



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών SLS προσθετικών κατασκευών**

**Συγγραφέας**

**Βλάσσης Μάριος**

**46147303**

**Επιβλέποντες Καθηγητές:**

**Σαγιάς Βασίλειος**

**Στεργίου Κωνσταντίνος**

**Αθήνα, Ιούλιος 2022**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
SCHOOL OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Mechanical properties of SLS AM specimens**

**Student name and surname:**

**Vlassis Marios**

**Registration Number: 46147303**

**Supervisors:**

**Sagias Vasileios**

**Stergiou Konstantinos**

**Athens, July 2022**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών SLS προσθετικών κατασκευών**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/A</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
<b>1</b>	<b>Στεργίου Κωνσταντίνος</b>	
<b>2</b>	<b>Ρώσης Κυριάκος</b>	
<b>3</b>	<b>Σαγιάς Βασίλειος</b>	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βλάσης Μάριος του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 46147303 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών  
ΜΑΡΙΟΣ ΒΛΑΣΣΗΣ



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια πρώιμη ιδέα των τελευταίων χρόνων. Ολοένα και διαφορετικές τεχνολογίες παρουσιάζονται στον τομέα με εξελιγμένες μεθόδους και περισσότερες δυνατότητες εκτύπωσης και δημιουργίας. Πλέον εκτός από τους τομείς της βιομηχανίας, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται και για οικιακή χρήση, όντας οικονομική και εύχρηστη τεχνολογία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά παρουσιάζεται η ιστορική αναδρομή της τεχνολογίας καθώς και η θεωρία σχετικά με τις τεχνολογίες και τα υλικά που υπάρχουν στις προσθετικές κατασκευές. Έπειτα παρουσιάζεται η μεθοδολογία που πρόκειται να ακολουθηθεί, ο πειραματικός σχεδιασμός και τα βήματα για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας, ουσιαστικά πραγματοποιείται ένα πλήθος τρισδιάστατων εκτυπώσεων SLS με διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης για διάφορες περιπτώσεις. Τα εκτυπωμένα δοκίμια έπειτά, υποβάλλονται σε μηχανικές καταπονήσεις εφελκυσμού και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους με τη βοήθεια διαγραμμάτων. Με το πέρας της διαδικασίας των δοκίμων και μέσω στατιστικής ανάλυσης προκύπτει ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων, αλλά και η παράμετρος που επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες ενός αντικειμένου παραγόμενου μέσω της τεχνολογίας SLS.

Τέλος, πραγματοποιείται συζήτηση για την ανασκόπηση της παρούσας διπλωματικής, αναλύονται τα συμπεράσματα της εργασίας καθώς και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν με τις πιθανές λύσεις τους, αλλά δίνονται και περιθώρια βελτίωσης τα οποία επιτρέπουν την εξέλιξη αντίστοιχων ερευνών στο τομέα των προσθετικών κατασκευών.

**Λέξεις κλειδιά:** 3D Printing, Προσθετικές κατασκευές, Additive manufacturing, Μηχανικές Ιδιότητες, Selective Laser Sintering



## ABSTRACT

3D printing is a first idea of recent years. More and more new technologies are introduced in the field with sophisticated methods and more printing and creation possibilities. Now in addition to the fields of industry, 3D printing is also used for home use, because it is an economical and easy-to-use technology.

In this thesis, the historical review of the technology as well as theory regarding the technologies and materials included in additive manufacturing is firstly presented. Then the methodology to be followed, the experimental design and the steps for carrying out the experimental procedure are presented.

In the experimental part of the work, a number of SLS 3D prints are actually performed with different printing parameters for different cases. The printed samples are then subjected to mechanical tensile stresses and the results are compared with each other with the help of charts. At the end of the trial process and through statistical analysis, the optimal combination of parameters is obtained, as well as the parameter that affects to a greater extent the mechanical properties of an object produced through SLS technology.

Finally, a discussion is held for the review of this dissertation, the conclusions of the work are analyzed as well as problems presented with their possible solutions, but room for improvement is also given which allows the development of corresponding research in the field of prosthetic constructions

**Keywords:** 3D Printing, Mechanical Properties, Selective Laser Sintering, Additive manufacturing

## **Ευχαριστίες**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κύριο Σαγιά, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα επίκαιρο με το οποίο ελπίζω να ενασχοληθώ και στην επαγγελματική μου καριέρα.

Επιπλέον, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Βασίλη και Ελευθερία, οι οποίοι μου προσέφεραν τα μέγιστα καθόλη τη διάρκεια της φοίτησης μου.



## Περιεχόμενα

Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων .....	11
Εισαγωγή .....	13
1. Ιστορική Αναδρομή .....	15
2. Από την σχεδίαση στην εκτύπωση .....	20
Δημιουργία του ψηφιακού CAD μοντέλου .....	20
Μετατροπή του μοντέλου CAD σε αρχείο εξαγωγής.....	20
Αρχείο εξαγωγής STL .....	21
Μεταφορά και χειρισμός του αρχείου εξαγωγής στον 3D εκτυπωτή .....	21
3. Κατηγοριοποίηση Τεχνολογιών Τρισδιάστατης Εκτύπωσης .....	23
Σύντηξη Εναπόθεσης Υλικού (FDM) .....	24
Στερεολιθογραφία- Vat Polymerization (SLA).....	26
Selective Laser Sintering (SLS)-Power Bed Fusion .....	28
Εναπόθεση Υλικού-Material Jetting (MJ) .....	30
Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας - Binder Jetting (BJ) .....	32
Διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη - Direct Energy Deposition .....	33
Διεργασίες επάλληλων φύλλων - Sheet Lamination (LOM, UAM) .....	35
4. Υλικά που χρησιμοποιούνται στις Προσθετικές Κατασκευές .....	37
Μέταλλα και κράματα.....	37
Κεραμικά .....	39
Σύνθετα Υλικά.....	42
Πολυμερή .....	43
Πολυαμίδιο PA12 .....	47
5. Μηχανικές Ιδιότητες .....	52
Ορισμός Εφελκυσμού.....	52
Δοκιμή εφελκυσμού .....	53
Νόμος του Hooke .....	54
6. Μέθοδος Taguchi .....	55
Καθορισμός προβλήματος .....	56
Καταιγισμός ιδεών .....	56
Πειραματικός σχεδιασμός.....	56
Διεξαγωγή πειράματος.....	57
Ανάλυση .....	57
Επιβεβαίωση πειράματος .....	57
7. Μεθοδολογία .....	58

8. Πειραματικό Μέρος .....	60
Εξοπλισμός και διεξαγωγή πειραμάτων .....	60
Υλικό Εκτύπωσης.....	60
Συσκευή Εκτύπωσης.....	61
Συσκευή Δοκιμής Εφελκυσμού .....	63
Δοκίμιο προς Εκτύπωση .....	64
Μοντελοποίηση.....	68
Διαδικασία Εκτύπωσης .....	69
Στάδιο Προεκτύπωσης .....	69
Στάδιο Μετεκτύπωσης .....	74
Αποτελέσματα Προεργασίας .....	78
Αποτελέσματα Εκτύπωσης.....	81
Διαστασιολογικός Έλεγχος .....	82
Αποτελέσματα Μηχανικών Καταπονήσεων .....	85
<b>Πείραμα Νο1</b> .....	85
Πείραμα Νο2.....	86
<b>Πείραμα Νο3</b> .....	87
<b>Πείραμα Νο4</b> .....	88
<b>Πείραμα Νο5</b> .....	89
<b>Πείραμα Νο6</b> .....	90
<b>Πείραμα Νο8</b> .....	92
<b>Πείραμα Νο9</b> .....	93
<b>Πείραμα Νο10</b> .....	94
<b>Πείραμα Νο11</b> .....	95
<b>Πείραμα Νο12</b> .....	96
<b>Πείραμα Νο13</b> .....	97
<b>Πείραμα Νο14</b> .....	98
<b>Πείραμα Νο15</b> .....	99
<b>Πείραμα Νο16</b> .....	100
<b>Πείραμα Νο17</b> .....	101
<b>Πείραμα Νο18</b> .....	102
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b> .....	107
Προβλήματα και συντήρηση.....	107
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	109
Μελλοντικές Εφαρμογές .....	111
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	112

## Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων

<b>ΕΙΚΟΝΑ 1:</b> Ο ΠΡΩΤΟΣ 3D PRINTER (GORNET, 2017) .....	15
<b>ΕΙΚΟΝΑ 2:</b> Η ΜΗΧΑΝΗ ΤΟΥ DECKARD (3DPRINT.COM) .....	16
<b>ΕΙΚΟΝΑ 3:</b> ΑΡΧΕΙΟ STL (GR.PRINTEREST.COM) .....	21
<b>ΕΙΚΟΝΑ 4:</b> ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΑΡΧΕΙΟΥ 3D MODEL ΣΕ STL ΚΑΙ ΕΠΕΙΤΑ ΣΕ GCODE (THE3DBROS.COM) .....	22
<b>ΕΙΚΟΝΑ 5:</b> ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ FDM (RAPIDFAB.RICOH-EUROPE.COM) .....	25
<b>ΕΙΚΟΝΑ 6:</b> ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ SLA (FORMLABS.COM) .....	27
<b>ΕΙΚΟΝΑ 7:</b> ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ SLS (FORMLABS.COM) .....	29
<b>ΕΙΚΟΝΑ 8:</b> ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ MJ (HUBS.COM) .....	31
<b>ΕΙΚΟΝΑ 9:</b> ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ BJ (3DPRINT.COM) .....	33
<b>ΕΙΚΟΝΑ 10:</b> ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ DIRECT ENERGY DEPOSITION (DED) (WWW.3DSOURCED.COM) .....	34
<b>ΕΙΚΟΝΑ 11:</b> ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ SHEET LAMINATION (RESEARCHGATE.NET) .....	36
<b>ΕΙΚΟΝΑ 12:</b> ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ (SCIENCEDIRECT.COM) .....	44
<b>ΕΙΚΟΝΑ 13:</b> ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ DSC PA12 (SCHMID, AMADO AND WEGENER, 2015) .....	48
<b>ΕΙΚΟΝΑ 14:</b> ΠΡΟΩΡΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ / ΠΡΟΩΡΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ (SCHMID, AMADO AND WEGENER, 2015) .....	49
<b>ΕΙΚΟΝΑ 15:</b> ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΙΞΩΔΩΝ PA12 (SCHMID, AMADO AND WEGENER, 2015) .....	49
<b>ΕΙΚΟΝΑ 16:</b> (Α) ΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΤΩΝ ΚΑΙ (Β) ΠΑΛΑΙΩΜΕΝΩΝ ΣΚΟΝΩΝ PA12 (DADBAKHS ET AL., 2017) .....	50
<b>ΕΙΚΟΝΑ 17:</b> ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ (EL.WIKIPEDIA.ORG) .....	52
<b>ΕΙΚΟΝΑ 18:</b> ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (PRACTICALMAINTENANCE.NET) .....	53
<b>ΕΙΚΟΝΑ 19:</b> FRESH POWDER & PRINT READY POWDER .....	61
<b>ΕΙΚΟΝΑ 20:</b> 3D PRINTER LISA PRO .....	62
<b>ΕΙΚΟΝΑ 21:</b> QUASAR 100 ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	63
<b>ΕΙΚΟΝΑ 22:</b> ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ASTM (AST, 2013) .....	64
<b>ΕΙΚΟΝΑ 23:</b> ΘΕΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ) (1Η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ) , ΜΕΓΑΛΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ (Α), ΜΙΚΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ (Β) ..	64
<b>ΕΙΚΟΝΑ 24:</b> ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SINTERIT STUDIO .....	65
<b>ΕΙΚΟΝΑ 25:</b> ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΤΡΩΣΗΣ .....	65
<b>ΕΙΚΟΝΑ 26:</b> ΘΕΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗ (0°, 45°, 90°) .....	66
<b>ΕΙΚΟΝΑ 27:</b> ΡΥΘΜΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ LASER .....	66
<b>ΕΙΚΟΝΑ 28:</b> ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ L18 ΚΑΤΑ TAGUCHI & ΤΕΛΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....	67
<b>ΕΙΚΟΝΑ 29:</b> ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ .....	68
<b>ΕΙΚΟΝΑ 30:</b> SLICER SINTERIT STUDIO .....	68
<b>ΕΙΚΟΝΑ 31:</b> ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΡΟΕΚΤΥΠΩΣΗΣ .....	70
<b>ΕΙΚΟΝΑ 32:</b> ΒΗΜΑ 1Ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	70
<b>ΕΙΚΟΝΑ 33:</b> ΒΗΜΑ 2Ο ΡΥΘΜΙΣΗ ΘΕΣΕΩΝ .....	71
<b>ΕΙΚΟΝΑ 34:</b> ΒΗΜΑ 3Ο ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΥΛΙΚΟΥ .....	71
<b>ΕΙΚΟΝΑ 35:</b> ΒΗΜΑ 4Ο ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ ΣΚΟΝΗΣ .....	71
<b>ΕΙΚΟΝΑ 36:</b> ΒΗΜΑ 5Ο ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΟΥ ΚΑΘΡΕΠΤΗ .....	72
<b>ΕΙΚΟΝΑ 37:</b> ΒΗΜΑ 6Ο ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΠΥΡΟΜΕΤΡΩΝ .....	72
<b>ΕΙΚΟΝΑ 38:</b> ΒΗΜΑ 7Ο ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΜΠΑΡΑΣ ΟΔΗΓΟΥ ΤΟΥ ΕΠΙΧΡΙΣΤΗ .....	73
<b>ΕΙΚΟΝΑ 39:</b> ΒΗΜΑ 8Ο ΛΙΠΑΝΣΗ ΜΠΑΡΑΣ ΟΔΗΓΟΥ .....	73
<b>ΕΙΚΟΝΑ 40:</b> ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΜΕΤΕΚΤΥΠΩΣΗΣ .....	74
<b>ΕΙΚΟΝΑ 41:</b> ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΘΑΛΑΜΟ .....	75
<b>ΕΙΚΟΝΑ 42:</b> ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ .....	75
<b>ΕΙΚΟΝΑ 43:</b> ΠΡΙΝ ΤΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΜΜΟΒΟΛΗΣ .....	76

<b>ΕΙΚΟΝΑ 44:</b> ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΜΜΟΒΟΛΗΣ .....	76
<b>ΕΙΚΟΝΑ 45:</b> ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΕΚΤΥΠΩΤΗ .....	77
<b>ΕΙΚΟΝΑ 46:</b> ΚΟΣΚΙΝΟ ΥΛΙΚΟΥ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	77
<b>ΕΙΚΟΝΑ 47:</b> ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟΝ ΟΓΚΟ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ .....	80
<b>ΕΙΚΟΝΑ 48:</b> ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....	81
<b>ΕΙΚΟΝΑ 49:</b> ΣΗΜΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	82
<b>ΕΙΚΟΝΑ 50:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ1.....	85
<b>ΕΙΚΟΝΑ 51:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ2.....	86
<b>ΕΙΚΟΝΑ 52:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ3.....	87
<b>ΕΙΚΟΝΑ 53:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ4.....	88
<b>ΕΙΚΟΝΑ 54:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ5.....	89
<b>ΕΙΚΟΝΑ 55:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ6.....	90
<b>ΕΙΚΟΝΑ 56:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ7.....	91
<b>ΕΙΚΟΝΑ 57:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ8.....	92
<b>ΕΙΚΟΝΑ 58:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ9.....	93
<b>ΕΙΚΟΝΑ 59:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ10.....	94
<b>ΕΙΚΟΝΑ 60:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ11.....	95
<b>ΕΙΚΟΝΑ 61:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ12.....	96
<b>ΕΙΚΟΝΑ 62:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ13.....	97
<b>ΕΙΚΟΝΑ 63:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ14.....	98
<b>ΕΙΚΟΝΑ 64:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ15.....	99
<b>ΕΙΚΟΝΑ 65:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ16.....	100
<b>ΕΙΚΟΝΑ 66:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ17.....	101
<b>ΕΙΚΟΝΑ 67:</b> ΠΕΙΡΑΜΑ ΝΟ18.....	102
<b>ΕΙΚΟΝΑ 68:</b> ΔΟΚΙΜΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΝΟ9 .....	104
<b>ΕΙΚΟΝΑ 69:</b> SIGNAL TO NOISE DIAGRAM .....	105
<b>ΕΙΚΟΝΑ 70:</b> MAIN EFFECTS PLOT FOR MEANS .....	105
<b>ΕΙΚΟΝΑ 71:</b> ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ .....	108

## Εισαγωγή

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι μια καινοτόμα ιδέα που έχει ως σκοπό τη δημιουργία πραγματικών αντικειμένων. Πρωτοεμφανιζόμενη στα μέσα της δεκαετίας του 1980, βασίζεται στη δημιουργία ψηφιακών σχεδίων κάθε είδους, τα οποία με τη βοήθεια μιας συσκευής συνδεδεμένης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή υλοποιούνται σε αληθινά αντικείμενα με τη μέθοδο της εναπόθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Αποτελεί ουσιαστικά, μέθοδο ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων. Φυσικά ο γενικός όρος που χρησιμοποιείται είναι το «Additive Manufacturing» (προσθετικές μέθοδοι παραγωγής), ο οποίος υποδηλώνει εύστοχα τη διαφορά από τις σημερινές τεχνικές που βασίζονται στην αφαίρεση υλικού από αδιαμόρφωτα τεμάχια με τη χρήση των λεγόμενων μηχανών CNC, δηλαδή subtractive Manufacturing. (Additive manufacturing method and different welding applications | Elsevier Enhanced Reader)

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης με δυνατότητα να εκτυπώνουν αντικείμενα με διαφορετικά υλικά, με την καθεμία να έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα εκτυπώσιμα μέρη μπορούν να παραχθούν σε πολύπλοκες γεωμετρίες χωρίς να απαιτούνται εργαλεία υψηλής ακρίβειας όπως στις αφαιρετικές μεθόδους κατεργασίας, κάτι το οποίο σημαίνει χαμηλό κόστος εκκίνησης με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πρωτοτύπων και τμημάτων παραγωγής μικρού όγκου. Από την άλλη μεριά, το μεγαλύτερο μειονέκτημα της, θεωρείται η αδυναμία παραγωγής εξαρτημάτων με αντίστοιχες ιδιότητες αυτών που κατασκευάζονται μέσω αφαιρετικών ή μορφοποιητικών τεχνικών.

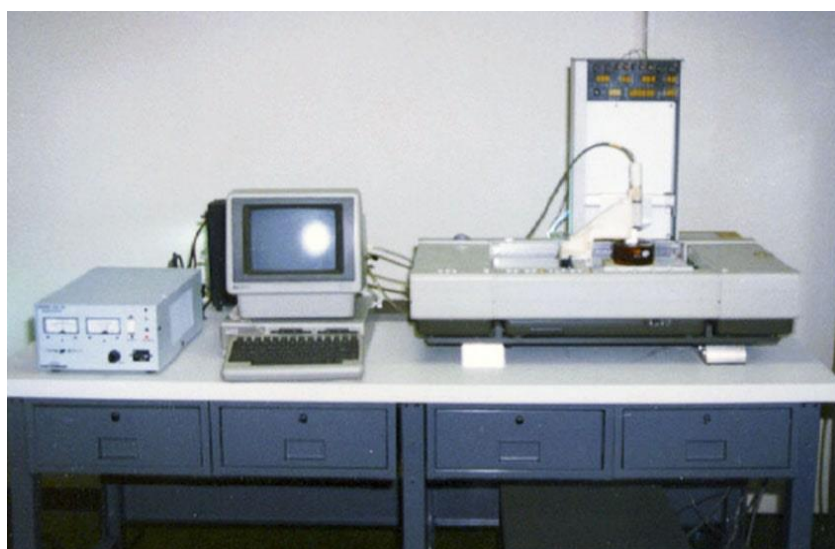
Η τρισδιάστατη εκτύπωση διακρίνεται σε τρία βασικά στάδια: της προ εκτύπωσης, της εκτύπωσης και της μετεκτύπωσης. Η προεκτύπωση περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες που αφορούν την προετοιμασία του τρισδιάστατου μοντέλου, οι οποίες είναι πολύ σημαντικές για την επιτυχή έκβαση του τελικού αποτελέσματος. Σε αυτό το στάδιο, τα ψηφιακά σχέδια δημιουργούνται με τη βοήθεια λογισμικού σχεδίασης μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή ή αλλιώς CAD και έπειτα μετατρέπονται σε αρχεία stl, τα οποία και «τεμαχίζουν» τα αντικείμενα σε εξαιρετικά λεπτά στρώματα. Αυτές οι πληροφορίες καθοδηγούν τη διαδρομή ενός ακροφυσίου ή της κεφαλής εκτύπωσης ή μίας δέσμης laser με σκοπό να εναποθέτει με ακρίβεια υλικό στο

προηγούμενο στρώμα.(Attaran, 2017)Το τελικό τρισδιάστατο αντικείμενο θεωρείται ολοκληρωμένο μετά το στάδιο της μετεκτύπωσης, στο οποίο πραγματοποιούνται συγκεκριμένες διαδικασίες αναλόγως με την τεχνολογία προσθετικών κατασκευών που έχει παραχθεί το προϊόν, με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, της επιφάνειας κλπ. ώστε το προϊόν να είναι έτοιμο προς χρήση.

## 1. Ιστορική Αναδρομή

Το 1981 ο Hideo Kodama, από το Ινστιτούτο Βιομηχανικών Ερευνών της Ναγκόγια, κάνει την πρώτη αναφορά για τη μέθοδο του Rapid Prototyping με τη χρήση φωτοπολυμερών υλικών στην Ιαπωνία με τις πρώτες τεχνολογίες να ονομάζονται ταχείας πρωτοτυποποίησης, εφόσον σχεδιάστηκαν αρχικά ως μία γρήγορη και πιο οικονομικά αποδοτική μέθοδο, με σκοπό τη δημιουργία πρωτοτύπων για την ανάπτυξη προϊόντων εντός της βιομηχανίας.

Λίγα χρόνια αργότερα, ο πρώτος 3D printer στερεολιθογραφίας, κατασκευάζεται από τον Αμερικάνο Chuck Hull στις 9 Μαρτίου του 1983, ο οποίος έκανε λόγο για μια διαδικασία που επιτρέπει στους σχεδιαστές τη δημιουργία 3D μοντέλων χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα τα οποία κατόπιν μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν για να δημιουργήσουν ένα συγκεκριμένο αντικείμενο. Ο ίδιος το 1986 ιδρύει την εταιρεία 3D Systems και ονομάζει το μηχάνημα που είχε δημιουργήσει “3D Printer” και τον κλάδο ενασχόλησης “Additive Manufacturing”. (Hull, 1984)



*Εικόνα 1: Ο πρώτος 3D printer (Gornet, 2017)*

Το 1987 ο Carl Deckard, προπτυχιακός στο Πανεπιστήμιο του Τέξας επινόησε μια πατέντα ευρεσιτεχνίας μεθόδου 3D εκτύπωσης, την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS). Η μηχανή του Deckard, ο πρώτος 3D εκτυπωτής SLS, ονομάστηκε Betsy και μπορούσε να παράγει μόνο απλά κομμάτια πλαστικού. Βέβαια, καθώς ο κύριος σκοπός του εκτυπωτή ήταν απλά να δοκιμάσει την ιδέα για το SLS, οι λεπτομέρειες

των αντικειμένων και η ποιότητα εκτύπωσης δεν ήταν οι υψηλότερες προτεραιότητες.



*Εικόνα 2: Η μηχανή του Deckard (3Dprint.com)*

Μάλιστα, η επιλεκτική πυροσυσσώματωση με λέιζερ και η στερεολιθογραφία ήταν μεταξύ των πρώτων ευρέως επιτυχημένων μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης, που αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για τη βιομηχανική δημιουργία πρωτοτύπων. (Su and Al'Aref, 2018)

Η πιο πρόσφατη τεχνολογία προσθετικών κατασκευών που αναπτύχθηκε είναι αυτή της εναπόθεσης τηγμένου υλικού (FDM) το 1989 από τον Scott και Lisa Crump, οι οποίοι ίδρυσαν την εταιρεία Stratasys καταθέτοντας και δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. (Maxey, 2013)

Το 1989 η εταιρεία EOS χρησιμοποιώντας ως μέθοδο εκτύπωσης, τη σύντηξη με λέιζερ (LS) πούλησε το πρώτο σύστημα το 1990.

Επίσης το 1992 παράγεται η πρώτη στερεολιθογραφική μηχανή από την 3d Systems (Wohlers and Gornet, 2016)

Πρόκειται για μια μηχανή που αποτελείται από ένα υπεριώδης λέιζερ που στερεοποιεί το φωτοπολυμερές υλικό και κατασκευάζει πολύπλοκη δομή με διαστρωμάτωση.

Κατά τη δεκαετία 1990 οι τεχνολογίες 3D εκτύπωσης πληθαίνουν και δημιουργούνται διαδικασίες όπως η βαλλιστική κατασκευή σωματιδίων (BPM) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον William Masters, η συγκόλληση λεπτών φύλλων (LOM) με



δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Michael Feygin, η ωρίμανση στερεού εδάφους (SGC) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Itzchak Pomerantz και «τρισδιάστατης εκτύπωσης» (3DP) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Emanuel Sachs.

Το 1999 δημιουργείται το πρώτο όργανο που είναι καλλιεργημένο σε εργαστήριο. Ασθενείς νέοι σε ηλικία, υποβάλλονται σε αύξηση της ουροδόχου κύστης με χρήση ενός ικρίωματος που έχει εκτυπωθεί τρισδιάστατα και έχει επικαλυφθεί από δικά τους κύτταρα. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από επιστήμονες στο Ινστιτούτο Wake Forest για την αναγεννητική ιατρική και άνοιξε δρόμους για την ανάπτυξη άλλων στρατηγικών για την τρισδιάστατη εκτύπωση οργάνων. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται τα κύτταρα του ασθενή, ο κίνδυνος της απόρριψης από τον οργανισμό, είναι ελάχιστος έως μηδενικός.

Έπειτα, το 2002 κατασκευάστηκε ένα λειτουργικό νεφρό. Το νεφρό αυτό είχε την ικανότητα να φιλτράρει το αίμα και να παράγει αραιωμένα ούρα σε ζώο. Αυτή η εφεύρεση συνετέλεσε στην διεξαγωγή ερευνών στο Wake Forest Institute για την εκτύπωση οργάνων και ιστών.

Το 2005 ο Δρ. Adrian Bowyer στο Πανεπιστήμιο του Bath ιδρύει την RepRap, μία πρωτοβουλία ανοιχτού κώδικα για την κατασκευή ενός 3D εκτυπωτή ο οποίος μπορεί να εκτυπώνει τα περισσότερα από τα εξαρτήματα του ίδιου του εκτυπωτή. Το όραμα του έργου αυτού ήταν η χαμηλού κόστους διανομή των RepRap μονάδων σε ιδιώτες παντού, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να δημιουργήσουν προϊόντα καθημερινής χρήσης από μόνοι τους. Το 2008 απελευθερώνεται ο πρώτος εκτυπωτής αυτού του είδους.

Το 2007 πωλείται ο πρώτος 3D εκτυπωτής με τιμή μικρότερη από 10.000 δολάρια.

Το 2008 εκτυπώθηκε ένα ανθρώπινο προσθετικό μέλος και συγκεκριμένα ένα πόδι, το οποίο είχε όλα τα μέρη εκτυπωμένα χωρίς να απαιτείται η συναρμολόγησή τους. Έτσι έχουμε τον πρώτο άνθρωπο που περπατάει με τρισδιάστατο εκτυπωμένο πόδι. Την ίδια χρονιά η εταιρεία Shapeways δημιουργεί μια υπηρεσία συνεργασίας και μία κοινότητα επιτρέποντας καλλιτέχνες, αρχιτέκτονες και σχεδιαστές να μετατρέψουν οικονομικά τα 3D σχέδιά τους φυσικά αντικείμενα.

Το 2009 βγαίνουν για πρώτη φορά προς πώληση οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές DIY kits από την εταιρία Maker Bot Industries. Επίσης την ίδια χρονιά χρησιμοποιείται 3D εκτυπωτής για την εκτύπωση των πρώτων αιμοφόρων αγγείων.

Έπειτα, το 2011 στο Πανεπιστήμιο Southampton κατασκευάστηκε το πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωμένο μη επανδρωμένο αεροπλανάκι σε επτά ημέρες και προϋπολογισμό £5,000. Κατασκευάστηκε με πτέρυγες ελλειπτικού σχήματος, ένα συνήθως ακριβό χαρακτηριστικό, που βοηθά στη βελτίωση της αεροδυναμικής

Επίσης την ίδια χρονιά δημιουργήθηκε το πρώτο παγκοσμίως τρισδιάστατο τυπωμένο αυτοκίνητο, το Urbee (Kor, 2013). Είναι φιλικό προς το περιβάλλον, ηλεκτρικό με εναλλακτικό καύσιμο την αιθανόλη. Επιπρόσθετα έχουμε εκτύπωση σε χρυσό και ασήμι. Η εταιρεία materialise γίνεται η πρώτη υπηρεσία εκτύπωσης 3D σε όλο τον κόσμο που προσφέρει χρυσό 14 καρατιών και ασήμι ως υλικά, ανοίγοντας έτσι μια νέα και λιγότερο δαπανηρή επιλογή κατασκευής για τους σχεδιαστές κοσμημάτων.

Το 2012 έχουμε την πρώτη εμφύτευση τρισδιάστατης τυπωμένης κάτω σιαγόνας σε μία ηλικιωμένη κυρία που πάσχει από χρόνια λοίμωξη των οστών. Αυτή η τεχνολογία ερευνάται για να προωθηθεί η ανάπτυξη νέου ιστού οστού.

Το 2014 ο Richard Arm (MSc Smart Design, ερευνητής στο πανεπιστήμιο του Νότινγκαμ της Μεγάλης Βρετανίας) δημιουργεί την πρώτη τρισδιάστατα εκτυπωμένη καρδιά, προκειμένου να ενισχύσει τη δυνατότητα έρευνας και την πειραματική χειρουργική.

Το 2015 η Google επενδύει 100 εκατομμύρια δολάρια στην εταιρία Carbon3D.

Το 2016 η HP παραδίδει τον πρώτο 3D εκτυπωτή τεχνολογίας Multi Jet Fusion (MJF) και η XJet LTD παρουσίασε την τεχνολογία νανοσωματιδίων με πίεση ακροφυσίου

Γενικότερα, τα τελευταία χρόνια η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αρχίσει και απευθύνεται σε όλο και περισσότερο κόσμο εφόσον πλέον το κόστος αγοράς ενός 3D εκτυπωτή είναι ανεκτό, καθώς και η ενασχόληση με το αντικείμενο μπορεί να γίνει για οικιακή και γενικότερα προσωπική χρήση. Το παρόν και το μέλλον της συγκεκριμένης τεχνολογίας βασίζεται στην ιδέα πως οι άνθρωποι μπορούν να

δημιουργήσουν όλα τα είδη των προσαρμοσμένων προϊόντων όπως και όταν τα χρειάζονται. (Καλτσής, 2017)

## 2. Από την σχεδίαση στην εκτύπωση

Κατά τα τελευταία 35 χρόνια, αρκετές τεχνολογίες και μέθοδοι ταχείας προτυποποίησης (RP) έχουν εμφανιστεί, όλες με βάση την ιδέα κατασκευής πρόσθετης ύλης. Οι τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης διαφέρουν μεταξύ ως προς τον τρόπο λειτουργία τους, τους χρόνους εκτύπωσης, την επεξεργασία των υλικών, το κόστος και χρησιμοποιούνται βάση των αναγκών κάθε χρήστη που πρόκειται να τις χρησιμοποιήσει. Όμως, όλες οι τεχνικές ακολουθούν μια σειρά βασικών βημάτων είτε σε κάποιο βαθμό, είτε με ενδιάμεσα πρόσθετα στάδια, τα οποία οδηγούν την εικονική ψηφιακή περιγραφή ενός μοντέλου στο φυσικό τελικό εκτυπωμένο αντικείμενο. Αυτά τα βήματα είναι τα εξής:

1. Δημιουργία του ψηφιακού CAD μοντέλου
2. Μετατροπή του μοντέλου CAD σε αρχείο εξαγωγής
3. Αρχείο εξαγωγής STL
4. Μεταφορά και χειρισμός του αρχείου εξαγωγής στον 3D εκτυπωτή

### Δημιουργία του ψηφιακού CAD μοντέλου

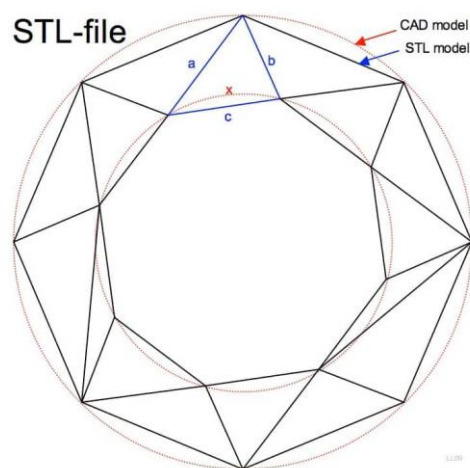
Το πρώτο βήμα αποτελεί η σχεδίαση του αντικειμένου με την βοήθεια CAD στερεού μοντελοποιητή. Το αντικείμενο μπορεί να σχεδιαστεί εξ ολοκλήρου από την αρχή ή να χρησιμοποιηθεί ένα ήδη υπάρχον αρχείο CAD. Έπειτα μπορεί να υλοποιηθεί και αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση με τη χρήση τρισδιάστατου σαρωτή (3D scanner) για την σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου και τη δημιουργία του 3D CAD μοντέλου.

### Μετατροπή του μοντέλου CAD σε αρχείο εξαγωγής

Η μετατροπή του μοντέλου CAD σε κατάλληλο αρχείο εξαγωγής, αποτελεί το δεύτερο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης και είναι το μεταβατικό στάδιο του ψηφιακού μοντέλου σε αρχείο κατάλληλο και αναγνωρίσιμο για το λογισμικό του 3D εκτυπωτή. (Καλτσής, 2017)

### Αρχείο εξαγωγής STL

Το αρχείο STL αποτελεί ακρωνύμιο της αγγλικής λέξης Standard Tessellation και σημαίνει στρωματοποίηση γεωμετρικών σχημάτων και μοτίβων. Το συγκεκριμένο αρχείο ουσιαστικά αναλύει την τρισδιάστατη μορφή του CAD μοντέλου και δημιουργεί ένα παρόμοιο γεωμετρικό μοτίβο με την βοήθεια τριγώνων, έτσι ώστε το ακροφύσιο ή η δέσμη laser ενός εκτυπωτή να ακολουθήσει τη γεωμετρική περιγραφή, δημιουργώντας τελικά το τρισδιάστατο μοντέλο. Τα αρχεία STL αποτελούνται από τριάδες συντεταγμένων του χώρου X,Y,Z, που αποτελούν κορυφές τριγώνων. Η αύξηση των τριγώνων σε ένα πλέγμα επιτρέπει καλύτερη προσέγγιση του τελικού αποτελέσματος, αλλά παράλληλα κάνει την επεξεργασία του αρχείου δυσκολότερη και χρονοβόρα.

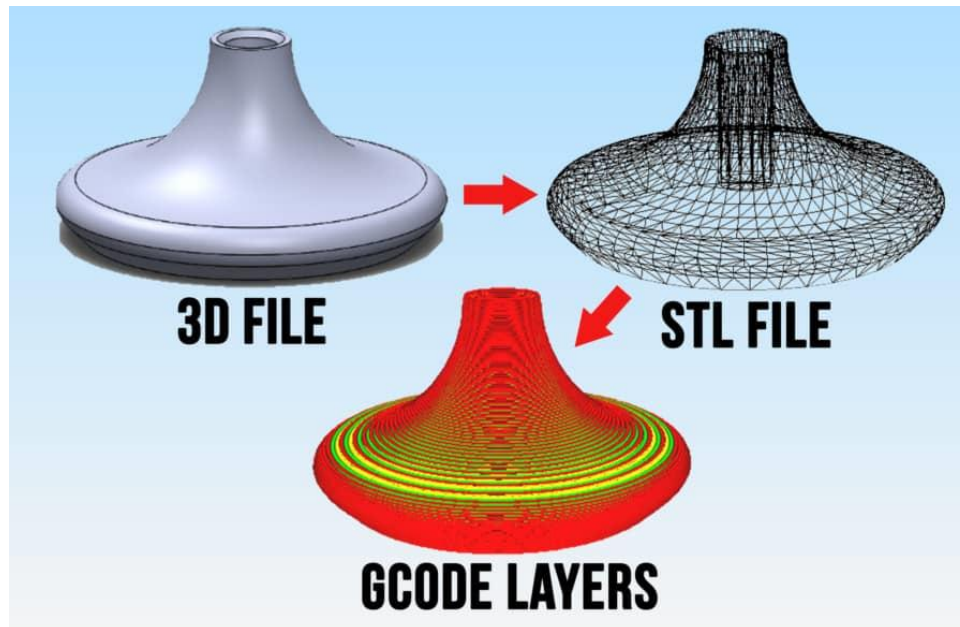


Εικόνα 3: Αρχείο STL (gr.printerest.com)

### Μεταφορά και χειρισμός του αρχείου εξαγωγής στον 3D εκτυπωτή

Για να θεωρηθεί το αρχείο έτοιμο προς εκτύπωση χρησιμοποιείται ένας τύπος λογισμικού που λαμβάνει το αρχείο το οποίο σχεδιάστηκε από τα προηγούμενα προγράμματα και το τεμαχίζει, δηλαδή το κόβει σε επίπεδα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να γίνει κατανοητό από τον 3D εκτυπωτή ποια γεωμετρία θα δημιουργήσει και με ποιες παραμέτρους θα λειτουργήσει, μετατρέποντας το αρχείο σε G-Code. Επίσης, μπορεί να δημιουργήσει και μια βοηθητική δομή, που θα χρησιμοποιείται για τη στήριξη του πρωτοτύπου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του. Αυτά τα αρχεία περιλαμβάνουν επίσης πρόσθετα δεδομένα κάποια από τα οποία ρυθμίζονται και

από τον ίδιο το χρήστη όπως ταχύτητα εκτύπωσης, θερμοκρασία, ύψος στρώματος, εάν υπάρχει πολλαπλή εξώθηση κ.λπ. Ουσιαστικά αποτελεί ένα εργαλείο CAM που παράγει όλες τις οδηγίες για να μπορέσει ο εκτυπωτής να φτιάξει το μοντέλο.



*Εικόνα 4: Μετατροπή αρχείου 3D model σε STL και έπειτα σε GCODE (the3dbros.com)*

### 3. Κατηγοριοποίηση Τεχνολογιών Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO/ASTM 52900, που αναπτύχθηκε από τα πρότυπα ISO/TC 261 και ASTM F42 σε συνεργασία με τη συμφωνία μεταξύ ISO και ASTM International και με στόχο τη δημιουργία ενός κοινού συνόλου προτύπων ISO/ASTM για την τρισδιάστατη εκτύπωση, οι τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης διακρίνονται σε επτά κατηγορίες (ISO/ASTM,2018):

- Εξώθηση υλικού - Material Extrusion (FDM): Το υλικό διανέμεται επιλεκτικά μέσω ακροφυσίου.
- Φωτοπολυμερισμός - Vat Polymerization (SLA & DLP): Υγρή φωτοπολυμερής ρητίνη τοποθετημένη σε ένα δοχείο, υφίσταται επιλεκτική σκλήρυνση με υπεριώδες φως.
- Σύντηξη πούδρας σε κλίνη - Powder Bed Fusion (SLS, DMLS & SLM): Μια πηγή υψηλής ενέργειας συνενώνει επιλεκτικά και μηχανικά σωματίδια σκόνης.
- Εναπόθεση υλικού - Material Jetting (MJ): Τα σταγονίδια υλικού εναποτίθενται επιλεκτικά και σκληραίνονται.
- Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας - Binder Jetting (BJ): Ρευστό συγκολλητικό μέσο συνδέει επιλεκτικά περιοχές μιας κλίνης με πούδρα.
- Διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη - Direct Energy Deposition (LENS, LBMD): Μια πηγή υψηλής ενέργειας συνενώνει το υλικό, έτσι όπως έχει εναποτεθεί.
- Διεργασίες επάλληλων φύλλων - Sheet Lamination (LOM, UAM): Τα φύλλα του υλικού συνενώνονται και σχηματίζονται στρώση-στρώση.

### Σύντηξη Εναπόθεσης Υλικού (FDM)

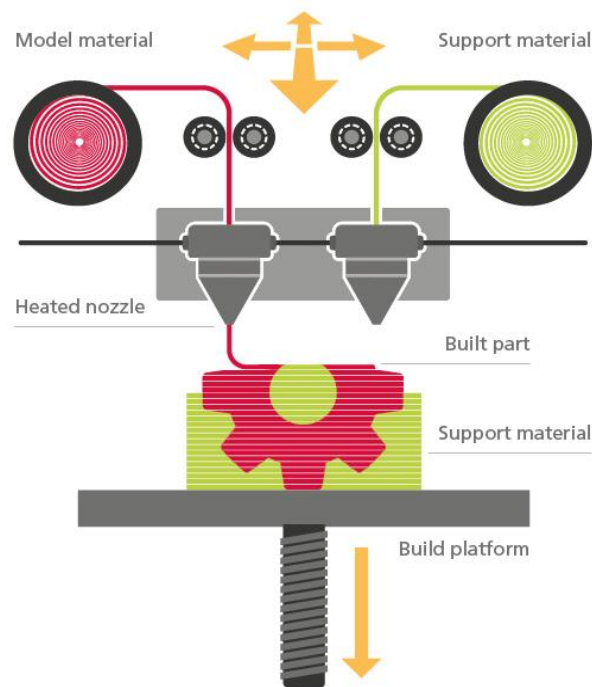
Fused Deposition Modelling (FDM) γνωστό και ως Fused Filament Fabrication (FFF) θεωρείται μια τεχνολογία προσθετικών κατασκευών που χρησιμοποιεί την αρχή εξώθησης υλικού, η οποία αποτελεί τη πιο διαδεδομένη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μηχανήματα αυτής της τεχνολογίας μπορούν να κινούνται σε τρεις γραμμικές κατευθύνσεις (x), (y) και (z), γνωστές ως και καρτεσιανές συντεταγμένες.

Αποτελούνται από:

- μία ή περισσότερες κεφαλές εξώθησης,
- μία επιφάνεια εκτύπωσης
- βηματικούς κινητήρες ή κινητήρες σέρβο, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μετακινήσουν το νήμα,
- την κεφαλή
- την βάση εκτύπωσης
- τον ανεμιστήρα ψύξης εκτύπωσης και κεφαλής

Το υλικό, συνήθως σύνθετο πολυμερές θερμοπλαστικό, σε μορφή νήματος, τροφοδοτείται από ένα καρούλι στην κεφαλή εξώθησης από μία διάταξη κυλίνδρων που δημιουργούν πίεση εξώθησης. Το ακροφύσιο θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία με αποτέλεσμα το υλικό να τήκεται και να διασκορπίζεται ομοιόμορφα από τον εξωθητή κατά μήκος της καθορισμένης διαδρομής. Για την εκτύπωση του εξαρτήματος, η κεφαλή του ακροφυσίου ακολουθεί διαδρομές ελεγχόμενες από υπολογιστή (κώδικας G), με αποτέλεσμα να εναποθέτει το ημι-ρευστό θερμοπλαστικό υλικό με ακρίβεια πάνω από μία θερμαινόμενη πλατφόρμα που στερεοποιείται σε περίπου 1/10 του δευτερολέπτου. Μετά την εναπόθεση, το εξωθημένο υλικό ψύχεται με τη βοήθεια ανεμιστήρα και συγχωνεύεται με το υπόλοιπο υλικό για να σχηματίσει το τυπωμένο στρώμα. (Doshi *et al.*, 2021) Εν τω μεταξύ, η πλατφόρμα εκτύπωσης χαμηλώνει κατά το ύψος της στρώσης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η βάση εκτύπωσης είναι συνήθως από γυαλί ή αλουμίνιο και θερμαίνεται για την αποφυγή στρέβλωσης ή ραγίσματος της κατασκευής. Για την υποστήριξη των ευαίσθητων σημείων του αντικειμένου κατασκευάζονται υποστηρίγματα, από το ίδιο ή διαφορετικό υλικό τα οποία αφαιρούνται εύκολα στην μετεπεξεργασία.





*Εικόνα 5: Απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM (rapidfab.ricoh-europe.com)*

Το λογισμικό κοπής (slicer) όπως προαναφέρθηκε καθορίζει τις διαδρομές εργαλείου, οι οποίες είναι ελεγχόμενες από το αρχείο 3D CAD του εκτυπωμένου δείγματος. Το λογισμικό χωρίζει το μοντέλο σε στρώματα με πάχη που ορίζει ο χρήστης. Το γέμισμα του μοντέλου (infill) είναι μία από τις παραμέτρους που ρυθμίζονται μέσω του χρήστη, οπότε το αντικείμενο μπορεί να είναι συμπαγές, άδειο ή να γεμίσει με κατάλληλες δομές υποστήριξης που δημιουργούνται με τεμαχισμό αλγορίθμων λογισμικού. Λόγω της ικανότητάς του να κατασκευάζει εσωτερικά καθορισμένες δομές, το FDM απλοποιεί τις διαδικασίες συναρμολόγησης και ως εκ τούτου μειώνει το κόστος. Η FDM αφαιρεί επίσης την ανάγκη δημιουργίας καλουπιών για την κατασκευή προϊόντων, η οποία είναι μια δαπανηρή επένδυση που πρέπει να γίνεται κάθε φορά που αλλάζει το σχέδιο. Ως αποτέλεσμα, η FDM είναι μια ιδιαίτερα αποτελεσματική τεχνολογία κατασκευής όπου απαιτείται υψηλό επίπεδο προσαρμογής του προϊόντος. (Prabhakar *et al.*, 2021) Τέλος, μερικές από τις κρίσιμες παραμέτρους επεξεργασίας της μεθόδου είναι το πάχος του στρώματος, η ταχύτητα εκτύπωσης και το πάχος του ακροφυσίου εξώθησης υλικού. (Bozkurt and Karayel, 2021) Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες που αναλύονται μόλις ολοκληρωθεί η

εκτύπωση ενός αντικειμένου δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία, εκτός από την αφαίρεσή των στηρίξεων.

### Στερεολιθογραφία- Vat Polymerization (SLA)

Τα βασικά μέρη της συσκευής στερεολιθογραφίας :

- Laser υπεριώδους ακτινοβολίας
- τα οπτικά συστήματα εστίασης της δέσμης
- Καθρέφτες κατεύθυνσης της ακτίνας Laser
- Δεξαμενή (VAT) που περιέχει το φωτοπολυμεριζόμενο υγρό
- Σύστημα ευθυγράμμισης της επιφάνειας του υγρού
- Σύστημα κατακόρυφη μετακίνησης του δοχείου, με βήματα ίσα με το πάχος των στρωμάτων.

Στη στερεολιθογραφία αντικείμενα παράγονται χρησιμοποιώντας θερμοσκληρυνόμενα φωτοπολυμερή υλικά. Φωτοπολυμερή θεωρούνται τα πολυμερή τα οποία αλλάζουν τις μηχανικές και χημικές τους ιδιότητες, μέσω μίας χημικής αντίδρασης όταν εκτεθούν στο φως. Ουσιαστικά ένα μόριο φωτοεκκινητή στη ρητίνη ανταποκρίνεται στο εισερχόμενο φως και κατά την ακτινοβολία, τοπικά ενεργοποιεί την αντίδραση χημικού πολυμερισμού, η οποία οδηγεί σε σκλήρυνση μόνο τις εκτεθειμένες περιοχές.

Το αντικείμενο δημιουργείται πάνω σε μία βάση, η οποία βυθίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή εποξική, ακρυλική ρητίνη ή ρητίνη βινυλαιθέρα. Αρχικά, η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό (ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί). (Schmidleithner and Kalaskar, 2016) Κατόπιν το υλικό επεξεργάζεται μέσω μίας δέσμης λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας για κάθε στρώση ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας καθρέφτες γνωστούς ως γαλβανόμετρα, που τοποθετούνται, ένας στον άξονα X και ένας στον άξονα Y. Η ακτίνα laser που στερεοποιεί το ρευστό ονομάζεται ακτίνα HeCd. Παράλληλα, μία δεύτερη ακτίνα laser χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώνει, ότι η επιφάνεια του ρευστού βρίσκεται σε σωστή θέση. Εν συνεχεία με τη βοήθεια της πλατφόρμας, η οποία κινείται στον άξονα Z, δημιουργούνται διαδοχικές στρώσεις και έπειτα το τελικό αντικείμενο. (Wang *et al.*, 2017) Μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το αντικείμενο

υπόκειται σε πλύση βυθισμένο σε λουτρό με ειδική ένωση για την αφαίρεση περιττών στοιχείων και έπειτα σε ειδικό φούρνο υπερυδών ακτινών για την βελτίωση των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Η ακτινοβολία μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο βασικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιείται στην παρούσα τεχνολογία (SLA) και είναι η σάρωση κάθε σημείου ξεχωριστά, κάτι που προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια και υψηλότερη ποιότητα επιφανείας. Ο δεύτερος τρόπος είναι με προβολή ολόκληρης εικόνας pixel σε κάθε στρώση, προσδίδοντας χαμηλότερη ποιότητα επιφανείας όπως συμβαίνει στην τεχνολογία DLP.

Για την δημιουργία ενός αντικειμένου και σε αυτή την μέθοδο απαιτούνται υποστηρικτικές δομές, οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν στην διαδικασία της προεκτύπωσης αυτόματα και αφαιρούνται συνήθως χειροκίνητα στο τέλος.



*Εικόνα 6: Απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης SLA (formlabs.com)*

Το κύριο προτέρημα της μεθόδου αυτής είναι η ταχύτητα της. Οι χρόνοι δημιουργίας του πρωτοτύπου είναι σχετικά μικροί σε σχέση με άλλες μεθόδους (SLS) και εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα και την γεωμετρία του αντικειμένου. Έπειτα η τεχνολογία SLA, διασφαλίζει ότι τα λεπτομερή, μικρά και πολύπλοκα εξαρτήματα

παράγονται στις σωστές διαστάσεις και με πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας. Για το βέλτιστο αποτέλεσμα βέβαια, πρέπει να ρυθμιστούν σημαντικοί παράγοντες, που αποτελούν το ύψος της στρώσης και η ανάλυση της πηγής φωτός. (Bozkurt and Karayel, 2021) Τέλος η διεργασία SLA, συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή καλουπιών για χύτευση υπό πίεση.

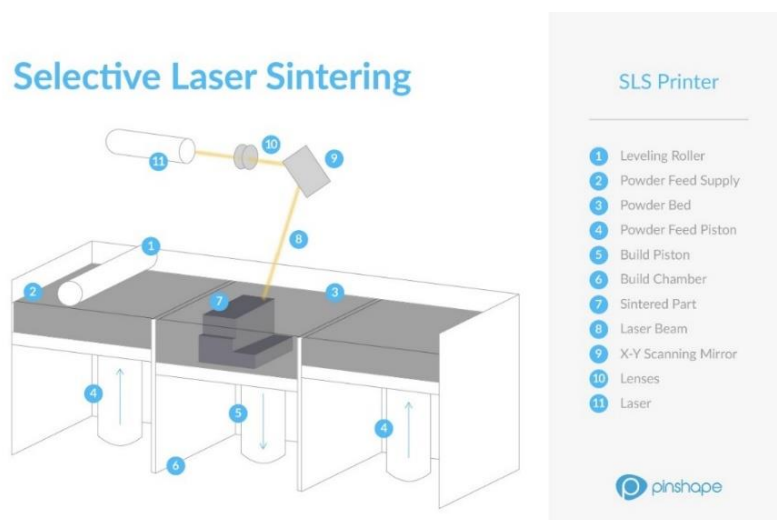
### Selective Laser Sintering (SLS)-Power Bed Fusion

Η τεχνολογία SLS θεωρείται μία ευέλικτη μέθοδος προσθετικών κατασκευών, η οποία επιτρέπει την παραγωγή εξαρτημάτων από διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, πολυμερών και κεραμικών, χρησιμοποιώντας την διεργασία της πυροσυσσωμάτωσης για την δημιουργία 3D αντικειμένων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί και την μέθοδο εκτύπωσης για την διεξαγωγή των πειραμάτων στην παρούσα εργασία. Ο εξοπλισμός SLS περιλαμβάνει: τον υπολογιστή ελέγχου, τον έλεγχο ατμόσφαιρας και το θάλαμο κατασκευής. Ο υπολογιστής ελέγχου βασίζεται σε λειτουργικό σύστημα UNIX, στο οποίο πραγματοποιείται η προεπεξεργασία του αντικειμένου με τη δημιουργία αρχείου STL και αρχείου τεμαχισμού. Ο υπολογιστής ελέγχου παρακολουθεί όλη τη διαδικασία κατασκευής. Η μονάδα ελέγχου ρυθμίζει τις συνθήκες ατμόσφαιρας του θαλάμου εκτύπωσης. Περιλαμβάνει τα όργανα φιλτραρίσματος και ανακύκλωσης των αερίων του θαλάμου διατηρώντας παράλληλα σταθερή τη θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θάλαμο ρυθμίζοντας παράλληλα την ποσότητα αζώτου μέσα στη μονάδα, όταν αυτό χρησιμοποιείται. Ο θάλαμος κατασκευής περιλαμβάνει το laser και το σύστημα διαχείρισης της πούδρας. Στο σύστημα διαχείρισης περιλαμβάνονται οι αντιστάσεις ή θερμικοί λαμπτήρες, τα πυρόμετρα, ο επιχριστής, και τα έμβολα τροφοδοσίας και εκτύπωσης.

Η τεχνολογία SLS θεωρείται μία ευέλικτη μέθοδος προσθετικών κατασκευών, η οποία επιτρέπει την παραγωγή εξαρτημάτων από διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, πολυμερών και κεραμικών, χρησιμοποιώντας την διεργασία της πυροσυσσωμάτωσης για την δημιουργία 3D αντικειμένων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποτελεί και την μέθοδο εκτύπωσης για την διεξαγωγή των πειραμάτων στην παρούσα εργασία. Η διαδικασία εκτύπωσης γίνεται ως εξής: Αρχικά,

τοποθετείται υλικό σε μορφή πούδρας στο έμβολο τροφοδοσίας. Έπειτά ο θάλαμος εκτύπωσης, ο οποίος αναλόγως το υλικό γεμίζει με άζωτο ή αργό προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη οξείδωση, πλησιάζει την θερμοκρασία τήξης του υλικού. Η προθέρμανση της κλίνης πρέπει να είναι ομοιόμορφη πάνω από ολόκληρη την επιφάνεια του υλικού για 2 βασικούς λόγους. Πρώτον, αυτή η θερμοκρασία θα περιορίσει την ποσότητα ισχύος λέιζερ που απαιτείται για την ενοποίηση του υλικού. (Kruth, Leu and Nakagawa, 1998) Δεύτερον, μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στην επιφάνεια του υλικού μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητες παραμορφώσεις διόγκωσης ή συρρίκνωσης του αντικειμένου.

Στη συνέχεια, το έμβολο εκτύπωσης μετακινείται προς τα κάτω σύμφωνα με το απαιτούμενο πάχος στρώσης και ένας επιχριστής μετακινεί την πούδρα από το τμήμα τροφοδοσίας στο τμήμα εκτύπωσης καθώς την απλώνει ομοιόμορφα. (Imanian and Biglari, 2022) Ανά μία στρώση κονιοποιημένου υλικού ένα λέιζερ (CO<sub>2</sub> laser) χρησιμοποιείται για τη σύντηξη του στην επιθυμητή γεωμετρία, στοχεύοντας την ακτίνα στα σημεία του χώρου που ορίζεται από ένα 3D μοντέλο, αναγκάζοντας τα να λιώσουν και να στερεοποιηθούν. Στη συνέχεια ένα νέο στρώμα σκόνης υλικού εφαρμόζεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Αυτό συμβαίνει για όλες τις στρώσεις, μέχρι να δημιουργηθεί το επιθυμητό αντικείμενο. (Lindberg *et al.*, 2018) Στο τέλος το αντικείμενο, υπόκειται σε συγκεκριμένη διεργασία για να είναι έτοιμο προς χρήση, χωρίς αυτή η διεργασία να βελτιώνει κάποιες από τις μηχανικές του ιδιότητες όπως στην περίπτωση του SLA.



Εικόνα 7: Απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης SLS (formlabs.com)

Η τεχνολογία SLS παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως τη χρήση υλικών εκτύπωσης μεγάλης ποικιλίας και την επαναχρησιμοποίηση τους μετά από κάθε εκτύπωση. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι πολυμερή, όπως νάιλον, πολυαμίδιο, μέταλλα, όπως χάλυβας τιτάνιο, κράματα και σύνθετα υλικά. Ανάλογα με το υλικό μπορεί να επιτευχθούν ανάλογες μηχανικές ιδιότητες με συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Αποτέλεσμα αυτού η τεχνολογία πλέον να χρησιμοποιείται για την δημιουργία τελικών εξαρτημάτων έτοιμων προς χρήση και όχι μόνο για την παραγωγή πρωτοτύπων.

Τα αντικείμενα που παράγονται με τη μέθοδο αυτή δεν απαιτούν την προσθήκη στηρίξεων στο εκτυπωμένο κομμάτι, όπως σε άλλες τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών (πχ SLA, FDM), εκτός σπάνιων περιπτώσεων, διότι προκαλείται στήριξη μέσω της παιπάλης που δεν συμμετέχει στην εκτύπωση. Έπειτά, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ακρίβεια αυτής της διαδικασίας χαρακτηρίζεται από το μέγεθος των σωματιδίων του υλικού, που κυμαίνεται μεταξύ 50-80 μm. (González-Henríquez, Sarabia-Vallejos and Rodriguez-Hernandez, 2019)

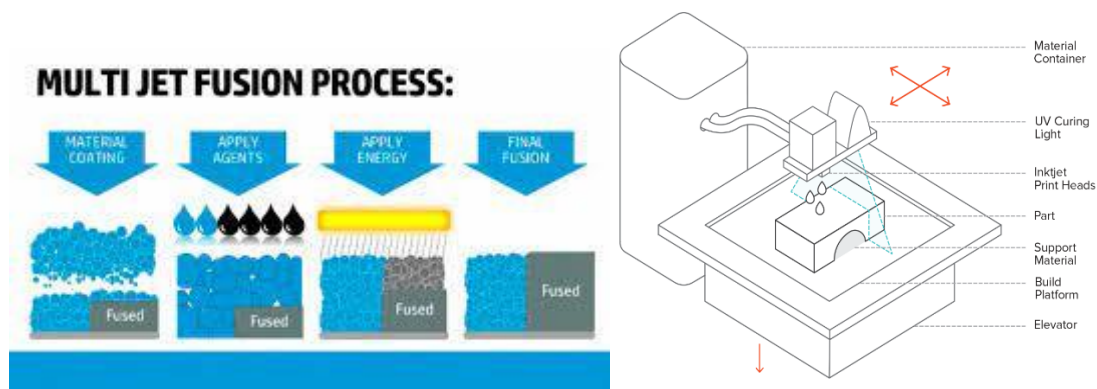
### Εναπόθεση Υλικού-Material Jetting (MJ)

Η μέθοδος εναπόθεσης υλικού δημιουργεί τρισδιάστατα αντικείμενα, με τον παρόμοιο τρόπο, όπως ένας δυσδιάστατος εκτυπωτής μελανιού. Ο εκτυπωτής αποτελείται από:

- το δοχείο του υλικού
- κεφαλές εξώθησης υλικού
- πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας
- βάση εκτύπωσης
- ανυψωτήρας κατά τον Z άξονα

Αρχικά η κεφαλή εκτύπωσης, που κινείται στο οριζόντιο επίπεδο εναποθέτει σταγονίδια υλικού στην προκαθορισμένη γεωμετρία, καθοδηγούμενη από το stl αρχείο, χρησιμοποιώντας είτε θερμική είτε πιεζοηλεκτρική μέθοδο. Το υλικό εκτοξεύεται σε μια πλατφόρμα κατασκευής χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους: είτε συνεχή είτε με προσέγγιση Drop on Demand.

Έπειτά, τα σταγονίδια υλικού στερεοποιούνται δημιουργώντας την πρώτη στρώση του αντικειμένου. Αυτά οι στρώματα κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 16μm και 28μm αναλόγως με τις δυνατότητες του μηχανήματος εκτύπωσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με τα στρώματα παράλληλα να ψύχονται ή να υπόκεινται σε υπεριώδη ακτινοβολία για να σκληρύνουν. Καθώς το υλικό πρέπει να εναποτεθεί σε σταγονίδια, τα διαθέσιμα υλικά για χρήση είναι περιορισμένα. (Mora, Pugno and Misseroni, 2022) Τα πολυμερή και τα κεριά είναι κατάλληλα και κοινώς χρησιμοποιούμενα υλικά, λόγω της παχύρρευστης φύσης τους και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες. Ολοκληρώνοντας, η μεταγενέστερη επεξεργασία περιλαμβάνει αφαίρεση υλικού υποστήριξης, που συνήθως πραγματοποιείται με πίεση νερού ή σε λουτρό υπερήχων. (Willems *et al.*, 2021) Όταν διαλυθούν σωστά, τα στηρίγματα δεν αφήνουν σημάδια στην επιφάνεια μετά την αφαίρεση.



Εικόνα 8: Απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης MJ (hubs.com)

Η συγκεκριμένη διεργασία αποτελεί μία από τις μεθόδους με την υψηλότερη ακρίβειά στις προσθετικές κατασκευές. Χάρη στην ακριβή εναπόθεση μικροσκοπικών σταγονιδίων υλικού, τα στρώματα μπορούν να εκτυπωθούν με ακρίβεια έως και 0,013mm, δίνοντας έτσι δυνατότητα για την παραγωγή εξαρτημάτων με πολύ λεία επιφάνεια και με μικρά αλλά εξαιρετικά ακριβή χαρακτηριστικά.

Μεγάλο μειονέκτημα της τεχνολογίας αποτελούν οι κακές μηχανικές ιδιότητες. Τα παραγόμενα αντικείμενα σε σύγκρισή με άλλες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης συνήθως παρουσιάζονται πιο αδύναμα, καθιστώντας την διεργασία ακατάλληλη για λειτουργικές εφαρμογές με αποτέλεσμα να δίνεται έμφαση σε εξαρτήματα για τα οποία η εμφάνιση έχει μεγαλύτερη σημασία από τη λειτουργία. Έπειτα, τα σταγονίδια αφού εναποτίθενται σε ένα περιορισμένο μέρος της κατασκευής κάθε



φορά, η διαδικασία απαιτεί περισσότερο χρόνο για να δημιουργηθεί ένα μέρος και έτσι οι χρόνοι εκτύπωσης αυξάνονται.

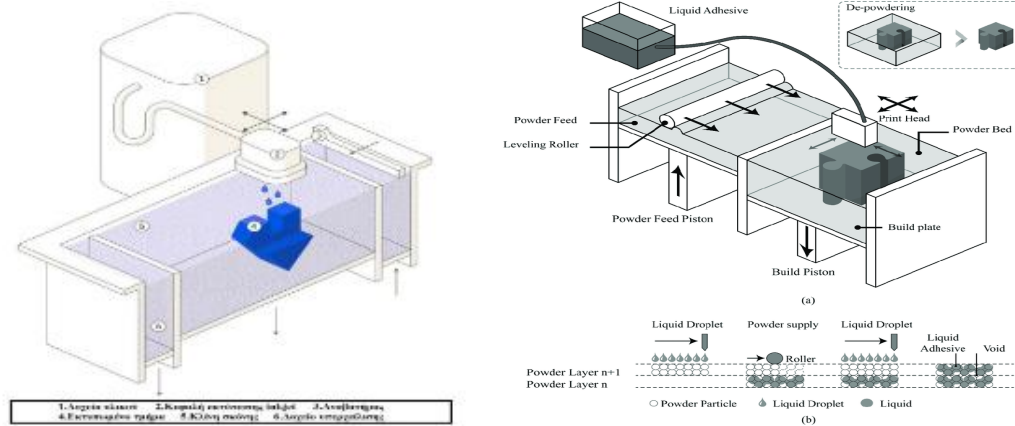
#### Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας - Binder Jetting (BJ)

Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει παρόμοια λειτουργία με την εναπόθεση υλικού που αναφέρθηκε παραπάνω και εντάσσεται στις τεχνολογίες εκτύπωσης Powder Bed fusion. Ένας εκτυπωτής Binder Jetting αποτελείται από:

- το έμβολο τροφοδοσίας
- το έμβολο εκτύπωσης
- τον κυλινδρικό επίχριστή
- το ακροφύσιο εκτύπωσης
- το δοχείο εναπόθεσης συνθετικού υλικού

Σε αυτό το είδος εκτύπωσης, αρχικά ένα ή πολλά ακροφύσια χρησιμοποιούνται για την έγχυση υγρού συνθετικού υλικού επιλεκτικά πάνω σε ένα λεπτό στρώμα σκόνης.(Stevens *et al.*, 2018) Τα σωματίδια σκόνης που διαβρέχονται από το συνδετικό διάλυμα προσκολλώνται μεταξύ τους, προκαλώντας στερεοποίηση του στρώματος. Το μέγεθος των σταγονιδίων του συνθετικού υλικού είναι περίπου 80 μm σε διάμετρο δίνοντας δυνατότητες υψηλής ακρίβειας στο τελικό αποτέλεσμα. Μόλις το στρώμα δημιουργηθεί, η πλακά εκτύπωσης χαμηλώνει κατά ένα επίπεδο (όσο και το πάχος στρώματος του μοντέλου και ένα νέο στρώμα κονιοποιημένο υλικού απλώνεται με την βοήθεια ενός κυλίνδρου με την διαδικασία να επαναλαμβάνεται διαδοχικά για να παραχθούν διαδοχικές στρώσεις επιλεγμένων περιοχών συγκολλημένης σκόνης μέχρι να ολοκληρωθεί το τελικό αντικείμενο.(Su *et al.*, 2021) Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο δεν απαιτεί οποιαδήποτε δομή στήριξης δεδομένου ότι η εναπομένουσα σκόνη είναι το υλικό υποστήριξης.





Εικόνα 9: Απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης BJ (3dprint.com)

Λόγω των υψηλών ταχυτήτων και της ευελιξίας των υλικών, το binder jetting ξεχωρίζει μεταξύ των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης ως τεχνολογία μεγάλου όγκου παραγωγής, χαμηλού κόστους με αποτέλεσμα τη βιωσιμότητα της 3D εκτύπωσης στις μάζες. Έπειτα, υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης περίπλοκων γεωμετριών με πολύ καλή ποιότητα επιφανείας, (Miao *et al.*, 2022) χωρίς να εφαρμόζεται πρόσθετη θερμότητα στο εξάρτημα (σε αντίθεση με τις διαδικασίες FDM, SLS, DMLS) επομένως δεν προκαλούνται ανεπιθύμητες παραμορφώσεις του εξαρτήματος. Ομοίως με το SLS, το Binder Jetting δεν απαιτεί δομές στήριξης επειδή το τμήμα περιβάλλεται από την αδέσμευτη σκόνη που λειτουργεί ως δομή στήριξης.

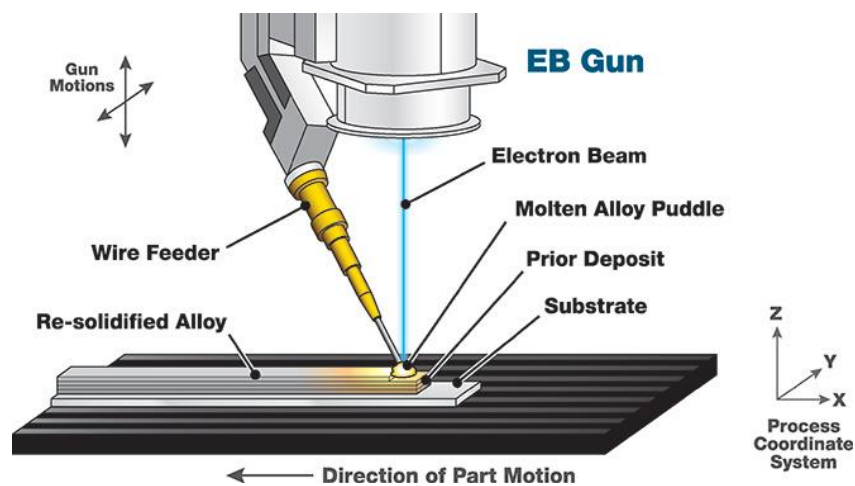
Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο Binder Jetting είναι κυρίως πολυμερή και πλαστικά. Παρά τα πλεονεκτήματα που προαναφέρθηκαν η τεχνολογία παρουσιάζει περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες απαιτώντας πρόσθετη επεξεργασία για την ενίσχυση τους. Οι περαιτέρω αυτές διεργασίες αυξάνουν δραστικά το χρόνο παραγωγής ενός τελικού προϊόντος έτοιμο προς χρήση προσθέτοντας αναπόφευκτα και κόστος στη συνολική διαδικασία. Τέλος, τα μέρη που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας διαδικασίες BJ τείνουν να μην έχουν ακρίβεια και λείες επιφάνειες.

### Διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη - Direct Energy Deposition

Η εναπόθεση μετάλλου με λέιζερ (Laser-Based Metal Deposition - LBMD) ανήκει στις διεργασίες εναπόθεσης με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη, όπως η τεχνολογία SLS. Η συσκευή εκτύπωσης είναι σχετικά απλή και αποτελείται από:

- την δέσμη laser ή ηλεκτρονίων ή πλάσμα
- τον τροφοδότη του υλικού
- την πλατφόρμα εκτύπωσης

Η μέθοδος λειτουργεί αρχικά με την εναπόθεση υλικού σε μορφή σκόνης ή νήματος σε συγκεκριμένα σημεία. (Kim *et al.*, 2021) Έπειτά χρησιμοποιώντας μία εστιασμένη πηγή ενέργειας, όπως ένα λέιζερ ή μία δέσμη ηλεκτρονίων ή ένα τόξο πλάσματος, το υλικό τήκεται την ίδια στιγμή που εναποτίθεται από ένα ακροφύσιο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να στερεοποιηθούν τα στρώματα και τελικά να δημιουργήσουν ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Η συγκεκριμένη τεχνολογία, επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επιδιόρθωσή αντικειμένων. (Zhang *et al.*, 2022)



**Εικόνα 10:** Απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης Direct Energy Deposition (DED) ([www.3dsourced.com](http://www.3dsourced.com))

Στην περίπτωση της δέσμης ηλεκτρονίων, η διαδικασία πρέπει να εκτελείται σε κενό για να αποτραπεί η αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αέρα ή η εκτροπή τους από αυτά. Τα συστήματα που βασίζονται σε λέιζερ απαιτούν έναν πλήρως αδρανή θάλαμο εάν εργάζονται με αντιδρώντα μέταλλα, που απαιτούν σημαντική ποσότητα αερίου και αρκετό χρόνο για να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα οξυγόνου.

Η DED τεχνολογία έχει την ικανότητα να παράγει σχετικά μεγάλα εξαρτήματα που απαιτούν ελάχιστο εξοπλισμό και σχετικά μικρή δευτερεύουσα επεξεργασία. Μεγάλο πλεονέκτημα, επίσης αποτελούν οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες της διεργασίας

σε συνδυασμό με τον ελάχιστο χρόνο παραγωγής και τη μηδενική σπατάλη υλικού. Επιπλέον, οι διαδικασίες DED μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή συστατικών με βαθμίδες σύνθεσης ή υβριδικών δομών που αποτελούνται από πολλαπλά υλικά με διαφορετικές συνθέσεις και δομές. Αρνητικό στοιχείο της τεχνολογίας αποτελεί η χαμηλή ακρίβεια επιφανείας καθώς και η ασυνέχεια που παρουσιάζουν οι στρώσεις. Παράλληλα το κόστος των εκτυπωτών είναι ιδιαίτερο υψηλό γι' αυτό και χρησιμοποιούνται κυρίως στην βιομηχανία.

Η παρούσα τεχνολογία χρησιμοποιεί κυρίως μέταλλα σε μορφή νήματος ή παιπάλης καθώς έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πολυμερή και κεραμικά. Το νήμα συνήθως κυμαίνεται από 1 έως 3mm διάμετρο και τα σωματίδια της πούδρας μεταξύ 50 και 150μm.

#### Διεργασίες επάλληλων φύλλων - Sheet Lamination (LOM, UAM)

Οι Διεργασίες επαλληλών φύλλων, δημιουργήθηκαν με σκοπό την ταχεία παραγωγή αντικειμένων μέσω της συγκόλλησης επάλληλων φύλλων από μέταλλο. Χρησιμοποιεί παρόμοιες μεθόδους με άλλες προσθετικές κατασκευές, αλλά αντί για υλικό σε μορφή νήματος ή σκόνης, χρησιμοποιούνται φύλλα μετάλλου. (Friel, 2015)

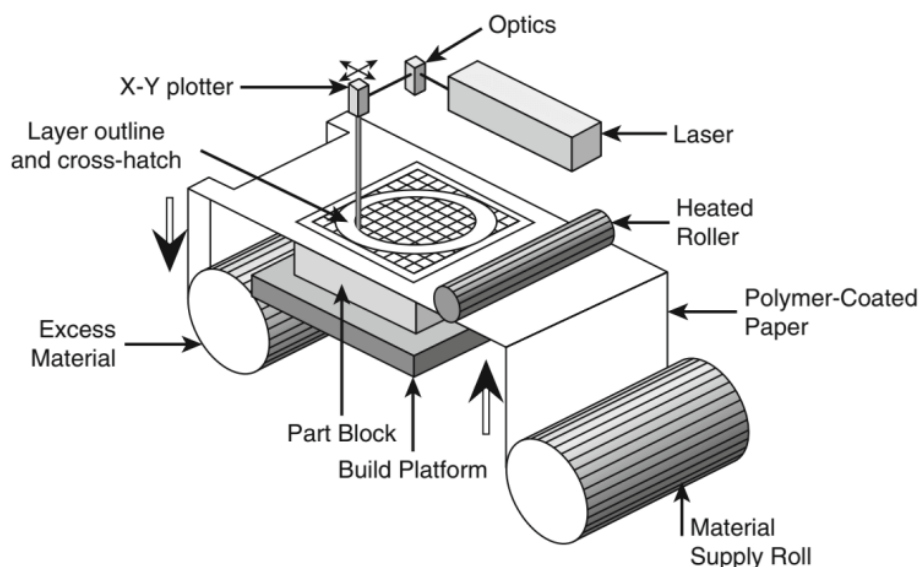
Το σύστημα εκτύπωσης της διεργασίας αποτελείται από:

- Laser υπεριώδους ακτινοβολίας
- τα οπτικά συστήματα εστίασης της δέσμης
- θερμαινόμενο κύλινδρο
- τροφοδότη υλικού
- πλατφόρμα εκτύπωσης

Η διαδικασία απαιτεί πρόσθετη κατεργασία CNC και αφαίρεση του μη δεσμευμένου μετάλλου, συχνά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης. Αρχικά το πρώτο φύλλο τοποθετείται στην θέση του κρεβατιού κοπής και έπειτα το υλικό συγκολλάτε με θερμική κόλλα. Κατόπιν ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από το υλικό πιέζοντάς το ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν. Για τη δημιουργία του αντικειμένου γίνεται μορφοποίηση μέσω κοπής περιμετρικά με λέιζερ ή ειδικού κοπτικού. Αφού κοπεί το πρώτο στρώμα, η βάση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται και το

επόμενο στρώμα προστίθεται με την διαδικασία να επαναλαμβάνεται, μέχρι τη δημιουργία του αντικειμένου.

Το πάχος του υλικό δεν είναι σταθερό. Συνεπώς, ένας αισθητήρας μετράει το πάχος του ελάσματος και το μοντέλο κόβεται ανάλογα. Πολύ συχνά πρέπει να γίνεται επικάλυψη του τελικού αντικειμένου με βερνίκι ώστε να μη προσβάλλεται και παραμορφώνεται από την υγρασία (ειδικά στην περίπτωση του χαρτιού).



*Εικόνα 11: Απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης Sheet Lamination (researchgate.net)*

Έπειτά μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλες μέθοδοι με διαφορετικές θερμικές και μηχανικές πηγές ενέργειας που περιλαμβάνουν θερμική συγκόλληση, σύσφιξη και υπερηχητικούς κραδασμούς. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ουσιαστικά οποιοδήποτε φύλλο με δυνατότητα έλασης. Χαρτί, πλαστικό και μερικές λαμαρίνες. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό είναι το χαρτί A4. Τα πλεονεκτήματα της παρούσας διεργασίας αποτελούν η ταχύτητα, το χαμηλό κόστος και η ποικιλία των υλικών. Τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένη τεχνολογίας είναι τα ποσοστά υπολειμμάτων υλικού, που δημιουργούν αρνητικές συνέπειες στο κόστος εκτύπωσης. (Derazkola, Khodabakhshi and Simchi, 2020) Τα φινιρίσματα, επίσης μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το υλικό και να απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Υστερεί στην ποιότητα επιφανείας και στην παραγωγή περιπλοκών γεωμετριών έχοντας παράλληλα αδύναμους δεσμούς μεταξύ των στρωμάτων. (Rouf *et al.*, 2022)

## 4. Υλικά που χρησιμοποιούνται στις Προσθετικές Κατασκευές

Υπάρχουν διάφοροι τύποι υλικών και μεγάλη ποικιλία στην αγορά που απευθύνονται στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Μέταλλα και κράματα, κεραμικά, σύνθετα υλικά, πολυμερή, βιοϋλικά, έξυπνα υλικά, υλικά εκτύπωσης τροφίμων, δομικά υλικά και ειδικά υλικά, αποτελούν τις κατηγορίες υλικών στις διεργασίες προσθετικών κατασκευών.

### Μέταλλα και κράματα

Κράματα είναι τα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στοιχεία, από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο, και εμφανίζουν τις ιδιότητες των μετάλλων. Τα μέταλλα και τα κράματα χρησιμοποιούνται στις μεθόδους Powder bed fusion, Material jetting, Binder jetting, Direct energy deposition και Sheet lamination, που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι αποσκοπούν στην τήξη των υλικών αυτών με δέσμη laser ή ηλεκτρονίων. Έχοντας περισσότερες δυνατότητες από συμβατικές μεθόδους κατεργασίες μετάλλου, προσδίδουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε περιπλοκές γεωμετρίες. Κράματα αλουμινίου, κράματα κοβαλτίου, κράματα νικελίου, ανοξείδωτος χάλυβας και κράματα τιτανίου χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροπορία, η φαρμακευτική και η αμυντική βιομηχανία, ανάλογα με τη χρήση και τις μηχανικές ιδιότητες που προσδίδει το κάθε υλικό. Για παράδειγμα, σε οδοντιατρικές εφαρμογές τα κράματα κοβαλτίου είναι ιδανικά, λόγω της ανθεκτικότητάς, της υψηλής ακαμψίας και της υψηλής θερμικής επεξεργασίας τους. Ενώ τα κράματα τιτανίου χρησιμοποιούνται στη δημιουργία εξαρτημάτων αεροσκαφών, εφόσον δεν οξειδώνονται, έχουν αντοχή στην διάβρωση, αντοχή σε υψηλά φορτία, ικανά να ανταπεξέλθουν σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. (Ranjan *et al.*, 2022) Πιο αναλυτικά παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα μέταλλα και κράματα που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών.

Το **καθαρό τιτάνιο** (Ti64 ή TiAl4V) είναι ένα από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέταλλα για 3D εκτύπωση και είναι σίγουρα ένα από τα πιο ευέλικτα, δεδομένου ότι είναι ισχυρό και ελαφρύ. Χρησιμοποιείται ευρέως σε βιοϊατρικό πεδίο λόγω υψηλής ειδικής αντοχής, αντίστασης στην διάβρωση σε βιολογικό περιβάλλον και

χαρακτηρίζεται από υψηλή βιοσυμβατότητα. Το μόνο μειονέκτημα είναι πώς θεωρείται πολύ δραστικό, κάτι το οποίο σημαίνει ότι μπορεί εύκολα να εκραγεί όταν είναι σε μορφή σκόνης. Γι' αυτό η 3D εκτύπωση πρέπει να πραγματοποιείται σε συνθήκες κενού ή σε ατμόσφαιρα αργού αερίου. (HAN and WANG, 2020)

Ο **ανοξειδωτος χάλυβας** (Stainless Steel) είναι από τα πιο προσιτά μέταλλα για 3D εκτύπωση. Την ίδια στιγμή, είναι πολύ ισχυρό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία βιομηχανικών αλλά και καλλιτεχνικών / σχεδιαστικών εφαρμογών. Ένα είδος κράματος χάλυβα, το οποίο περιέχει επίσης κοβάλτιο και νικέλιο (cobalt and nickel) είναι ιδιαίτερα δύσκολο να σπάσει, ενώ την ίδια στιγμή έχει πολύ υψηλές ελαστικές ιδιότητες.

Το **κοβάλτιο χρωμίου** (Cobalt Chromium) έχει κατοχυρωθεί ως απαραίτητο βιοϋλικό σε πληθώρα ιατρικών εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται σε ορθοπεδικές, καρδιαγγειακές και οδοντιατρικές εφαρμογές χάρη στις εξαιρετικές μηχανικές τους ιδιότητες. Έπειτά χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή στη διάβρωση και την φθορά, ενώ έχει πολύ καλή βιοσυμβατότητα και σχετικά χαμηλό κόστος. (Narushima, Ueda and Alfirano, 2015)

Το **αλουμίνιο** (Aluminium) έχει αντοχή στην διάβρωση, χαμηλό ειδικό βάρος σε συνδυασμό με ανθεκτικότητα. Γενικότερα έχει χαμηλότερη πυκνότητα σε σύγκριση με άλλους χάλυβες και χαρακτηρίζεται από υψηλή απορρόφηση ενέργεια σύγκρουσης ανά μονάδα βάρους, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως στην αεροναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Είναι μη μαγνητικό υλικό με πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, αδιαπέραστο από τους μικροοργανισμούς & το φως, όλκιμο και 100% ανακυκλώσιμο. (Fatchurrohman and Sulaiman, 2018)

Ο **χαλκός** (Copper), ο **ορείχαλκος** (Brass) ο **Μπρούντζος** (Bronze) και ο **σίδηρος** (iron) χρησιμοποιούνται κυρίως σε διαδικασίες χύτευσης ή ως νήμα περιεκτικότητας περίπου 80%, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αποτελείται από PLA, που αναλύεται παρακάτω. Δεν είναι ιδανικά υλικά για βιομηχανικές εφαρμογές και χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη βιοτεχνία, και για σκοπούς δημιουργίας τέχνης.

Ο **χρυσός** (Gold), ο **λευκόχρυσος** (platinum), το **ασήμι** (Silver) χρησιμοποιούνται κυρίως στις τεχνολογίες Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion). Τα

πολύτιμα μέταλλα χρησιμοποιούνται για κοσμήματα, ιατρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές.

### Κεραμικά

Τα κεραμικά υλικά αποτελούν μια μεγάλη και πολυσχιδή κατηγορία υλικών. Οι εφαρμογές τους είναι πάρα πολλές και ποικίλλουν από καλλιτεχνικές όπως π.χ. χρωματιστά, γυάλινα διακοσμητικά έως τις λεγόμενες <<πολύ υψηλής τεχνολογίας>> όπως π.χ. κεραμικά πλακίδια που χρησιμοποιήθηκαν σε διαστημικό λεωφορείο. Λόγω των διαφόρων εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, τα κεραμικά χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της χημικής βιομηχανίας, του τομέα των ηλεκτρονικών, της αεροδιαστημικής και της βιοϊατρικής μηχανικής. Τα κεραμικά είναι κατά κανόνα ψαθυρά, κακοί ηλεκτρικοί αγωγοί καλοί θερμομονωτές, ενώ μπορούν επίσης να είναι διαφανή. Είναι πάντα ανόργανα αλλά μπορούν να είναι κρυσταλλικά, μερικώς κρυσταλλικά ή άμορφα. Τα κεραμικά είναι ενωμένα με ισχυρούς πρωτεύοντες δεσμούς. Αυτοί κατά κύριο λόγο είναι είτε ιοντικοί είτε ομοιοπολικοί και σε μερικές περιπτώσεις μικτοί. Χαρακτηρίζονται, ως υλικά με υψηλό σημείο τήξης και τείνουν να έχουν υψηλά μέτρα ελαστικότητας. Γενικότερα, οι ιδιότητες των κεραμικών περιλαμβάνουν υψηλή μηχανική αντοχή και σκληρότητα, καλή θερμική και χημική σταθερότητα, οπτική, ηλεκτρική και μαγνητική απόδοση, ενώ θεωρούνται ανθεκτικά σε συμπίεση και χημική διάβρωση αλλά εύθραυστα και αδύναμα στην διάτμηση και την ένταση.

Οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν επί του παρόντος να κατασκευάσουν τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα εφαρμόζοντας κεραμικά χωρίς την εμφάνιση ελαττωμάτων δομής, όπως εγκοπές, ρωγμές και πόρους προσαρμόζοντας τις παραμέτρους της διαδικασίας, με αποτέλεσμα το παραγόμενο προϊόν να έχει υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες, από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Μέσω των προσθετικών κατασκευών δίδονται και για τα κεραμικά υλικά δυνατότητες υλοποίησης συνθέτων γεωμετριών. (Chen *et al.*, 2019) Έπειτα, κατηγοριοποιούνται σε κεραμικά υπό μορφή πολτού, υπό μορφή σκόνης και υπό μορφή στερεών και χρησιμοποιούνται ανάλογα στις παραπάνω τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών που αναφέρθηκαν. (Hwa *et al.*, 2017)

Πιο αναλυτικά τα κεραμικά διακρίνονται σε δύο κύριες ομάδες: τα οξειδία και τα μη οξειδία. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τα μεταλλικά οξειδία όπως αλουμίνα, ζirkόνια και σίλικά. Η άλλη ομάδα, περιλαμβάνει τα κεραμικά χωρίς οξειδία, και αποτελείται από υλικά όπως καρβίδιο του πυριτίου, βόριο πυρίτιο και νιτρίδιο του πυριτίου μεταξύ άλλων.

### **Αλουμίνα**

Η αλουμίνα (οξείδιο του αργιλίου) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό, καθώς και το πιο οικονομικό υλικό αυτής της κατηγορίας. Χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα σκληρότητας (σχεδόν τριπλάσια σκληρότητα από ανοξείδωτο χάλυβα), καλή αντοχή στη διάβρωση και τη θερμοκρασία. (Mariani *et al.*, 2021)

### **Ζirkονία**

Το ζirkόνιο (διοξείδιο του ζirkονίου) βασίζεται σε ζirkόνιο που είναι μεταλλικό στοιχείο. Τα κύρια χαρακτηριστικά του Zirconia είναι: χαμηλή θερμική αγωγιμότητα με εξαιρετική θερμομόνωση και πολύ υψηλή αντοχή στη διάδοση ρωγμών. Τα κεραμικά ζirkονίας παρέχουν μοναδικές ιδιότητες στον τομέα των βιοϊατρικών εφαρμογών περιορίζοντας τη φλεγμονώδη διήθηση και παρέχοντας καλή ενσωμάτωση των μαλακών μορίων. Βέβαια το ζirkόνιο και γενικότερα τα κεραμικά υψηλής αντοχής είναι σχετικά δύσκολο να επεξεργαστούν με αφαιρετικές μεθόδους CNC. (Willems *et al.*, 2021)

### **Πυρίτιο**

Το Silica ( $\text{SiO}_2$ ) είναι γνωστό για την ανθεκτικότητα του στις ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες και τη δυνατότητα του στη χημική διάλυση. Για αυτούς τους λόγους, χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή κελυφών σε αεροδιαστημικές και ενεργειακές εφαρμογές.

### **Κεραμικά χωρίς οξειδία**

Τα κεραμικά που δεν περιέχουν οξειδία έχουν καλύτερη απόδοση σε ακραίες συνθήκες, όπως για παράδειγμα, τις υψηλότερες θερμοκρασίες. Το καρβίδιο του πυριτίου και το νιτρίδιο του πυριτίου, που αποτελούν κεραμικά μη οξειδίου έχουν τη δυνατότητα να αντέξουν σε θερμοκρασίες έως 2400 βαθμούς Κελσίου. Επιπλέον, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση, σκληρότητα και αντοχή στην οξείδωση.



### **Καρβίδιο του πυριτίου**

Το καρβίδιο του πυριτίου είναι σκληρό (τέσσερις φορές πιο σκληρό από τον ανοξείδωτο χάλυβα). Είναι πολύ ελαφρύτερο και σκληρότερο από άλλα κεραμικά και είναι ανθεκτικό στα οξέα. Σε σχέση με τα άλλα κεραμικά το καρβίδιο του πυριτίου θεωρείται το πιο ανθεκτικό στη διάβρωση, γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε πολλά κρίσιμα πεδία, όπως εξαρτήματα αεροδιαστημικής, εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και συστήματα θερμικής διαχείρισης. Συναντάται κυρίως σε μορφή παιπάλης.(Fleisher *et al.*, 2019)

### **Καρβίδιο του βορίου**

Το καρβίδιο του βορίου χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας λόγω του εξαιρετικά υψηλού σημείου τήξεως (3000 ° C), της υψηλής αντοχής του στην οξείδωση και της υψηλής θερμικής και ηλεκτρικής του αγωγιμότητας.

### **Νιτρίδιο αλουμινίου**

Το νιτρίδιο αλουμινίου χαρακτηρίζεται από έναν συνδυασμού υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, σταθερότητας υψηλής θερμοκρασίας, χαμηλής θερμικής διαστολής, εξαιρετικής ηλεκτρικής μόνωσης και μεγάλου διάκενου ζώνης. Αυτές οι ιδιότητες το συνιστώνται ιδιαίτερα στη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών, και σε τεχνολογίες όπως το υπόστρωμα κυκλώματος, οι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς, οι συσκευές μικροκυμάτων και οι διόδους εκπομπής υπεριώδους φωτός. Η πυροσυσσωμάτωση είναι η κοινή προσέγγιση για την παρασκευή πολυκρυσταλλικών κεραμικών υψηλής ποιότητας και σε αυτή την περίπτωση. (Aguilar *et al.*, 2019)

### **Νιτρίδιο πυριτίου**

Το Silicon Nitride είναι από τα πιο σκληρά και ανθεκτικά τεχνικά κεραμικά. Παρουσιάζει πολύ χαμηλή πυκνότητα, υψηλή αντοχή σε θραύση, καλή αντοχή σε κάμψη και εξαιρετική αντοχή σε θερμικό σοκ. Η εφαρμογή του βρίσκεται στα εξαρτήματα αντλιών και βαλβίδων.

### Σύνθετα Υλικά

Τα σύνθετα υλικά είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων υλικών που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των μηχανικών και δομικών ιδιοτήτων ενός νέου υλικού που προκύπτει. Το ένα εκ των δύο συστατικών μερών, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. (Wang *et al.*, 2017) Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε δομικές εφαρμογές που σχετίζονται με την άμυνα, την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική και τις βιομηχανίες που βασίζονται στον αθλητισμό. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ελαφρών εξαρτημάτων με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και ακαμψία. Σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους παραγωγής, στις προσθετικές κατασκευές τα σύνθετα υλικά αποτελούν ελκυστική επιλογή για τον καταναλωτή λόγω της διαθεσιμότητας τους, των καλύτερων μηχανικών χαρακτηριστικών τους και της οικονομικής προσαρμογής προϊόντων με υψηλή ακρίβεια. Σύνθετα υλικά μπορούν να επιλεγούν ώστε να προκύψουν ασυνήθιστοι συνδυασμοί δυσκαμψίας, μηχανική αντοχής, πυκνότητας, συμπεριφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχής σε διάβρωση σκληρότητας ή αγωγιμότητας. Η ενσωμάτωση ενισχύσεων σωματιδίων, ινών ή νανοϋλικών σε πολυμερή επιτρέπει την κατασκευή σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή μηχανική απόδοση και εξαιρετική λειτουργικότητα. Η διαδικασία δημιουργίας και η απόδοση των σύνθετων υλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ελεγχόμενη και κατανοητή σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, που η ικανότητα ελέγχου της πολύπλοκης εσωτερικής δομής είναι περιορισμένη. (Wang *et al.*, 2017)

Τα σύνθετα υλικά συνήθως περιλαμβάνουν σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Στις σύνθετες δομές από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, οι ίνες παρέχουν ακαμψία και αντοχή ενώ η μήτρα που εμπεριέχεται το πλαστικό μεταφέρει την πίεση μεταξύ των ινών με αποτέλεσμα να τις προστατεύει. Τα πλαστικά ενισχυμένα με ανθρακονήματα

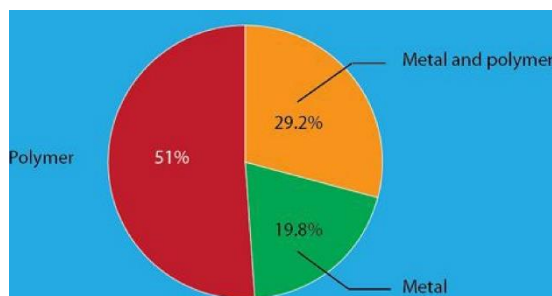
χαρακτηρίζονται ως ελαφριά υλικά με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και επιλέγονται κυρίως στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας. (Moon *et al.*, 2019) Τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούνται ευρέως για διάφορους σκοπούς στην τρισδιάστατη εκτύπωση και έχουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών χρήσεων λόγω του ονομαστικού κόστους και της καλής απόδοσής τους. Για παράδειγμα, το Fiber glass έχει ισχυρή θερμική αγωγιμότητα και χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Επιπλέον, το Fiber glass δεν μπορεί να καεί και δεν επηρεάζεται από τις θερμοκρασίες στη διαδικασία παραγωγής, καθιστώντας το ιδανικό για τρισδιάστατη εκτύπωση.

### Πολυμερή

Ο όρος πολυμερές σημαίνει <<πολλά μέρη>> και μέσα σε αυτό το πλαίσιο, ο όρος Mer αναφέρεται σε μία μοναδιαία δομική ομάδα ατόμων που χαρακτηρίζουν την διάταξη ενός πολυμερούς. Τα πολυμερή αποτελούνται από αλυσίδες μορίων. Πολυμερισμός είναι η διαδικασία κατά την οποία μικρά μόρια αποτελούμενα από μία ή λίγες δομικές μονάδες (γνωστά ως μονομερή ή ολιγομερή) ενώνονται χημικά, ώστε να δημιουργήσουν ένα πολυμερές.

Τα πλαστικά είναι υλικά που αποτελούνται κυρίως από πολυμερή που είτε βρίσκονται στη φύση και τροποποιούνται κατάλληλα, είτε δημιουργούνται τεχνητά. Τα πλαστικά χρησιμοποιούνται σε έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών που περιλαμβάνουν ρούχα, παιχνίδια, οικιακές συσκευές, δομικά και διακοσμητικά αντικείμενα και πολλά άλλα. Θεωρείται πως το πιο διαδεδομένο και απαραίτητο υλικό στις προσθετικές κατασκευές είναι το πολυμερές λόγω της ευρείας διαθεσιμότητάς του, των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του και του χαμηλού κόστους αλλά και λόγω του σχετικά χαμηλού σημείου τήξης του. Τα πολυμερή υλικά είναι ευέλικτα ως προς την επεξεργασία τους και ποικίλουν σε μορφή αναλόγως με την τεχνολογία που πρόκειται να κατεργαστούν. Για παράδειγμα, στην τεχνολογία εναπόθεσης υλικού (FDM) το πολυμερές συναντάται σε μορφή νήματος, στην διεργασία επάλληλων φύλλων (LOM) σε μορφή ελασμάτων και στην επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) σε μορφή πούδρα. (Camínero *et al.*, 2018) Στην

παρούσα εργασία και συγκεκριμένα στο πειραματικό μέρος γίνεται χρήση πολυμερούς υλικού και συγκεκριμένα πολυαμιδίου.



*Εικόνα 12: Ποσοστιαία χρήση υλικών στις προσθετικές κατασκευές (sciencedirect.com)*

Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό τη χρήση τους και τα διαχωρίζουν στις παρακάτω τρεις κατηγορίες :

- **Θερμοπλαστικά (thermoplastics)**

Τα μόρια στα θερμοπλαστικά συνδέονται σε γραμμική μορφή, με γραμμικές αλυσίδες που παραμένουν ανεξάρτητες από τις γειτονικές. Κατά τη θέρμανση τους τα μακρομόρια τους χάνουν τη συνοχή τους και μπορούν να ολισθαίνουν μεταξύ τους, πράγμα που δίνει τη δυνατότητα στο πολυμερές να γίνεται εύπλαστο. Μπορούν να διατηρηθούν σε αυτή την κατάσταση για όσο επιδρά η θερμότητα. Η απόψυξη που ακολουθεί δίνει στερεό υλικό ενώ η διεργασία είναι εξ' ολοκλήρου αντιστρεπτή. Αναλόγως τη χημική τους σύσταση, τα θερμοπλαστικά πολυμερή μπορεί να είναι στερεά ή ρευστά. Επίσης είναι ευαίσθητα στους διαλύτες και στη θερμοκρασία. Είναι προϊόντα αντίδρασης με προσθήκη ή συμπύκνωσης. Τα φθοροπολυμερή, τα πολυαμίδια και το πολυστυρένιο είναι μερικά παραδείγματα θερμοπλαστικού.

- **Θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings)**

Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα αποτελούνται από μη γραμμικούς δεσμούς μικρών ,σχετικά, μακρομορίων. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή με θέρμανση μπορούν να μορφοποιηθούν υπό πίεση. Η θερμοσκλήρυνση όμως δεν είναι επαναληπτική, δεν ισχύει αυτό που ισχύει στα θερμοπλαστικά. Περαιτέρω κατεργασία εδώ, οδηγεί σε πυκνή δικτυωτή δομή και σε προϊόντα που είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και δεν επιδέχονται διαμόρφωση με επιπλέον θέρμανση ή πίεση. Μερικά τέτοια υλικά είναι οι πολυεστέρες ,τα φαινολικά πολυμερή, οι εποξικές ρητίνες κλπ.

- **Ελαστομερή (elastomers)**

Τέλος, τα ελαστομερή χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα τους να επιδέχονται κατά τον εφελκυσμό πολύ μεγάλη επιμήκυνση και ταχύτατη πλήρη επαναφορά όταν αποφορτίζονται, είναι δηλαδή υπερελαστικά. Τέτοια υλικά είναι το καουτσούκ, οι σιλικόνες κλπ. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα πολυμερή παίζουν κομβικό ρόλο στην εξέλιξη προϊόντων που καλύπτουν καθημερινές αλλά και πιο εξειδικευμένες ανάγκες. Αυτό οφείλεται στο ότι μπορούμε μέσω των προαναφερθέντων μεθόδων και συνδυασμών. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται κάποια από τα πολυμερή υλικά στις προσθετικές κατασκευές. (Καλτσής, 2017)

Το Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρόλιο (Acrylonitrile Butadiene Styrene - **ABS**) και το Πολυγαλακτικό Οξύ (Polylactic Acid - **PLA**) είναι από τα πιο διαδεδομένα πολυμερή υλικά. Το Ακρυλονιτρίλιο, είναι ένα συνθετικό μονομερές που παράγεται από προπυλένιο και αμμωνία. Αυτό το συστατικό συμβάλλει στη χημική αντοχή και στη θερμική σταθερότητα. Το Βουταδιένιο, παράγεται ως υποπροϊόν της παραγωγής αιθυλενίου από κροτίδες ατμού. Αυτό το εξάρτημα προσφέρει σκληρότητα και αντοχή σε κρούση στο πολυμερές. Τέλος το Στυρένιο, παρασκευάζεται με αφυδρογόνωση και παρέχει ακαμψία και δυνατότητα επεξεργασίας στο πλαστικό ABS. (Kumar, Ahuja and Singh, 2021)

Το **ABS** είναι παράγωγο πετρελαίου και εκλύονται μικρές αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση. Είναι λιγότερο εύθραυστο και πιο όλκιμο με μεγάλη θερμοκρασιακή αντίσταση. Συνιστάται για πιο απαιτητικές εφαρμογές και προτυποποίηση μοντέλων. Το σημείο τήξης του είναι υψηλό (Θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ 220-235° C) σε σχέση με το PLA (Θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ 185-210°C). Ως θερμοπλαστικό είναι άμορφο στη φύση και έχει υψηλή αντοχή στην κρούση, αντοχή στη θερμότητα και σκληρότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, καλή ακαμψία και μικρό βάρος, ενώ παραμένει πολύ προσιτό από άποψη τιμής. Εμφανίζεται σε μορφή νήματος και χρησιμοποιείται κυρίως στην τεχνολογία FDM και σε συνδυασμό με PLA εκτυπώνονται ευκολότερα από άλλα τεχνικά και φθηνά θερμοπλαστικά. (Angelopoulos *et al.*, 2022) Σε αντίθεση με το PLA, το ABS ανήκει στην κατηγορία των πλαστικών που αποτελούν προϊόντα πετρελαίου. Συνήθως κατά την εκτύπωση του εκλύονται σε μικρό βαθμό αναθυμιάσεις.

Το **PLA** δημιουργείται με την βοήθεια πολυμερών που είναι βιοδιασπώμενοι πολυεστέρες και συνήθως λαμβάνεται από γεωργικές καλλιέργειες όπως καλαμπόκι και πατάτες μέσω βακτηριακής ζύμωσης υδατανθράκων. Τα δύο κύρια μονομερή που συνθέτουν το πολυγαλακτικό οξύ είναι 1) το γαλακτικό οξύ και 2) κυκλικός διεστέρας, λακτίδιο. Η δημιουργία του μπορεί να πραγματοποιηθεί από βιοπολυμερή και από χημικά επεξεργασμένα μονομερή, ενώ λόγω της βιοσυμβατότητάς του με το ανθρώπινο σώμα, είναι ενδεδειγμένο για ιατρικές εφαρμογές. Το PLA εκτυπώνεται εύκολα, παρουσιάζοντας χαμηλότερη θερμοκρασία εκτύπωσης από το ABS χωρίς να παραμορφώνεται τόσο εύκολα. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης PLA όπως η ελαχιστοποίηση βάρους, η μειωμένη θερμική αγωγιμότητα και πως θεωρείται ανακυκλώσιμο υλικό. Βέβαια υπάρχουν διάφοροι τύποι PLA με μεγαλύτερα μηχανικά και καμπτικά χαρακτηριστικά με βελτιωμένες θερμικές παραμορφώσεις, όπως το PLA+ ή το Polymax PLA. (Farah, Anderson and Langer, 2016)

Το **PolyVinyl Alcohol (PVA)** είναι ένα συνθετικό πολυμερές νήμα που σχηματίζεται από πολυμερισμό οξικού βινυλίου. Είναι υδροδιαλυτά υλικά και χρησιμοποιούνται ως υλικό υποστήριξης, κατά την εκτύπωση, στα σημεία των αντικειμένων με μεγάλες κλίσεις. Το νήμα PVA έχει ημιδιαφανή, λευκή εμφάνιση. Είναι ανθεκτικό στο λάδι στο γράσο και στους διαλύτες, και έχει εξαιρετικές συγκολλητικές ιδιότητες. Έχει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και ευκαμψία. Γενικότερα διαλύεται ευκολότερα σε ζεστό νερό και έχει θερμοκρασία τήξης 205-220 °C.

Το **πολυαμίδιο(PA)** αποτελεί ένα μακρομόριο με επαναλαμβανόμενες μονάδες συνδεδεμένες με αμιδικούς δεσμούς. Τα πολυαμίδια υπάρχουν και φυσικά και τεχνητά. Μερικά παραδείγματα φυσικών πολυαμιδίων είναι οι πρωτεΐνες, το μαλλί και το μετάξι. Τεχνητά κατασκευασμένα πολυαμίδια μπορούν να παραχθούν μέσω πολυμερισμού σταδιακής ανάπτυξης ή σύνδεσης στερεής φάσης δίνοντας υλικά όπως το νάιλον και το πολυασπάρτικό νάτριο. Το υλικό εμφανίζεται σε μορφή παιπάλης και χρησιμοποιείται κυρίως στις τεχνολογίες power bed fusion, όπως SLS, SLM κ.α. Τα πολυαμίδια είναι κρυσταλλικά πολυμερή που παράγονται συνήθως από τη συμπύκνωση ενός διοξέος και μιας διαμίνης. Τα πολυαμίδια υψηλού μοριακού βάρους είναι κοινώς γνωστά ως νάιλον. Οι εφαρμογές και οι χρήσεις PA ποικίλουν και πρέπει να καλύπτουν συγκεκριμένες προδιαγραφές όπως: ιδιότητες τριβής

ολίσθησης, υψηλή θερμική αντίσταση, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή σε κρούση, καλές ελαστικές ιδιότητες, αντοχή σε χημικά και υψηλή ακρίβεια διαστάσεων.(Goodridge, Tuck and Hague, 2012)

Τα μοντέλα πολυαμιδίου δεν ενδείκνυται για εφαρμογές που έχουν άμεση επαφή με περιβάλλον υγρασίας, καθώς απορροφούν την υγρασία. Μέσω της υγρασίας μπορούν να δημιουργηθούν αρνητικές επιπτώσεις στις διαστάσεις του αντικειμένου. Γενικά, η αντοχή στην κρούση και η ευκαμψία τείνουν να αυξάνονται με την περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ η αντοχή και η ακαμψία κάτω από τη θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού (< 50–80°C) μειώνονται. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις το υλικό μπορεί να επεξεργαστεί και να γίνει υδατοστεγές. Επίσης, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στα μοντέλα με μεγάλες επίπεδες επιφάνειες ή πλάκες καθώς όταν ένα τέτοιο μοντέλο ψυχθεί είναι πιθανόν να παραμορφωθεί.

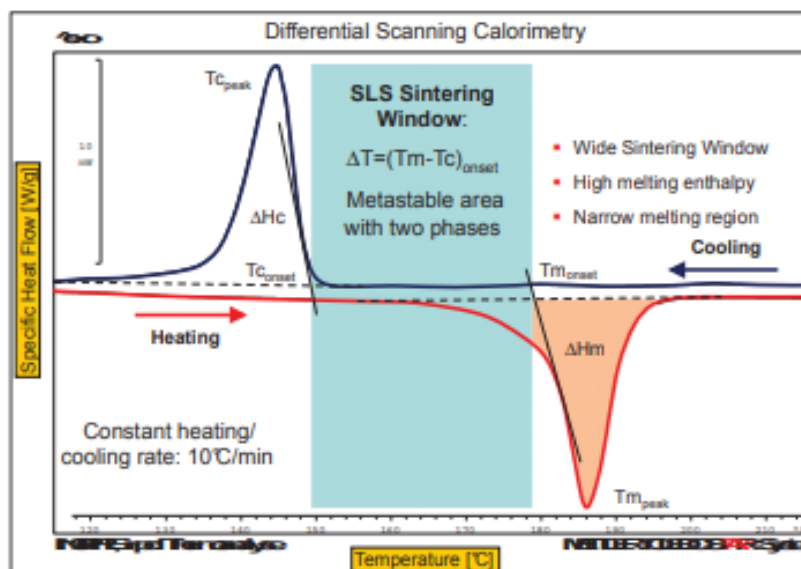
### Πολυαμίδιο PA12

Το **PA12** πολυαμίδιο αποτελεί το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο πολυμερές υλικό στην τεχνολογία SLS. Το PA12 συναντάται σε μορφή παιπάλης και παρουσιάζει αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τις εγγενείς και τις εξωγενείς. Οι εγγενείς ιδιότητες αφορούν κυρίως θερμικές, οπτικές και ρεολογικές παραμέτρους, οι οποίες δίνονται συνήθως από τη μοριακή δομή του ίδιου του πολυμερούς και δεν μπορούν να επηρεαστούν εύκολα. Οι εξωγενείς ιδιότητες σχετίζονται με τα σωματίδια και την πούδρα και μπορούν να επεξεργαστούν με μία συγκεκριμένη προεργασία.

Η θερμοκρασία όπως έχει ήδη αναφερθεί αποτελεί κύριο παράγοντα για την δημιουργία του τελικού αποτελέσματος. Στην διεργασία της πυροσυσσωμάτωσης τρεις χαρακτηρίζονται ως κρίσιμες θερμοκρασίες, η θερμοκρασία κρυστάλλωσης η θερμοκρασία τήξης και η θερμοκρασία πυροσυσσωμάτωσης του υλικού.

Γενικότερα στην τεχνολογία SLS η διαδικασία που αφορά την κρυστάλλωση πρέπει να παρατείνεται όσο το δυνατό περισσότερο, τουλάχιστον για κάποιες στρώσεις υλικού. Έτσι, η θερμοκρασία επεξεργασίας πρέπει να ελέγχεται με ακρίβεια μεταξύ του σημείου τήξης και του σημείου κρυστάλλωσης. Αυτή η θερμοδυναμική περιοχή του υπόψυκτου τήγματος πολυμερών ονομάζεται «Sinterit window» της επεξεργασίας SLS για ένα δεδομένο πολυμερές. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα

ιδανικό διάγραμμα DSC (Differential Scanning Calorimetry) για το PA12, το οποίο ουσιαστικά αναλύει τη μέτρηση των μεταβολών της ενθαλπίας που οφείλονται σε αλλαγές στις φυσικές και χημικές ιδιότητες ενός υλικού ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ή του χρόνου.



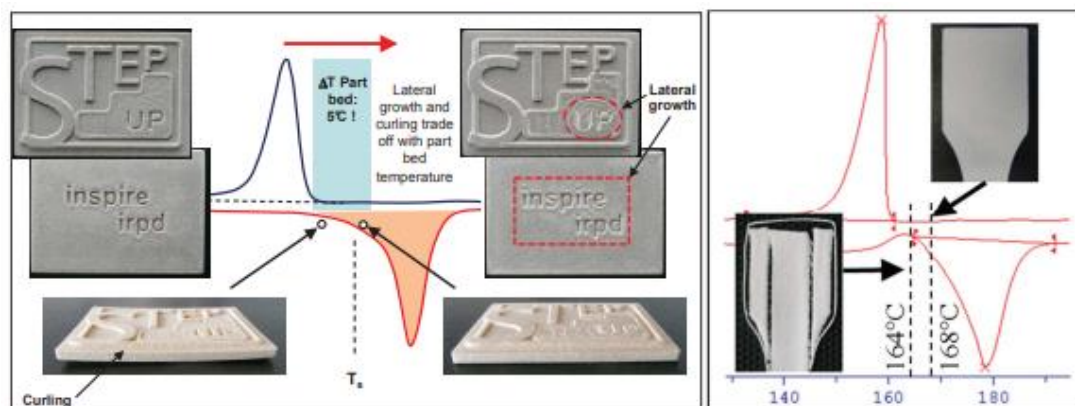
Εικόνα 13: Διάγραμμα DSC PA12 (Schmid, Amado and Wegener, 2015)

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω διάγραμμα αποτελεί μια εξιδανικευμένη αναπαράσταση της θερμικής πραγματικότητας εφόσον χαρακτηρίζεται από σταθερούς ρυθμούς θέρμανσης και ψύξης ( $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) που δεν εφαρμόζονται ποτέ κατά την επεξεργασία SLS.

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία  $T_s$  (η θερμοκρασία κατά την οποία πραγματοποιείται η διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης) βρίσκεται πολύ κοντά στην θερμοκρασία κρυστάλλωσης δημιουργείται κύρτωση του αντικειμένου λόγω πρόωρης κρυστάλλωσης. Αν η θερμοκρασία όμως, είναι ελαφρώς υψηλότερη από αυτή που ενδείκνυται, η πρόωρη κρυστάλλωση μπορεί να αποφευχθεί αλλά επειδή το υλικό βρίσκεται κοντά στο σημείο τήξης, τα γειτονικά σωματίδια θα κολλήσουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να επηρεαστούν οι λεπτομέρειες της επιφάνειας και των χαρακτηριστικών του αποτελέσματος. Έπειτα, στην περίπτωση κατά την οποία η κρυστάλλωση συμβαίνει ραγδαία το αποτέλεσμα μπορεί να είναι μέχρι και ο διαχωρισμός του αντικειμένου σε κομμάτια. Αυτό συμβαίνει διότι, όταν ένα υλικό κρυσταλλώνεται διέρχεται από την ρευστή κατάσταση του στην στερεή. Για να

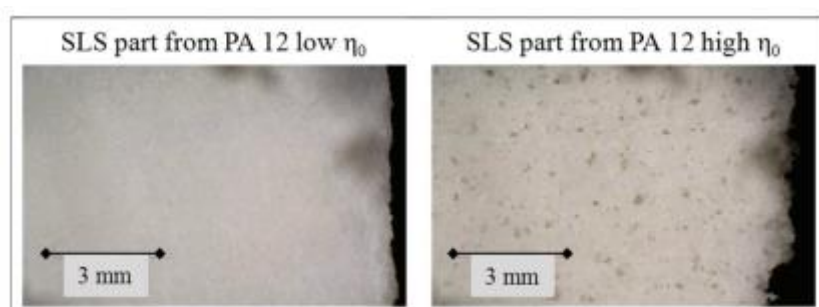


υλοποιηθεί ομογενοποίηση του υλικού πρέπει αυτό να βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση, γι' αυτό και αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους οι θερμοκρασίες τήξης και κρυστάλλωσης. (Schmid, Amado and Wegener, 2015)



*Εικόνα 14: Πρόωρη Κρυστάλλωση / Πρόωρη Κρυστάλλωση και διαχωρισμός (Schmid, Amado and Wegener, 2015)*

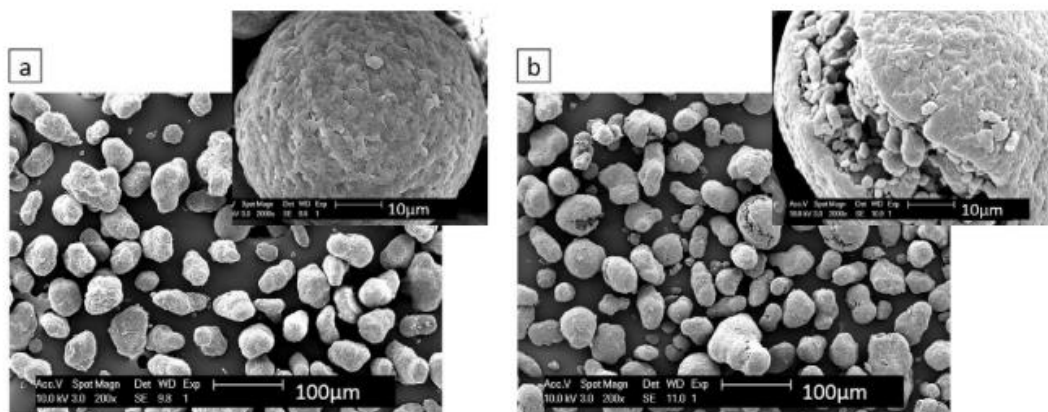
Για το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα απαραίτητο θεωρείται ένα χαμηλό ιξώδες και μια χαμηλή επιφανειακή τάση του τήγματος πολυμερούς. Ιδιαίτερα ένα χαμηλό ιξώδες έχει τεράστια σημασία εφόσον δημιουργεί επαρκή συνένωση των σωματιδίων μεταξύ τους, διότι η τεχνολογία SLS δεν μπορεί να παρέχει πρόσθετη συμπίεση κατά τη διάρκεια της μερικής παραγωγής σε αντίθεση με τη χύτευση με έγχυση. Οι εμφανείς διαφορές και η σημασία χαμηλού και υψηλού ιξώδους υλικού PA12 απεικονίζονται παρακάτω.



*Εικόνα 15: Επιφανειακή Διαφορά με χρήση διαφορετικών Ιξωδών PA12 (Schmid, Amado and Wegener, 2015)*

Το σχήμα και η επιφάνεια των μεμονωμένων σωματιδίων καθορίζουν τη συμπεριφορά της παιπάλης που προκύπτει σε μεγάλο βαθμό. Τα σωματίδια θα πρέπει να είναι τουλάχιστον όσο το δυνατόν σφαιρικά. Αυτό γίνεται για να προκληθεί ρέουσα συμπεριφορά καθώς είναι απαραίτητη εφόσον το υλικό κατανέμεται πάνω

από ένα ήδη υπάρχον στρώμα με ένα σύστημα επίχρισης χωρίς να συμπιέζεται επιπλέον. Γενικότερα το σχήμα όπως φαίνεται και παρακάτω είναι σφαιρικό με μία σχετικά τραχιά επιφάνεια. Αυτό το χαρακτηριστικό βέβαια αλλάζει ανάλογα με τον χρόνο χρήσης της πούδρας.



*Εικόνα 16:(α) Αχρησιμοποίητων και (β) παλαιωμένων σκονών PA12 (Dadbakhsh et al., 2017)*

Οι παλαιωμένες σκόνες φαίνεται να παρουσιάζουν αυξημένες ρηγματώσεις μετά την διατήρησή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η προέλευση αυτών των ρωγμών δεν είναι ακριβώς σαφής καθώς μπορεί να προέρχεται από απορροφούμενη υγρασία (που προέρχεται από το περιβάλλον) ή ακόμη και από τα επακόλουθα στάδια διαστολής/συρρίκνωσης του κύκλου διαδικασίας. Αυτές οι μορφολογικές αλλαγές, ωστόσο, μπορεί να φέρουν αρνητικές επιπτώσεις στην επιφάνεια του αντικειμένου. (Dadbakhsh et al., 2017)

Γενικότερα, όταν το υλικό σε μορφή παιπάλης υποβάλλεται σε υψηλές θερμοκρασίες για παρατεταμένες περιόδους, όπως στην περίπτωση της πυροσυσσωμάτωσης, οδηγεί στην αποικοδόμηση του. Αυτό σημαίνει πως επηρεάζονται παράγοντες, όπως οι μηχανικές ιδιότητες, η ποιότητα επιφανείας και η ακρίβεια των διαστάσεων ενός τελικού προϊόντος. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο γίνεται ανάμειξη της ήδη χρησιμοποιημένης πούδρας, με ένα ποσοστό αχρησιμοποίητης που ορίζεται από τον κατασκευαστή. (Mwania, Maringa and Van Der Walt, 2020)

Το **PA12** χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- **Print Ready Powder**, χαρακτηρίζεται η πούδρα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν χωρίς να προαπαιτείτε κάποιο ποσοστό αναμειξιμότητας πριν τη διαδικασία της εκτύπωσης.
- **Fresh Powder** είναι ουσιαστικά η πούδρα με την οποία γίνεται η ανάμειξη της ήδη χρησιμοποιημένης.

Ουσιαστικά ρυθμίζοντας το ποσοστό υγρασίας στο επαναχρησιμοποιημένο υλικό δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την επαναχρησιμοποίηση του.

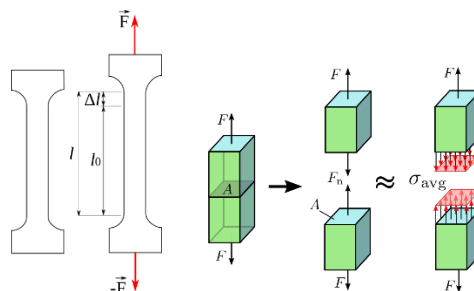
## 5. Μηχανικές Ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες (mechanical properties) είναι εκείνες που προσδιορίζουν τη συμπεριφορά των δομικών υλικών σε καταπονήσεις λόγω φορτίων ή περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται από τον τρόπο που δρουν οι καταπονήσεις, αποτέλεσμα του οποίου είναι η ανάπτυξη εσωτερικών δυνάμεων στα υλικά που ονομάζονται τάσεις (stress). Ανάλογα με το αν οι τάσεις δρουν κάθετα ή εφαπτομενικά στην επιφάνεια διακρίνονται σε ορθές ( $\sigma$ ) και διατμητικές ( $\tau$ ). Οι ορθές τάσεις που τείνουν να απομακρύνουν τα άτομα του υλικού προκαλούν εφελκυσμό και ονομάζονται εφελκυστικές, ενώ αυτές που τείνουν να τα πλησιάσουν μεταξύ τους προκαλούν θλίψη και ονομάζονται θλιπτικές. Αποτέλεσμα των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα στοιχείο είναι η μεταβολή των διαστάσεών του, δηλαδή η ανάπτυξη παραμορφώσεων (deformation), οι οποίες διακρίνονται σε ορθές ( $\epsilon$ ) και διατμητικές ( $\gamma$ ).

### Ορισμός Εφελκυσμού

**Εφελκυσμός** ονομάζεται η καταπόνηση δοκιμίου, όταν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις  $F$ , που είναι ίσες και αντίθετες, ενεργούν κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου, τείνουν να αυξήσουν το μήκος του. Σε αυτή την περίπτωση ο εφελκυσμός χαρακτηρίζεται ως αξονικός ή κεντρικός, σε αντίθεση με τον έκκεντρο εφελκυσμό στον οποίο οι δυνάμεις είναι μεν παράλληλες αλλά δεν βρίσκονται στον ίδιο νοητό άξονα. Ο εφελκυσμός είναι μία από τις δύο μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις ενός παραμορφώσιμου στερεού σώματος. Η άλλη μονοαξονική εντατική κατάσταση είναι η θλίψη. Η ισορροπία δυνάμεων είναι μηδέν. (Καθηγητής, Μέντρεα and Πανταζοπούλου, 2010)

$$\sum \vec{F} = 0$$

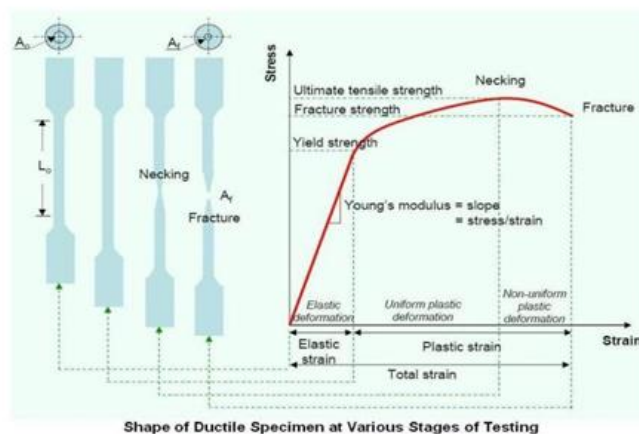


**Εικόνα 17:** Εφελκυστικές Τάσεις (el.wikipedia.org)

## Δοκιμή εφελκυσμού

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση Δl. Το μηχάνημα εφελκυσμού είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε, να προκαλεί την επιμήκυνση του υλικού με έναν σταθερό ρυθμό, να μετράει το φορτίο που εφαρμόζεται στο υλικό, καθώς επίσης και τις προκαλούμενες επιμηκύνσεις. Η διαδικασία του εφελκυσμού διαρκεί μικρό χρόνο και είναι καταστρεπτική, εφόσον το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και σπάει. Το εφαρμοζόμενο φορτίο και η αντίστοιχη επιμήκυνση καταγράφονται και σχεδιάζεται η λεγόμενη καμπύλη τάσης εφελκυσμού-παραμόρφωσης.

## Καμπύλη εφελκυσμού



Εικόνα 18: Καμπυλή Εφελκυσμού ([practicalmaintenance.net](http://practicalmaintenance.net))

Βασικοί ορισμοί:

- Τάση (Stress): Είναι το πηλίκο της δύναμης που ασκείται κάθετα στη διατομή του δοκιμίου προς την επιφάνεια της διατομής του δοκιμίου.
- Παραμόρφωση (Strain): Είναι το πηλίκο της επιμήκυνσης προς το αρχικό του μήκος.
- Μετρώ ελαστικότητας (Modulus of elasticity): Είναι το πηλίκο της τάσης προς την παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή του δοκιμίου και αντιστοιχεί ποιο αντιπροσωπευτικά στην κλίση του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος «σ-ε».

- Αντοχή διαρροής (ή παραμόρφωσης) (Yield strength): Είναι η τάση πέραν της οποίας το υλικό εισέρχεται στην πλαστική περιοχή δηλαδή είναι η μέγιστη τάση που αντέχει το υλικό πριν την έναρξη της πλαστικής (μόνιμης) του παραμόρφωσης.
- Ανοχή εφελκυσμού (Tensile Strength): Η μέγιστη τάση στην όποια αντέχει το υλικό πριν την θραύση του. Αντιστοιχεί στο υψηλότερο σημείο της καμπύλης «σ-ε»
- Τάση θραύσης: Είναι το πηλίκο της δύναμης όπου το δοκίμιο θραύεται προς την αρχική επιφάνεια της διατομής του δοκιμίου.
- Όριο θραύσης: Είναι το σημείο της καμπύλης «σ-ε» το οποίο αντιστοιχεί στην αντοχή εφελκυσμού.
- Όριο Διαρροής: Είναι το σημείο της καμπύλης «σ-ε» το οποίο αντιστοιχεί στην αντοχή διαρροής. ('Πείραμα Εφελκυσμου 1.')

### Νόμος του Hooke

Για τα περισσότερα υλικά και εφόσον η φόρτιση είναι εντός συγκεκριμένων ορίων ισχύει πως η επιμήκυνση της ράβδου είναι ανάλογη του φορτίου. Χαρακτηρίζεται και ως **Νόμος Ελαστικότητας** και η σχέση τάσεων και παραμορφώσεων.

Η επιμήκυνση της ράβδου ανάγεται στη μονάδα μήκους της ράβδου, σημειώνεται με  $\varepsilon$  και λέγεται **ειδική διαμόρφωση εφελκυσμού**. Προκύπτει από τον τύπο:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Η σχέση μεταξύ παραμορφώσεων των δυνάμεων δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta l = \frac{P * l}{F * E}$$

όπου  $\Delta l$  = η παραμόρφωση

$l$  = το μήκος της ράβδου

$P$  = η διατομή της ράβδου

$E$  = μέτρο ελαστικότητας (σταθερά εξαρτώμενη από το υλικό)

Μια άλλη έκφραση του νόμου του Hooke είναι ότι η τιμή  $\sigma$  είναι ανάλογη προς την ανοιγμένη παραμόρφωση και γράφεται:  $\sigma \varepsilon = \varepsilon * E$

## 6. Μέθοδος Taguchi

Η μέθοδος Taguchi περιλαμβάνει τη μείωση της διακύμανσης σε μια διαδικασία μέσω ισχυρού σχεδιασμού πειραμάτων. Ο γενικός στόχος της μεθόδου είναι η παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος για τον κατασκευαστή. Η μέθοδος Taguchi αναπτύχθηκε από τον Genichi Taguchi της Ιαπωνίας που διατήρησε αυτή την παραλλαγή. Ο Taguchi ανέπτυξε μια μέθοδο για τον σχεδιασμό πειραμάτων για να διερευνήσει πώς διαφορετικές παράμετροι επηρεάζουν τον μέσο όρο και τη διακύμανση ενός χαρακτηριστικού απόδοσης διεργασίας που καθορίζει πόσο καλά λειτουργεί η διαδικασία. Ο πειραματικός σχεδιασμός που προτείνεται από τον Taguchi περιλαμβάνει τη χρήση ορθογώνιων πινάκων για την οργάνωση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαδικασία και τα επίπεδα στα οποία πρέπει να βρίσκονται ποικίλλουν. Αντί να χρειάζεται να δοκιμάσετε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς όπως ο παραγοντικός σχεδιασμός, η μέθοδος Taguchi δοκιμάζει ζεύγη συνδυασμών. Αυτό επιτρέπει τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για τον προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν περισσότερο την ποιότητα του προϊόντος με έναν ελάχιστο πειραματισμό, εξοικονομώντας έτσι χρόνο και πόρους.

Οι πίνακες Taguchi μπορούν να προκύψουν ή να αναζητηθούν. Μικροί πίνακες μπορούν να σχεδιαστούν με το χέρι, ενώ μεγάλοι πίνακες μπορούν να προκύψουν από αλγόριθμους. Γενικά, οι πίνακες μπορούν να βρεθούν στο διαδίκτυο. Οι πίνακες επιλέγονται από τον αριθμό των παραμέτρων (μεταβλητές) και τον αριθμό των επιπέδων (καταστάσεις). Η ανάλυση της διακύμανσης στα δεδομένα που συλλέγονται από τον σχεδιασμό των πειραμάτων Taguchi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή νέων τιμών παραμέτρων για τη βελτιστοποίηση του χαρακτηριστικού απόδοσης. (Fraleley *et al.*, 2021)

Όλα τα αποτελέσματα των μηχανικών καταπονήσεων, ακολούθησε μία στατιστική ανάλυση μέσω της μεθόδου Taguchi. Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί έναν ειδικό σχεδιασμό ορθογώνιων πινάκων που επιτρέπει τη μελέτη όλων των περιπτώσεων των παραμέτρων με περιορισμένο αριθμό πειραμάτων. Παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως: μείωση του οικονομικού κόστους αλλά και του χρόνου μελέτης για την εύρεση βέλτιστης λύσης, βέλτιστες συνθήκες διεργασίας κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών πειραμάτων, θεωρείται σημαντικό εργαλείο για την βελτίωση

παραγωγικότητας έρευνας και ανάπτυξης (R&D) και εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε διαδικασία. (Rosa *et al.*, 2009)

Η μεθοδολογία που πρότεινε ο Taguchi για το σχεδιασμό πειραμάτων, με σκοπό τη συνεχή βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος ή της διεργασίας. Ο πειραματικός σχεδιασμός ουσιαστικά, είναι το πεδίο της Στατιστικής που περιέχει το σύνολο των γνώσεων και των τεχνικών που οδηγούν σε ορθολογικό πειραματισμό και σε αποδοτικότερη ανάλυση δεδομένων συνδέοντας τα συμπεράσματα των αναλύσεων με τους πρωταρχικούς στόχους μιας έρευνας. (ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ)  
Η μεθοδολογία είναι η εξής:

#### Καθορισμός προβλήματος

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τον εντοπισμό της πηγής του προβλήματος. Ουσιαστικά καθορίζεται το ποιοτικό χαρακτηριστικό που θα λάβει την βέλτιστη τιμή. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι μια παράμετρος της οποίας η μεταβλητότητα έχει κρίσιμη επίδραση στην ποιότητα του προϊόντος.

#### Καταιγισμός ιδεών

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των συνθηκών πειραματισμού και των κρίσιμων μεταβλητών για την ποιότητα του υπό εξέταση προϊόντος ή της διεργασίας. Διακρίνονται δύο κατηγορίες παραγόντων:

- α) Παράγοντες ελέγχου (control factors): είναι οι μεταβλητές που μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν και να ελεγχθούν.
- β) Παράγοντες θορύβου (noise factors): είναι οι μεταβλητές που επηρεάζουν το σύστημα, αλλά είναι δύσκολο ή και αδύνατο να ελεγχθούν.

#### Πειραματικός σχεδιασμός

Στο στάδιο αυτό σχεδιάζεται το πείραμα μέσω αριθμητικών πινάκων και ορίζεται η μέθοδος για την ανάλυση των δεδομένων. Χρησιμοποιούνται τα επίπεδα παραγόντων και οι στόχοι όπως αυτά καθορίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο του καταιγισμού ιδεών.



### Διεξαγωγή πειράματος

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιείται το πείραμα που έχει καθοριστεί.

### Ανάλυση

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τρόποι ανάλυσης, όπως η Ανάλυση Διασποράς (ANOVA) ή η Πολλαπλή Παλινδρόμηση (Multiple Regression), αλλά είναι διαθέσιμες και απλούστερες μέθοδοι. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί ένα στατιστικό μέτρο απόδοσης που ονομάζεται λόγος σήματος προς θόρυβο. Βάση του λόγου S/N, μπορούν να προσδιοριστούν τα επίπεδα των παραγόντων ελέγχου που αντιμετωπίζουν αποτελεσματικότερα το θόρυβο. Στην απλούστερη του μορφή, ο λόγος S/N είναι ο λόγος του μέσου προς την τυπική απόκλιση. Η κατάλληλη μορφή του S/N εξαρτάται από το κριτήριο που πρέπει να βελτιστοποιηθεί για το κάθε ποιοτικό χαρακτηριστικό. Σε αυτή την φάση, γίνεται ο καθορισμός των βέλτιστων επιπέδων για όλους τους παράγοντες ελέγχου.

### Επιβεβαίωση πειράματος

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης πρέπει να επιβεβαιωθούν από την εκτέλεση πειράματος με τις παραμέτρους να λαμβάνουν τις βέλτιστες τιμές όπως αυτές προέκυψαν. (Τσάκωνας and Π, )

## 7. Μεθοδολογία

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας ακολουθείτε συγκεκριμένη μεθοδολογία για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας. Επειδή ο στόχος της παρούσας διπλωματικής αποτελεί την μελέτη περιπτώσεων πάνω σε αντικείμενα παραγόμενα μέσω προσθετικών κατασκευών, αρχικά πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σε επιστημονικά άρθρα τα οποία αφορούν μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων στον αντίστοιχο κλάδο. Σύμφωνα με την μελέτη και αποκλείοντας παράλληλα πειράματα που έχουν ήδη υλοποιηθεί, θα προκύψει το υλικό εκτύπωσης και η μηχανική καταπόνηση στην οποία θα υποβληθούν τα πειράματα.

Κάθε ερευνητικό άρθρο ακολουθεί συγκεκριμένες διαδικασίες και πρότυπα για την ορθή διεξαγωγή των πειραμάτων. Έτσι και στην συγκεκριμένη περίπτωση βάση της βιβλιογραφίας θα προκύψει ένα πρότυπο βασισμένο στις προδιαγραφές που ορίζουν τα διεθνή πρότυπα. Σύμφωνα με αυτά τα πρότυπα, τον εξοπλισμό και τις παροχές του εργαστηρίου αλλά και βάση της ανασκόπησης θα πραγματοποιηθεί σχεδιασμός πειραμάτων. Από αυτό τον σχεδιασμό και με κριτήριο τα διεθνή πρότυπα θα προκύψουν οι μηχανικές και γεωμετρικές προδιαγραφές του δοκιμίου.

Μέσω των γεωμετρικών προδιαγραφών βασισμένων στα διεθνή πρότυπα θα επακολουθήσει η μοντελοποίηση του δοκιμίου με τη βοήθεια CAD στερεού μοντελοποιητή και στη συνέχεια η μετατροπή του σε STL αρχείο και έπειτα σε Gcode αρχείο έτσι ώστε το αρχείο να θεωρείται έτοιμο προς εκτύπωση. Ύστερα επρόκειτο να πραγματοποιηθεί η εκτύπωση του αντικειμένου. Με την ολοκλήρωση της εκτύπωσης το δοκίμιο υφίσταται μετεπεξεργασία έτσι ώστε να θεωρηθεί έτοιμο προς χρήση. Το επόμενο βήμα θα αποτελέσει ο διαστασιολογικός έλεγχος του δοκιμίου, καθώς επρόκειτο να συγκριθεί με το διεθνές πρότυπο και να παρουσιαστεί η τυπική απόκλιση που προκύπτει με αυτό. Εν κατακλείδι, το τρισδιάστατο δοκίμιο θα υποστεί μηχανική καταπόνηση και συλλέγοντας τα δεδομένα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, θα σχεδιαστούν τα κατάλληλα διαγράμματα με τον απαραίτητο σχολιασμό. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα θα αναλυθούν βάση της μεθόδου Taguchi έτσι ώστε να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς παραμέτρων. Τέλος, βάση των τελικών αποτελεσμάτων επρόκειτο να

γίνει συζήτηση για την συγκεκριμένη εργασία αλλά και μεταγενέστερες που μπορούν να ακολουθήσουν βασιζόμενες σε αυτή.

## 8. Πειραματικό Μέρος

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε και έχοντας ως δεδομένο την τεχνολογία εκτύπωσης, προέκυψε το υλικό εκτύπωσης που αποτελεί το πολυαμίδιο PA12, καθώς και η μηχανική καταπόνηση που θα πραγματοποιηθεί στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας αυτή του εφελκυσμού.

### Εξοπλισμός και διεξαγωγή πειραμάτων

#### Υλικό Εκτύπωσης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το υλικό που επιλέχτηκε είναι το πολυαμίδιο PA12. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστό ανάμειξης 30% φρέσκια πούδρα και 70% χρησιμοποιημένη. Στο κομμάτι της θεωρίας αναφέρεται η σημαντικότητα της αναμειξιμότητας των υλικών αποσκοπώντας στην ποσοστιαία ρύθμιση των επιπέδων υγρασίας μέσα σε αυτό, η οποία ορίζεται από τον κατασκευαστή.

Παρακάτω παρατίθενται πληροφορίες και μηχανικές ιδιότητες για το πολυαμίδιο PA12.

Γενικές Πληροφορίες	Τιμές	Μέθοδος Δοκιμών
Ποσοστό Ανάμειξης	30%	-
Μέγεθος Σωματιδίων	18-90μm	ISO 13320
Πυκνότητα Εκτυπωμένου Υλικού	0,92 g/cm <sup>3</sup>	PN-EN ISO 845:2010
Απορρόφηση Υγρασίας	8,70%	PN-EN ISO 62:2008
Μηχανικές Ιδιότητες		
Elongation at break	10 MPa	PN-EN ISO 527- 2:2012
Μέτρο Ελαστικότητας	1470 MPa	PN-EN ISO 527- 2:2012
Όριο Θραύσης	1160 MPa	PN-EN ISO 527- 2:2012
Αντοχή σε Κάμψη	47 MPa	PN-EN ISO 178:2019
Αντοχή Κρούσης	16 KJ/m <sup>2</sup>	PN-EN ISO 179- 1/1eU:2010
Θερμικές Ιδιότητες		
Σημείο Τήξης	185 οC	PN-EN ISO 11357-3:2018

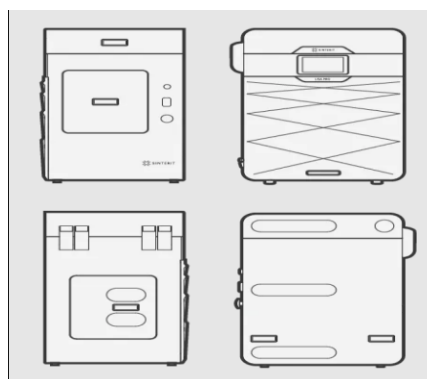
Πίνακας 1: Πληροφορίες PA12



*Εικόνα 19: Fresh Powder & Print Ready Powder*

### Συσκευή Εκτύπωσης

Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο 3D printer Lisa PRO της Πολωνικής εταιρίας Sinterit. Ο συγκεκριμένος εκτυπωτής είναι τεχνολογίας επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με laser (SLS) και μπορεί να κατεργαστεί πληθώρα κονιοποιημένων υλικών που προαναφέρθηκαν, καθώς και είναι εφοδιασμένος με φιάλη αζώτου ( $N_2$ ) που χρησιμοποιείτε ως το αδρανές αέριο πλήρωσης του θαλάμου. Είναι εφοδιασμένος με ένα laser  $CO_2$ , του οποίου η δέσμη κατευθύνεται από ένα σύστημα καθρεπτών. Η θέρμανση του θαλάμου πραγματοποιείται μέσω θερμικών λαμπτήρων-θερμικών αντιστάσεων που είναι τοποθετημένοι πάνω από το θάλαμο εκτύπωσης. Μάλιστα υπάρχουν 22 θερμαντικά στοιχεία κατανεμημένα σε τέσσερις ζώνες θέρμανσης που επιτρέπουν να υπάρχει αυστηρός έλεγχος στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του εκτυπωτή. Έπειτα υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης και προσαρμογής 32 παραμέτρων που επιτρέπει την βελτιωμένη διαδικασία σε νέες μεθοδολογίες έρευνας και εκτυπώσεις υψηλής ποιότητας.([www.Sinterit.com](http://www.Sinterit.com), 2022)



*Εικόνα 20: 3D printer Lisa PRO*

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Προδιαγραφές	
Διαστάσεις	690x500x880 [mm]
Βάρος	90.0 [kg]
Τύπος Laser	CO <sub>2</sub> , 5W
Μέγιστο Όγκος Εκτύπωσης	PA - 110x160x230 [mm] TPU - 110x160x245 [mm]
Μέγεθος Κρεβατιού Εκτύπωσης	150x200x260 [mm]
Ύψος στρώματος κατά τον Z (Ελάχιστη-Μέγιστη)	0.075 - 0.175 [mm]
Ταχύτητα Εκτύπωσης	μέχρι 3 [mm/h]
Software	Sinterit Studio
Τύποι φακέλων που υποστηρίζονται	STL, 3MF, OBJ, 3DS, FBX, DAE
Τύποι αρχείων εξόδου	*.scode, *.sopf, *.sopfz
Μέγιστη θερμοκρασία στο θάλαμο	200 [°C] / 392 [°F]
Τάση λειτουργίας	220-240 [V] AC, 50/60 [Hz], 7 [A] ή 100-130 [V] AC, 50/60 [Hz], 15[A]
Μέση Κατανάλωση Ρεύματος	1.1 [kW]
Μέγιστη Κατανάλωση Ρεύματος	1.9 [kW]

*Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά εκτυπωτή Lisa Pro*

## Συσκευή Δοκιμής Εφελκυσμού

Για την μηχανική καταπόνηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εφελκυσμού Quasar 100 της εταιρίας GALDABINI. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.



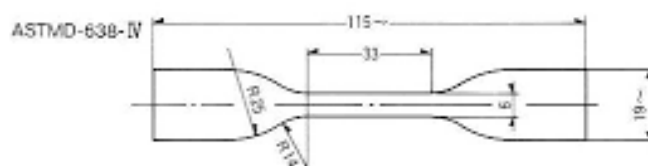
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
Φορτίο Πλαισίου	100000 N
Ονομαστικό μέγεθος κυψέλης φόρτωσης	100000 N
Τιμή σφάλματος κυψέλης φόρτωσης	Min 300000 N
Πρότυπα	ASTM E4, EN-ISO 7500-1
Ακαμψία πλαισίου	Κατά μέσο Ορο <b>84000 N/mm</b> παραμόρφωση μέγιστη στο μέγιστο φορτίο <b>1,2 mm</b>
ταχύτητα στο μέγιστο φορτίο	0,0005 - 200 mm/min.
Ακρίβεια επαναληψιμότητας	0,02 mm (20 μm)
Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος	230V/50Hz or 120V/60Hz
Ισχύς	1000 Watt
βάρος μηχανήματος	390 Kg
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Από +5 to +40 °C
Υγρασία αέρα	Μέγιστη 80%
Διαστάσεις	2232mm
	783mm
	820mm

Εικόνα 21: Quasar 100 και πίνακας με τεχνικά χαρακτηριστικά

### Δοκίμιο προς Εκτύπωση

Τα δοκίμια σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου ASTM D638-10, (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα) και ακολούθησε ο σχεδιασμός πειραμάτων βάση του συγκεκριμένου προτύπου. (Ast, 2013)

#### ASTM D638 Type IV



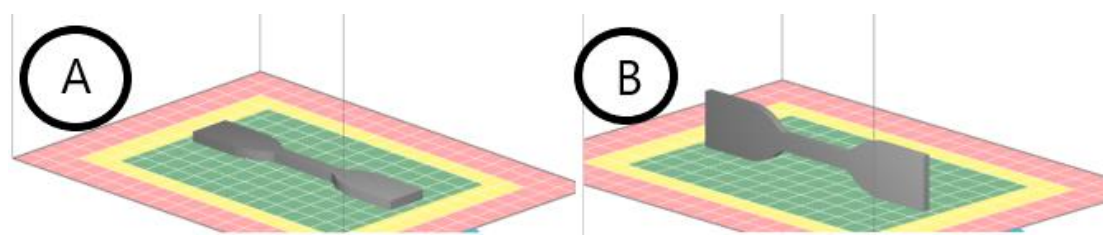
*Εικόνα 22: Διαστάσεις δοκιμίου κατά ASTM (Ast, 2013)*

Το πάχος του παραπάνω δοκιμίου είναι 3,2mm σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο. Στη συνέχεια βάση των δυνατοτήτων του εξοπλισμού και έπειτα από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση επιλέχθηκαν τέσσερις παράμετροι για την υλοποίηση των πειραμάτων που παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι παράμετροι είναι οι εξής:

#### 1 Θέση κατά την εκτύπωση (Περιστροφή)

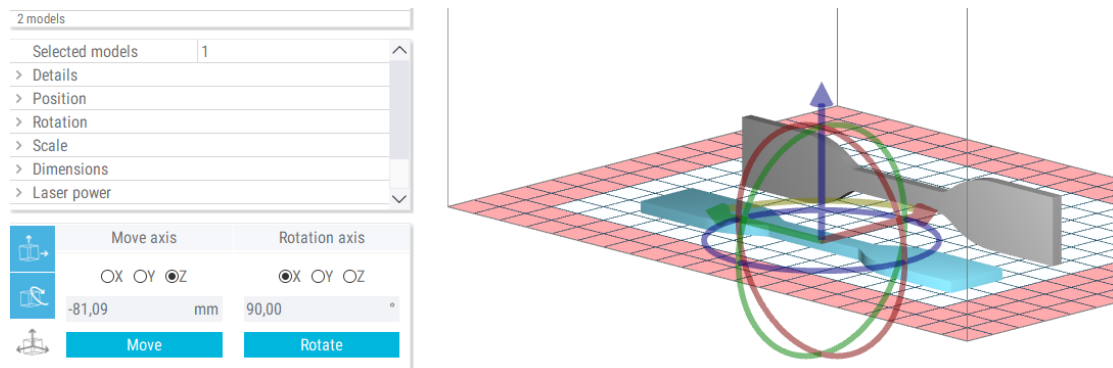
Η συγκεκριμένη παράμετρος αφορά την τοποθέτηση του δοκιμίου στον όγκο εκτύπωσης και χωρίζεται σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση το δοκίμιο είναι τοποθετημένο έτσι ώστε η μεγάλη επιφάνεια να ακουμπάει στο επίπεδο, ενώ στην δεύτερη όπως φαίνεται (στο αντίστοιχο σχήμα) ακουμπάει η μικρή επιφάνεια.



*Εικόνα 23: Θέση κατά την εκτύπωση (Περιστροφή) (1η παράμετρος), μεγάλη επιφάνεια ως προς το επίπεδο (A), μικρή επιφάνεια ως προς το επίπεδο (B)*



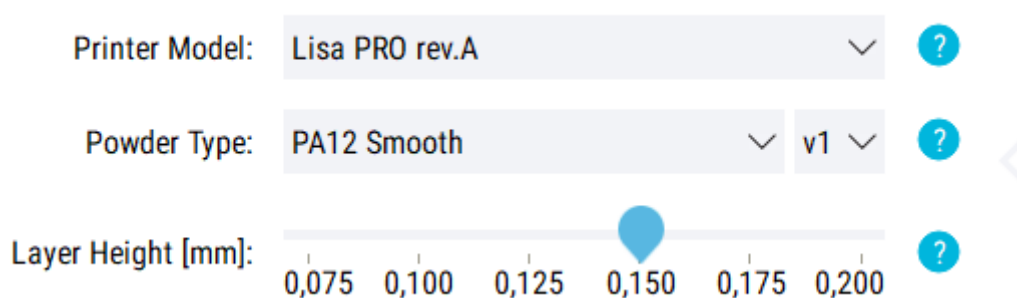
Ο προσανατολισμός του αντικειμένου διαμορφώθηκε από το λογισμικό Sinterit Studio για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, όπως φαίνεται παρακάτω.



**Εικόνα 24:** Τροποποίηση προσανατολισμού μέσω του λογισμικού Sinterit Studio

## 2 Το πάχος της στρώσης

Οι τιμές της παραμέτρου κυμαίνονται μεταξύ 0,075mm έως 0,175mm. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τρεις περιπτώσεις αυτές των 0,075mm, των 0,125mm και των 0,175mm. Το πάχος στρώσης δεν μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα από τον χρήστη, αλλά το κάθε λογισμικό δίνει δυνατότητες για συγκεκριμένες τιμές επιλογής, οι οποίες είναι εξαρτώμενες από τον εξοπλισμό και το εκτυπώσιμο υλικό. Οι τιμές του πάχους επιλέχθηκαν μέσω του λογισμικού Sinterit Studio.



**Εικόνα 25:** Ρύθμιση πάχους στρώσης

### 3 Θέση κατά την εκτύπωση (Μοίρες)

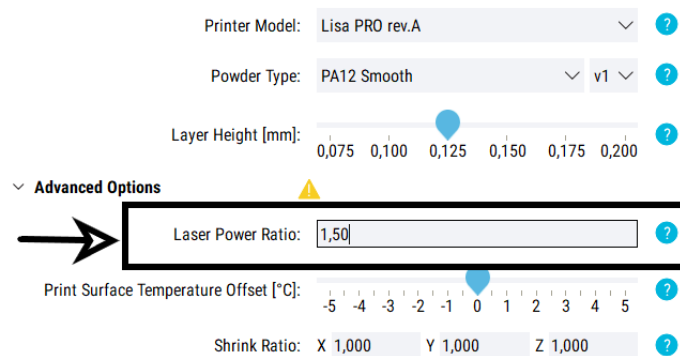
Παρόμοια με την πρώτη περίπτωση, η παράμετρος αφορά την τοποθέτηση του δοκιμίου στον όγκο εκτύπωσης. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν με τρεις διαφορετικούς τρόπους, υπό γωνία  $0^\circ$ , υπό γωνία  $45^\circ$  και υπό γωνία  $90^\circ$  ως προς το άξονα Y, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η τοποθέτηση κάθε δοκιμίου πραγματοποιήθηκε με παρόμοιο τρόπο που υλοποιήθηκε και η πρώτη παράμετρος. (βλ. εικόνα )



**Εικόνα 26:** Θέση κατά την εκτύπωση ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ )

### 4 Ισχύς Laser

Η ισχύς laser μπορεί να λάβει τιμές μεταξύ 0,5 έως 3 Watt. Οι τιμές της ισχύς εξαρτώνται από τον εξοπλισμό και συγκεκριμένα τον εκάστοτε εκτυπωτή γι' αυτό και παρουσιάζεται ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών. Οι τιμές που επιλέχθηκαν στον σχεδιασμό πειραμάτων ήταν 0.5 Watt, 1.0 Watt και 1.5 Watt. Η επιλογή τους πραγματοποιήθηκε από το ίδιο λογισμικό μέσω των προχωρημένων ρυθμίσεων.



**Εικόνα 27:** Ρύθμιση Ισχύος laser

Υστέρα για την ολοκλήρωση του πειραματικού σχεδιασμού μέσω ανασκόπησης και βάση του πλήθος των παραμέτρων επιλέχθηκε ο παρακάτω ορθογωνικός πίνακας L18 κατά Taguchi (κάτω αριστερά). Αντικαθιστώντας τις παραμέτρους που αναλύθηκαν παραπάνω στον ορθογωνικό πίνακα προκύπτει ο τελικός πίνακας πειραματικού σχεδιασμού, βάση του οποίου πραγματοποιήθηκαν όλα τα πειράματα.

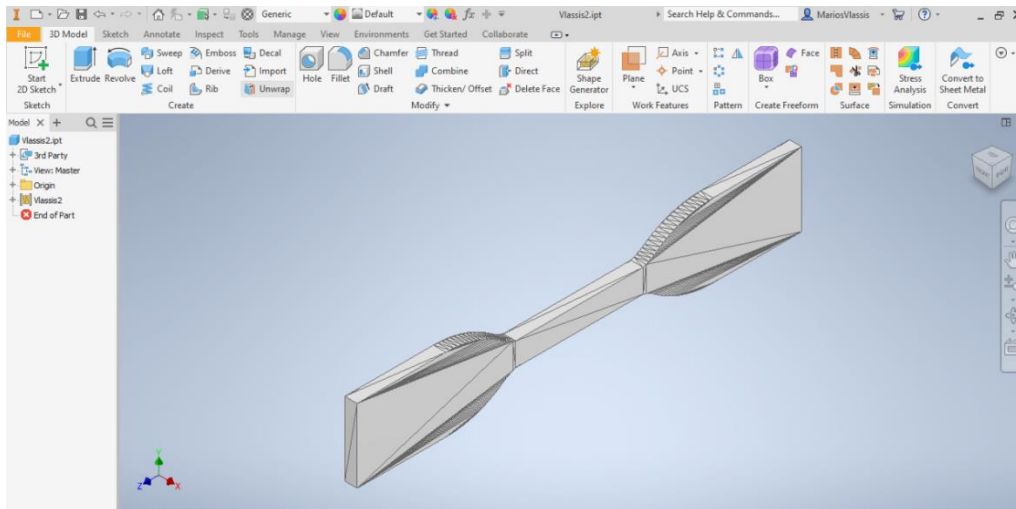
Expt. No.	A	B	C	D	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ				
					Αριθμός Πειράτων	Επιφάνεια στο Επίπεδο	Πάχος Στρωσης (mm)	Μοιρές ως προς το επίπεδο (°)	Ισχύς Laser (Watt)
1	1	1	1	1	1	A	0,075	0	0,5
2	1	1	2	2	2	A	0,075	45	1
3	1	1	3	3	3	A	0,075	90	1,5
4	1	2	1	1	4	A	0,125	0	0,5
5	1	2	2	2	5	A	0,125	45	1
6	1	2	3	3	6	A	0,125	90	1,5
7	1	3	1	2	7	A	0,175	0	1
8	1	3	2	3	8	A	0,175	45	1,5
9	1	3	3	1	9	A	0,175	90	0,5
10	2	1	1	3	10	B	0,075	0	1,5
11	2	1	2	1	11	B	0,075	45	0,5
12	2	1	3	2	12	B	0,075	90	1
13	2	2	1	2	13	B	0,125	0	1
14	2	2	2	3	14	B	0,125	45	1,5
15	2	2	3	1	15	B	0,125	90	0,5
16	2	3	1	3	16	B	0,175	0	1,5
17	2	3	2	1	17	B	0,175	45	0,5
18	2	3	3	2	18	B	0,175	90	1

*Εικόνα 28: Ορθογωνικός πίνακας L18 κατά Taguchi & Τελικός πίνακας πειραματικού σχεδιασμού*

## Μοντελοποίηση

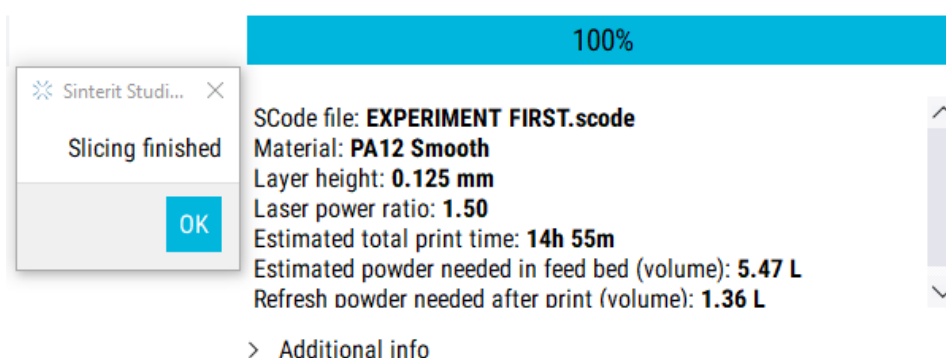
Μετά την ολοκλήρωση του πειραματικού σχεδιασμού πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση του δοκιμίου (dog bone).

Ο σχεδιασμός του αντικειμένου υλοποιήθηκε με την βοήθεια τρισδιάστατου υβριδικού μοντελοποιητή CAD και πιο συγκεκριμένα με το πρόγραμμα Inventor της εταιρίας Autodesk.



Εικόνα 29: Μοντελοποίηση Δοκιμίου

Έπειτα το σχέδιο στερεού μοντελοποιητή CAD μετατράπηκε σε αρχείο STL και μεταφέρθηκε στο λογισμικό Sinterit Studio. Στο λογισμικό αρχικά επιλέχθηκαν οι παράμετροι που αναλύθηκαν παραπάνω ανάλογα με το πείραμα. Στην συνέχεια μέσω του αναλυτή του λογισμικού (slicer) δημιουργήθηκε το αρχείο Scode, (ή Gcode όπως συνηθίζεται) έτσι ώστε το δοκίμιο να είναι έτοιμο προς εκτύπωση.



Εικόνα 30: Slicer Sinterit Studio

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα μόλις ολοκληρωθεί ο τεμαχισμός παρέχονται πληροφορίες χρήσιμες για την διεργασία της εκτύπωσης, όπως οι ώρες της εκτύπωσης και η ποσότητα πούδρας που πρέπει να αναμειχθεί μετά την διαδικασία. Με το πέρας της διαδικασίας το δοκίμιο είναι πλέον έτοιμο προς εκτύπωση.

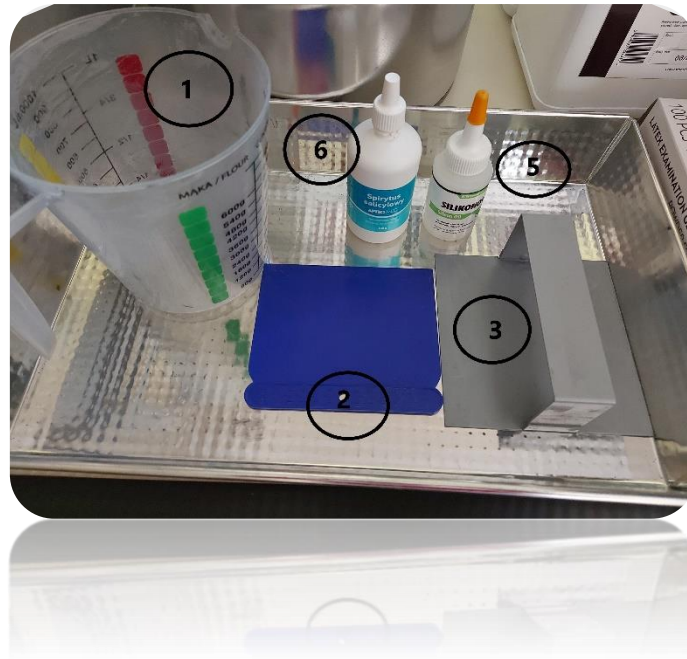
### Διαδικασία Εκτύπωσης

Στην επιλεκτική πυροσυσσώματωση με laser (SLS) διεργασία ο εξοπλισμός είναι πιο σύνθετος σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Αυτό συμβαίνει διότι η μορφή του υλικού είναι πολύ ιδιαίτερη συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες και χρήζει ειδικής μεταχείρισης τόσο πριν την διαδικασία της εκτύπωσης όσο και μετά. Η εκτύπωση λοιπόν μπορεί να χωριστεί σε τρία διαφορετικά στάδια, αυτά της προεκτύπωσης, της εκτύπωσης και της μετεκτύπωσης. Κάθε στάδιο απαρτίζεται από τον κατάλληλο εξοπλισμό για την υλοποίηση του ο οποίος αναλύεται εκτενώς παρακάτω.

### Στάδιο Προεκτύπωσης

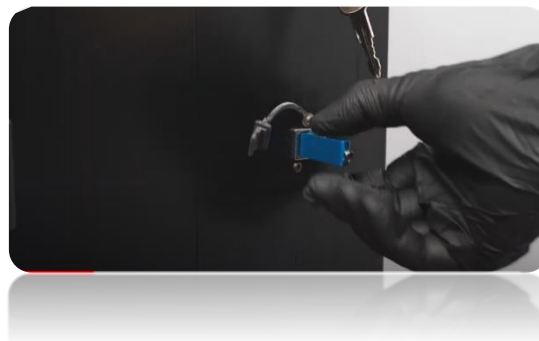
Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε διεργασία πρέπει να ληφθούν αρχικά τα απαραίτητα μέτρα προστασίας για τον χρήστη. Ενδείκνυται η χρήση προστατευτικών γυαλιών και γαντιών ενώ η χρήση μάσκας υψηλής προστασίας θεωρείται απαραίτητη προς αποφυγή εισπνοής του υλικού. Για την παρούσα διαδικασία απαιτείται ο απαραίτητος εξοπλισμός, ο οποίος είναι ο εξής:

1. Μετρητικό δοχείο
2. Πλαστική ξύστρα
3. Μεταλλικό Εξάρτημα για την συμπίεση της πούδρας
4. Λάδι σιλικόνης
5. Αιθυλική αλκοόλη
6. Βαμβακερό πανί



*Εικόνα 31: Εξοπλισμός για το στάδιο της προεκτύπωσης*

Για την έναρξη της διαδικασίας τα απαραίτητα δεδομένα (αρχείο Scode) μεταφέρονται στον εκτυπωτή μέσω USB stick.



*Εικόνα 32: Βήμα 1ο Εισαγωγή Δεδομένων*

Στην συνέχεια ο εκτυπωτής μέσω του firmware υπολογίζει και ρυθμίζει τη θέση του εμβόλου τροφοδοσίας και του εμβόλου εκτύπωσης αντίστοιχα, παρουσιάζοντας παράλληλα τον εκτιμώμενο χρόνο εκτύπωσης για κάθε περίπτωση.



*Εικόνα 33: Βήμα 2ο Ρύθμιση Θέσεων*

Ύστερα η απαραίτητη ποσότητα υλικού τοποθετείται στο έμβολο τροφοδοσίας και πιέζεται με ειδικό εξάρτημα, ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας που δημιουργεί κενά μεταξύ των επιπέδων του.



*Εικόνα 34: Βήμα 3ο Προσθήκη Υλικού*

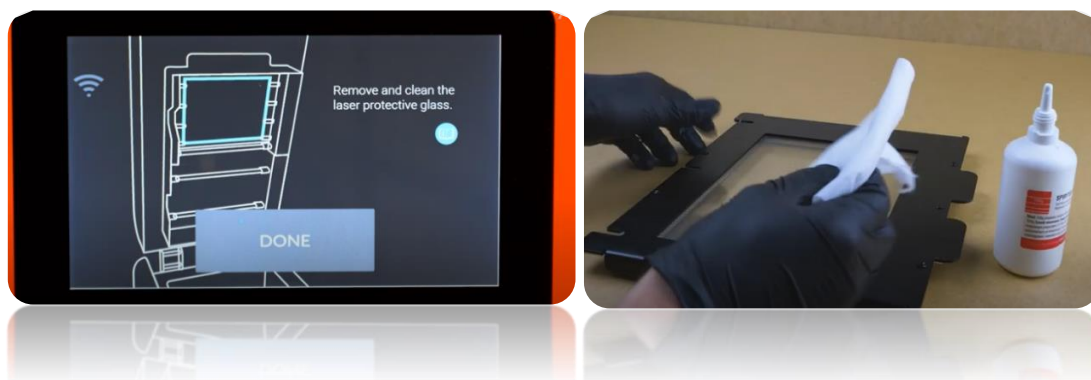
Εφόσον υλοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία και τοποθετηθεί μια μικρή ποσότητα υλικού στο “κρεβάτι” εκτύπωσης, ο κυλινδρικός επιχριστής επιστρώνει το υλικό και στις δύο πλευρές μέχρι να είναι ομοιόμορφο, απομακρύνοντας παράλληλα το περισσεύον υλικό σε ειδικό δοχείο.



*Εικόνα 35: Βήμα 4ο Επίστρωση σκόνης*



Έπειτα καθαρίζεται πολύ προσεκτικά το προστατευτικό τζάμι με τη χρήση υφάσματος και αιθυλικής αλκοόλης. Παρόλο που αποτελεί απλή διαδικασία είναι απαραίτητη διότι σε περίπτωση που υπάρχει εναπομένον υλικό στην επιφάνεια του τζαμιού ή κάποιο θάμπωμα από αποτύπωμα, μπορεί να επηρεαστεί το αποτέλεσμα της εκτύπωσης. Το εξάρτημα αυτό προστατεύει ουσιαστικό το laser CO<sub>2</sub> στη διάρκεια της εκτύπωσης από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στο θάλαμο και μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του και τη διάρκεια ζωής του.



*Εικόνα 36: Βήμα 5ο Καθαρισμός προστατευτικού καθρέπτη*

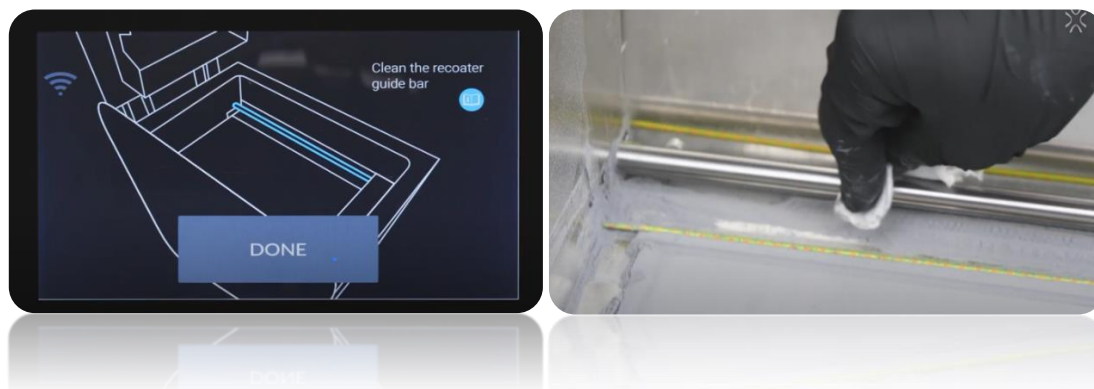
Στη συνέχεια, πάλι με τη χρήση υγρού-στεγνού υφάσματος και αιθυλικής αλκοόλης καθαρίζονται τα πυρόμετρα. Τα πυρόμετρα πρέπει να είναι καθαρά έτσι ώστε να παρουσιάζουν τις πραγματικές θερμοκρασίες του θαλάμου, εφόσον πρέπει να είναι συγκεκριμένες για κάθε υλικό.



*Εικόνα 37: Βήμα 6ο Καθαρισμός πυρομέτρων*



Στο προτελευταίο βήμα με ένα κομμάτι ύφασμα πραγματοποιείται καθαρισμός της μπάρας στην οποία μετακινείται ο κυλινδρικός επιχριστής, έτσι ώστε να απομακρυνθεί παραμένον σκόνη που μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία του επίχριστή και έτσι το τελικό αποτέλεσμα.



*Εικόνα 38: Βήμα 7ο Καθαρισμός μπάρας οδηγού του επίχριστή*

Στο τελευταίο βήμα γίνεται λίπανση της μπάρας οδηγού με λάδι σιλικόνης.



*Εικόνα 39: Βήμα 8ο λίπανση μπάρας οδηγού*

Μόλις ολοκληρωθούν όλα τα παραπάνω βήματα ο εκτυπωτής είναι έτοιμος για την έναρξη της διεργασίας. Η διαδικασία εκτύπωσης SLS παρουσιάζεται στο θεωρητικό μέρος. Ο εκτυπωτής χρειάζεται περίπου στα 60 λεπτά για να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία κατά μήκος όλου του θαλάμου (περίπου στους 178°C). Μόλις το υλικό θερμανθεί κατάλληλα, η εκτύπωση ξεκινάει.

### Στάδιο Μετεκτύπωσης

Με την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, χρειάζονται περίπου 60 λεπτά, έτσι ώστε η θερμοκρασία του θαλάμου να πέσει κάτω από τους 50°C. Μόνο τότε δίνεται η δυνατότητα αφαίρεσης του αντικειμένου (από το σύστημα) για λόγους ασφαλείας. Για την επεξεργασία του δοκιμίου χρειάζεται ο κατάλληλος εξοπλισμός και είναι ο εξής:

1. Κουτί αφαίρεσης υλικού
2. Βούρτσα αφαίρεσης υλικού
3. Πινέλο
4. Σκούπα Καθαρισμού
5. Κόσκινο
6. Δοχείο αποθήκευσης
7. Καμπίνα Αμμοβολής
8. Συμπιεστής Αέρος



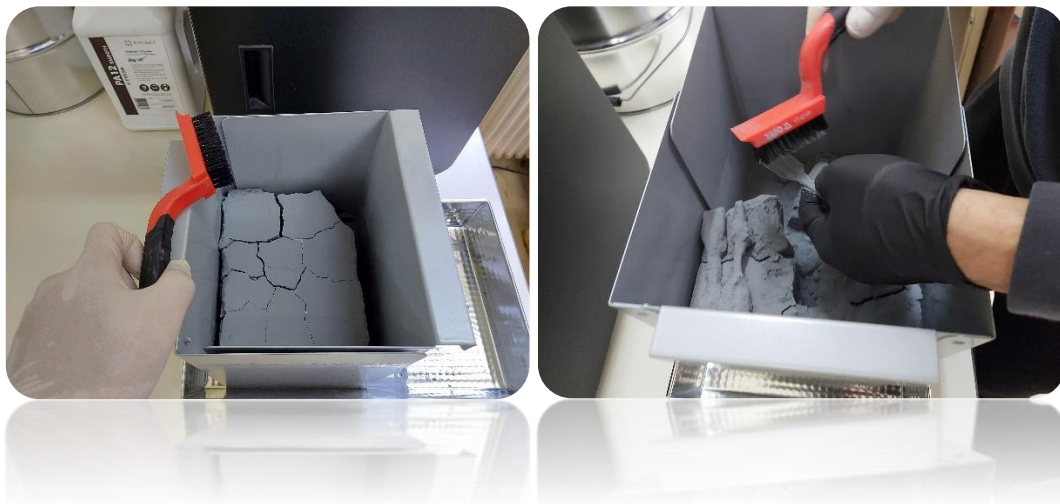
*Εικόνα 40: Εξοπλισμός για το στάδιο της μετεκτύπωσης*

Αρχικά τοποθετείται το κουτί αφαίρεσης υλικού πάνω από τον όγκο εκτύπωσης και το έμβολο εκτύπωσης ανεβαίνει προς τα πάνω με το επεξεργασμένο και μη επεξεργασμένο υλικό.



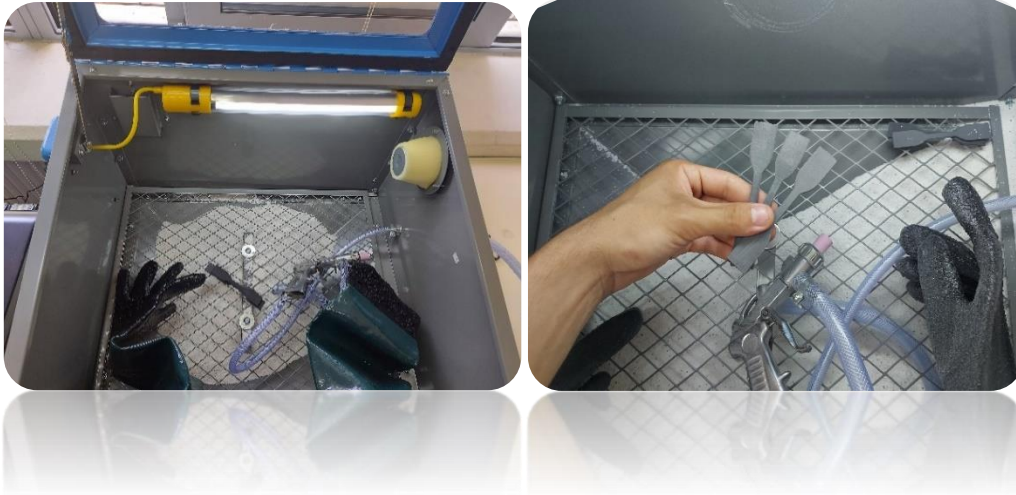
*Εικόνα 41: Αφαίρεση αντικειμένου από τον θάλαμο*

Σε αυτό το στάδιο με τη βοήθεια μίας βούρτσας αφαιρείται η μεγαλύτερη ποσότητα εναπομένον υλικού από τα δοκίμιο.



*Εικόνα 42: Αφαίρεση αχρησιμοποίητης σκόνης*

Το δοκίμιο, έπειτα περνάει από το στάδιο της αμμοβολής. Σε αυτό το στάδιο η αχρησιμοποίητη σκόνη απομακρύνεται εντελώς από το αντικείμενο με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα και ειδικού υλικού (άμμου) αφήνοντας μία χαρακτηριστική επιφάνεια mat στο δοκίμιο. Εκτός της ποιότητας επιφανείας αυτή η διεργασία πραγματοποιείται για την ανάδειξη των λεπτομερειών ενός εκτυπωμένου αντικειμένου, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



*Εικόνα 43: Πριν τη διεργασία της αμμοβολής*



*Εικόνα 44: Αποτέλεσμα μετά την διεργασία της αμμοβολής*

Με το πέρας της συγκεκριμένης διαδικασίας το δοκίμιο είναι έτοιμο προς χρήση και έπειτα ακολουθεί ο καθαρισμός του εκτυπωτή.

Με τη βοήθεια της σκούπας συλλέγεται η περισσευούμενη παιπάλη μέσα από τον εκτυπωτή αλλά και έξω από αυτόν.





*Εικόνα 45: Καθαρισμός Εκτυπωτή*

Στο τελευταίο βήμα το αυτόματο κόσκινο αναμειγνύει και κοσκινίζει το επαναχρησιμοποιούμενο υλικό, αφαιρώντας υπολείμματα και ακαθαρσίες εξασφαλίζοντας βέλτιστες συνθήκες εκτύπωσης. Σε αυτό το σημείο προστίθεται και το 30% της fresh powder και αναμειγνύεται με την χρησιμοποιημένη πούδρα. Το υλικό πλέον είναι έτοιμο για την επόμενη εκτύπωση.



*Εικόνα 46: Κόσκινο Υλικού Εκτύπωσης*

## Αποτελέσματα Προεργασίας

Ακολουθώντας τις διαδικασίες που αναλύθηκαν παραπάνω, αρχικά δημιουργήθηκαν όλα τα αρχεία Scode, βάση του τελικού πίνακα πειραματικού σχεδιασμού και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ					ΔΟΚΙΜΙΑ			ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ		
Αριθμός Πειράτων	Επιφάνεια στο Επίπεδο	Πάχος Στρωσης (mm)	Μοιρές ως προς το επίπεδο (°)	Ισχύς Laser (Watt)				ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	POWDER IN FEED BED	POWDER AFTER PRINT
1	A	0,075	0	0,5	1.1	1.2	1.3	6H 50M	1,67L	0,23L
2	A	0,075	45	1	2.1	2.2	2.3	17H 27M	4,77L	1,04L
3	A	0,075	90	1,5	3.1	3.2	3.3	22H 56M	5,61L	1,35L
4	A	0,125	0	0,5	4.1	4.2	4.3	5H 27M	1,71L	0,24L
5	A	0,125	45	1	5.1	5.2	5.3	11H 39M	4,78L	1,04L
6	A	0,125	90	1,5	6.1	6.2	6.3	14H 55M	5,98L	1,36L
7	A	0,175	0	1	7.1	7.2	7.3	4H 41M	1,71L	0,24L
8	A	0,175	45	1,5	8.1	8.2	8.3	9H 9M	4,78L	1,04L
9	A	0,175	90	0,5	9.1	9.2	9.3	11H 29M	5,98L	1,36L
10	B	0,075	0	1,5	10.1	10.2	10.3	9H 51M	2,20L	0,39L
11	B	0,075	45	0,5	11.1	11.2	11.3	19H 35M	4,83L	1,15L
12	B	0,075	90	1	12.1	12.2	12.3	22H 56M	5,53L	1,35L
13	B	0,125	0	1	13.1	13.2	13.3	6H59M	2,21L	0,39L
14	B	0,125	45	1,5	14.1	14.2	14.3	12H 54M	4,84L	1,15L
15	B	0,125	90	0,5	15.1	15.2	15.3	14H 55M	5,54L	1,36L
16	B	0,175	0	1,5	16.1	16.2	16.3	6H 10M	2,21L	0,39L
17	B	0,175	45	0,5	17.1	17.2	17.3	10H 3M	4,85L	1,15L
18	B	0,175	90	1	18.1	18.2	18.3	11H 29M	5,56L	1,36L

Πίνακας 3: Πειράματα Διαδικασίας

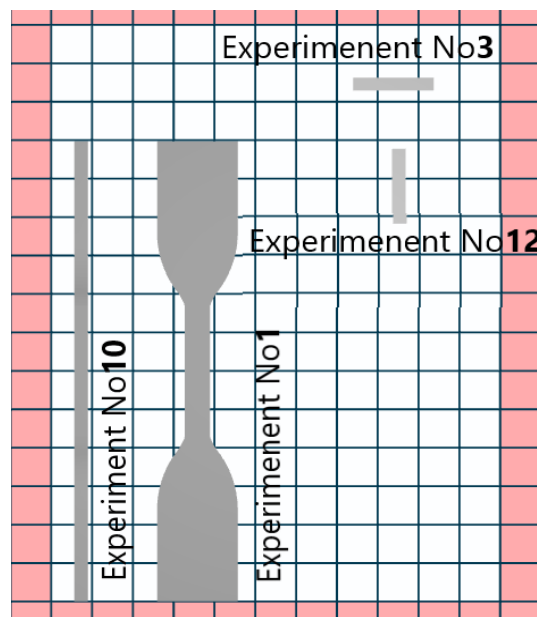
Όπως φαίνεται στον πίνακα παρέχονται πληροφορίες για τον χρόνο εκτύπωσης, την ποσότητα πούδρας που πρέπει να τοποθετηθεί στο έμβολο τροφοδοσίας και την ποσότητα πούδρας που πρέπει να προστεθεί στο χρησιμοποιημένο υλικό μετά την εκτύπωση. Επίσης παρουσιάζονται τα δοκίμια τα οποία κωδικοποιήθηκαν με αριθμούς προς διευκόλυνση της διαδικασίας στις μηχανικές καταπονήσεις για την αποφυγή λάθους και αναγνώρισης των σπασμένων μερών τους. Παρακάτω δημιουργήθηκε ένας πίνακας με κριτήριο την τοποθέτηση των μοιρών στις οποίες φαίνονται εκ πρώτης όψεως κρίσιμες διαφορές.

Αριθμός Πειραμάτων	Επιφάνεια στο Επίπεδο	Πάχος Στρώσης (mm)	Μοιρές ως προς το επίπεδο (°)	Ισχύς Laser (Watt)	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	POWDER IN FEED BED	POWDER AFTER PRINT
<b>ΜΗΔΕΝ ΜΟΙΡΕΣ</b>							
1	A	0,075	0	0,5	6H 50M	1,67L	0,23L
4	A	0,125	0	0,5	5H 27M	1,71L	0,24L
7	A	0,175	0	1	4H 41M	1,71L	0,24L
10	B	0,075	0	1,5	9H 51M	2,20L	0,39L
13	B	0,125	0	1	6H59M	2,21L	0,39L
16	B	0,175	0	1,5	6H 10M	2,21L	0,39L
<b>ΣΑΡΑΝΤΑΠΕΝΤΕ ΜΟΙΡΕΣ</b>							
2	A	0,075	45	1	17H 27M	4,77L	1,04L
5	A	0,125	45	1	11H 39M	4,78L	1,04L
8	A	0,175	45	1,5	9H 9M	4,78L	1,04L
11	B	0,075	45	0,5	19H 35M	4,83L	1,15L
14	B	0,125	45	1,5	12H 54M	4,84L	1,15L
17	B	0,175	45	0,5	10H 3M	4,85L	1,15L
<b>ΕΝΝΕΝΗΝΤΑ ΜΟΙΡΕΣ</b>							
3	A	0,075	90	1,5	22H 56M	5,61L	1,35L
6	A	0,125	90	1,5	14H 55M	5,98L	1,36L
9	A	0,175	90	0,5	11H 29M	5,98L	1,36L
12	B	0,075	90	1	22H 56M	5,53L	1,35L
15	B	0,125	90	0,5	14H 55M	5,54L	1,36L
18	B	0,175	90	1	11H 29M	5,56L	1,36L

**Πίνακας 4:** Συγκριτικός πίνακας ωρών εκτύπωσης και υλικού

Αρχικά παρατηρείτε ξεκάθαρα πως τα πειράματα με την παράμετρο **45°** και **90°** παρουσιάζουν μεγαλύτερους χρόνους εκτυπώσεων σε σχέση με των **0°**, κάτι απόλυτα λογικό εφόσον στην πρώτη περίπτωση τα δοκίμια είναι τοποθετημένα κατά μήκος του άξονα Z και χρειάζονται περισσότερες στρώσεις για την δημιουργία τους. Πιο συγκεκριμένα οι μεγαλύτεροι χρόνοι παρουσιάζονται στις 90°. Έπειτα στην περίπτωση των 45° συναντώνται επίσης μεγάλοι χρόνοι εκτύπωσης που επηρεάζονται ελάχιστα και από την πρώτη παράμετρο, ενώ στην τελευταία

περίπτωση των  $0^\circ$  οι χρόνοι είναι με διαφορά οι μικρότεροι. Όπως φαίνεται και στην κάτω παρακάτω, το πείραμα No12 και το πείραμα No3 (περιπτώσεις  $90^\circ$ ), παρόλο που έχουν διαφορετική τοποθέτηση στον όγκο εκτύπωσης βάση της πρώτης παραμέτρου, οι χρόνοι εκτύπωσης τους είναι ακριβώς ίδιοι, διότι και στις 2 περιπτώσεις το laser διαμορφώνει ίδιο εμβαδόν επιφανείας για τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου. Σε αντίθετη περίπτωση στο πείραμα No1 και στο πείραμα No10 (περιπτώσεις  $0^\circ$ ) τα εμβαδά επιφανείας είναι διαφορετικά, με αποτέλεσμα η πρώτη εκτύπωση να χρήζει λιγότερου χρόνου υλοποίησης, αφού ανά διαμόρφωση μίας στρώσης δημιουργείται μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με το πείραμα 10. Οι χρόνοι όπως είναι λογικό βέβαια επηρεάζονται και από την παράμετρο του ύψος στρώσης, επειδή μεγαλύτερο ύψος σημαίνει λιγότερες στρώσεις για τη δημιουργία του αντικειμένου οπότε λιγότερος χρόνος αλλά ταυτόχρονα και χαμηλότερη ποιότητα επιφανείας και λεπτομερειών.



*Εικόνα 47: Τοποθέτηση δοκιμών στον όγκο εκτύπωσης*

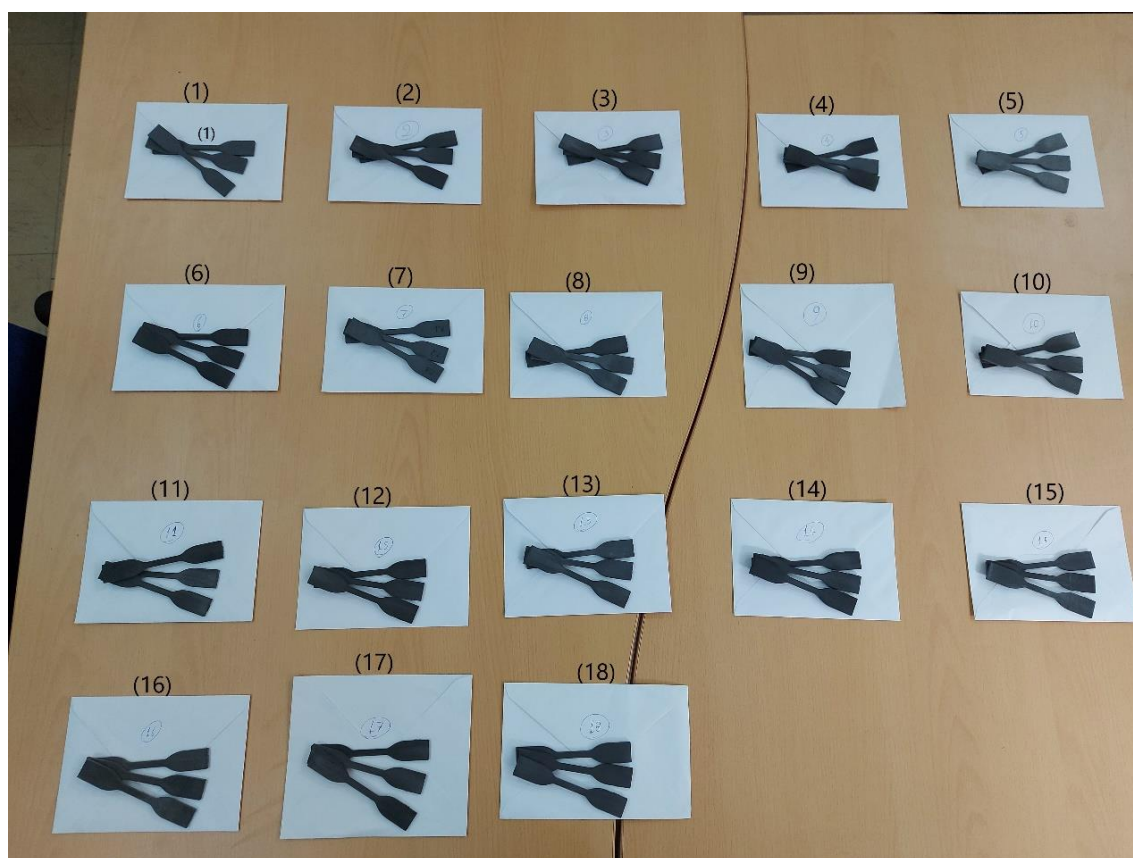
Οι μεγάλοι χρόνοι εκτύπωσης επίσης, παρουσιάζουν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και φθορά των εξαρτημάτων (αναλώσιμων και μη) του εκτυπωτή. Έπειτα όπως αναλύθηκε και στην θεωρία όταν το υλικό παραμένει για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάτω από υψηλές θερμοκρασίες προκαλείται η αποικοδόμηση του. Τέλος, παρατηρείτε πως στις περιπτώσεις των  $45^\circ$  και  $90^\circ$  χρειάζεται περισσότερο υλικό για την εκτύπωση αλλά και για την ανάμειξη τους έπειτα, σε αντίθεση με τις



περιπτώσεις των  $0^\circ$ , κάτι το οποίο συνεπάγεται με μεγαλύτερο κόστος εκτύπωσης στις  $45^\circ$  και  $90^\circ$  καθώς και μεγαλύτερη καταπόνηση του υλικού.

### Αποτελέσματα Εκτύπωσης

Εφόσον πραγματοποιήθηκαν όλα τα βήματα της διαδικασίας εκτύπωσης που αναλύονται εκτενώς παραπάνω για κάθε πείραμα ξεχωριστά προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

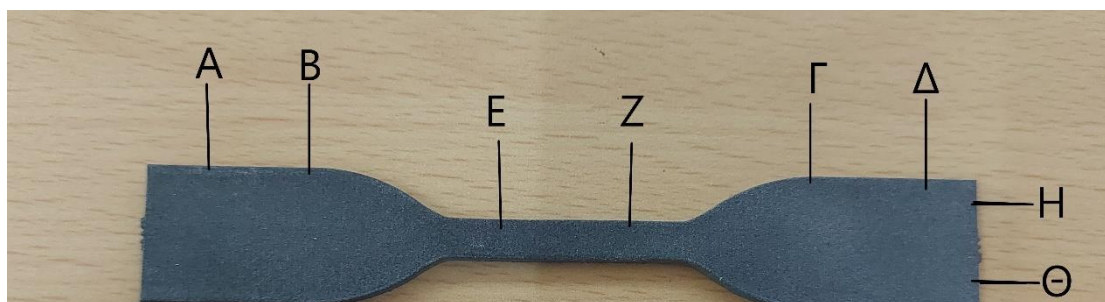


*Εικόνα 48: Δοκίμια Εκτύπωσης*

Κάποια από τα πειράματα που είχαν κοινές παραμέτρους το πάχος στρώσης και τη ισχύς laser εκτυπώθηκαν μαζί, για οικονομία χρόνου και υλικού. Για κάθε περίπτωση εκτυπώθηκαν τρία δοκίμια βάση του προτύπου ASTM, όπως φαίνεται και στην εικόνα.

### Διαστασιολογικός Έλεγχος

Η εκτύπωση τουλάχιστον τριών δοκιμών βάση του προτύπου πραγματοποιείται έτσι ώστε να φανεί μέσω διαστασιολογικό ελέγχου κατά πόσο είναι επαναλήψιμη η διαδικασία που πραγματοποιείται για κάθε περίπτωση. Για την μέτρηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας 0,01 mm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά ISO 6906 σε θερμοκρασία δωματίου.



*Εικόνα 49: Σημεία μετρήσεων*

Για κάθε δοκίμιο πάρθηκαν 14 μετρήσεις. Στα σημεία A,B,Γ,Δ μετρήθηκαν το πάχος και το ύψος του δοκιμίου. Στα σημεία E,Z μετρήθηκαν εξίσου το πάχος λαιμού και το ύψος λαιμού, ενώ στα σημεία H,Θ μετρήθηκε το μήκος. Ύστερά, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση για κάθε ένα δοκίμιο, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα με ακρίβεια εκατοστού του χιλιοστού.

Γενικότερα παρατηρείται εκ πρώτης όψεως η ύπαρξη επαναληψιμότητας μεταξύ των δοκιμών και μάλιστα σε αρκετά δοκίμια η τυπική απόκλιση δεν παρουσιάζει διαφορές. Για να πραγματοποιηθεί καλύτερη ανάλυση των δεδομένων βέβαια, οι τιμές διαχωρίστηκαν βάση του ύψους στρώσης, εφόσον αποτελεί τον κύριο παράγοντα για την ύπαρξη ακρίβειας στο παραγόμενο αντικείμενο. Βρίσκοντας λοιπόν τις μέγιστες τιμές τυπικής απόκλισης για κάθε πείραμα και συγκρίνοντας τις περιπτώσεις για κάθε παράμετρο, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Αρχικά διαπιστώνεται πως οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην τυπική απόκλιση παρουσιάζονται στο ύψος στρώσης των 0.175mm, αποτέλεσμα αναμενόμενο εφόσον αποτελεί την μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου παρέχοντας μικρότερη ακρίβεια γεωμετρικών διαστάσεων και επιφανείας στο δοκίμιο σε σχέση με τις μικρότερες τιμές του ύψους στρώσης. Παρόλα αυτά η τιμή των 0.075mm (ως μικρότερη) δεν παρουσιάζει τα βέλτιστα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις, κάτι το οποίο

σημαίνει πως κάποια από τις υπόλοιπες παραμέτρους μπορεί να επηρεάζουν τις γεωμετρικές προδιαγραφές σε μεγαλύτερο βαθμό από το ύψος στρώσης. Κάνοντας παρόμοια ανάλυση για την παράμετρο της ισχύος laser προέκυψε πως επηρεάζει εξίσου σημαντικά τις γεωμετρικές προδιαγραφές. Παρατηρείται ξεκάθαρα από το πως την μικρότερη διακύμανση τιμών τυπικής απόκλισης εκφράζεται στα 0.5 Watt (0.01-0.16mm). Έπειτα ακολουθεί η τιμή του 1.0 Watt με διακύμανση 0,07 έως 0,15 mm και τέλος η τιμή του 1.5 Watt με την μεγαλύτερη διακύμανση, η οποία περιλαμβάνει και τη μεγαλύτερη τιμή τυπικής απόκλισης (0,35mm).

Για τις παραμέτρους 1 και 3 που αφορούν την τοποθέτηση στον όγκο εκτύπωσης πραγματοποιήθηκε παρόμοια ανάλυση χωρίς να παρουσιάζουν συγκεκριμένη επιρροή στο αποτέλεσμα των διαστάσεων του δοκιμίου.

Τυπική Αποκλιση	Δοκίμιο 1					Δοκίμιο 2					Δοκίμιο 3				
	Πάχος	Πάχος Λαιμού	Υψός	Υψός Λαιμού	Μήκος	Πάχος	Πάχος Λαιμού	Υψός	Υψός Λαιμού	Μήκος	Πάχος	Πάχος Λαιμού	Υψός	Υψός Λαιμού	Μήκος
S1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
S2	0,07	0,01	0,07	0,00	0,12	0,04	0,01	0,05	0,01	0,01	0,03	0,02	0,06	0,05	0,04
S3	0,14	0,09	0,12	0,03	0,08	0,19	0,17	0,13	0,08	0,07	0,15	0,05	0,13	0,02	0,02
S4	0,02	0,00	0,05	0,01	0,02	0,05	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,04	0,02	0,04	0,01
S5	0,07	0,07	0,05	0,16	0,02	0,07	0,03	0,05	0,06	0,09	0,08	0,08	0,15	0,07	0,03
S6	0,14	0,03	0,14	0,02	0,05	0,15	0,03	0,06	0,00	0,10	0,11	0,01	0,16	0,00	0,05
S7	0,10	0,01	0,10	0,03	0,03	0,07	0,04	0,13	0,25	0,10	0,03	0,02	0,07	0,02	0,05
S8	0,14	0,01	0,12	0,01	0,02	0,19	0,02	0,12	0,01	0,05	0,35	0,09	0,23	0,11	0,08
S9	0,02	0,01	0,04	0,00	0,10	0,03	0,01	0,07	0,00	0,16	0,03	0,01	0,05	0,01	0,05
S10	0,17	0,00	0,26	0,04	0,06	0,15	0,02	0,25	0,03	0,02	0,03	0,03	0,14	0,01	0,07
S11	0,05	0,02	0,05	0,02	0,09	0,04	0,01	0,06	0,00	0,13	0,02	0,01	0,06	0,01	0,04
S12	0,02	0,01	0,05	0,00	0,09	0,02	0,00	0,02	0,01	0,05	0,05	0,00	0,07	0,00	0,01
S13	0,14	0,05	0,04	0,01	0,23	0,04	0,01	0,06	0,01	0,23	0,05	0,03	0,09	0,01	0,11
S14	0,09	0,02	0,09	0,01	0,05	0,08	0,06	0,03	0,01	0,15	0,11	0,02	0,11	0,02	0,09
S15	0,02	0,02	0,06	0,00	0,02	0,03	0,00	0,06	0,02	0,02	0,02	0,00	0,06	0,00	0,09
S16	0,11	0,04	0,16	0,17	0,15	0,12	0,15	0,07	0,02	0,10	0,03	0,00	0,09	0,00	0,21
S17	0,02	0,01	0,02	0,04	0,06	0,04	0,02	0,06	0,00	0,13	0,03	0,00	0,04	0,00	0,07
S18	0,07	0,02	0,07	0,00	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,00	0,03	0,01	0,05

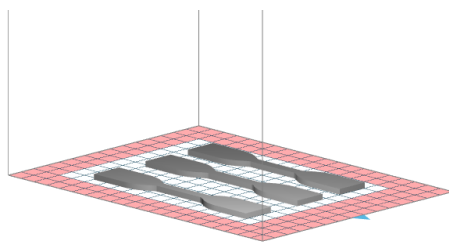
Πίνακας 5: Τυπικές Αποκλίσεις Δοκιμών

### Αποτελέσματα Μηχανικών Καταπονήσεων

Μετά την υλοποίηση των εκτυπώσεων και τον διαστασιολογικό έλεγχο, τα δοκίμια δοκιμάστηκαν σε μηχανικές καταπονήσεις εφελκυσμού μέσω του μηχανήματος Quasar 100, με ρυθμό παραμόρφωσης  $0,1 \text{ sec}^{-1}$ . Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο αντοχής υλικών Κώστας Γιαννακόπουλος, υπό την επιμέλεια του Δημήτρη Παπαγεωργίου. Από τις μετρήσεις εφαρμοζόμενου φορτίου-εφελκυσμού προέκυψαν τα ανάλογα διαγράμματα εφελκυσμού.

#### Πείραμα Νο1

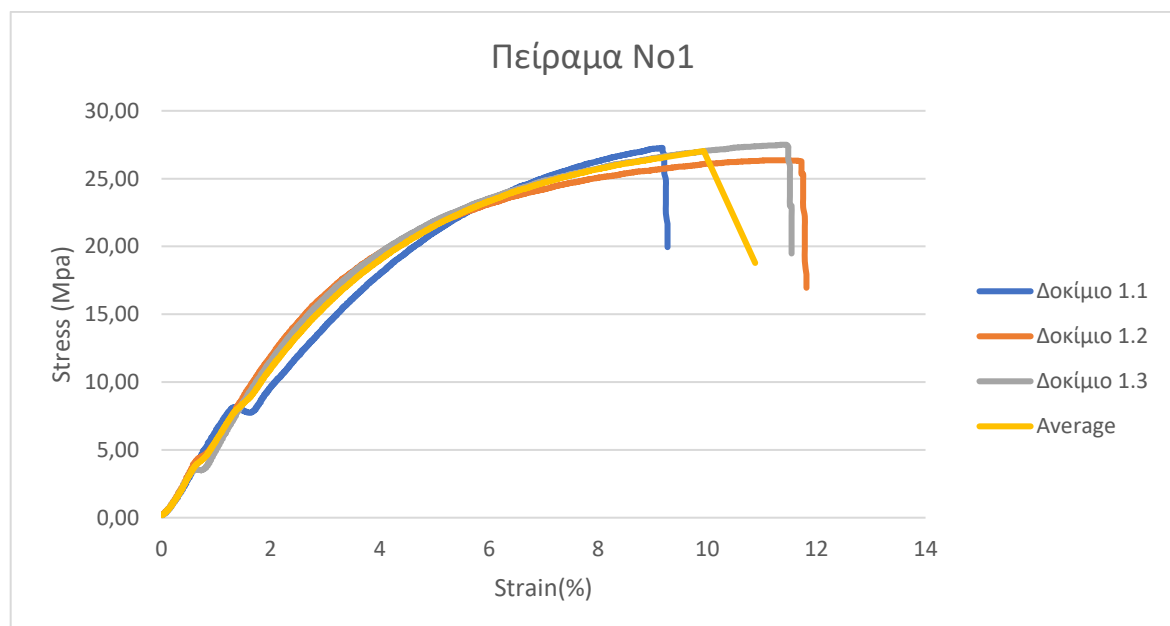
Για το πρώτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπώθηκαν σε γωνία κλίσης  $0^\circ$ , με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser  $0.5 \text{ Watt}$  και το ύψος στρώσης  $0,075 \text{ mm}$ . Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 1.1	27,27	9,18	641,00
Δοκίμιο 1.2	26,35	9,18	637,00
Δοκίμιο 1.3	27,50	11,45	593

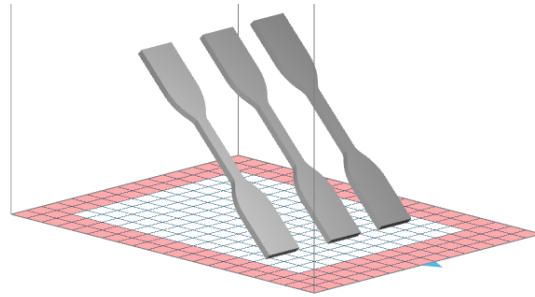
Εικόνα 50: Πείραμα Νο1

#### Διάγραμμα Εφελκυσμού



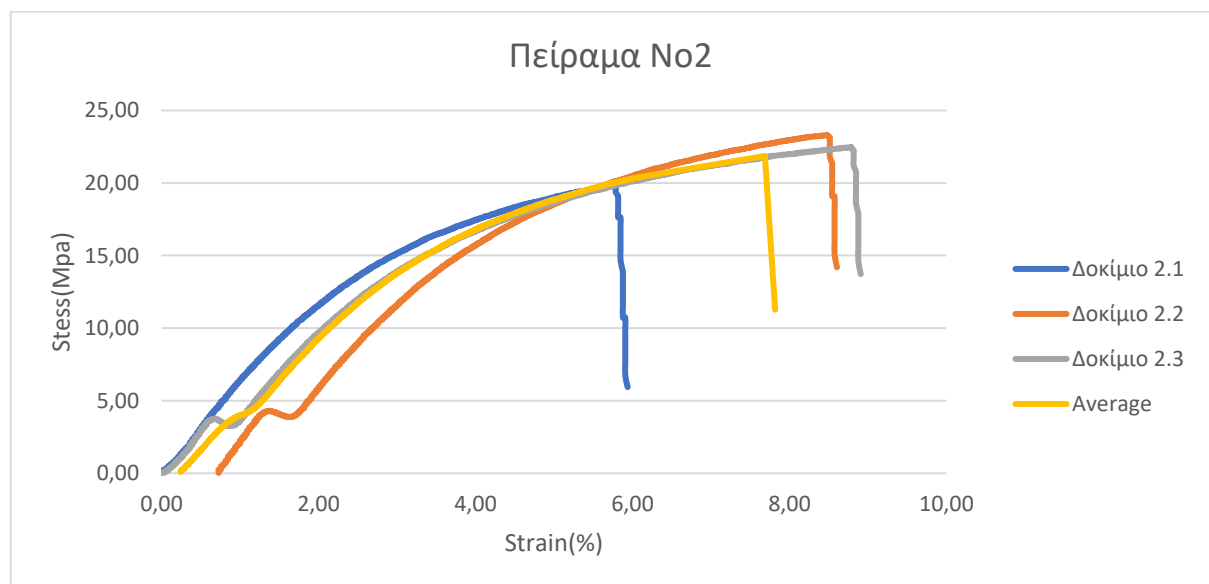
## Πείραμα Νο2

Για το δεύτερο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 45°, με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.0Watt και το ύψος στρώσης 0,075mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 51: Πείραμα Νο2

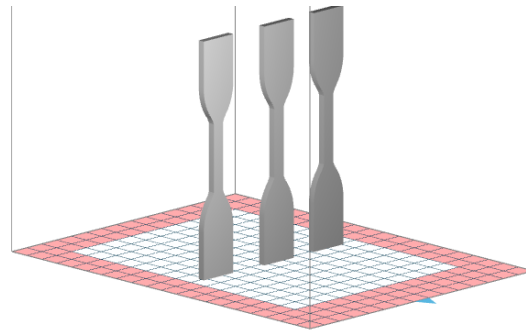
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 2.1	19,82	5,79	623,00
Δοκίμιο 2.2	23,31	8,48	735,00
Δοκίμιο 2.3	22,47	8,79	603

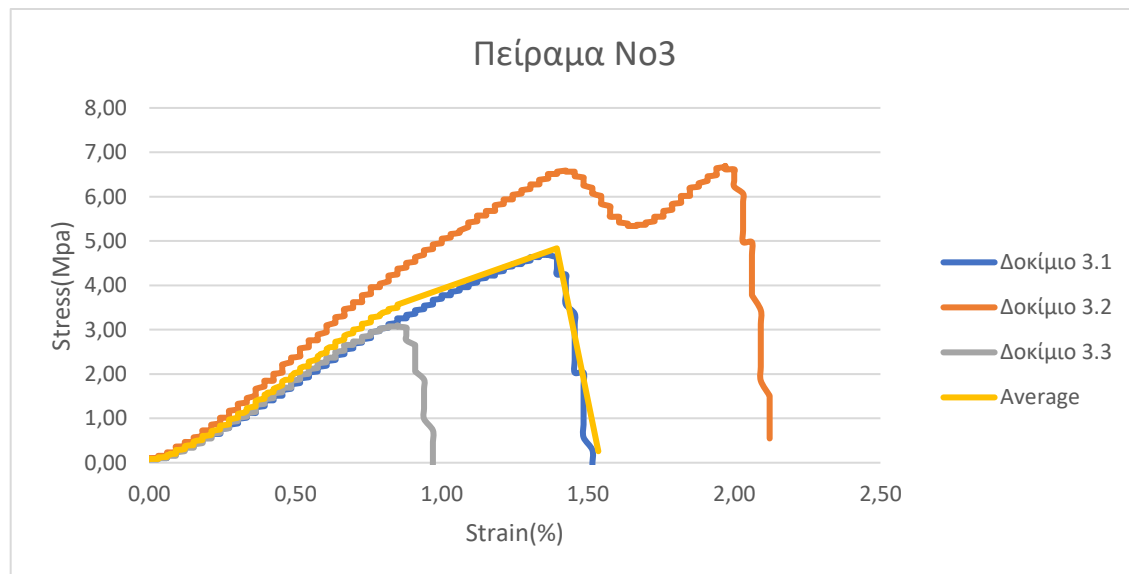
### Πείραμα Νο3

Για το τρίτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 90°, με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.5Watt και το ύψος στρώσης 0,075mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 52: Πείραμα Νο3

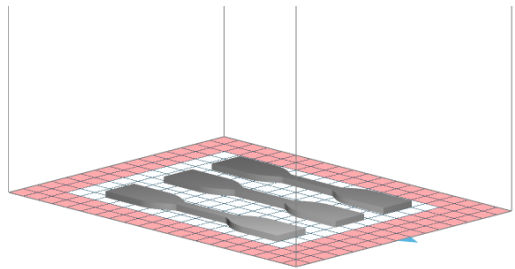
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 3.1	4,71	1,36	368
Δοκίμιο 3.2	6,69	1,97	499,00
Δοκίμιο 3.3	3,10	0,85	391,00

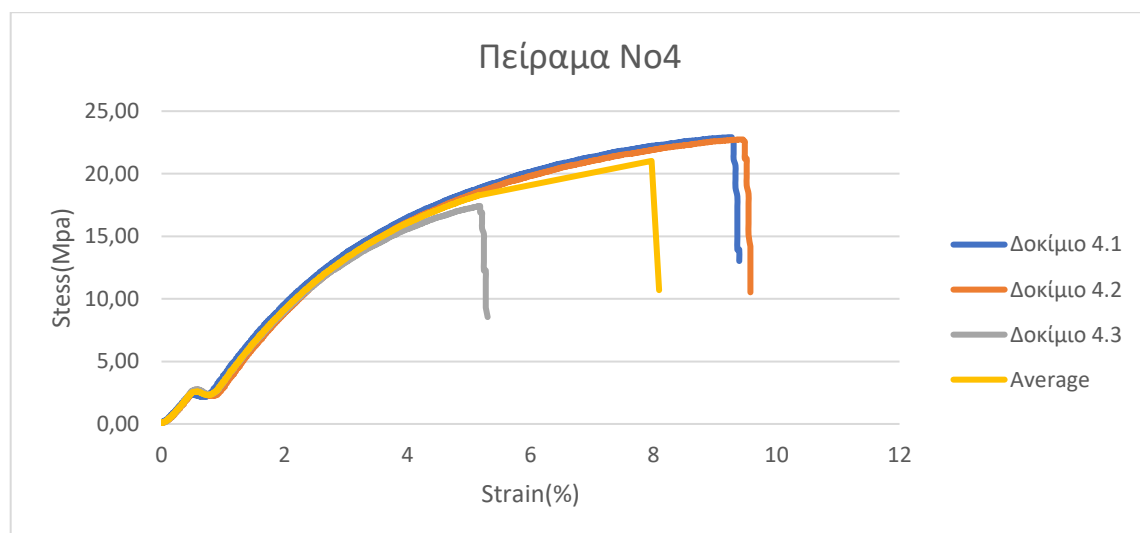
### Πείραμα Νο4

Για το τέταρτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης  $0^\circ$ , με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 0.5Watt και το ύψος στρώσης 0,125mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 53: Πείραμα Νο4

### Διάγραμμα Εφελκυσμού

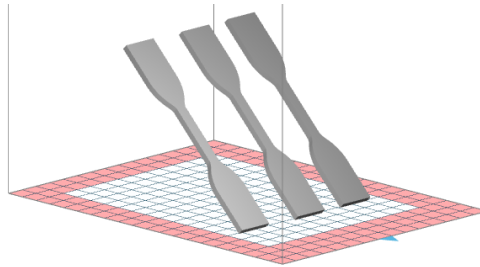


	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμο 4.1	22,92	9,27	491,00
Δοκίμο 4.2	22,73	9,45	476,00
Δοκίμο 4.3	17,42	5,18	497



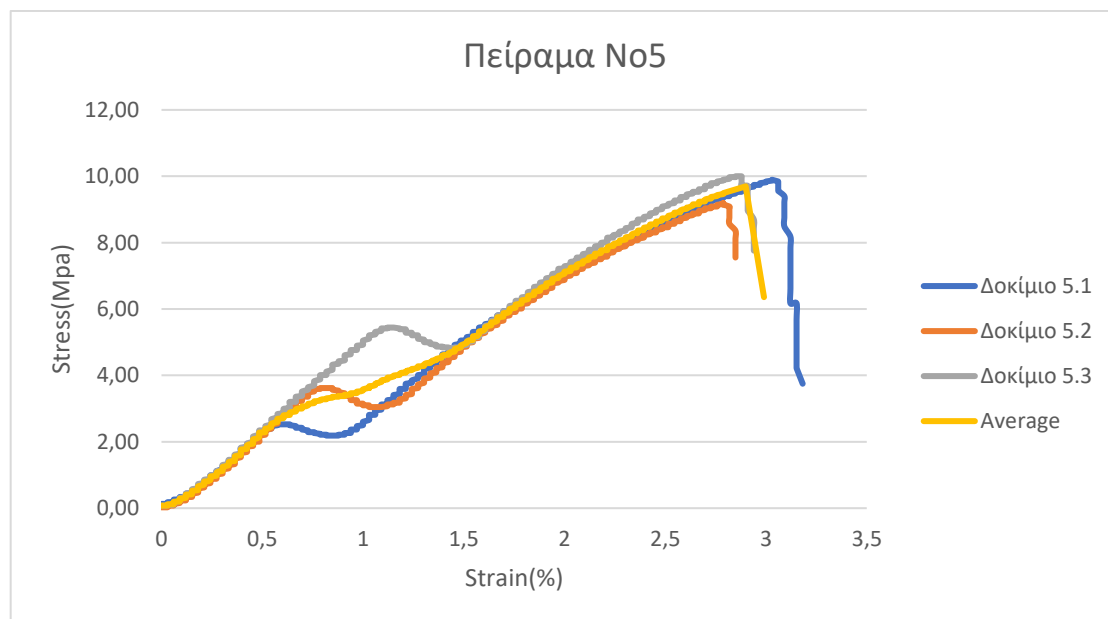
### Πείραμα Νο5

Για το πέμπτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης  $45^\circ$ , με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.0Watt και το ύψος στρώσης 0,125mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 54: Πείραμα Νο5

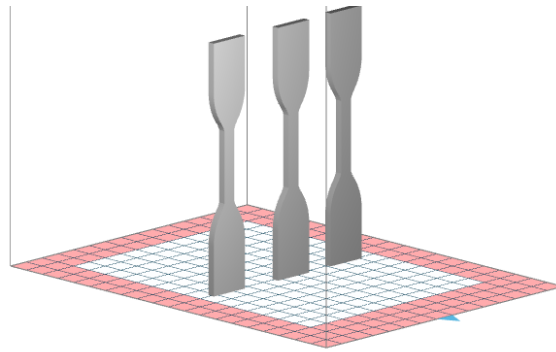
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 5.1	9,90	3,03	4,32
Δοκίμιο 5.2	9,19	2,79	481,00
Δοκίμιο 5.3	10,00	2,88	512

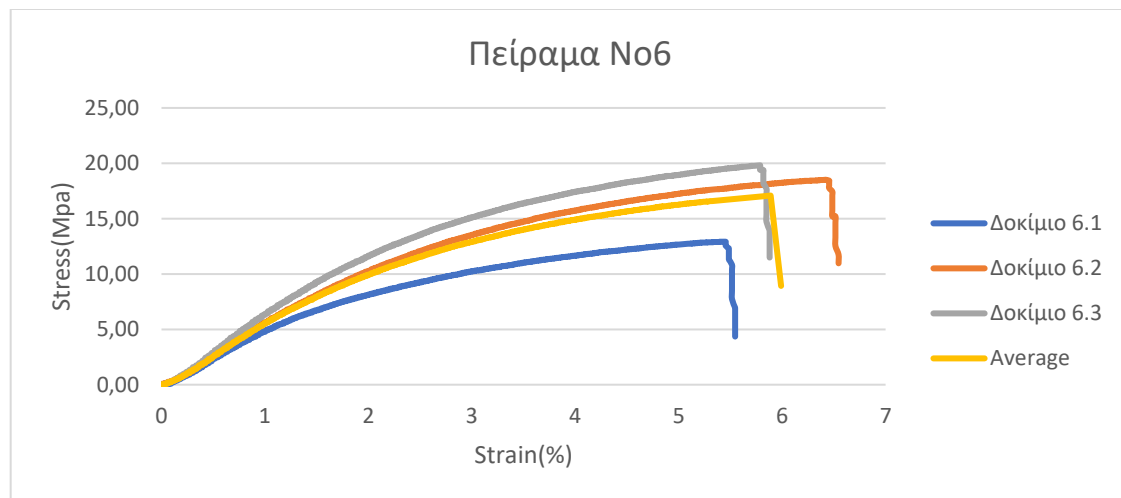
### Πείραμα Νο6

Για το έκτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 90°, με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.5Watt και το ύψος στρώσης 0,125mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 55: Πείραμα Νο6

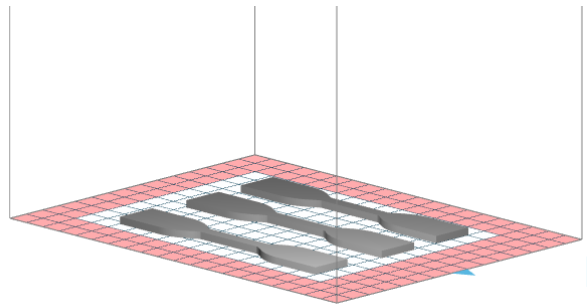
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 6.1	12,92	5,45	531,00
Δοκίμιο 6.2	18,52	6,42	551,00
Δοκίμιο 6.3	19,82	5,79	641

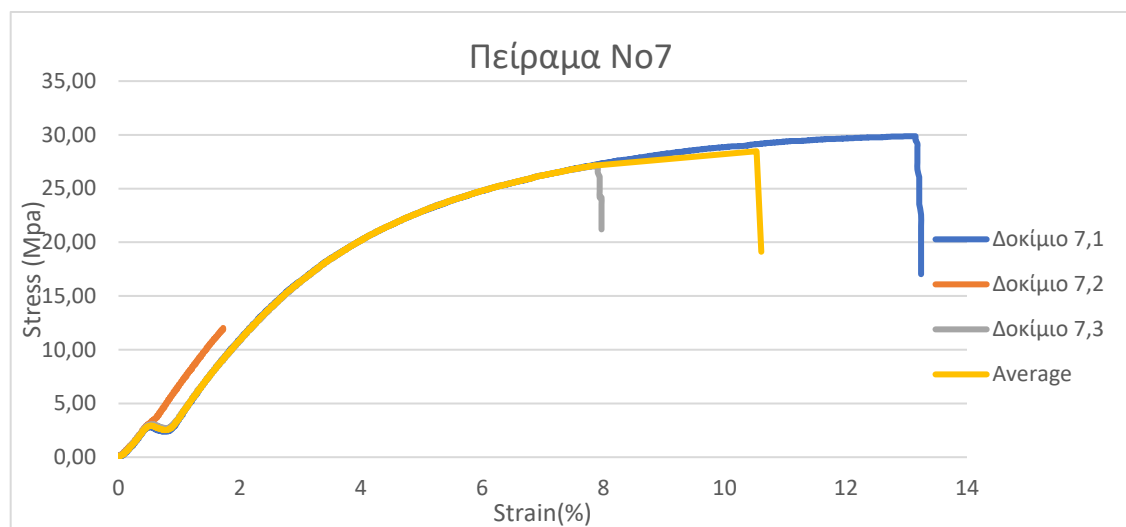
**Πείραμα Νο7**

Για το έβδομο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 0°, με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.0Watt και το ύψος στρώσης 0,175mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



*Εικόνα 56: Πείραμα Νο7*

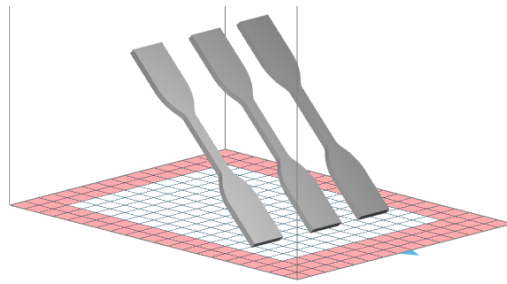
**Διάγραμμα Εφελκυσμού**



	<b>UTS (MPa)</b>	<b>%STRAIN</b>	<b>E (MPa)</b>
Δοκίμιο 7.1	29,87	13,15	592,00
Δοκίμιο 7.2	31,74	11,21	609,00
Δοκίμιο 7.3	27,08	7,91	604

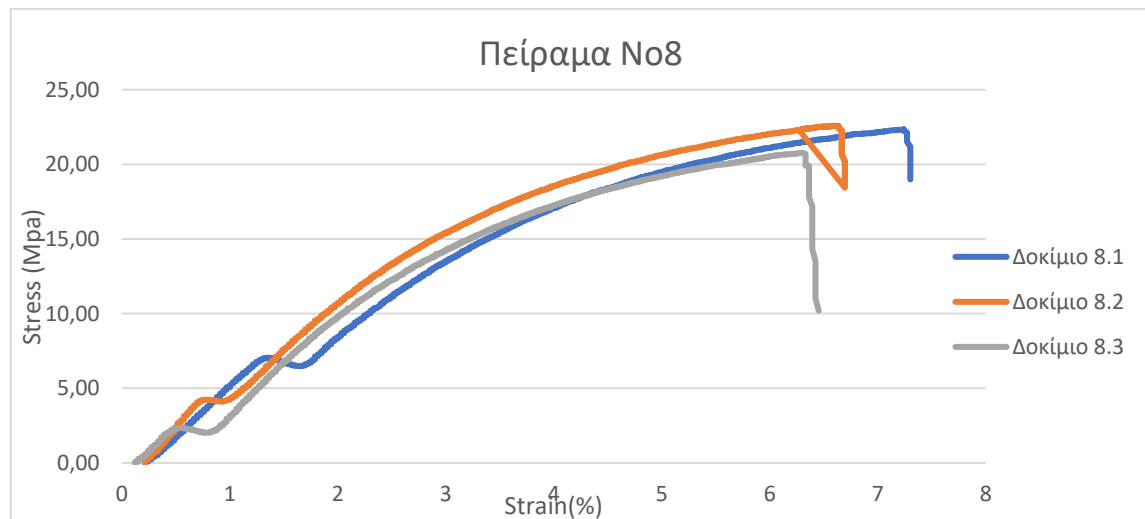
### Πείραμα Νο8

Για το όγδοο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 45°, με την μεγάλη επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.5Watt και το ύψος στρώσης 0,175mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 57: Πείραμα Νο8

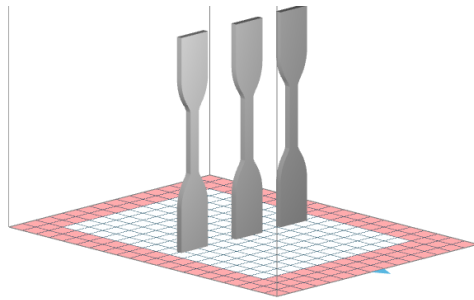
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 8.1	22,34	7,24	539,00
Δοκίμιο 8.2	22,58	6,64	550,00
Δοκίμιο 8.3	20,78	6,30	458

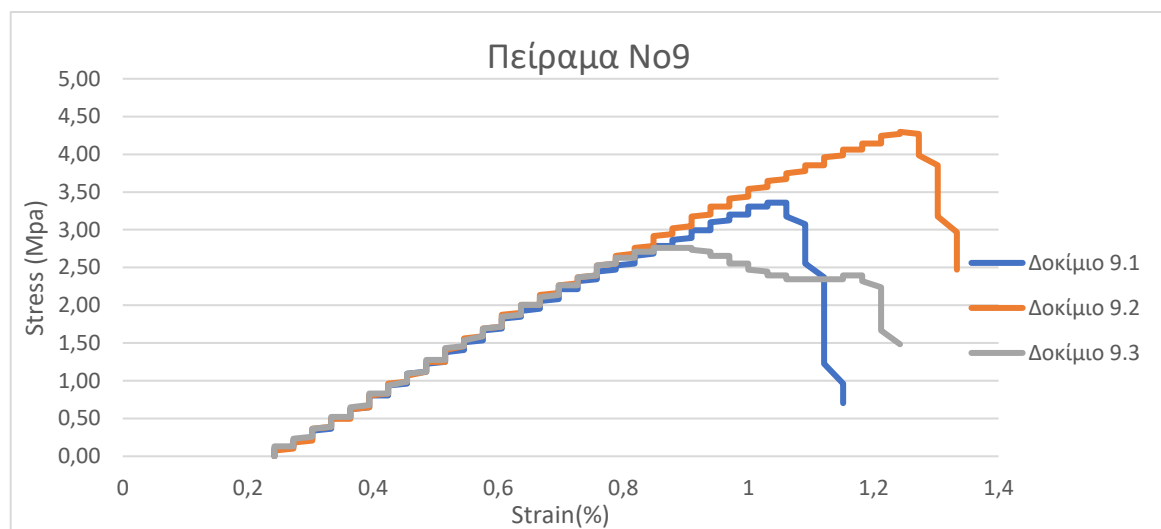
### Πείραμα Νο9

Για το ένατο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 90°, με την μεγάλη επιφάνεια της το επίπεδο, την ισχύ laser 0.5Watt και το ύψος στρώσης 0,175mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 58: Πείραμα Νο9

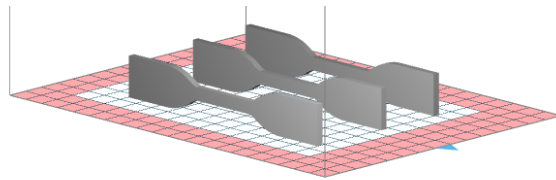
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 9.1	3,36	1,06	522,00
Δοκίμιο 9.2	4,30	1,24	545,00
Δοκίμιο 9.3	2,76	0,91	520

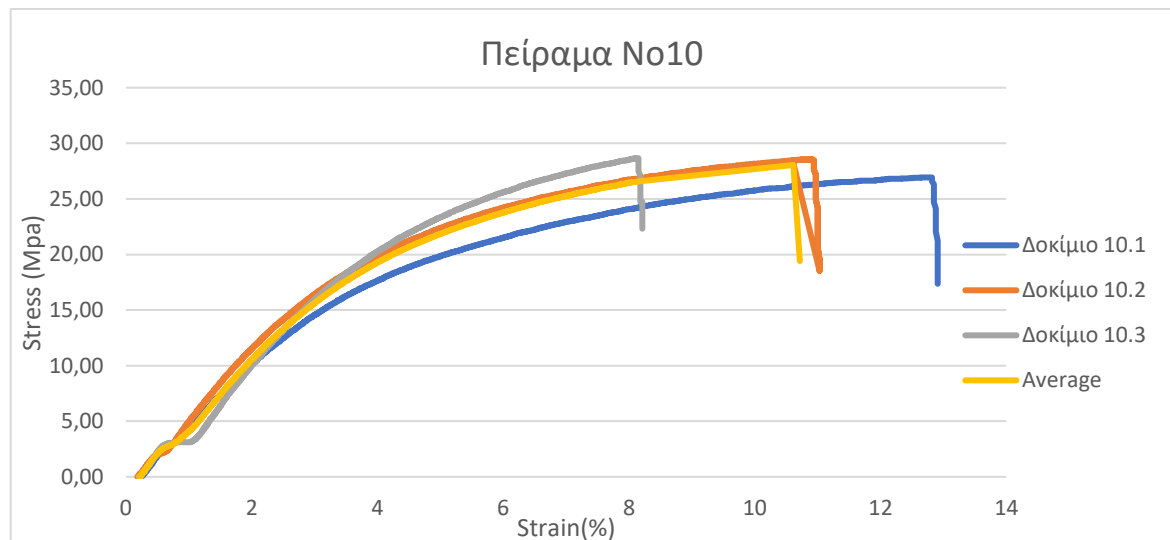
### Πείραμα Νο10

Για το δεύτερο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 0°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.5Watt και το ύψος στρώσης 0,075mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 59: Πείραμα Νο10

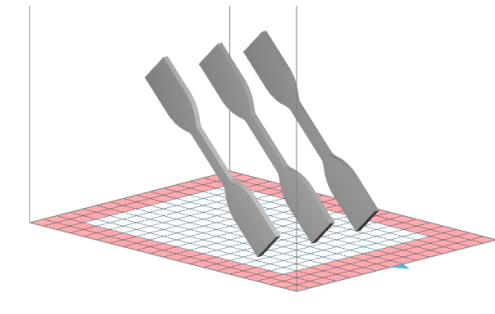
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμο 10.1	26,93	12,82	748,00
Δοκίμο 10.2	28,57	10,91	697,00
Δοκίμο 10.3	28,67	8,12	800

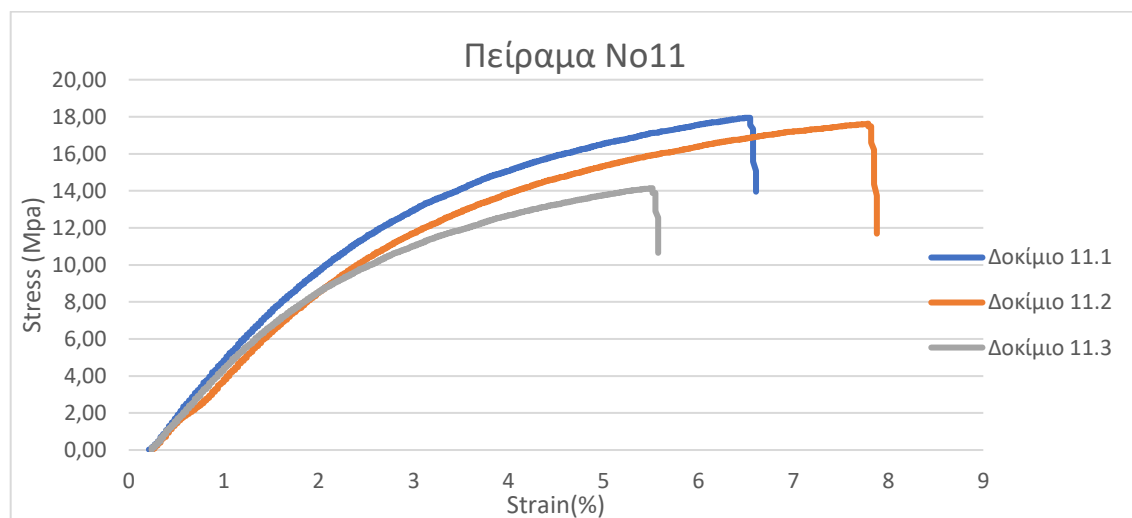
### Πείραμα Νο11

Για το ενδέκατο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 45°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 0.5Watt και το ύψος στρώσης 0,075mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 60: Πείραμα Νο11

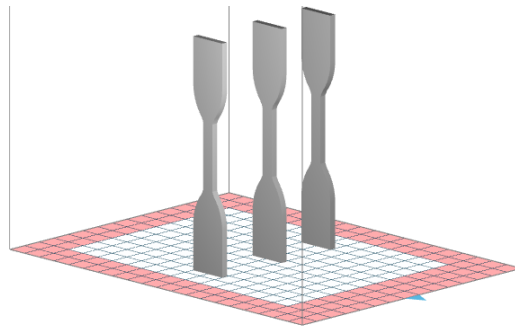
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 11.1	17,94	6,55	451,00
Δοκίμιο 11.2	17,63	7,79	296,00
Δοκίμιο 11.3	14,14	5,52	528

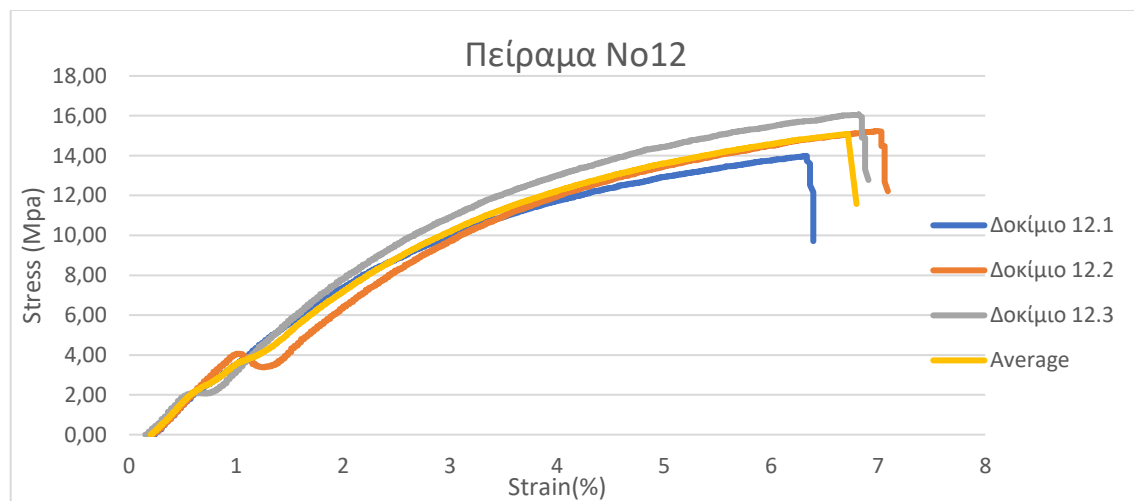
### Πείραμα Νο12

Για το δωδέκατο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 90°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.0Watt και το ύψος στρώσης 0,075mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 61: Πείραμα Νο12

### Διάγραμμα Εφελκυσμού

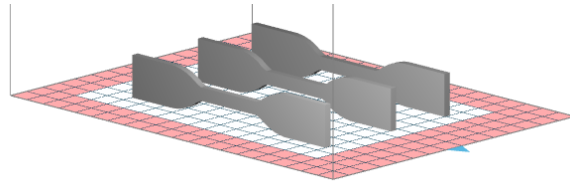


	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 12.1	13,98	6,33	326,00
Δοκίμιο 12.2	15,23	7,00	406,00
Δοκίμιο 12.3	16,07	6,82	354



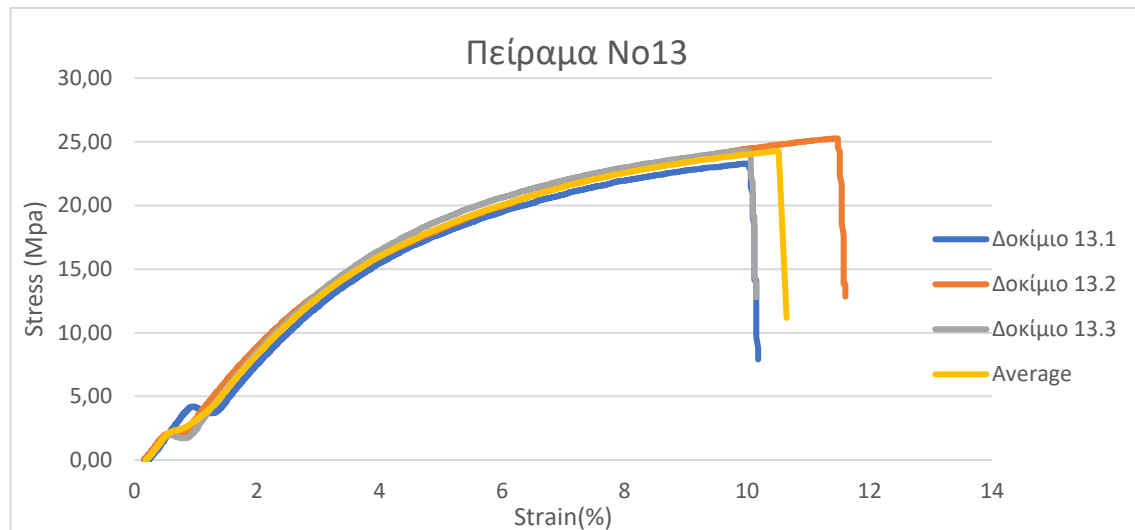
### Πείραμα Νο13

Για το δέκατο τρίτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης  $0^\circ$ , με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.0Watt και το ύψος στρώσης 0,125mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 62: Πείραμα Νο13

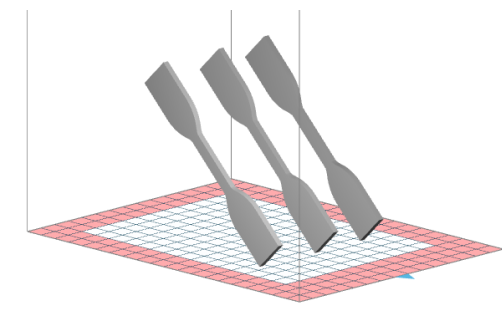
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 13.1	23,28	10,03	445,00
Δοκίμιο 13.2	25,26	11,48	372,00
Δοκίμιο 13.3	24,30	10,03	339

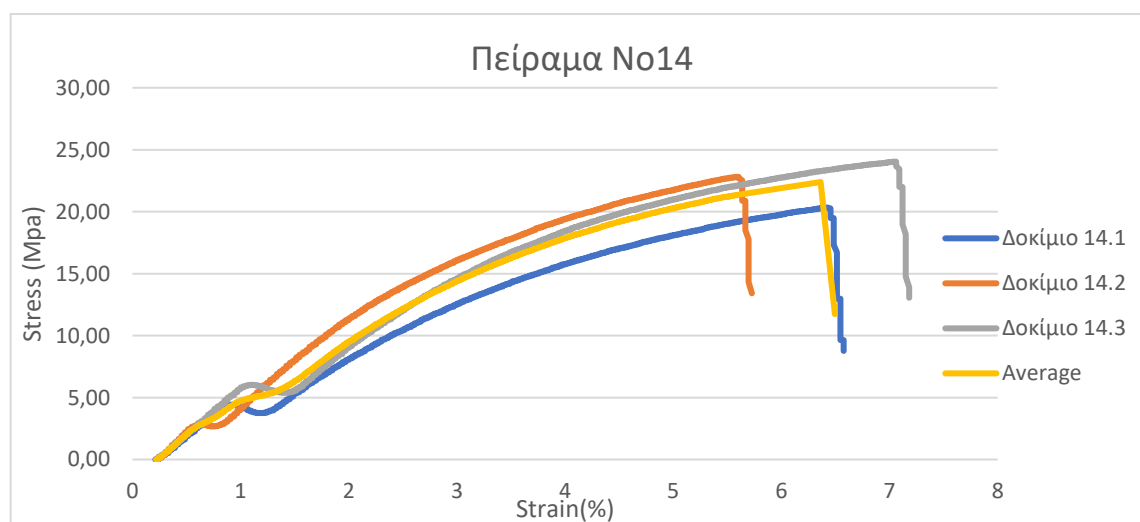
### Πείραμα Νο14

Για το δέκατο τέταρτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 45°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.5Watt και το ύψος στρώσης 0,125mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 63: Πείραμα Νο14

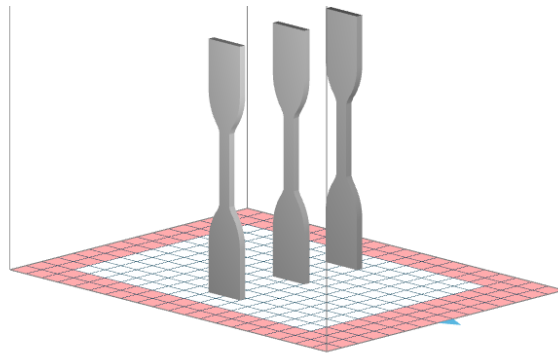
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 14.1	20,34	6,42	490,00
Δοκίμιο 14.2	22,81	5,61	533,00
Δοκίμιο 14.3	24,04	7,06	567

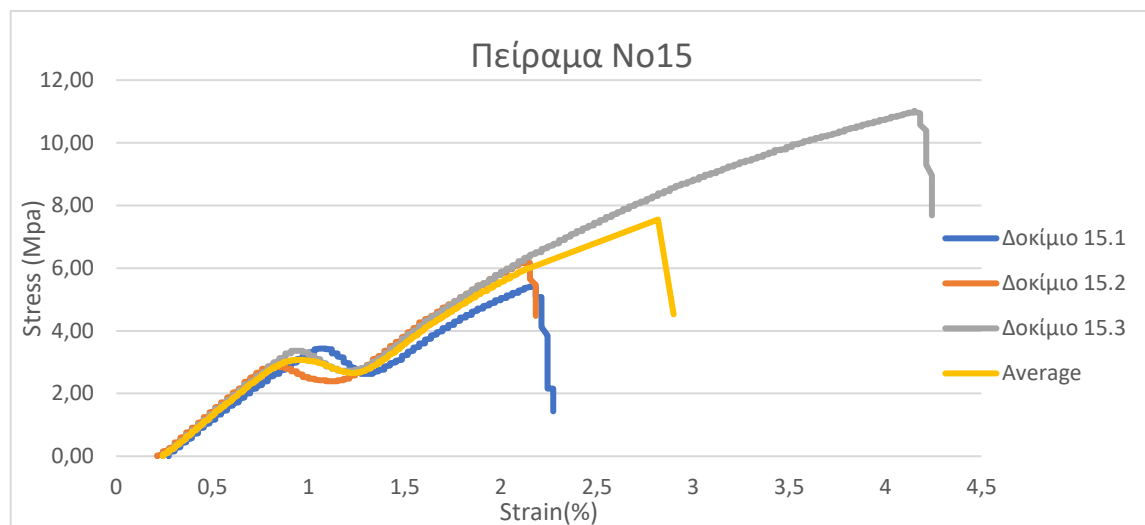
**Πείραμα Νο15**

Για το δέκατο πέμπτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 90°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 0.5Watt και το ύψος στρώσης 0,125mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 64: Πείραμα Νο15

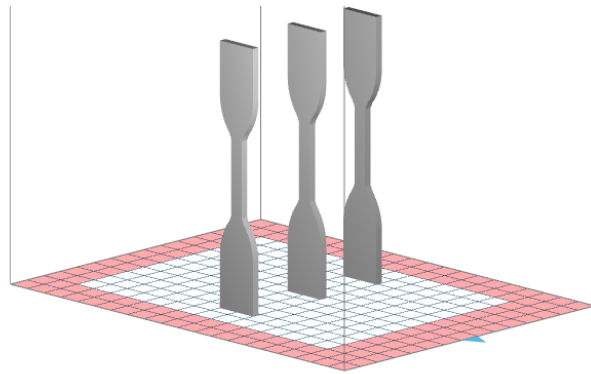
**Διάγραμμα Εφελκυσμού**



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 15.1	5,42	2,18	320,00
Δοκίμιο 15.2	6,22	2,12	353,00
Δοκίμιο 15.3	11,02	4,15	358

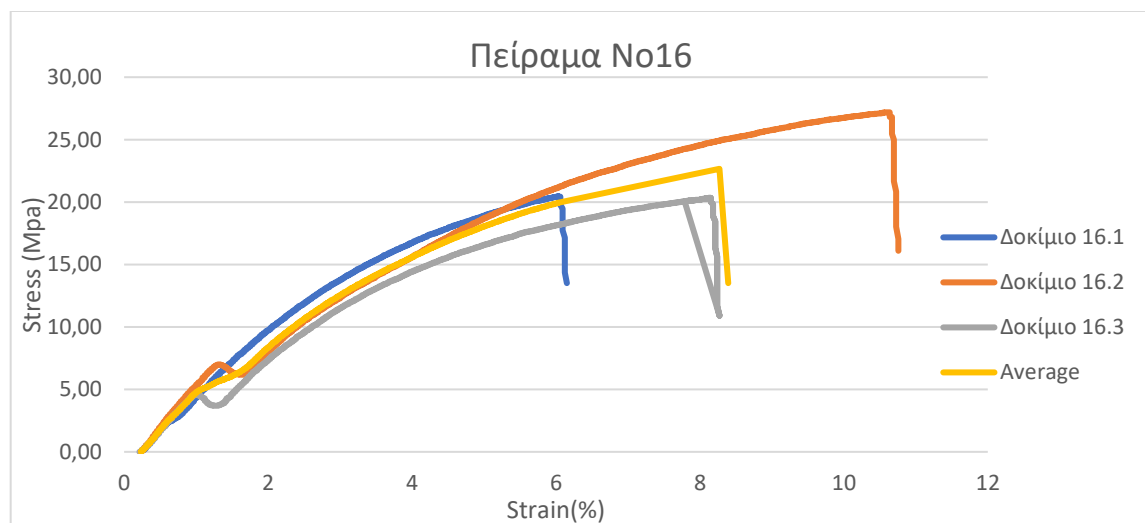
### Πείραμα Νο16

Για το δέκατο έκτο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 0°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.5Watt και το ύψος στρώσης 0,175mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 65: Πείραμα Νο16

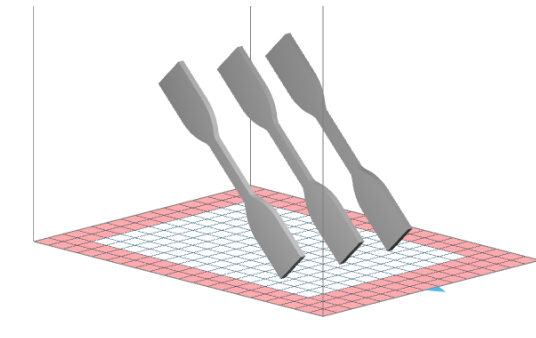
### Διάγραμμα Εφελκυσμού



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 16.1	20,47	6,03	366,00
Δοκίμιο 16.2	27,19	10,64	537,00
Δοκίμιο 16.3	20,34	8,15	450

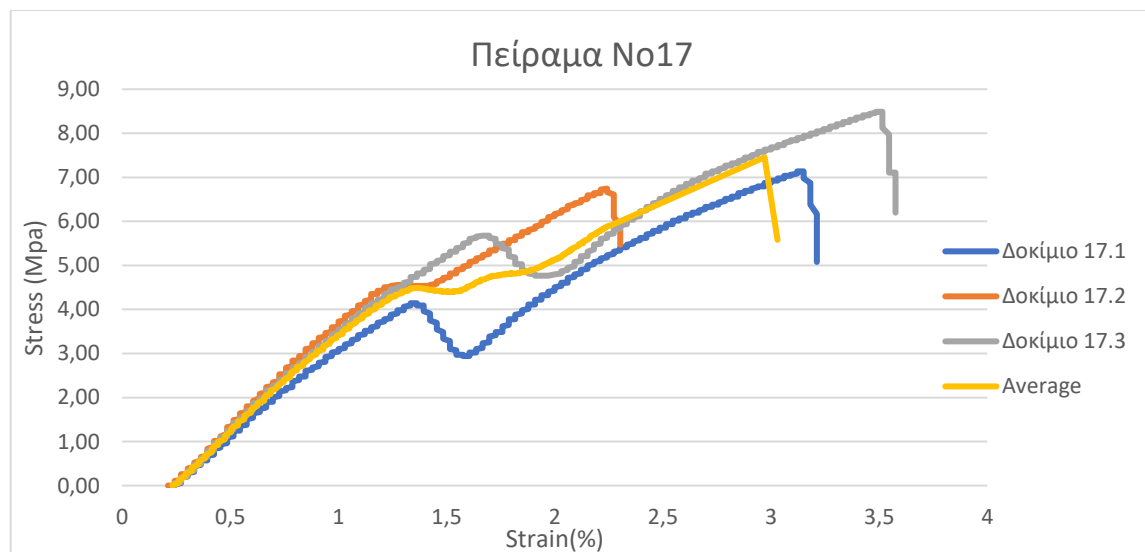
**Πείραμα Νο17**

Για το δέκατο έβδομο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 45°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 0.5Watt και το ύψος στρώσης 0,175mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



Εικόνα 66: Πείραμα Νο17

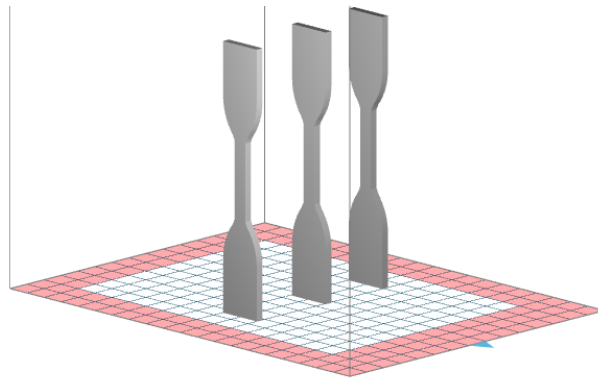
**Διάγραμμα Εφελκυσμού**



	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμιο 17.1	7,14	3,15	305,00
Δοκίμιο 17.2	6,74	2,24	373,00
Δοκίμιο 17.3	8,49	3,52	343

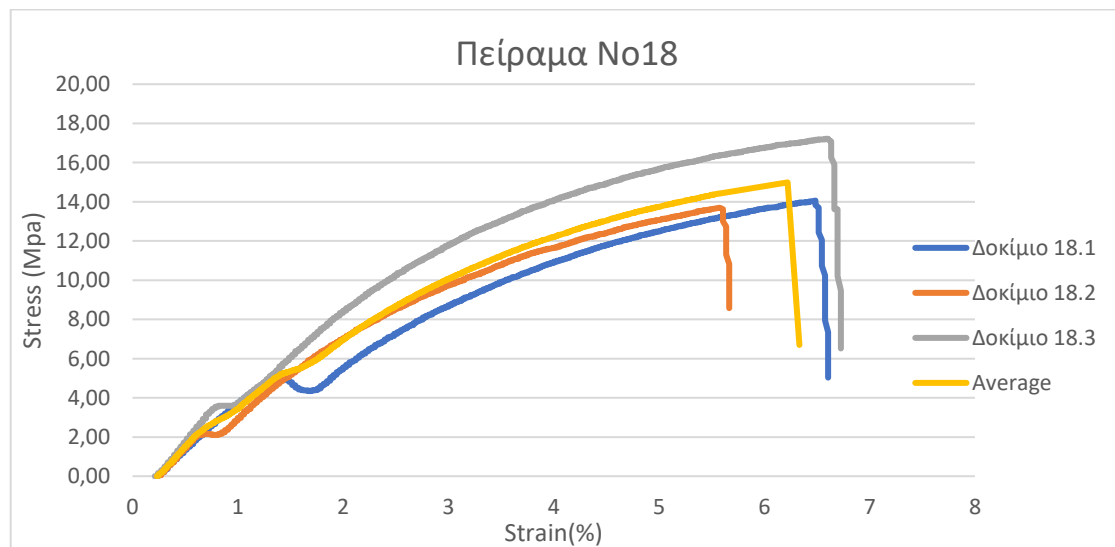
**Πείραμα Νο18**

Για το δέκατο όγδοο πείραμα τα δοκίμια εκτυπωθήκαν σε γωνία κλίσης 90°, με την μικρή επιφάνεια προς το επίπεδο, την ισχύ laser 1.0Watt και το ύψος στρώσης 0,175mm. Με την ολοκλήρωση της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε το ανάλογο διάγραμμα εφελκυσμού.



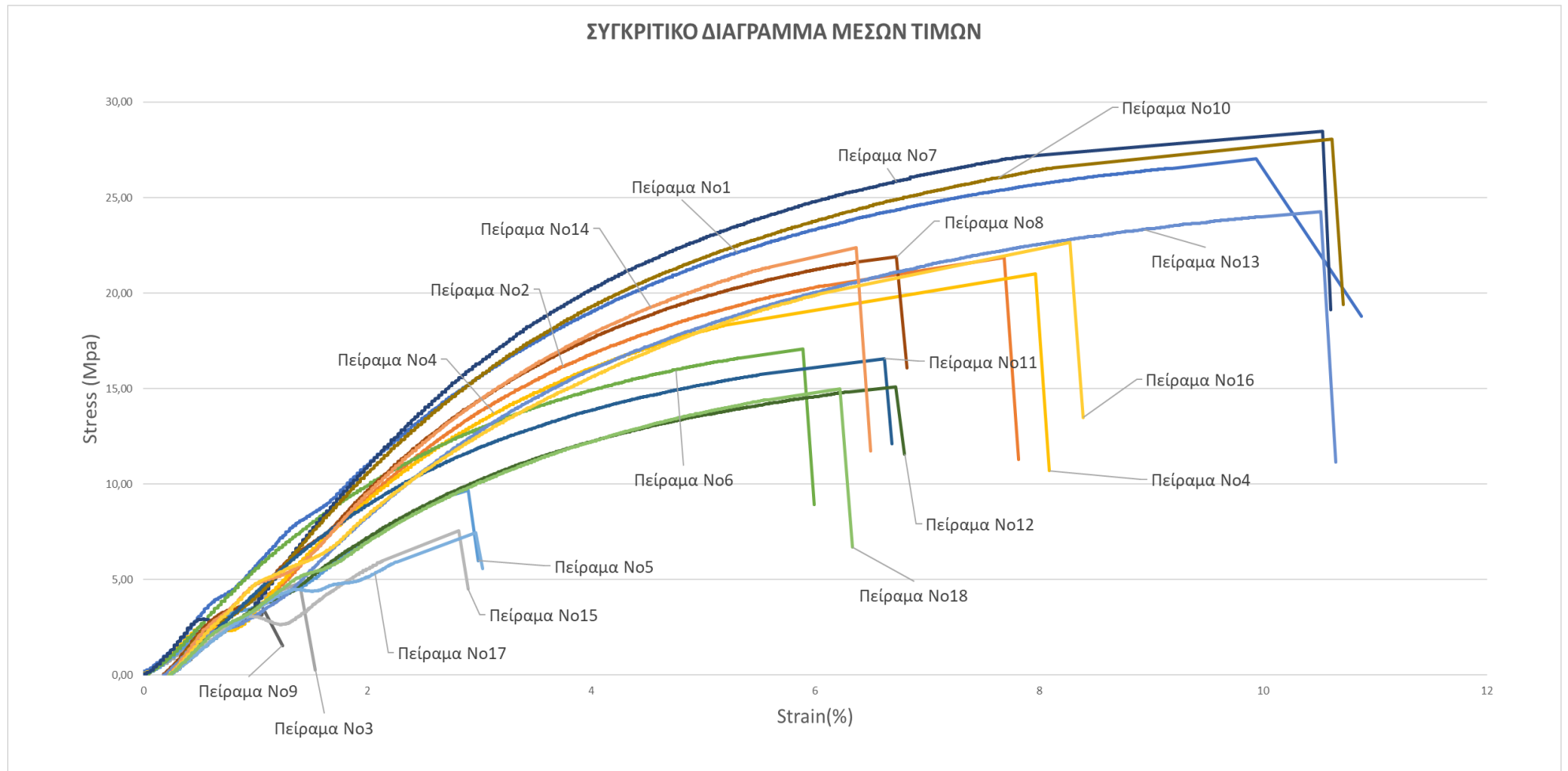
*Εικόνα 67: Πείραμα Νο18*

**Διάγραμμα Εφελκυσμού**

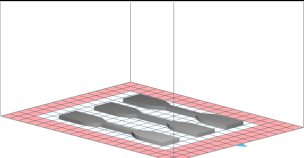
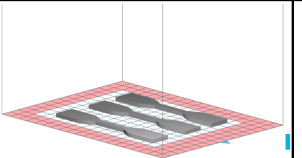


	UTS (MPa)	%STRAIN	E (MPa)
Δοκίμο 18.1	14,06	6,48	375,00
Δοκίμο 18.2	13,70	5,58	326,00
Δοκίμο 18.3	17,21	6,61	452

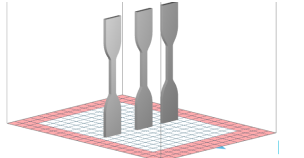
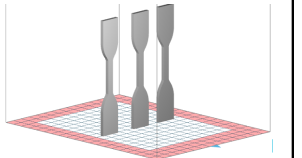
Από τα παραπάνω διαγράμματα υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές για UTS και Strain και σχεδιάστηκε για κάθε περίπτωση μία καμπύλη εφελκυσμού μέσω τιμών όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα.



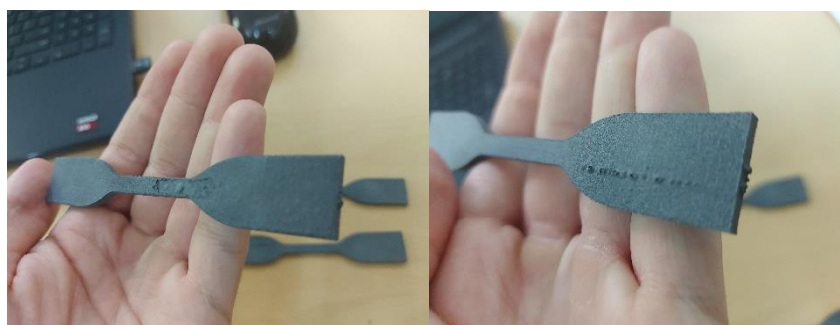
Από το συγκριτικό διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα πώς το πείραμα **No7** παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα από τα 18 πειράματα με  $UTS=29,87$  MPa,  $Strain=13.15\%$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=592$  MPa, ενώ οι παράμετροί του πειράματος ήταν οι εξής:

Παράμετροι	A	0,175mm	0 μοίρες	1 Watt
Πείραμα No7				

Το πείραμα με τα χειρότερα αποτελέσματα όπως διακρίνεται είναι το **No9** με  $UTS=4,3$  MPa,  $Strain=1.24\%$  και μέτρο ελαστικότητας  $E=545$  MPa, ενώ σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροί ήταν οι εξής:

Παράμετροι	A	0,175mm	90 μοίρες	0,5Watt
Πείραμα No7				

Το συγκεκριμένο πείραμα μετά την κατεργασία της αμμοβολής παρουσίασε μία ιδιαιτερότητα στην επιφάνεια, η οποία πιθανώς να επηρέασε τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών επιφέροντας τα παραπάνω αποτελέσματα.



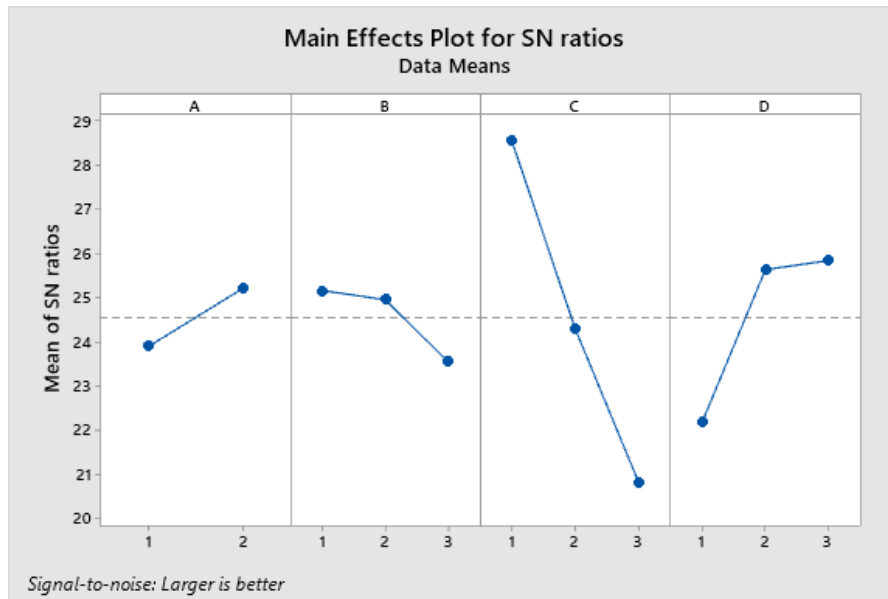
Εικόνα 68: Δοκίμιο πειράματος No9

Όπως παρατηρείται και από τις εικόνες στα δοκίμια έχουν δημιουργηθεί παραμορφώσεις οι οποίες μπορεί να προκλήθηκαν από μη επιθυμητή υγρασία στο υλικό. Ουσιαστικά το φαινόμενο που πιθανώς δημιούργησε την παραπάνω δυσμορφία είναι πως στην διεργασία πυροσυσσωμάτωσης η υγρασία στα συγκεκριμένα σημεία, λόγω της θερμοκρασίας μετατράπηκε σε ατμό με αποτέλεσμα



την δημιουργία μίας μορφής "φούσκας" αποτρέποντας την συσσωμάτωση των μορίων μεταξύ τους, επηρεάζοντας τελικά τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.

Στη συνέχεια, συλλέγοντας τα απαραίτητα δεδομένα από όλα τα πειράματα (UTS, Strain, Yung Modulus) και μέσω προγράμματος στατιστικής ανάλυσης Taguchi προέκυψαν τα διαγράμματα με τους παράγοντες ελέγχου και τους παράγοντες θορύβου που παρουσιάζονται παρακάτω.



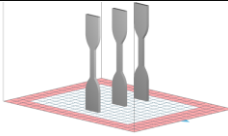
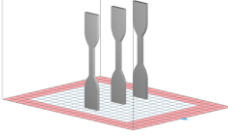
Εικόνα 69: Signal to Noise diagram



Εικόνα 70: Main effects plot for Means

Από τα παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ξεκάθαρα πως οι παράγοντες νούμερο 3 (θέση κατά την εκτύπωση) και νούμερο 4 (Ισχύς laser) επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών σε αντίθεση με την παράμετρο νούμερο 2 (ύψος στρώσης) και νούμερό 1 (θέση κατά την εκτύπωση/ περιστροφή) που δεν φαίνεται να επηρεάζουν καθόλου τις μηχανικές ιδιότητες.

Έπειτα προκύπτει ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων με  $UTS=31.10 \text{ MPa}$ .

Παράμετροι	A2	B1	C1 (90 μοίρες)	D3
Βέλτιστος Συνδυασμός		0,075mm		1,5 Watt

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε πειραματική έρευνα πάνω σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια αντοχής εφελκυσμού. Σκοπός της εργασίας αποτελεί η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων για την δημιουργία αντικειμένου με την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά σε άσκηση φορτίων εφελκυσμού. Σε ευρύτερο επίπεδο, θεωρείται η διερεύνηση των παραγόντων τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς και η συλλογή δεδομένων με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων αντικειμένων παραγόμενων μέσω προσθετικών κατασκευών. Η εν λόγω πειραματική διαδικασία και έρευνα εκτελέστηκε επιτυχώς με αποτέλεσμα την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων μέσω της στατιστικής ανάλυσης Taguchi.

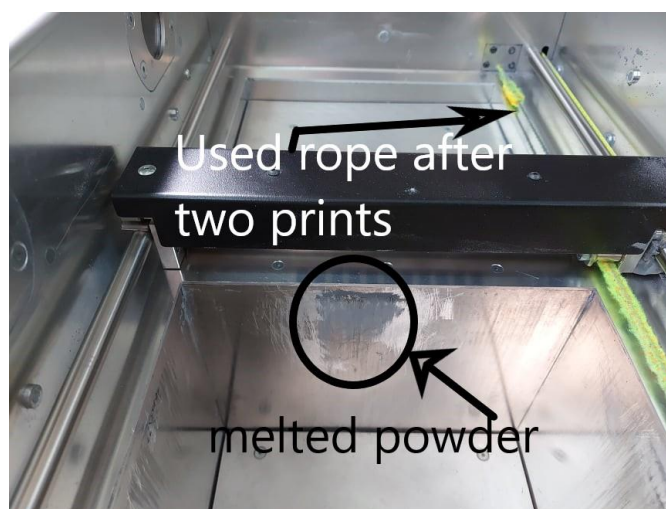
### Προβλήματα και συντήρηση

Στην παρακάτω ενότητα θα παρουσιαστούν προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας καθώς και τρόποι αντιμετώπισης/συντήρησης προς αποφυγή τους.

Κατά τη διάρκεια των εκτυπώσεων και συγκεκριμένα στο στάδιο της προεκτύπωσης παρουσιάστηκε πρόβλημα στο έμβολο εκτύπωσης. Η αναγνώριση της αιτίας του προβλήματος δεν ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα ως διαδικασία διότι βρέθηκε πως είχε δημιουργηθεί μια στρώση παραμένον λιωμένου υλικού στην μία πλευρά του τοιχώματος μετακίνησης του εμβόλου. Σε αυτή την περίπτωση προτείνεται αφαίρεση του υλικού με ξύστρα και συνεχής καθαρισμός των τοιχωμάτων μετακίνησης του εμβόλου.

Ο καθαρισμός του εκτυπωτή αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για την σωστή λειτουργία του. Σε περίπτωση μη συνέπειας ή ελλιπή καθαρισμού μπορεί να προκύψει πρόβλημα στον εκτυπωτή ιδιαίτερα στην αλλαγή υλικού. Αυτό συμβαίνει διότι τα υλικά μεταξύ τους έχουν διαφορετικά σημεία τήξης με αποτέλεσμα και η θερμοκρασία του θαλάμου του ενός να πλησιάζει την θερμοκρασία τήξης του αλλού με αποτέλεσμα το υλικό με χαμηλότερο σημείο τήξης να ρευστοποιείται σε σημεία που μπορεί να προκληθεί πρόβλημα.

Μεγάλο πρόβλημα επίσης παρουσιάστηκε με το σκοινί με το οποίο μετακινείται ο επιχριστής, το λεγόμενο short cord. Το συγκεκριμένο εξάρτημα αποτελεί αναλώσιμο και χρήζει αλλαγής ανά 200 με 300 ώρες χρήσης, σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Στην πειραματική διαδικασία χρειάστηκαν τουλάχιστον τέσσερα ανταλλακτικά στη διάρκεια των εκτυπώσεων, κάτι μη φυσιολογικό αν αναλογιστεί κανείς τις ώρες εκτύπωσης (περίπου 220 ώρες) που αναλογούν το πολύ σε μία αλλαγή του εξαρτήματος. Η χρήση του είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του συγκεκριμένου εκτυπωτή μέσω αυτού μετακινείται ο επιχριστής για να επιστρώσει το υλικό. Η αστοχία του στη διάρκεια της εκτύπωσης σημαίνει ημιτελές τελικό αποτέλεσμα και επανάληψη της διαδικασίας. Η αναγνώριση της αιτίας του προβλήματος ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα ως διαδικασία και εν τέλει βρέθηκε πως μπορεί να προέκυπτε από δύο παράγοντες: Πρώτον λάθος τοποθέτηση του ανταλλακτικού με αποτέλεσμα να είναι πολύ τεντωμένο ή να δημιουργείται τάνυση του αντικειμένου και έτσι να δημιουργούνται τριβές και να διαβρώνεται πιο εύκολα το υλικό. Δεύτερον ένας από τους 2 κυλίνδρους στους οποίους μετακινείται ο επιχριστής να μην περιστρέφεται δημιουργώντας έτσι φθορές. Παρακάτω στην εικόνα φαίνονται τα προβλήματα που αναφέρθηκαν.



*Εικόνα 71: Προβλήματα που προέκυψαν*

Κατά τη διάρκεια εκτύπωσης, πραγματοποιήθηκε διακοπή ρεύματος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η διαδικασία εκτύπωσης πρέπει να πραγματοποιηθεί από την αρχή. Όταν το σύστημα επανέρθει δεν δύναται να συνεχίσει την εκτύπωση από

εκεί που σταμάτησε όπως σε άλλες τεχνολογίες, εφόσον η θερμοκρασία στο θάλαμο έχει πέσει.

Επείτα παρουσιάστηκαν κάποια προβλήματα με το λογισμικό του μηχανήματος. Πιο συγκεκριμένα στα βήματα της προεκτύπωσης η οθόνη αφής δεν ανταποκρινόταν με αποτέλεσμα να γίνεται επανεκκίνηση του συστήματος για την επιλυση του ζητήματος, κάτι που σημαίνει έναρξη της διαδικασίας από την αρχή. Προτεινόμενη λύση για την συγκεκριμένη περίπτωση είναι η αναβάθμιση του λογισμικού του μηχανήματος.

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ερευνητική εργασία τα πειράματα υλοποιήθηκαν με επιτυχία και τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον προς ανάλυση. Εκτός δύο περιπτώσεων, (πείραμα Νο3 και Νο9) που τα αποτελέσματα είναι ασαφή και ανεπιτυχή, στις υπόλοιπες περιπτώσεις τα αποτελέσματα θεωρούνται επιτυχημένα. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως αρκετά πειράματα βάση των διαγραμμάτων παρουσιάζουν συμπεριφορά όλκιμου υλικού(πείραμα Νο14), ενώ το αναμενόμενο αποτέλεσμα ήταν συμπεριφορά ψαθυρού υλικού(πείραμα Νο11). Τα δείγματα γενικότερα έδειξαν σχετικά μικρή ποσοστιαία μεταβολή του παραμορφώμενου μήκους ( $strain=0.85\%-13.15\%$ ) με το πείραμα Νο7 να παρουσιάζει την βέλτιστη τιμή(13,15%). Όσο αναφορά τη μέγιστη εφελκυστική τάση τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά με τις τιμές UTS να κυμαίνονται μεταξύ 2,76 MPa και 29,87 MPa ανάλογα με το συνδυασμό των παραγόντων εκτύπωσης και με την βέλτιστη τιμή να παρουσιάζεται ξανά στο πείραμα Νο7. Σύμφωνα με τα διαγράμματα Signal-to-Noise and Means της διεξαγόμενης μελέτης, η σημασία των παραγόντων ανάλογα με την επιρροή τους στις μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων ταξινομούνται ως εξής:

Θέση κατά την εκτύπωση(Μοίρες)> Ισχύς laser > Ύψος στρώσης > Θέση κατά την εκτύπωση (περιστροφή)

Το ύψος στρώσης και η θέση κατά την εκτύπωση (περιστροφή) φαίνεται να μην επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Ειδικότερα η θέση κατά την εκτύπωση (περιστροφή) παρουσιάζει την παράμετρο με την λιγότερη δυνατή

σημασία, οπότε δεν απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της περίπτωσης σε μελλοντικές έρευνες.

Έπειτα, μέσω της στατιστικής ανάλυσης της μεθόδου Taguchi, και της στρατηγικής «Larger is better» του λόγου Σήματος προς το Θόρυβο βρέθηκε η μέγιστη εφελκυστικής τάση (UTS) από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των παραμέτρων προβλέποντας την τιμή  $UTS=31.1$  MPa με βέλτιστο συνδυασμό τον παρακάτω:

- A2 =Μικρή επιφάνεια τοποθετημένη στο επίπεδο
- B1=0.075mm
- C1=90°
- D3 =1.5 Watt

Η συγκεκριμένη τιμή UTS αποτελεί ικανοποιητικό αποτέλεσμα για παραγωγή αντικειμένου μέσω προσθετικών κατασκευών. Το ίδιο υλικό με συμβατική μέθοδο κατασκευής (έγχυση) παρουσιάζει μέγιστη εφελκυστική τάση των 50MPa, μια διαφορά της τάξης του 60% από το βέλτιστο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας, κάτι απόλυτα λογικό εφόσον οι συμβατικές μέθοδοι υπερέχουν των προσθετικών κατασκευών όσο αναφορά τις μηχανικές ιδιότητες.

Η παράμετρος των 90° αποτελεί το παράγοντα με την μεγαλύτερη επιρροή στις μηχανικές καταπονήσεις εφελκυσμού, όπως προέκυψε. Όπως έχει προαναφερθεί ο παράγοντας των 90° παρουσιάζει τους μεγαλύτερους χρόνους εκτυπώσεις κάνοντας χρήση περισσότερου υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες για την δημιουργία του αντικειμένου. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε βάθος χρόνου μπορεί να επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων, διότι το υλικό καταπονείται θερμικά για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επίσης, η επιλογή των 90° δυστυχώς δεν αποτελεί οικονομική επιλογή εφόσον περισσότερο υλικό στο θάλαμο μεταφράζεται σε ανάμειξη περισσότερου φρέσκου υλικού.

### Μελλοντικές Εφαρμογές

Η επιτυχημένη ολοκλήρωση των πειραμάτων θέτει καλά θεμέλια στην εκπόνηση αντίστοιχων εγχειρημάτων, εφόσον δεν υπάρχουν παρόμοιες μελέτες στην βιβλιογραφία. Εφόσον η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί εφεύρεση των τελευταίων χρόνων, κάθε μελέτη βελτίωσης συνθηκών και μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων δοκιμίων της τεχνολογίας αποτελεί σημαντική προσθήκη στις δυνατότητες και την εξέλιξη του τομέα. Μελλοντικά μπορούν να πραγματοποιηθούν παρόμοιες μελέτες με διαφορετικά υλικά, διαφορετική μηχανική καταπόνηση, διαφορετικές παραμέτρους πειράματος αποκλείοντας βέβαια τις απορριπτές περιπτώσεις της συγκεκριμένης μελέτης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Additive manufacturing method and different welding applications* | Elsevier Enhanced Reader (no date). Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S223878542031646X?token=EAC132AEF3557A59471FDC86ACA0E69E57A856BC52F8F7299A6743284FE31CCF67E18F7934596DE1DB4C2533831FA0E1&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220206124141> (Accessed: 6 February 2022).
- Aguilar, A. C. *et al.* (2019) 'Non-destructive optical second harmonic generation imaging of 3D printed aluminum nitride ceramics', *Ceramics International*, 45(15), pp. 18871–18875. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2019.06.121.
- Angelopoulos, P. M. *et al.* (2022) 'Manufacturing of ABS/expanded perlite filament for 3D printing of lightweight components through fused deposition modeling', *Materials Today: Proceedings*, 54, pp. 14–21. doi: 10.1016/J.MATPR.2021.06.351.
- Ast, M. (2013) 'D638, Standard test method for tensile properties of plastics', *TF ~ VFING HOOP TENSILE I'REN ...*, (C), pp. 1–16. doi: 10.1520/D0638-10.1.
- Attaran, M. (2017) 'The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing', *Business Horizons*, 60(5), pp. 677–688. doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- Bozkurt, Y. and Karayel, E. (2021) '3D printing technology; methods, biomedical applications, future opportunities and trends', *Journal of Materials Research and Technology*, 14, pp. 1430–1450. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.050.
- Camirero, M. A. *et al.* (2018) 'Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling', *Composites Part B: Engineering*, 148, pp. 93–103. doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2018.04.054.
- Chen, Z. *et al.* (2019) '3D printing of ceramics: A review', *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), pp. 661–687. doi: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2018.11.013.
- Dadbakhsh, S. *et al.* (2017) 'Effect of PA12 powder reuse on coalescence behaviour and microstructure of SLS parts', *European Polymer Journal*, 92(April), pp. 250–262. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2017.05.014.
- Derazkola, H. A., Khodabakhshi, F. and Simchi, A. (2020) 'Evaluation of a polymer-steel laminated sheet composite structure produced by friction stir additive manufacturing (FSAM) technology', *Polymer Testing*, 90, p. 106690. doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2020.106690.
- Doshi, M. *et al.* (2021) 'Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects', *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/J.MATPR.2021.10.003.
- Farah, S., Anderson, D. G. and Langer, R. (2016) 'Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review', *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, pp. 367–392. doi: 10.1016/J.ADDR.2016.06.012.
- Fatchurrohman, N. and Sulaiman, S. (2018) 'Metal Matrix Composites for Automotive Components in Depth Case Study: Development of Automotive Brake Disc', *Encyclopedia of Materials: Composites*, pp. 540–556. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.10487-4.
- Fleisher, A. *et al.* (2019) 'Reaction bonding of silicon carbides by Binder Jet 3D-Printing,



- phenolic resin binder impregnation and capillary liquid silicon infiltration', *Ceramics International*, 45(14), pp. 18023–18029. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2019.06.021.
- Fraley, A. S. *et al.* (2021) '14 . 1 : Design of Experiments via Taguchi Methods - Orthogonal Arrays', pp. 1–10.
- Friel, R. J. (2015) 'Power ultrasonics for additive manufacturing and consolidating of materials', *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, pp. 313–335. doi: 10.1016/B978-1-78242-028-6.00013-2.
- González-Henríquez, C. M., Sarabia-Vallejos, M. A. and Rodríguez-Hernández, J. (2019) 'Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications', *Progress in Polymer Science*, 94, pp. 57–116. doi: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2019.03.001.
- Goodridge, R. D., Tuck, C. J. and Hague, R. J. M. (2012) 'Laser sintering of polyamides and other polymers', *Progress in Materials Science*, 57(2), pp. 229–267. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2011.04.001.
- Gornet, T. (2017) 'History of Additive Manufacturing', pp. 1–24. doi: 10.4018/978-1-5225-2289-8.ch001.
- HAN, L. ying and WANG, C. shan (2020) 'Microstructure and properties of Ti64.51Fe26.40Zr5.86Sn2.93Y0.30 biomedical alloy fabricated by laser additive manufacturing', *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(12), pp. 3274–3286. doi: 10.1016/S1003-6326(20)65460-7.
- Hull, C. W. (1984) 'Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects By Stereo Thography', *Patent*, (19), p. 16. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4575330>.
- Hwa, L. C. *et al.* (2017) 'Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review', *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(6), pp. 323–347. doi: 10.1016/J.COSSMS.2017.08.002.
- Imanian, M. E. and Biglari, F. R. (2022) 'Modeling and prediction of surface roughness and dimensional accuracy in SLS 3D printing of PVA/CB composite using the central composite design', *Journal of Manufacturing Processes*, 75, pp. 154–169. doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.12.065.
- Kim, I. H. *et al.* (2021) 'Oxidation-resistant coating of FeCrAl on Zr-alloy tubes using 3D printing direct energy deposition', *Surface and Coatings Technology*, 411, p. 126915. doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2021.126915.
- Kruth, J. P., Leu, M. C. and Nakagawa, T. (1998) 'Progress in additive manufacturing and rapid prototyping', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(2), pp. 525–540. doi: 10.1016/S0007-8506(07)63240-5.
- Kumar, V., Ahuja, I. S. and Singh, R. (2021) 'Multi-Factor Optimization for Preparation of Mechanical Blended and Chemical Assisted Mechanical Blended ABS-Graphene Composite for 3D Printing', *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. doi: 10.1016/B978-0-12-820352-1.00216-9.
- Lindberg, A. *et al.* (2018) 'Mechanical performance of polymer powder bed fused objects – FEM simulation and verification', *Additive Manufacturing*, 24, pp. 577–586. doi: 10.1016/J.ADDMA.2018.10.009.
- Mariani, M. *et al.* (2021) '3D printing of fine alumina powders by binder jetting', *Journal of*

*the European Ceramic Society*, 41(10), pp. 5307–5315. doi: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2021.04.006.

Maxey, K. (2013) 'History Of 3d printing', (3d printing), p. 5. Available at: <https://www.engineering.com/story/infographic-the-history-of-3d-printing>.

Miao, G. *et al.* (2022) 'Experimental investigation on the effect of roller traverse and rotation speeds on ceramic binder jetting additive manufacturing', *Journal of Manufacturing Processes*, 79, pp. 887–894. doi: 10.1016/J.JMAPRO.2022.05.039.

Moon, M. S. *et al.* (2019) 'Carbon Fiber Manufacturing and Applications as a Benchmark for Nanotube Superfiber Development', *Nanotube Superfiber Materials: Science, Manufacturing, Commercialization*, pp. 879–896. doi: 10.1016/B978-0-12-812667-7.00034-3.

Mora, S., Pugno, N. M. and Misseroni, D. (2022) '3D printed architected lattice structures by material jetting', *Materials Today*. doi: 10.1016/J.MATTOD.2022.05.008.

Mwania, F. M., Maringa, M. and Van Der Walt, K. (2020) 'Mixing and Reuse of Polymer Laser Sintering Powders to Ensure Homogeneity-A Review', *International Journal of Engineering Research and Technology*, 13(11), pp. 3335–3341. doi: 10.37624/IJERT/13.11.2020.3335-3341.

Narushima, T., Ueda, K. and Alfirano (2015) 'Co-Cr Alloys as Effective Metallic Biomaterials', *Springer Series in Biomaterials Science and Engineering*, 3, pp. 157–178. doi: 10.1007/978-3-662-46836-4\_7.

Prabhakar, M. M. *et al.* (2021) 'A short review on 3D printing methods, process parameters and materials', *Materials Today: Proceedings*, 45, pp. 6108–6114. doi: 10.1016/J.MATPR.2020.10.225.

Ranjan, R. *et al.* (2022) 'A critical review on Classification of materials used in 3D printing process', *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/J.MATPR.2022.03.308.

Rosa, J. L. *et al.* (2009) 'Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach', *Journal of Materials Processing Technology*, 209(3), pp. 1181–1188. doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2008.03.021.

Rouf, S. *et al.* (2022) 'Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications', *Sustainable Operations and Computers*, 3, pp. 258–274. doi: 10.1016/J.SUSOC.2022.05.001.

Schmid, M., Amado, A. and Wegener, K. (2015) 'Polymer powders for selective laser sintering (SLS)', *AIP Conference Proceedings*, 1664(May 2015). doi: 10.1063/1.4918516.

Schmidleithner, C. and Kalaskar, D. M. (2016) 'Stereolithography'. doi: 10.5772/intechopen.78147.

Stevens, E. *et al.* (2018) 'Density variation in binder jetting 3D-printed and sintered Ti-6Al-4V', *Additive Manufacturing*, 22, pp. 746–752. doi: 10.1016/J.ADDMA.2018.06.017.

Su, A. and Al'Aref, S. J. (2018) 'History of 3D Printing', *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, pp. 1–10. doi: 10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8.

Su, C. *et al.* (2021) 'Binder-jetting additive manufacturing of Mg alloy densified by two-step sintering process', *Journal of Manufacturing Processes*, 72, pp. 71–79. doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.09.061.

Wang, X. *et al.* (2017) '3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective', *Composites Part B: Engineering*, 110, pp. 442–458. doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034.

Willems, E. *et al.* (2021) 'Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting', *Journal of the European Ceramic Society*, 41(10), pp. 5292–5306. doi: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2021.04.018.

Wohlers, T. and Gornet, T. (2016) 'History of Additive Manufacturing'.

www.Sinterit.com (2022) 'Lisa\_PRO\_specification\_v1', *Sinterit Lisa Pro*, pp. 7–8.

Zhang, X. *et al.* (2022) 'An approach to improve the microstructure and mechanical properties: a hybrid manufacturing of laser directed energy deposition and shot peening', *Additive Manufacturing*, p. 102686. doi: 10.1016/J.ADDMA.2022.102686.

Καθηγητής, Δ. Α. Ρ., Μέντρεα, Δ. Κ. and Πανταζοπούλου, Π. (2010)  
'\376\377\003\240\003\225\003\244\003\245\003\233\000 \000-\000  
\003\221\003\243\003\232\003\227\003\243\003\227\000 \0004\000 \000-\000  
\003\225\003\246\003\225\003\233\003\232\003\245\003\243\003\234\003\237\003\24  
3'.

Καλτσής, Α. (2017) 'Τρισδιάστατη Εκτύπωση & Στρατιωτικές Εφαρμογές'.

'ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ' (no date).

'Πείραμα Εφελκυσμού 1.' (no date).

Τσάκωνας, Χ. Γ. and Π, Δ. Χ. Μ. Π. (no date) 'Χρήστος Γ. Τσάκωνας Διπλ. Χημικός Μηχανικός Π.Π.'