόνες των σχημάτων 4.7 και 4.8.



Σχήμα 4.7: Επιλογή Backup → Restore Configuration.

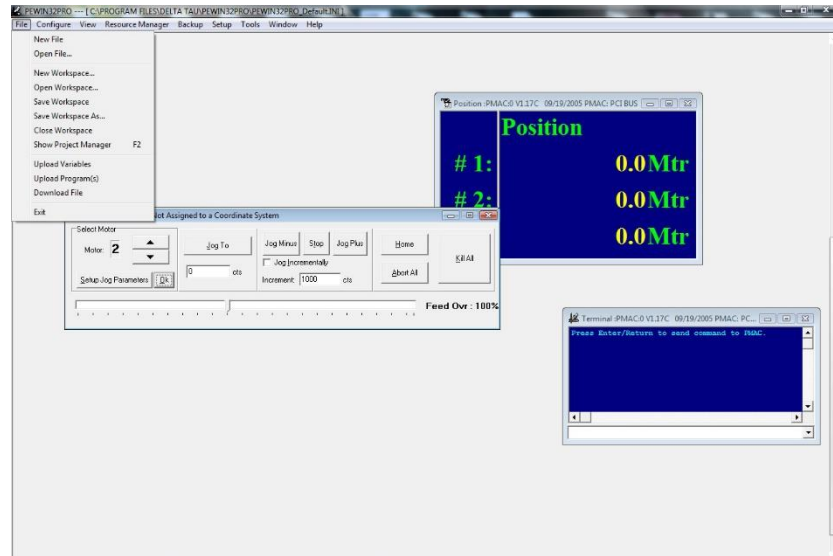


Σχήμα 4.8: Επιλογή του backup αρχείου .cfg που επιθυμούμε. Συνήθως τα backup αρχεία είναι αποθηκευμένα σε μορφή ημερομηνίας.

Μετά το backup της μηχανής, ο ελεγκτής γνωρίζει σε ποιες θέσεις του βρίσκονται όλα τα λειτουργικά μέρη της μηχανής και έτσι πλέον η μηχανή είναι έτοιμη για χρήση.

2. Η μηχανή είναι πλέον έτοιμη, επομένως σαν επόμενη ενέργεια είναι το φόρτωμα του τελικού κώδικα για την δημιουργία του αντικειμένου μας. Οι τρόποι που μπορεί να γίνει αυτό είναι αρκετοί, αλλά εδώ προτείνεται μία μέθοδος.

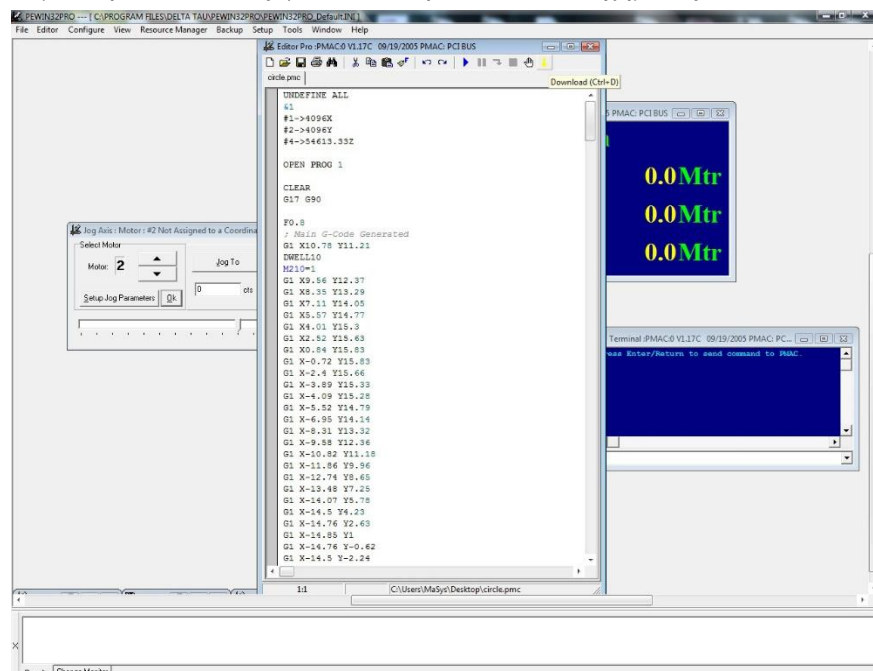
Έχοντας τον τελικό κώδικα σε κάποιο αρχείο κειμένου με επέκταση .pmc, φορτώνουμε το αρχείο αυτό στην εφαρμογή από την επιλογή File → Open File.



Σχήμα 4.9: Επιλογή File → Open File για το φόρτωμα του αρχείου .pmc που περιέχει τον κώδικα για την κατασκευή του αντικειμένου.

Η ενέργεια αυτή θα μας ανοίξει το αρχείο με τον κώδικα που έχουμε φτιάξει στον editor της εφαρμογής. Εκεί μπορούμε να αλλάξουμε τμήματα του κώδικα ή να τον ελέγξουμε. Μπορούμε επίσης με την επιλογή File → New File να γράψουμε τον δικό μας κώδικα στον editor της εφαρμογής.

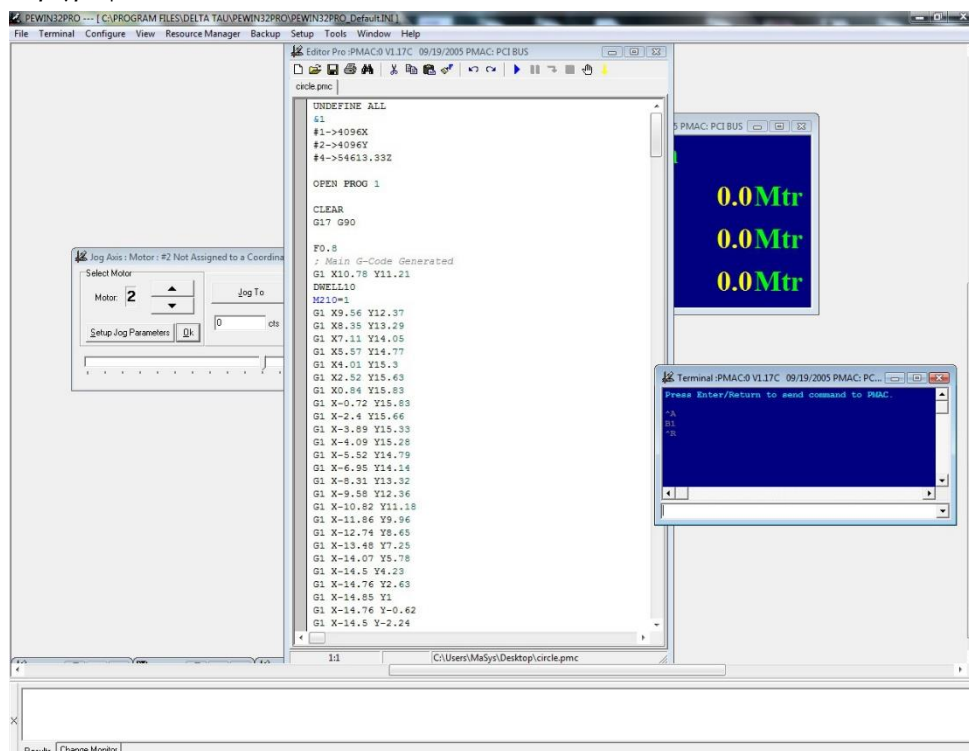
Σε οποιαδήποτε περίπτωση ο κώδικας που έχουμε μπροστά μας στον editor πρέπει να φορτωθεί στον καταχωρητή του ελεγκτή. Αυτό γίνεται με την επιλογή Download ή με την συντόμευση Ctrl+D όπως φαίνεται στην εικόνα του Σχήματος 4.10.



Σχήμα 4.10: Ο editor της εφαρμογής PEWIN32PRO και η επιλογή Download για το φόρτωμα του κώδικα στον καταχωρητή της μηχανής.

3. Πλέον ο κώδικας έχει φορτωθεί στον καταχωρητή του ελεγκτή της μηχανής και είναι έτοιμος να εκτελεστεί. Η εκτέλεση του κώδικα γίνεται με εντολές στο terminal της εφαρμογής. Αρχικά, πληκτρολογώντας Ctrl+A μπαίνουν όλοι οι κινητήρες σε κλειστό βρόχο ελέγχου. Στην συνέχεια επιλέγουμε το πρόγραμμα με αριθμό 1 του καταχωρητή, πληκτρολογώντας B1. Τέλος, υλοποιούμε εκτέλεση του προγράμματος πληκτρολογώντας Ctrl+R. Οι δύο τελευταίες εντολές μπορούν να συγχωνευτούν σε μία πληκτρολογώντας B1R.

Η διαδικασία της εκτέλεσης παρουσιάζεται στην εικόνα του σχήματος 4.11 και αποτέλεσμα της είναι η εκκίνηση της διαδικασίας δημιουργίας του αντικειμένου όπως περιγράφεται από τον κώδικα.



Σχήμα 4.11: Εντολές εκτέλεσης προγράμματος στο terminal της εφαρμογής.

4. Κανόνες ασφαλείας κατά την χρήση της μηχανής

Κατά την χρήση της μηχανής, πρέπει να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα προστασίας τόσο για την δέσμη laser όσο και για την σκόνη που χρησιμοποιείται. Τα μέτρα προστασίας αφορούν το πραγματικό σύστημα της μηχανής.

Για την δέσμη laser επιβάλλεται η χρήση των ειδικών γυαλιών προστασίας που βρίσκονται στο εργαστήριο (βλ. Κεφάλαιο 2 για προστασία από την δέσμη του laser Ylia M20). Η δέσμη laser δεν πρέπει ποτέ να λειτουργεί σε απευθείας έκθεση με τον χειριστή της μηχανής. Η επίβλεψη της κατεργασίας γίνεται πάντοτε μέσω του ειδικού τζαμιού που βρίσκεται στα πλάγια του

θαλάμου της μηχανής. Η πόρτα του θαλάμου δεν θα πρέπει να ανοίγεται ακαριαία μετά το τέλος της κατεργασίας, καθώς τυχόν ανακλάσεις δέσμης υψηλής ενέργειας μπορεί να εξέλθουν σε απευθείας έκθεση με τον άνθρωπο.

Για την σκόνη επιβάλλεται η αυστηρή ακολουθία των οδηγιών προστασίας του κατασκευαστή της. Στην περίπτωση της σκόνης πολυμερούς που υπάρχει στο εργαστήριο προτείνεται η χρήση γαντιών όταν γίνονται εργασίες με σκόνη και ποτέ η άμεση επαφή με γυμνό χέρι. Οι κόκκοι της σκόνης είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων του μμ που σημαίνει πως τυχόν επαφή με μάτια και στόμα μετά το άγγιγμα της σκόνης με γυμνό χέρι μπορεί να προκαλέσει ερεθισμούς. Λόγω του μικρού μεγέθους της, προτείνεται παράλληλα και η χρήση μάσκας φιλτραρίσματος της σκόνης. Ιδιαίτερα σε εργασίες πάνω στην μηχανή, σκόνη μπορεί να εισέλθει στο κάτω αναπνευστικό σύστημα μέσω της αναπνοής μέσω στόματος προκαλώντας μιας μικρής κλίμακας δυσφορία.

Μετά το τέλος της χρήσης της μηχανής και κατά την έξοδο από τον χώρο που βρίσκεται η μηχανή είναι σημαντικό να ελέγξουμε πως όλα τα συστήματα δεν έχουν τροφοδοσία και το laser φέρει το καπάκι προστασίας της οπής εξόδου της δέσμης από την σκόνη. Το καπάκι της προστασίας πρέπει να αφαιρείται κάθε φορά που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε την μηχανή.

Κατά την επίβλεψη της κατεργασίας σε περίπτωση κάποιου συμβάντος επιβάλλεται το πάτημα του διακόπτη έκτακτης ανάγκης ο οποίος θα απενεργοποιήσει την λειτουργία της μηχανής αμέσως.

4.2 Επίλυση ζητημάτων (Troubleshooting)

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι τρόποι αντιμετώπισης των βασικότερων προβλημάτων που ανακύπτουν από την χρησιμοποίηση της μηχανής:

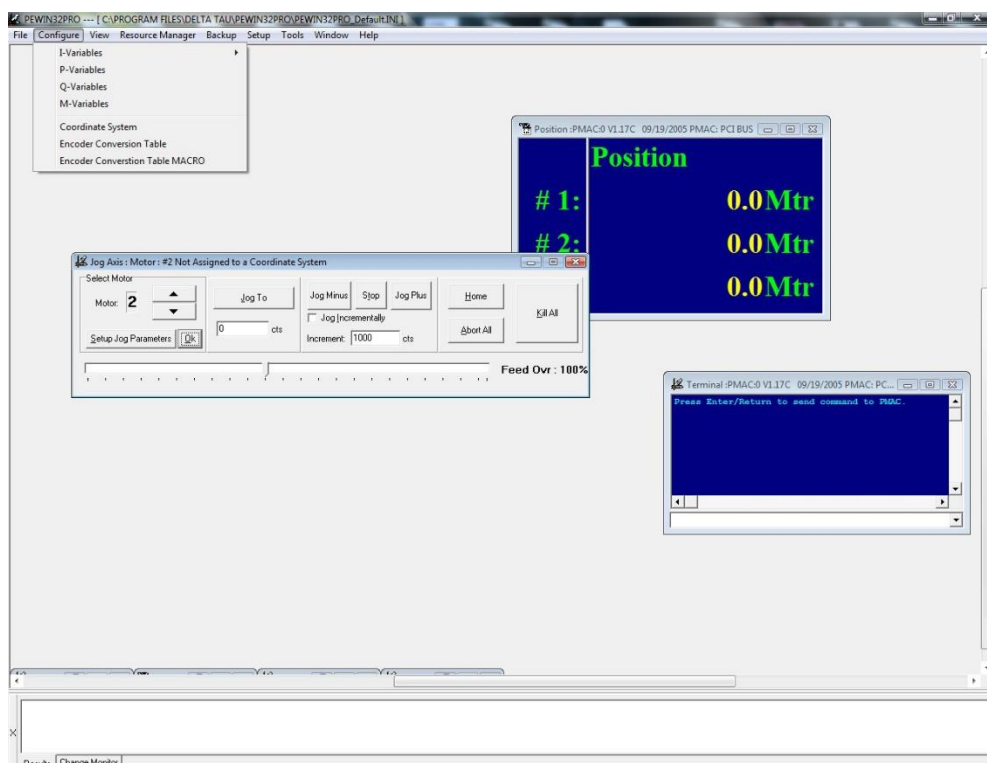
- **Ορισμός αρχής συστήματος συντεταγμένων**

Όταν θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα αντικείμενο και έχουμε παράξει τον κώδικά του με βάση μια αρχή ενός συστήματος συντεταγμένων πάνω στην τράπεζα σκόνης, αλλά ενεργοποιώντας την μηχανή βλέπουμε πως η θέση της κεφαλής laser βρίσκεται σε κάποια θέση που δεν επιτρέπει την κατασκευή του τεμαχίου, για παράδειγμα βρίσκεται στην άκρη της τράπεζας σκόνης με αποτέλεσμα με κάποια κίνηση της να βρεθεί εκτός ορίων τράπεζας, τότε κάνουμε λόγω για κακή ανάθεση της αρχής του συστήματος συντεταγμένων. Η επίλυση του ζητήματος αυτού είναι απλή και χρήσιμη λόγω της συχνότητας εμφάνισέως του.

Αρχικά μετακινούμε την κεφαλή του laser (κινητήρες 1 και 2) ή της θέσης της τράπεζας σκόνης (κινητήρας 4) σε ένα επιθυμητό σημείο, έτσι ώστε με βάση τον κώδικα των διαδρομών που μας έδωσε ο Kisslicer να είμαστε εντός ορίων κινήσεων. Αυτό γίνεται μέσω της Jog επαφής παίρνοντας feedback για την θέση των κινητήρων από την οθόνη Position. Αφού γίνει η συνολική μετακίνηση, κάνουμε επανεκκίνηση της μηχανής και της εφαρμογής PEWIN32PRO. Μετά την επανεκκίνηση, ο ελεγκτής θα ορίσει την θέση που μεταφέραμε το σύστημα ως την αρχή του συστήματος συντεταγμένων της κατεργασίας.

- **Αρχείο Backup**

Στην περίπτωση που γίνει απώλεια του αρχείου Backup που χρησιμοποιούμε για την μηχανή ή ο ελεγκτής της μηχανής δεν αναγνωρίζει κάποια εντολή ή μεταβλητή M, τότε στο περιβάλλον της εφαρμογής PEWIN32PRO μέσω της επιλογής Configure, ρυθμίζουμε τις μεταβλητές I, P, Q, M από την τιμή τους (By Number).



Σχήμα 4.12: Ρύθμιση των μεταβλητών I, P, Q, M.

Με την κάθε επιλογή από τις 4, θα γίνει εμφάνιση ενός παραθύρου με την λίστα όλων των μεταβλητών του κάθε τύπου. Στο παράθυρο αυτό, αρκεί να εισαχθούν οι τιμές των μεταβλητών του κάθε τύπου που παρουσιάζονται στους πίνακες των παρακάτω σχημάτων (βλ. Σχήματα 4.13 και 4.14). Αξίζει να σημειώσουμε πως για την μηχανή, το backup αφορά τις μεταβλητές I και M μόνο.

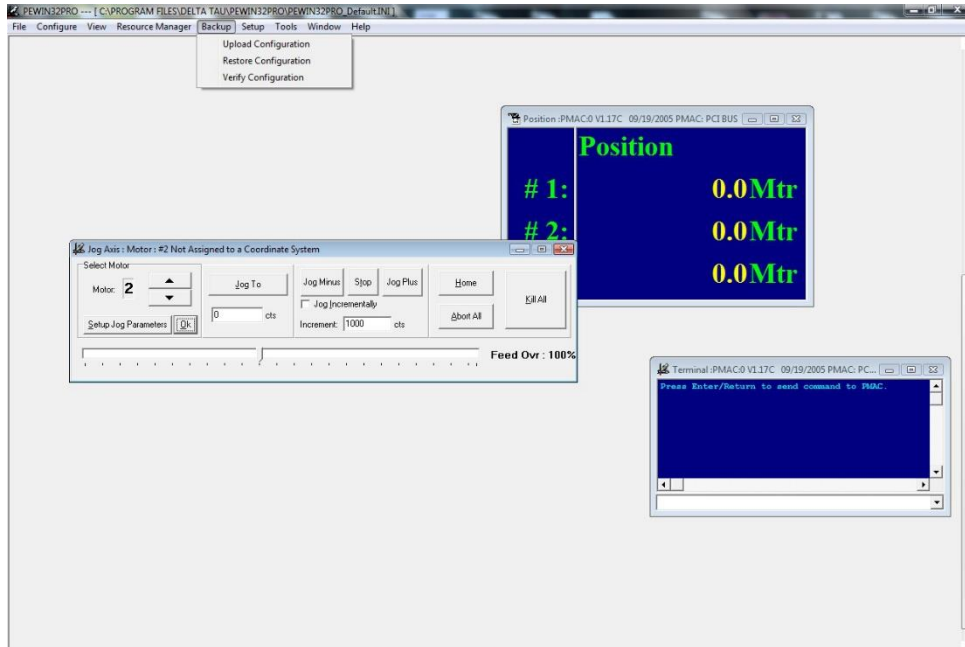
Μεταβλητή I	Ενδεικτική τιμή κινητήρα n			Σχόλια
	n=1	n=2	n=4	
In00	1	1	1	Motor n Activate
In01	0	0	0	Motor n PMAC-Commutate Enable
In02	\$C003	\$C002	\$C00A	Motor n DAC Address
In03	\$720	\$721	\$723	Motor n Position Address
In04	\$720	\$721	\$723	Motor n Velocity Address
In05	\$73F	\$73F	\$73F	Motor n Master Position Address
In06	0	0	0	Motor n Master Follow Enable
In07	96	96	96	Motor n Master Scale Factor
In08	96	96	96	Motor n Position Scale Factor
In09	96	96	96	Motor n Velocity Scale Factor
In10	50	50	50	Motor n Power-on Servo Position Address
In11	32000	32000	32000	Motor n Fatal Following Error Limit
In12	16000	16000	16000	Motor n Warning Following Error Limit
In13	0	0	0	Motor n +Software Position Limit
In14	0	0	0	Motor n -Software Position Limit
In15	0.25	0.25	0.25	Motor n Abort/Lim Decel Rate
In16	32	32	32	Motor n Maximum Velocity
In17	0.5	0.5	0.5	Motor n Maximum Acceleration
In18	0	0	0	Reserved for Future use
In19	0.015625	0.015625	0.015625	Motor n Maximum Jog Acceleration
In20	0	0	0	Motor n Jog/Home Acceleration Time
In21	50	50	50	Motor n Jog/Home S-Curve Time
In22	32	32	32	Motor n Jog Speed
In23	-32	-32	32	Motor n Homing Speed & Direction
In24	0	0	0	Reserved for Future use
In25	\$C000	\$C004	\$C00C	Motor n Flag Address
In26	0	0	0	Motor n Home Offset
In27	0	0	0	Motor n Rollover Range
In28	160	160	160	Motor n In-Position Band
In29	0	0	0	Motor n DAC/1 st Phase Bias
In30	10000	10000	10000	Motor n Proportional Gain
In31	7000	7000	7000	Motor n Derivative Gain
In32	7000	7000	7000	Motor n Velocity Feed Forward Gain
In33	0	0	0	Motor n Integral Gain
In34	1	1	1	Motor n Integration Mode

Σχήμα 4.13: Ενδεικτικές τιμές μεταβλητών τύπου I.

Μεταβλητή M	Τιμές
M200	Y:\$FFC1,0,1
M201	Y:\$FFC1,1,1
M202	Y:\$FFC1,2,1
M203	Y:\$FFC1,3,1
M204	Y:\$FFC1,4,1
M205	Y:\$FFC1,5,1
M206	Y:\$FFC1,6,1
M207	Y:\$FFC1,7,1
M208	Y:\$FFC1,8,1
M209	Y:\$FFC1,9,1
M210	Y:\$FFC1,10,1
M211	Y:\$FFC1,11,1
M212	Y:\$FFC1,12,1
M213	Y:\$FFC1,13,1
M214	Y:\$FFC1,14,1
M215	Y:\$FFC1,15,1

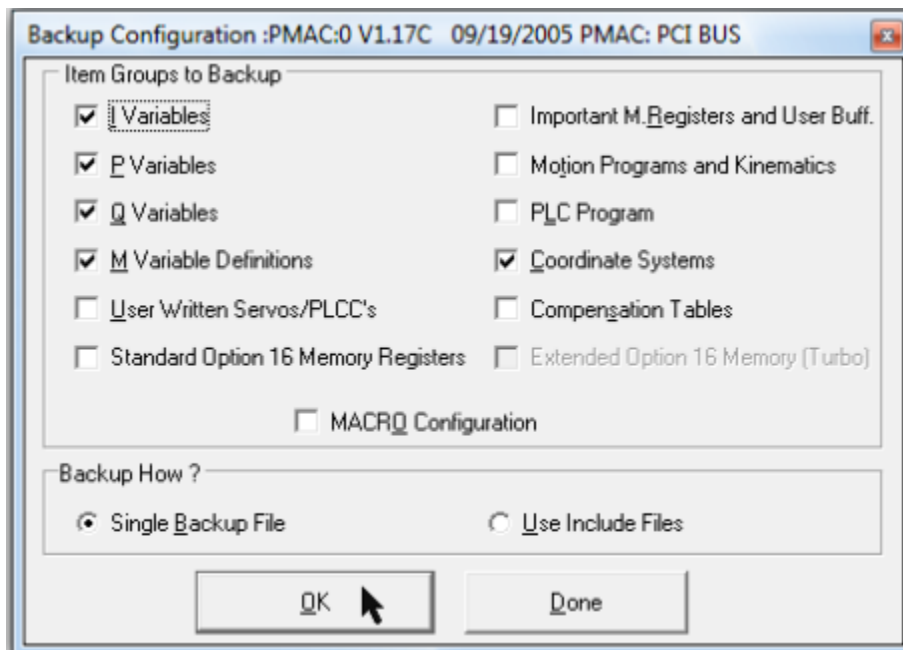
Σχήμα 4.14: Τιμές M μεταβλητών.

Αφού ολοκληρώσουμε την ανάθεση των τιμών, προχωρούμε στην επιλογή Upload To Editor και Download για την αποθήκευση των αλλαγών. Μετά την αποθήκευση των επιθυμητών τιμών δημιουργούμε ένα καινούργιο backup αρχείο για την μηχανή μέσω της επιλογής Backup → Upload Configuration.



Σχήμα 4.15: Επιλογή Upload configuration για την δημιουργία καινούργιου αντιγράφου ασφαλείας.

Στο παράθυρο που θα εμφανιστεί επιλέγουμε τον τύπο των μεταβλητών που θέλουμε να αποθηκεύσουμε στο καινούργιο αρχείο backup.



Σχήμα 4.16: Επιλογή τύπου μεταβλητών προς αποθήκευση στο καινούργιο αρχείο backup.

- **Πρόβλημα περιστροφής των doser του συστήματος απλώματος σκόνης**

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αναδειχθεί όταν ο θάλαμος είναι πολύ βρώμικος από σκόνη με αποτέλεσμα κάποια στιγμή ο κινητήρας περιστροφής κάποιου doser να μην περιστραφεί καλά μετά το ρίξιμο της σκόνης (βλ. εικόνα Σχήματος 4.17).



Σχήμα 4.17: Ο αριστερός doser του συστήματος απλώματος σκόνης δεν έχει στραφεί στην σωστή του θέση μετά το ρίξιμο της σκόνης.

Η επίλυση αυτού του ζητήματος γίνεται με την άμεση διακοπή της κατεργασίας αρχικά και στην συνέχεια το γύρισμα του doser με το χέρι στην αρχική του σωστή θέση και την αρχικοποίηση του συστήματος απλώματος σκόνης στην ακραία αριστερή του θέση (πατημένος διακόπτης LEFT SWITCH M200) και την επανεκκίνηση του συστήματος (απενεργοποίηση/ενεργοποίηση τροφοδοσίας).

- **Πρόβλημα μη απόκρισης εφαρμογής PEWIN32PRO και Ylia M20 1.7**

Σε αυτή την περίπτωση, συνήθως θα παρατηρηθεί μη απόκριση των εντολών από την εφαρμογή του ελεγκτή της μηχανής PEWIN32PRO ή παρατεταμένη εμφάνιση των ενδείξεων alarm στην εφαρμογή Ylia M20 1.7 και μπορεί να εμφανιστεί από μη σωστή αρχικοποίηση του συστήματος laser και μηχανής. Για την επίλυση του ζητήματος αυτού, προτείνεται το σβήσιμο της μηχανής και του συστήματος laser και επανεκκίνηση του υπολογιστή στον οποίο τρέχουν οι παραπάνω εφαρμογές.

5

Βασικά πειράματα λειτουργικότητας μηχανής

Σε αυτό το Κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση των βασικών πειραμάτων τήξης-πυροσυσσωμάτωσης μίας και πολλαπλών στρώσεων που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση της μηχανής SLS/SLM για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην λειτουργικότητά της.

5.1 Σκόνη Duraform PA

Η σκόνη που χρησιμοποιήθηκε για όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην μηχανή ήταν σκόνη τύπου Duraform PA από την εταιρεία 3D Systems. Η ακριβής σύνθεση του Duraform PA είναι άγνωστη, αφού ο τρόπος παραγωγής του δεν ήταν δυνατό να μας δοθεί από την εταιρεία, αλλά πρακτικώς αποτελεί μια παραλλαγή του πολυαμιδίου – nylon τύπου 12 (PA12), με το οποίο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες στις ιδιότητές του [19]. Το PA12 είναι ένα υλικό ευρέως χρησιμοποιούμενο σε μηχανές SLS/SLM. Όπως ισχύει και με άλλα πολυαμίδια και ημικρυσταλλικά πολυμερή υλικά, οι μηχανικές ιδιότητες του Duraform PA έχουν άμεση σχέση με την φύση της μοριακής του δομής, η οποία με την σειρά της ορίζεται από την θερμική «ιστορία» του υλικού. Επαναλαμβανόμενη θέρμανση και ψύξη της σκόνης του Duraform PA έχει αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά του υλικού όπως στην αντοχή σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength – UTS), στο μέτρο ελαστικότητας (E), ευθραυστότητα του και στην κρυσταλλικότητα της δομής του [19]. Αυτή η ιδιότητά του αποτελεί ένα μειονέκτημα και ένα πλεονέκτημα ταυτόχρονα για την χρήση του. Το μειονέκτημα σχετίζεται με το όταν θέλουμε να παράξουμε ομοιογενή προϊόντα μέσω της τεχνικής SLS/SLM και δεν μπορούμε να επαναχρησιμοποιήσουμε την σκόνη που βρίσκεται στον θάλαμο πάνω από κάποιο αριθμό χρήσεων. Αντιθέτως, το πλεονέκτημα της ιδιότητας αυτής να αλλάζει χαρακτηριστικά με βάση τον αριθμό επαναχρήσεως της σκόνης, σχετίζεται με το όταν θέλουμε να κατασκευάσουμε προϊόντα που οι μηχανικές τους ιδιότητες αλλάζουν από περιοχή σε

περιοχή. Οι ιδιότητες του υλικού Duraform PA παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες όπως δόθηκαν από την εταιρεία (βλ. Σχήμα 5.1 και 5.2).

General Properties

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC	U.S.
Specific Gravity	ASTM D792	1.00 g/cm ³	1.00 g/cm ³
Moisture Absorption - 24 hours	ASTM D570	0.07%	0.07%

Mechanical Properties

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC	U.S.
Tensile Strength Ultimate (MPa/PSI)	ASTM D 638	43	6237
Tensile Modulus (MPa/KSI)	ASTM D 638	1586	230
Elongation at Break (%)	ASTM D 638	14	14
Flexural Strength, Ultimate (MPa/PSI)	ASTM D 790	48	6962
Flexural Modulus (MPa/KSI)	ASTM D 790	1387	201
Hardness, Shore D	ASTM D2240	73	73
Impact Strength (notched Izod, 23°C)	ASTM D256	32 J/m	0.6 ft-lb/in
Impact Strength (unnotched Izod, 23°C)	ASTM D256	336 J/m	6.3 ft-lb/in
Gardner Impact	ASTM D5420	2.7 J	2.0 ft-lb

Thermal Properties

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC	U.S.
Heat Deflection Temperature	ASTM D 648 @ 0.45 MPa @ 1.82 MPa	180 °C 95 °C	356 °F 203 °F
Coefficient of Thermal Expansion (μm/m-°C / μm/in-°F)	ASTM E 831 0-50 °C 85-145 °C	82.6 179.2	45.9 99.6
Specific Heat Capacity	ASTM E1269	1.64 J/g-°C	0.392 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	ASTM E1225	0.70 W/m-K	4.86 BTU-in/hr-ft ² -°F
Flammability	UL 94	HB	HB

Electrical Properties

MEASUREMENT	CONDITION	METRIC	U.S.
Volume Resistivity	ASTM D257	5.9 X 10 ¹³ ohm-cm	5.9 X 10 ¹³ ohm-cm
Surface Resistivity	ASTM D257	7.0 X 10 ¹² ohm	7.0 X 10 ¹² ohm
Dissipation Factor, 1 KHz	ASTM D150	0.044	0.044
Dielectric Constant, 1 KHz	ASTM D150	2.73	2.73
Dielectric Strength	ASTM D149	17.3 kV/mm	439 kV/in

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες Duraform PA

Powder Properties

PROPERTIES	CONDITION	UNITS	TEST METHOD	PA
Density	Tap	g/cm ³	ASTM D4164	0.59
Particle Size Average (1)		μm	Laser Diffraction	58
Particle Size Range (1)	90%	μm	Laser Diffraction	25-92
Specific Gravity	20 °C		ASTM D792	0.97
Moisture Absorption	23 °C	%	ASTM D570	0.41

Thermal Properties

PROPERTIES	CONDITION	UNITS	TEST METHOD	PA
Melting Point:	T _m	°C	DSC	184
DTUL	0.45 MPa	°C	ASTM D648	177
DTUL	1.82 MPa	°C	ASTM D648	86

Mechanical Properties

PROPERTIES	CONDITION	UNITS	TEST METHOD	PA
Tensile Strength		MPa	ASTM D638	44
Tensile Modulus		MPa	ASTM D638	1600
Tensile Elongation at Break		%	ASTM D638	9
Flexural Modulus		MPa	ASTM D790	1285
Impact Strength	Notched Izod	J/m	ASTM D256	214
	Unnotched Izod	J/m	ASTM D256	428

Surface Finish

PROPERTIES	CONDITION	UNITS	TEST METHOD	PA
Facing	As Processed (R _a)	μm		8.5
	After Polishing (R _a)	μm		0.13

Chemical Resistance

PROPERTIES	CONDITION	UNITS	TEST METHOD	PA
	Alkalines, hydrocarbons, fuels and solvents			

Electrical Properties

PROPERTIES	CONDITION	UNITS	TEST METHOD	PA
Volume Resistivity	22°C, 50% RH, 500V	ohm x cm	ASTM D257-93	3.1x10 ¹⁴
Surface Resistivity	22°C, 50% RH, 500V	ohm x cm	ASTM D257-93	3.0x10 ¹⁴
Dielectric Constant	22°C, 50% RH, 500V		D150-95	2.9
Dielectric Strength		v/mm	D149-95a	1.6x10 ⁴
Comparative Tracking Index		V	D5288-92	585, TI-Cu and/or IEC Standard

Σχήμα 5.2: Ιδιότητες Duraform PA για θερμοκρασία δωματίου (20-23 °C)

Από τα παραπάνω είναι φανερό, πως το Duraform PA σαν υλικό έχει πολλά πλεονεκτήματα που το κάνουν κατάλληλο για την τεχνική SLS/SLM:

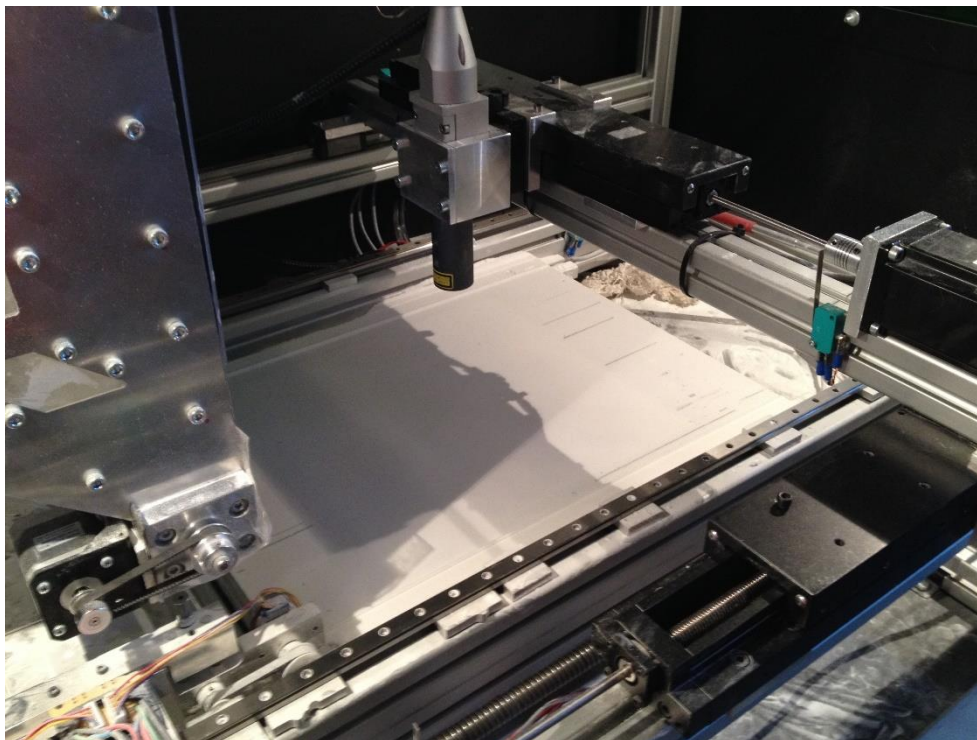
- Χαμηλό σημείο τήξης και άρα χαμηλή θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης.
- Μικρό μέγεθος κόκκων που προσφέρει ακρίβεια σε δημιουργία περίπλοκων γεωμετριών και λεπτών στρώσεων.
- Ικανοποιητικές ιδιότητες για την δημιουργία αντικειμένων που δεν απαιτούν χρονοβόρο post-processing.

Η σκόνη διατηρούνταν στον ευρύτερο χώρο της μηχανής, όπου όμως δεν υπήρχε έλεγχος θερμοκρασίας και υγρασίας. Η θερμοκρασία κυμαινόταν μεταξύ 18-25 °C κατά την διάρκεια των ημερών διεξαγωγής των πειραμάτων, η οποία πιθανώς να επηρέασε σε ένα βαθμό τα αποτελέσματα. Ο μη έλεγχος της υγρασίας κατά την διάρκεια των πειραμάτων πιθανώς επίσης να επηρέασε τα αποτελέσματα, αφού η σκόνη να μην απορροφά υψηλό ποσοστό υγρασίας, αλλά έχει μια τάση να δημιουργεί μπίλιες συσσωματωμάτων λόγω αυτής, τόσο στο δοχείο αποθήκευσης της, όσο και μετά το άπλωμα της στην τράπεζα σκόνης. Τέτοιου είδους συσσωματώματα αφαιρούνταν πάντα, αλλά παρόλα αυτά σε ορισμένα αποτελέσματα των

πειραμάτων που παρουσίαζαν ανομοιογένεια έγινε η υπόθεση πως η αιτία αυτή της συμπεριφοράς ήταν η ύπαρξη υγρασίας.

Η διαδικασία διεξαγωγής του κάθε πειράματος έγινε υλοποιώντας 4 βασικά βήματα:

- Τοποθέτηση σκόνης πάνω στην τράπεζα (powder bed) είτε από το δοχείο, είτε από επαναχρησιμοποιημένη σκόνη.
- Σωστό στρώσιμο την σκόνης πάνω στην μηχανή (βλ. εικόνα Σχήματος 5.3). Στην περίπτωση διεξαγωγής πειράματος με μη στρωμένη σκόνη, δεν θα ήταν δυνατή η εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων για την λειτουργικότητα της μηχανής και της δέσμης laser.
- Καθαρισμός με οινόπνευμα του προστατευτικού φακού εξόδου της δέσμης laser από τυχόν σκόνη που μπορεί να επηρέαζε την δέσμη.
- Επίβλεψη του πειράματος.



Σχήμα 5.3: Το σωστό στρώσιμο της σκόνης για την διεξαγωγή του κάθε πειράματος ήταν απαραίτητο για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην λειτουργικότητα της μηχανής.

5.2 Βασικά πειράματα

Πριν την αρχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι λειτουργικές δυνατότητες της μηχανής ήταν παντελώς άγνωστες. Πιο συγκεκριμένα, δεν ήταν γνωστό αν το laser με την υπάρχουσα μορφή του θα μπορούσε να επιτύχει πυροσυσσωμάτωση ή τήξη, λόγω της μεγάλης διαμέτρου της δέσμης του, αφού η λειτουργικότητα της μηχανής δεν είχε ελεγχθεί προηγουμένως.

Γι' αυτό το λόγο, αρχικά τέθηκε η μέση ισχύς του συστήματος laser να είναι στη μέγιστη τιμή της, στα 20W με συχνότητα παλμών στα 20kHz. Η επιλογή της τιμής ισχύος βασίστηκε με σκοπό να γίνει η αναγνώριση λειτουργικότητας της μηχανής στον λιγότερο δυνατό χρόνο με βάση την εξής υπόθεση:

Αν η δέσμη laser στην μέγιστη τιμή ισχύος δεν πυροσυσσωματώσει ή τήξει την σκόνη, τότε είναι βέβαιο πως σε μικρότερη ισχύ θα είναι λιγότερο λειτουργική και επομένως θα χρειαστεί άμεσα η αγορά φακού συγκέντρωσης της δέσμης σε μικρότερη διάμετρο με σκοπό την αύξηση της πυκνότητας ενέργειας ή την δοκιμή σε σκόνη άλλου χρώματος (η σκόνη Duraform PA είναι άσπρη με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η απορρόφηση ενέργειας της δέσμης laser από αυτή). Επιπροσθέτως, ακόμη και αν η δέσμη laser παρουσιαστεί να είναι λειτουργική πάνω στην σκόνη, τότε όλα τα πειράματα που θα γίνουν θα είναι στην βέλτιστη δυνατότητα της κατεργασίας (από άποψη ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας της σκόνης και επομένως της ταχύτητας πυροσυσσωμάτωσης ή τήξης της) που προσφέρει η μηχανή. Ενώ σε περίπτωση που η δέσμη laser από τα πειράματα φανεί να είναι αρκετά ισχυρή, η λογική μείωσης της ισχύος της θα γίνει μέσω δοκιμών. Επομένως η αρχική επιλογή ισχύος της δέσμης έγινε με γνώμονα την υπόθεση πως αν όντως δουλέψει η δέσμη laser, τότε θα μπορούμε να την μειώσουμε μέσω δοκιμών και πειραμάτων για την εύρεση της βέλτιστης ισχύος με βάση τα αποτελέσματα που παίρνουμε.

Με βάση τα παραπάνω, όλα τα πειράματα που παρουσιάζονται στην συνέχεια έχουν πραγματοποιηθεί στην μέγιστη τιμή μέσης ισχύος laser, ενώ τέθηκε ως στόχος η επίτευξη της πυροσυσσωμάτωσης παρά της τήξης για την διερεύνηση της λειτουργικότητας της μηχανής. Η επεξεργασία των μετρήσεων των πειραμάτων έγινε σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab 2015a.

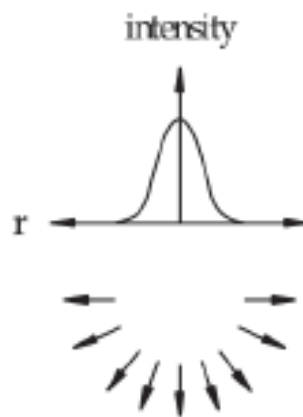
5.2.1 Πειράματα στατικής κεφαλής laser

Σε αυτή την κατηγορία πειραμάτων η κεφαλή της δέσμης laser διατηρήθηκε ακίνητη πάνω από την σκόνη. Είναι τα πρώτα πειράματα που έγιναν με την μηχανή και σκοπό είχαν την εξαγωγή συμπερασμάτων για την λειτουργικότητα της δέσμης laser πάνω στην σκόνη και είναι τριών ειδών:

- **Πειράματα Μεγέθους – Χρόνου**
- **Πειράματα Θερμοκρασίας – Χρόνου**
- **Πειράματα Θερμοκρασίας – Μεγέθους – Χρόνου**

5.2.1.1 Πειράματα Μεγέθους – Χρόνου

Τα πειράματα αυτά είχαν ως σκοπό την διερεύνηση του αν η δέσμη laser μπορεί να δημιουργήσει κάποιο στερεό προϊόν από την σκόνη χωρίς να μας ενδιαφέρει αν το προϊόν είναι πυροσυσσωματωμένο ή τηγμένο, στο πιο απλό λειτουργικό σενάριο της μηχανής (ακίνητη κεφαλή laser). Για την υλοποίηση των πειραμάτων γινόταν ενεργοποίηση της δέσμης laser, χρονομέτρηση της λειτουργίας της μέσω της εντολής DWELL και απενεργοποίηση της μετά από κάποιο χρόνο που ορίζαμε εμείς μέσω της εντολής DWELL. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν πυροσυσσωματωμένα ή τηγμένα προϊόντα σκόνης που είχαν σταγονοειδή μορφή (κομμάτι σφαίρας). Η αιτιολόγηση της γεωμετρίας του αποτελέσματός μας μπορεί να βασιστεί στην θεωρία της τρισδιάστατης ροής θερμότητας μέσα στην σκόνη (βλ. εικόνα του Σχήματος 5.4).



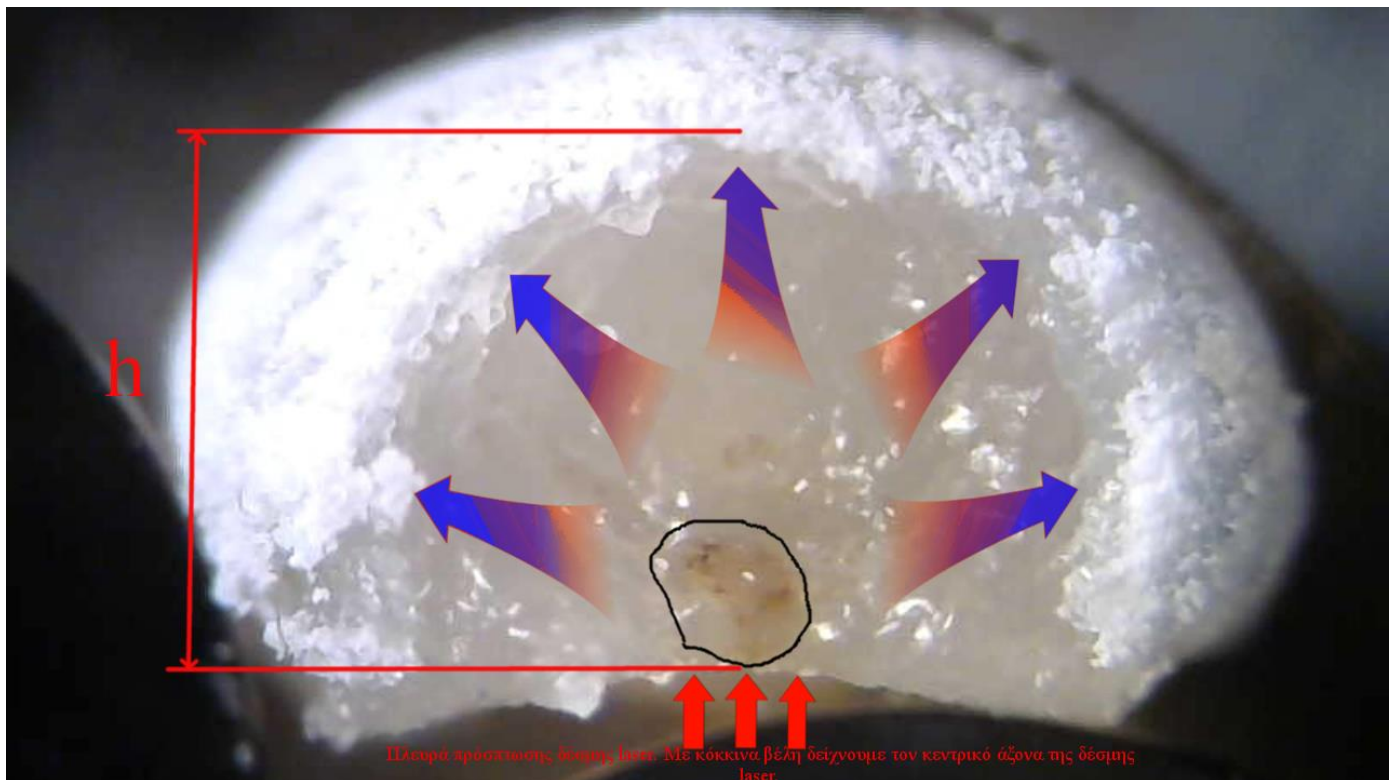
Σχήμα 5.4: Τρισδιάστατη ροή θερμότητας από την δέσμη laser μέσα στην σκόνη.

Πιο αναλυτικά, καθώς η δέσμη laser προσπίπτει στην σκόνη αρχίζει το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 (βλ. Laser-Powder αλληλεπίδραση), δηλαδή η ακτινική ροή της θερμότητας στον χώρο του powder bed από τον οπτικό άξονα του laser προς το εσωτερικό μέρος της σκόνης μέσω των κόκκων. Η εντονότητα του φαινομένου σχετίζεται άμεσα με τον χρόνο πρόσπτωσης της δέσμης laser πάνω στην σκόνη και είναι μειούμενης κλίμακας όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της δέσμης laser ακτινικά. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται δύο κύριες διαστάσεις στη στερεή μάζα του αποτελέσματος λόγω της συνολικής θέρμανσης. Αυτές οι δύο διαστάσεις είναι η διάσταση D της διαμέτρου του αποτελέσματος του πειράματος και η διάσταση h που αφορά το ύψος του κομματιού αυτού σφαίρας. Στην εικόνα του σχήματος 5.5 παρατηρείται η κάτοψη της μορφής μιας σειράς αποτελεσμάτων που πήραμε μέσω της συγκεκριμένης κατηγορίας πειραμάτων, διατεταγμένα με σειρά αυξανόμενου χρόνου, ενώ στην εικόνα του σχήματος 5.6 παρουσιάζεται η τομή ενός από τα προϊόντα των πειραμάτων όπως παρατηρήθηκε στο στερεοσκόπιο. Οι βασικές διαστάσεις D και h έχουν σημειωθεί πάνω στις εικόνες των αποτελεσμάτων. Η

εντονότητα της ακτινικής ροής θερμότητας που περιγράφηκε μπορεί να παρατηρηθεί στην εικόνα του σχήματος 5.6 όπου βλέπουμε πως κοντά στον άξονα της δέσμης laser παρατηρείται η ύπαρξη καμένου υλικού λόγω της έντονης αύξησης της θερμοκρασίας στην περιοχή αυτή, ενώ μεταφερόμενοι ακτινικά προς την περιφέρεια του στερεού αυτού προϊόντος παρατηρούμε πως έχουμε μείωση της εντονότητας της θερμοκρασίας (εκ του αποτελέσματος) αφού από κάτι εντελώς στερεό καταλήγουμε στα άκρα να έχουμε κόκκους σκόνης «κολλημένους» με την υπόλοιπη στερεή μάζα (βλ. εικόνα Σχήματος 5.7).



Σχήμα 5.5: Η κάτοψη μιας σειράς αποτελεσμάτων πειραμάτων στατικής κεφαλής Χρόνου – Μεγέθους. Η πλευρά που έπεφτε η δέσμη laser δεν φαίνεται. Παρατηρείται η αύξηση της διάστασης D με το πέρασμα του χρόνου θέρμανσης από την δέσμη laser.



Σχήμα 5.6: Η τομή ενός από τα πειραματικά αποτελέσματα στο στερεοσκόπιο. Με μαύρο χρώμα παρατηρούμε την περιοχή που είχαμε έντονη θέρμανση (στοιχεία καμένου υλικού) και όσο πλησιάζουμε ακτινικά προς την περιφέρεια παρατηρούμε το φαινόμενο της μειούμενης θερμικής ροής. Το φαινόμενο συμβαίνει και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Από κάτω είναι η πλευρά πρόσπτωσης της δέσμης laser. Με κόκκινα βέλη δείχνουμε τον κεντρικό άξονα της δέσμης laser. Τέλος, φαίνεται η διάσταση h .



Σχήμα 5.7: «Κολλημένοι» κόκκοι σκόνης με την υπόλοιπη στερεή μάζα στην περιφέρεια της συνολικής μάζας. Αποτέλεσμα της μειούμενης ακτινικής θερμικής ροής από τον κεντρικό άξονα της δέσμης Laser προς το εσωτερικό της σκόνης του powder bed.

Οι διαστάσεις D και h μετρήθηκαν (με παχύμετρο) για έναν αριθμό πειραμάτων που διεξήχθησαν σε διαφορετικές μέρες με διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ($21-23\text{ }^{\circ}\text{C}$) και παρατηρήθηκε πως ήταν ίδιες για ίδιους χρόνους. Επομένως δεν παρατηρήθηκε κάποιο συστηματικό σφάλμα λόγω επίδρασης εξωτερικών παραγόντων. Οι εξωτερικοί παράγοντες όμως έπαιξαν ρόλο στο φαινόμενο της καύσης που αναφέρθηκε πριν. Παρατηρήθηκε πως η υγρασία που απορροφά το κάθε σημείο πάνω στο powder bed δεν είναι σταθερή, αφού σε ίδια θερμοκρασία του χώρου ο χρόνος εμφάνισης σπινθήρα, δηλαδή του φαινομένου καύσης του υλικού της σκόνης λόγω της θέρμανσης της δέσμης laser, κατά την επίβλεψη του πειράματος κυμαινόταν από 3-25 sec. Τέλος, για μεγάλους χρόνους παρατεταμένης θέρμανσης μιας περιοχής της σκόνης (άνω των 30 sec) παρατηρήθηκε πως η μορφή των προϊόντων σταματούσε να είναι σφαιρική. Σε αυτές τις περιπτώσεις κάνουμε λόγω για δύο κύριες διαστάσεις D , την D_1 και D_2 , αφού τα προϊόντα έπαιρναν ελλειπτική μορφή. Όπως μελετήθηκε στα πειράματα Θερμοκρασίας – Χρόνου που θα παρουσιαστούν παρακάτω, αυτή η συμπεριφορά οφείλονταν στο ότι μια μεγάλη περιοχή σκόνης μετά από τόσο μεγάλο χρόνο θέρμανσης είχε φτάσει την θερμοκρασία τήξης με αποτέλεσμα τα μεγάλα θερμοκρασιακά gradient στην περιοχή αυτή να προκαλούν την παραμόρφωσή της. Παρόλα αυτά στην παρακάτω ανάλυση σαν διάσταση D εμείς θα παίρνουμε τον μέσο όρο μεταξύ D_1 και D_2 . Η ίδια ακριβώς συμπεριφορά παρατηρήθηκε και για την διάσταση h , η οποία μετά από χρόνο θέρμανσης 30 sec, παρουσίασε μείωση λόγω της θερμικής συρρίκνωσης (shrinking) που επήλθε στα προϊόντα από το έντονο θερμοκρασιακό gradient.

Με βάση τις συνολικές μετρήσεις των διαστάσεων D και h σε σχέση με τον χρόνο δημιουργήθηκαν τα παρακάτω μοντέλα πρόβλεψής τους:

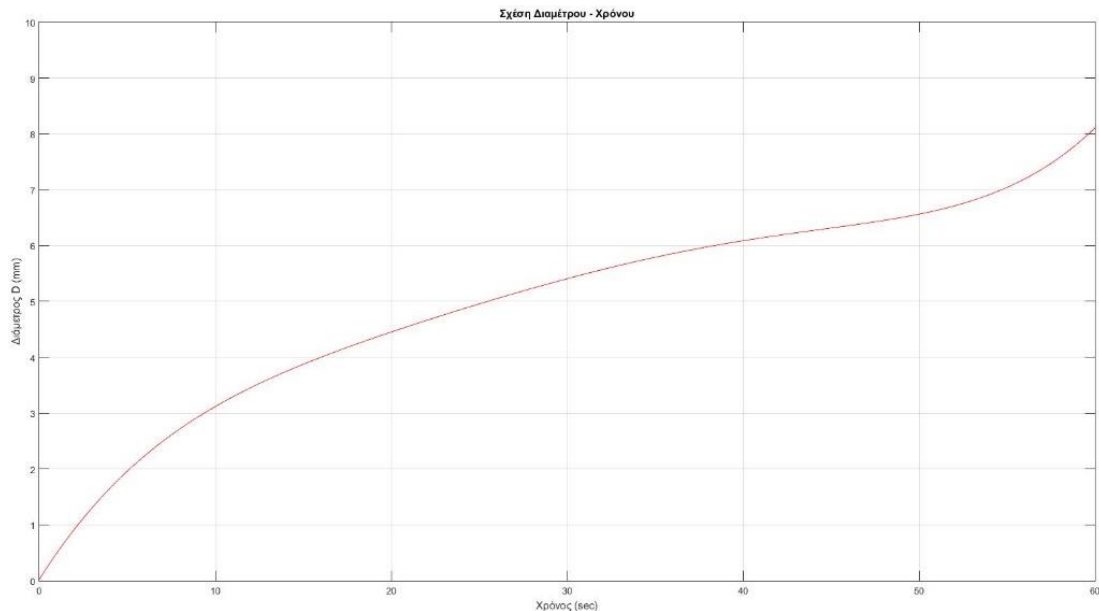
Σχέση Διαμέτρου – Χρόνου

$$D = 5.402 \cdot 10^{-8} \cdot t^5 - 7.482 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 + 0.0004153 \cdot t^3 - 0.0133 \cdot t^2 + 0.344 \cdot t + 0.6066$$

,όπου D [mm] η διάμετρος με την ελάχιστη παραμόρφωση και t [s] ο χρόνος θέρμανσης.

Η ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου κρίνεται πολύ καλή με βάση τις μετρήσεις των πειραμάτων αφού:

- Το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος $SSE = 0.06567$.
- $R^2 = 0.9976$
- Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος $RMSE = 0.148$.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα καμπύλης μοντέλου πρόβλεψης διαμέτρου προϊόντος σε σχέση με τον χρόνο θέρμανσης.

Σχέση Ύψους – Χρόνου

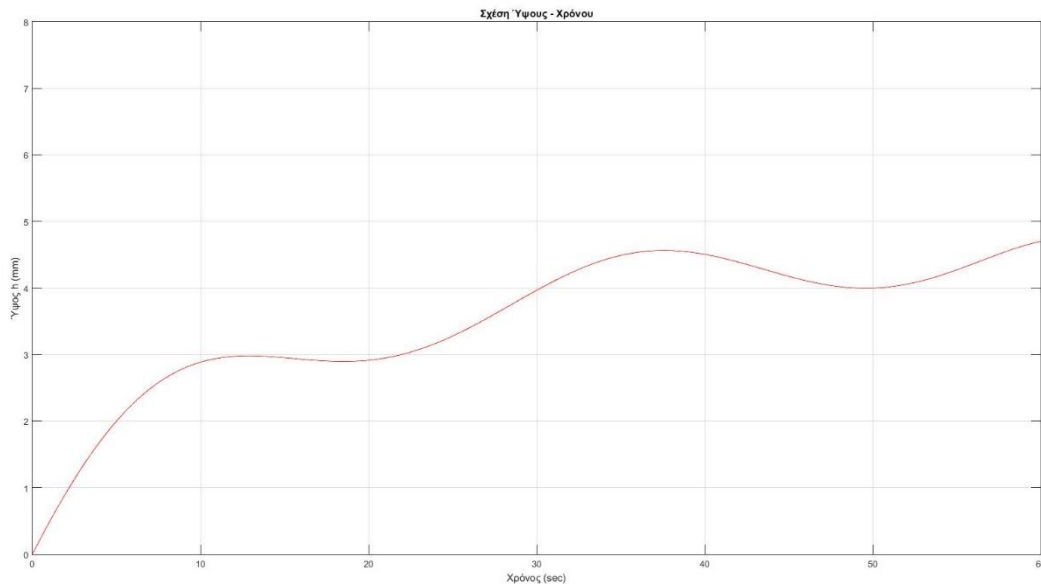
$$h = 6.283 \cdot \sin(0.05027 \cdot t - 0.4196) + 2.359 \cdot \sin(0.0954 \cdot t + 1.175) + 0.701 \cdot \sin(0.2017 \cdot t + 0.5811)$$

,όπου h [mm] το ύψος του προϊόντος και t [s] ο χρόνος θέρμανσης.

Η ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου κρίνεται πολύ καλή με βάση τις μετρήσεις των πειραμάτων αφού:

- Το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος $SSE = 0.01774$.
- $R^2 = 0.999$
- Ρίζα του τετραγωνικού σφάλματος $RMSE = 0.1332$.

Η καλή του προβλεπτική ικανότητα είναι για τα 60 sec θέρμανσης. Παραπάνω χρόνος θέρμανσης θα απαιτούσε και την χρήση επιπλέον όρων ημιτόνου.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα καμπύλης πρόβλεψης ύψους προϊόντος σε σχέση με τον χρόνο θέρμανσης.

5.2.1.2 Πειράματα Θερμοκρασίας – Χρόνου

Τα πειράματα Θερμοκρασίας – Χρόνου έγιναν και αυτά στο πιο απλό λειτουργικό σενάριο της μηχανής, δηλαδή θέρμανση της σκόνης με στατική κεφαλή laser, χωρίς να μας ενδιαφέρει αν η στερεή μάζα του προϊόντος από την σκόνη ήταν αποτέλεσμα πυροσυσσωμάτωσης ή τήξης. Σκοπός της διεξαγωγής τους ήταν η διερεύνηση του κατά πόσο αυξάνεται η θερμοκρασία στην περιοχή σκόνης στην οποία προσέπιπτε η δέσμη laser.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων η μέτρηση θερμοκρασίας έγινε από αισθητήρα πυρομέτρου της Alhborn που υπήρχε στο εργαστήριο. Ο αισθητήρας ήταν μοντέλου πυρομέτρου σκανδάλης AMRR3ILTCL2CRD, τεχνολογίας διπλού σημείου και επέτρεπε την μέτρηση θερμοκρασίας εξ' αποστάσεως μέσω της εκλυόμενης θερμικής ακτινοβολίας της επιφάνειας που θέρμαινε η δέσμη laser της μηχανής. Επειδή το φασματικό εύρος μέτρησης του αισθητήρα αφορούσε την μέτρηση της θερμικής ακτινοβολίας (μήκη κύματος από 8 έως 14 μm) η ακτινοβολία του laser που είχε μήκος κύματος 1.064 μm δεν επηρέαζε τις μετρήσεις. Παρόλα αυτά είναι πιθανό να είχαμε κάποιο σφάλμα λόγω χαμηλού emissivity της επιφάνειας της σκόνης, αφού ήταν στρωμένη και ήταν άσπρου χρώματος. Ο αισθητήρας ήταν διπλού σημείου,

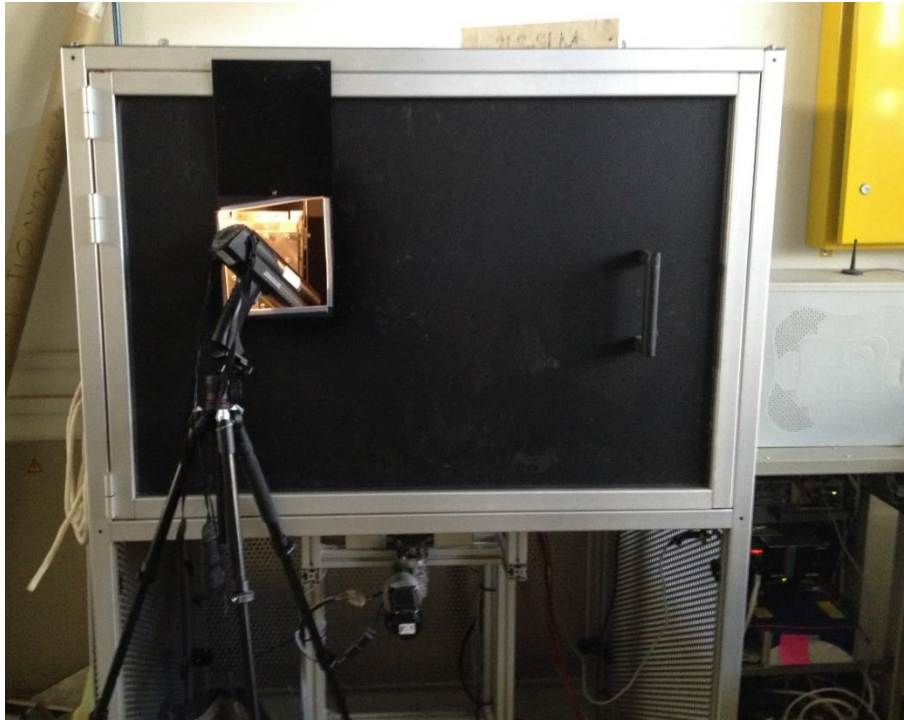
δηλαδή έστειλε δύο σημεία laser πάνω στην επιφάνεια που θέλαμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία. Όσο μεγαλύτερη ταύτιση είχαν αυτά τα δύο σημεία μεταξύ τους τόσο μεγαλύτερη ήταν η ακρίβεια της μέτρησης της θερμοκρασίας. Τέλος, ο αισθητήρας είχε οθόνη και πλήκτρα που επέτρεπαν την επιλογή της αποθήκευσης διαφόρων τιμών μιας σειράς μετρήσεων ενός δείγματος, όπως μέση τιμή, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία κ.ά., καθώς και επιλογή κλειδώματος της σκανδάλης ενεργοποίησης για συνεχόμενη μέτρηση θερμοκρασίας κάποιας περιοχής. Το πυρόμετρο του εργαστηρίου παρουσιάζεται στην εικόνα του σχήματος 5.10.



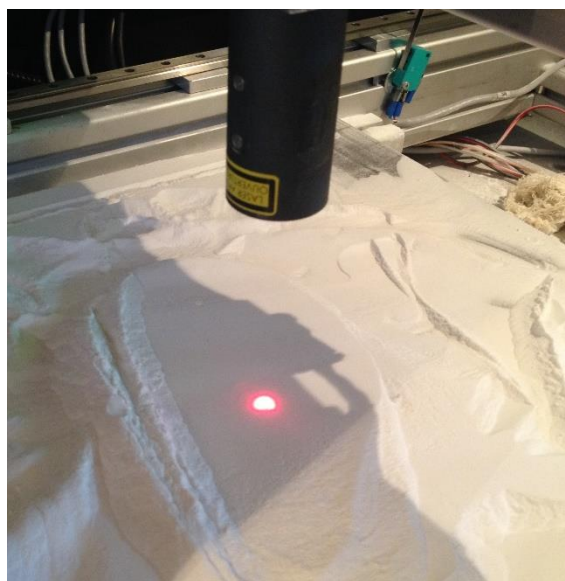
Σχήμα 5.10: Πυρόμετρο σκανδάλης της Alhborn που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων δημιουργήθηκε ειδικό παράθυρο στην πόρτα του θαλάμου της μηχανής, όπου εισέρχονταν ο αισθητήρας εστιασμένος σε μια περιοχή που βρισκόταν κάτω από το laser. Η στήριξη του πυρομέτρου γινόταν με ρυθμιζόμενο τρίποδο και η απόσταση του από την περιοχή μέτρησης ήταν περίπου 40cm. Σε αυτή την απόσταση είχαμε ταύτιση των δύο σημείων μετρήσεων του πυρομέτρου και επομένως πιο ακριβή μέτρηση. Αξίζει να σημειώσουμε πως το spot size μέτρησης του πυρομέτρου (βλ. εικόνα Σχήματος 5.12) παρόλα αυτά ήταν μεγαλύτερο από το spot size της δέσμης laser που θέρμαινε την σκόνη, επομένως υπήρχε μεταβολή στις μετρήσεις που παίρναμε από σημείο σε σημείο μέσα στην περιοχή που έπεφτε η δέσμη laser λόγω της έντονης τοπικότητας του θερμικού φαινομένου. Για την καταγραφή των μετρήσεων, λόγω του κινδύνου έκθεσης του δέρματος στην ακτινοβολία της

δέσμης laser, αλλά και για την ακριβή συσχέτιση του χρόνου με την κάθε μέτρηση θερμοκρασίας που παίρναμε, χρησιμοποιήθηκε κάμερα μπροστά από την οθόνη του πυρομέτρου καταγράφοντας όλες τις μετρήσεις. Η επεξεργασία των μετρήσεων και η συσχέτισή τους με τον χρόνο έγινε μετά το τέλος του πειράματος από ειδικό πρόγραμμα που μας έδινε το κάθε frame του video για κάθε χρονική στιγμή. Προφανώς η ενεργοποίηση της δέσμης laser της μηχανής και της σκανδάλης του πυρομέτρου γινόταν ταυτόχρονα με αποτέλεσμα όλες οι μετρήσεις να μπορούν να συσχετιστούν με τον συνολικό χρόνο θέρμανσης. Η διάταξη των πειραμάτων παρουσιάζεται στην εικόνα του Σχήματος 5.11.



Σχήμα 5.11: Πειραματική διάταξη για την εύρεση της σχέσης Θερμοκρασίας – Χρόνου.



Σχήμα 5.12: Το spotsize του πυρομέτρου για την μέτρηση της θερμοκρασίας στην περιοχή πρόσπτωσης της δέσμης laser.

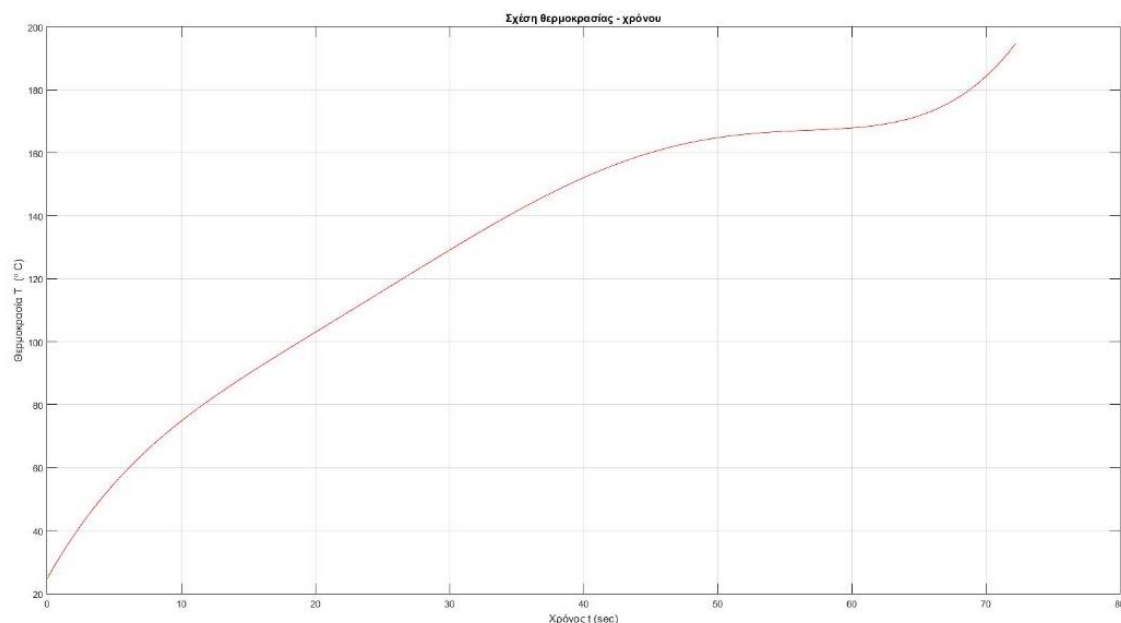
Το προβλεπτικό μοντέλο που προέκυψε είναι το ακόλουθο:

$$T = 1.185 \cdot t^5 - 0.0002041 \cdot t^4 + 0.01255 \cdot t^3 - 0.3602 \cdot t^2 + 7.534 \cdot t + 24.87$$

Όπου T [°C] η εκτιμώμενη μέση θερμοκρασία στην περιοχή πρόσπτωσης της δέσμης laser και t [s] ο χρόνος θέρμανσης.

Η προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου θα μπορούσε να θεωρηθεί αρκετά non-biased αφού:

- Το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος $SSE = 877.4$ (αρκετή υψηλή)
- $R^2 = 0.997$ (πολύ ικανοποιητική)
- Ρίζα του τετραγωνικού σφάλματος $RMSE = 2.66$ (ικανοποιητική τιμή)



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα καμπύλης μοντέλου πρόβλεψης θερμοκρασίας με βάση τον χρόνο θέρμανσης.

Όπως παρατηρείται στην παραπάνω καμπύλη οι μετρήσεις που λάβαμε μετά από χρόνο 50s παρουσιάζουν μια μικρή σταθεροποίηση κατά την διάρκεια της θέρμανσης, ενώ αρχικά είχαν μια σχετικά έντονη αύξηση θερμοκρασίας, που είναι κάτι που περιμένουμε να συμβεί καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Το παράδοξο αυτό συμβαίνει γιατί με την πάροδο του χρόνου η περιοχή που θερμαίνεται από την δέσμη laser αρχίζει και αυξάνεται σε μέγεθος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καταγραφή μετρήσεων από το πυρόμετρο από μια πιο μεγάλη περιοχή σε σχέση με την αρχή του πειράματος, η οποία παρουσιάζει έντονη τοπικότητα όσο αφορά το θερμοκρασιακό προφίλ της. Με άλλα λόγια, μια μετακίνηση μέσα σε αυτή την περιοχή κατά 0.1 mm μπορεί να σημάνει αλλαγή κατά 30 ή και παραπάνω °C. Αυτός είναι και ο λόγος επίσης που παρατηρείται στην πάνω καμπύλη μια συνεχόμενη μείωση κλίσης της (φθίνουσα δεύτερη παράγωγος) μετά τα πρώτα 10 sec μέχρι τον χρόνο των 63 sec όπου πρακτικά ένα μεγάλο μέρος της περιοχής στερεού προϊόντος έχει πλησιάσει την θερμοκρασία τήξης του. Μετά από αυτό

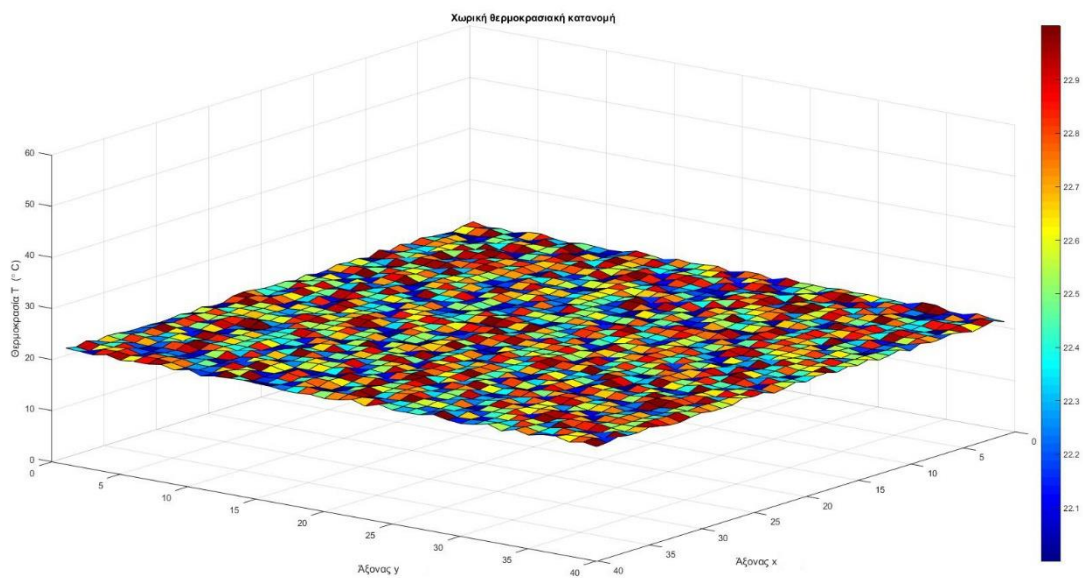
τον χρόνο παρατηρείται ξανά έντονη αύξηση της θερμοκρασίας λόγω δημιουργίας μεγάλης περιοχής melting pool. Το πυρόμετρο του εργαστηρίου δεν μπορούσε να διαχειριστεί την τοπικότητα αυτών των φαινομένων από την απόσταση που είχε τεθεί και για αυτό επέστρεφε ουσιαστικά μια μέση τιμή της θερμοκρασίας της περιοχής αυτής. Για τους παραπάνω λόγους έγινε αντιληπτό πως για την σωστότερη κατανόηση του θερμικού προφίλ πάνω στην σκόνη με το υπάρχον σύστημα πυρομέτρου θα έπρεπε να προχωρήσουμε στα πειράματα της επόμενης κατηγορίας, δηλαδή σε πειράματα συνδυασμού Θερμοκρασίας – Μεγέθους – Χρόνου.

5.2.1.3 Πειράματα Θερμοκρασίας – Μεγέθους – Χρόνου

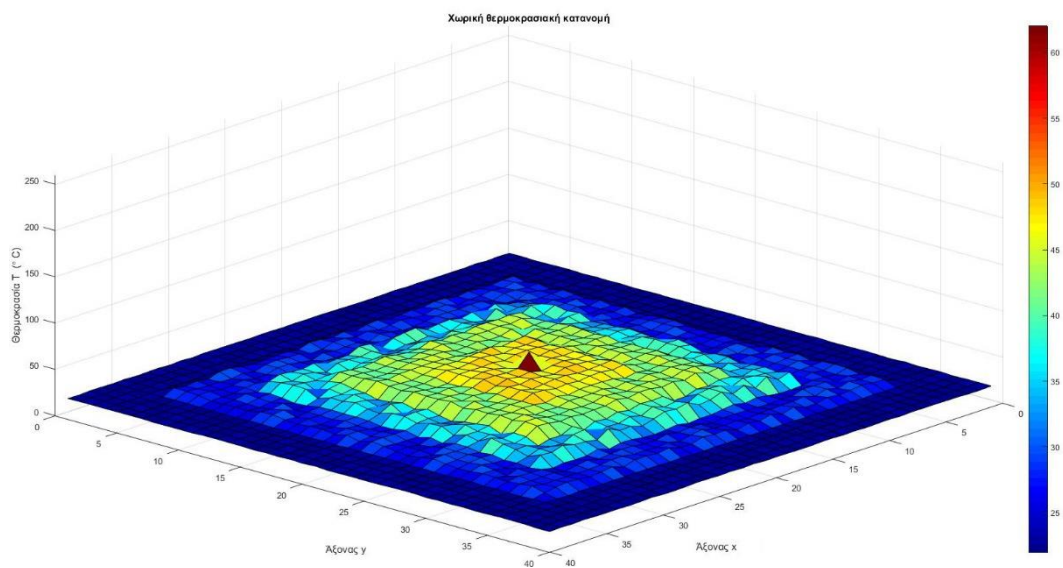
Τα συγκεκριμένα πειράματα έγιναν με την διάταξη του πυρομέτρου που περιγράφηκε παραπάνω ενώ διατηρήθηκε το ίδιο σενάριο θέρμανσης με στατική κεφαλή laser. Η μόνη διαφορά που υπήρχε σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα ήταν πως πλέον μετά από κάποιους συγκεκριμένους χρόνους θέρμανσης γινόταν ακαριαία απενεργοποίηση της λειτουργίας της δέσμης laser και άρα και της θέρμανσης με ταυτόχρονο άνοιγμα της πόρτας του θαλάμου και γρήγορη εστίαση του πυρομέτρου τοπικά πάνω στο στερεό προϊόν για την εύρεση της μέγιστης θερμοκρασίας που υπήρχε σε αυτό μέσω της επιλογής αποθήκευσης της που μας έδινε η συσκευή του πυρομέτρου. Η κοντινή εστίαση του πυρομέτρου μας έδινε την πιο τοπική καταγραφή της μέγιστης θερμοκρασίας. Ο χρόνος της ακαριαίας απενεργοποίησης της θέρμανσης και της μέτρησης της μέγιστης θερμοκρασίας χρονομετρήθηκε στα 2 sec. Αυτό σημαίνει πως η καταγραφή της μέγιστης θερμοκρασίας που παίρναμε ήταν πολύ κοντά στην πραγματική τιμή της, η οποία εμφανιζόταν κατά την διάρκεια της θέρμανσης από την δέσμη laser και δεν μπορούσε να καταγραφεί με άλλο τρόπο με τον υπάρχοντα αισθητήρα πυρομέτρου και χωρίς να γίνει απευθείας έκθεση ανθρώπου στην ακτινοβολία της δέσμης laser. Από τα δεδομένα που καταγράφηκαν σε αυτή την σειρά πειραμάτων δημιουργήθηκε μια απεικόνιση του χωρικού θερμοκρασιακού προφίλ της περιοχής που προσπίπτει η δέσμη laser για κάθε καταγεγραμμένο χρόνο θέρμανσης. Για καλύτερο και ακριβέστερο resolution στο θερμοκρασιακό προφίλ θα απαιτούνταν η αγορά κάποιου άλλου αισθητήρα με δυνατότητα καταγραφής μετρήσεων πολύ πιο τοπικά από αυτόν που είχε το εργαστήριο.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα χωρικά θερμοκρασιακά προφίλ της περιοχής της σκόνης που προσπίπτει η δέσμη laser για διαφορετικούς χρόνους θέρμανσης. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται για λόγους οπτικοποίησης του φαινομένου περισσότερο, αφού οι ακριβείς θερμοκρασιακές τιμές για κάθε σημείο του χώρου δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν από τον αισθητήρα του εργαστηρίου. Οι επιφάνειες θερμοκρασιακής κατανομής παρουσιάζονται ως παραλληλόγραμμα αντί για κυκλικοί δίσκοι για απλοποίηση της οπτικοποίησης· κάτι τέτοιο δεν επηρεάζει όμως την πληροφορία των διαγραμμάτων, η οποία αφορά την απεικόνιση της

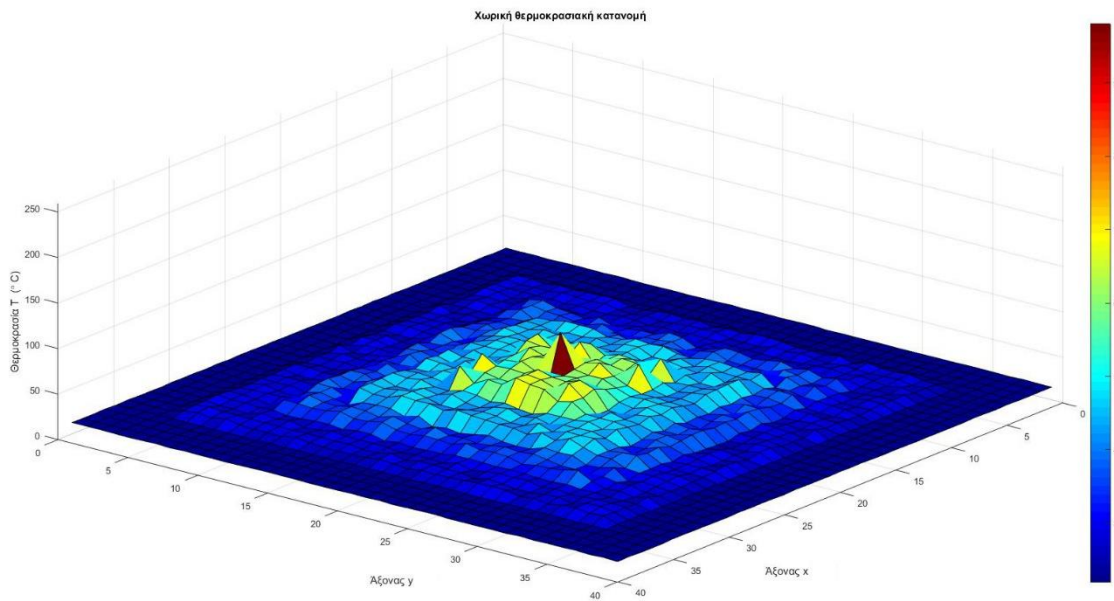
χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας σε ζώνες. Πιο συγκεκριμένα, τα θερμοκρασιακά προφίλ που παρουσιάζονται στην συνέχεια απεικονίζουν την θερμοκρασιακή κατανομή που υπάρχει πάνω στην περιοχή πρόπτωσης της δέσμης laser σε ζώνες συγκεκριμένου εύρους τιμών θερμοκρασίας. Αυτές οι τιμές θερμοκρασίας μετρήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Στις ζώνες αυτές η θερμοκρασία του κάθε σημείου όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα έχει επιλεγεί τυχαία μεταξύ των ακραίων τιμών του εύρους που επικρατεί σε αυτή την ζώνη. Τέλος σημειώνουμε πως η κίνηση 5 μονάδων στους άξονες x και y των διαγραμμάτων αντιστοιχεί σε 1 mm μετατόπισης στο πραγματικό τραπέζι σκόνης της μηχανής.



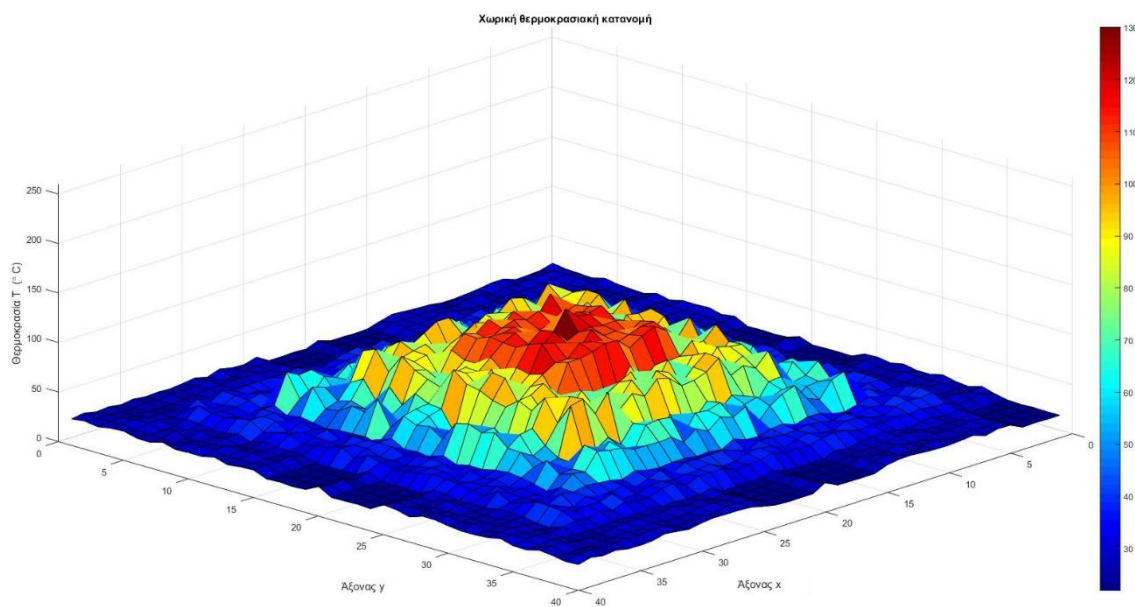
Σχήμα 5.14: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για χρόνο $t = 0s$ (laser απενεργοποιημένο). Η θερμοκρασία της σκόνης κυμαίνεται από 22 μέχρι 23 °C.



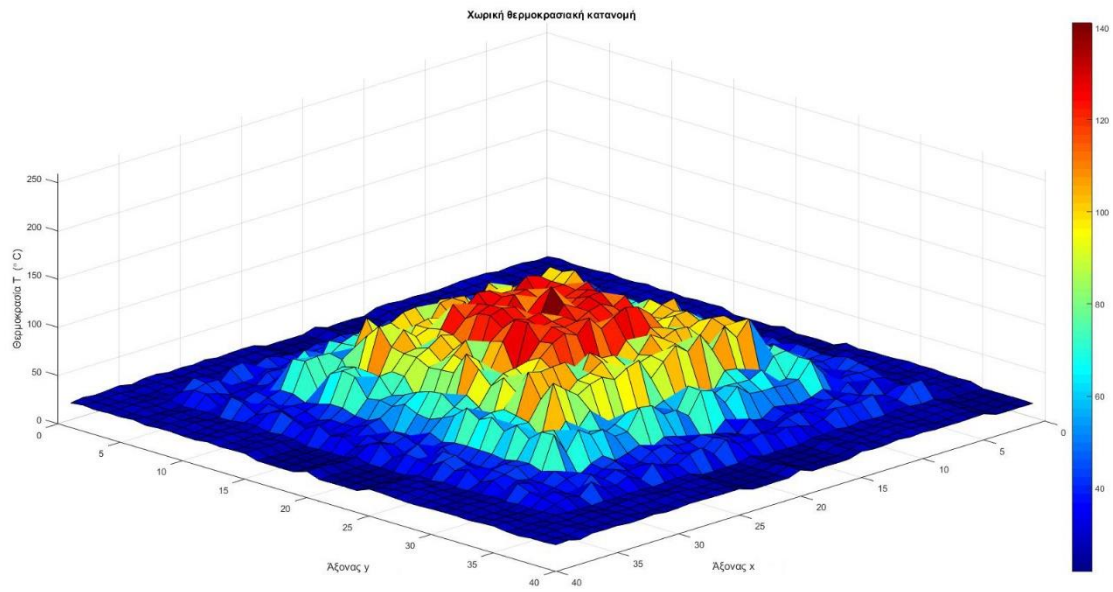
Σχήμα 5.15: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για χρόνο θέρμανσης $t = 5s$. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία 62 °C.



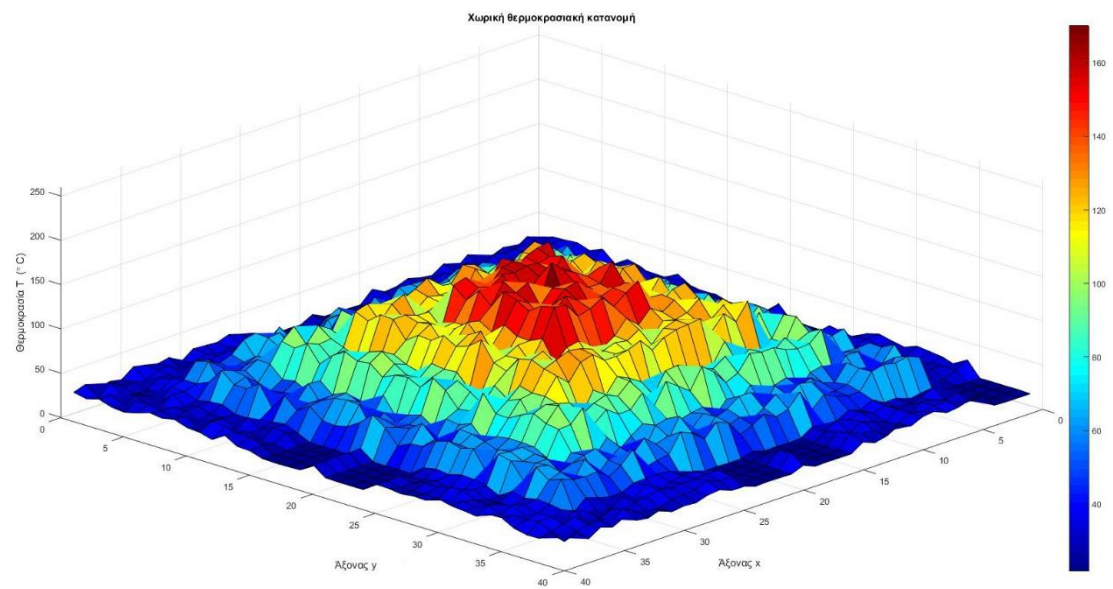
Σχήμα 5.16: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για χρόνο $t = 10$ s. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία 98 °C.



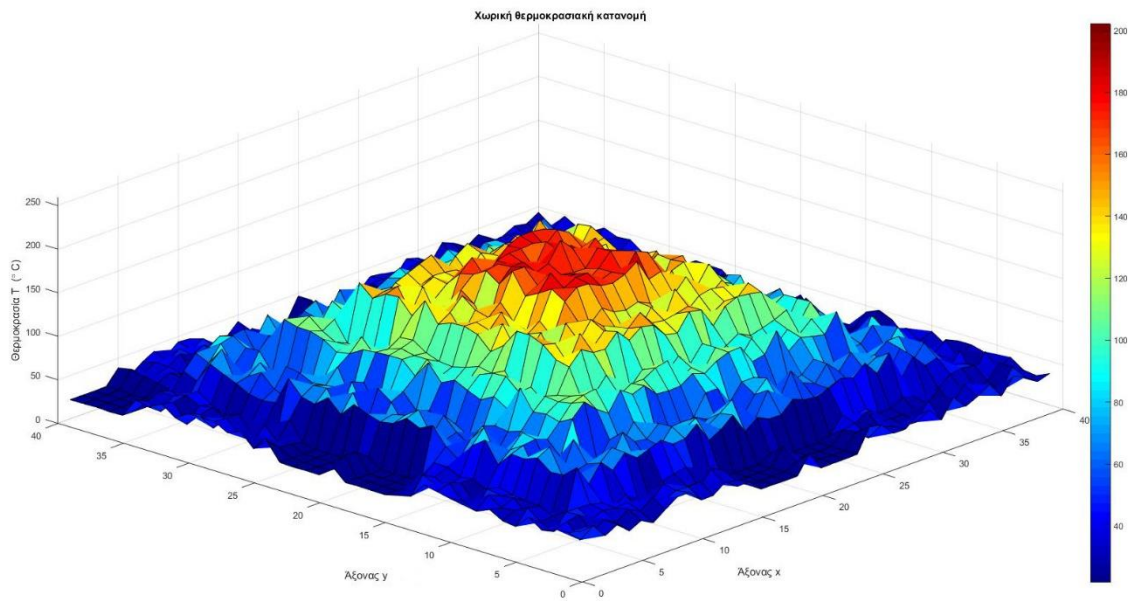
Σχήμα 5.17: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για $t = 15$ s. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία 130 °C.



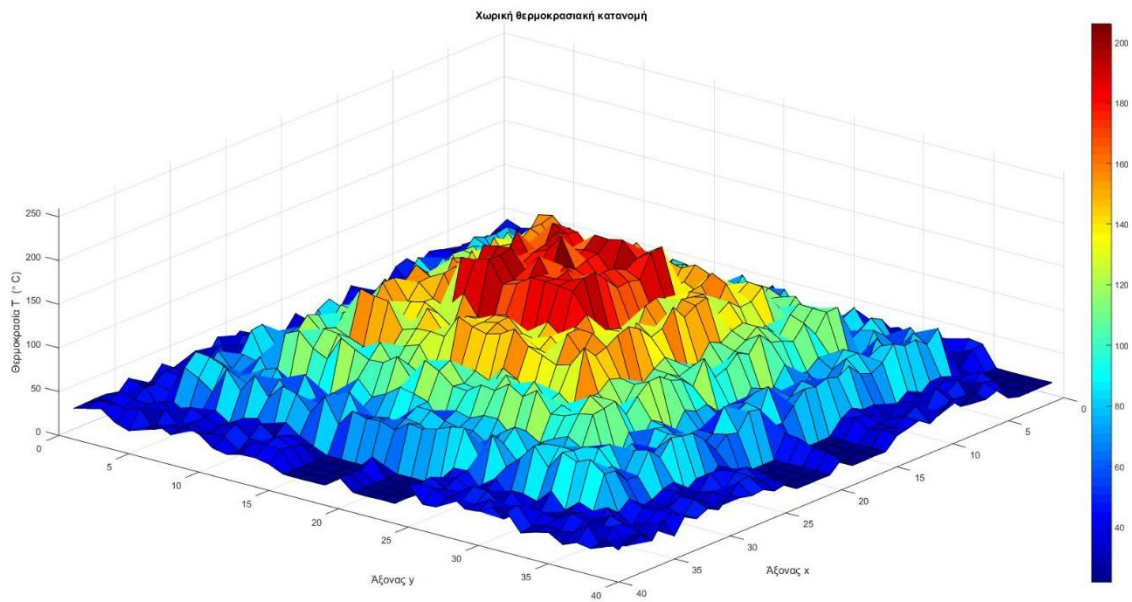
Σχήμα 5.18: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για $t = 20s$. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία $141\text{ }^{\circ}\text{C}$.



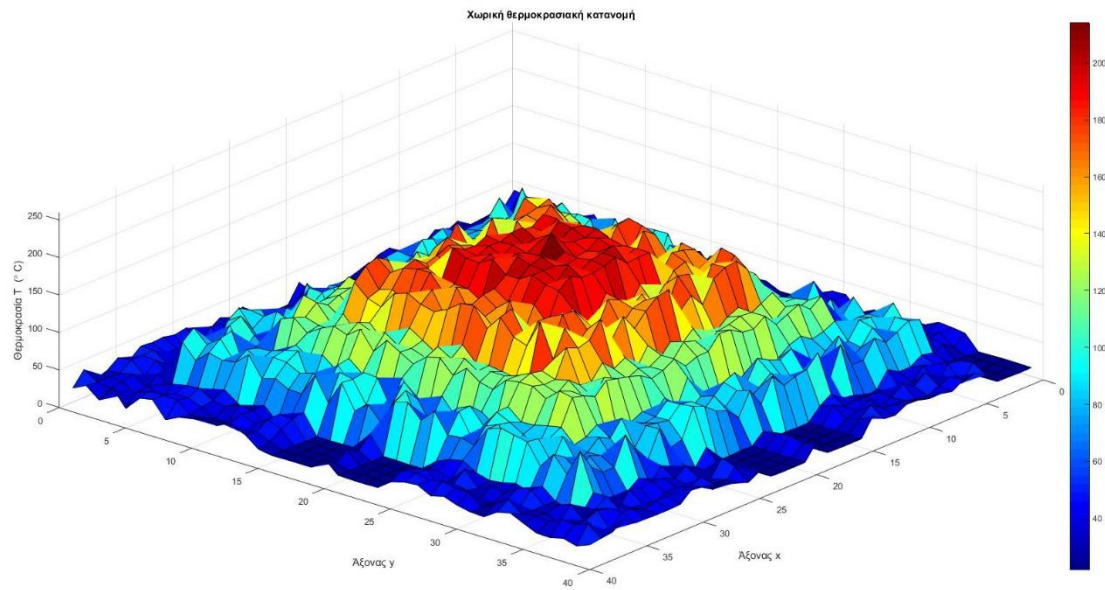
Σχήμα 5.19: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για $t = 25s$. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία $170\text{ }^{\circ}\text{C}$.



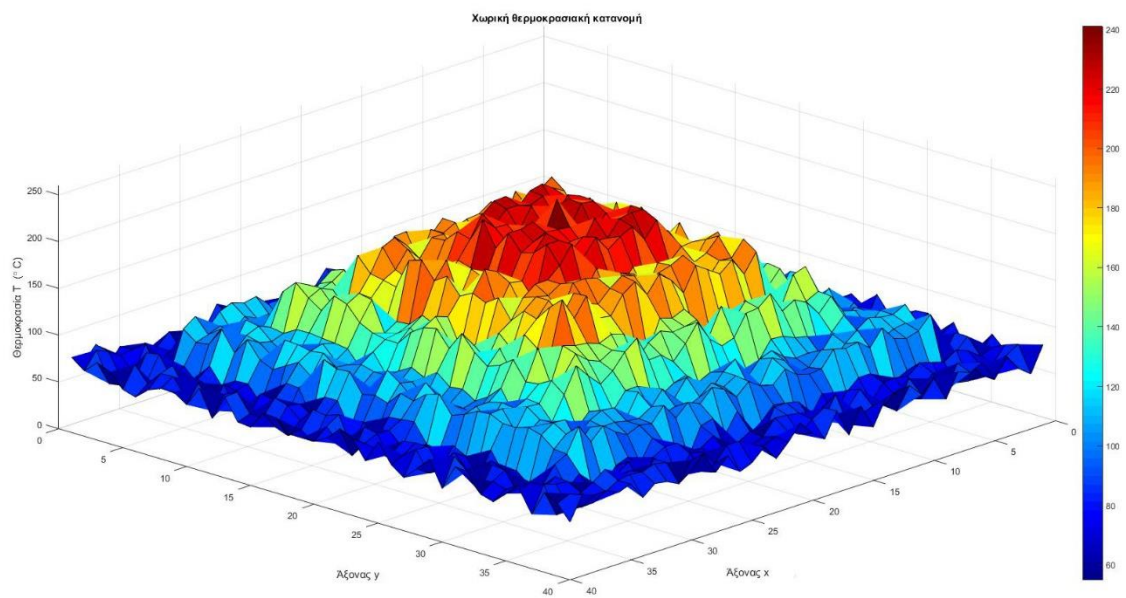
Σχήμα 5.20: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για $t = 30s$. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία $202\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 5.21: Η εκτιμώμενη χωρική θερμοκρασιακή κατανομή για $t = 40s$. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία $206\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 5.22: Η εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή για $t = 50s$. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία 214 °C.



Σχήμα 5.23: Η εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή για $t = 60s$. Παρουσιάζεται μέγιστη θερμοκρασία 241 °C.

Με βάση τα παραπάνω αξίζει να σημειώσουμε πως για την μεγαλύτερη ακρίβεια απεικόνισης των διαστάσεων της κάθε ζώνης και συνολικά των θερμοκρασιακών κατανομών που παρουσιάστηκαν, λήφθηκαν υπόψη και οι μετρήσεις των πειραμάτων Μεγέθους – Χρόνου.

5.2.2 Πειράματα κινούμενης κεφαλής laser

Από τα πειράματα στατικής κεφαλής laser συμπεράναμε πως η δέσμη laser στην ισχύ που είχε τεθεί ήταν λειτουργική πάνω στην σκόνη, αφού όχι μόνο δημιουργούσε στερεές μάζες προϊόντων, αλλά όπως παρουσιάστηκε ήταν ικανή να αναπτύξει υψηλή θερμοκρασία στην περιοχή της σκόνης που προσέπιπτε. Γι' αυτό τον λόγο προχωρήσαμε στα πειράματα κινούμενης κεφαλής laser. Με αυτή την κατηγορία πειραμάτων θα βγάζαμε συμπεράσματα πάνω στην λειτουργικότητα της δέσμης laser, όταν η κεφαλή της κινείται με κάποια ταχύτητα πρόωσης F [mm/s]. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν:

- Πειράματα Μεγέθους - Πρόωσης
- Πειράματα αξιολόγησης αποτελέσματος μίας και πολλαπλών στρώσεων
- Πειράματα Μορφολογίας - Πρόωσης

5.2.2.1 Πειράματα Μεγέθους - Πρόωσης

Τα πειράματα αυτά είχαν ως σκοπό την εύρεση της σχέσης μεταξύ ταχύτητας κίνησης της κεφαλής laser στο x-y επίπεδο της κατεργασίας ή αλλιώς της πρόωσης F [mm/s] του laser σε σχέση με το μέγεθος του προϊόντος που δημιουργείται στο τραπέζι της σκόνης, χωρίς όμως να μας ενδιαφέρει αν είναι πυροσυσσωματωμένο ή τηγμένο.

Για την υλοποίηση των πειραμάτων, μέσω της εφαρμογής PEWIN32PRO δημιουργούνταν κώδικας μονοδιάστατης κίνησης της ενεργοποιημένης κεφαλής laser με διαφορετικές τιμές πρόωσης. Μετά το τέλος της κίνησης, τα προϊόντα αφαιρούνταν από τον θάλαμο της μηχανής και μετρούνταν οι βασικές διαστάσεις τους με παχύμετρο. Ως βασικές διαστάσεις τους ορίσαμε το μήκος τους L , το πλάτος τους b και το ύψος/πάχος τους h .

Το μήκος L μετρήθηκε καθαρά για λόγους ελέγχου του αν η δέσμη laser καθ' όλη την διάρκεια της κίνησης όντως επιδρά πάνω στην σκόνη. Για παράδειγμα, αν ορίζαμε μια κίνηση από το σημείο (0,0) στο x-y επίπεδο μέχρι το σημείο (50,0) με μια πρόωση F έπρεπε να πάρουμε προϊόν με μήκος $L = 50$ mm. Σε διαφορετική περίπτωση θα υπήρχε πρόβλημα με την δέσμη laser ή με την ακρίβεια κινήσεως των κινητήρων στο x-y επίπεδο. Για το μήκος L

παρατηρήθηκε ταύτιση με την εντολή κίνησης που εισαγάγαμε στην μηχανή με το εξής σφάλμα:

- Για τον άξονα x: εντολή για κίνηση 1 μονάδα μήκους στον ελεγκτή της μηχανής αντιστοιχεί σε 1 mm πραγματικού μήκους προϊόντος με σφάλμα $e = +0.02$ mm.
- Για τον άξονα y: εντολή για κίνηση 1 μονάδα μήκους αντιστοιχεί σε 1 mm πραγματικού μήκους προϊόντος με σφάλμα $e = +0.05$ mm.

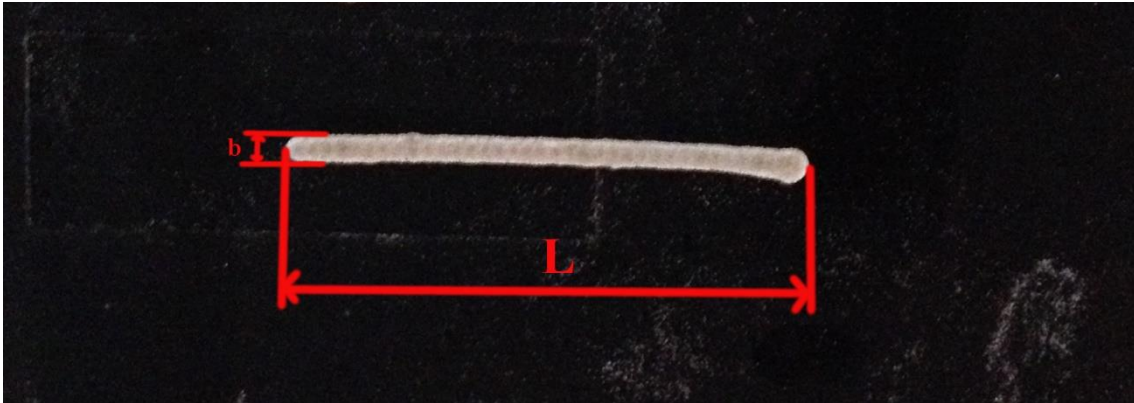
Το ελάχιστο σφάλμα που παρουσιάστηκε οφειλόταν στο ότι η δέσμη laser όταν έφτανε στο τελικό σημείο για πολύ λίγο χρόνο (της τάξεως του χρόνου προσπέλασης της εντολής απενεργοποίησης της δέσμης laser $M210 = 0$ από τον ελεγκτή της μηχανής) πριν απενεργοποιηθεί από τον κώδικα, ήταν ενεργοποιημένη και θέρμαινε την σκόνη της ευρύτερης περιοχής του τελικού σημείου κίνησης. Το γεγονός πως έχουμε μεγαλύτερο σφάλμα στον άξονα y οφείλεται πιθανώς στους παλμούς του κινητήρα y. Δηλαδή με άλλα λόγια, 4096 παλμοί μπορεί να αντιστοιχούν σε κίνηση λίγο μεγαλύτερη του 1 mm για την κίνηση στον άξονα y. Παρόλα αυτά το σφάλμα είναι πολύ μικρό και μπορούμε να θεωρήσουμε πως υπάρχει ταύτιση μεταξύ επιθυμητού και πραγματικού μήκους.

Η διάσταση b αφορούσε το πλάτος του προϊόντος στο επίπεδο x-y. Η διάσταση αυτή είναι πολύ σημαντική, γιατί αφορούσε τον τρόπο που θα γινόταν το «γέμισμα» (infill) μιας στρώσης μεταγενέστερα για την κατασκευή αντικειμένων. Στο Κεφάλαιο 4, στην περιγραφή του προγράμματος Kisslicer, στις ρυθμίσεις Style (βλ. 4.1 Βήματα χρήσης της μηχανής) είχαμε κάνει αναφορά σε δύο παραμέτρους. Η μία αφορούσε το Infill Extrusion Width που στον εκτυπωτή εναπόθεσης νήματος αφορά το πάχος του νήματος που εναποτίθεται για την δημιουργία στρώσεων. Κατ' αναλογία, η παράμετρος αυτή για την τεχνική SLS/SLM αφορά το πλάτος b που αναφέραμε.

Η διάσταση h αφορούσε το μετρούμενο ύψος/πάχος του προϊόντος, δηλαδή είναι διάσταση στον άξονα z της κατεργασίας. Αποτελεί τη δεύτερη σημαντική διάσταση της κατεργασίας γιατί αφορά το ύψος της δημιουργημένης στρώσης. Στο Κεφάλαιο 4, η δεύτερη παράμετρος που είχαμε σταθεί στην περιγραφή των Style ρυθμίσεων του Kisslicer ήταν η παράμετρος του Layer Thickness. Σε έναν εκτυπωτή εναπόθεσης νήματος η παράμετρος αυτή αφορά το πάχος στρώσης. Κατ' αναλογία στην τεχνική SLS/SLM αφορά και πάλι το πάχος της δημιουργημένης στρώσης.

Οι διαστάσεις b και h είναι οι δύο πιο βασικές διαστάσεις της τεχνικής SLS/SLM γιατί σχετίζονται άμεσα με την ακρίβεια και την ταχύτητα της κατεργασίας καθώς και με την ποιότητα των δημιουργημένων αντικειμένων. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, δημιουργήθηκαν δοκίμια μήκους 50 mm με διαφορετικές προώσεις και μετρήθηκαν οι b και h διαστάσεις τους ανά 10 mm του μήκους τους. Με βάση τις μετρήσεις που πήραμε δημιουργήθηκαν τα παρακάτω μοντέλα πρόβλεψης για την δεδομένη μέση ισχύ laser των 20W.

Οι διαστάσεις b και L φαίνονται στην εικόνα του Σχήματος 5.24. Η διάσταση h του ύψους είναι στον άξονα z (κάθετος στο επίπεδο της εικόνας).

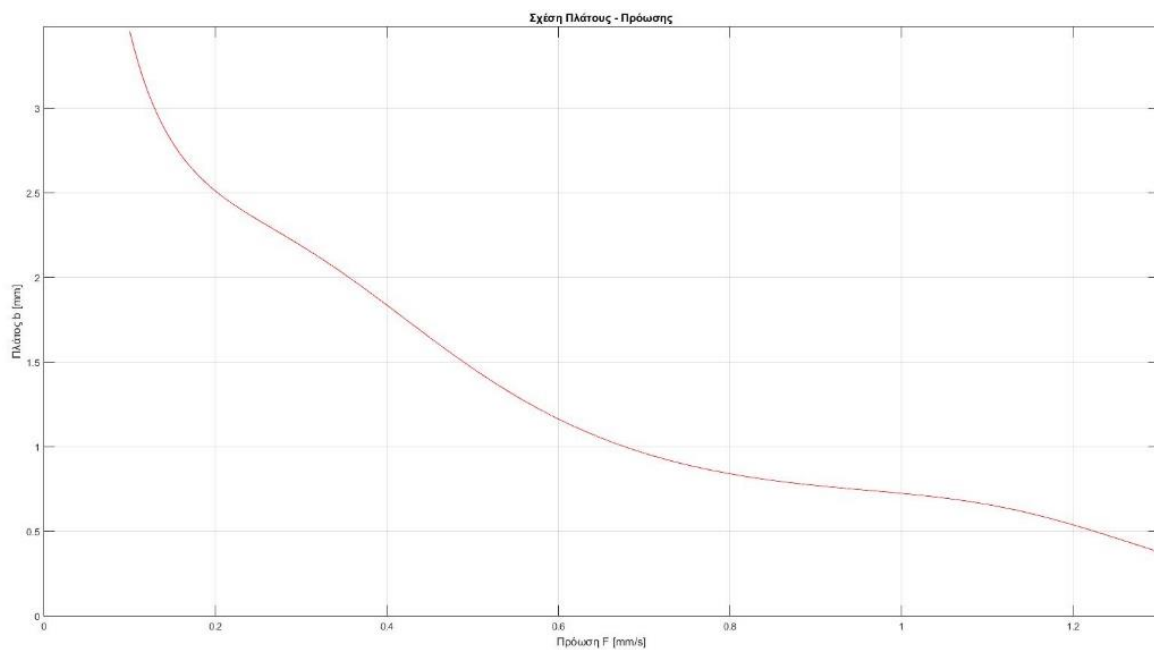


Σχήμα 5.24: Οι διαστάσεις b και L πάνω στις λωρίδες της στερεοποιημένης μάζας σκόνης που δημιουργήθηκε από την κίνηση του laser. Το πάχος/ύψος της λωρίδας είναι η διάσταση h . Οι τιμές b και h μεταβάλλονται ανά μήκος L όπως φαίνεται στην εικόνα, γι' αυτό και στα πειράματα μετρήθηκαν ανά 10mm μήκους L σε δοκίμια με $L = 50\text{mm}$. Στα μόντελα πρόβλεψης λήφθηκαν υπόψη οι μέσοι όροι των τιμών αυτών.

Σχέση Πλάτους – Πρόωσης

Το μοντέλο πρόβλεψης που δημιουργήθηκε με βάση τις καταγραφές των πειραμάτων είναι το ακόλουθο:

$$b = \begin{cases} \frac{0.06512}{(F^5 - 3.008 \cdot F^4 + 3.209 \cdot F^3 - 1.425 \cdot F^2 + 0.3158 \cdot F - 0.001369)}, & \text{όταν } F \in (0, \infty) \\ 0, & \text{όταν } F = 0 \end{cases}$$



Σχήμα 5.25: Διάγραμμα με την καμπύλη του προβλεπτικού μοντέλου για το πλάτος προϊόντος με βάση την πρόωση μονοδιάστατης κίνησης.

Η προβλεπτική ικανότητα της σχέσης που παρουσιάστηκε χαρακτηρίζεται ως καλή και αντιπροσωπευτική του φαινομένου, αφού:

- Το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος SSE = 0.1562
- $R^2 = 0.9844$
- Ρίζα του τετραγωνικού σφάλματος RMSE = 0.1494

Τα αποτελέσματα που παίρναμε κυμαινότουσαν από αρκετά στιβαρά για ταχύτητες FE [0.1,0.9] έως εύθραυστα για τιμές πρόωσης FE [1.0,1.4]. Αξίζει να σημειωθεί πως από τα πειράματα παρατηρήθηκε πως μετά από τιμή πρόωσης $F = 1.4$ mm/s δεν δημιουργούνταν κάποια στερεή μάζα προϊόντος σκόνης από την δέσμη laser ή στην περίπτωση που δημιουργούνταν ήταν τόσο εύθραυστη που δεν μπορούσε να απομακρυνθεί από την τράπεζα σκόνης γιατί θρυμματιζόταν απευθείας. Από αυτό συμπεραίνουμε πως στην μέγιστη ρύθμιση μέσης ισχύος του συστήματος laser που είναι τα 20W, η ταχύτητα κατεργασίας της μηχανής έχει ένα άνω όριο, την τιμή πρόωσης $F = 1.4$ mm/s. Όπως θα παρουσιαστεί και στα πειράματα μορφολογίας στην συνέχεια, αυτή η τιμή άνω κατωφλίου παίζει καθοριστικό ρόλο στην συνολική ταχύτητας της κατεργασίας που μπορεί να επιτύχει η μηχανή.

Σχέση Ύψους – Πρόωσης

Το προβλεπτικό μοντέλο για την περιγραφή της σχέσης ύψους – πρόωσης είναι το ακόλουθο:

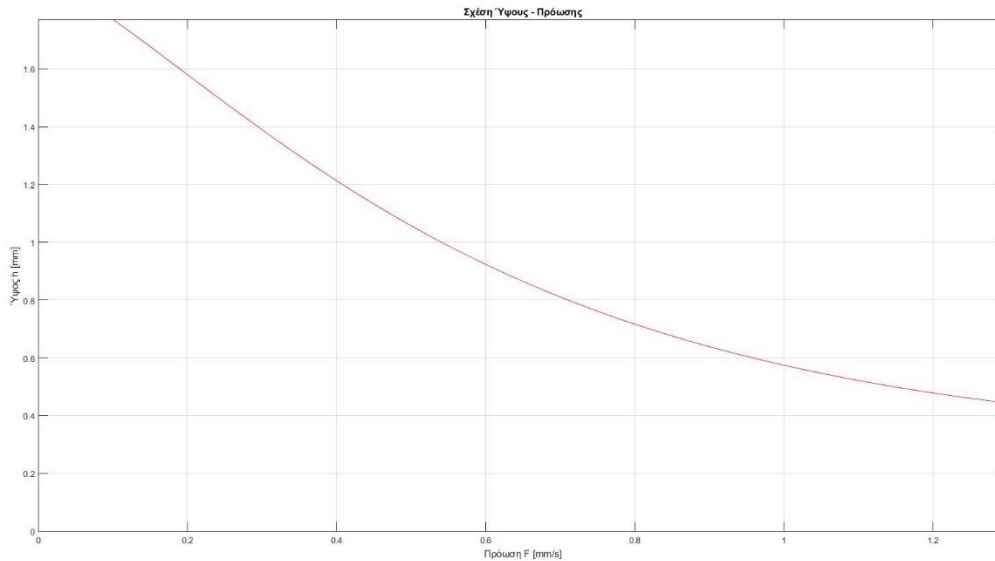
$$h = \begin{cases} \frac{2785}{(F^5 - 567.1 \cdot F^4 + 367.1 \cdot F^3 + 2463 \cdot F^2 + 1155 \cdot F + 1432)}, & \text{όταν } F \in (0, \infty) \\ 0, & \text{όταν } F = 0 \end{cases}$$

Η προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου χαρακτηρίζεται ως καλή και αντιπροσωπευτική του φαινομένου αφού:

- Το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος SSE = 0.02999
- $R^2 = 0.9873$
- Ρίζα του τετραγωνικού σφάλματος RMSE = 0.06545

Η ομοιότητα της παραπάνω σχέσης με το μοντέλο για προσδιορισμό του πλάτους σε σχέση με την πρόωση του laser είναι φανερή και χαρακτηριστική των δυνατοτήτων ταχύτητας κατεργασίας της μηχανής.

Η καμπύλη της σχέσης ύψους – πρόωσης παρουσιάζεται στην εικόνα του Σχήματος 5.26.

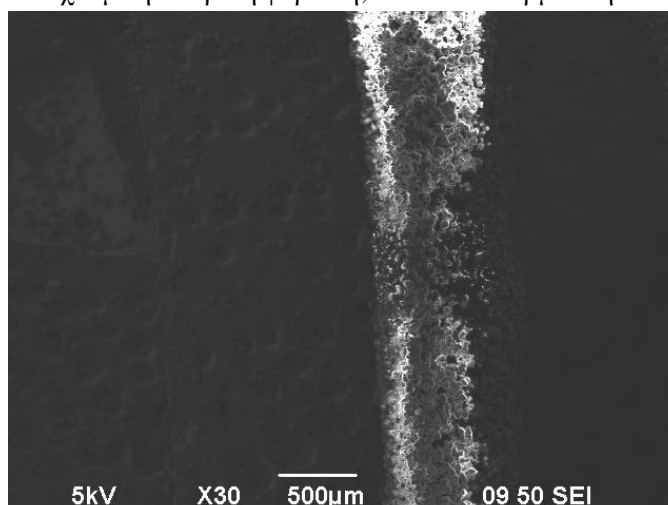


Σχήμα 5.26: Διάγραμμα με την καμπύλη του προβλεπτικού μοντέλου για το ύψος προϊόντος με βάση την πρόωση μονοδιάστατης κίνησης.

5.2.2.2 Πειράματα αξιολόγησης αποτελέσματος

Σε αυτή την σειρά πειραμάτων δημιουργήσαμε στερεά προϊόντα από την σκόνη με κινούμενη δέσμη laser, αλλά αυτή την φορά προχωρήσαμε στην αξιολόγηση του αποτελέσματος σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Πιο συγκεκριμένα, μια πρώτη σειρά δύο δειγμάτων δημιουργήθηκε με πρόωση 0.5 mm/s, όπου το ένα δείγμα είχε σχήμα τετραγωνικού πλαισίου διαστάσεων 50x50 mm, ενώ το άλλο είχε δημιουργηθεί από μονοδιάστατη κίνηση του laser αλλά περιείχε τρεις στρώσεις στερεού προϊόντος σκόνης. Το δείγμα πολλαπλών στρώσεων δημιουργήθηκε με την εξής διαδικασία: αρχικά η δέσμη laser κινούμενη μονοδιάστατα έκανε μια στρώση υλικού με μήκος 50 mm, στην συνέχεια η τράπεζα κατέβηκε κατά το απαραίτητο βήμα (για πρόωση 0.5 mm/s παίρνουμε δοκίμια ύψους περίπου 1 mm, άρα η τράπεζα μετά την δημιουργία κάθε στρώσης κατεβαίνει κατά 1mm), απλώθηκε μια καινούργια στρώση σκόνης στην τράπεζα, κάτω από την οποία βρισκόταν η προηγούμενη δημιουργημένη στρώση μήκους 50 mm, η κεφαλή laser έκανε την ίδια κίνηση με πριν και με την ίδια ταχύτητα, η τράπεζα κατέβηκε ξανά κατά το απαραίτητο βήμα κοκ, μέχρι την δημιουργία και της τρίτης στρώσης. Ένα μέρος του δείγματος πολλαπλών στρώσεων κόπηκε με σκοπό την παρατήρηση της τομής του και του τρόπου που έχουν ενοποιηθεί οι στρώσεις μεταξύ τους. Η δεύτερη σειρά δειγμάτων δημιουργήθηκε από δέσμη laser με ταχύτητα πρόωσης από 0.1 mm/s μέχρι 1.0 mm/s με βήμα 0.1 mm/s και με δείγμα σκόνης και αποτελούνταν από έντεκα συνολικά δείγματα.

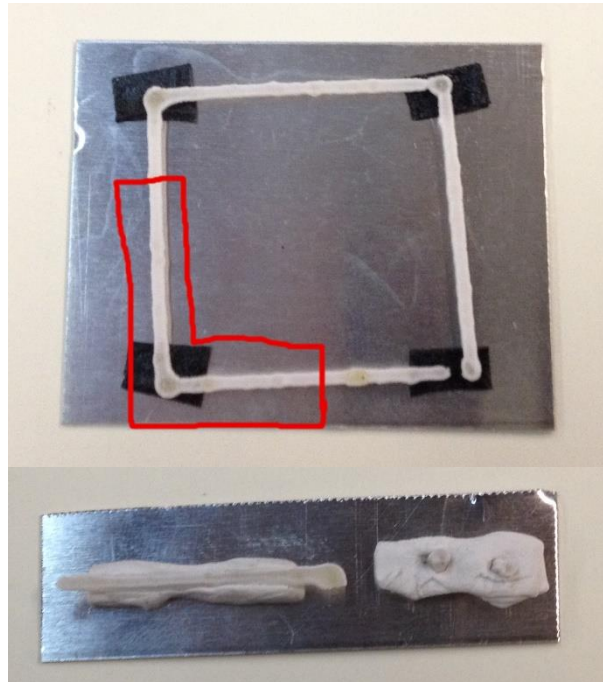
Πριν την εισαγωγή της πρώτης σειράς δειγμάτων στον θάλαμο του SEM για παρατήρηση πραγματοποιήθηκε sputter coating με γραφίτη στον Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής των Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ με την συνδρομή της καθηγήτριας κα. Βασιλείου. Το sputter coating ή sputtering είναι η διαδικασία εναπόθεσης πάνω στο δείγμα προς παρατήρηση σε SEM, μιας εξαιρετικά λεπτής στρώσης αγωγίμου υλικού, το οποίο είναι συνήθως μέταλλο, όπως γραφίτης, χρυσός, πλατίνα, κράματα χρυσού με παλλάδιο κ.ά. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ειδικότερα σε μη μεταλλικά δείγματα, τα οποία θέλουμε να παρατηρήσουμε σε μεγάλες τιμές μεγέθυνσης. Πιο αναλυτικά, στο SEM τα δείγματα βομβαρδίζονται από ηλεκτρόνια, δηλαδή αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Μερικά από αυτά που προσπίπτουν στο δείγμα ανακλώνται (backscattered ή οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια), άλλα δημιουργούν δευτερογενή ηλεκτρόνια, ενώ άλλα ενσωματώνονται στο δείγμα και το φορτίζουν ηλεκτρικώς αρνητικά. Όταν αυτή η αρνητική ηλεκτρική φόρτιση γίνει αρκετά μεγάλη, τότε το δείγμα πρακτικά θα απωθεί τις νέες δέσμες ηλεκτρονίων. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα η δέσμη ηλεκτρονίων του SEM να αλλάζει πορεία με άμεσο αντίκτυπο στην εικόνα που παίρνουμε· γίνεται θολή. Η φόρτιση επίσης μπορεί να θερμάνει υπερβολικά το δείγμα και να το καταστρέψει (βλ. εικόνα Σχήματος 5.27). Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στο sputtering είναι αγωγά. Αυτό σημαίνει πως επιτρέπουν στα ηλεκτρόνια να κινούνται μέσα τους χωρίς πρόβλημα. Αν ένα μεταλλικό δείγμα γειωθεί, τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια της δέσμης από το SEM δεν θα το φορτίσουν. Ορισμένα μη μεταλλικά δείγματα προς παρατήρηση όμως είναι διηλεκτρικά, δηλαδή μονωτές με την ιδιότητα να πολώνουν τα ηλεκτρικά φορτία όταν τοποθετούνται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως τα ηλεκτρόνια που προσπίπτουν από την δέσμη του SEM θα μείνουν σε ένα συγκεκριμένο μέρος κατά την πρόσπτωση τους στο δείγμα, με αποτέλεσμα να το φορτίσουν ηλεκτρικά ή να το θερμανούν υπερβολικά με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Αν επομένως κάνουμε sputtering, δημιουργούμε «μονοπάτια» για τα ηλεκτρόνια της δέσμης του SEM προς την γείωση και έτσι δεν έχουμε ηλεκτρική φόρτιση, αλλά ούτε θέρμανση του δείγματος. Οι μεγάλες



Σχήμα 5.27: Κατεστραμμένο δείγμα από την δέσμη ηλεκτρονίων του SEM, λόγω της μη επικάλυψης του με αγωγίμο υλικό μέσω της διαδικασίας του sputtering.

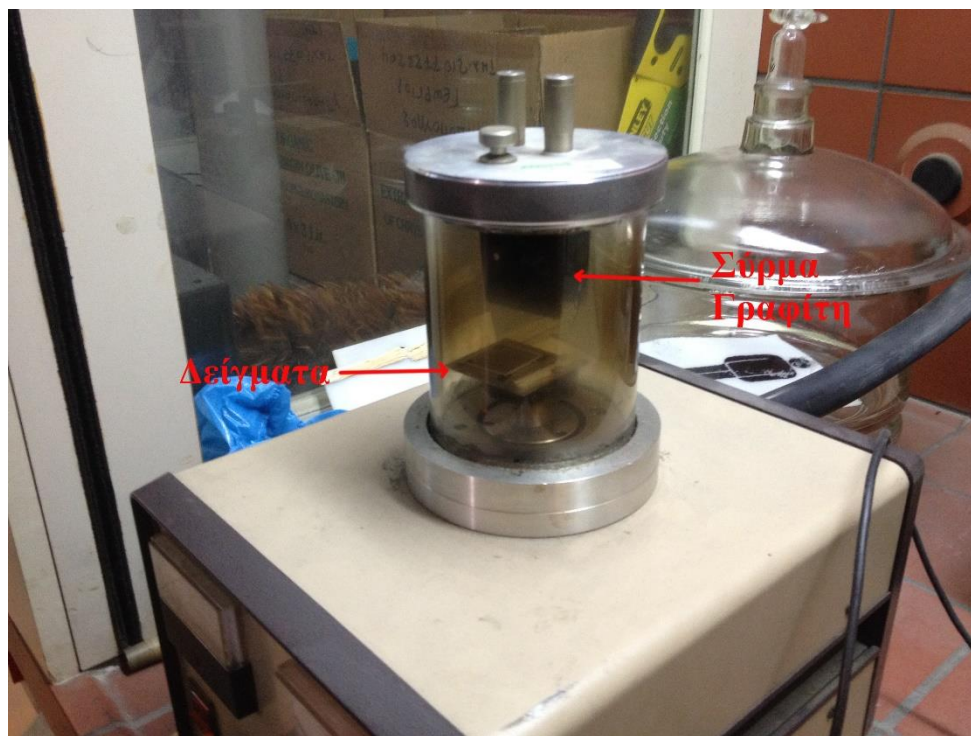
μεγεθύνσεις στο SEM συμβαίνουν όταν περισσότερα ηλεκτρόνια ανά περιοχή προσπίπτουν στο δείγμα με αποτέλεσμα την μεταφορά πληροφορίας με περισσότερες λεπτομέρειες για την δομή του, επομένως το φαινόμενο που περιγράφηκε εντείνεται.

Για τους παραπάνω λόγους πραγματοποιήθηκε sputtering με γραφίτη στην πρώτη σειρά δειγμάτων, αφού μας ενδιέφερε η λεπτομερής παρατήρηση τους. Αρχικά, τα δείγματα κολλήθηκαν πάνω σε λαμαρίνες αλουμινίου (βλ. εικόνα Σχήματος 5.28). Ως πλευρά για την



Σχήμα 5.28: Η πρώτη σειρά δειγμάτων δημιουργήμενα με πρόωση κεφαλής laser 0.5 mm/s. Πρώτο δείγμα τετραγωνικού πλαισίου (πάνω) μίας στρώσης, όπου με κόκκινο χρώμα σημειώνεται η περιοχή που παρατηρήθηκε στο SEM. Το δεύτερο δείγμα τριών στρώσεων (κάτω) όπου δεξιά φαίνονται οι τομές που έγιναν προς παρατήρηση του τρόπου ενοποίησης των στρώσεων.

παρατήρηση τους στο SEM (άνω πλευρά στις εικόνες του Σχήματος 5.28) ορίστηκε η πλευρά που έπεφτε η δέσμη laser κατά την διάρκεια της δημιουργίας τους. Στην συνέχεια, τα δείγματα αυτά τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο που στην οροφή του υπήρχε ένα λεπτό σύρμα γραφίτη (βλ. εικόνα Σχήματος 5.29). Ο θάλαμος αυτός ήταν μέρος ενός κυκλώματος με αντλία κενού και τροφοδοτικό ηλεκτρικής ισχύος (βλ. εικόνα Σχήματος 5.30). Με την είσοδο των δειγμάτων στον θάλαμο πραγματοποιήθηκε στεγανοποιημένο κλείσιμο του και δημιουργία κενού μέσα σε αυτόν. Στην συνέχεια, επιβλήθηκε τάση 200V στο σύρμα γραφίτη με αποτέλεσμα να εμφανιστεί ρεύμα εντάσεως 50A μέσα σε αυτό. Αυτό προκάλεσε την εμφάνιση βολταϊκού τόξου στο σύρμα με μια χαρακτηριστική λάμψη που σήμανε και το τέλος της διαδικασίας. Η εμφάνιση μιας τόσο μεγάλης τιμής εντάσεως ρεύματος στο λεπτό σύρμα είχε σαν αποτέλεσμα σωματίδια γραφίτη να απλωθούν στο κάτω μέρος του θαλάμου που βρισκόντουσαν τα δείγματα. Τέλος, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε κουτί με ζελατίνα για την προστασία τους από τυχόν υγρασία, μέχρι την ημέρα παρατήρησης τους στο SEM.

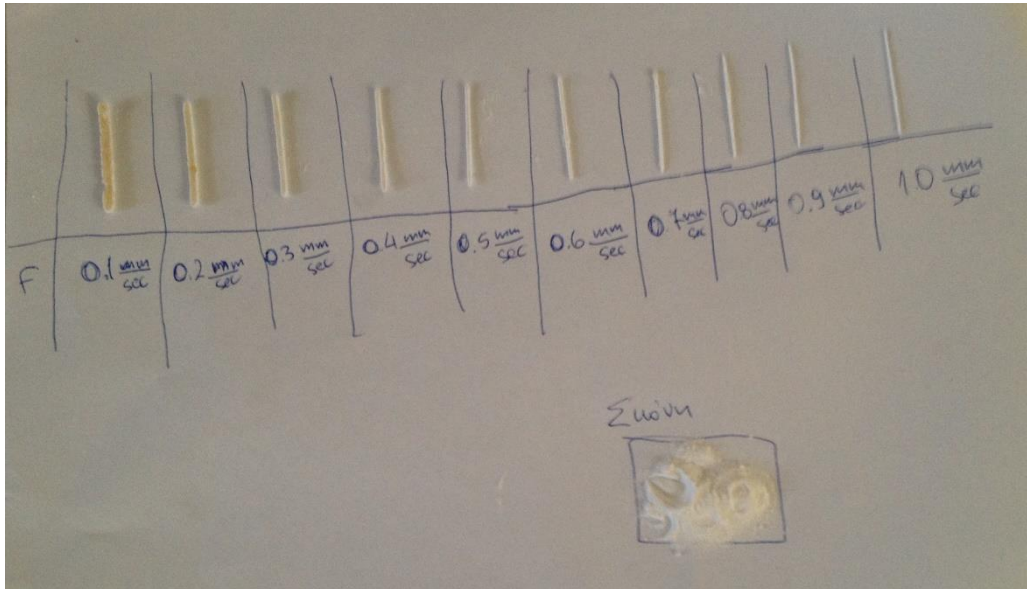


Σχήμα 5.29: Ο ειδικός θάλαμος μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η διαδικασία του sputtering.



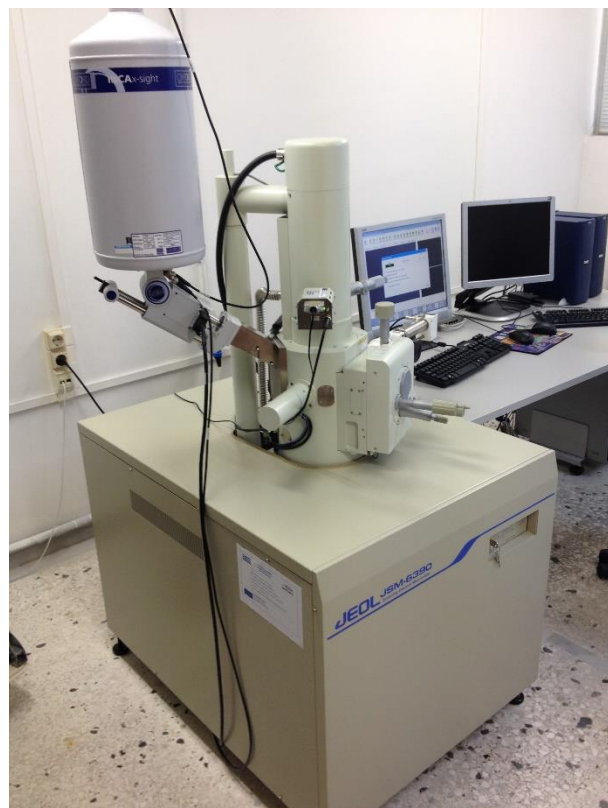
Σχήμα 5.30: Κύκλωμα για την δημιουργία sputtering.

Για την δεύτερη σειρά δειγμάτων (βλ. εικόνα Σχήματος 5.31) επειδή δεν μας ενδιέφερε η πολύ λεπτομερής παρατήρησή τους, αλλά μόνο η αξιολόγηση του φαινομένου της πυροσυσσωμάτωσης και της τήξης σε σχέση με την πρόωση της κεφαλής laser, δεν πραγματοποιήθηκε sputtering.



Σχήμα 5.31: Η δεύτερη σειρά δειγμάτων για παρατήρηση στο SEM με σκοπό την αξιολόγηση του φαινομένου της τήξης – πυροσυσσωμάτωσης σε σχέση με την πρόωση F [mm/s] της κεφαλής του laser.

Για την παρατήρηση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το SEM της σχολής των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, μοντέλου JEOL JSM-6390 (βλ. εικόνα Σχήματος 5.32).



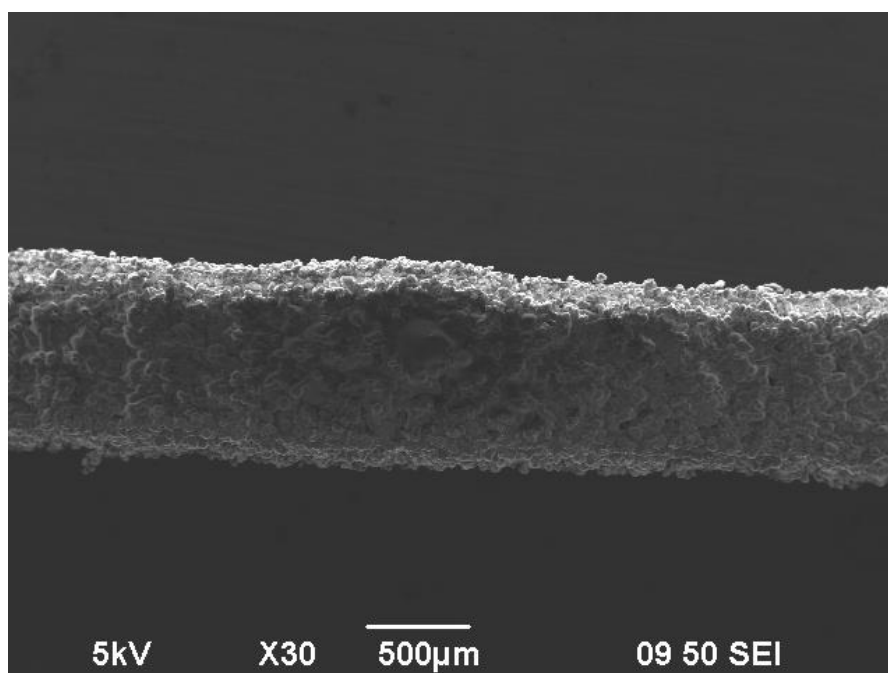
Σχήμα 5.32: Το SEM που χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση των δειγμάτων.

Ο χειρισμός του SEM έγινε από την κα. Σαράφογλου. Τα δείγματα παρατηρήθηκαν κατά την συμβατική λειτουργία του SEM, δηλαδή σε θάλαμο υψηλού κενού και υψηλής τάσης νήματος (5kV) για την δημιουργία της δέσμης των ηλεκτρονίων.

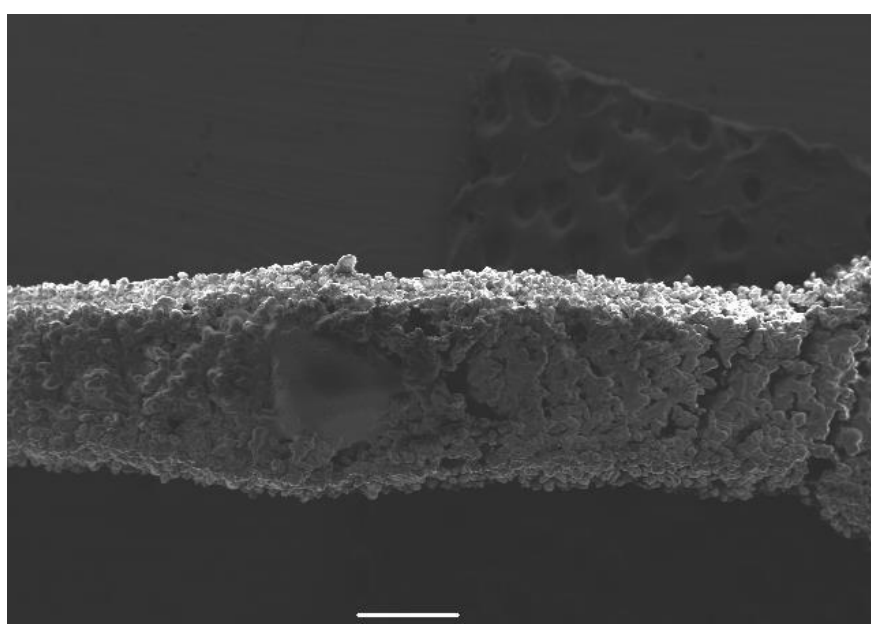
Αποτελέσματα πρώτης σειράς δειγμάτων

Οι εικόνες που λάβαμε από τα δείγματα της πρώτης σειράς παρατήρησης στο SEM είναι οι εξής:

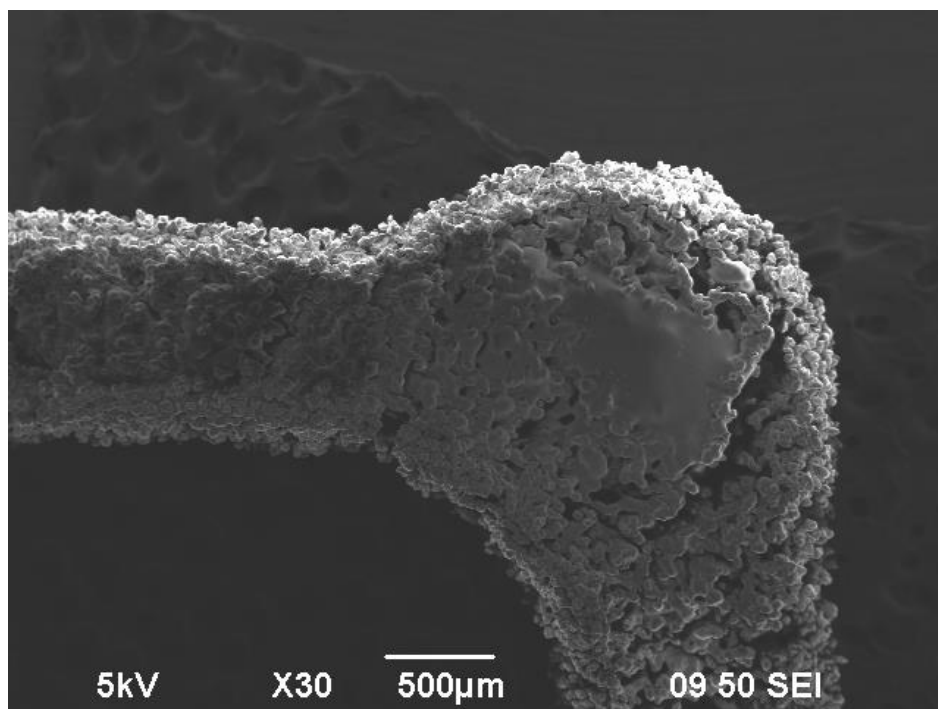
- **Δείγμα μίας στρώσης**



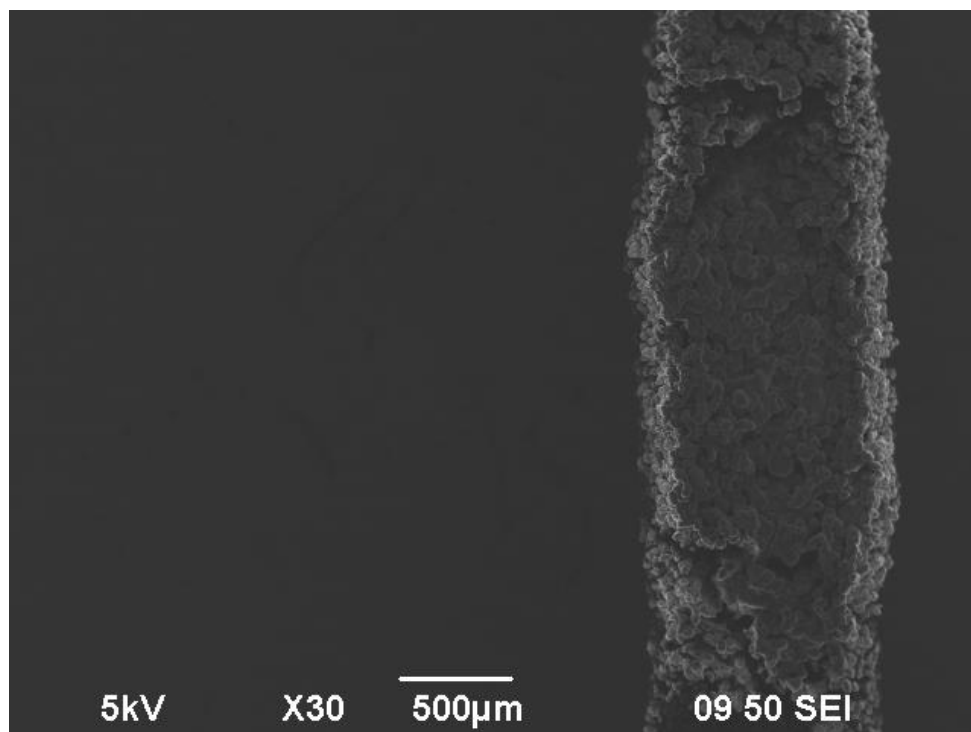
Σχήμα 5.33: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δείγμα της μίας στρώσης.



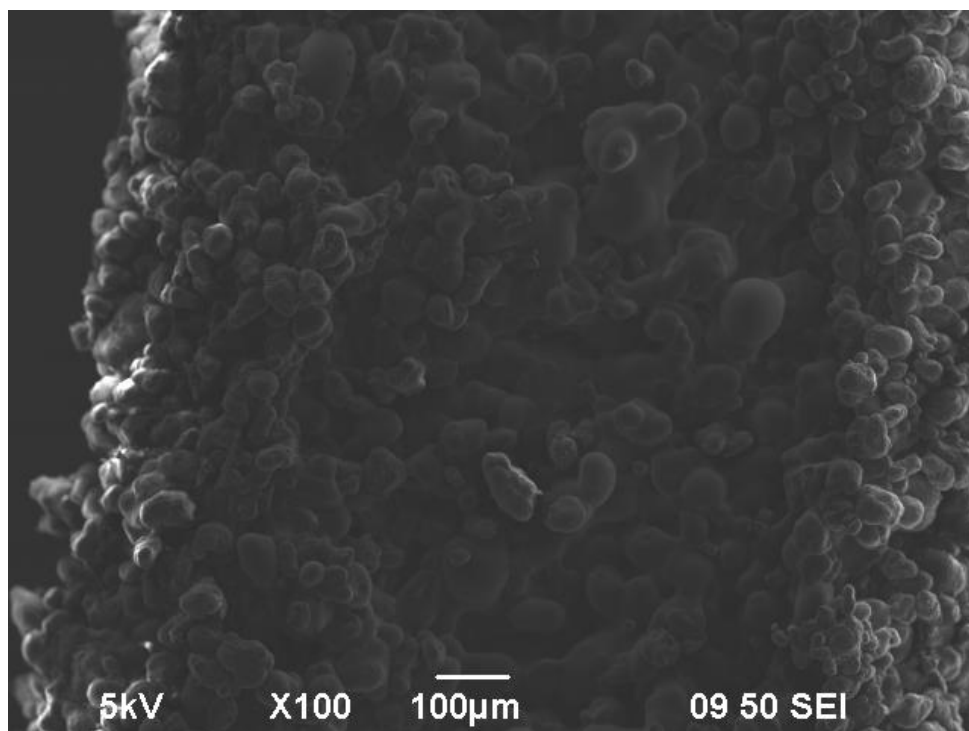
Σχήμα 5.34: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δείγμα της μίας στρώσης μετακινούμενοι προς την γωνία του πλαισίου. Η ύπαρξη υψηλού ποσοστού πορώδους είναι εμφανής.



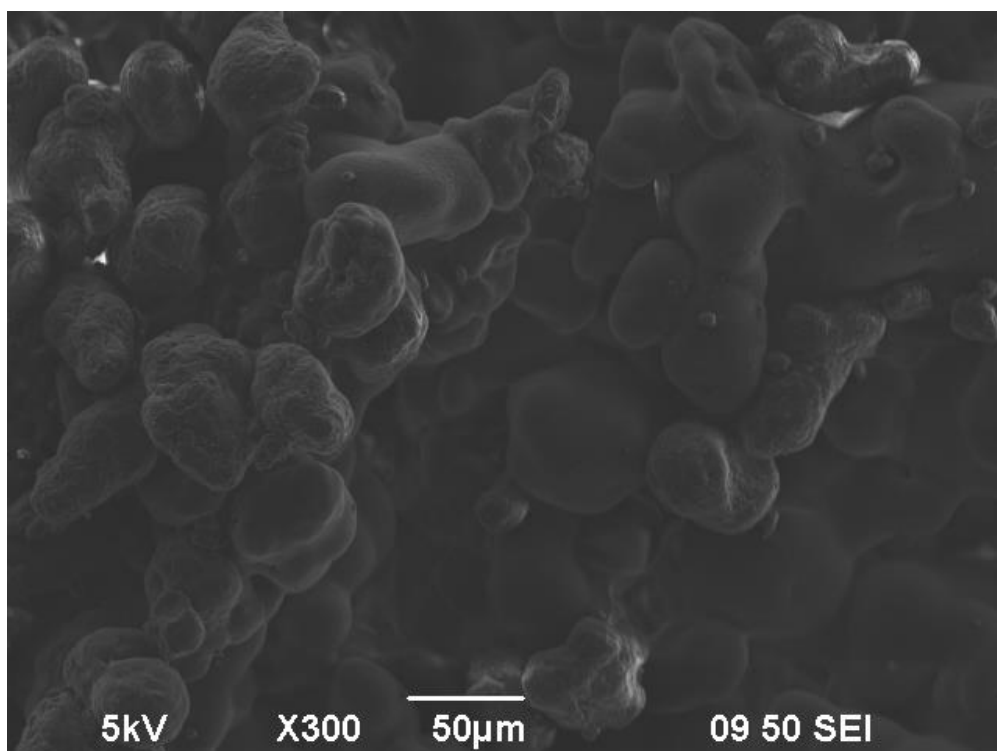
Σχήμα 5.35: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δείγμα της μίας στρώσης στην γωνία του τετραγωνικού πλαισίου του δείγματος.



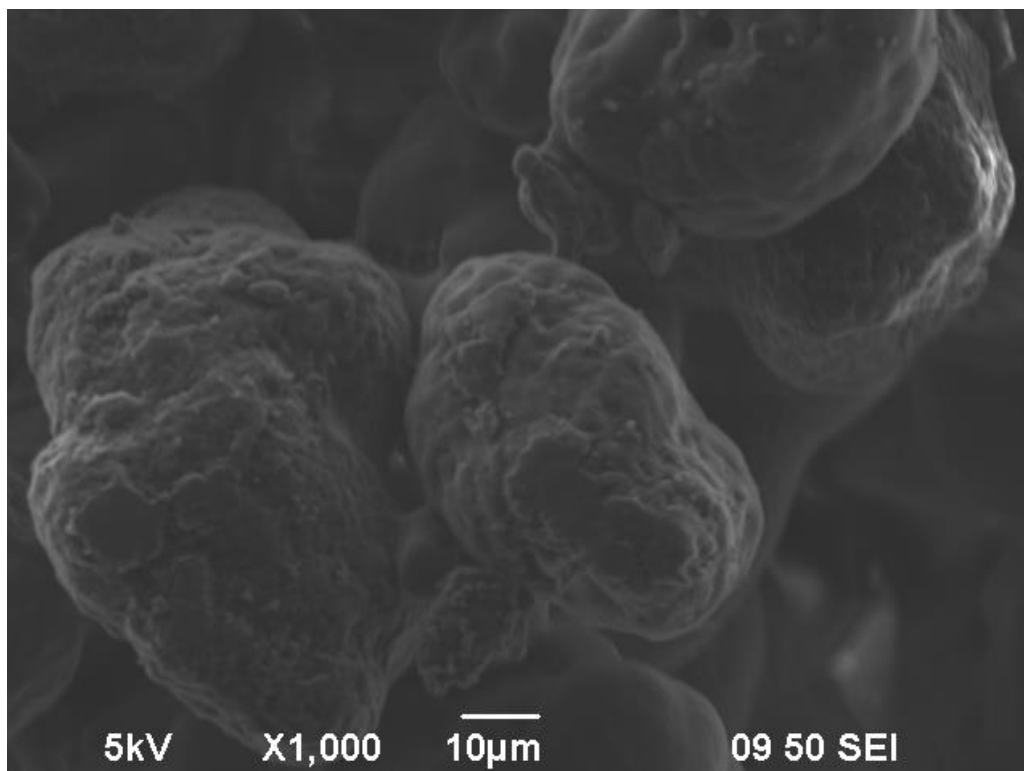
Σχήμα 5.36: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δείγμα της μίας στρώσης μετακινούμενοι προς κάτω.



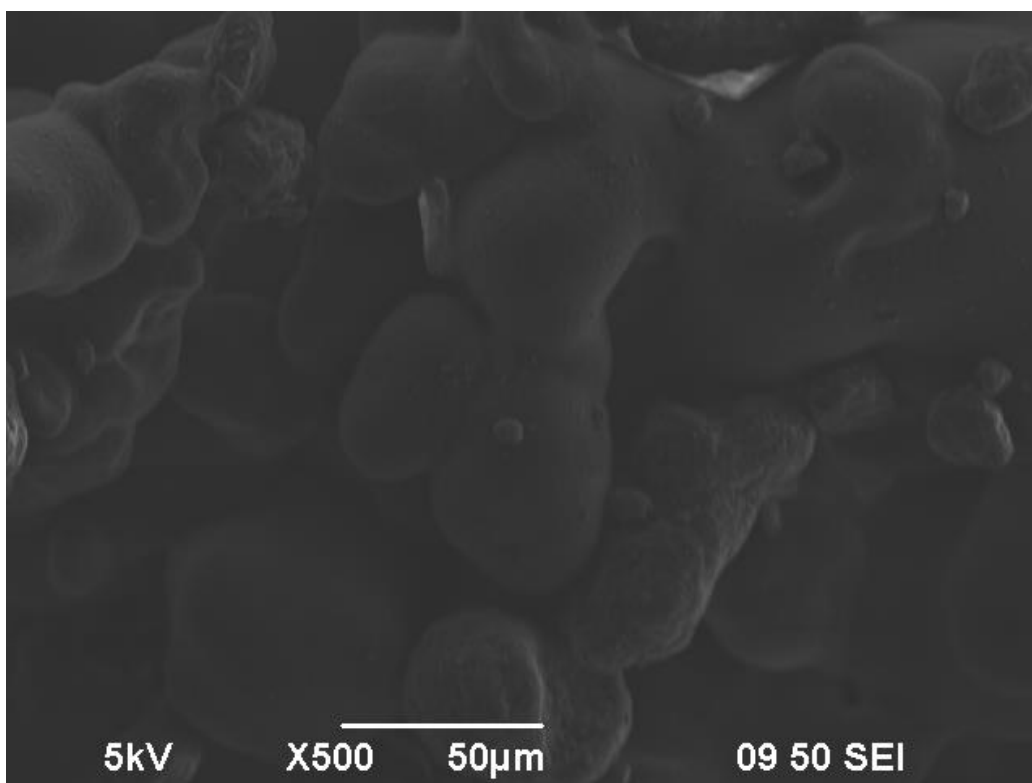
Σχήμα 5.37: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δείγμα. Είναι ορατή η ύπαρξη λαιμών Solid State Sintering πάνω στο δείγμα



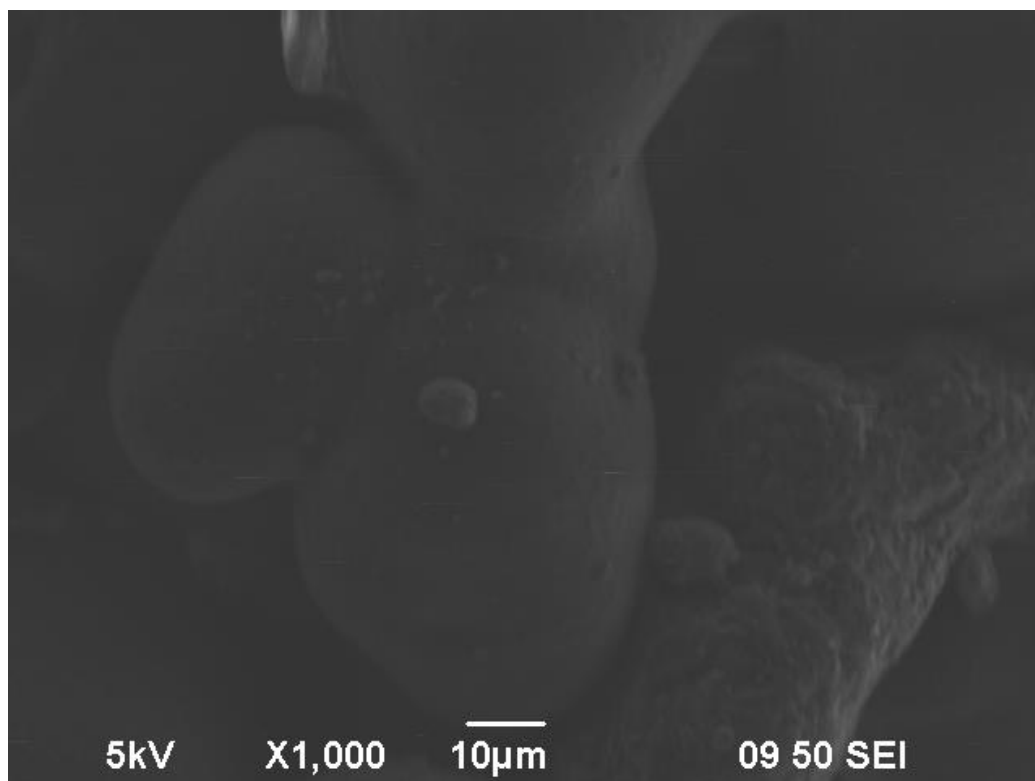
Σχήμα 5.38: Μεγέθυνση x300 πάνω στο δείγμα. Παρουσιάζονται κόκκοι διαφορετικής μορφολογίας που σημαίνει πως στην σκόνη έχουμε κόκκους δυο διαφορετικών μεθόδων παρασκευής.



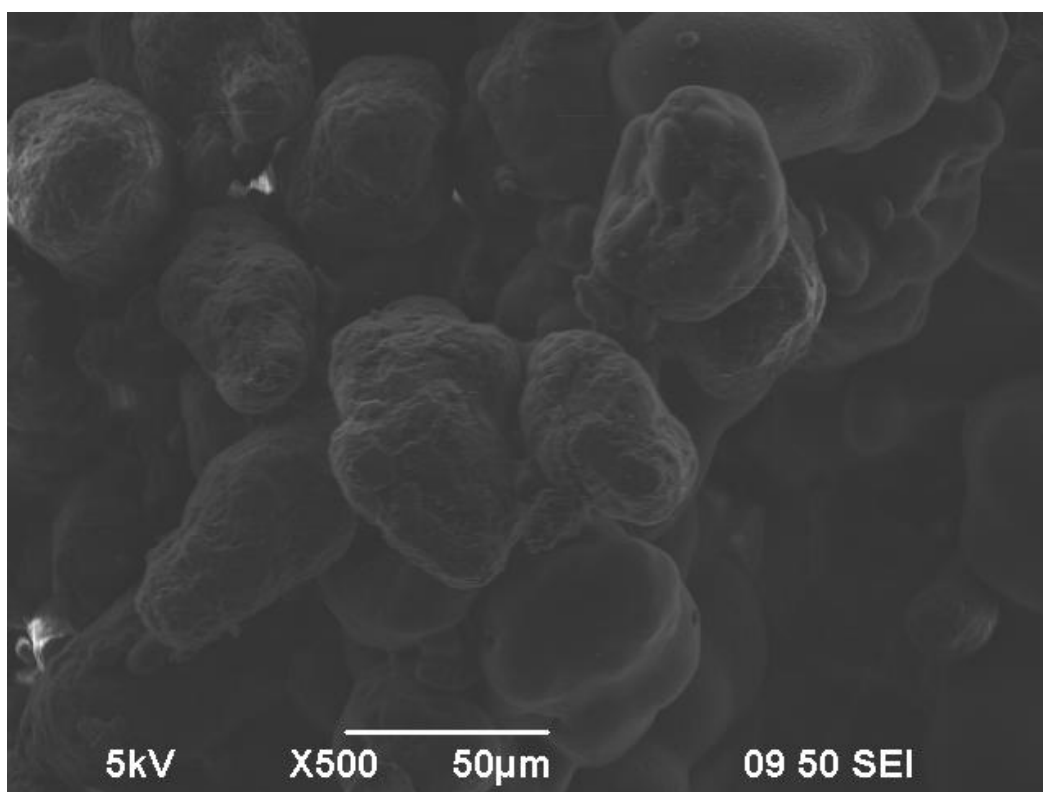
Σχήμα 5.39: Μεγέθυνση x1000 πάνω στο δείγμα. Παρουσιάζεται ο λαιμός του Solid State Sintering με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.



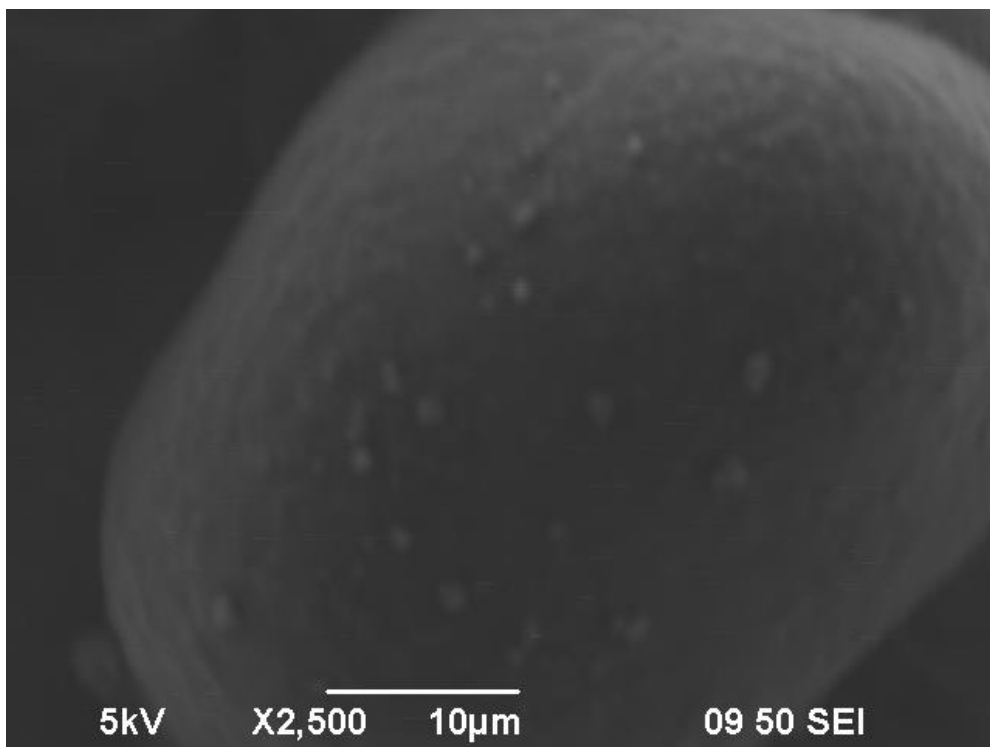
Σχήμα 5.40: Μεγέθυνση x500 πάνω στο δείγμα. Παρουσιάζεται το φαινόμενο της ημιτελούς τήξης μεταξύ αυτής της ομάδας των κόκκων μαζί με το φαινόμενο του Solid State Sintering..



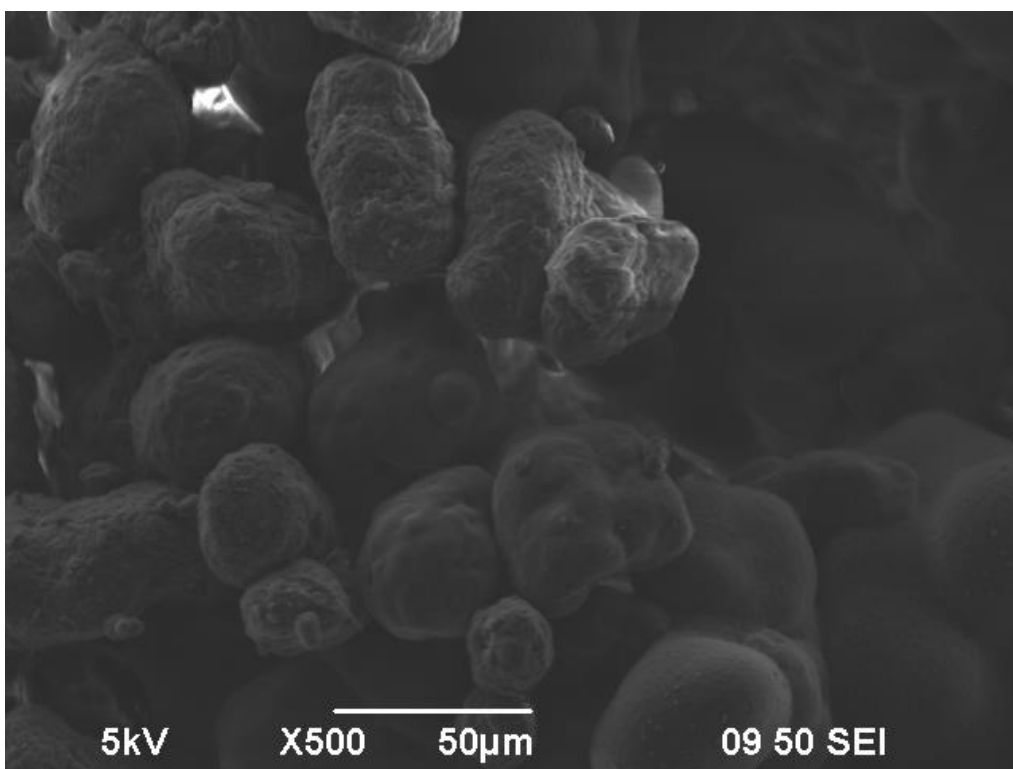
Σχήμα 5.41: Μεγέθυνση x1000 πάνω στο δείγμα. Ύπαρξη λαιμού Solid State Sintering διάστασης $D \cong 20 \mu\text{m}$.



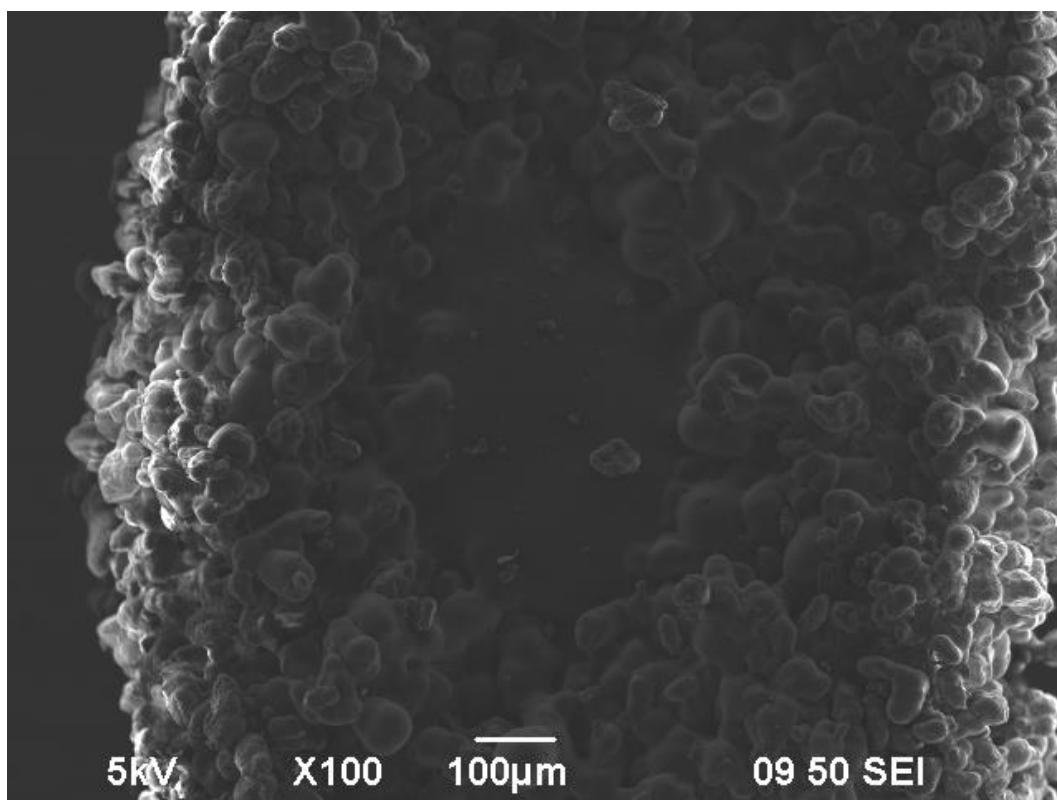
Σχήμα 5.42: Μεγέθυνση x500 πάνω στο δείγμα. Φαινόμενο Solid State Sintering μεταξύ των κόκκων που οδηγεί στο υψηλό ποσοστό πορώδους στο δείγμα.



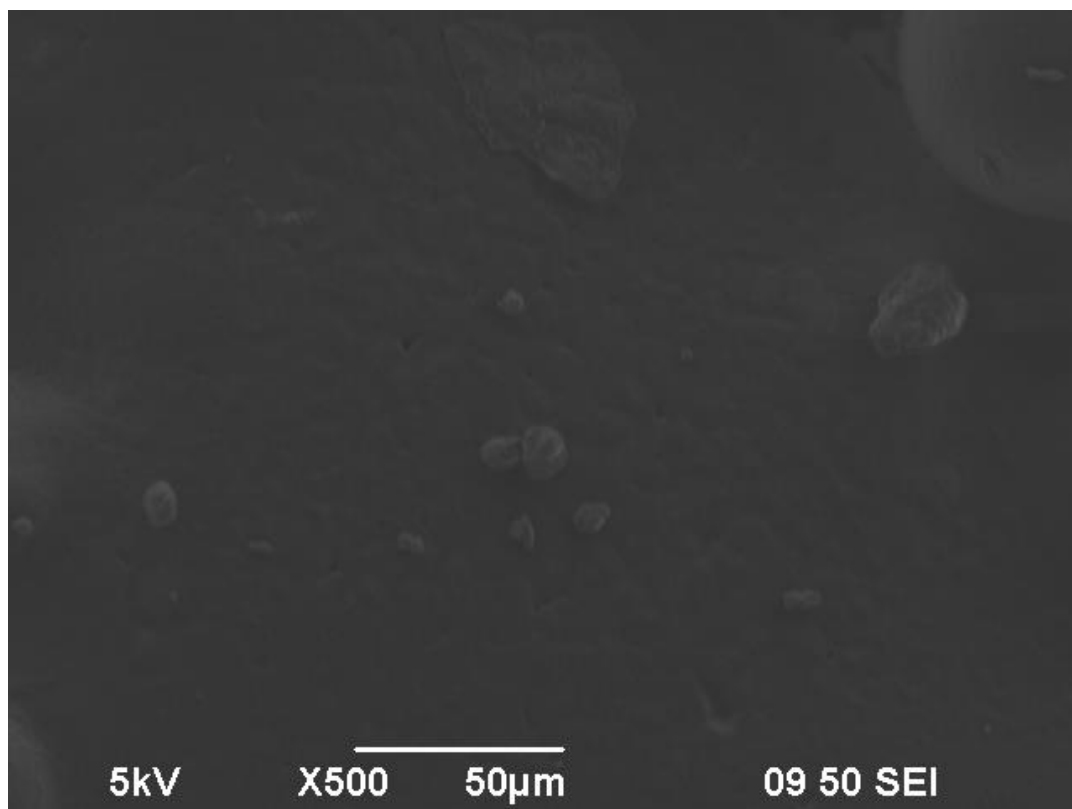
Σχήμα 5.43: Μεγέθυνση x2500 πάνω στο δείγμα. Διακρίνεται η εμφάνιση βρωμιάς ή υγρασίας πάνω στην επιφάνεια των κόκκων των δείγματος.



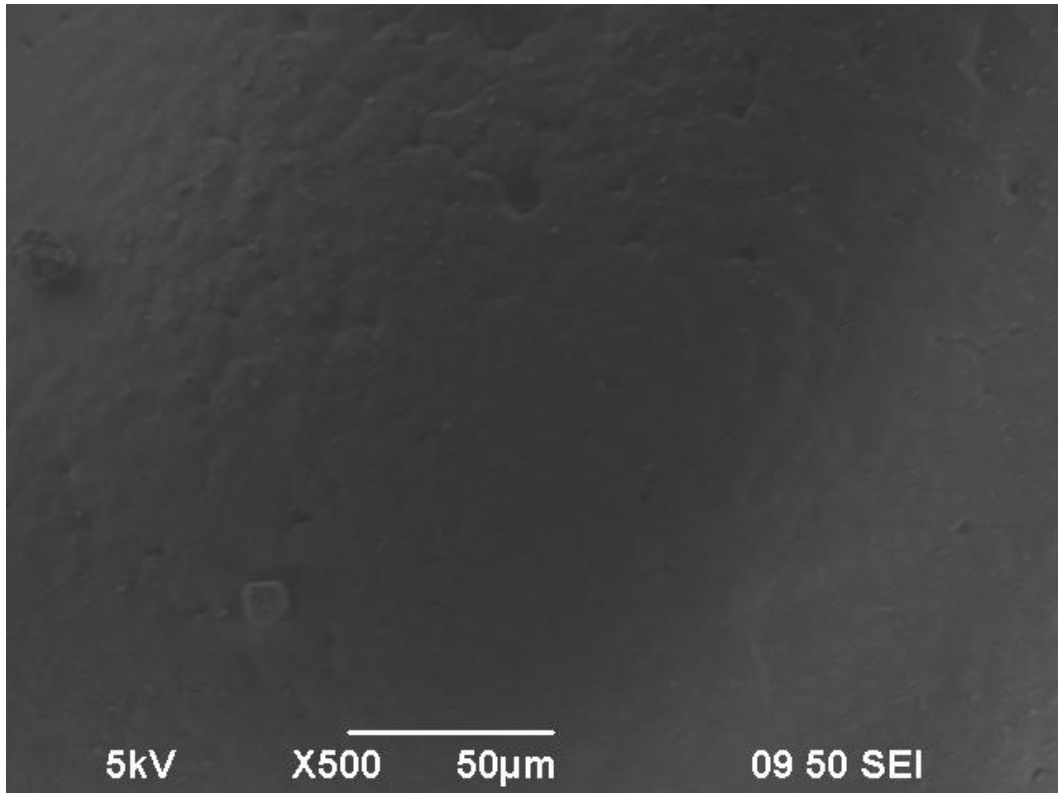
Σχήμα 5.44: Μεγέθυνση x500 πάνω στο δείγμα. Το φαινόμενο της πυροσυσσωμάτωσης (Solid State Sintering) είναι εμφανές.



Σχήμα 5.45: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δείγμα. Διακρίνεται η ύπαρξη δύο φαινομένων ενοποίησης πάνω στο δείγμα. Στο εσωτερικό παρατηρείται η ύπαρξη πλήρως τηγμένου και μερικώς τηγμένου υλικού γύρω από το οποίο έχουν ενωθεί πυροσυσσωματωμένοι κόκκοι.

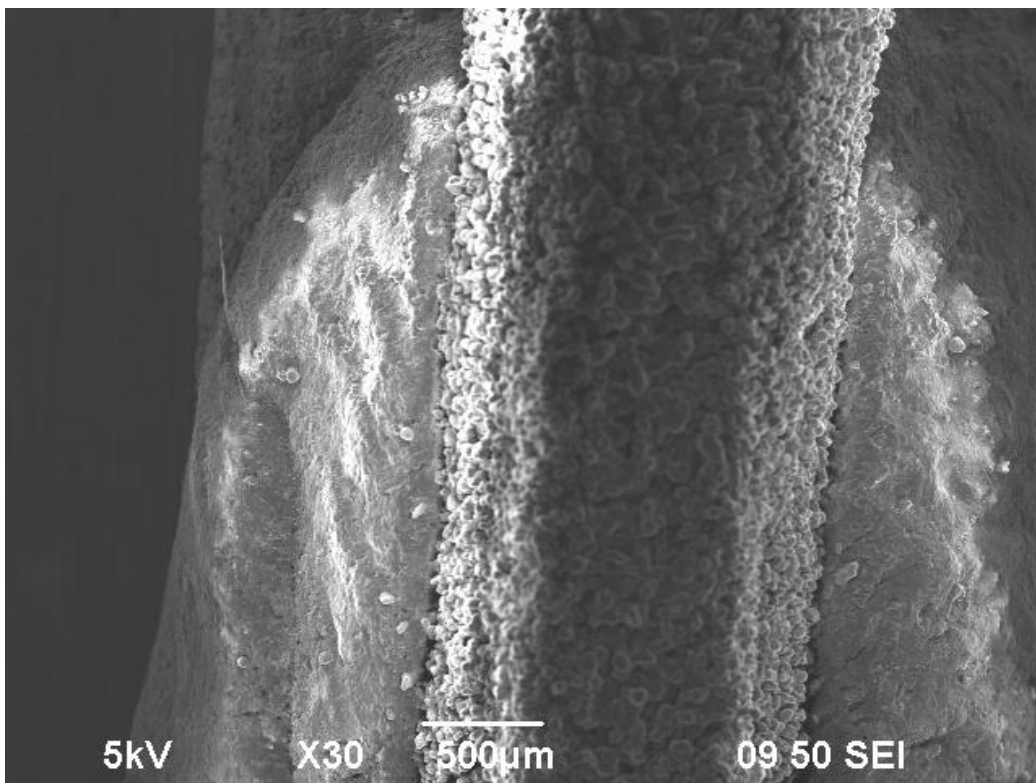


Σχήμα 5.46: Μεγέθυνση x500 πάνω στην τηγμένη περιοχή της εικόνας του σχήματος 5.44. Παρουσιάζεται η ύπαρξη κολλημένων κόκκων μικρού μεγέθους και πιθανώς βρωμιάς πάνω στην περιοχή.

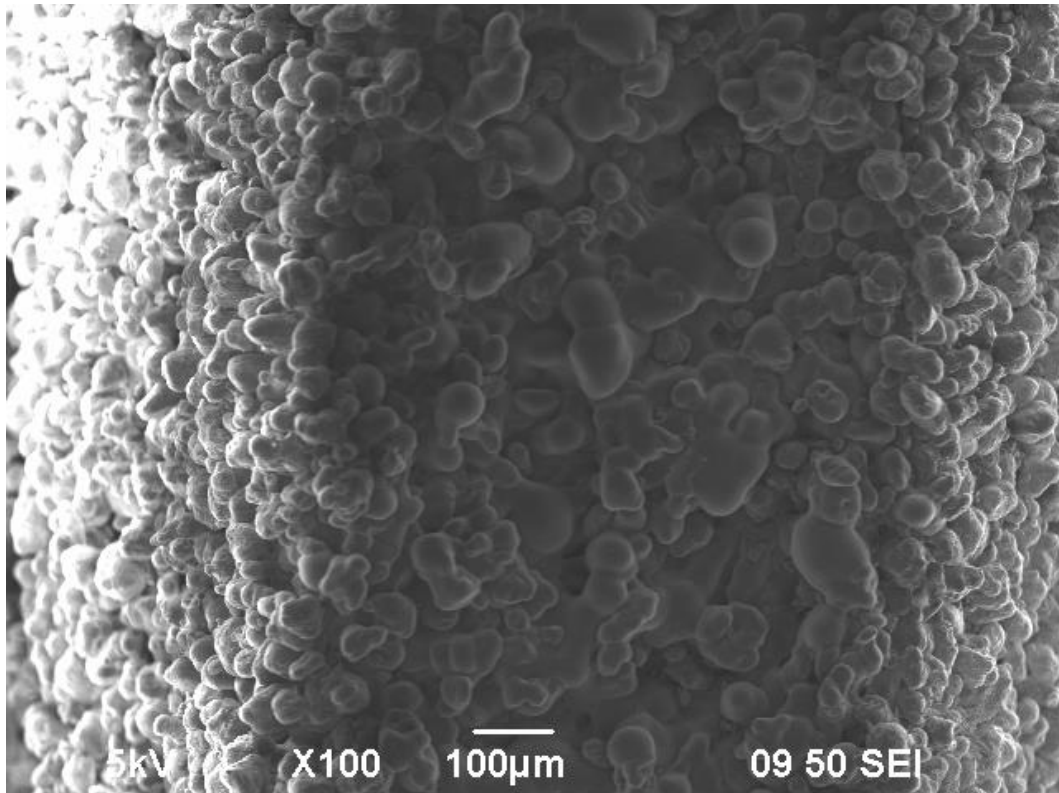


Σχήμα 5.47: Μεγέθυνση x500 πάνω στην τηγμένη περιοχή της εικόνας του σχήματος 5.44. Διακρίνεται το φαινόμενο της πλήρους τήξης του δείγματος στην περιοχή αυτή.

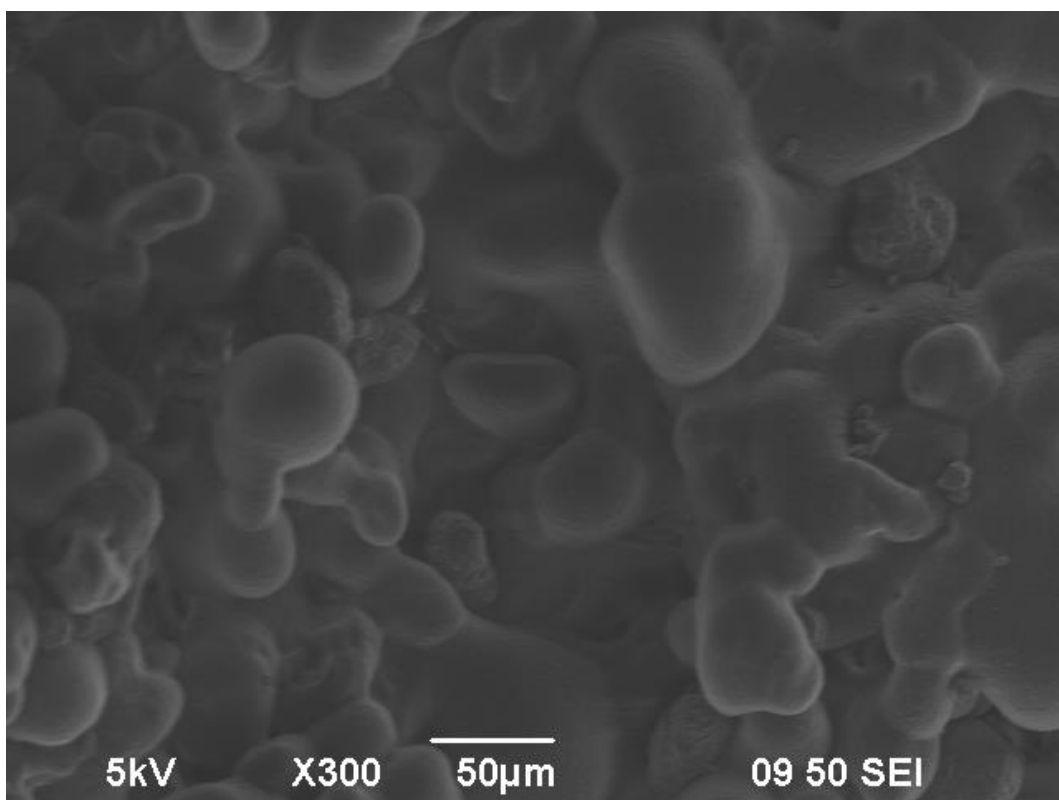
- **Δείγμα τριών στρώσεων**



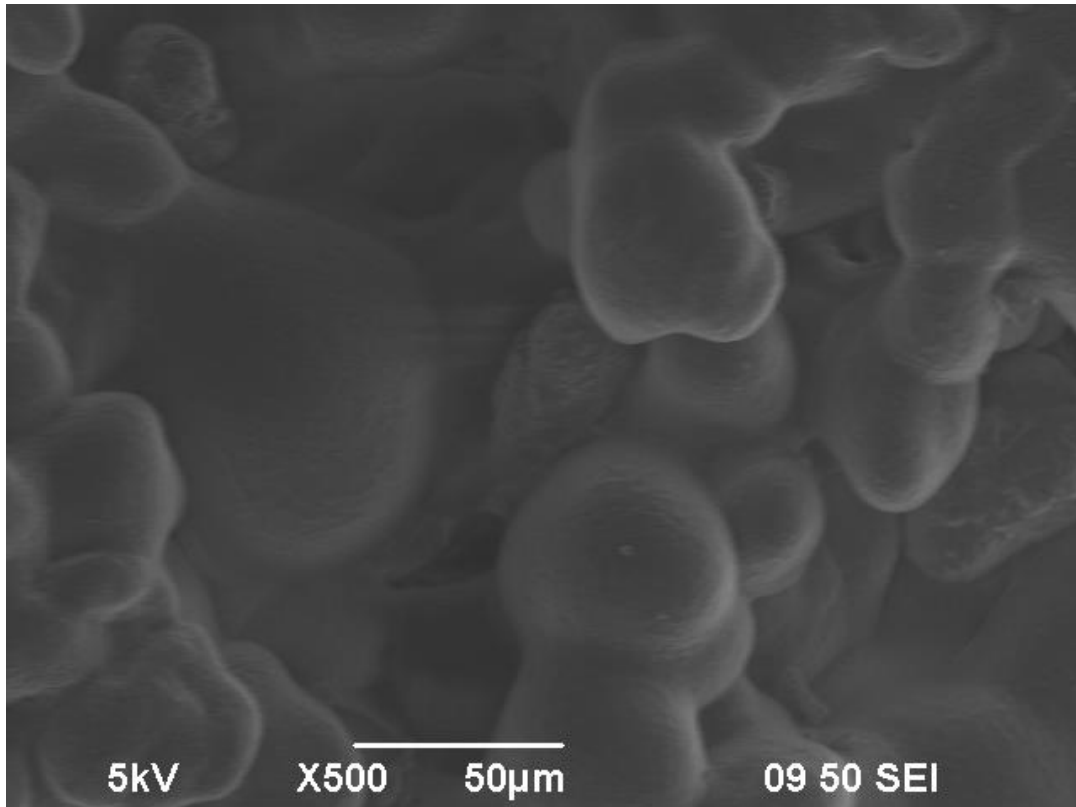
Σχήμα 5.48: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δείγμα. Η ύπαρξη μη τηγμένων κόκκων στο δείγμα είναι εμφανής. Το δείγμα παρουσιάζεται ανυψωμένο λόγω της ύπαρξης πολλαπλών στρώσεων.



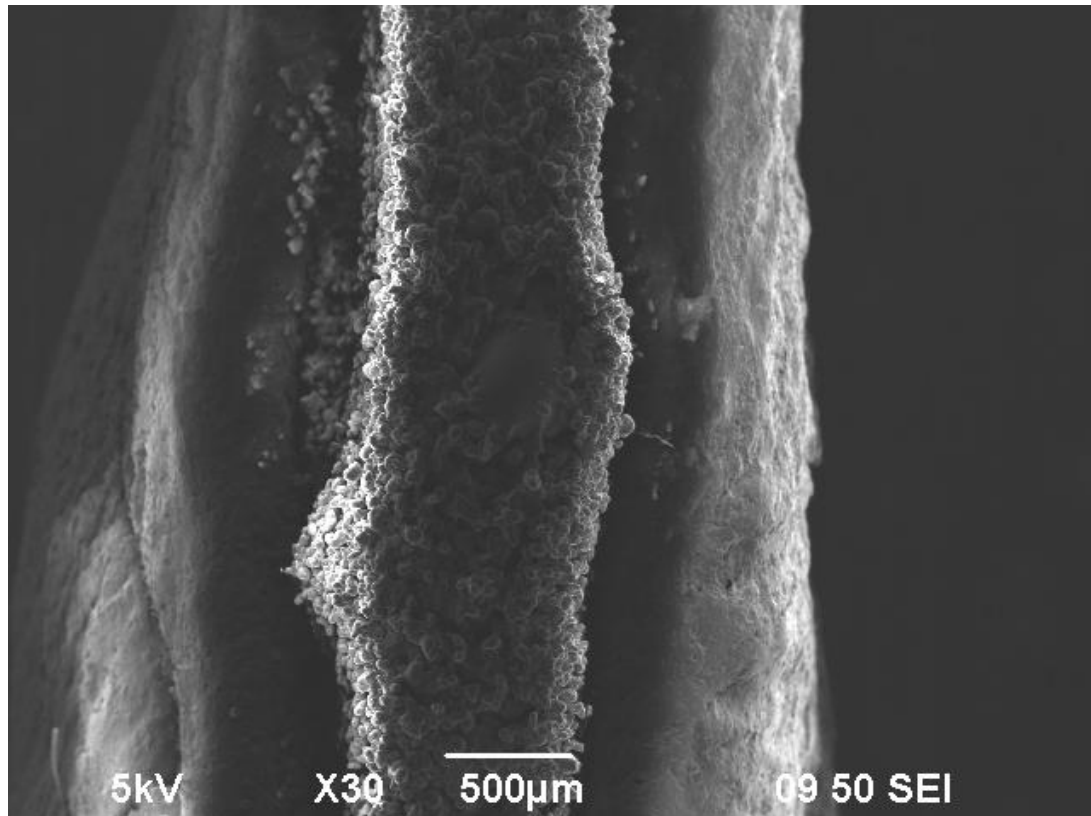
Σχήμα 5.49: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δείγμα. Παρατηρείται η ύπαρξη πυροσυσσωματωμένων κόκκων (Solid State Sintering) μαζί με κάποιες περιοχές μερικής τήξης των κόκκων. Όσο απομακρυνόμαστε από την κεντρική περιοχή της εικόνας παρατηρούμε μόνο solid state sintering.



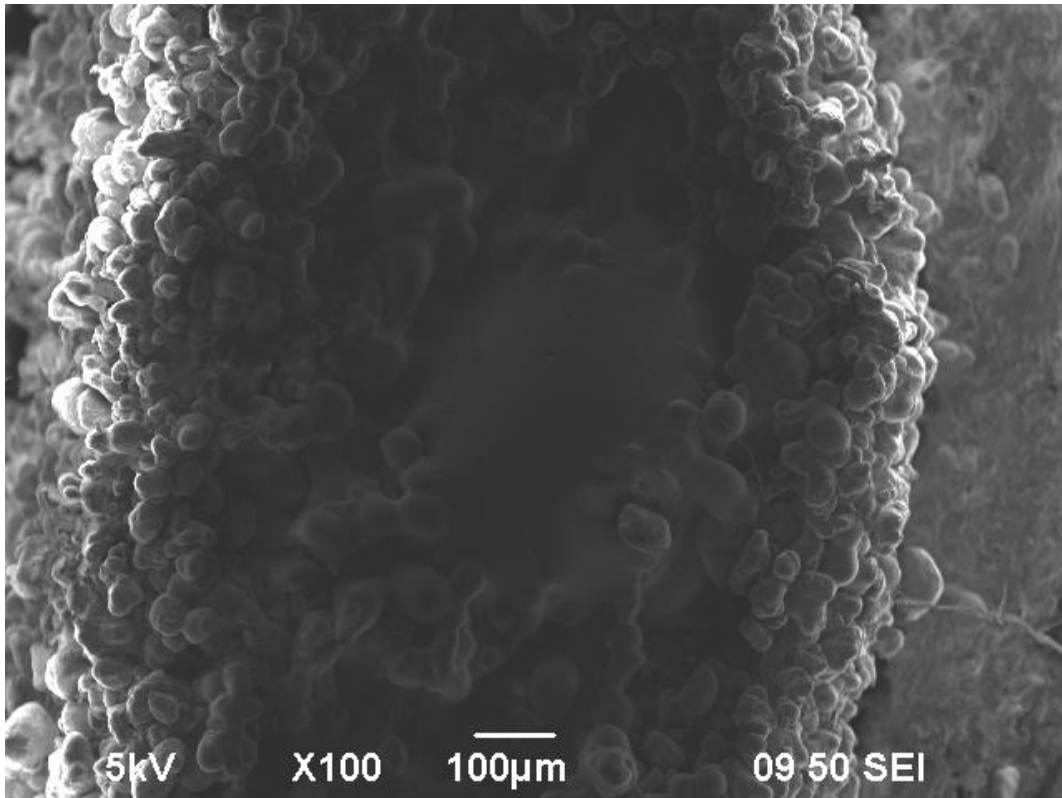
Σχήμα 5.50: Μεγέθυνση x300 στην περιοχή πρόσπτωσης της δέσμης laser του δείγματος. Παρατηρείται η ύπαρξη του φαινομένου μερικής τήξης μαζί με πυροσυσσωματωμένους κόκκους.



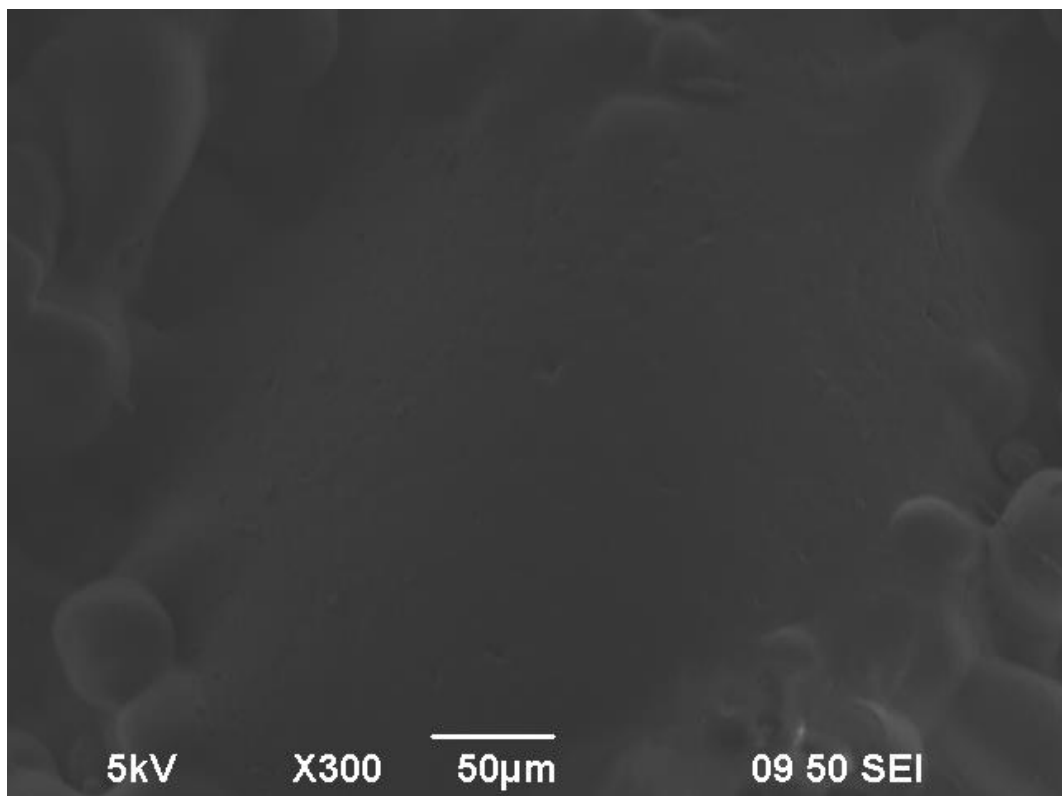
Σχήμα 5.51: Μεγέθυνση x500 πάνω στο δείγμα. Παρατηρούνται λαιμοί solid state sintering και μερικώς τηγμένο υλικό εσωτερικά.



Σχήμα 5.52: Μεγέθυνση x30 πάνω σε άλλη περιοχή του δείγματος. Παρατηρείται η ύπαρξη μιας περιοχής τηγμένου υλικού. Στο υπόλοιπο δείγμα η ύπαρξη κόκκων είναι εμφανής. Η ανομοιομορφία της ύπαρξης τηγμένου υλικού τόσο τοπικά πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός πως η περιοχή αυτή θερμάνθηκε περισσότερο από την δέσμη laser λόγω της ύπαρξης λιγότερης υγρασίας σε σχέση με άλλες περιοχές του δείγματος.

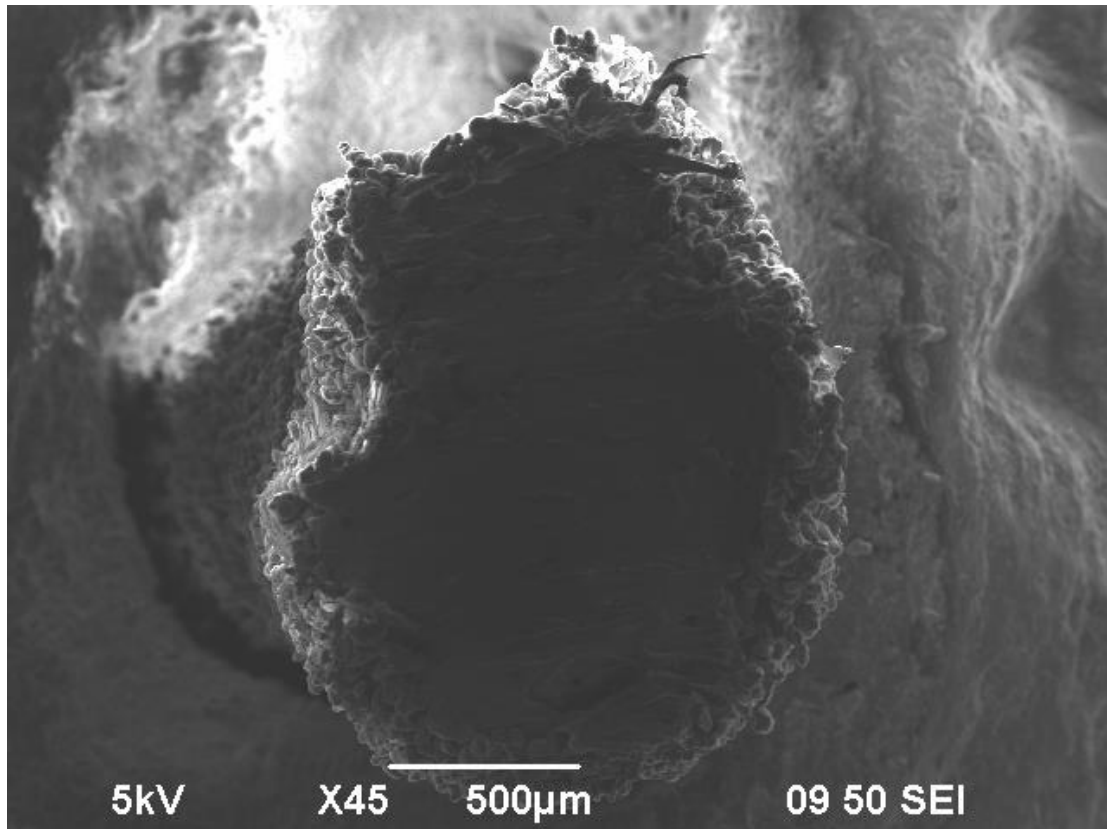


Σχήμα 5.53: Μεγέθυνση x100 πάνω στην περιοχή τηγμένου υλικού της εικόνας του σχήματος 5.51. Παρατηρείται το φαινόμενο της πλήρους τήξης εσωτερικά που σταδιακά μέσω της μερικής τήξης καταλήγει σε solid state sintering.

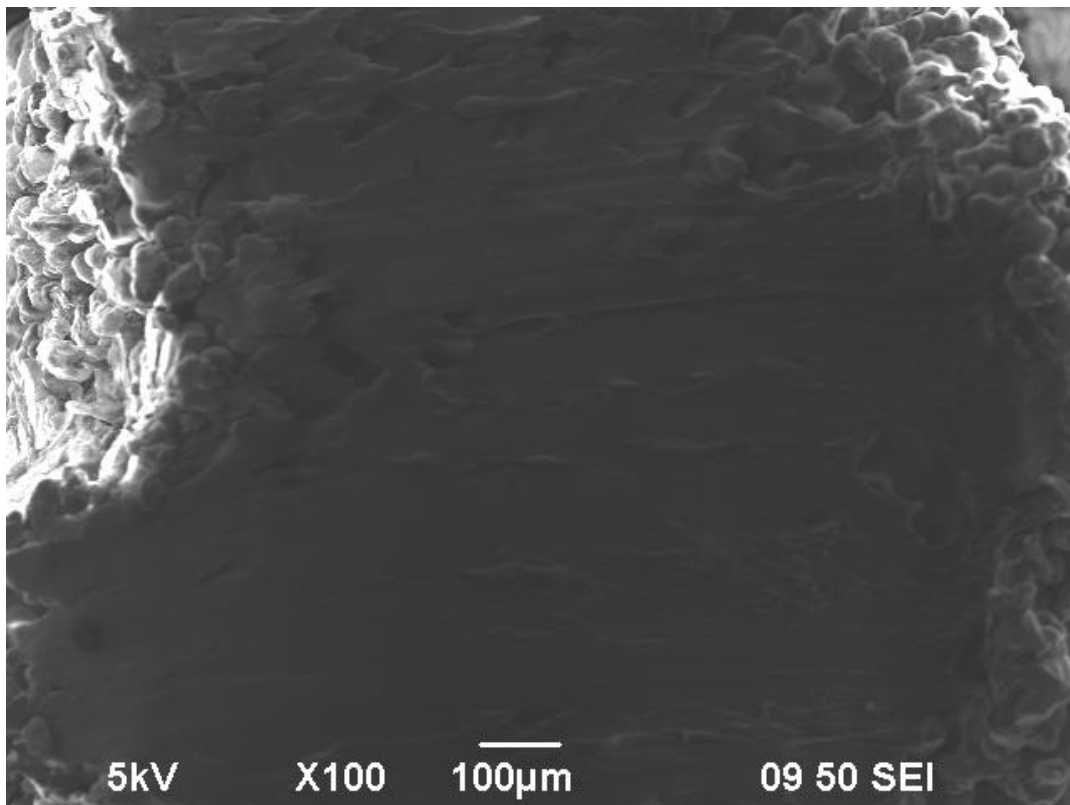


Σχήμα 5.54: Μεγέθυνση x300 πάνω στην περιοχή τηγμένου υλικού του σχήματος 5.51. Παρατηρείται το φαινόμενο της πλήρους τήξης το οποίο μεταφερόμενοι εξωτερικά καταλήγει μέσω της μερικής τήξης σε πυροσυσσωμάτωση.

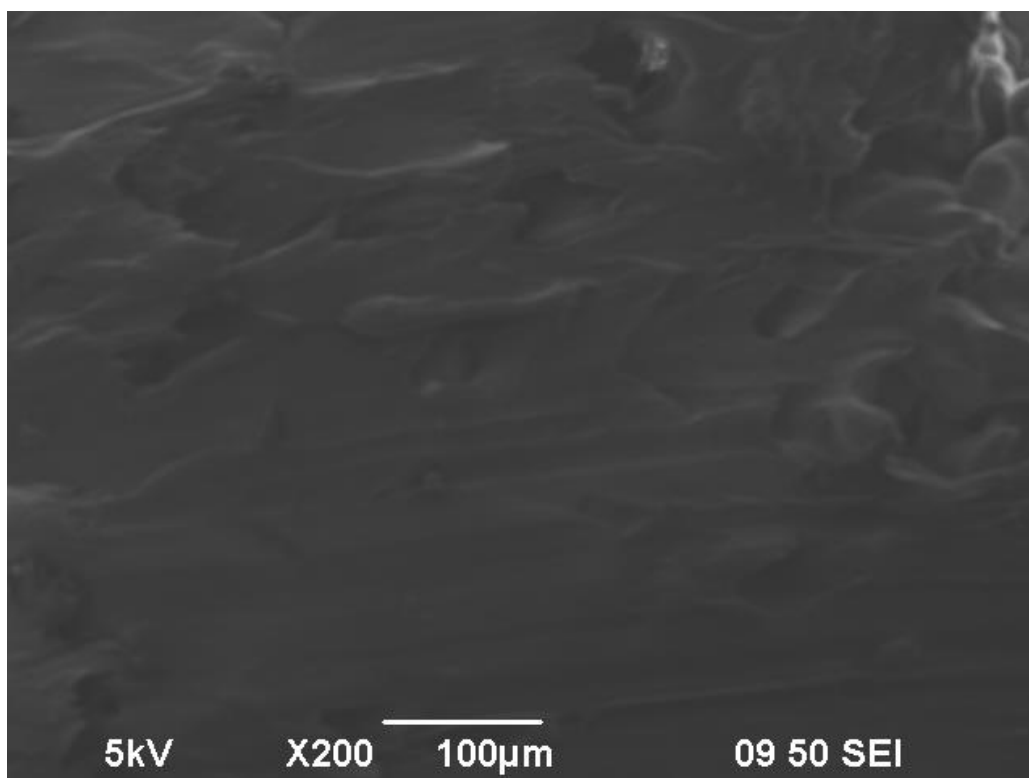
- Τομή δείγματος τριών στρώσεων



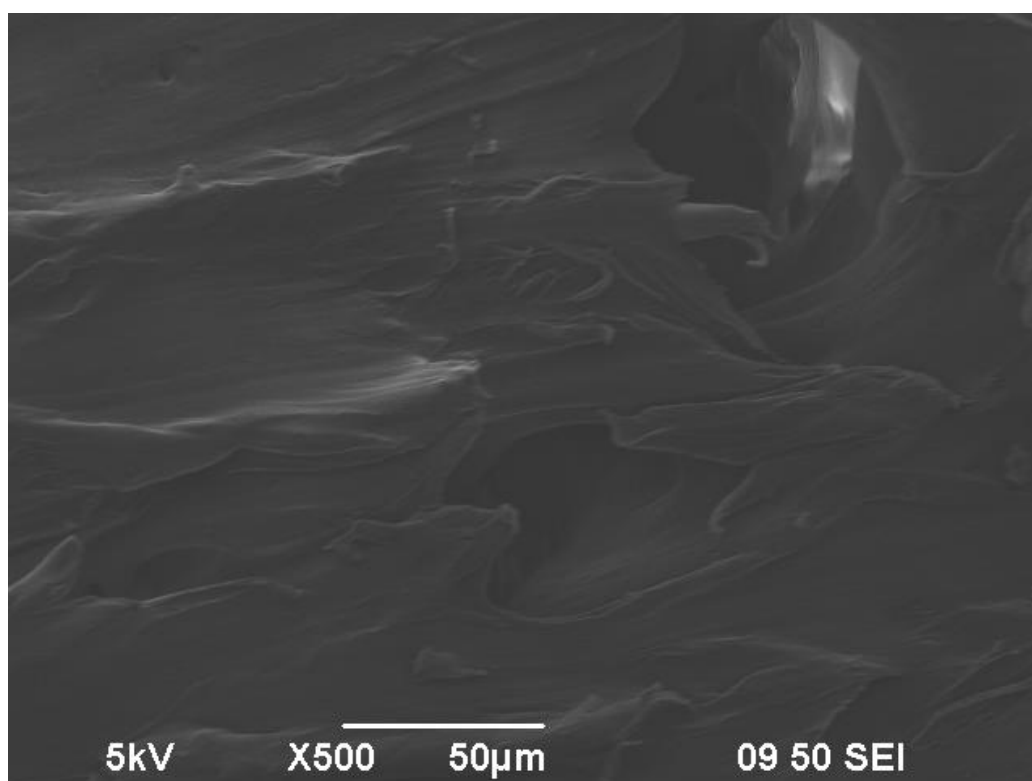
Σχήμα 5.55: Μεγέθυνση x45 πάνω στην τομή του δείγματος τριών στρώσεων. Παρατηρείται η ύπαρξη πορώδους λόγω της πυροσυσσωμάτωσης που συμβαίνει σε κάθε στρώση του δείγματος.



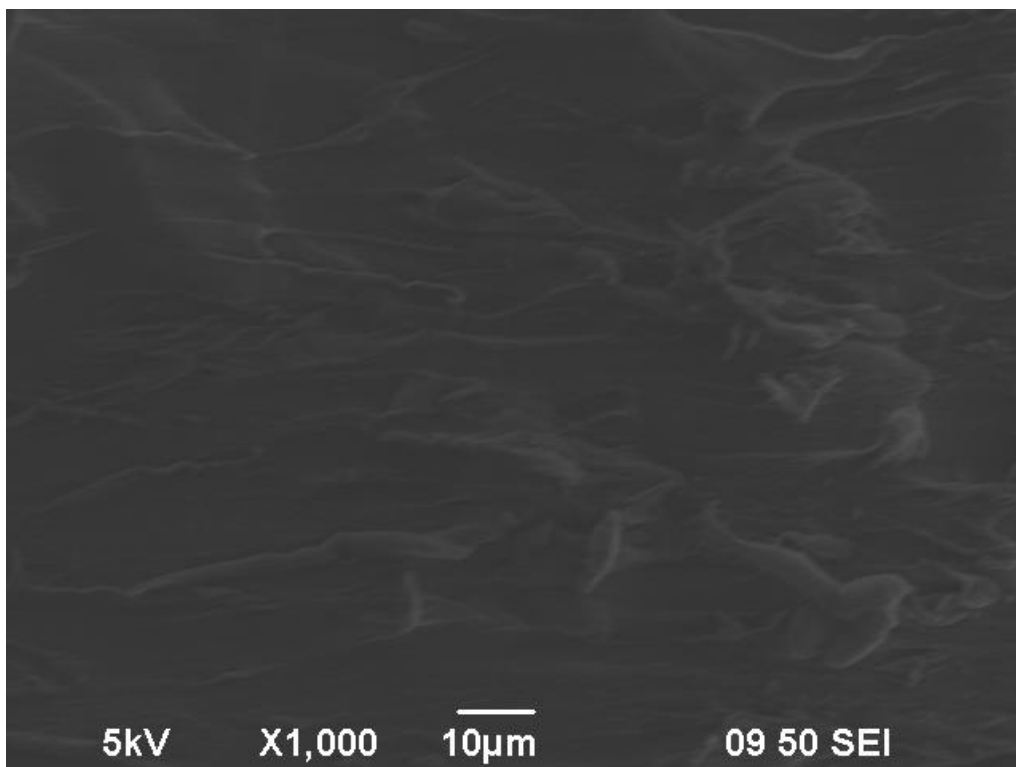
Σχήμα 5.56: Μεγέθυνση x100 πάνω στην τομή του δείγματος τριών στρώσεων. Παρατηρείται η ενιαία ένωση των τριών στρώσεων του δείγματος με την ύπαρξη του πορώδους να είναι χαρακτηριστική του ότι το δείγμα έχει πυροσυσσωματωθεί.



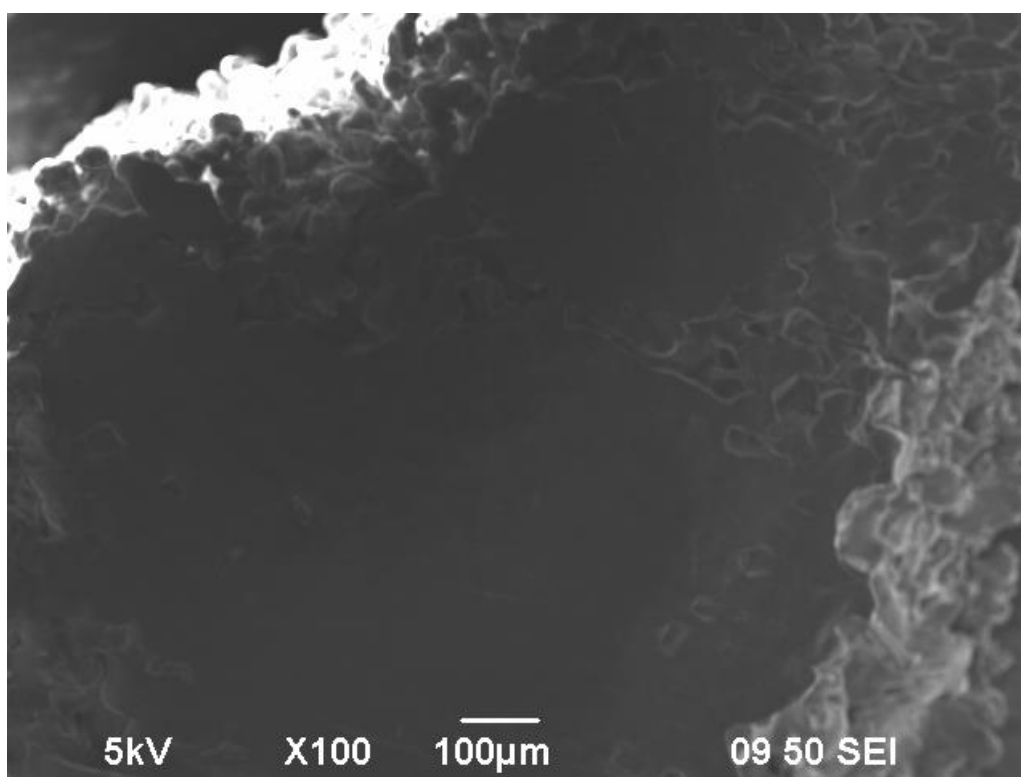
Σχήμα 5.57: Μεγέθυνση x200 πάνω στην τομή του δείγματος τριών στρώσεων. Το γεγονός πως η μορφολογία που παρατηρείται είναι προσανατολισμένη προς τα δεξιά έχει συμβεί από τον κόπτη που χρησιμοποιήθηκε για να κοπεί το δείγμα. Η εμφάνιση του πορώδους είναι πιο έντονη.



Σχήμα 5.58: Μεγέθυνση x500 πάνω στην τομή του δείγματος τριών στρώσεων. Η προσανατολισμένη μορφολογία είναι πιο εμφανής λόγω του τρόπου που κόπηκε το δείγμα, ενώ επίσης παρατηρούνται τα κενά που υπάρχουν λόγω του υψηλούς πορώδους.



Σχήμα 5.59: Μεγέθυνση x1000 πάνω στην τομή του δείγματος τριών στρώσεων. Τα ίχνη που άφησε το μαχαίρι κοπής του δείγματος είναι εμφανή.

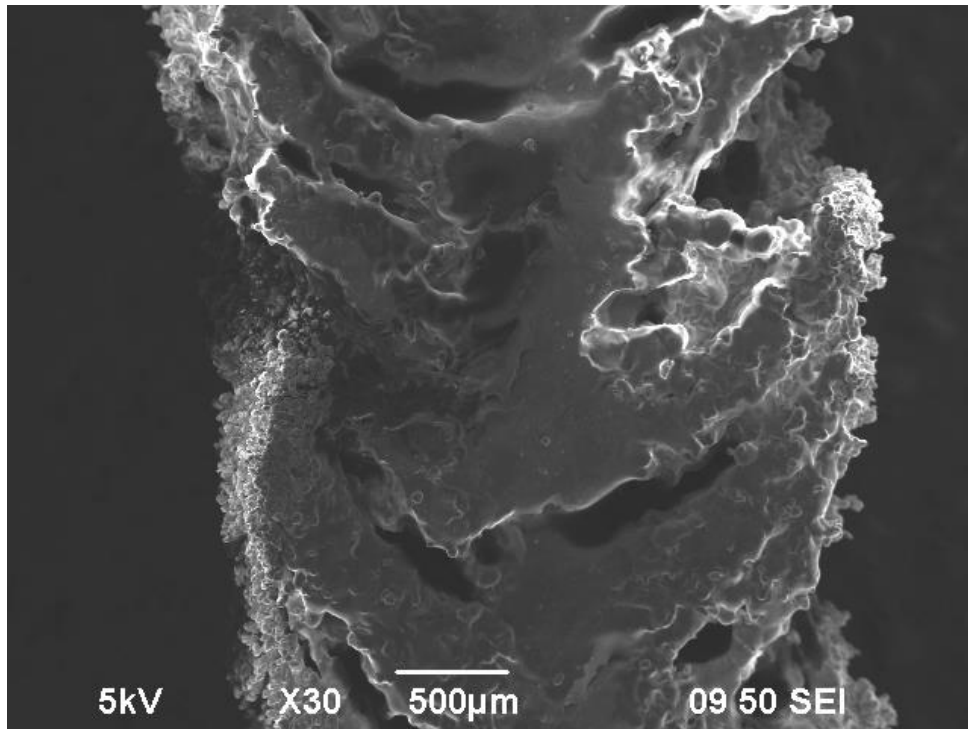


Σχήμα 5.60: Μεγέθυνση x100 πάνω σε περιοχή της τομής του δείγματος τριών στρώσεων. Είναι εμφανής η ύπαρξη πολλών κενών που δικαιολογούν το υψηλό πορώδες του δείγματος. Οι στρώσεις έχουν ενωθεί ενιαία, ενώ προς τα εξωτερικό του δείγματος βλέπουμε πυροσυσσωματωμένους κόκκους.

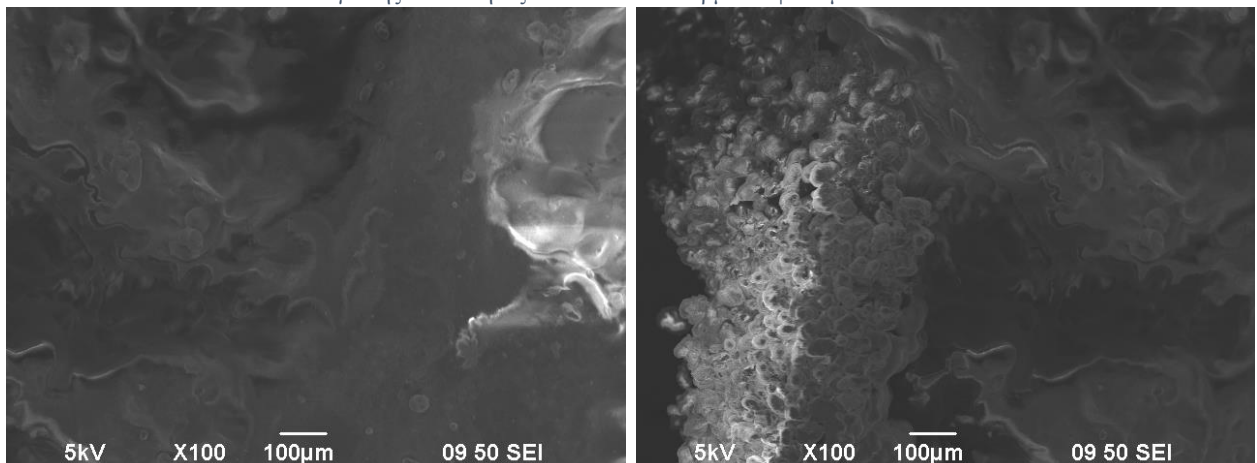
Αποτελέσματα δεύτερης σειράς δειγμάτων

Υπενθυμίζουμε πως η δεύτερη σειρά δειγμάτων δεν πέρασε από την διαδικασία του sputtering, επομένως δεν έγινε λεπτομερής παρατήρησή της (μέγιστη μεγέθυνση στα x100). Οι εικόνες που παρουσιάζονται στην συνέχεια έχουν ταξινομηθεί με βάση την πρόωση της κεφαλής laser που έδωσε το κάθε δείγμα με μέση ισχύ δέσμης στα 20W. Παρόλα αυτά μπορούν να γενικοποιηθούν για οποιαδήποτε τιμή ισχύος, αφού είναι χαρακτηριστικές της επίδρασης της δέσμης laser πάνω στην σκόνη σε σχέση με την ταχύτητα κίνησης της, F [mm/s] :

- Δείγμα με $F = 0.1$ mm/s

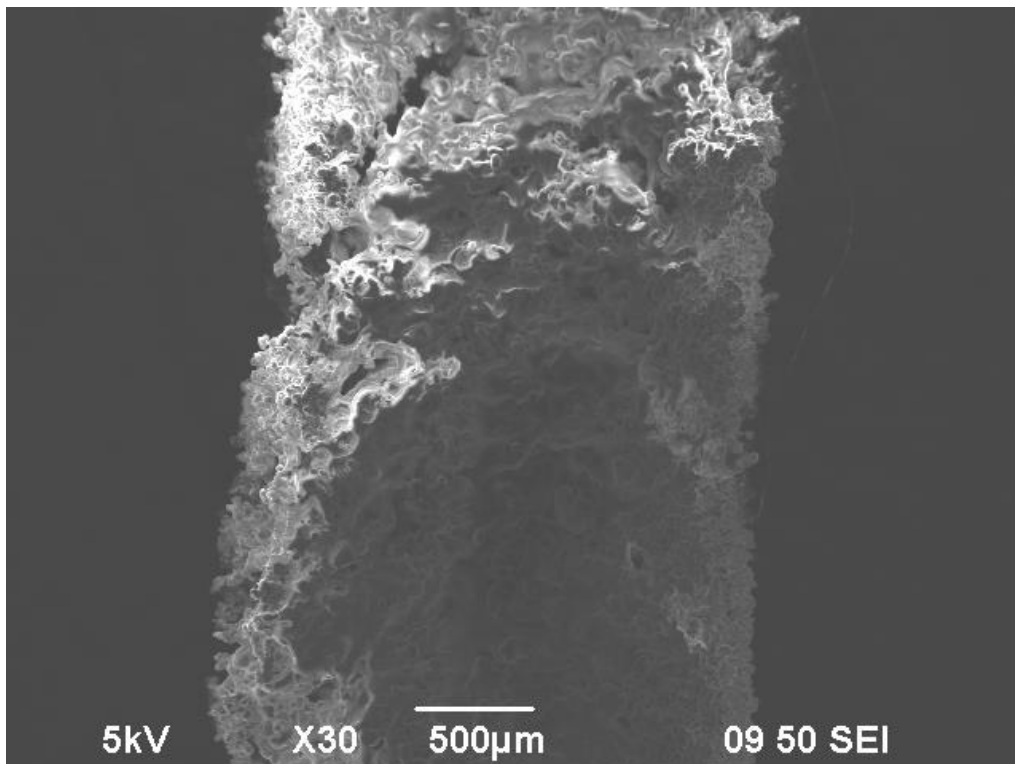


Σχήμα 5.61: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.1$ mm/s. Παρατηρείται το έντονο φαινόμενο της πλήρους και μερικής τήξης από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του δείγματος. Το πορώδες του υλικού λόγω της ύπαρξης μερικής τήξης παραμένει υψηλό. Προχωρώντας στην περιφέρεια του δείγματος παρατηρούμε την ύπαρξη πυροσυσσωματωμένων κόκκων (Solid State Sintering) που κόλλησαν με την υπόλοιπη στερεή μάζα λόγω της εντονότητας του συνολικού θερμικού φαινομένου..

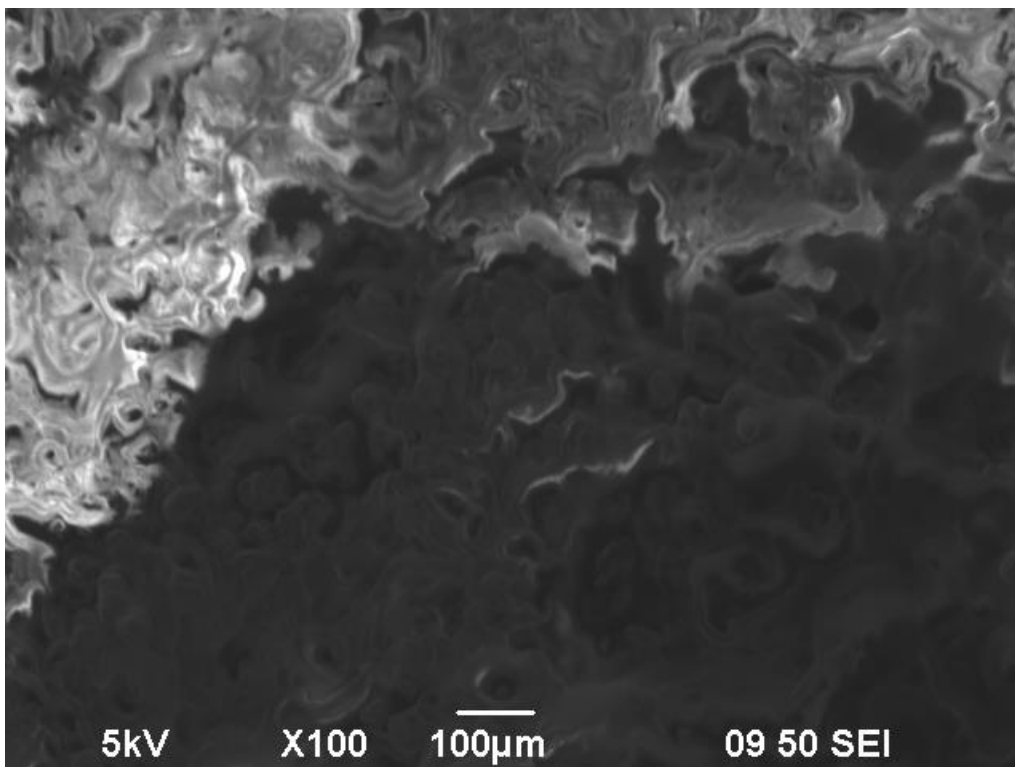


Σχήμα 5.62: Μεγέθυνση x100 πάνω σε περιοχές ενδιαφέροντος του δημιουργημένου δείγματος με πρόωση $F = 0.1$ mm/s. Στην αριστερή εικόνα παρατηρείται η περιοχή πλήρους και μερικής τήξης, ενώ στην δεξιά εικόνα η περιοχή του solid state sintering στα άκρα του δείγματος.

- Δείγμα με $F = 0.2 \text{ mm/s}$

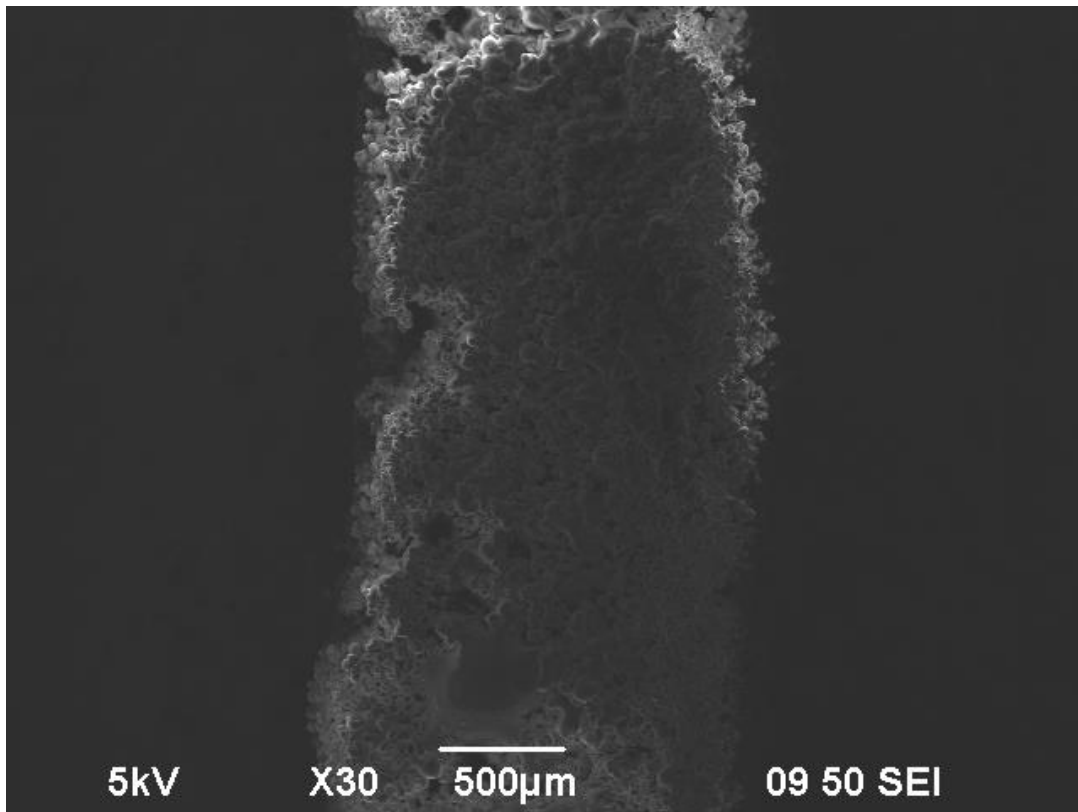


Σχήμα 5.63: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.2 \text{ mm/s}$. Το φαινόμενο της πλήρους και μερικής τήξης είναι εμφανές, ενώ το ποσοστό πορώδους παραμένει υψηλό. Η περιοχή πυροσυσσωματωμένων κόκκων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το δείγμα για $F = 0.1 \text{ mm/s}$.

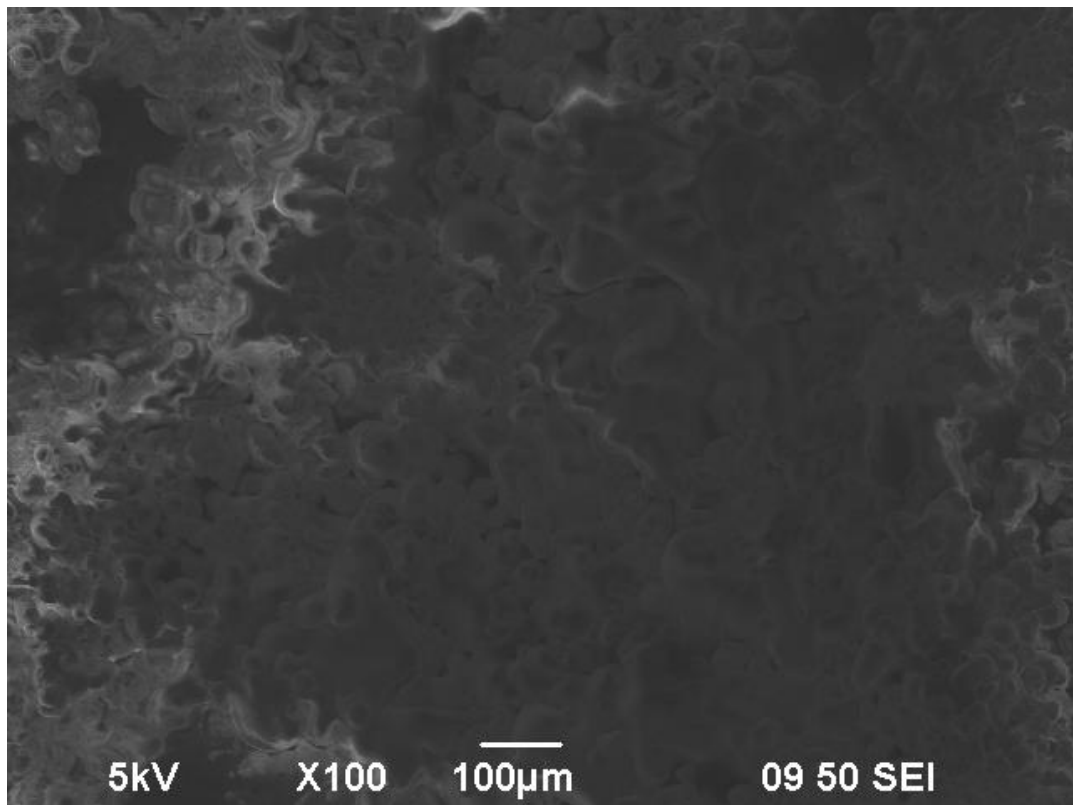


Σχήμα 5.64: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.2 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται το φαινόμενο της τήξης (πλήρους και μερικής) μεταξύ των κόκκων.

- Δείγμα με $F = 0.3 \text{ mm/s}$

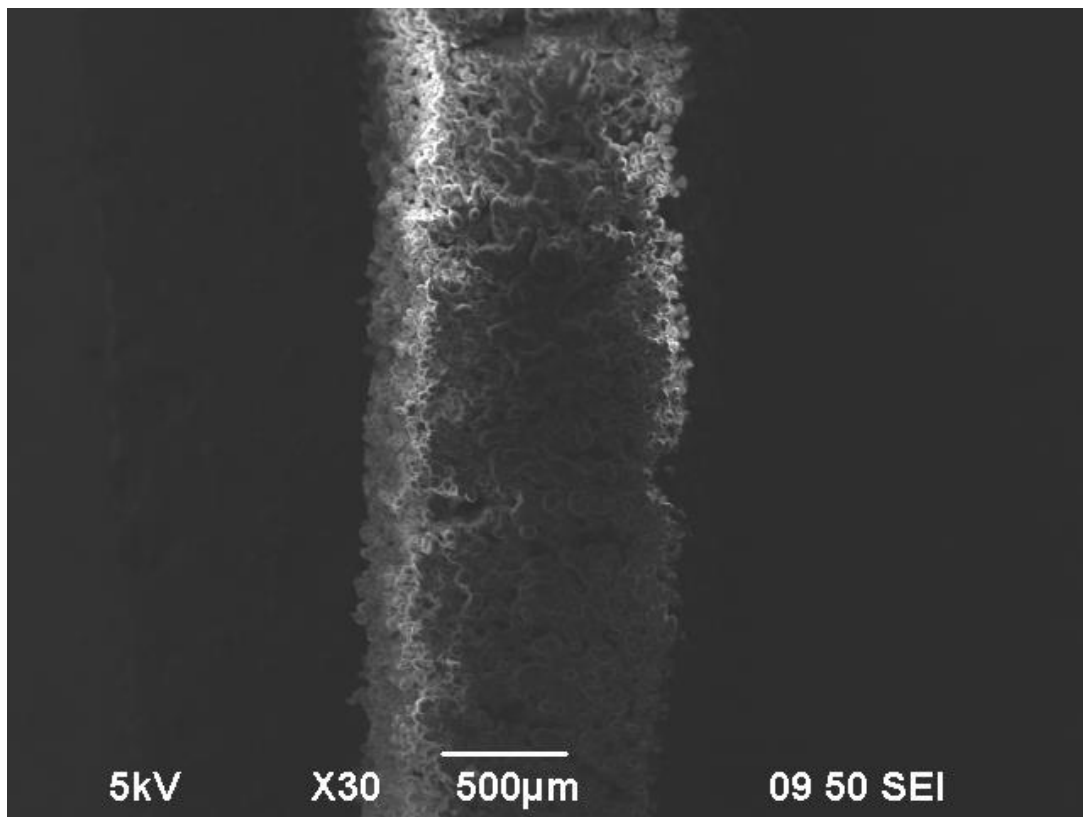


Σχήμα 5.65: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.3 \text{ mm/s}$. Το φαινόμενο της πλήρους τήξης έχει μειωθεί σε σχέση με τις προηγούμενες ταχύτητες πρόωσης, αφού κατά κύριο λόγο στο εσωτερικό του δείγματος κυριαρχεί η μερική τήξη. Τέλος, το φαινόμενο του solid state sintering αρχίζει να εμφανίζεται πλέον πιο εσωτερικά του δείγματος σε σχέση με πριν.

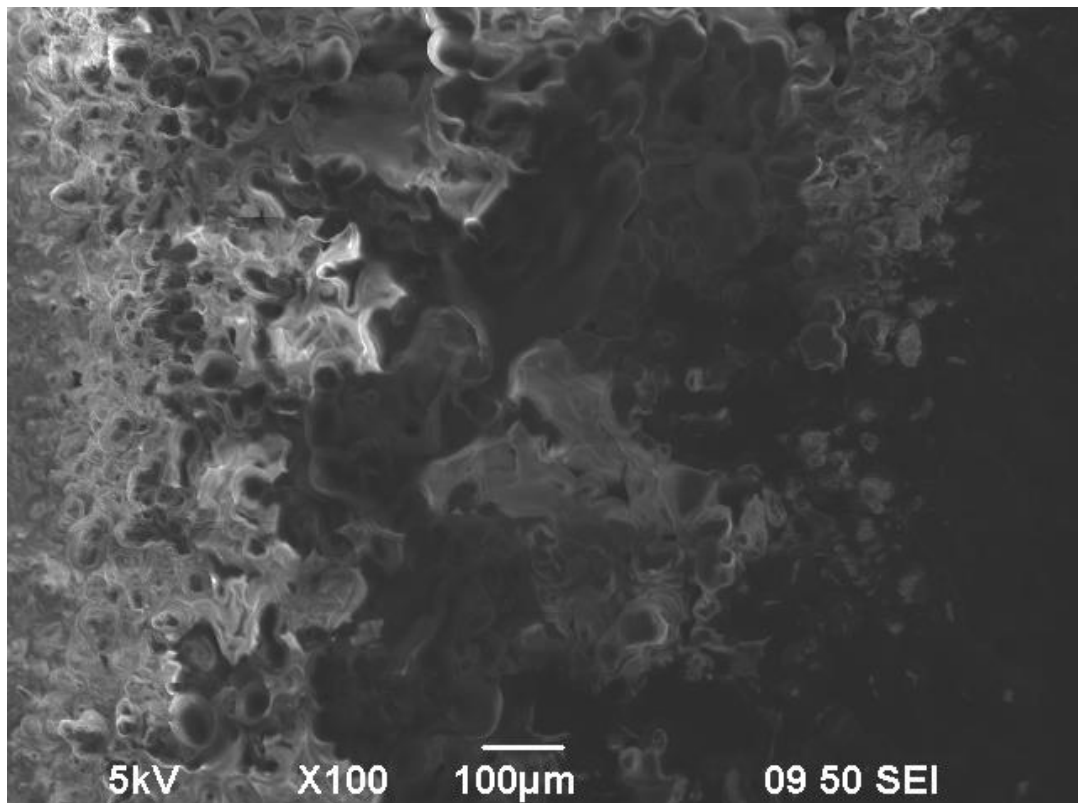


Σχήμα 5.66: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.3 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται το φαινόμενο της μερικής τήξης των κόκκων.

- Δείγμα με $F = 0.4 \text{ mm/s}$

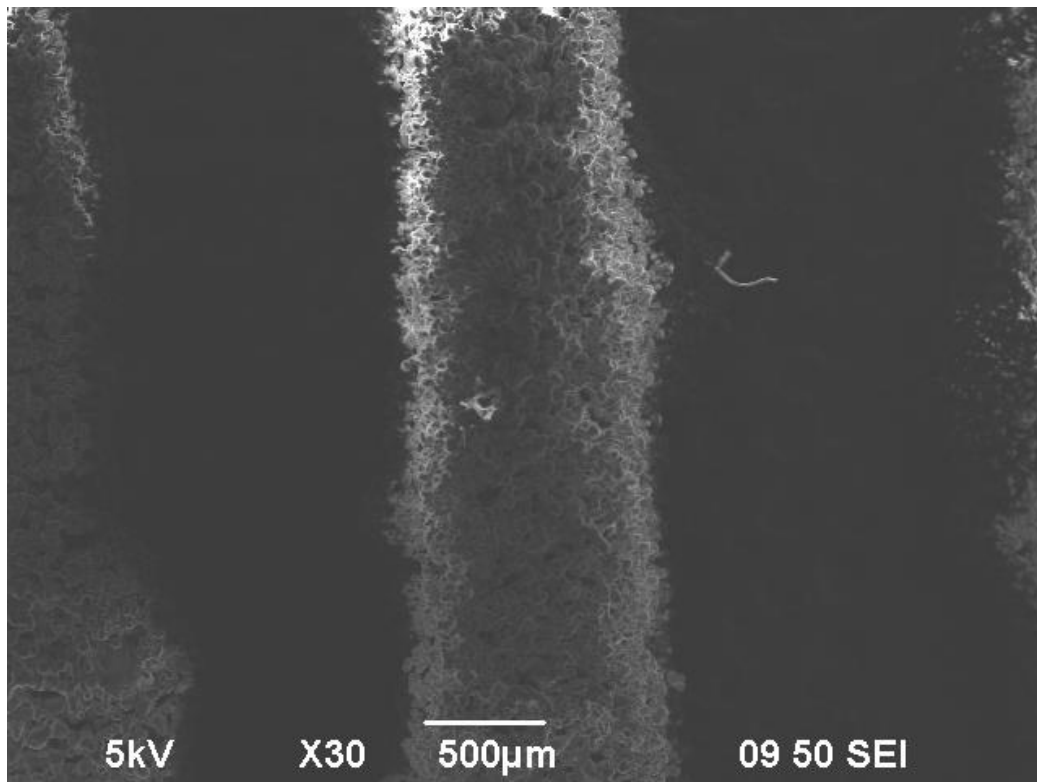


Σχήμα 5.67: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.4 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται η ύπαρξη solid state sintering εσωτερικά του τεμαχίου πλέον με τις περιοχές μερικής τήξης να είναι μειωμένες σε σχέση με πριν.

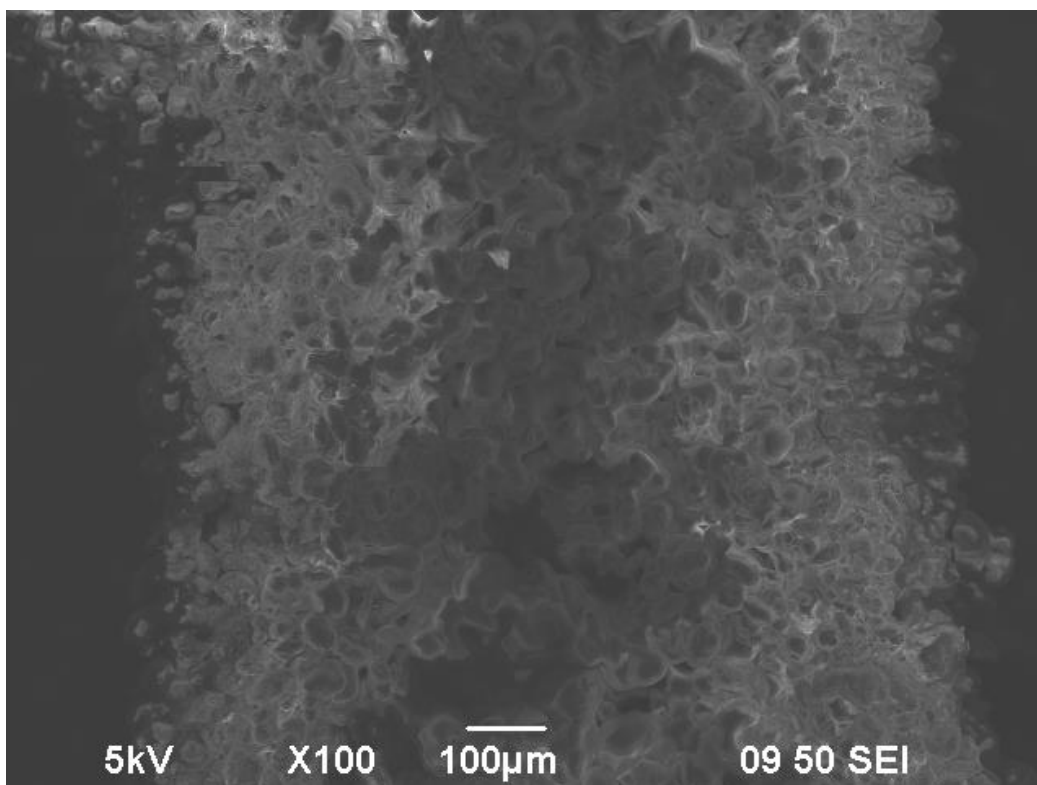


Σχήμα 5.68: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.4 \text{ mm/s}$. Λόγω μη sputtering με γραφίτη, το δείγμα παρουσιάζεται με περίεργη όψη στην εικόνα αυτή. Παρ'όλα αυτά διακρίνονται οι λαιμοί των κόκκων λόγω του solid state sintering καθώς και η ύπαρξη υψηλού ποσοστού πορώδους.

- Δείγμα με $F = 0.5 \text{ mm/s}$

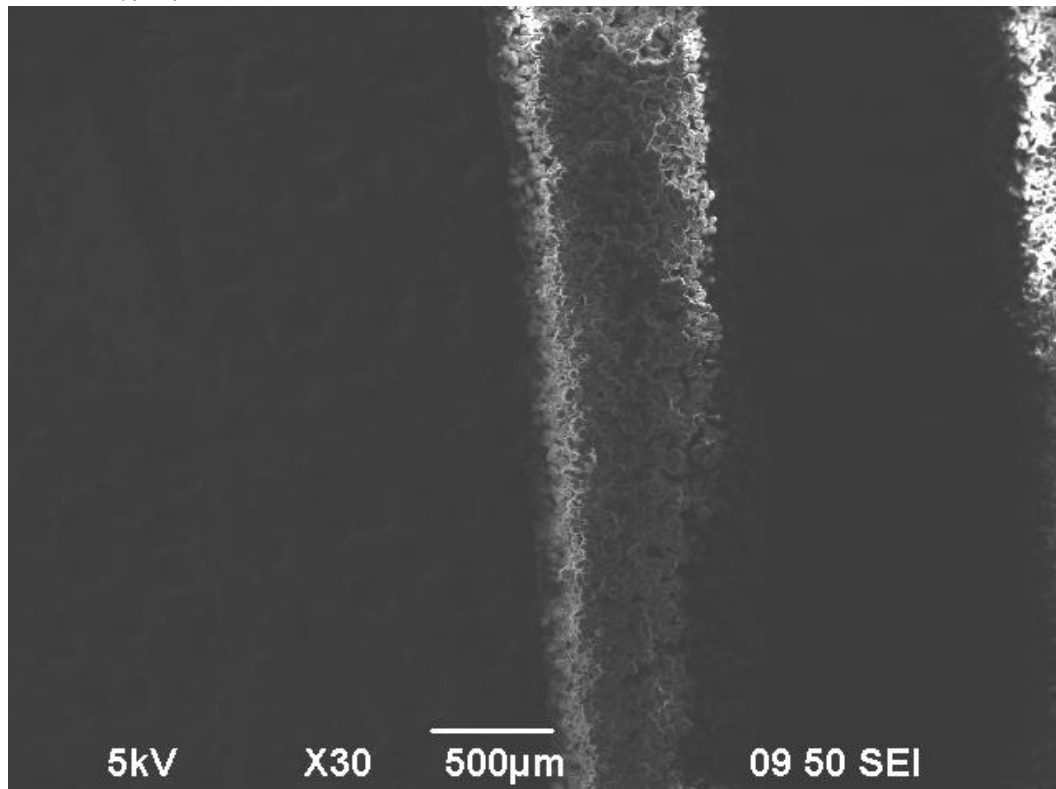


Σχήμα 5.69: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.5 \text{ mm/s}$. Τα δείγματα αυτής της πρόωσης παρατηρήθηκαν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην προηγούμενη σειρά δειγμάτων. Για μέση ισχύ του laser Ylta M20 στα 20 W, η πρόωση $F = 0.5 \text{ mm/s}$, αποτελεί ουσιαστικά την κρίσιμη ταχύτητα για την εμφάνιση του solid state sintering κυρίως πάνω στα στερεά προϊόντα σκόνης.

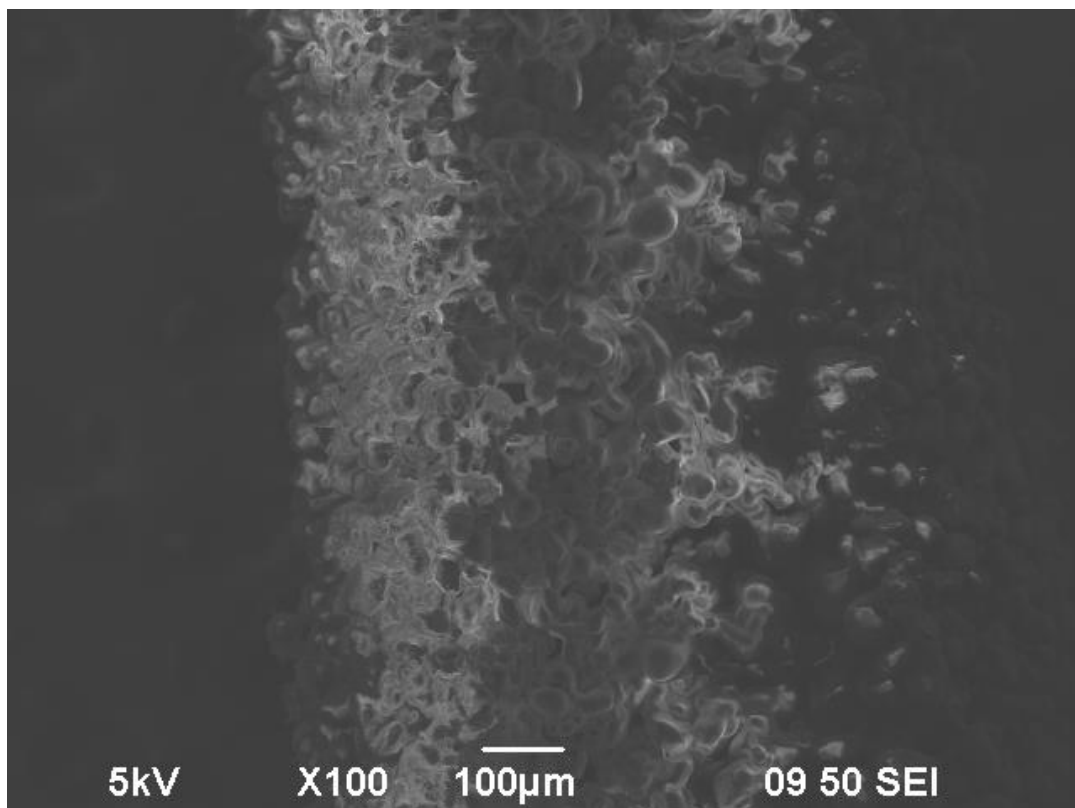


Σχήμα 5.70: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.5 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται η ύπαρξη λαιμού μεταξύ των κόκκων και υψηλό ποσοστό πορώδους λόγω πυροσυσσωμάτωσης.

- Δείγμα με $F = 0.6 \text{ mm/s}$

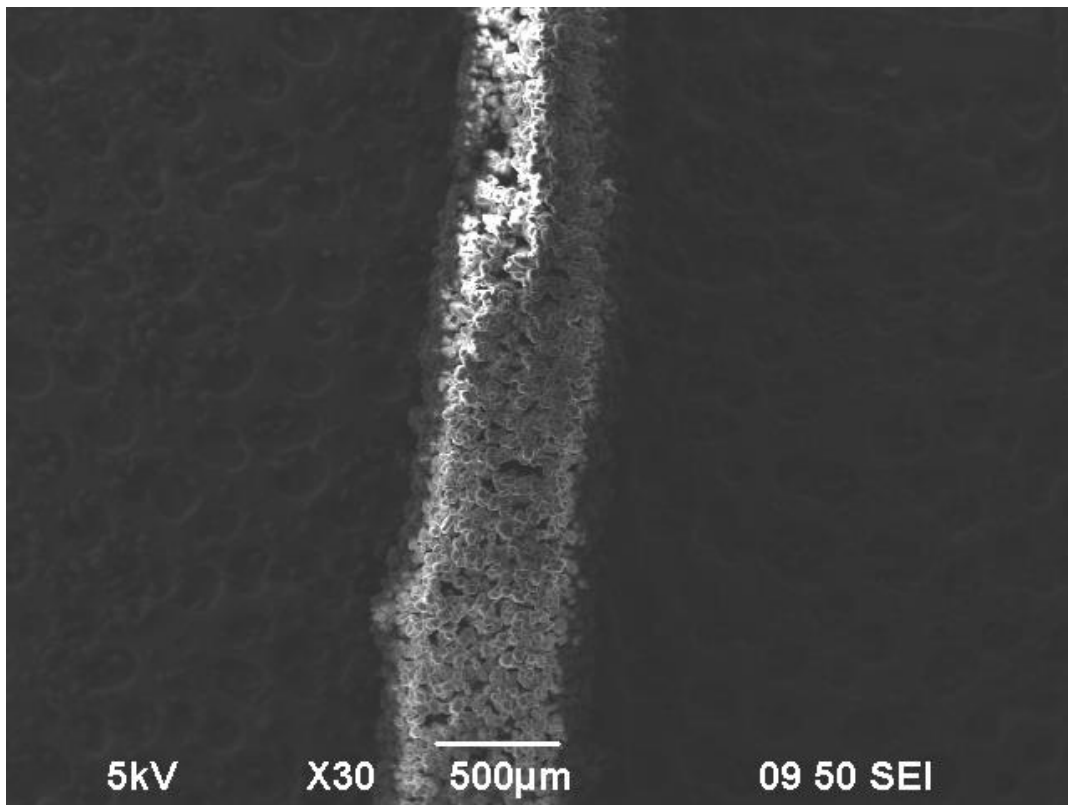


Σχήμα 5.71: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.6 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται μόνο ύπαρξη πυροσυσσωματωμένων κόκκων σκόνης στο δείγμα. Η μείωση του πλάτους b στο δείγμα σε σχέση με τις προηγούμενες μικρότερες τιμές πρόωσης είναι φανερή.

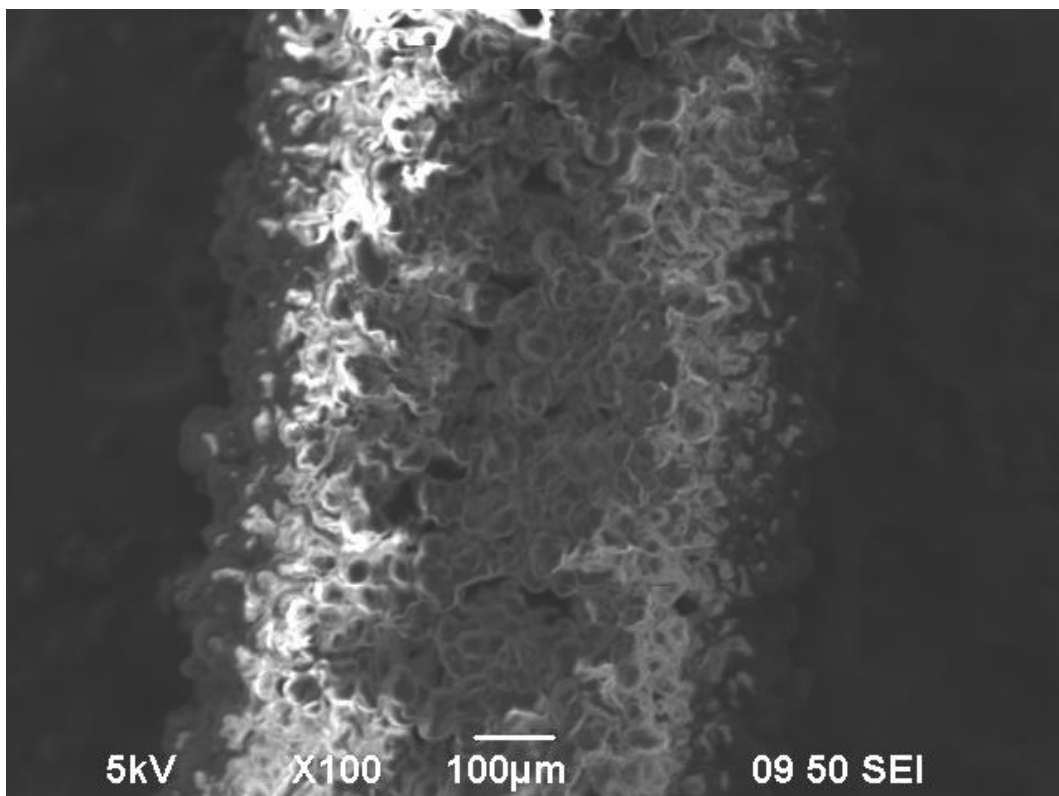


Σχήμα 5.72: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.6 \text{ mm/s}$. Η ποιότητα εικόνας δεν είναι ιδανική λόγω μη sputtering. Παρ'όλα αυτά διακρίνονται οι λαιμοί των κόκκων από το solid state sintering.

- Δείγμα με $F = 0.7 \text{ mm/s}$

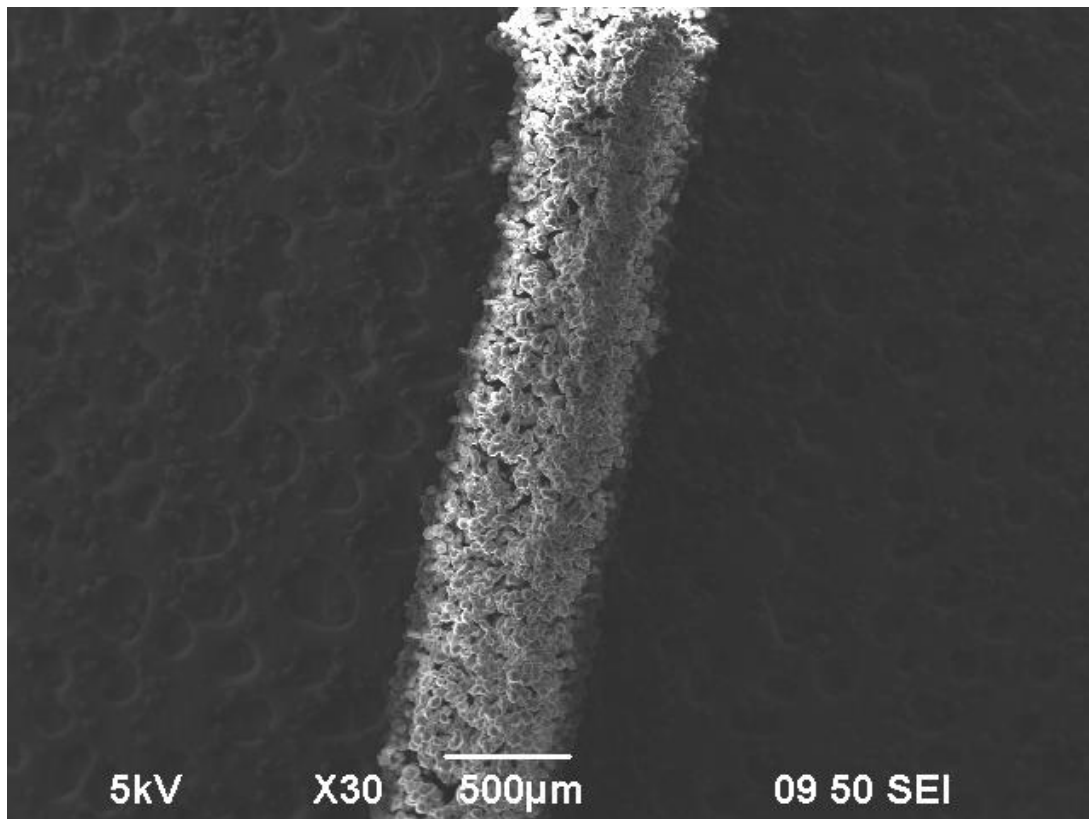


Σχήμα 5.73: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.7 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται το φαινόμενο του solid state sintering μεταξύ των κόκκων. Η μικρή τιμή του πλάτους b είναι επίσης φανερή λόγω της αύξησης της ταχύτητας πρόωσης της δέσμης laser.

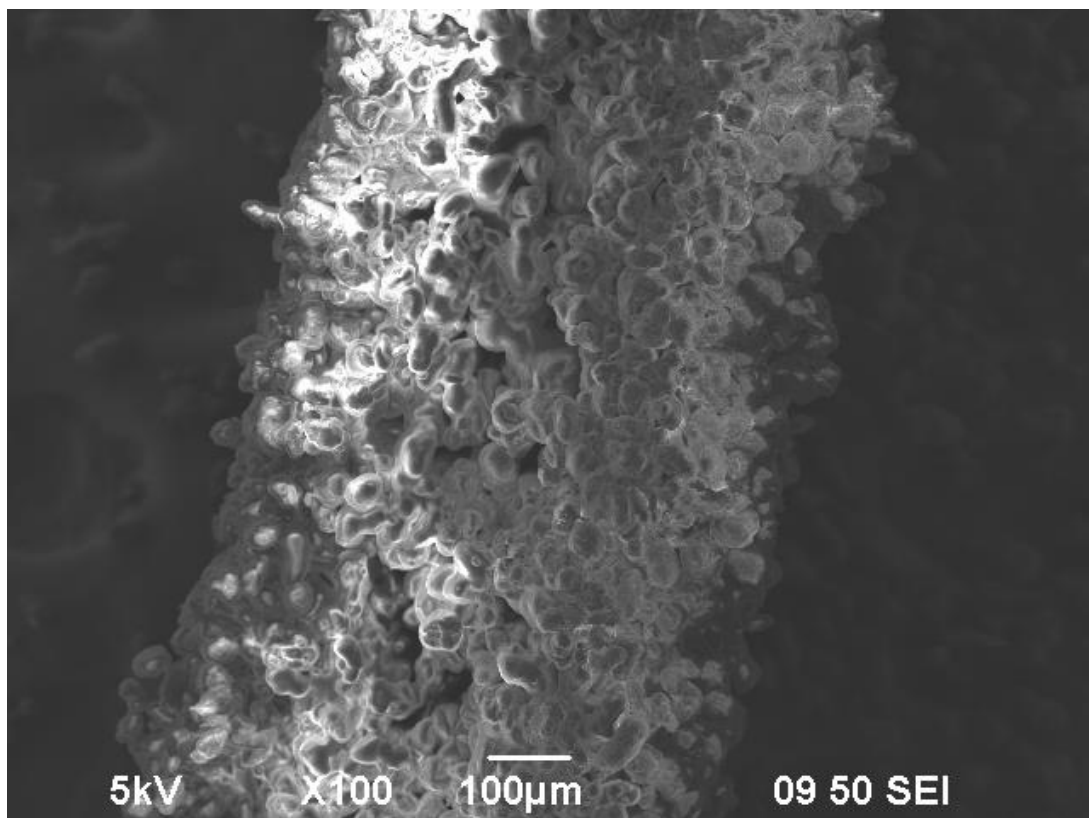


Σχήμα 5.74: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.7 \text{ mm/s}$. Παρουσιάζονται οι λαιμοί της πυροσυσσωμάτωσης μεταξύ των κόκκων της σκόνης.

- Δείγμα με $F = 0.8 \text{ mm/s}$

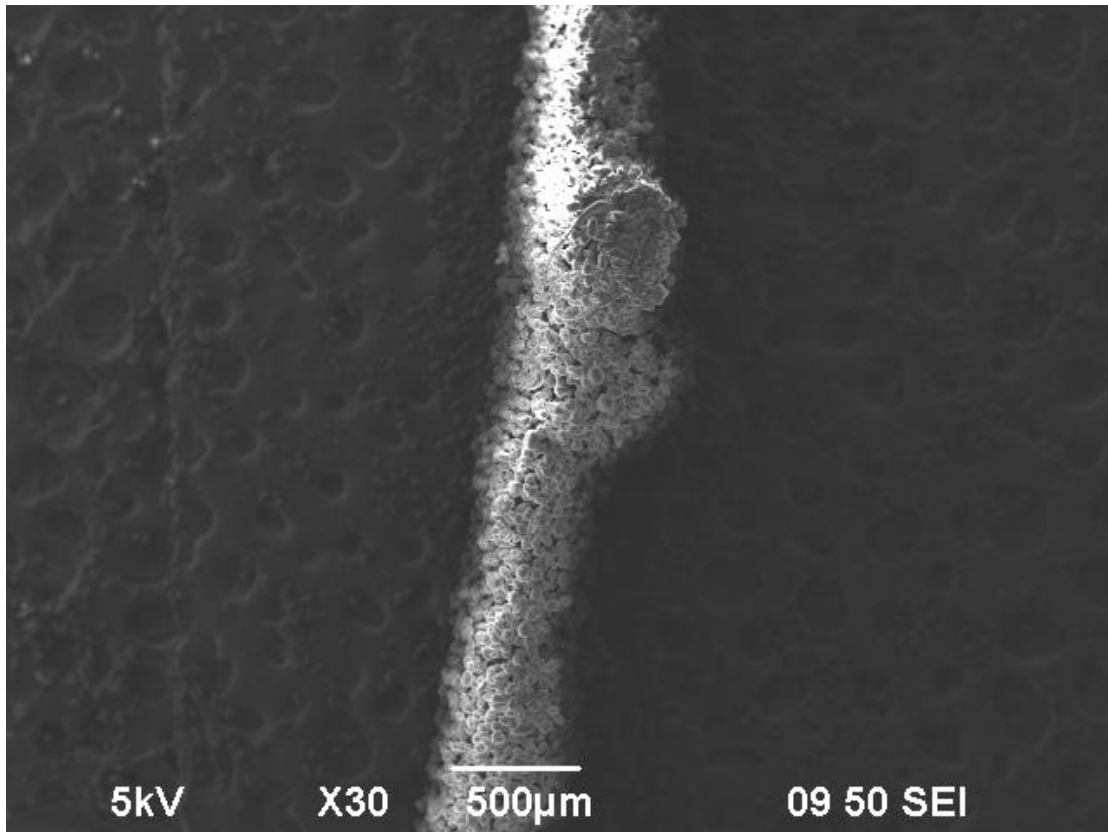


Σχήμα 5.75: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.8 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται το φαινόμενο του solid state sintering μεταξύ των κόκκων, καθώς και το υψηλό ποσοστό πορώδους του δείγματος.

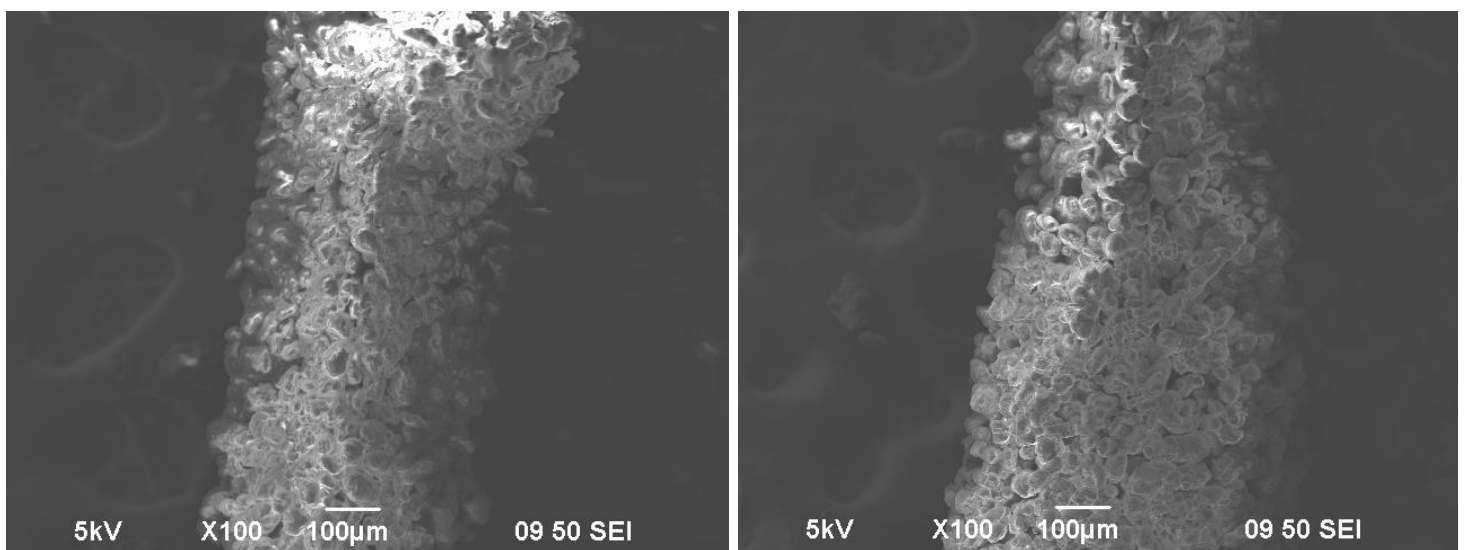


Σχήμα 5.76: Μεγέθυνση x100 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.8 \text{ mm/s}$. Παρουσιάζονται οι λαιμοί της πυροσυσσωμάτωσης μεταξύ των κόκκων της σκόνης.

- Δείγμα με $F = 0.9 \text{ mm/s}$

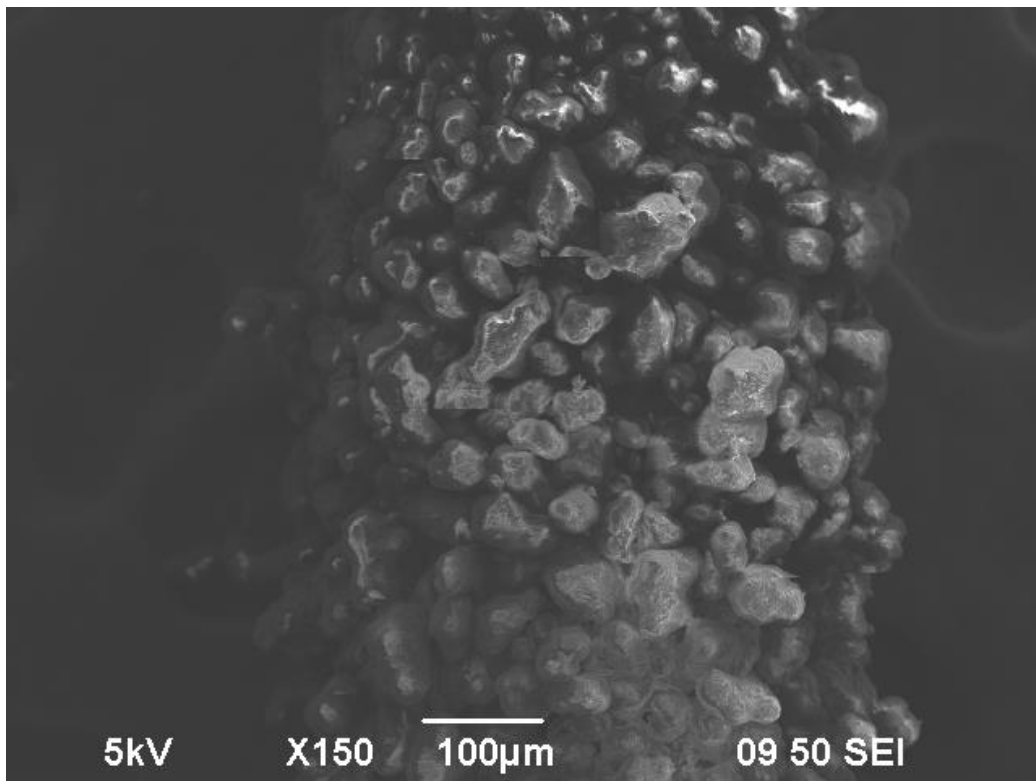


Σχήμα 5.77: Μεγέθυνση x30 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 0.9 \text{ mm/s}$. Παρατηρείται το φαινόμενο του solid state sintering στο δείγμα. Το πλάτος b παρουσιάζεται ιδιαίτερα λεπτό λόγω της αύξησης ταχύτητας της κεφαλής του laser. Το εξόγκωμα σκόνης που παρατηρείται είναι μια μπίλια σκόνης λόγω της ύπαρξης υγρασίας στον θάλαμο της μηχανής που κολλήθηκε στο συνολικό κορμό του δείγματος μέσω της θέρμανσης από το laser. Τα δείγματα τέτοιας πρόωσης είναι εύθραυστα λόγω των μικρών διαστάσεων των λαιμών των κόκκων.

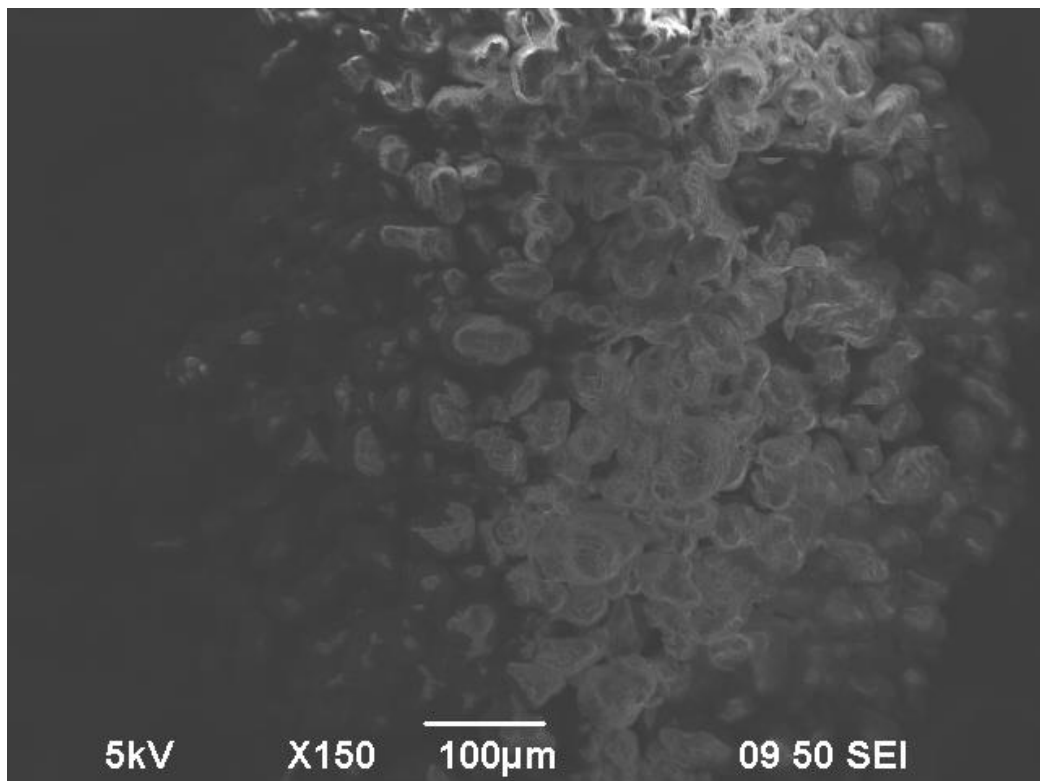


Σχήμα 5.78: Μεγέθυνση x100 πάνω σε δύο διαφορετικές περιοχές του δημιουργημένου δείγματος με πρόωση $F = 0.9 \text{ mm/s}$. Η παρουσία των λαιμών πυροσσωμάτωσης μεταξύ των κόκκων είναι εμφανής.

- Δείγμα με $F = 1.0 \text{ mm/s}$

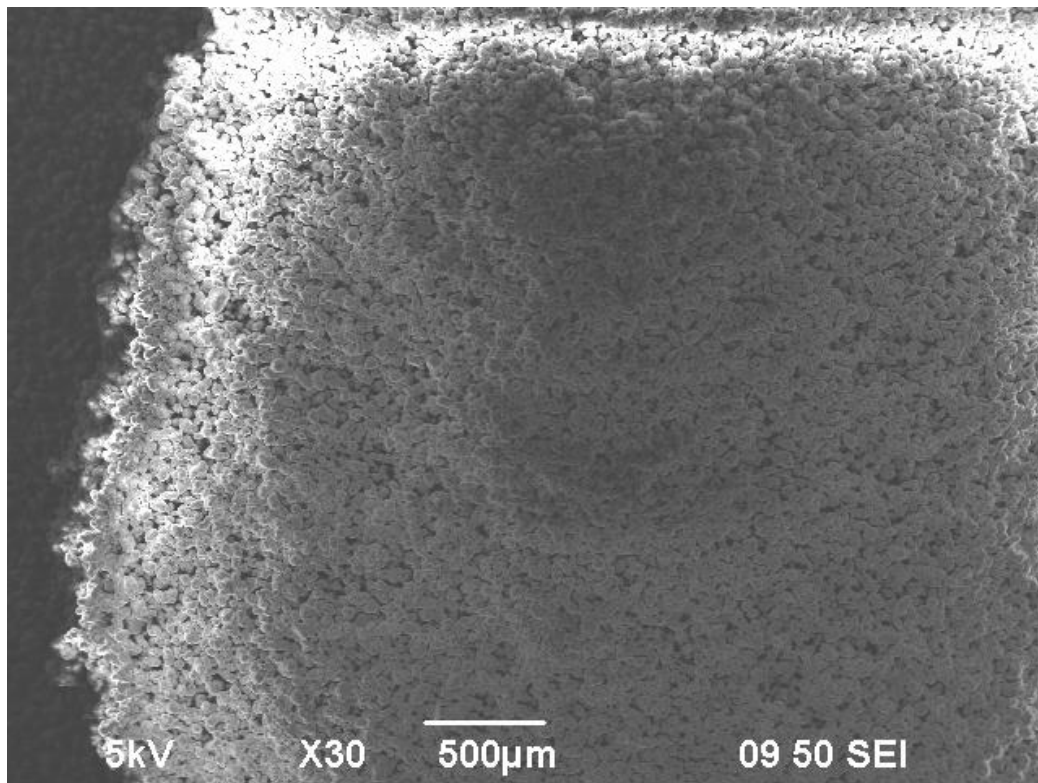


Σχήμα 5.79: Μεγέθυνση x150 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 1.0 \text{ mm/s}$. Οι κόκκοι είναι πυροσυσσωματωμένοι, αλλά οι βασικές διαστάσεις D και r των λαμών είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα να μην φαίνονται. Τα δείγματα τέτοιας πρόωσης είναι εξαιρετικά εύθραυστα λόγω των μικρών διαστάσεων των λαμών των κόκκων.

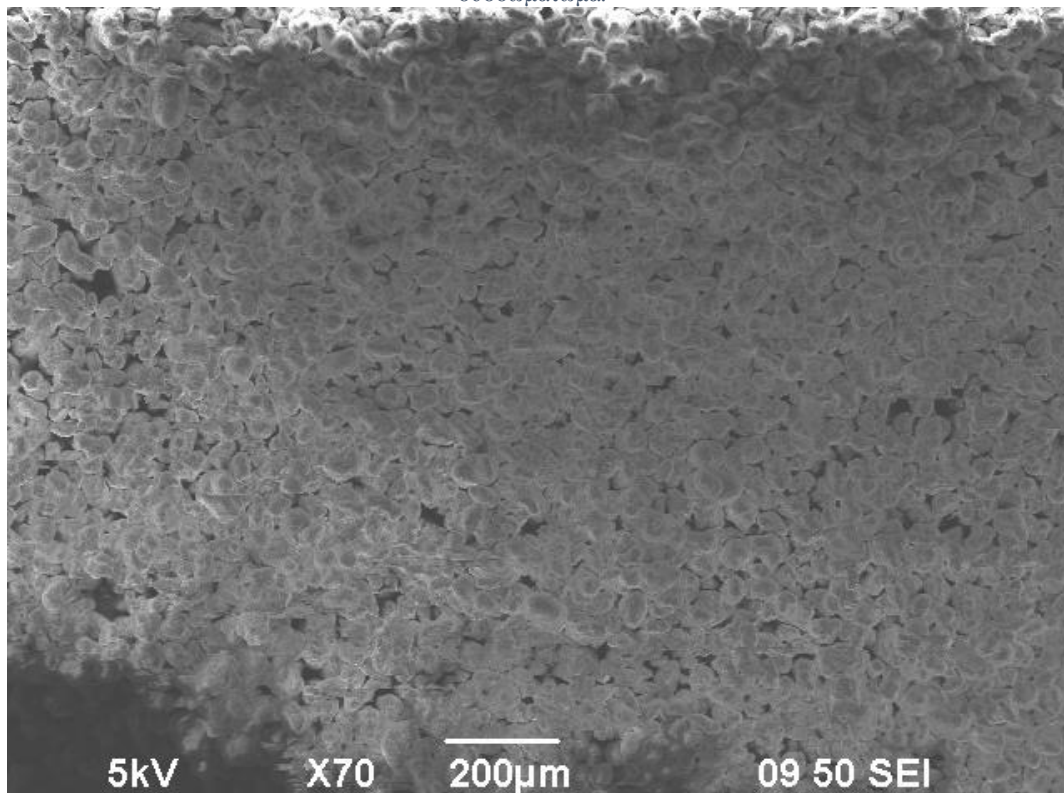


Σχήμα 5.80: Μεγέθυνση x150 πάνω στο δημιουργημένο δείγμα με πρόωση $F = 1.0 \text{ mm/s}$. Παρατηρούνται οι μικρές διαστάσεις του λαμού πυροσυσσωμάτωσης μεταξύ των κόκκων της σκόνης.

- Δείγμα σκόνης



Σχήμα 5.81: Μεγέθυνση x30 πάνω σε δείγμα σκόνης Duraform PA. Οι κόκκοι της σκόνης είναι συμπιεσμένοι σε ειδικό δοχείο τοποθέτησης για να μην μετακινούνται από τα ηλεκτρόνια του SEM. Η μορφή που έχουν πάρει στο δοχείο τοποθέτησης λόγω της επιβαλλόμενης πίεσης μοιάζει με συσσωμάτωμα.



Σχήμα 5.82: Μεγέθυνση x150 πάνω σε δείγμα σκόνης Duraform PA. Οι κόκκοι λόγω της συμπίεσης μέσα στο δοχείο παρατήρησης για το SEM έχουν κάνει ένα ασθενές συσσωμάτωμα. Η εικόνα τους αυτή συγκρινόμενη με την εικόνα τους σαν πυροσυσσωμάτωμα σε υψηλές ταχύτητες δέσμης Laser FE[0.9,∞) δείχνει και την ευθραυστότητα των δειγμάτων αυτών.

5.2.2.3 Πειράματα Μορφολογίας – Πρόωσης

Από τις προηγούμενες σειρές πειραμάτων, γνωρίζουμε πλέον πως η δέσμη laser είτε σε στατική είτε σε κινητή λειτουργία έχει την δυνατότητα να αναπτύσσει κατάλληλες θερμοκρασίες και να δημιουργεί στερεά προϊόντα από την σκόνη Duraform PA που βρίσκεται στον θάλαμο της μηχανής. Μάλιστα, τα προϊόντα αυτά είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της πυροσυσσωμάτωσης μεταξύ των κόκκων της σκόνης αν επιλεγεί σωστή ταχύτητα κίνησης για το laser. Με βάση όλες τις παρατηρήσεις των παραπάνω πειραμάτων, προχωρήσαμε στην τελευταία σειρά πειραμάτων που αφορούσε την δημιουργία επιφανειών βασικών σχημάτων για διάφορες τιμές πρόωσης της κεφαλής laser. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στην πολυδιάστατη κίνηση του laser όταν αυτό δημιουργεί επιφάνειες στρώσεων βασικών σχημάτων.

Για αυτή την σειρά πειραμάτων επιλέχθηκαν σαν επιφάνειες σχημάτων δημιουργίας οι επιφάνειες του κυκλικού δίσκου και του παραλληλόγραμμου. Επιλέχθηκαν αυτές οι γεωμετρίες γιατί συνδύαζαν την ύπαρξη καμπύλων και γωνιών. Η διαδικασία παραγωγής του G-κώδικα για την υλοποίηση των κινήσεων από τον ελεγκτή της μηχανής και τη δημιουργία των επιφανειών, έγινε με βάση τα βήματα για την χρήση της μηχανής του Κεφαλαίου 4. Ίδιες επιφάνειες δημιουργήθηκαν με διαφορετικές τιμές πρόωσης για το laser και τα αποτελέσματα τους αξιολογήθηκαν ως προς την μορφολογία τους: ακρίβεια διαστάσεων και ομοιομορφία επιφάνειας. Για την δημιουργία του κυκλικού δίσκου επιλέχθηκε διάμετρος 30 mm ενώ για το παραλληλόγραμμο διατομή 50x30 mm. Τέλος, η διαδικασία της κατασκευής των επιφανειών χρονομετρήθηκε.

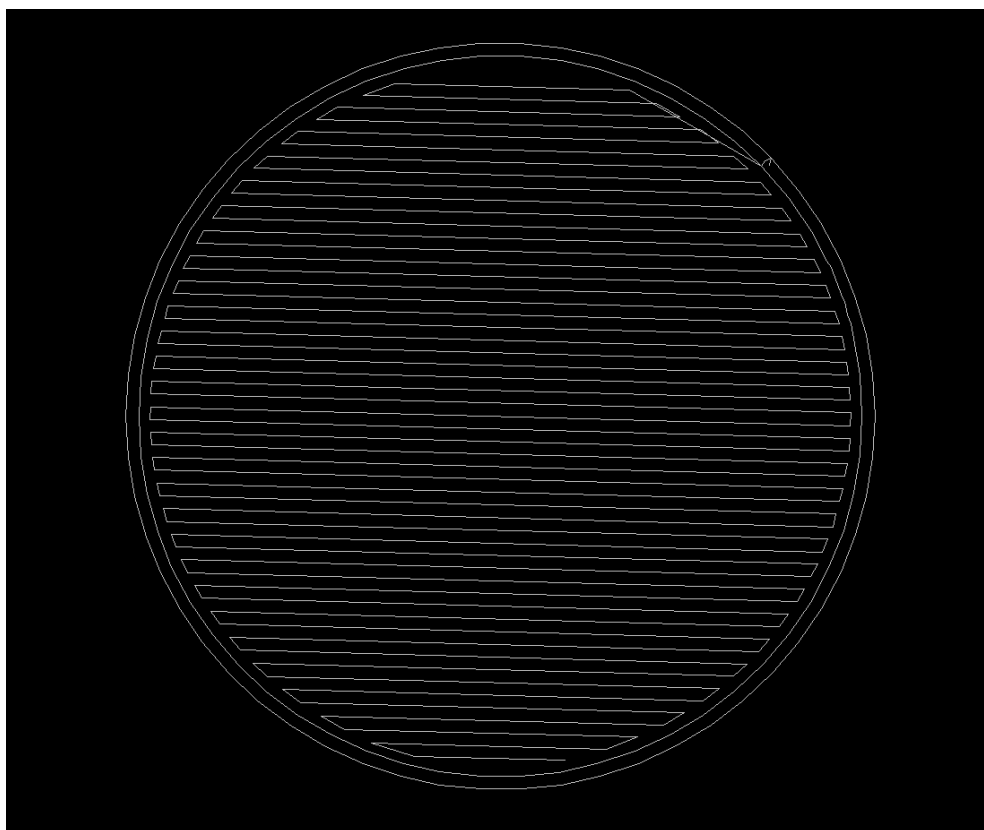
Γεωμετρία Κυκλικού Δίσκου

Ορισμένα από τα προϊόντα που δημιουργήθηκαν φαίνονται στην εικόνα του Σχήματος 5.83.



Σχήμα 5.83: Δημιουργία στερεών προϊόντων κυκλικής γεωμετρίας για διάφορες τιμές πρόωσης.

Πριν ξεκινήσουμε να περιγράψουμε την διαδικασία των πειραμάτων αξίζει να αναφερθούμε στις τροχιές της κεφαλής laser για την δημιουργία κυκλικού δίσκου που παρουσιάζονται στην εικόνα του Σχήματος 5.84. Από την εικόνα βλέπουμε πως η κεφαλή αρχικά δημιουργεί την κυκλική περιφέρεια του δίσκου και στην συνέχεια εισέρχεται εσωτερικά και γεμίζει την επιφάνεια με παλινδρομικές κινήσεις εντός του δίσκου.



Σχήμα 5.84: Η τροχιά κίνησης της κεφαλής laser για την δημιουργία της επιφάνειας κυκλικού δίσκου.

Η σειρά των πειραμάτων άρχισε με την εισαγωγή στον ελεγκτή της μηχανής του G-κώδικα για την δημιουργία του κυκλικού δίσκου με διάμετρο 30 mm και με πρόωση 0.1 mm/s. Η διαδικασία δεν ολοκληρώθηκε αφού μετά από περίπου 2 h κατεργασίας παρατηρήθηκε έντονη παραμόρφωση *shrinking* όταν το laser άρχισε να πραγματοποιεί τροχιές εντός του κυκλικού δίσκου. Η εικόνα του προϊόντος για $F = 0.1$ mm/s στο Σχήμα 5.83 είναι χαρακτηριστική: στο κάτω ημικύκλιο του προϊόντος παρατηρούμε την σωστή δημιουργία της κυκλικής περιφέρειας από την δέσμη laser, αλλά στο άνω ημικύκλιο βλέπουμε ένα παραμορφωμένο προϊόν. Η παραμόρφωση έχει γίνει γιατί η επιφάνεια του κυκλικού δίσκου που έχει δημιουργηθεί από το laser έχει συρρικνωθεί λόγω έντονου θερμοκρασιακού gradient με αποτέλεσμα να χάνεται η καμπυλότητα που θα περιμέναμε. Αυτή η συρρίκνωση ονομάζεται *shrinking*. Σε περίπτωση που αφήναμε την κατεργασία να συνεχιστεί θα παίρναμε ένα συρρικνωμένο προϊόν που θα απείχε πολύ από την γεωμετρία του κυκλικού δίσκου.

Γι' αυτό τον λόγο αυξήσαμε την πρόωση στην τιμή $F = 0.5$ mm/s και επαναλάβαμε την διαδικασία. Στην εικόνα του προϊόντος για $F = 0.5$ mm/s του σχήματος 5.83 παρατηρούμε και πάλι το φαινόμενο του θερμικού *shrinking* λόγω της ύπαρξης έντονου θερμοκρασιακού gradient. Το αποτέλεσμα είναι ένα δύσμορφο προϊόν με τις διαστάσεις της περιφέρειάς του να κυμαίνονται από 23 – 30 mm. Η μέγιστη διάσταση του παρουσιάζεται στον άξονα της παλινδρομικής κίνησης που πραγματοποιεί το laser κατά το γέμισμα της επιφάνειας (*infill*) που

εξηγεί και τον μηχανισμό συρρίκνωσής του, λόγω του θερμοκρασιακού gradient. Η εικόνα του Σχήματος 5.85 παρουσιάζει το προϊόν αμέσως μετά το τέλος της κατεργασίας. Τέλος, παρατηρήθηκε μια πολύ μικρή καμπύλωση του προϊόντος (curling) στον άξονα z.



Σχήμα 5.85: Δημιουργία κυκλικού δίσκου για $F = 0.5 \text{ mm/s}$

Στην συνέχεια αυξήσαμε την πρόωση στην τιμή $F = 0.8 \text{ mm/s}$. Το αποτέλεσμα που πήραμε είναι αρκετά πιο ομοιόμορφο σε σχέση με τα προηγούμενα, παρόλα αυτά το φαινόμενο της παραμόρφωσης λόγω απότομου θερμοκρασιακού gradient συνεχίζει να υπάρχει. Πιο συγκεκριμένα, οι ακραίες διαστάσεις περιφέρειας του προϊόντος κυμαίνονταν από 27 – 29 mm, ενώ δεν παρουσίαζε curling (βλ. εικόνα Σχήματος 5.86).



Σχήμα 5.86: Δημιουργία κυκλικού δίσκου για $F = 0.8 \text{ mm/s}$

Μετέπειτα αυξήσαμε περαιτέρω την πρόωση στην τιμή $F = 0.9 \text{ mm/s}$. Το αποτέλεσμα βγήκε σχεδόν κυκλικό με μικρές παραμορφώσεις shrinking και καθόλου curling. Οι διαστάσεις περιφέρειας του κυμαίνονταν από 28 – 29 mm.



Σχήμα 5.87: Κυκλικός δίσκος με $F = 0.5 \text{ mm/s}$ (αριστερά) και $F = 0.9 \text{ mm/s}$ (δεξιά). Η διαφορά στην μορφολογία λόγω των παραμορφώσεων είναι εμφανής.

Συνεχίσαμε την αύξηση της πρόωσης στην τιμή $F = 1.0 \text{ mm/s}$. Οι παραμορφώσεις λόγω shrinking παρέμειναν στα ίδια επίπεδα με πριν, αφού οι διαστάσεις περιφέρειας που μετρήθηκαν κυμαίνονταν από 28 – 29 mm. Το προϊόν όμως δεν ήταν ομοιόμορφο αφού παρουσίαζε κενά μεταξύ των περασμάτων infill του laser.

Τέλος ανεβάσαμε την τιμή της πρόωσης σε $F = 1.4 \text{ mm/s}$. Το αποτέλεσμα είχε ελάχιστη παραμόρφωση αφού οι ακραίες διαστάσεις του κυμαίνονταν από 29 – 30 mm. Παρόλα αυτά ήταν εξαιρετικά εύθραυστο και με δυσκολία απομακρύνθηκε από το τραπέζι κατασκευής (βλ. εικόνα Σχήματος 5.88).

Από τα παραπάνω, η βέλτιστη τιμή πρόωσης για βέλτιστη μορφολογία (ακρίβεια διαστάσεων και ομοιογένεια επιφάνειας) είναι η τιμή $F = 0.9 \text{ mm/s}$.

Οι χρόνοι κατασκευής των κυκλικών δίσκων διατομής περίπου 707 mm^2 από την μηχανή κυμαίνονταν από 36 min για την πιο γρήγορη ρύθμιση πρόωσης ($F = 1.4 \text{ mm/s}$) έως 8 h και 24 min αν είχαμε αφήσει την κατεργασία για $F = 0.1 \text{ mm/s}$ να ολοκληρωθεί. Στην βέλτιστη πρόωση, ο χρόνος κατεργασίας μετρήθηκε στα 63 min. Αυτό σημαίνει πως για την κατασκευή ενός κυλίνδρου ύψους 1 cm στην τιμή βέλτιστης πρόωσης θα χρειαζόμασταν περίπου 10 h και

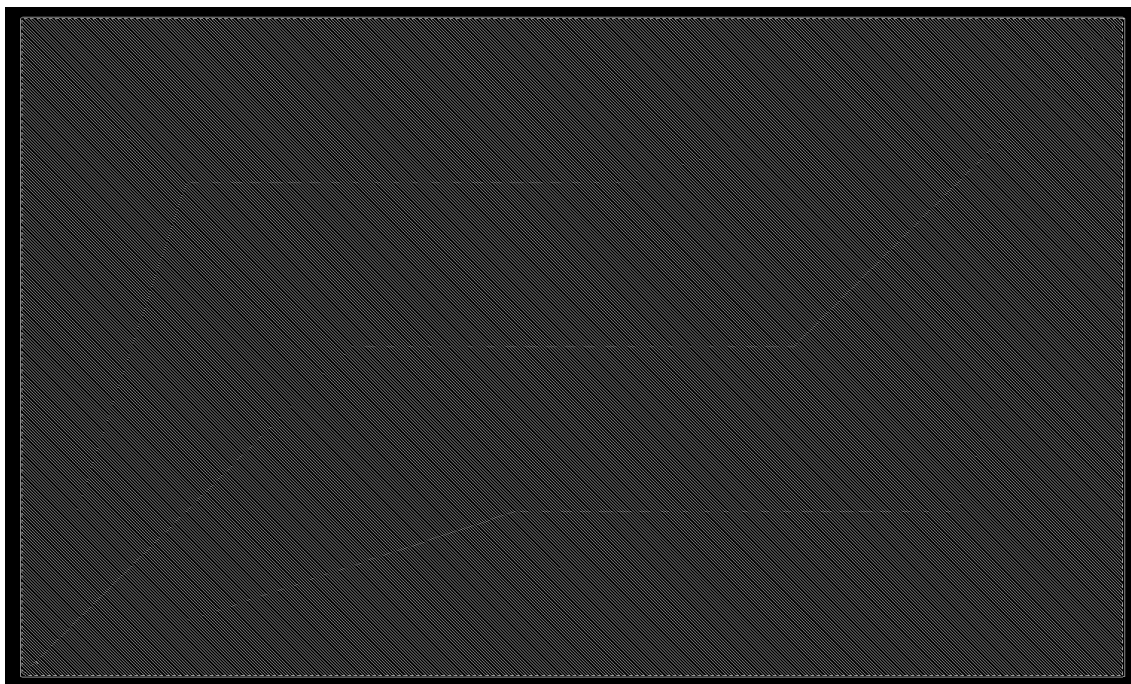
30 min κατεργασίας. Αυτό σημαίνει πως η μηχανή στην μέγιστη τιμή ισχύος για το laser είναι εξαιρετικά αργή.



Σχήμα 5.88: Δημιουργία κυκλικού δίσκου για $F = 1.4 \text{ mm/s}$.

Γεωμετρία Παραλληλόγραμμου.

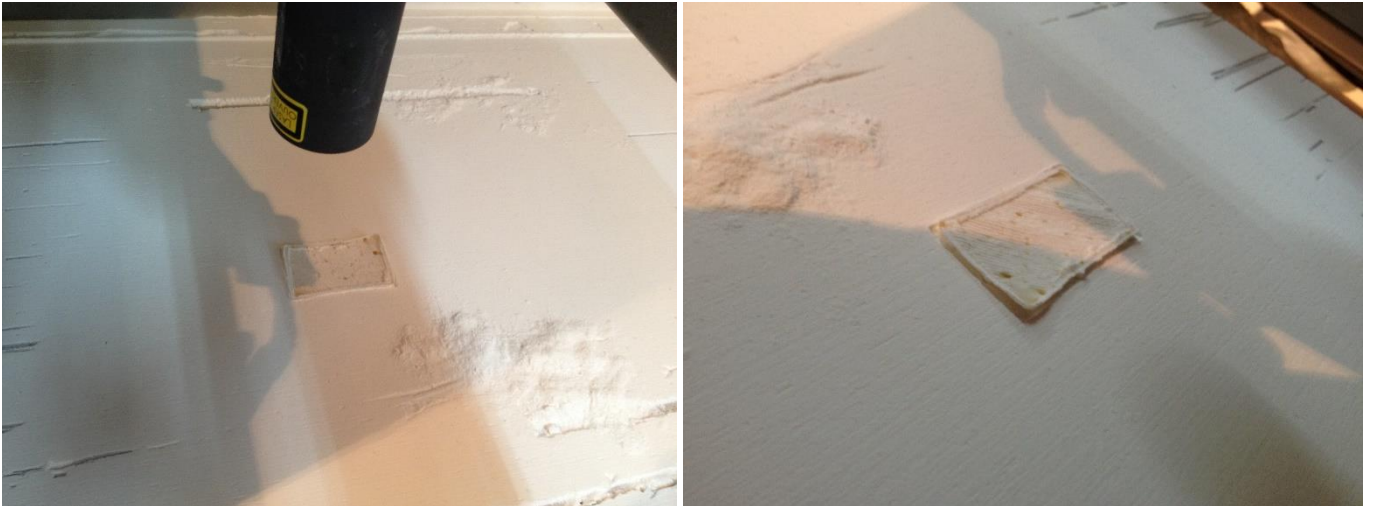
Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων, αξίζει να παρουσιάσουμε τις τροχιές της κεφαλής laser για την δημιουργία μιας επιφάνειας ενός παραλληλόγραμμου. Από την εικόνα του Σχήματος 5.89, παρατηρούμε πως η δέσμη laser αρχικά δημιουργεί την περιφέρεια



Σχήμα 5.89: Τροχιές της κεφαλής laser για την δημιουργία επιφάνειας παραλληλογράμμου.

του παραλληλογράμμου και στην συνέχεια από την άνω δεξιά γωνία προχωράει στο γέμισμα της επιφάνειας μέχρι να φτάσει στην κάτω αριστερή γωνία για να τερματιστεί η κατεργασία.

Γνωρίζοντας από πριν πως η βέλτιστη πρόωση, όσο αφορά την μορφολογία του κυκλικού δίσκου, είναι η $F = 0.9 \text{ mm/s}$, εισαγάγαμε αυτή την τιμή για την δημιουργία της επιφάνειας του παραλληλογράμμου. Το αποτέλεσμα που φαίνεται στην εικόνα του Σχήματος 5.90 παρουσίαζε ακρίβεια διαστάσεων και ομοιογένεια, χωρίς κενά στην επιφάνεια του. Παρόλα αυτά εμφάνιζε παραμόρφωση curling στις γωνίες του με την μέγιστη ανύψωση γωνίας να μετριέται στα 3.5 mm.



Σχήμα 5.90: Δημιουργημένη επιφάνεια παραλληλογράμμου με $F = 0.9 \text{ mm/s}$. Παρουσιάζεται ανύψωση του τεμαχίου από την τράπεζα της σκόνης λόγω curling (δεξιά εικόνα).

Για πληρότητα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με μειωμένη και αυξημένη τιμή πρόωσης και τα προϊόντα παρουσίαζαν την ίδια συμπεριφορά με την γεωμετρία του κυκλικού δίσκου, δηλαδή υψηλές παραμορφώσεις (shrinking και curling) για μικρές τιμές πρόωσης και εξαιρετική ευθραυστότητα για μεγάλες τιμές πρόωσης. Η ύπαρξη γωνιών στην γεωμετρία κατασκευής προκαλούσε περισσότερο curling παρά shrinking σε αντίθεση με την κυκλική διατομή που η ύπαρξη καμπυλών ενίσχυε την εμφάνιση του shrinking έναντι του curling.

Η κατεργασία για διατομή παραλληλογράμμου στην βέλτιστη τιμή πρόωσης όσο αφορά την μορφολογία, $F = 0.9 \text{ mm/s}$, χρονομετρήθηκε στη 1h και 27 min.

6

Μελέτη βελτιώσεων και διόρθωση παραλείψεων

Σε αυτό το Κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η μελέτη και η υλοποίηση των βασικών βελτιώσεων και παραλείψεων στο σύστημα της μηχανής του εργαστηρίου.

6.1 Βελτιώσεις

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων διερεύνησης λειτουργικότητας που παρουσιάστηκαν, εντοπίστηκαν τρεις βασικές απαραίτητες βελτιώσεις στο σύστημα της μηχανής:

1. Μείωση της διαμέτρου της δέσμης laser
2. Προθέρμανση σκόνης
3. Μέτρηση και ρύθμιση της παραλληλίας του roller και του powder bed

Οι βελτιώσεις 1 και 2 μελετήθηκαν με σκοπό την μελλοντική υλοποίησή τους. Ενώ η βελτίωση 3 υλοποιήθηκε πάνω στην μηχανή.

6.1.1 Μείωση της διαμέτρου της δέσμης laser

Όπως αναφέρθηκε στα πειράματα κινούμενης κεφαλής laser στο Κεφάλαιο 5, για την παραγωγή στερεών προϊόντων σκόνης παρουσιάστηκε μια μέγιστη τιμή πρόωσης πάνω από την οποία η δέσμη laser δεν μπορούσε να δημιουργήσει στερεή μάζα προϊόντος από την σκόνη. Η κρίσιμη αυτή τιμή πρόωσης ήταν η $F = 1.4 \text{ mm/s}$. Στην συνέχεια στα πειράματα Μορφολογίας – Πρόωσης έγινε αναφορά στους χρόνους κατασκευής διατομών κάποιων βασικών σχημάτων, όπου ο ελάχιστος χρόνος κατασκευής μιας στρώσης πάχους περίπου 0.5 mm (για μέγιστη πρόωση $F = 1.4 \text{ mm/s}$), με επιφάνεια στρώσης κυκλικής διατομής 707 mm^2 ήταν περίπου 36 min . Να υπενθυμίσουμε επίσης πως οι παραπάνω παρατηρήσεις αφορούσαν

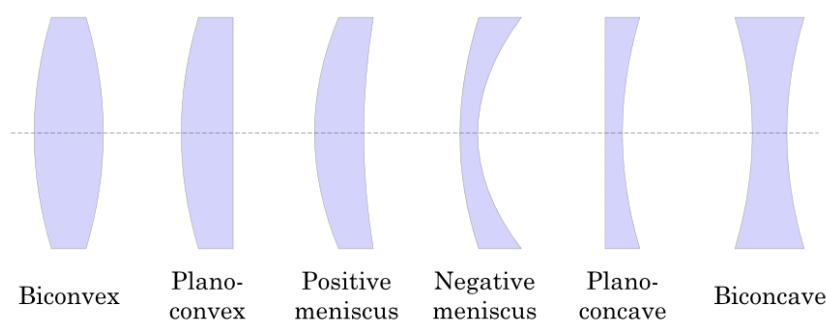
στην μέγιστη ρύθμιση μέσης ισχύος για την δέσμη laser, τα 20 W. Επομένως καταλαβαίνουμε πως οι ταχύτητες κατεργασίας που μπορούν να επιτευχθούν από το σύστημα της μηχανής με την υπάρχουσα κατάσταση του είναι εξαιρετικά χαμηλές. Η αιτία αυτού του φαινομένου εντοπίστηκε στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης laser και πιο συγκεκριμένα στην διάμετρό της. Στην παρουσίαση του συστήματος laser Ylia M20 στο Κεφάλαιο 2 είχαμε αναφέρει πως η τελική διάμετρος δέσμης που θερμαίνει την σκόνη είναι 8 mm. Πιο συγκεκριμένα, η δέσμη laser εξερχόμενη από τον beam expander με διάμετρο 9 mm συγκεντρώνεται μέσω ενός bi-convex φακού στα 8 mm σε απόσταση 100 mm από το τελικό σημείο εξόδου της κεφαλής laser. Για την βελτίωση της ταχύτητας κατεργασίας της μηχανής κρίθηκε απαραίτητη η αντικατάσταση αυτού του φακού με κάποιον άλλον που θα μπορούσε να μειώνει την δέσμη laser σε διάμετρο μικρότερη του 1 mm στην ίδια απόσταση με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης και επομένως η συνολική ταχύτητα κατεργασίας. Στην συνέχεια της ενότητας αυτής, θα γίνει μια εισαγωγή στους φακούς και στα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους και θα παρουσιαστεί η πρόταση αντικατάστασης για το σύστημα laser του εργαστηρίου.

6.1.1.1 Εισαγωγή στους φακούς των laser

Σαν φακό ορίζουμε ένα σώμα διαφανές που περιορίζεται από τουλάχιστον δύο διαθλαστικές επιφάνειες που ονομάζονται δίοπτρα. Οι φακοί αποτελούν ένα οπτικό σύστημα διαχείρισης του φωτός (όχι μόνο του ορατού φάσματος) βασιζόμενοι στο φαινόμενο της διάθλασης.

Οι φακοί διακρίνονται στις παρακάτω βασικές γεωμετρικές μορφές:

- Αμφίκυρτοι (Bi-convex)
- Επιπεδόκυρτοι (Plano-Convex)
- Κοιλόκυρτοι (Positive meniscus)
- Αμφίκοιλοι (Bi-concave)
- Επιπεδόκοιλοι (Plano-concave)
- Κοιλόκυρτοι (Negative meniscus)

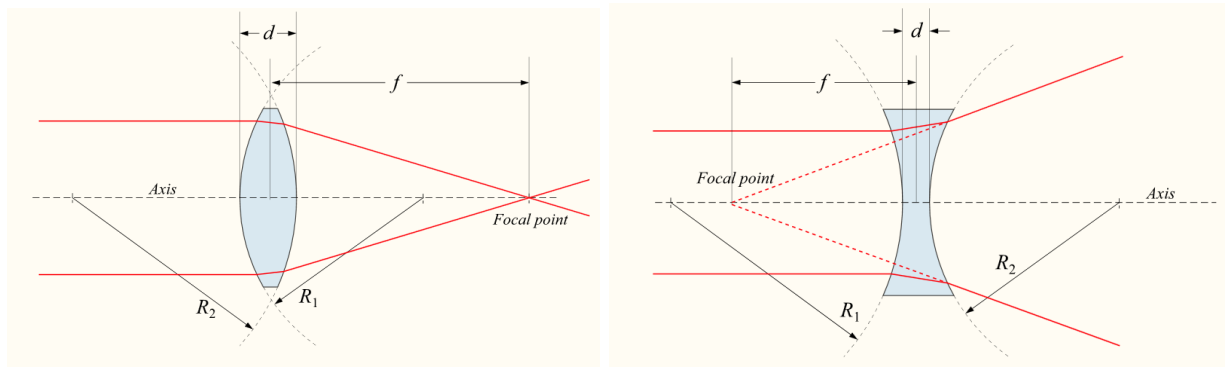


Σχήμα 6.1: Βασικές γεωμετρικές μορφές φακών.

Μπορούν επίσης να χωριστούν με βάση τον μηχανισμό εκτροπής του φωτός που διέρχεται μέσα από αυτούς σε:

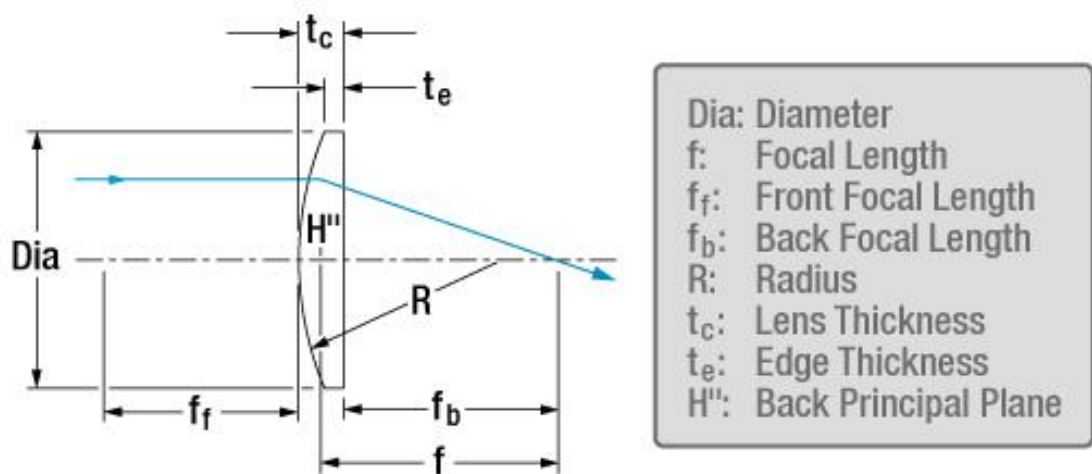
- Συγκλίνοντες: προκαλούν σύγκλιση σε μια παράλληλη εισερχόμενη δέσμη φωτός. Τέτοιοι φακοί έχουν γεωμετρική μορφή Plano-Convex, Bi-Convex και Positive meniscus.
- Αποκλίνοντες: προκαλούν απόκλιση σε μια παράλληλη εισερχόμενη δέσμη φωτός. Τέτοιοι φακοί έχουν γεωμετρική μορφή Plano-Concave, Bi-Concave και Negative meniscus.

Οι βασικοί μηχανισμοί εκτροπής του φωτός από ένα συγκλίνον και ένα αποκλίνον φακό παρουσιάζονται στην εικόνα του Σχήματος 6.2.



Σχήμα 6.2: Μηχανισμοί εκτροπής σύγκλισης (αριστερά) και απόκλισης (δεξιά) δέσμης φωτός.

Τέλος, τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός φακού παρουσιάζονται στην εικόνα του Σχήματος 6.3.



Σχήμα 6.3: Βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός φακού.

Οι φακοί που προορίζονται για οπτικές διατάξεις laser που εκπέμπουν ακτινοβολία κοντά στο υπέρυθρο (με περίπου 1μm μήκος κύματος) συνήθως κατασκευάζονται από N-BK7, δηλαδή βοριοπυριτικό γυαλί. Το βοριοπυριτικό γυαλί είναι κατάλληλο σαν οπτικό υλικό λόγω της αξιοσημείωτης ομοιογένειας και της καθαρότητας της δομής του, ενώ λόγω της σκληρότητάς του παρουσιάζει αντοχή σε γρατζουνιές. Το εύρος μήκους κύματος ακτινοβολίας που μπορεί να διαχειριστεί είναι 380 – 2100nm.

6.1.1.2 Επιλογή φακών με βάση το σύστημα laser

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά αντοχής και ποιότητας που πρέπει να μελετούνται για την επιλογή ενός φακού με βάση το σύστημα laser που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί:

- **Ποιότητα επιφάνειας (Surface Quality)**

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μονάδα περιγραφής της ποιότητας επιφάνειας ενός φακού είναι οι αριθμοί scratch-dig. Οι ατέλειες επιφάνειας του φακού συνήθως περιγράφονται με δύο αριθμούς, όπως «20-10», «60-40» ή «80-50». Ο πρώτος αριθμός υποδεικνύει το μέγιστο πάχος scratch που υπάρχει πάνω στην επιφάνεια σε μm, ενώ ο δεύτερος αριθμός αφορά την μέγιστη διάμετρο για ένα εντοπισμένο dig στην επιφάνεια του φακού σε εκατοστά του mm. Σαν scratch εννοούμε τις τυχόν γρατζουνιές που υπάρχουν στην επιφάνεια του φακού, ενώ σαν dig ορίζουμε τα λακκάκια που μπορούν να εντοπιστούν στον φακό. Στον πίνακα του Σχήματος 6.4 παρουσιάζεται μια ταξινόμηση της ποιότητας επιφάνειας των φακών με βάση την χρήση τους.

Scratch-Dig	Quality	Applications
80-50	Very Low	Acceptable quality, can be easily fabricated
60-40	Low	Commercial quality, used for non-critical low power laser and imaging applications, where scattered light is not as important as cost.
40-20	Moderate	Standard scientific research applications for low to moderate power laser or imaging, which tolerate little scattered light.
20-10	High	Precision quality, minimum standard for laser mirrors and extra-cavity optics used in moderate to high power laser. Minimizing scattered light.
10-5	Very High	High precision quality, used for the most demanding applications such as intra-cavity laser optics or high power applications.

Σχήμα 6.4: Ταξινόμηση της ποιότητας επιφάνειας των φακών με βάση την χρήση τους.

- **Laser induced damage threshold (LIDT)**

Το φαινόμενο καταστροφής ενός φακού από την ενέργεια δέσμης του συστήματος laser στο οποίο χρησιμοποιείται ονομάζεται laser induced damage phenomenon. Η κρίσιμη τιμή ενέργειας πάνω από την οποία η δέσμη laser καταστρέφει το εξάρτημα του φακού ονομάζεται laser induced damage threshold. Η LIDT για ένα οπτικό εξάρτημα εξαρτάται άμεσα από τον τύπο laser που χρησιμοποιούμε. Τα CW laser συνήθως καταστρέφουν ένα φακό λόγω έντονων φαινομένων απορρόφησης ενέργειας που μπορεί να οδηγήσει στο λιώσιμο του φακού ή της επίστρωσης του. Αντίθετα, τα pulsed laser συνήθως απομακρύνουν ηλεκτρόνια από την δομή του οπτικού πριν το οδηγήσουν σε θερμική καταστροφή. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε πως μεγάλες διαφορές στην θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται το σύστημα laser και ο φακός μπορούν να μεταβάλλουν την τιμή του LIDT. Επίσης, τυχόν σκόνη ή άλλα σωματίδια πάνω στην επιφάνεια του φακού μπορεί να μικρύνουν την τιμή LIDT. Γι' αυτό τον λόγο προτείνεται πάντα ο προσεκτικός καθαρισμός των φακών.

CW laser

Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να ενταχθούν και pulsed laser με υψηλή συχνότητα επανάληψης παλμών. Για τέτοια συστήματα η μέση και μέγιστη ισχύ παλμού της δέσμης laser πρέπει να συγκριθεί με το αντίστοιχο CW laser.

Για τον έλεγχο LIDT ενός φακού για CW laser πρέπει να γνωρίζουμε τα ακόλουθα:

1. Μήκος κύματος ακτινοβολίας της δέσμης laser
2. Διάμετρο δέσμης ($1/e^2$)
3. Προφίλ πυκνότητας ενέργειας δέσμης (συνήθως Gaussian)
4. Linear Power density (συνολική ισχύς διαιρεμένη με την διάμετρο της δέσμης)

Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση της μέγιστης τιμής power density του laser με αυτή του εξαρτήματος του φακού που δίνει ο κατασκευαστής. Αν ο φακός έχει δοκιμαστεί με δέσμη διαφορετικού μήκους κύματος σε σχέση με το σύστημα laser που έχουμε, τότε η τιμή LIDT που βρίσκουμε πρέπει να κλιμακωθεί αναλόγως. Ένας καλός κανόνας είναι πως η τιμή LIDT έχει γραμμική σχέση με το μήκος κύματος, έτσι ώστε όσο κινούμαστε προς μικρότερα μήκη κύματος, η τιμή LIDT να αυξάνει. Για παράδειγμα, τιμή LIDT 10 W/cm στα 1310 nm μειώνεται σε 5 W/cm στα 655 nm.

$$\text{Adjusted LIDT} = \text{LIDT Power} \left(\frac{\text{Your Wavelength}}{\text{LIDT Wavelength}} \right)$$

Ο κανόνας αυτός πρέπει πάντα να επιβεβαιώνεται από τον κατασκευαστή του φακού.

Pulsed laser

Για τον έλεγχο LIDT ενός φακού για pulsed laser πρέπει να γνωρίζουμε τα ακόλουθα:

1. Μήκος κύματος ακτινοβολίας της δέσμης laser
2. Διάμετρο δέσμης ($1/e^2$)
3. Προφίλ πυκνότητας ενέργειας δέσμης (συνήθως Gaussian)
4. Συνολική πυκνότητα ενέργειας (συνολική ισχύς διαιρεμένη με την επιφάνεια της δέσμης laser)
5. Συχνότητα επανάληψης παλμών
6. Διάρκεια παλμού δέσμης laser

Η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης πρέπει να υπολογίζεται σε μονάδες J/cm^2 . Τώρα πρέπει να γίνει σύγκριση της μέγιστης πυκνότητας ενέργειας του συστήματος laser που χρησιμοποιούμε με την τιμή LIDT που μας δίνει ο κατασκευαστής του φακού. Αν ο φακός έχει δοκιμαστεί σε μήκος κύματος διαφορετικό από αυτό της δέσμης laser που έχουμε, τότε πρέπει να γίνει προσαρμογή της τιμής που βρήκαμε. Ένας καλός κανόνας είναι πως η LIDT είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα του μήκους κύματος, έτσι ώστε όσο πλησιάζουμε μικρότερη μήκη κύματος, τόσο αυξάνεται η LIDT. Για παράδειγμα τιμή LIDT $1 J/cm^2$ στα 1064 nm αντιστοιχεί σε $0.7 J/cm^2$ στα 532 nm.

$$Adjusted\ LIDT = LIDT\ Energy \sqrt{\frac{Your\ Wavelength}{LIDT\ Wavelength}}$$

Στο επόμενο βήμα πρέπει να προσαρμόσουμε την τιμή LIDT που βρήκαμε από την παραπάνω σχέση με βάση την διάρκεια παλμού δέσμης. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια παλμού, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που πρέπει να διαχειριστεί ο φακός. Για παλμούς μεταξύ 1 – 100 ns, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$Adjusted\ LIDT = LIDT\ Energy \sqrt{\frac{Your\ Pulse\ Length}{LIDT\ Pulse\ Length}}$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την σχέση, μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή LIDT για τον φακό που μας ενδιαφέρει προσαρμοσμένη στην διάρκεια παλμού του συστήματος laser που έχουμε. Αν η μέγιστη τιμή πυκνότητας ενέργειας του συστήματος laser που έχουμε είναι μικρότερη από την adjusted LIDT τιμή που υπολογίσαμε, τότε ο φακός δεν θα καταστραφεί. Σημειώνουμε πως οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για παλμούς διάρκειας μεταξύ 10^{-9} s έως 10^{-7} s. Για παλμούς μεταξύ 10^{-7} s και 10^{-4} s, πρέπει να γίνουν επίσης οι υπολογισμοί που παρουσιάστηκαν για CW laser. Σε κάθε περίπτωση, οι παραπάνω διαδικασίες πρέπει να ελέγχονται και από τον κατασκευαστή του φακού.

- **Surface Irregularity**

Μια μονάδα που χρησιμοποιείται για την έκφραση της ακρίβειας μιας επιφάνειας είναι η τιμή PV (peak-to-valley). Η τιμή PV συγκρίνει δύο τοπικά σημεία πάνω στην επιφάνεια, αγνοώντας την υπόλοιπη γεωμετρία της με σκοπό να βγάλουμε συμπεράσματα για την τραχύτητα της επιφάνειας του φακού. Ο υπολογισμός της είναι σχετικά γρήγορος και υλοποιείται οπτικά από το interferogram του φακού. Στον πίνακα του σχήματος 6.5 παρουσιάζεται μια ταξινόμηση της τιμής PV για το Surface Irregularity με βάση την χρήση του φακού.

Figure	Cost	Applications
$\lambda/2$	Low	Used where wavefront distortion is not as important as cost
$\lambda/4$	Moderate	Excellent for most general laser and imaging applications where low wavefront performance must be balanced with cost
$\lambda/8$	High	For laser and imaging applications requiring low wavefront distortion, especially in systems with multiple elements

Σχήμα 6.5: Ταξινόμηση της τιμής PV του Surface Irregularity μιας επιφάνειας ενός φακού σε σχέση με την χρήση του.

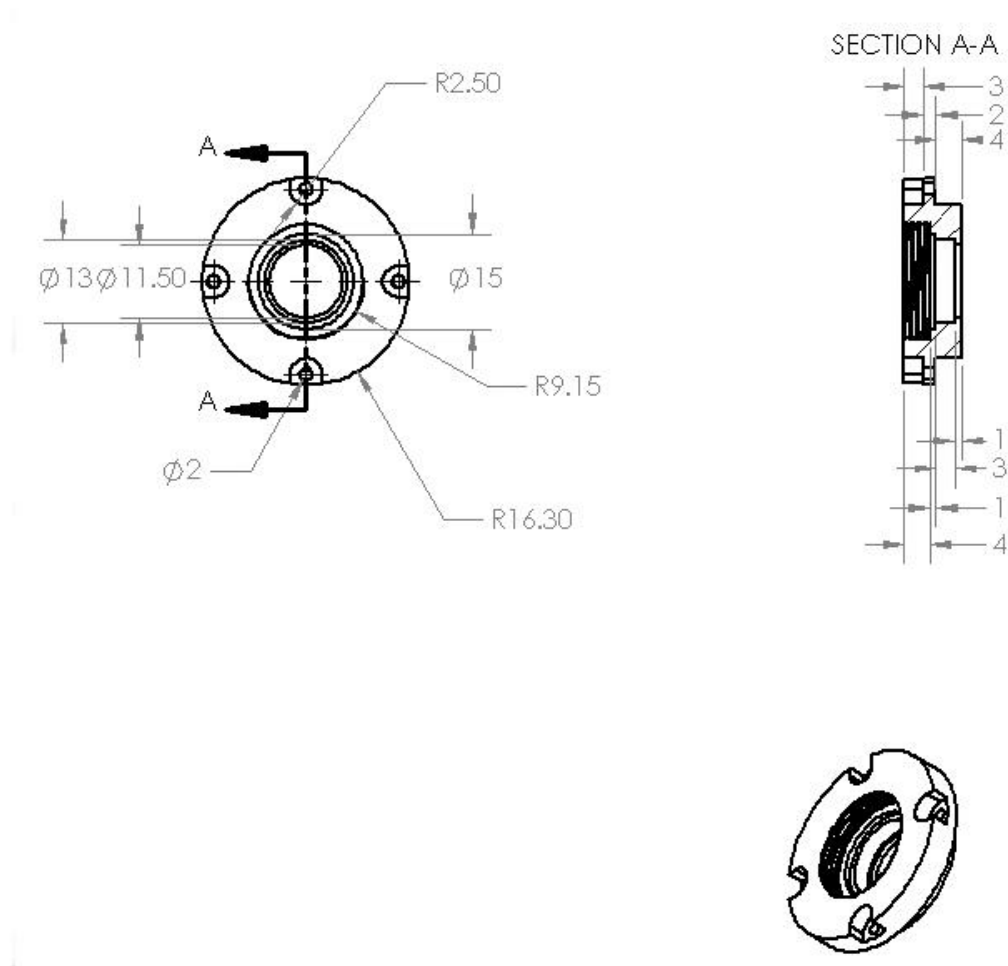
6.1.1.3 Φακός μείωσης διαμέτρου της δέσμης laser Ylia M20

Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται η αγορά φακού διαμέτρου 1/2" (12.7 mm) για την μείωση της διαμέτρου της δέσμης laser Ylia M20 σε διάμετρο μικρότερη του 1 mm και με εστιακή απόσταση 100 mm. Τα χαρακτηριστικά του φακού (μοντέλο LA1207-C) που βρέθηκε από την εταιρεία Thorlabs Inc. και προτείνεται προς αγορά παρουσιάζονται στον πίνακα του Σχήματος 6.6.

Common Specifications	
Lens Shape	Plano-Convex
Substrate Material	N-BK7 (Grade A) ^a
AR Coating Range	1050 - 1700 nm
Reflectance over Coating Range (Avg.)	<0.50%
Diameters Available	Ø1/2"
Diameter Tolerance	+0.00/-0.10 mm
Design Wavelength	587.6 nm
Index of Refraction @633 nm	1.515
Surface Quality	40-20 Scratch-Dig
Surface Flatness (Plano Side)	$\lambda/2$
Spherical Surface Power ^b (Convex Side)	$3\lambda/2$
Surface Irregularity (Peak to Valley)	$\lambda/4$
Damage Threshold ^c	7.5 J/cm ² (1542 nm, 10 ns, 10 Hz, Ø0.123 mm)
Abbe Number	$\nu_d = 64.17$
Centration	≤ 3 arcmin
Clear Aperture	90% of Diameter
Focal Length Tolerance	$\pm 1\%$

Σχήμα 6.6: Χαρακτηριστικά προτεινόμενου φακού για το σύστημα laser Ylia M20 της μηχανής του εργαστηρίου

Για την πρόσδεση του φακού στο σύστημα laser προτείνεται η δημιουργία από μηχανή φρέζας υψηλής ακρίβειας του εξαρτήματος του μηχανολογικού σχεδίου του Σχήματος 6.7. Το εξάρτημα αυτό έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το υπάρχον καπάκι που υπάρχει στην κεφαλή του laser και πάνω σε αυτό προτείνεται η συγκόλληση του παραπάνω φακού μείωσης της διαμέτρου της δέσμης laser. Τα χαρακτηριστικά του σπειρώματος προτείνεται να κατασκευαστούν έτσι ώστε να βιδώνεται δακτύλιος σύσφιξης 3/MEC/3750.



Σχήμα 6.7: Σχέδιο για την κατασκευή νέου καπακιού για την κεφαλή laser Ylia M20, με σκοπό την κόλληση του φακού μείωσης της διαμέτρου της δέσμης.

6.1.2 Προθέρμανση σκόνης

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, στα πειράματα Μορφολογίας – Πρόωσης, τα στερεά προϊόντα που δημιουργούσε η δέσμη laser από την σκόνη παρουσίαζαν παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις που εντοπίστηκαν ήταν δύο ειδών: shrinking και curling. Μάλιστα όσο μειωνόταν η πρόωση της κεφαλής laser τόσο πιο έντονο ήταν και το φαινόμενο της παραμόρφωσης που παρουσίαζαν τα προϊόντα. Ο λόγος που συνέβαινε αυτό ήταν η ύπαρξη απότομων μεταβολών στις τιμές θερμοκρασίας ανά περιοχή στο επίπεδο x-y της κατεργασίας λόγω της κίνησης του laser, δηλαδή με άλλα λόγια η ύπαρξη απότομου θερμοκρασιακού

gradient. Λόγω αυτού, τα προϊόντα δεν μπορούσαν να ανταπεξέλθουν στην απότομη θέρμανση και ψύξη τους ανά περιοχή λόγω της κίνησης του laser με αποτέλεσμα να παραμορφώνονται.

Για την εξάλειψη του φαινομένου των παραμορφώσεων προτείνεται η δημιουργία ενός συστήματος που να προθερμαίνει την σκόνη. Επειδή η σκόνη που έχουμε είναι σκόνη πολυμερούς, προτείνεται η προθέρμανση της στην θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως (T_g) του υλικού. Σε αυτή την θερμοκρασία, το υλικό της σκόνης από δύσμορφο και σκληρό μεταπίπτει στο να είναι εύκαμπτο και μαλακό και επομένως πιο ανεκτικό σε παραμορφώσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Για το Duraform PA, λόγω της ομοιότητας στην δομή που παρουσιάζει με το PA12, γίνεται υπόθεση πως η $T_g \cong 40$ °C. Η προθέρμανση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

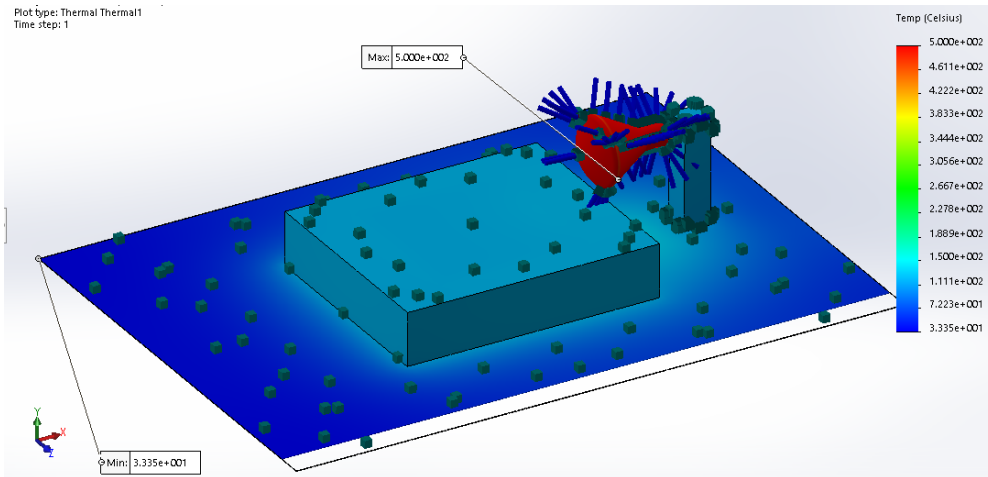
- Δημιουργία θερμικού sandwich (προθέρμανση σκόνης από το πάνω και το κάτω μέρος της).
- Επιβολή ομοιόμορφης θερμοκρασίας μόνο στο πάνω/κάτω μέρος της σκόνης.

Για το σύστημα της μηχανής του εργαστηρίου έγινε μελέτη και των δύο τρόπων σε θερμικά υπολογιστικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν μέσω Solidworks. Οι μελέτες έγιναν στις πρώτες 30 στρώσεις κατασκευής (περίπου 30 mm πάχους κατασκευής), αφού μετά κρίθηκε πως η επίδραση του βάρους του ήδη κατασκευασμένου προϊόντος δεν θα επέτρεπε την ανάπτυξη παραμορφώσεων πάνω στο υπόλοιπο προϊόν. Αυτό βέβαια πρέπει να επιβεβαιωθεί με πειράματα. Για την υλοποίηση των θερμικών μοντέλων ο συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας στην επιφάνεια του powder bed ορίστηκε ως $h = 25$ W/m²·K [20], οι συντελεστές αγωγιμότητας των τοιχωμάτων του θαλάμου και της σκόνης ορίστηκαν 75 W/m·K και 0.70 W/m·K αντίστοιχα, οι συντελεστές emissivity για τα τοιχώματα του θαλάμου και την σκόνη λήφθηκαν 0.8 και 0.08 αντίστοιχα, ενώ αμελήθηκε το φαινόμενο της συναγωγής στα τοιχώματα του θαλάμου κατεργασίας. Ως αρχική θερμοκρασία τοιχωμάτων και περιβάλλοντος θαλάμου και σκόνης ορίστηκε 23 °C. Τέλος, το γεωμετρικό μοντέλο πάνω στο οποίο εφαρμόστηκαν οι προσομοιώσεις αφορούσε μια απλουστευμένη απεικόνιση του κάτω μέρους του θαλάμου της μηχανής που υπήρχε σκόνη, για μεγαλύτερη ταχύτητα meshing και υπολογισμών. Οι διαστάσεις του powder bed, του κάτω τοιχώματος του θαλάμου της μηχανής και της λάμπας θέρμανσης σχεδιάστηκαν με ακρίβεια. Οι θερμικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

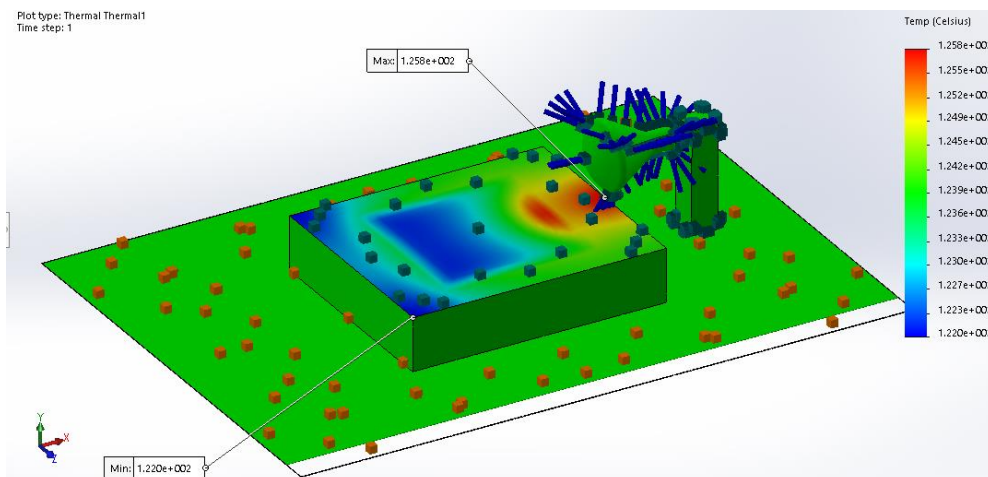
6.1.2.1 Προθέρμανση στο πάνω και κάτω μέρος της σκόνης

Για την δημιουργία θερμικού sandwich μελετήθηκε η ιδέα ενός ενδεικτικού συνδυασμού θέρμανσης με λάμπα υπέρυθρων από την Phillips (μοντέλο BR125 IR με 250 W, ντουί E27, τροφοδοσία 230-250 V και universal θέση λειτουργίας, 500 °C τελική θερμοκρασία λαμπτήρα) η οποία θα δημιουργούσε ένα περιβάλλον φούρνου μέσα στο θάλαμο με κρεβάτι θέρμανσης

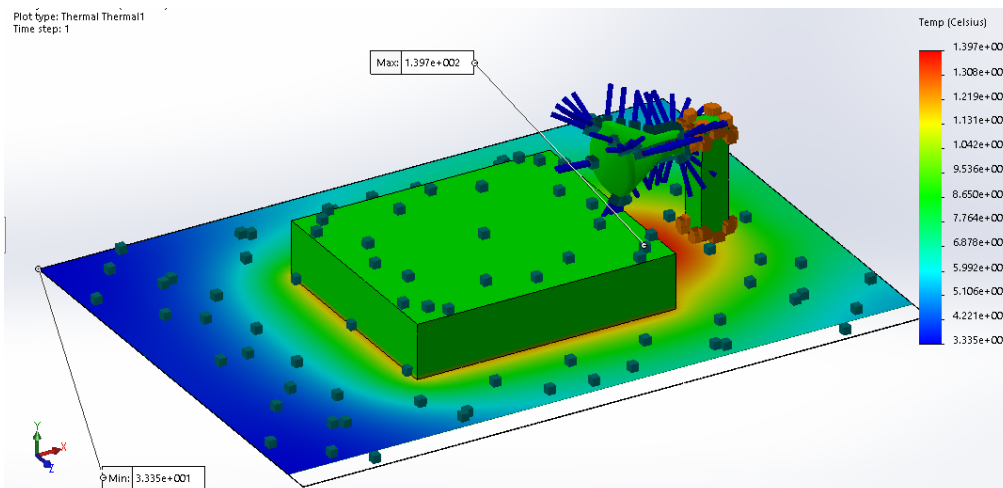
150W (125 °C τελική θερμοκρασία) στο κάτω μέρος της σκόνης. Η βάση της λάμπας τοποθετήθηκε σε απόσταση 150 mm από το powder bed κατά μήκος και σε ύψος 200 mm. Τα αποτελέσματα της θερμικής προσομοίωσης παρουσιάζονται στις εικόνες των Σχημάτων 6.8, 6.9 και 6.10.



Σχήμα 6.8: Συνολική εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή στον χώρο της μηχανής.



Σχήμα 6.9: Εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή στο powder bed από θερμοκρασιακό sandwich.

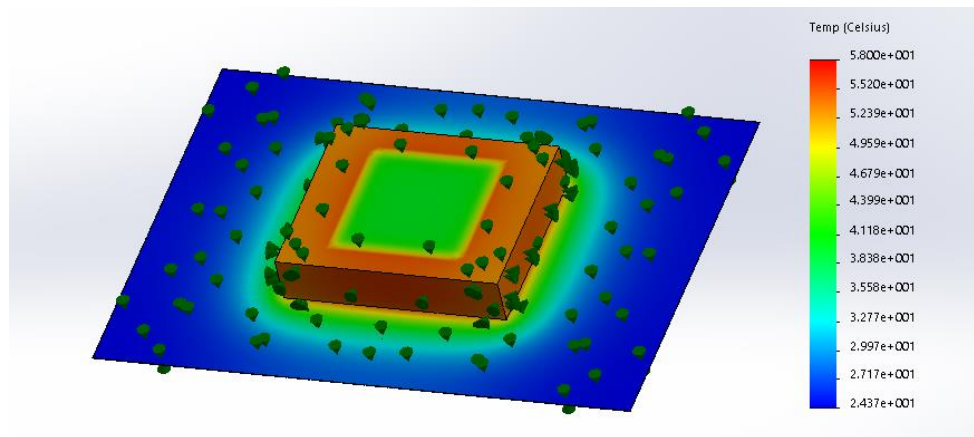


Σχήμα 6.10: Εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή στο κάτω τοίχωμα του θαλάμου της μηχανής.

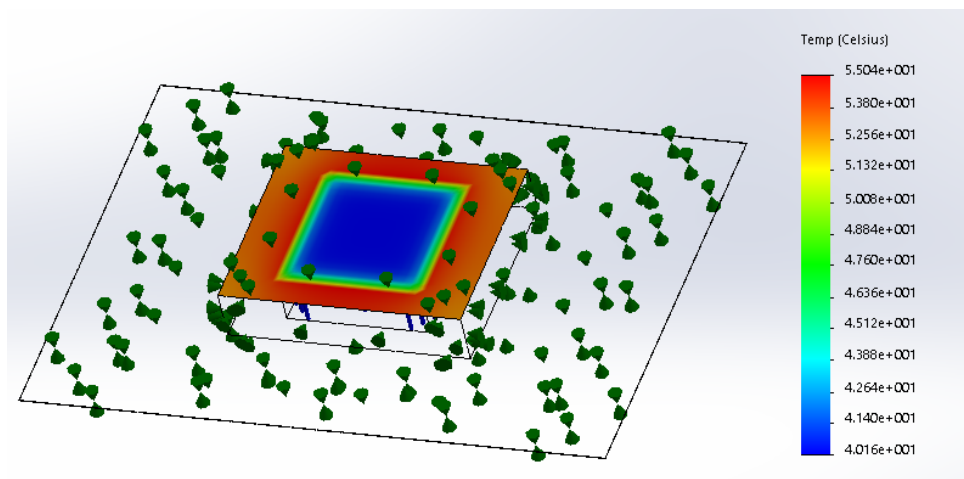
Από τα αποτελέσματα η ιδέα απορρίφθηκε, γιατί λόγω του μικρού διαθέσιμου χώρου που υπάρχει μέσα στο θάλαμο κατεργασίας οι πιθανές θέσεις τοποθέτησης με ασφάλεια μιας λάμπας υπέρυθρων για την δημιουργία φούρνου είναι ελάχιστες. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται λόγω του μαύρου χρώματος των τοιχωμάτων του θαλάμου από την θερμική ακτινοβολία της λάμπας είναι υπερβολικά υψηλές (περίπου 140 °C) θέτοντας σε κίνδυνο τις καλωδιώσεις των κινητήρων και του laser της μηχανής. Αν μάλιστα θεωρήσουμε πως ο συντελεστής emissivity των τοιχωμάτων είναι μεγαλύτερος από 0.9, τότε οι θερμοκρασίες μπορεί να φτάσουν πάνω από 180 °C. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα των φακών η επίδραση μιας τόσο υψηλής θερμοκρασίας στην ασφάλεια του φακού συγκέντρωσης της κεφαλής laser θα απαιτούσε επιπλέον μελέτη. Τέλος, η δοκιμή μικρότερων λαμπών με βάση τις επιλογές της αγοράς, για την τοποθέτηση τους πάνω από την σκόνη τοπικά (για να έχουν ουσιαστική επίδραση στην θέρμανση της) απορρίφθηκε επίσης. Ο λόγος ήταν πως δεν υπήρχε χώρος για την τοποθέτηση μικρότερων λαμπών υπέρυθρης ακτινοβολίας κοντά στην σκόνη, λόγω της διάταξης συγκράτησης και κίνησης της κεφαλής laser.

6.1.2.2 Ομοιόμορφη προθέρμανση στο κάτω μέρος της σκόνης

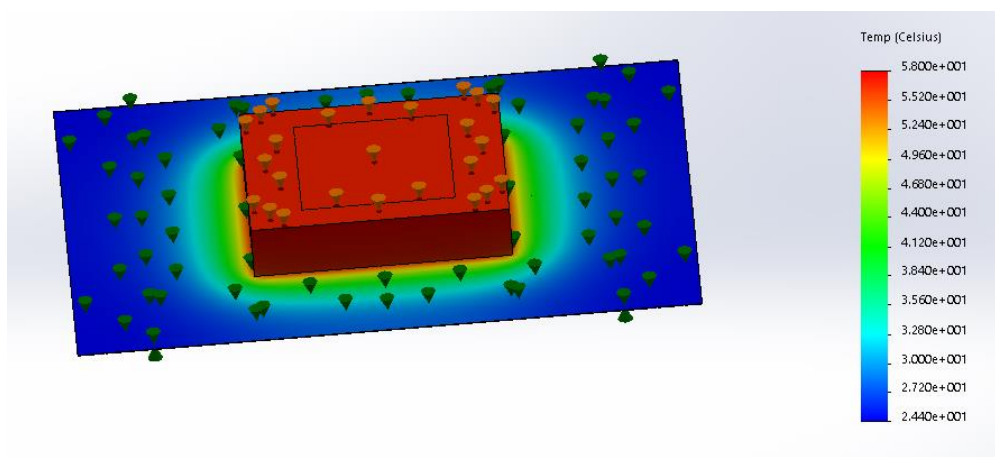
Λόγω των παραπάνω, ως μόνη εφικτή λύση για την σωστή προθέρμανση της σκόνης με ασφάλεια για το σύστημα της μηχανής προτείνεται η τοποθέτηση ενός θερμαντικού κρεβατιού (heating bed) στο κάτω μέρος της σκόνης (μεταξύ σκόνης και powder bed). Η επίδραση της θέρμανσης μας ενδιαφέρει για τις πρώτες 30 στρώσεις κατασκευής για τους λόγους που αναφέραμε νωρίτερα. Το θερμικό μοντέλο προσομοίωσης που κατασκευάστηκε επιλύθηκε για την εύρεση της βέλτιστης θερμοκρασίας θέρμανσης του heating bed με σκοπό την επίτευξη θερμοκρασίας οριακά άνω της T_g στο πάνω μέρος της σκόνης στις 30 πρώτες στρώσεις. Η βέλτιστη θερμοκρασία θέρμανσης της σκόνης από το heating bed βρέθηκε με δοκιμές στους 58 °C. Η λογική χρήσης του παραπάνω αποτελέσματος είναι πως στις πρώτες 30 στρώσεις κατασκευής θα έχουμε προθέρμανση της σκόνης άνω της T_g για την εξάλειψη παραμορφώσεων στα προϊόντα, ενώ μετά τις 30 στρώσεις, το βάρος των ήδη κατασκευασμένων στρώσεων θα αναιρεί την επίδραση των μεταγενέστερων παραμορφώσεων. Η υπόθεση των 30 στρώσεων θα πρέπει να ελεγχθεί πειραματικά μετά την αγορά του heating bed παρόλα αυτά. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στις εικόνες των σχημάτων 6.11, 6.12 και 6.13. Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι με την επιλογή του heating bed μπορεί να επιτευχθεί πιο εύκολα ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας πάνω στην σκόνη με αποτέλεσμα την παραγωγή πιο ποιοτικών προϊόντων από το laser λόγω ομοιόμορφου θερμοκρασιακού gradient.



Σχήμα 6.11: Συνολική εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή στον θάλαμο της μηχανής στις πρώτες 30 στρώσεις με θέρμανση heating bed 58 °C.



Σχήμα 6.12: Εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή στο άνω μέρος της σκόνης του powder bed στις πρώτες 30 στρώσεις κατασκευής με θέρμανση heating bed 58 °C.

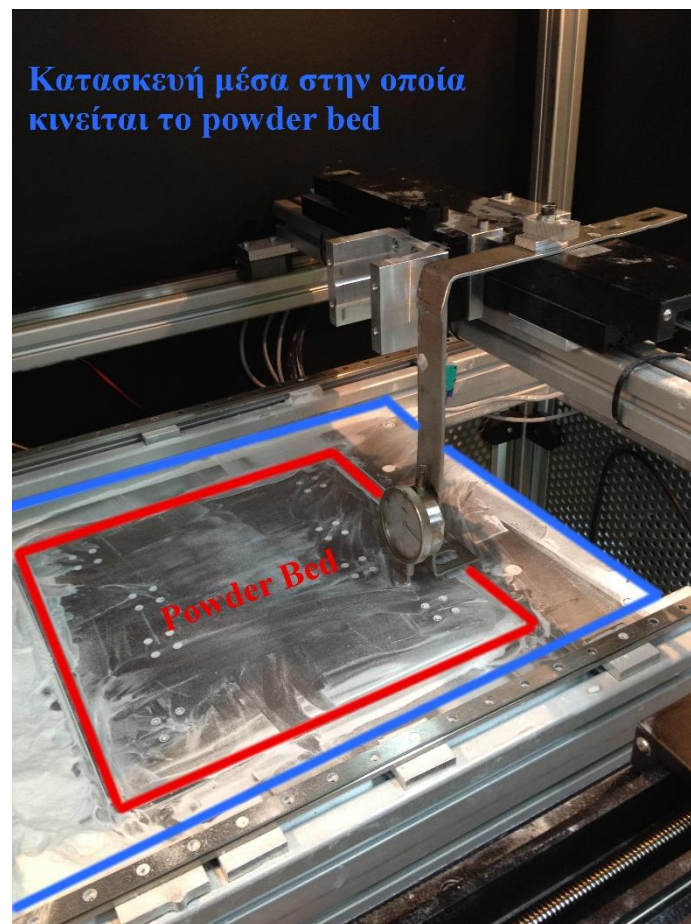


Σχήμα 6.13: Η εκτιμώμενη θερμοκρασιακή κατανομή στον θάλαμο της μηχανής στις πρώτες 2 στρώσεις με θέρμανση heating bed 58 °C.

6.1.3 Μέτρηση και ρύθμιση παραλληλίας μεταξύ roller – powder bed

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων εντοπίστηκε μη παραλληλία μεταξύ του powder bed και του roller απλώματος σκόνης. Πιο συγκεκριμένα, το powder bed παρουσίαζε ανηφορική κλίση από αριστερά προς τα δεξιά με αποτέλεσμα όταν βρισκόταν σε ορισμένα σημεία του άξονα z, ο roller να κοπανάει πάνω του με κίνδυνο της καταστροφής του συστήματος απλώματος σκόνης.

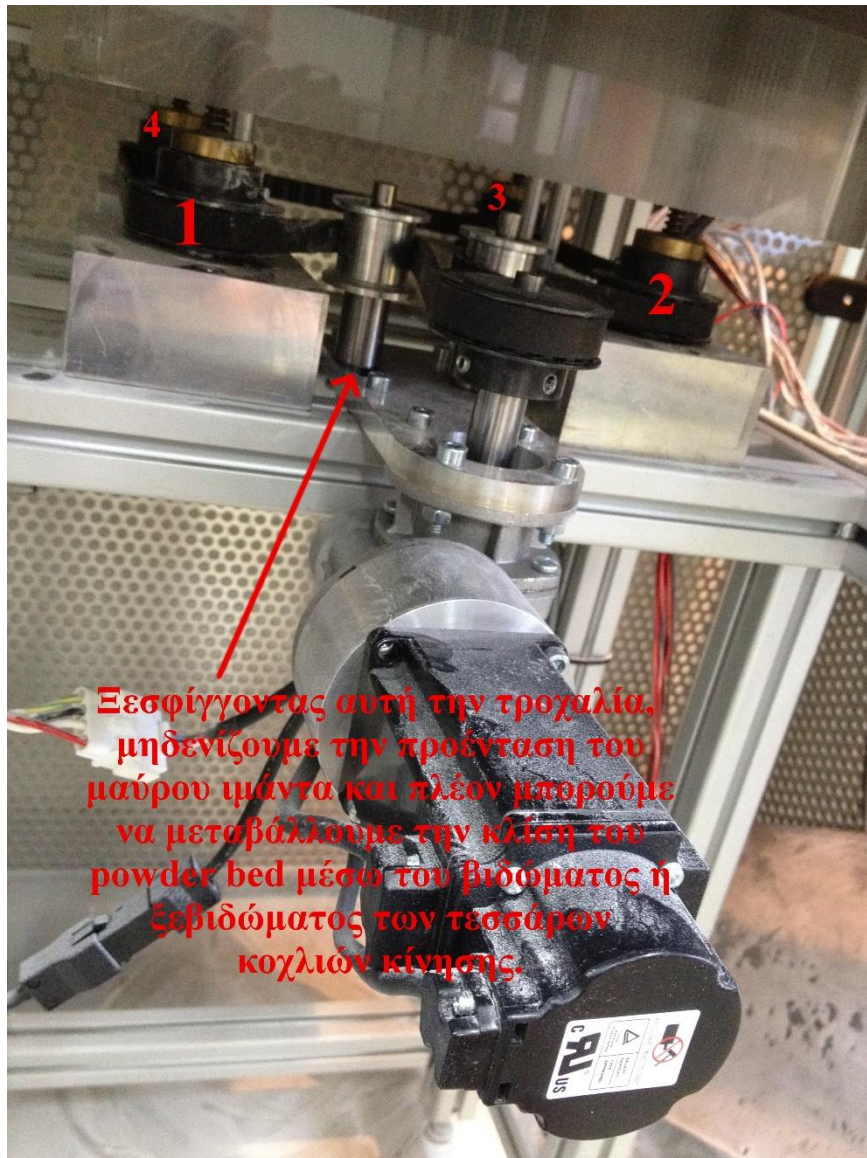
Για την επιδιόρθωση του ζητήματος κατασκευάστηκε η διάταξη στήριξης του μετρητικού ρολογιού παραλληλίας της εικόνας του Σχήματος 6.14.



Σχήμα 6.14: Διάταξη στήριξης μετρητικού ρολογιού παραλληλίας μεταξύ roller – powder bed.

Όπως παρουσιάζεται και στην παραπάνω εικόνα, το μετρητικό ρολόι προσδέθηκε στο σύστημα κίνησης της κεφαλής laser, το οποίο είχε μετρηθεί και ήταν παράλληλο με την κατασκευή στην οποία κινείται το powder bed. Άρα, η κατασκευή του μπλε χρώματος ήταν παράλληλη με τον roller του συστήματος απλώματος σκόνης και με την διάταξη κίνησης της κεφαλής laser [3]. Επομένως το powder bed έπρεπε να γίνει παράλληλο με την κατασκευή του μπλε χρώματος, μέσα στην οποία κινούνται. Η διαφορά μεταξύ της δεξιάς και της αριστερής πλευράς του powder bed μετρήθηκε στα 0.5 mm.

Για την διόρθωση της τιμής απόκλισης μεταξύ αριστερού και δεξιού άκρου του powder bed, ξεσφίξαμε τον ιμάντα της μετάδοσης κίνησης του κινητήρα που μεταβάλλει την θέση του στον άξονα z, και διορθώναμε με δοκιμές την κλίση του powder bed με το βιδώμα/ξεβιδώμα στους τέσσερις κοχλίες κίνησης πάνω στους οποίους κινείται μέχρι την εξάλειψη της κλίσης του (βλ. εικόνα Σχήματος 6.15). Τέλος, με την διάταξη της εικόνας του Σχήματος 6.14, επιβεβαιώσαμε



Σχήμα 6.15: Περιγραφή του τρόπου αλλαγής κλίσης του powder bed με σκοπό την βελτίωση της παραλληλίας του με το roller.

την βελτίωση της παραλληλίας μεταξύ roller – powder bed. Επειδή το μετρητικό ρολόι δεν μπορεί να μας προσφέρει την μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων παραλληλίας που επιθυμούμε, προτείνεται η χρήση ειδικού συστήματος μέτρησης με laser.

6.2 Παραλείψεις

Οι βασικές παραλείψεις που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων και μελετώνται σε αυτή την ενότητα είναι οι εξής:

1. Απομάκρυνση υπολοίπου πούδρας από τον θάλαμο κατεργασίας
2. Απαγωγή αερίων – Σύστημα εξαερισμού μηχανής
3. Προστασία της περιοχής κατεργασίας έναντι οξείδωσης (κυρίως μεταλλικής πούδρας) ή και ανάφλεξης

6.2.1 Απομάκρυνση υπολοίπου πούδρας από τον θάλαμο κατεργασίας

Η παράλειψη αυτή αφορά τον καθαρισμό του θαλάμου της μηχανής μετά το τέλος της χρήσης της. Είναι πολύ σημαντική τόσο για λόγους ποιότητας προϊόντων, αφού όπως είδαμε η επαναχρησιμοποιούμενη σκόνη έχει άμεσο αντίκτυπο στην ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος που παράγει η μηχανή, όσο και στην λειτουργικότητα των μηχανικών και ηλεκτρικών μερών της μηχανής. Κόκκοι σκόνης μπορούν να εισέλθουν στα σπειρώματα των κοχλιών κίνησης του powder bed και του συστήματος απλώματος σκόνης επηρεάζοντας την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας τους. Επίσης, κόκκοι σκόνης μπορούν εισέλθουν σε συνδέσεις pin των κινητήρων δημιουργώντας ανεπιθύμητες μονώσεις σε βασικά ηλεκτρονικά μέρη της μηχανής, όπως επίσης και να επηρεάσουν την ποιότητα της δέσμης laser εισερχόμενοι από τυχόν μικρά κενά στην οπτική διάταξη της κεφαλής του laser. Τέλος, η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας σκόνης στον θάλαμο της μηχανής μπορεί να έχει αντίκτυπο και στην ανθρώπινη υγεία όταν γίνονται εργασίες μέσα στον θάλαμο. Μεγάλα ποσά απλωμένης σκόνης μπορούν να οδηγήσουν σε δυσφορία όσο αφορά την αναπνοή και σε τυχόν ερεθισμούς σε μάτια και δέρμα.

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητη η αγορά ειδικής σκούπας για την απομάκρυνση του υπολοίπου πούδρας από τον θάλαμο της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται η αγορά της σκούπας Lavor Ashley 900/45875 (βλ. εικόνα Σχήματος 6.16). Η χρήση της σκούπας είναι απαραίτητη κάθε φορά που τελειώνει η κατεργασία ενός προϊόντος μέσα στον θάλαμο της μηχανής.



Σχήμα 6.16: Προτεινόμενη σκούπα Lavor Ashley 900/45875 για την απομάκρυνση της πούδρας από τον θάλαμο κατεργασίας.

6.2.2 Απαγωγή αερίων

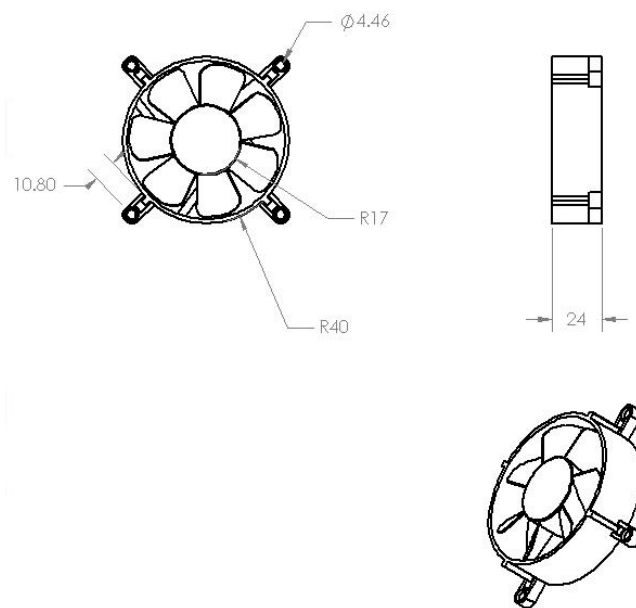
Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, μετά την παρατεταμένη χρήση της μηχανής καταγράφηκε έντονη δυσοσμία στον θάλαμο της κατεργασίας, λόγω της παραγωγής αερίων από τις τυχόν αντιδράσεις καύσης μικρών τμημάτων της σκόνης με το οξυγόνο του θαλάμου. Η αντίδραση καύσης είναι ένα τυχαίο φαινόμενο που συμβαίνει με την πρόσδοση θερμότητας στην σκόνη από το laser αφού η πιθανότητα εμφάνισης της εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό υγρασίας που έχει απορροφηθεί ανά περιοχή από την σκόνη. Γι' αυτό τον λόγο κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη ενός συστήματος εξαερισμού για την μηχανή.

Το σημαντικότερο στοιχείο που πρέπει να λάβουμε υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την μελέτη ενός συστήματος εξαερισμού για μια μηχανή SLS/SLM είναι το στοιχείο της σκόνης. Πιο αναλυτικά, επιδιώκουμε την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων αερίων από τον θάλαμο κατεργασίας χωρίς όμως να προκαλούμε την ανύψωση της πολύ ελαφριάς και λεπτόκοκκης

σκόνης στον αέρα του θαλάμου της κατεργασίας. Γι' αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε υπολογιστικό ρευστοδυναμικό μοντέλο με την χρήση του Solidworks. Μέσω αυτού του μοντέλου είμαστε σε θέση να βρούμε την κρίσιμη ταχύτητα περιστροφής λειτουργίας του διαθέσιμου ανεμιστήρα απαγωγής που υπάρχει στο εργαστήριο έτσι ώστε η πτώση πίεσης που προκαλείται στον αέρα του θαλάμου της μηχανής να μην φτάνει στο powder bed, κάτι που θα οδηγούσε στην ανύψωση της σκόνης. Επομένως, τιμές ταχύτητας περιστροφής μικρότερης της κρίσιμης θα οδηγεί μόνο σε απαγωγή αερίων.

Στο σχεδιασμό του θαλάμου κατεργασίας λήφθηκαν υπόψη με λεπτομέρεια η απόσταση του powder bed με τον ανεμιστήρα, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανεμιστήρα (80 mm εξωτερική διάμετρος, 34 mm διάμετρος hub) ενώ οι υπόλοιπες διατάξεις (κεφαλή laser, σύστημα απλώματος σκόνης κτλ.) παραλείφθηκαν για λόγους ταχύτητας meshing και υπολογισμών. Τέλος, οι στροφές του ανεμιστήρα για τάση 12 V και ρεύμα 0.14 A έγινε παραδοχή πως είναι στις 3200 rpm.

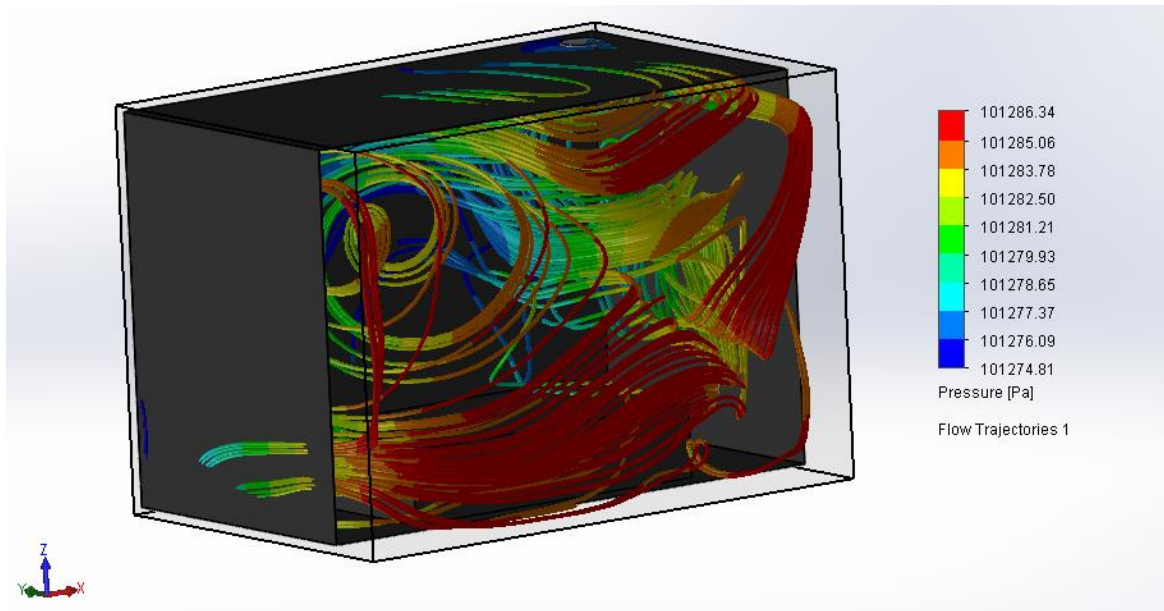
Ο διαθέσιμος ανεμιστήρας του εργαστηρίου σχεδιάστηκε και οι βασικές διαστάσεις του παρουσιάζονται στην σχέδιο του Σχήματος 6.17.



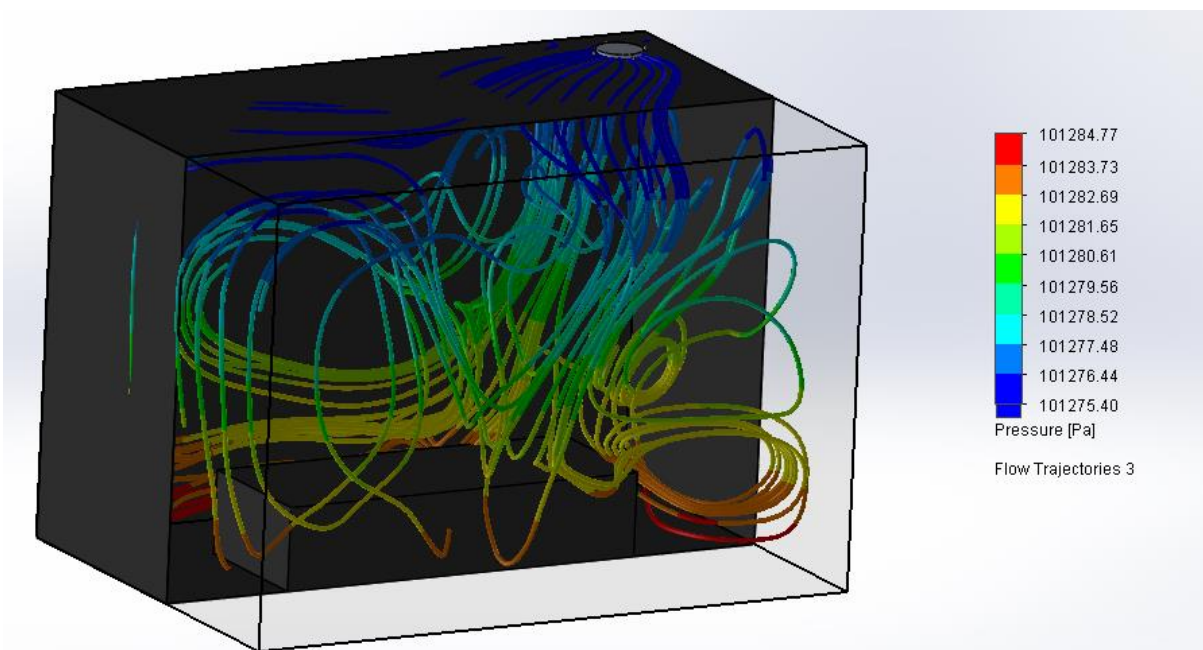
Σχήμα 6.17: Βασικές διαστάσεις ανεμιστήρα για την απαγωγή αερίων από τον θάλαμο κατεργασίας της μηχανής.

Για την υλοποίηση του συστήματος εξαερισμού προτείνεται η αγορά πλαστικών σωλήνων μήκους 10000 mm και διαμέτρου 40 mm για την απαγωγή των αερίων μέσω του εξωτερικού παραθύρου του χώρου που βρίσκεται η μηχανή προς το περιβάλλον. Στο μοντέλο που θα παρουσιαστεί στην συνέχεια, ο ανεμιστήρας έχει τοποθετηθεί στην μέσα δεξιά γωνία του θαλάμου κατεργασίας, απέχοντας 110 mm από το πίσω και δεξιά τοίχωμα του θαλάμου. Διαφορετική θέση τοποθέτησής του ευνοεί το φαινόμενο της ανύψωσης της σκόνης. Η εύρεση

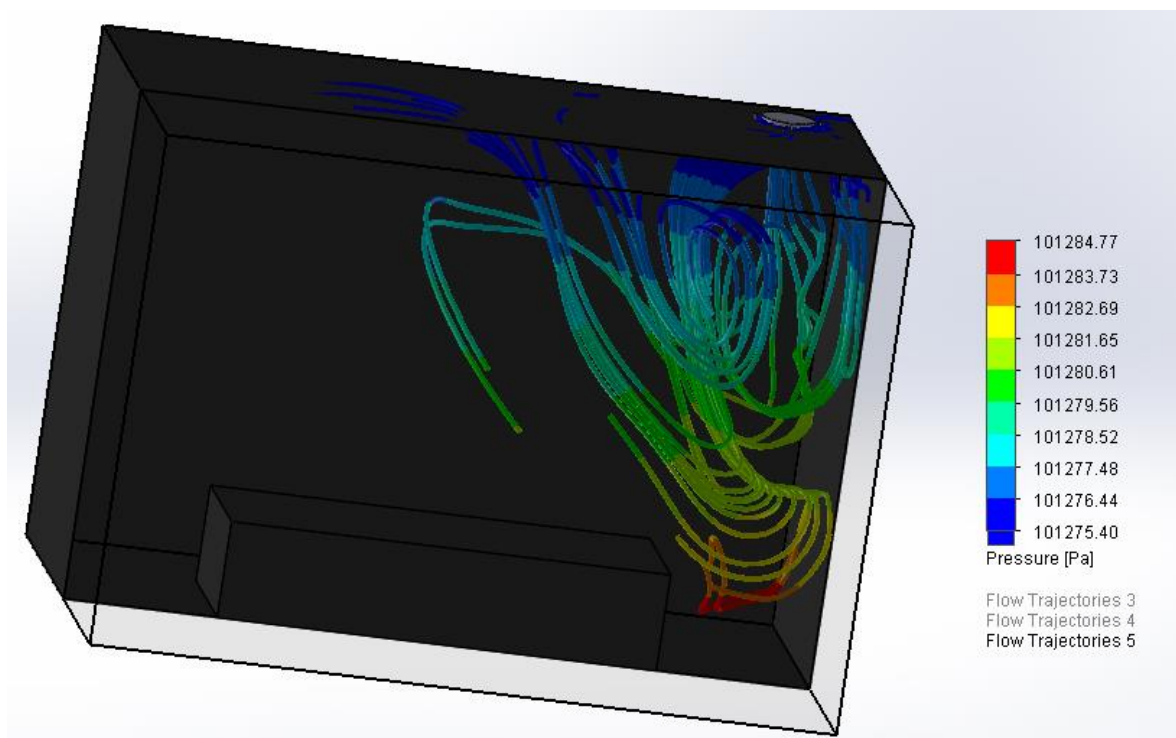
των κρίσιμων στροφών, κάτω από τις οποίες δεν προκαλείται ανύψωση σκόνης από το powder bed, βρέθηκε στις 1200 rpm. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στις εικόνες των Σχημάτων 6.18, 6.19 και 6.20. Ως αρχική επιφάνεια επίλυσης (starting points) ορίστηκε η επιφάνεια του ανεμιστήρα.



Σχήμα 6.18: Εκτιμώμενη πτώση πίεσης για 3200 rpm λειτουργίας του ανεμιστήρα. Παρουσιάζεται η τομή του θαλάμου και οι τροχιές πίεσης που προκαλούνται από τον ανεμιστήρα.

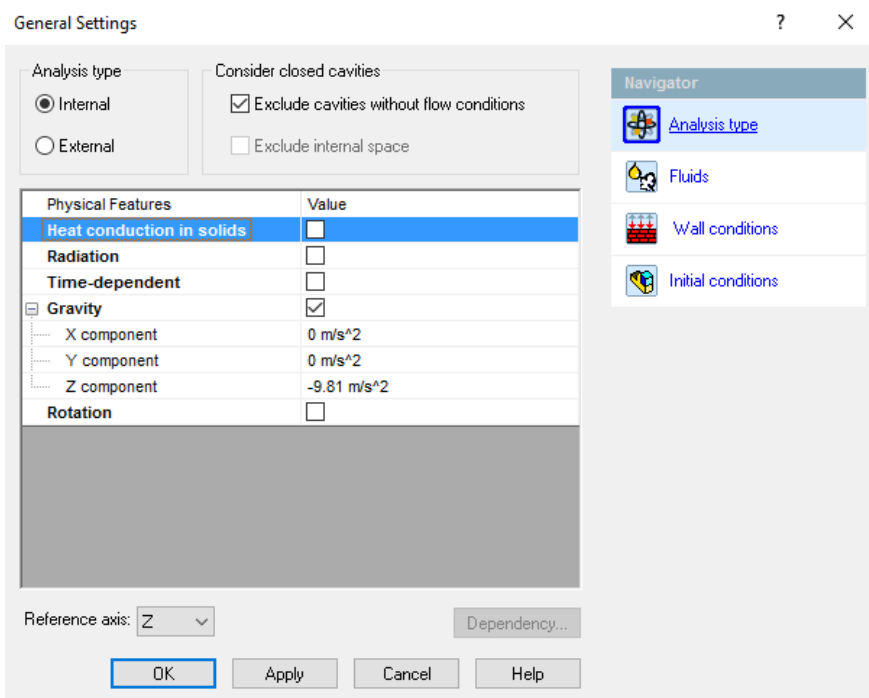


Σχήμα 6.19: Εκτιμώμενη πτώση πίεσης για 2000 rpm λειτουργίας του ανεμιστήρα. Παρουσιάζεται η τομή του θαλάμου και οι τροχιές πίεσης που προκαλούνται από τον ανεμιστήρα.

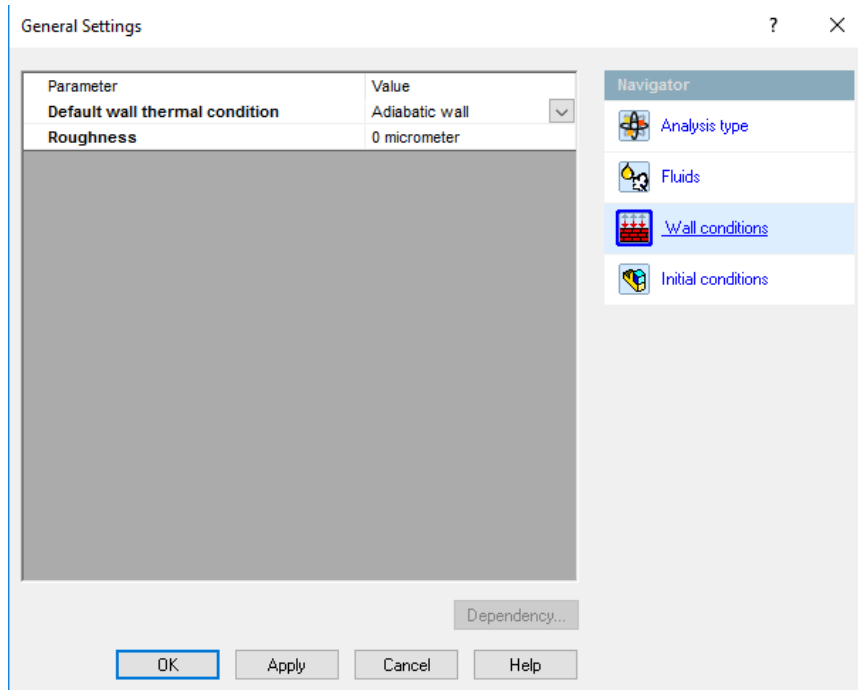


Σχήμα 6.20: Εκτιμώμενη πτώση πίεσης για 1200 rpm λειτουργίας του ανεμιστήρα. Παρουσιάζεται η τομή του θαλάμου και οι τροχιές πίεσης που προκαλούνται από τον ανεμιστήρα.

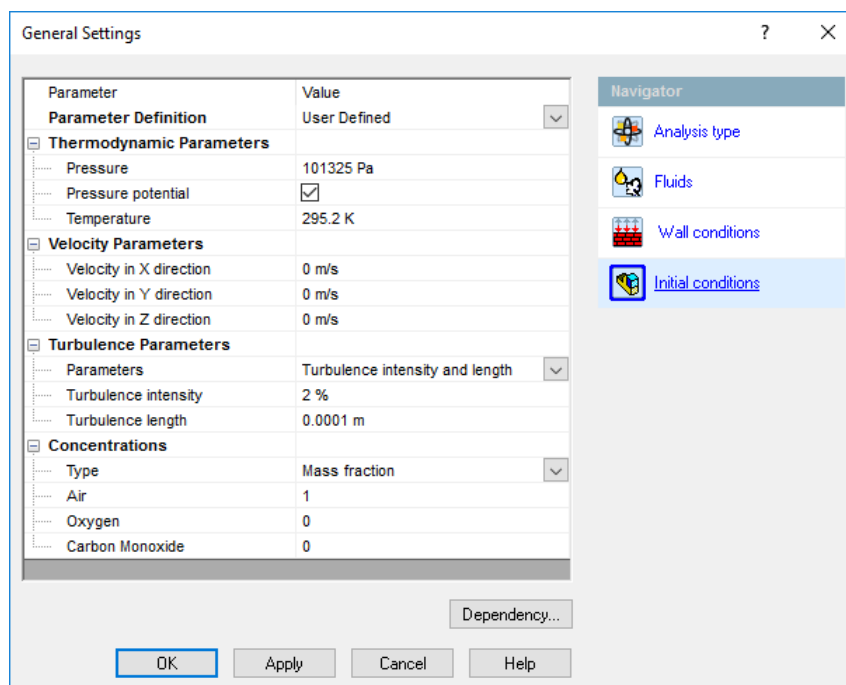
Ο τύπος ανάλυσης για το CFD μοντέλο, καθώς και οι αρχικές και οριακές συνθήκες για την επίλυση παρουσιάζονται στις εικόνες των Σχημάτων 6.21, 6.22 και 6.23:



Σχήμα 6.21: Τύπος ανάλυσης ρευστοδυναμικού μοντέλου στο Solidworks. Επιλέχθηκε Internal τύπος, αφού μας ενδιέφερε η εύρεση των τιμών πιέσεων στον κλειστό χώρο του θαλάμου της μηχανής.



Σχήμα 6.22: Οριακές συνθήκες επίλυσης για το CFD μοντέλο εξαερισμού της μηχανής. Θεωρούμε πως δεν έχουμε κανένα Inlet ή Outlet μάζας, όγκου ή ταχύτητας (κανένα Flow και Pressure opening πέρα από τον ανεμιστήρα).



Σχήμα 6.23: Αρχικές συνθήκες επίλυσης για το CFD εξαερισμού της μηχανής.

Τέλος, για την καμπύλη Πίεσης – Παροχής όγκου που διέπει τον ανεμιστήρα του εργαστηρίου, επειδή ήταν άγνωστη, έγινε η παραδοχή πως ταυτίζεται με τις τιμές από τους ανεμιστήρες F8025H-H της Mechatronics.

Γενικότερα ισχύει η ακόλουθη χαρακτηριστική εξίσωση ροπής-στροφών για έναν κινητήρα DC [21]:

$$T = \frac{K_{\omega}}{R} V_s - \frac{K_{\omega}^2}{R} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \quad [N \cdot m]$$

Όπου:

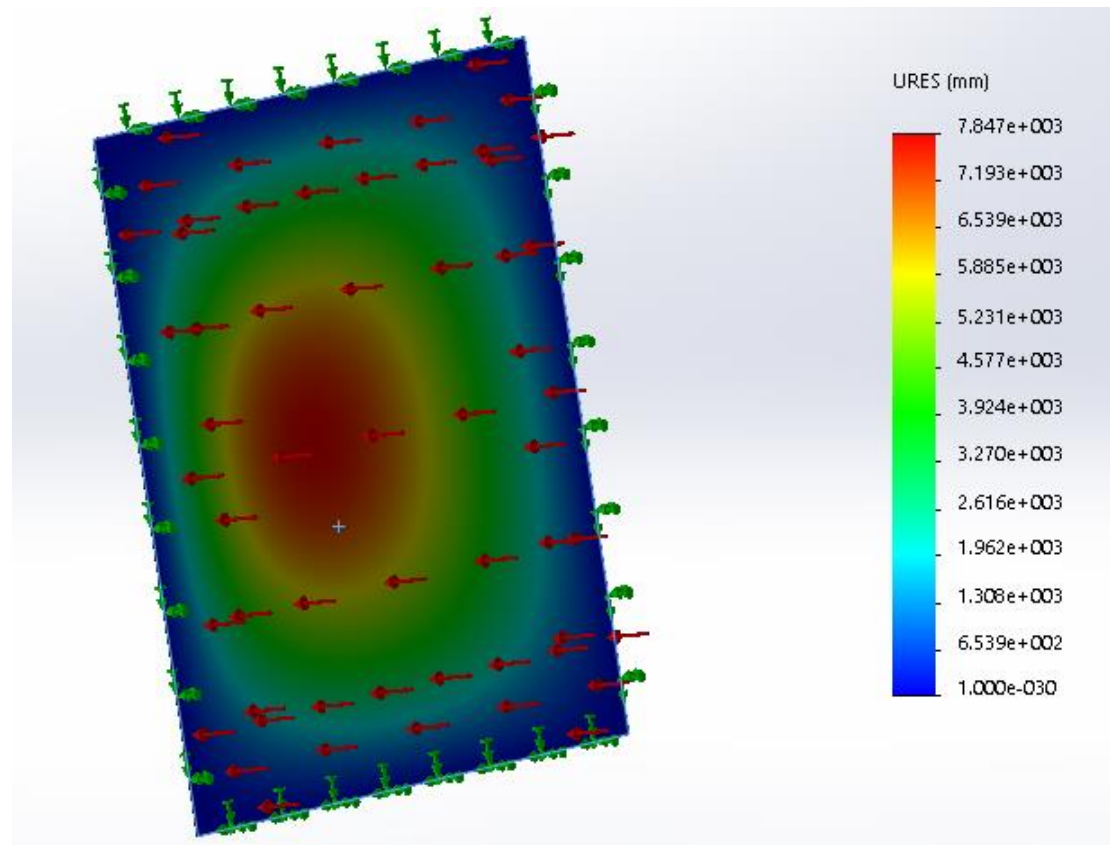
- K_{ω} : η σταθερά στροφών του κινητήρα
- R : η αντίσταση των τυλιγμάτων του κινητήρα [Ω]
- V_s : η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα [V]
- n : οι στροφές του κινητήρα [rpm]

Για διάφορες τιμές του V_s στην χαρακτηριστική εξίσωση ροπής-στροφών και έχοντας την χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου του κινητήρα, μπορούμε να βρούμε τις στροφές που μπορούσε να πετύχουμε για διάφορες τιμές τάσεως από την τομή των δύο σχημάτων.

Παρόλα αυτά, επειδή δεν μας δίνεται η σταθερά στροφών του κινητήρα για τον διαθέσιμο ανεμιστήρα του εργαστηρίου, αλλά ούτε και η χαρακτηριστική καμπύλη του φορτίου του, για την εύρεση της τάσης κάνουμε την υπόθεση πως η αντίσταση στα τυλίγματα του κινητήρα είναι αμελητέα και επομένως η κρίσιμη τάση για την επίτευξη ταχύτητας 1200 rpm είναι 4.5 V κατά προσέγγιση. Για μεγαλύτερη ασφάλεια πάνω στο αποτέλεσμα και επειδή για την μεταβολή της τάσης-στροφών δεν ισχύει γραμμική σχέση, μπορούμε να θεωρήσουμε πως η τελική ασφαλής τάση για την τροφοδοσία του ανεμιστήρα του συστήματος εξαερισμού, έτσι ώστε να γίνεται απαγωγή αερίων χωρίς να ανυψώνεται η σκόνη του powder bed, πρέπει είναι μικρότερη των 3 V.

6.2.3 Προστασία έναντι οξείδωσης ή και ανάφλεξης

Για την αποφυγή των φαινομένων καύσης/ανάφλεξης της σκόνης εξετάστηκε η περίπτωση της στεγανοποίησης και επιβολής κενού στον θάλαμο. Το αποτέλεσμα των μηχανικών παραμορφώσεων στις λαμαρίνες σιδήρου των τοιχωμάτων του θαλάμου της μηχανής λόγω της διαφοράς πίεσης κενού-ατμόσφαιρας παρουσιάζονται στην εικόνα του Σχήματος 6.24. Η ύπαρξη μιας τόσο μεγάλης παραμόρφωσης στα τοιχώματα της μηχανής κρίνει απαγορευτική την επιβολή απόλυτου κενού στον θάλαμο.



Σχήμα 6.24: Οι εκτιμώμενες παραμορφώσεις στο εξωτερικό τοίχωμα της μηχανής λόγω της διαφοράς πίεσης κενού-ατμόσφαιρας.

Παρ'όλα αυτά, σαν εναλλακτική μέθοδος αντιμετώπισης του ζητήματος οξείδωσης στην περίπτωση μεταλλικής σκόνης, κρίνεται απαραίτητη η πλήρης στεγανοποίηση του θαλάμου και η εισαγωγή αδρανούς αερίου σε ισορροπία πιέσεων εντός και εκτός του θαλάμου κατεργασίας. Η απαιτούμενη περιεκτικότητα σε αδρανές αέριο για την αποφυγή οξείδωσης ή ανάφλεξης θα πρέπει να βρεθεί πειραματικά.

7

Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό θα γίνει η σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν πάνω στην λειτουργικότητα της πρωτότυπης μηχανής SLS/SLM του εργαστηρίου, ενώ επίσης θα παρουσιαστούν και μελλοντικές προτάσεις για την τελειοποίηση της λειτουργίας της.

7.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Η σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορεί να γίνει μέσω της εικόνας του Σχήματος 7.1.



Σχήμα 7.1: Η διερεύνηση της ικανότητας της μηχανής να δημιουργεί στερεά προϊόντα από την σκόνη πολυμερούς είναι ένα βασικό επίτευγμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αφού από μια διάταξη, η οποία μπορούσε να χαράξει μόνο ένα ξύλο [3] με εντελώς άγνωστες λοιπές λειτουργικές δυνατότητες, όσο αφορά την τεχνική κατεργασίας που προοριζόταν, καταλήξαμε στο να μπορεί με κατάλληλες ρυθμίσεις να δημιουργεί στερεά προϊόντα σκόνης και αναλόγως τις ρυθμίσεις αυτές, να μπορεί να επιτύχει είτε την τεχνική SLM είτε την τεχνική SLS.

Πιο αναλυτικά όμως, από την συνολική διερεύνηση λειτουργικότητας που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία:

- Βρήκαμε και συσχετίσαμε τις κύριες παραμέτρους κατεργασίας της παρούσας λειτουργικής κατάστασης της μηχανής (Χρόνος, θερμοκρασία, μέγεθος, ταχύτητα, μορφολογία).
- Εντοπίσαμε τα λειτουργικά όρια των παραμέτρων κατεργασίας της μηχανής.
- Επιτύχαμε πυροσυσσώματωση (Solid State Sintering) που είχε τεθεί σαν κύριος στόχος αποτελέσματος και συσχετίσαμε τους μηχανισμούς τήξης και πυροσυσσώματωσης με την ταχύτητα, η οποία είναι μια κύρια παράμετρος της κατεργασίας.
- Βρήκαμε και μελετήσαμε τρόπους σε πρακτικό επίπεδο για την διεύρυνση και βελτίωση των λειτουργικών ορίων της μηχανής και κυριότερα της πρόωσης, αφού η μηχανή παρουσίαζε πολύ χαμηλές δυνατότητες ταχύτητας κατεργασίας.
- Εντοπίσαμε και μελετήσαμε κύριες παραλείψεις προηγούμενων εργασιών και καταλήξαμε πως η μηχανή δεν μπορεί να δεχτεί μεταλλική σκόνη στην υπάρχουσα κατάστασή της.
- Δημιουργήσαμε έναν συστηματικό τρόπο λειτουργίας της μηχανής για SLS/SLM κατεργασίες που δεν υπήρχε προηγουμένως.
- Πραγματοποιήσαμε μια συνολική αποσφαλμάτωση του συστήματος της μηχανής και εντοπίσαμε συγκεκριμένα λειτουργικά μέρη που πρέπει να τροποποιηθούν για την τελειοποίηση της λειτουργίας της. Αυτά παρουσιάζονται στην ενότητα των μελλοντικών επεκτάσεων στην συνέχεια.

Με βάση τα παραπάνω, η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση όλων των άγνωστων μέχρι πρότινος λειτουργικών δυνατοτήτων της μηχανής SLS/SLM του εργαστηρίου, η βελτίωσή τους και ο εντοπισμός των απαραίτητων μελλοντικών επεκτάσεων για την τελειοποίηση της λειτουργίας της.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Οι απαραίτητες μελλοντικές επεκτάσεις που θα οδηγήσουν στην τελειοποίηση της λειτουργίας της μηχανής και δεν ήταν χρονικώς εφικτό να υλοποιηθούν από την παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Είναι απαραίτητο να γίνουν πειράματα για το ποσό σκόνης που πέφτει στους doser του συστήματος απλώματος από το δοχείο σκόνης. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής, παρατηρήθηκε πως το ποσό που έπεφτε δεν ήταν επαρκές για το στρώσιμο της σκόνης πάνω στο powder bed, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται σκόνη με το χέρι και μετά να γίνεται το άπλωμα της. Επομένως είναι απαραίτητο να ευρεθεί ο αριθμός επαναλήψεων που πρέπει να ανοίγει και να κλείνει το καπάκι του δοχείου σκόνης πάνω από κάθε doser μέσω πειραμάτων. Στην συνέχεια, πρέπει να γίνει αλλαγή στον κώδικα του Arduino που ελέγχει το σύστημα όπως περιγράφεται από την [5] με την τοποθέτηση σε κάποιο loop του πόσες φορές πρέπει να γίνεται το άνοιγμα και κλείσιμο του καπακιού. Στον κώδικα του [5], το κομμάτι της ρίψης σκόνης πάνω στους doser περιγράφεται με τίτλο “Stop drop powder of doser”.
- Είναι απαραίτητο να αλλάξει η λειτουργία των διακοπών σήμανσης M200 και M201 που βρίσκονται στις ακραίες θέσεις κίνησης του συστήματος απλώματος σκόνης. Πιο συγκεκριμένα, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4, αυτοί οι διακόπτες πρακτικά δίνουν σήμανση στο σύστημα απλώματος σκόνης να σταματήσει όταν φτάσει στην θέση που του ορίζουν μέσω ενός while loop. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε πως ορισμένες φορές ο ελεγκτής της μηχανής προσπερνάει την ανάγνωση εντολών και σημάνσεων M και προχωράει στην ανάγνωση του υπόλοιπου προγράμματος. Αυτό εν μέρει, λύθηκε με την τοποθέτηση εντολών DWELL μετά από κάθε εντολή M, και ειδικότερα στην εντολή M210 της ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της δέσμης laser. Όμως, σε G-κώδικες μεγάλου μεγέθους και πολλών εντολών, η εντολή DWELL δεν έλυσε το πρόβλημα, με αποτέλεσμα όταν το σύστημα απλώματος σκόνης έφτανε για παράδειγμα στον διακόπτη M201 της δεξιάς ακραίας θέσης, να μην σταματάει την κίνηση του με άμεσο αντίκτυπο στην ασφάλεια της διάταξης. Προτείνεται λοιπόν, η αλλαγή της λειτουργίας των διακοπών αυτών με τρόπο έτσι ώστε να κόβεται η τροφοδοσία στον κινητήρα που κινεί το σύστημα απλώματος σκόνης αναλόγως την φορά κίνησης που βρίσκεται. Για παράδειγμα, όταν ο διακόπτης M201 γίνει ίσος με 1, να γίνεται διακοπή της τροφοδοσίας του κινητήρα για κίνηση προς τα δεξιά και να σταματάει αυτόματα το σύστημα απλώματος. Το αντίστοιχο να ισχύει και για τον διακόπτη M200. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα απλώματος σκόνης θα λειτουργεί μόνο με τις εντολές M208 και M209 (για κίνηση δεξιά και αριστερά αντίστοιχα) χωρίς την χρήση ενός while loop που περιμένει σήμανση από διακόπτες. Έτσι

μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος του ελεγκτή κατά την εκτέλεση του προγράμματος και πλέον δεν τίθεται σε κίνδυνο η διάταξη του συστήματος απλώματος σκόνης.

- Είναι απαραίτητο να γίνουν πειράματα με μειωμένη διάμετρο δέσμης laser με τον φακό που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τα πειράματα θα έχουν ως σκοπό την διερεύνηση κυρίως του κατά πόσο αυξήθηκε η ταχύτητα κατεργασίας της μηχανής, αλλά και τα λειτουργικά όρια των υπόλοιπων παραμέτρων κατεργασίας.
- Προτείνεται η αγορά αισθητήρα πυρομέτρου, ο οποίος θα προσδένεται με κάποια απλή διάταξη στην κεφαλή του laser, για online temperature-based control. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν η αγορά θερμικής κάμερας για την παραγωγή των χωρικών θερμοκρασιακών κατανομών στο powder bed.
- Θα ήταν απαραίτητο, να επανασχεδιαστεί το σύστημα κίνησης του απλώματος σκόνης της μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος κινήσεως για μία στρώση από την αριστερή πλευρά προς την δεξιά πλευρά του συστήματος απλώματος σκόνης χρονομετρήθηκε στα 2 min, ενώ ο χρόνος κινήσεως για την αντίστροφη πορεία στο 1 min και 52 sec. Η μείωση των χρόνων αυτών με ένα άλλο σύστημα κίνησης, θα κάνει την ταχύτητα κατεργασίας προϊόντων πολλαπλών στρώσεων της μηχανής αρκετά πιο γρήγορη.
- Τα βασικά μέρη του συστήματος της μηχανής (κινητήρες και κυρίως το laser) και οι καλωδιώσεις τους πρέπει να επανατοποθετηθούν με τρόπο που να ευνοεί την αποσύνδεση τους από τον θάλαμο κατεργασίας για την επίτευξη της εύκολης συντήρησης της μηχανής. Το ίδιο πρέπει να εφαρμοστεί και στον πίνακα ελέγχου της μηχανής.
- Το κάτω μέρος του θαλάμου κατεργασίας της μηχανής πρέπει να στεγανοποιηθεί έτσι ώστε να μην εξέρχεται σκόνη. Αυτό θα βοηθήσει στην ανακύκλωση της σκόνης, αλλά και στον αποδοτικότερο καθαρισμό του θαλάμου κατεργασίας.

8

Βιβλιογραφία

- [1] Μπουρνιάς Βαρότσης Α., *Σχεδιασμός μηχανισμού εναπόθεσης σκόνης για εργαλειομηχανή SLS/SLM*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2013.
- [2] Μιχέλης Α., *Ανάπτυξη ψηφιακά καθοδηγούμενης διάταξης δύο καρτεσιανών αξόνων κίνησης, για εργαλειομηχανή προσθετικής κατασκευής τεμαχίων κατά στρώσεις τύπου SLS/SLM*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2012.
- [3] Ρογάρης Φ., *Κατασκευή μηχανής επιλεκτικής τήξης-πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS-SLM): Ηλεκτρομηχανολογικά μέρη και έλεγχος κινήσεων*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2016.
- [4] Κυριακόπουλος Ε., *Κατασκευή μηχανής επιλεκτικής τήξης-πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS-SLM): Έλεγχος συστήματος εναπόθεσης σκόνης, έλεγχος και παραμετροποίηση διάταξης laser*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2016.
- [5] Ψαρομμάτης Γιαννακόπουλος Φ., *Ανάπτυξη μηχανισμού διαχείρισης σκόνης για μηχανή SLS/SLM*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Συστήματα Αυτοματισμού, ΕΜΠ, 2016.
- [6] William M. Steen, *Laser Material Processing*, Springer-Verlag, London, 1991, ISBN: 3-540-19670-6.
- [7] Μπένης Μ., *Φυσική των Laser*, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2013.
- [8] Μακροπούλου Μ., *Ασφάλεια κατά τις βιοϊατρικές εφαρμογές των laser*, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ, 2005.
- [9] Marvin J. Weber, *Handbook of Lasers*, CRC Press LLC, 2001.
- [10] Quantel, *Ylia M20 User's Manual*, 2008.

-
- [11] Gibson I., Rosen D. W., Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, 2010, ISBN: 978-1-4419-1119-3.
- [12] Kruth J. -P., Levy G., Klocke F., Childs T.H.C., *Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing*, ELSEVIER, Vol. 56 Issue: 2, pp. 730-759, 2007.
- [13] Kruth J. -P., Mercelis P., Van Vaerenbergh J, Froyen L., Rombouts M., *Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting*, Rapid Prototyping Journal, Vol. 11 Issue: 1, pp. 26-36, 2005.
- [14] Zeng K., Pal D., Stucker B., *A review of thermal analysis methods in Laser Sintering and Selective Laser Melting*, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium Austin, TX, pp. 796-814, 2012.
- [15] Massomi M., Thomson S. M., Shamsaei N., Elwany A., Bian L., *An experimental-numerical investigation of heat transfer during Selective Laser Melting*, Conference: 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, At Austin, Texas, USA, pp. 229-242, 2015.
- [16] Delta Tau Data Systems, Inc., *User Manual Pmac*, 2007.
- [17] Delta Tau Data Systems, Inc., *Software reference manual Pewin32 PRO*, 2003.
- [18] 3ntr INDUSTRIAL GRADE 3D PRINTERS, *KISSlicer v1.5 User Manual*, 2015
- [19] N.T. Sewell, M. Flestead, M.R. Sloan, M.A. Jenkins, *A study of the degradation of Duraform PA due to cyclic processing*, Virtual and rapid manufacturing, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 299 – 304, 2008, ISBN: 0-203-93187-4.
- [20] Timothy T. Diller, Rameshwar Sreenivasan, Joseph Beaman, David Bournell, Janna LaRocco, *Thermal Model of the Build Environment of Polyamide Powder Selective Laser Sintering*, 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, SFF, University of Texas at Austin, p. 540, 2010.
- [21] Παπαδόπουλος Ε. Γ., *Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα μετατροπής ενέργειας*, pp. 106-110, Fountas, 2010.

Παράρτημα Α: Κώδικας C++

```

#include <iostream>
#include <string>
#include <sstream>
#include <fstream>
#include <stdio.h>

using namespace std;

int main()
{
    cout << "\t***Kisslicer to SLS/SLM PMAC format program***" << endl;
    cout << "\t          Created by Patrinos Christos" << endl;
    cout << "School of Mechanical Engineering, Section of Manufacturing Technology,
NTUA."<<endl;
    cout << endl;
    cout << endl;
    string file;
    string mid = "middle.txt";
    string output = "middle2.txt";
    string line;
    cout << "Enter the name of the file with the generated G-Code from Kisslicer:"<<endl;
    getline(cin, file);
    fstream in;
    in.open(file.c_str());
    ofstream outmid(mid.c_str());
    if (!in){
        cout << endl;
        cout << "***** !!ERROR!! *****" <<
endl;
        cout << "Cannot open input file!"<< endl;
        cout << "Check the name of the file in the directory of the program!" << endl;
        cout << "*****" <<
endl;
        return 1;
    }
    cout<<endl;
    cout<<endl;
    cout<<"Preparing G-Code for SLS/SLM Machine..."<<endl;
    while(getline(in, line)){
        if(line[0] == 'M' || line[0] == 'T' || line[0] == 'P' || line[0] == 'S' ||
line[0] == ';' || line[0] == '^')
            continue;
        else if(line[line.length()-1] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-1)<<endl;
        else if (line[line.length()-2] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-2)<<endl;
        else if (line[line.length()-3] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-3)<<endl;
        else if (line[line.length()-4] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-4)<<endl;
        else if (line[line.length()-5] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-5)<<endl;
        else if (line[line.length()-6] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-6)<<endl;
        else if (line[line.length()-7] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-7)<<endl;
        else if (line[line.length()-8] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-8)<<endl;
        else if (line[line.length()-9] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-9)<<endl;
        else if (line[line.length()-10] == 'F')
            outmid<< line.substr(0,line.length()-10)<<endl;
        else
            outmid << line << endl;
    }
    in.close();
    outmid.close();
}

```

```

cout<<"..."<<endl;
fstream in2;
in2.open(mid.c_str());
if (!in2){
    cout << "Error while running the program."<<endl;
    cout << "For more info: send an email at patrchri@gmail.com" << endl;
    return 1;
}
ofstream out(output.c_str());
string line2;
while(getline(in2,line2)){
    if(line2.find("Z") != std::string::npos)
        line2.insert(line2.find("Z")+1,"-");
    out << line2 << endl;
}
in2.close();
remove(mid.c_str());
out.close();

string outfin;
string linefinal;
string compline;
cout<< endl;
cout << "Enter the name of the output file with the cleared G-Code:"<<endl;
getline(cin, outfin);
fstream infinal;
infinal.open(output.c_str());
ofstream outfina(outfin.c_str());
if (!infinal){
    cout << "Error while running the program."<<endl;
    cout << "For more info: send an email at patrchri@gmail.com" << endl;
    return 1;
}
cout<<"..."<<endl;
int counter = 1 ;
int layers = 0;
outfinal << "UNDEFINE ALL" << endl;
outfinal << "&1" <<endl;
outfinal << "#1->4096X" <<endl;
outfinal << "#2->4096Y" <<endl;
outfinal << "#4->54613.33Z" <<endl;
outfinal << endl;
outfinal << "OPEN PROG 1" <<endl;
outfinal << endl;
outfinal << "CLEAR" <<endl;
outfinal << "G17 G90" << endl;
outfinal << endl;
outfinal << "F0.7" << endl;
outfinal << endl;
outfinal << endl;
outfinal << "; Main G-Code Generated" << endl;
while(getline(infinal,linefinal)){
    if(counter <= 2){
        compline = linefinal;
        counter++;
        continue;
    }
    if(counter == 3){
        outfinal << linefinal << endl;
        outfinal << "M210=1" << endl;
        outfinal << "DWELL10" << endl;
    }
    if(linefinal.substr(linefinal.find("Z")+1,string::npos)
compline.substr(compline.find("Z")+1,string::npos)){
        layers++;

    if(layers % 2 != 0 && layers > 1){
        outfinal << endl;
        outfinal << endl;
        outfinal << ";-----Change of Layer-----"<<endl;
        outfinal << endl;
        outfinal << endl;
        outfinal << "M210=0" << endl;
        outfinal << "DWELL10" << endl;
        outfinal << linefinal << endl;
        outfinal << "M209=1" << endl;

```

```

        outfina << "While (M200 = 1) WAIT" << endl;
        outfina << "EndWhile" << endl;
        outfina << "DWELL10" << endl;
        outfina << "M209=0" << endl;
        outfina << "M210=1" << endl;
        outfina << endl;
        outfina << endl;
    }else if (layers % 2 == 0 && layers > 1){
        outfina << endl;
        outfina << endl;
        outfina << ";-----Change of Layer-----"<<endl;
        outfina << endl;
        outfina << endl;
        outfina << "M210=0" << endl;
        outfina << "DWELL10" << endl;
        outfina << "M208=1" << endl;
        outfina << linefinal << endl;
        outfina << "While (M201 = 1) WAIT" << endl;
        outfina << "EndWhile" << endl;
        outfina << "DWELL10" << endl;
        outfina << "M208=0" << endl;
        outfina << "M210=1" << endl;
        outfina << endl;
        outfina << endl;
    }
    outfina << linefinal << endl;
}else{
    outfina << linefinal << endl;
}
counter++;
compline = linefinal;
}
outfina << endl;
outfina << endl;
outfina << "M210=0" << endl;
outfina << endl;
outfina << endl;
outfina << "M30" << endl;
outfina << "CLOSE" << endl;
infina.close();
remove(output.c_str());
outfina.close();

cout<<endl;
cout<<"~~~~~ COMPLETED ~~~~~"<<endl;
cout<<endl;
cout<<endl;
cout <<"Input File: "<< file << endl;
cout <<"Output File: "<< outfina << endl;
cout << endl;
cout <<"NOTICE: Always check the generated cleared G-Code for logical errors before
inputting it in the machine." << endl;
return 0;
}

```