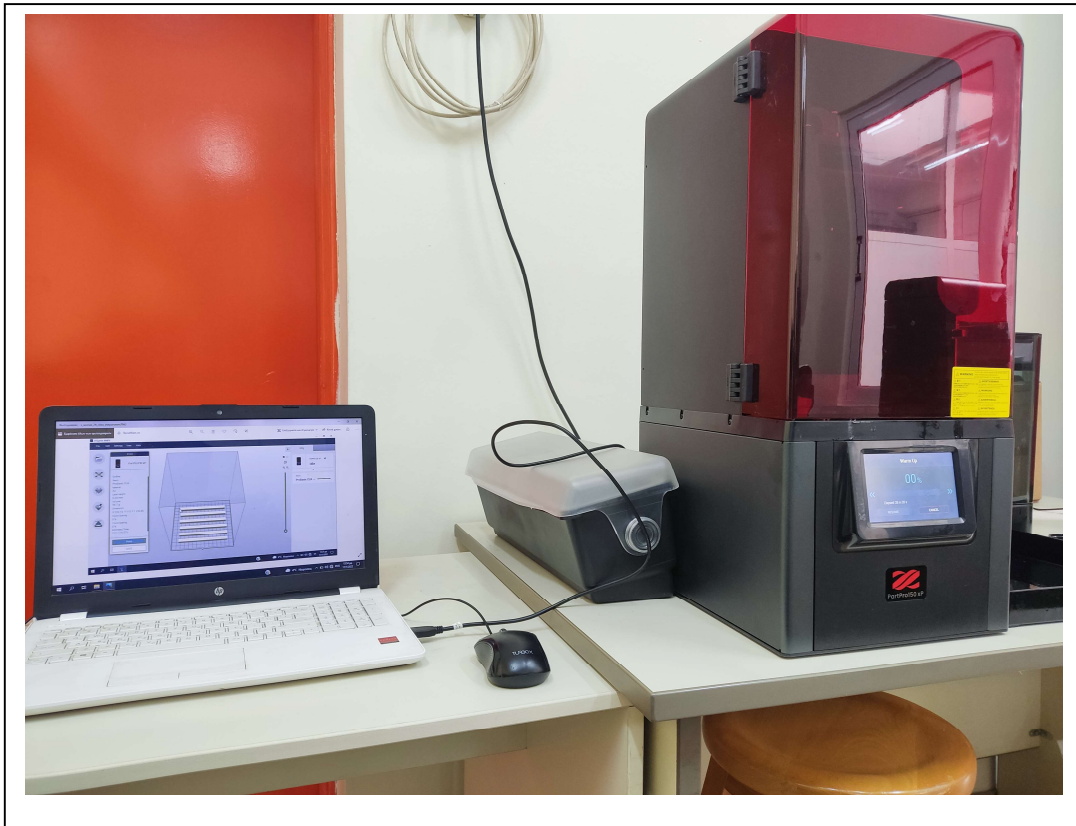




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Συγκριτική μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών προσθετικών  
κατασκευών.**



**Φοιτητής : Μαντός Ζαχαρίας**

**A.M. : 272017046**

**Επιβλέποντες Καθηγητές**

**ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΑΘΗΝΑ - ΑΙΓΑΛΕΩ**

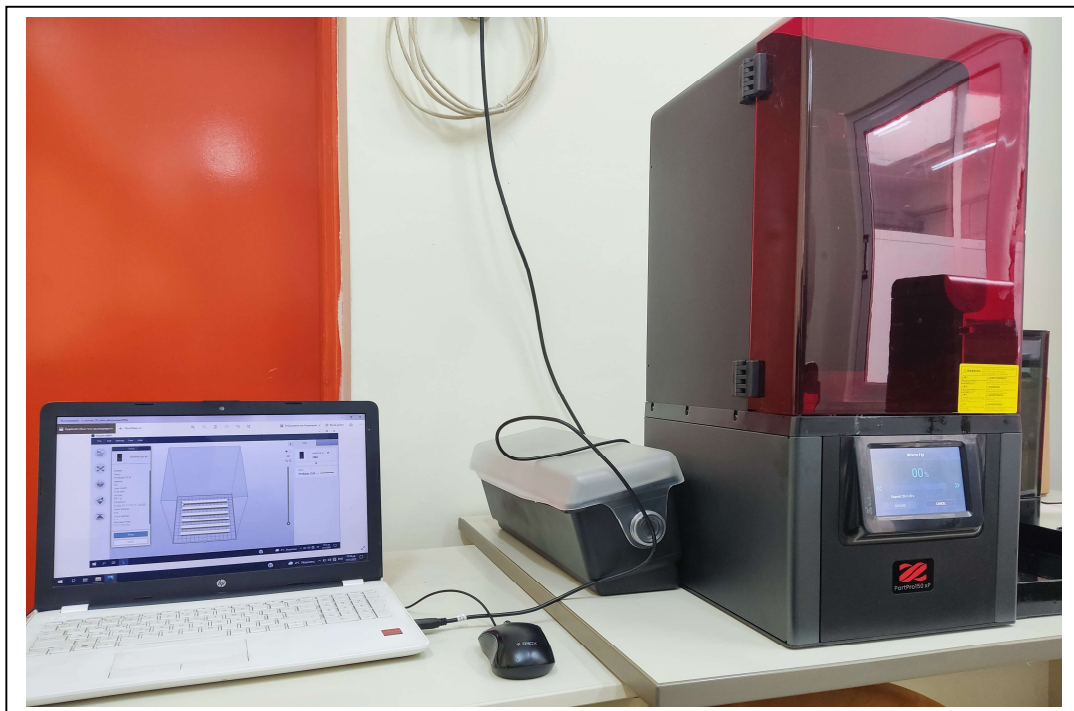
**ΙΟΥΛΙΟΣ - 2022**



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

## **Diploma Thesis**

**Comparative study of Mechanical properties AM specimens.**



**Student: Mantos Zacharias**  
**Registration Number: 272017046**

**Supervising Professors**  
**Sagias Vasileios                      Stergiou Konstantinos**

**ATHENS – AIGALEO**  
**JULY – 2022**

**ATHENS-EGALEO, JULY 2022**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

|                         |                    |                     |
|-------------------------|--------------------|---------------------|
| ΣΤΕΡΓΙΟΥ<br>ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ | ΡΩΣΣΗΣ<br>ΚΥΡΙΑΚΟΣ | ΣΑΓΙΑΣ<br>ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ |
|-------------------------|--------------------|---------------------|

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Όνοματεπώνυμο Φοιτητή/ήτριας),  
Μήνας, Έτος**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.



**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Μαντός Ζαχαρίας του Δημήτριου, με αριθμό μητρώου 461272017046 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

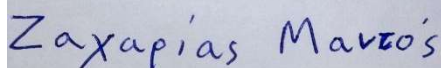
«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό 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 διπλώματός μου.

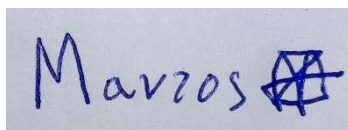
Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Ονοματεπώνυμο φοιτητή/ήτριας)



(Υπογραφή φοιτητή/ήτριας)



Ευχαριστώ μετά καρδίας το Ίδρυμα, τους καθηγητές μου και την οικογένεια μου που με υποστήριξαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

### Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε πειραματική διαδικασία, με σκοπό την κατανόηση της επίδρασης διαφορετικών κατασκευαστικών παραγόντων, στις μηχανικές ιδιότητες. Τα δοκίμια κατασκευαστήκαν με χρήση προσθετικών τεχνολογιών. Η πειραματική διαδικασία συνδυάστηκε και με βιβλιογραφική έρευνα στο αντικείμενο των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Τα δοκίμια κατασκευαστήκαν με χρήση εκτυπωτή τεχνολογίας τύπου Στερεολιθογραφίας (sla) και υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση της μεθοδολογίας taguchi. Τέλος πραγματοποιήθηκε συζήτηση ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλες ερευνητικές πηγές.

### Λέξεις – κλειδιά

Προσθετικές κατασκευές , Αντοχή υλικών , Στερεολιθογραφία , Κάμψη , Ρητίνη.

## Abstract

In this thesis, an experimental process was carried out with the aim of understanding the effect of different construction factors on mechanical installations. The products were manufactured using additive technologies. The experimental process was also combined with literature research in the field of prosthetic manufacturing technologies. The samples were manufactured using Stereolithography (sla) technology and subjected to three point bending test. The design of the experiments was carried out using the taguchi methodology. Finally, there was a discussion, analysis and comparison of the results with other research sources.

## Keywords

Additive constructions, Strength of materials, Stereolithography, Bending, Resin.

## Περιεχόμενα

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.1    | Πίνακας εικόνων.....   | 12 |
| 2      | ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....                                    | 20 |
|        | Εισαγωγή.....  | 20 |
|        | Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....                       | 20 |
| 2.1    | Προσθετική κατασκευή.....  | 20 |
| 2.2    | Ιστορική αναδρομή.....   | 21 |
| 2.3    | Εφαρμογές.....   | 24 |
| 2.3.1  | Ιατρική.....   | 27 |
| 2.3.2  | Αεροδιαστημική.....  | 27 |
| 2.3.3  | Αυτοκινητοβιομηχανία.....  | 29 |
| 2.4    | Βήματα της AM Διεργασίας.....                                    | 30 |
| 2.5    | Ορολογία για τεχνολογίες AM.....                                 | 34 |
| 2.6    | Προσθετικές και αφαιρετικές κατεργασίες.....                     | 36 |
| 2.6.1  | Διαφοροποιήσεις υλικού.....                                      | 36 |
| 2.6.2  | Ταχύτητα.....  | 37 |
| 2.6.3  | Πολυπλοκότητα.....   | 37 |
| 2.6.4  | Ακρίβεια.....  | 38 |
| 2.6.5  | Γεωμετρία.....   | 38 |
| 2.6.6  | Προγραμματισμός.....   | 39 |
| 2.7    | Τεχνολογίες AM.....  | 40 |
| 2.8    | Εξώθησης υλικού (material extrusion).....                        | 45 |
| 2.8.1  | Μεθοδος FDM.....   | 46 |
| 2.8.2  | Υλικά FDM συστημάτων.....  | 48 |
| 2.9    | Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion - PBF).....          | 50 |
| 2.9.1  | Λειτουργία της διεργασίας σύντηξης πούδρας σε κλίνη.....         | 51 |
| 2.9.2  | Υλικά εκτύπωσης.....   | 54 |
| 2.9.3  | Σύνθετα και πολυμερή.....  | 54 |
| 2.9.4  | Μέταλλα και σύνθετα αυτων.....                                   | 55 |
| 2.9.5  | Κεραμικά και σύνθετα αυτων.....                                  | 55 |
| 2.9.6  | Τύποι υλικών που χρησιμοποιούνται στους εκτυπωτές τύπου SLS..... | 56 |
| 2.10   | Μηχανισμοί σύντηξης της πούδρας.....                             | 56 |
| 2.10.1 | Στέρεης κατάστασης συσσωμάτωση.....                              | 56 |
| 2.10.2 | Υγρής κατάστασης συσσωμάτωση (LPS).....                          | 58 |
| 2.11   | Η τήξη σε όλο το υλικό (πλήρης τήξη).....                        | 59 |
| 2.11.1 | Χημική συγκόλληση.....   | 59 |
| 2.11.2 | Εναπόθεση υλικού.....  | 59 |
| 2.11.3 | Γενικά.....  | 59 |
| 2.11.4 | Υλικά που χρησιμοποιούνται.....                                  | 61 |
| 2.11.5 | Πολυμερή υλικά.....  | 62 |
| 2.11.6 | Κεραμικά.....  | 63 |
| 2.11.7 | Μέταλλα.....   | 63 |
| 2.12   | Εναπόθεση συγκολλητικού υλικού (Binder Jetting -BJ).....         | 64 |
| 2.12.1 | Γενικές γνώσεις.....   | 64 |
| 2.12.2 | Υλικά που χρησιμοποιούνται.....                                  | 67 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 2.13   | Επάλληλων φύλλων (LOM - Laminated Object Manufacturing).....                      | 67  |
| 2.13.1 | Γενικές γνώσεις.....  | 67  |
| 2.13.2 | Υλικά που χρησιμοποιούνται.....   | 69  |
| 2.14   | Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (DED-DIRECTED ENERGY DEPOSITION)..... | 69  |
| 2.14.1 | Γενικά.....   | 69  |
| 2.14.2 | Υλικά που χρησιμοποιούνται.....   | 74  |
| 2.15   | Φωτοπολυμερισμός σε κάδο.....   | 74  |
| 2.15.1 | Γενικά.....   | 74  |
| 2.15.2 | Υλικά.....  | 82  |
| 2.16   | Πλεονεκτήματα Μειονεκτήματα AM Διεργασίας.....                                    | 87  |
| 2.16.1 | FDM.....  | 88  |
| 2.16.2 | Σύντηξης πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion - PBF).....                          | 90  |
| 2.16.3 | Εναπόθεσης υλικού.....  | 91  |
| 2.16.5 | Εναπόθεσης συγκολλητικού υλικού (Binder Jetting -BJ).....                         | 92  |
| 2.16.6 | Επάλληλων φύλλων.....   | 92  |
| 2.17   | Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (DED-DIRECTED ENERGY DEPOSITION)..... | 93  |
| 2.17.1 | Φωτοπολυμερισμο σε κάδο.....  | 94  |
| 2.18   | Κάμψη.....  | 95  |
| 2.19   | Σχεδιασμός για χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής.....                      | 99  |
| 2.19.1 | Η θέση προσανατολισμού.....   | 99  |
| 2.19.2 | Στηρίγματα.....   | 100 |
| 2.19.3 | Σχεδίαση του προϊόντος με κοίλα τοιχώματα.....                                    | 101 |
| 2.19.4 | Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά προϊόντος.....                                      | 101 |
| 2.19.5 | Συνδετικά μέρη.....   | 101 |
| 2.19.6 | Μείωση των επιμέρους κομματιών που απαρτίζουν ένα προϊόν.....                     | 102 |
| 2.19.7 | Ταυτοποίηση των προϊόντων.....  | 102 |
| 2.20   | Λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.....   | 103 |
| 2.21   | Σχεδιασμός μεθοδολογίας Taguchi.....  | 104 |
| 2.21.1 | Βήματα μεθοδολογίας Taguchi.....  | 105 |
| 2.22   | Υλικά που χρησιμοποιούνται στον εκτυπωτή XYZ Part Pro 150.....                    | 108 |
| 3      | Μεθοδολογία.....  | 111 |
| 4      | Πειραματικό Μέρος.....  | 112 |
| 4.1    | Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε.....   | 118 |
|        | Εκτυπώσεις.....   | 119 |
| 4.2    | Διαστασιολογικός έλεγχος.....   | 125 |
| 4.3    | Κάμψη & Διαγράμματα (Stress – Strain).....  | 128 |
|        | Πρώτη σειρά δοκιμών.....  | 129 |
|        | Δεύτερη σειρά δοκιμών.....  | 131 |
|        | Τρίτη σειρά δοκιμών.....  | 133 |
|        | Τέταρτη σειρά δοκιμών.....  | 135 |
|        | Πέμπτη σειρά δοκιμών.....   | 137 |
|        | Έκτη σειρά δοκιμών.....   | 139 |
|        | Εβδόμη σειρά δοκιμών.....   | 141 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| Ογδόη | σειρά δοκιμίων.....  | 143 |
| Ενάτη | σειρά δοκιμίων.....  | 145 |
| 4.3.1 | Μετρό ελαστικότητας μέσω ορών.....                               | 147 |
| 4.3.2 | Ενδεικτικοί υπολογισμοί.....                                     | 147 |
| 4.3.3 | Παράμετροι κατά την σειρά επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων..... | 148 |
| 4.3.4 | Σύγκριση μελέτης.....  | 150 |
|       | ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....  | 151 |
| 5     | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....  | 158 |
| 5.1   | Μελλοντική εργασία.....  | 159 |
| 6     | Βιβλιογραφία.....  | 160 |

## 1.1 Πίνακας εικόνων

|   |           |
|---|-----------|
| Εικόνα 1 Ιστορία της προθετικής κατασκευής μετάλλων. ....   | 24        |
| <i>Εικόνα 2 Παρουσιάζεται μια απεικόνιση ενός τεμαχίου (φλιτζάνι) αρχικά σε μορφή CAD και στην συνέχεια εικονίζονται τα αποτελέσματα της κατασκευής AM, με τα αντίστοιχα στρωματά που διακρίνονται. (Ian Gibson, 2017).....</i> | <i>25</i> |
| Εικόνα 3 Εξαρτήματα τύπου στηριγμάτων από το αεροσκάφος μοντέλου Airbus A320 .....  | 29        |
| Εικόνα 4 Βήματα της AM Διεργασίας (Ian Gibson, 2017) .....  | 31        |
| <i>Εικόνα 5 Στην εικόνα παρουσιάζεται στο αριστερό σκέλος η μορφή ενός STL αρχείου ενώ στο δεξιό σκέλος ένα διαβαθμισμένο πλέγμα που χρησιμεύει για υπολογιστικές αναλύσεις αντοχών. (D.Rypl, 2006).....</i>                    | <i>32</i> |
| <i>Εικόνα 6 Σημεία που κατά την αφαιρετική κατεργασία θα υπήρχε αδυναμία κοπής. (Ian Gibson, 2017).....</i>   | <i>39</i> |
| <i>Εικόνα 7 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή των διεργασιών προσθετικής κατανομής ανάλογα την τεχνολογία στην οποία βασίζονται και στο είδος του υλικού που χρησιμοποιείται (Sunpreet Singh, 2017).....</i>        | <i>40</i> |
| <i>Εικόνα 8 Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται οι τεχνολογίες AM συγκριτικά ανάλογα την ενέργεια που χρειάζονται την ταχύτητα της διεργασίας , και την ανάλυση που μπορούν να πέτυχουν. (Syed A.M.Tofail, 2018) .....</i>    | <i>41</i> |
| Εικόνα 9 Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι κατηγορίες των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής σε συνδυασμό με τα υλικά εκτύπωσης την πηγή ενέργειας και τα Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα τους. (WeiGao, 2015).....          | 44        |
| Εικόνα 10 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας εξώθησης υλικού (Rasheedat ModupeMahamood, 2021).....  | 46        |
| Εικόνα 11 Παραπάνω απεικονίζεται σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας εξώθησης υλικού (Ian Gibson, 2017) .....  | 46        |
| <i>Εικόνα 12 Διαδρομές εξώθησης υλικού τεχνολογίας FDM (Vigneshwaran Shanmugam, 2021).....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Εικόνα 13 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τεχνολογία FDM (Sunpreet Singh, 2017).....</i>   | <i>48</i> |
| Εικόνα 14 Ιδιότητες υλικών για την τεχνολογία FDM. (Ian Gibson, 2017) .....   | 49        |
| Εικόνα 15 Μια τυπική διάταξη μηχανής sls (AqibMuzaffar, 2020).....  | 50        |



|  |           |
|--|-----------|
| <i>Εικόνα 16 Διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα την τεχνολογία εκτύπωσης (EBM , MLS) (Ian Gibson, 2017).....</i>   | <i>51</i> |
| <i>Εικόνα 17 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η διεργασία τύπου SLS και τους βασικούς μηχανισμούς που την απαρτίζουν (Ian Gibson, 2017).....</i>                                   | <i>51</i> |
| <i>Εικόνα 18 Η διαδικασία από το cad μοντέλο στο τελικό προϊόν μέσω της διεργασίας της τεχνολογίας SLS (WeiZhu, 2015).....</i>   | <i>53</i> |
| <i>Εικόνα 19 Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η σύγκριση της τεχνολογίας SLS με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας (Syed A.M.Tofail, 2018) .....</i>                            | <i>53</i> |
| <i>Εικόνα 20 Οι μηχανισμοί σύντηξης για που υπάρχουν είναι τέσσερις, οι οποίοι αναφέρονται παραπάνω (Ian Gibson, 2017).....</i>  | <i>56</i> |
| <i>Εικόνα 21 Μορφές σωματιδίων (Ian Gibson, 2017).....</i>   | <i>57</i> |
| <i>Εικόνα 22 Στην παραπάνω εικόνα δείχνονται οι διάφορες μεταξύ των παραλλαγών που υπάρχουν μεταξύ στα συστήματα υγρής φάσης συσσωμάτωσης. (Ian Gibson, 2017) .....</i>              | <i>58</i> |
| <i>Εικόνα 23 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η διεργασία Drop On Demand και τα συστήματα τα οποία την υποβοηθούν για να πραγματοποιηθεί η λειτουργία της (HwanKo, 2015) .....</i> | <i>61</i> |
| <i>Εικόνα 24 Παραπάνω απεικονίζεται πλακέτα IC με χρήση σταγονιδίων από κασσίτερο (καλαιο) τα σταγονίδια είναι διαμέτρου 70 μm από Sn63/Pb37. (Ian Gibson, 2017).....</i>            | <i>64</i> |
| <i>Εικόνα 25 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη μιας μηχανής διεργασίας τύπου εναπόθεσης συγκολλητικού υλικού. (SoniaHolland, 2019).....</i>                               | <i>65</i> |
| <i>Εικόνα 26 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα βήματα της διεργασίας Εναπόθεση συγκολλητικού υλικού (exone, 2022).....</i>  | <i>66</i> |
| <i>Εικόνα 27 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι διαφορές στις διατάξεις μεταξύ των τεχνολογιών SLM και BINDER JETTING. (additivalab, 2022).....</i>                              | <i>66</i> |
| <i>Εικόνα 28 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας προσθετικής κατασκευής με χρήση επάλληλων φύλλων (TassiloMoritz, 2018).....</i>              | <i>68</i> |
| <i>Εικόνα 29 Στην παραπάνω σχηματική αναπαράσταση απεικονίζονται δυο τεχνολογίες DED με διαφορετικές πηγές θερμότητας. (S.L.Sing, 2020).....</i>                                     | <i>70</i> |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Εικόνα 30 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι περιοχές κάτω και επάνω από το σημείο εστίασης του laser , στο σημείο εστίασης η ενεργειακή πυκνότητα έχει πολύ μεγάλες τιμές και γίνεται η τήξη του υλικού. (Ian Gibson, 2017) .....</i>   | <i>71</i> |
| <i>Εικόνα 31 Στις παραπάνω σχηματικές διατάξεις απεικονίζεται η Α) Χρήση ομοαξονικού ακροφυσίου και Β ) Η χρήση μονού ακροφυσίου (Ian Gibson, 2017)..</i>   | <i>72</i> |
| <i>Εικόνα 32 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την DED διεργασία (DavidSvetlizky, 2021) .....</i>  | <i>73</i> |
| <i>Εικόνα 33 Διατάξεις τεχνολογίας φωτοπολυμερισμού. (A.Patel, 2020).....</i>   | <i>76</i> |
| <i>Εικόνα 34 Απεικόνιση διατάξεων τύπου bath και τύπου bat, C) βάθους επίδρασης UV laser και D) βήματα της διεργασίας. (AshishM.TECH, 2019).....</i>  | <i>78</i> |
| <i>Εικόνα 35 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται και κατηγοριοποιούνται τα υποσυστήματα που απαρτίζονται σε μια SL μηχανή (Ian Gibson, 2017).....</i>   | <i>81</i> |
| <i>Εικόνα 36 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι μοριακές δομές που συναντιούνται στα θερμοπλαστικά και στα VP φωτοπολυμερή. (Ian Gibson, 2017)</i>  | <i>83</i> |
| <i>Εικόνα 37 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα είδη των υλικών τύπου ρητινών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μηχανές τεχνολογίας SLA. (M.Gurr, 2012) .....</i>   | <i>85</i> |
| <i>Εικόνα 38 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η μοριακή δομή των υλικών που συγκαταλέγονται στα VP μονομερή. (Ian Gibson, 2017).....</i>  | <i>86</i> |
| <i>Εικόνα 39 Στην εικόνα παρατηρείται στο αριστερό σκέλος η διαδρομή εκτύπωσης ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ακρίβεια , στο δεξιό σκέλος της εικόνας παρατηρείται η διαδρομή για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού με στόχο την καλύτερη αντοχή του τεμαχίου (Ian Gibson, 2017).....</i> | <i>90</i> |
| <i>Εικόνα 40 Κάμψη τριών σημείων (ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, 2020) .....</i>   | <i>95</i> |
| <i>Εικόνα 41Τυπικό διάγραμμα κάμψης (ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, 2020) .....</i>  | <i>96</i> |
| <i>Εικόνα 42 Κάμψη τριών σημείων και απεικόνιση του μηχανισμού κάμψης πειραμάτων (M. Nebe, 2021) .....</i>  | <i>97</i> |
| <i>Εικόνα 43 Διάγραμμα καμπτικών ροπών. (Γιαννακόπουλος, 2011) .....</i>  | <i>97</i> |
| <i>Εικόνα 44 Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ο τρόπος που πραγματοποιείται η καταπόνηση στο δοκίμιο, οι γραμμές θλίψης στο άνω μέρος του δοκιμίου και οι γραμμές εφελκυσμού στο κάτω σημείο του δοκιμίου. (Γιαννακόπουλος, 2011).....</i>   | <i>98</i> |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Εικόνα 45 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η βασική διακλάδωση των λογισμικών που έχουν τα συστήματα προσθετικής κατασκευής. (LEE, 1999) .....</i>           | 104 |
| <i>Εικόνα 46 Προϊόν από υλικό εκτύπωσης ProTempSL (xyzprinting, 2020).....</i>  | 108 |
| <i>Εικόνα 47 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού ProTempSL (xyzprinting, 2020) .....</i>                                      | 108 |
| <i>Εικόνα 48 Προϊόντα από το υλικό ProPreciseSL τα οποία παρουσιάζουν υψηλή σκληρότητα και μπορούν να είναι και λειτουργικά. (xyzprinting, 2020) .....</i>        | 109 |
| <i>Εικόνα 49 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού ProPreciseSL (xyzprinting, 2020).....</i>                                    | 109 |
| <i>Εικόνα 50 Προϊόντα που έχουν κατασκευαστεί από το υλικό ProPoly (xyzprinting, 2020) .....</i>  | 110 |
| <i>Εικόνα 51 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού: ProPoly (xyzprinting, 2020).....</i>  | 110 |
| <i>Εικόνα 52 Παραπάνω απεικονίζεται ένα από τα δοκίμια τα οποία δημιουργήθηκαν, είναι από την σειρά 9 που σημαίνει ότι εκτυπώθηκε παράλληλα στον (άξονα Z) ..</i> | 112 |
| <i>Εικόνα 53 Επιλογή STL αρχείου .....</i>  | 112 |
| <i>Εικόνα 54 Επιλογές για εξαγωγή μοντελοποιημένου δοκιμιού .....</i>   | 113 |
| <i>Εικόνα 55 Επιλογές slicer .....</i>  | 113 |
| <i>Εικόνα 56 Επιλογές πάχους στο slicer .....</i>   | 114 |
| <i>Εικόνα 57 Επιλογές θέσης εκτύπωσης στο slicer .....</i>  | 114 |
| <i>Εικόνα 58 Επιλογές στηρίξεων στο slicer .....</i>  | 115 |
| <i>Εικόνα 59 Δοκίμιο σε θέση εκτύπωσης παράλληλη στον άξονα X με χρήση στηρίξεων Honeycomb .....</i>  | 115 |
| <i>Εικόνα 60 Δοκίμιο σε θέση εκτύπωσης παράλληλη στον άξονα X χωρίς χρήση στηρίξεων.....</i>  | 115 |
| <i>Εικόνα 61 Δοκίμιο τοποθετημένο παράλληλα στον άξονα Y εκτύπωσης, χωρίς την χρήση στηρίξεων.....</i>  | 116 |
| <i>Εικόνα 62 Παράδειγμα δυνατότητας εκτύπωσης πολλαπλών δοκιμιών ταυτόχρονα, παράλληλα στον άξονα Z (1.1-3.3) .....</i>   | 116 |
| <i>Εικόνα 63 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμιού , παράλληλα στον άξονα X.....</i>   | 117 |

|  |            |
|--|------------|
| Εικόνα 64 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμίου , παράλληλα στον άξονα Z .....  | 117        |
| Εικόνα 65 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμίου , παράλληλα στον άξονα Z .....  | 117        |
| Εικόνα 66 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμίου, παράλληλα στον άξονα Y .....   | 117        |
| <i>Εικόνα 67 Παραπάνω εικονίζονται προϊόντα από το υλικό ProBasic (xyzprinting, 2020) .....</i>  | <i>118</i> |
| Εικόνα 68 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού ProBasic (xyzprinting, 2020) .....                     | 118        |
| <i>Εικόνα 69 Δοκίμια παράλληλα στον άξονα Z μετά την διεργασία της εκτύπωσης πριν την εξαγωγή τους από την επιφάνεια εκτύπωσης .....</i> | <i>120</i> |
| Εικόνα 70 Αντίστοιχα και για τα δοκίμια (8.1-8.2-8.3) μετα την εφαρμογή UV Curing .....  | 120        |
| Εικόνα 71 Δοκίμια ( 7,1 – 7,2 - 7,3 ) Μετά το UV Curing. ....  | 120        |
| Εικόνα 72 Δοκίμια ( 7,1 – 7,2 - 7,3 ), πριν το UV Curing. ....   | 120        |
| Εικόνα 73 Αφαίρεση της επιφάνειας εκτύπωσης από την AM μηχανή με σκοπό την αποκόλληση των πειραματικών δοκιμών. ....                     | 121        |
| Εικόνα 74 Εικονίζεται η διαδικασία πριν το καθαρισμό των δοκιμών από την υπολιπούσα ρητίνη.....  | 122        |
| Εικόνα 75 Εκτύπωση στον κατακόρυφο άξονα.....  | 123        |
| Εικόνα 76 Το form wash που χρησιμοποιήθηκε για το καθαρισμό των δοκιμών...123  | 123        |
| Εικόνα 77 Τα δοκίμια μετα τον καθαρισμό τους φαίνονται στην παραπάνω εικόνα .....  | 124        |
| Εικόνα 78 Παραπάνω παρατίθενται τα δοκίμια μετά την διαδικασία του UV Curing. ....   | 124        |
| Εικόνα 79 Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία του UV Curing 124  | 124        |
| Εικόνα 80 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια τα οποία παραχθήκαν από την πειραματική διαδικασία .....                    | 125        |
| Εικόνα 81 Στο παραπάνω σχέδιο απεικονίζονται και ονομάζονται τα σημεία που έχει διεξαχθεί μέτρηση.....                                   | 126        |
| Εικόνα 82 Ενδεικτική φωτογραφία της πειραματικής διαδικασίας .....   | 128        |
| Εικόνα 83 Διάγραμμα πρώτης σειράς δοκιμών. ....  | 129        |

|   |     |
|---|-----|
| Εικόνα 84 Δοκίμια 1.1-1.5, μετα από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.....  | 129 |
| Εικόνα 85 Δοκίμιο 1.1 Σημείο θραύσης.....   | 130 |
| Εικόνα 86 Δοκίμιο 1.2 Σημείο θραύσης .....  | 130 |
| Εικόνα 87 Δοκίμιο 1.3 Σημείο θραύσης .....  | 130 |
| Εικόνα 88 Δοκίμιο 1.4 Σημείο θραύσης .....  | 130 |
| Εικόνα 89 Δοκίμιο 1.5 Σημείο θραύσης .....  | 130 |
| Εικόνα 90 Διάγραμμα δεύτερης σειράς δοκιμών .....                                     | 131 |
| Εικόνα 91 Δοκίμια 2.1-2.5, μετα από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.....  | 131 |
| Εικόνα 92 Δοκίμιο 2.1 Σημείο θραύσης.....   | 132 |
| Εικόνα 93 Δοκίμιο 2.2 Σημείο θραύσης.....   | 132 |
| Εικόνα 94 Δοκίμιο 2.4 Σημείο θραύσης.....   | 132 |
| Εικόνα 95 Δοκίμιο 2.3 Σημείο θραύσης.....   | 132 |
| Εικόνα 96 Δοκίμιο 2.5 Σημείο θραύσης.....   | 132 |
| Εικόνα 97 Διάγραμμα τρίτης σειράς δοκιμών .....                                       | 133 |
| Εικόνα 98 Δοκίμια 3.1-3.5, μετα από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.....  | 133 |
| Εικόνα 99 Δοκίμιο 3.1 Σημείο θραύσης.....   | 134 |
| Εικόνα 100 Δοκίμιο 3.2 Σημείο θραύσης.....  | 134 |
| Εικόνα 101 Δοκίμιο 3.4 Σημείο θραύσης .....   | 134 |
| Εικόνα 102 Δοκίμιο 3.3 Σημείο θραύσης .....   | 134 |
| Εικόνα 103 Δοκίμιο 3.5 Σημείο θραύσης .....   | 134 |
| Εικόνα 104 Διάγραμμα τέταρτης Σειράς Δοκιμών .....                                    | 135 |
| Εικόνα 105 Δοκίμια 4.1-4.5, μετα από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης..... | 135 |
| Εικόνα 106 Δοκίμιο 4.2 Σημείο θραύσης .....   | 136 |

|   |     |
|---|-----|
| Εικόνα 107 Δοκίμιο 4.1 Σημείο θραύσης.....  | 136 |
| Εικόνα 108 Δοκίμιο 4.4 Σημείο θραύσης .....   | 136 |
| Εικόνα 109 Δοκίμιο 4.3 Σημείο θραύσης .....   | 136 |
| Εικόνα 110 Δοκίμιο 4.5 Σημείο θραύσης .....   | 136 |
| Εικόνα 111 Διάγραμμα πέμπτης σειράς δοκιμών.....                                      | 137 |
| Εικόνα 112 Δοκίμια 5.1-5.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης..... | 137 |
| Εικόνα 113 Δοκίμιο 5.2 Σημείο θραύσης .....   | 138 |
| Εικόνα 114 Δοκίμιο 5.1 Σημείο θραύσης .....   | 138 |
| Εικόνα 115 Δοκίμιο 5.3 Σημείο θραύσης .....   | 138 |
| Εικόνα 116 Δοκίμιο 5.4 Σημείο θραύσης.....  | 138 |
| Εικόνα 117 Δοκίμιο 5.5 Σημείο θραύσης .....   | 138 |
| Εικόνα 118 Διάγραμμα έκτης σειράς δοκιμών.....  | 139 |
| Εικόνα 119 Δοκίμια 6.1-6.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης..... | 139 |
| Εικόνα 120 Δοκίμιο 6.1 Σημείο θραύσης .....   | 140 |
| Εικόνα 121 Δοκίμιο 6.2 Σημείο θραύσης .....   | 140 |
| Εικόνα 122 Δοκίμιο 6.4 Σημείο θραύσης .....   | 140 |
| Εικόνα 123 Δοκίμιο 6.3 Σημείο θραύσης .....   | 140 |
| Εικόνα 124 Δοκίμιο 6.5 Σημείο θραύσης .....   | 140 |
| Εικόνα 125 Διάγραμμα εβδομή σειρά δοκιμών.....  | 141 |
| Εικόνα 126 Δοκίμια 7.1-7.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης..... | 141 |
| Εικόνα 127 Δοκίμιο 7.2 Σημείο θραύσης .....   | 142 |
| Εικόνα 128 Δοκίμιο 7.1 Σημείο θραύσης .....   | 142 |
| Εικόνα 129 Δοκίμιο 7.3 Σημείο θραύσης .....   | 142 |
| Εικόνα 130 Δοκίμιο 7.4 Σημείο θραύσης .....   | 142 |

|   |     |
|---|-----|
| Εικόνα 131 Δοκίμιο 7.5 Σημείο θραύσης .....   | 142 |
| Εικόνα 132 Διάγραμμα ογδός σειράς δοκιμίων.....                                       | 143 |
| Εικόνα 133 Δοκίμια 8.1-8.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης..... | 143 |
| Εικόνα 134 Δοκίμιο 8.2 Σημείο θραύσης .....   | 144 |
| Εικόνα 135 Δοκίμιο 8.1 Σημείο θραύσης .....   | 144 |
| Εικόνα 136 Δοκίμιο 8.3 Σημείο θραύσης .....   | 144 |
| Εικόνα 137 Δοκίμιο 8.4 Σημείο θραύσης .....   | 144 |
| Εικόνα 138 Δοκίμιο 8.5 Σημείο θραύσης .....   | 144 |
| Εικόνα 139 Διάγραμμα ενάτης σειράς δοκιμίων .....                                     | 145 |
| Εικόνα 140 Δοκίμια 9.1-9.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης..... | 145 |
| Εικόνα 141 Δοκίμιο 9.1 Σημείο θραύσης.....  | 146 |
| Εικόνα 142 Δοκίμιο 9.2 Σημείο θραύσης .....   | 146 |
| Εικόνα 143 Δοκίμιο 9.4 Σημείο θραύσης .....   | 146 |
| Εικόνα 144 Δοκίμιο 9.3 Σημείο θραύσης .....   | 146 |
| Εικόνα 145 Δοκίμιο 9.5 Σημείο θραύσης .....   | 146 |
| Εικόνα 146 Συγκριτικό διάγραμμα μέσων ορών όλων των πειραμάτων.....                   | 147 |
| Εικόνα 147 Δοκιμαστική εκτύπωση με εφαρμογή κλίσης 45 μοιρών. ....                    | 153 |
| Εικόνα 148 Αδυναμία εκτύπωσης δυο δοκιμίων στον άξονα Z .....                         | 154 |
| Εικόνα 149 Μη επιτυχής εκτύπωση .....   | 155 |
| Εικόνα 150 Μη επιτυχής εκτύπωση .....   | 155 |
| Εικόνα 151 Η στερεοποιημένη σταγωνα ρητινης .....                                     | 156 |
| Εικόνα 152 Αδυναμία εκτύπωσης εξαιτίας στερεωμένης σταγόνας ρητίνης.....              | 156 |

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

### Εισαγωγή

#### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση του μεγέθους της συμβολής των παραμέτρων εκτύπωσης στις μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων, που έχουν κατασκευαστεί με χρήση προσθετικών διεργασιών και την σύγκριση των αποτελεσμάτων με βιβλιογραφικές πηγές. Ο σχεδιασμός πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με βάση τη μεθοδολογία taguchi. Τα δοκίμια δημιουργήθηκαν με χρήση της τεχνολογίας στερεολιθογραφίας και από υλικό ProBasic resin. Στα δοκίμια επιβλήθηκε καταπόνηση τύπου κάμψης τριών σημείων. Το ενδιαφέρον της διπλωματικής εργασίας έγκειται στο ότι προσθέτει δεδομένα στην καταπόνηση κάμψης, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των μηχανικών ιδιοτήτων. Να σημειωθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες θα πρέπει να είναι δεδομένες και αξιόπιστες ώστε να υπάρχουν ασφαλείς κατασκευές με προβλεπόμενη συμπεριφορά.

#### 2.1 Προσθετική κατασκευή

Ο ορός προσθετική κατασκευή είναι πρόσφατος, καθώς αρχικά η ονομασία ήταν ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping) (Ian Gibson, 2017). Η ταχεία πρωτοτυποποίηση αναφέρεται στην γρήγορη φυσική απεικόνιση ενός πρωτότυπου μοντέλου το οποίο δεν έχει γίνει εμπορικά διαθέσιμο. Η ορολογία Rapid prototyping δεν μπορούσε να καλύψει το φάσμα των δυνατοτήτων αυτής της τεχνολογίας καθώς με την πάροδο των ετών, η ποιότητα των παραγομένων προϊόντων αυξήθηκε και μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερους τομείς, ως τελικά προϊόντα και όχι μόνο ως πρωτότυπα. (Ian Gibson, 2017) Επίσης να αναφερθεί ότι ο ορός Rapid prototyping δεν αναφέρει την προσθετική μέθοδο αυτής της τεχνολογίας. Στη ASTM International, δημιουργήθηκε για αυτό το θέμα μια επιτροπή, η οποία κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι η ορολογία, για αυτή την τεχνολογία, θα έπρεπε να αλλάξει. Να σημειωθεί, ότι δεν έχει παρθεί τελική απόφαση για την ονομασία της τεχνολογίας, ενώ προς το παρόν έχουν υιοθετήσει



τον ορό <<additive manufacturing>> (<< προσθετική κατασκευή>>). Ως συντομογραφικό χαρακτήρα μπορούμε να την αναφέρουμε AM. (Ian Gibson, 2017). Βασική προϋπόθεση για την AM τεχνολογία είναι η προαπαιτούμενη τρισδιάστατη μοντελοποίηση του προϊόντος που θα εκτυπωθεί, η οποία γίνεται μέσω ενός συστήματος CAD (Computer - Aided - Design ). Αυτή η τεχνολογία έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να δημιουργήσει τρισδιάστατα μοντέλα, χωρίς να προϋπάρχει προγραμματισμός της παραγωγής του. Σε γενικές γραμμές να αναφερθεί ότι η τεχνολογία AM απλοποιεί και διευκολύνει την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από ψηφιακά δεδομένα τύπου CAD. (Ian Gibson, 2017)

Η τεχνολογία AM λειτουργεί με την προσθήκη υλικού σταδιακά σε στρώσεις ενώ το κάθε layer χαρακτηρίζεται από μια μικρού πάχους διατομή του τεμαχίου, που κατασκευάζεται (cross-section). Οι στρώσεις αυτές προέρχονται από το αρχικό τρισδιάστατο μοντέλο CAD. Το μοντέλο προσεγγίζεται από τις διαδοχικές διατομές, καθώς η κάθε στρώση έχει ένα πεπερασμένο αριθμό πάχους , όσο πιο λεπτή είναι η κάθε στρώση τόσο πιο ακριβές θα είναι το παραγόμενο κομμάτι ως προς το αρχικό μοντέλο CAD. Όλες οι σύγχρονες διατάξεις τύπων μηχανήματων AM χρησιμοποιούν την διαστρωματική μέθοδο κατασκευής. Οι διαφοροποιήσεις, οι οποίες υπάρχουν στις τεχνολογίες AM, έχουν να κάνουν με τον τρόπο κατασκευής των στρώσεων, καθώς και τον τρόπο ενσωμάτωσης μεταξύ τους, όπως και από το υλικό που κατασκευάζονται. (Ian Gibson, 2017) Οι διαφοροποιήσεις υπάρχουν στην τελική γεωμετρική ακρίβεια, στις ιδιότητες (Μηχανικές & Χημικές), τον χρόνο παραγωγής των τελικών προϊόντων, της μετεπεξεργασίας αυτών, το κόστος παραγωγής προϊόντων όπως και το κόστος του AM εξοπλισμού. (Ian Gibson, 2017)

## 2.2 Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα πειράματα για την δημιουργία στερεών δοκιμίων με χρήση φωτοπολυμερικής τεχνολογίας έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1960, στις εγκαταστάσεις που βρίσκονται στο (Battelle Memorial Institute) . (Terry Wohlers, 2016) Τα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιούσαν δυο laser, τα οποία ήταν διαφορετικού μήκους κύματος και είχαν ως σκοπό να πολυμερίσουν την ρητίνη, η οποία βρισκόταν σε μια δεξαμενή.

Παρόμοια πειράματα έγιναν από τον Wyn K. Swainson το 1967 με σκοπό την περεταίρω ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας και σε μεταγενέστερο στάδιο την εμπορευματοποίηση της. (Terry Wohlers, 2016)

Στις αρχές της δεκαετίας του 70, τα πρώτα εμπορικά μοντέλα, με χρήση δυο laser εμφανιστήκαν στην αγορά από την Formigraphic Engine Co. Η τεχνολογία αυτή ονομάστηκε φωτοχημική μηχανική. (Terry Wohlers, 2016)

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 παρουσιάστηκαν από την Dynell Electronics Corp αρκετές εφευρέσεις, όσο αναφορά το κομμάτι της solid photography. Οι εφευρέσεις αφορούσαν την ψηφιακή καθοδήγηση laser. (Terry Wohlers, 2016)

Η τεχνολογία της στερεολιθογραφίας

Βάσει βιβλιογραφικών πηγών ο Hideo Kodama ήταν από τους πρώτους που εφηύρε το laser μονής δέσμης τον Οκτώβριο του 1980. Η εργασία που δημοσίευσε είχε σχέση με την τρισδιάστατη δημιουργία δεδομένων, τα οποία είχαν προέλθει από ένα 3D μοντέλο. Στο πειραματικό σκέλος της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν UV ακτίνες οι οποίες εξέρχονταν από μια λάμπα υδράργυρου τύπου Toshiba. Ως υλικό χρησιμοποιήθηκε ρητίνη (tevislar). Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή ασπρόμαυρων φιλμ τα οποία είχαν ως σκοπό την σκίαση περιοχών, για τον έλεγχο των διαδρομών στερεοποίησης. Η εν λόγω εργασία αναφέρει επίσης μια διάταξη τύπου x-γ πλοτέρ, σε συνδυασμό με οπτικές ίνες, για την εξαγωγή UV φωτός. Να αναφερθεί επίσης ότι το CMET έκανε χρήση μηχανήματων που χρησιμοποίησαν αυτήν την τεχνολογία (SOUP 530,600,850). (Terry Wohlers, 2016)

Μια δεύτερη εργασία δημοσιεύτηκε από τον Hideo Kodama, της οποίας το αντικείμενο ήταν η αυτοματοποιημένη μέθοδος για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου μοντέλου από πλαστικό με χρήση φωτοσκλήρυνσης. Η εργασία δημοσιεύτηκε το έτος 1981 τον μηνά Νοέμβριο. (Terry Wohlers, 2016)

Ο Hideo Kodama αναφέρει τις βασικές τεχνολογίες, τις οποίες χρησιμοποίησε για να κατασκευάσει πλαστικά δοκίμια από διαδοχικά στρωματά φωτοπολυμερών, τα οποία στερεοποιούνται. Η εργασία η οποία παρουσιάστηκε από τον Kodama στο (Review of Scientific Instruments), παρουσιάζει για πρώτη φορά τον μηχανισμό

λειτουργίας αυτής της τεχνολογίας και αποδεικνύει ότι οι κατασκευές με χρήση AM είναι εφικτές. (Terry Wohlers, 2016)

Όσο αναφορά τις μηχανές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για εμπορική χρήση, τα πρώτα συστήματα εμφανιστήκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Ήταν μηχανήματα τύπου στρεωλιθογραφίας και ο εφευρέτης τους είναι ο Charles Hull στον οποίο δόθηκε και δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Το επόμενο είδος τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, το οποίο εμπορευματοποιήθηκε ήταν οι μηχανές που λειτουργούσαν με την τεχνολογία Selective Laser Sintering (SLS) από την εταιρία DTM CORP το 1992. Να σημειωθεί ότι και στις δυο τεχνολογίες χρησιμοποιείται laser για την στερεοποίηση του υλικού της διεργασίας. (Terry Wohlers, 2016)

Η LB-PBF είχε ως προυπάρχουσα τεχνολογία την Direct Metal Laser Sintering (DMLS) η οποία δημιουργήθηκε το 1994 από την εταιρία κατασκευής συστημάτων ονόματος EOS. Η συγκεκριμένη εταιρία κατασκεύαζε μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία SLS και στην συνέχεια προσαρμοσε την τεχνολογία, έτσι ώστε να μπορεί να κατασκευάσει μεταλλικά προϊόντα μέσω δυο μεταλλικών υλικών, με την μέθοδο της πυροσυσσωμάτωσης. (Terry Wohlers, 2016) Η διαδικασία γίνεται με τήξη υλικού (συνήθως μπρούτζου, χαλκού) το οποίο τήκεται γύρω από κόκκους χάλυβα. Κατά το τέλος της δεκαετίας του 1990 χρησιμοποιήθηκε Fiber Laser υψηλής ενέργειας για την υγροποίηση κραμάτων μεταλλικών υλικών. Οι Fockele και Schwarze παρουσίασαν ένα μοντέλο, το οποίο ήταν το πρώτο σύστημα με χρήση επιλεκτικής τήξης Laser κατά το έτος 1999, άλλες επιχειρήσεις όπως η Quickly Concept Laser, η EOS και η Trumpf κατά το έτος 2003 δημιούργησαν τα δικά τους συστήματα για την τήξη μετάλλων με χρήσης ενεργειακής δέσμης. Οι επιχειρήσεις αυτές κατά την πλειοψηφία τους συνεχίζουν να παράγουν μηχανήματα προσθετικών κατασκευών μέχρι και σήμερα. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι το 2002 χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά εμπορικά η τεχνολογία Electron Beam Powder Bed Fusion από την εταιρία ARCAM. Την δεκαετία του 2010 οι τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών χρησιμοποιήθηκαν στο κομμάτι των ιατρικών συσκευών, με τις κυριότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται να είναι η EB και η LB-PBF. Το 2016 εταιρίες όπως η HP και η Desktop Metal δήλωσαν συμμετοχή στην ανάπτυξη τεχνολογιών προσθετικών

κατασκευών. Η τεχνολογία που παρουσιάστηκε ήταν η BJT. Να αναφερθεί ότι κατά το τέλος της δεκαετίας 2010 και στις αρχές της δεκαετίας του 2020 πολλές βιομηχανικές χρήσεις PBF είναι σε διαδικασία εφαρμογής πιστοποίησης. (Report, 2022)

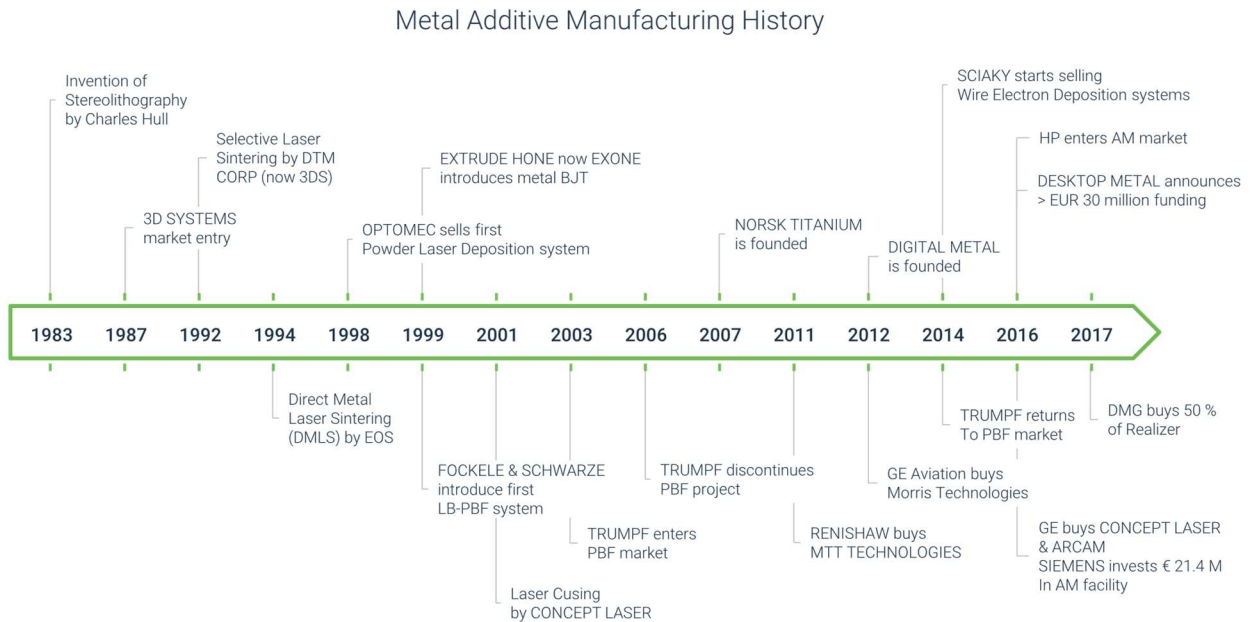


Figure 1 Ιστορία της προθετικής κατασκευής μετάλλων. (Report, 2022)

### 2.3 Εφαρμογές

Οι AM τεχνολογίες αρχικά δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την παρουσίαση πρωτοτύπων μοντέλων, για την καλύτερη αναπαράσταση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε γιατί ένα φυσικό υπαρκτό μοντέλο είναι πιο εύκολο στην κατανόηση και στην σύλληψη της ιδέας του σχεδιαστή στο εκάστοτε προϊόν (conceptual design). Να αναφερθεί ότι τα σχέδια είναι πιο ευκολά στην κατασκευή τους, αλλά για την παραγωγή ενός καινούργιου προϊόντος συνήθως απαιτείται ένα φυσικό υπαρκτό τρισδιάστατο μοντέλο. (Ian Gibson, 2017)

Με την πάροδο των ετών η τεχνολογία βελτιώθηκε όσο αναφορά την ποιότητα των τελικών μοντέλων αλλά και στην προσεγγιστικότητα της γεωμετρίας του τελικού μοντέλου. Στην συνέχεια η τεχνολογία άρχισε να χρησιμοποιείται και ως << 3Fs>> (form ,fit, function). Ο όρος form (μορφή) χρησιμοποιείται για την οπτική

αναπαράσταση της γεωμετρίας του προϊόντος. Ο όρος *fit* (συναρμογή) υποδηλώνει την ικανότητα της τεχνολογίας AM για εφαρμογές τύπου συναρμολόγησης. Ο όρος *function* (λειτουργία) χρησιμοποιείται καθώς τα υλικά βελτιώθηκαν και απέκτησαν ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τεμάχια τα οποία είναι λειτουργικά ως τελικά προϊόντα. (Ian Gibson, 2017)

Οι διεργασίες AM μπορούν να συνδυαστούν με άλλες τεχνολογίες και να δημιουργήσουν υβριδικές μονάδες με σκοπό την μείωση του χρόνου παραγωγής προϊόντων, αλλά και μικρότερα κόστη δημιουργίας τεμαχίων. (Ian Gibson, 2017) Αξίζει να αναφερθεί ότι κάποιες από αυτές τις τεχνολογίες έχουν εξελιχθεί σε τέτοιο βαθμό, που παράγουν τελικά προϊόντα. Η τεχνολογία αυτή, με χρήση ενεργειακής δέσμης μεγάλης ισχύος, έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται και για μεταλλικά προϊόντα με αποτέλεσμα την ανάπτυξη της AM τεχνολογίας σε μεγαλύτερο βαθμό. Ως αποτέλεσμα τεκμηριώνεται η αλλαγή του ονόματος από «ταχεία πρωτοτυπία» σε «προσθετική κατασκευή». (Ian Gibson, 2017)



*Εικόνα 2 Παρουσιάζεται μια απεικόνιση ενός τεμαχίου (φλιτζάνι) αρχικά σε μορφή CAD και στην συνέχεια εικονίζονται τα αποτελέσματα της κατασκευής AM, με τα αντίστοιχα στρώματα που διακρίνονται. (Ian Gibson, 2017)*

Η χρήση μηχανήματων τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής στον χώρο του εμπορίου είναι στην τρίτη δεκαετία ανάπτυξης. Κατά το διάστημα αυτό, οι μηχανικές ιδιότητες των παραγομένων τεμαχίων βελτιωθήκαν, όπως και η ακρίβειά τους. Οι χρήσεις των μηχανήματων διευρύνθηκε σε πολλούς τομείς ενώ το κόστος των μηχανήματων παραγωγής αλλά και των προϊόντων έχει μειωθεί. Να αναφερθεί ότι το κόστος των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ενεργειακή δέσμη είναι κατά κανόνα αυξημένο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες AM. (Ian Gibson, 2017). Επίσης με την πάροδο των ετών, τα υλικά κατασκευών αυξήθηκαν σε ποικιλία και πραγματοποιήθηκε προσθήκη υλικών τα οποία είναι σύνθετα. (Ian Gibson, 2017). Η συντήρηση των μηχανήματων διαφέρει ανάλογα το τύπο της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής καθώς έχουν διαφορετική πολυπλοκότητα. (Ian Gibson, 2017)

Η ταχύτητα της διεργασίας διαφέρει ανάλογα την τεχνολογία AM ως προς την περάτωση της. (Ian Gibson, 2017). Οι τεχνολογίες παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα ευελιξίας όσο αναφορά τις επιλογές που προσφέρουν στον προγραμματιστή. (Ian Gibson, 2017). Το πάχος στρώσης σε διάφορες τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών είναι περιορισμένο, καθώς οι παράμετροι διεργασίας και επεξεργασίας που σχετίζονται με το υλικό κατασκευής, έχουν επίδραση στο μέγεθος του πάχους που είναι διαθέσιμο. (Ian Gibson, 2017)

Η ακρίβεια επηρεάζεται άμεσα από την αντίστοιχη ανάλυση στο οριζόντιο επίπεδο που μπορεί να επιτύχει η δέσμη του laser και σχετίζεται και με την διάμετρο της αλλά και με το πάχος των στρώσεων. (Ian Gibson, 2017)

Τα χαρακτηριστικά της προσθετικής κατασκευής, την έχουν κάνει ιδανική για χρήση σε τομείς εφαρμογών, όπως στην αεροδιαστημική, στις αυτοκινητοβιομηχανίες, αλλά και στο τομέα της ιατρικής. Η ανάπτυξη μηχανήματων τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν μεταλλικές πούδρες βοήθησε στην διεύρυνση των πεδίων εφαρμογών των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Αυτή η τεχνολογία είναι πολύ χρήσιμη σε αυτούς τους τομείς, καθώς δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης πολυμορφικών προϊόντων, όπως και τον μικρό χρόνο που χρειάζονται για να

κατασκευαστούν συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες παραγωγής αντίστοιχων πολύπλοκων γεωμετρικών προϊόντων. (Ian Gibson, 2017)

### **2.3.1 Ιατρική**

Στον τομέα της ιατρικής η δυνατότητα ανάπτυξης πολυμορφικών αντικειμένων δίνουν την εξατομικευμένη λύση για κάθε ασθενή που μπορεί να χρειάζεται ειδικά διαμορφωμένο υποστηρικτικό υλικό. Στην ιατρική για την κατασκευή προσθετικών μοντέλων τα δεδομένα αντλούνται από ένα σύστημα CT με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει μέχρι και 0,2mm από την τιμή που αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα (Jianping Wang, 2009). Να σημειωθεί ότι το λογισμικό CAD μπορεί να αναβαθμίσει την κατασκευή προσθετικών μελών με την χρήση διατάξεων και διαμορφώσεων που σκοπό έχουν την καλύτερη σύνδεση του προσθετικού μέλους με τα οστά. (Ian Gibson, 2017)

### **2.3.2 Αεροδιαστημική.**

Η δυνατότητα των προσθετικών κατασκευών να δημιουργούν πολύπλοκης γεωμετρίας προϊόντα, τα οποία προέρχονται από πολύ λίγες φάσεις κατεργασίας, έχει ως αποτέλεσμα την αξιοποίηση της AM τεχνολογίας στο τομέα της αεροδιαστημικής. Τα χαρακτηριστικά τα οποία κάνουν την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής κατάλληλη για αυτού του είδους τις εφαρμογές, είναι το μικρό βάρος των προϊόντων το οποίο είναι απαραίτητο σε εφαρμογές όπου το εξάρτημα αποτελεί μέρος μηχανισμού το οποίο ίπταται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλα υλικά, των οποίων η αντοχή τους είναι αυξημένη σε σχέση με το βάρος τους. Η χρήση υλικών τύπου αλουμίνιου και τιτάνιου είναι συνήθης σε τέτοιες εφαρμογές. Ακόμα πιο πρόσφατα έχουν εφαρμοστεί υλικά με χρήση ινών άνθρακα όπως και με χρήση σύνθετων υλικών. Η τεχνολογία προσθετικών κατασκευών δίνει την δυνατότητα δημιουργίας προϊόντων με κυψελοειδής μορφής εσωτερικό, το οποίο ενισχύει το χαρακτηριστικό του μειωμένου βάρους του προϊόντος. (Ian Gibson, 2017)

Στα χαρακτηριστικά των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στο τομέα της αεροδιαστημικής, πρέπει να συμπεριλαμβάνονται η αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες καθώς και στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Για αυτό τον λόγο στην αεροδιαστημική γίνεται χρήση καινοτόμων σχεδιασμών και όσο αναφορά το τομέα



της ψύξης των εξαρτημάτων. Τα υλικά των τεχνολογιών AM πρέπει να έχουν το χαρακτηριστικό της επιβραδυνόμενης ανάφλεξης και να είναι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν τις αντίστοιχες καταπονήσεις. (Ian Gibson, 2017)

Η γεωμετρία των εξαρτημάτων στο τομέα της αεροδιαστημικής είναι αρκετά πολύπλοκη καθώς τα εξαρτήματα έχουν συνήθως πολλαπλούς ρόλους όσο αναφορά τις λειτουργίες και τις απαιτήσεις που έχουν μελετηθεί να κάνουν. Ο σχεδιασμός τους μπορεί να είναι βασισμένος σε μαθηματικές σχέσεις οι οποίες να προκύπτουν από ρευστομηχανικούς κανόνες και σε συνδυασμούς με σχεδίαση η οποία περιλαμβάνει εσωτερικές διαμορφώσεις, για την ψύξη των εξαρτημάτων. (Ian Gibson, 2017)

Οικονομικά η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής είναι συμφέρουσα για μικρές ποσότητες εξειδικευμένων εξαρτημάτων, κάτι το οποίο είναι γεγονός στις εφαρμογές στο τομέα της αεροδιαστημικής. Οι μηχανικοί που έχουν αναλάβει να κατασκευάσουν τα προϊόντα δεν χρειάζεται να κατασκευάσουν μήτρες, καλούπια, συσκευές συγκρατήσεις και να προβούν σε προγραμματισμό αφαιρετικών διαδικασιών, όπως κατά κανόνα συμβαίνει στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής εξαρτημάτων. (Ian Gibson, 2017)

Η χρήση των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής είναι κατάλληλη για την αποθήκευση ανταλλακτικών σε ψηφιακή μορφή. Ο λόγος που τα ανταλλακτικά αποθηκεύονται είναι γιατί τα αεροσκάφη έχουν μεγάλο χρόνο υπηρεσίας, που σημαίνει ότι πρέπει να τροφοδοτούνται με ανταλλακτικά από τις βιομηχανίες. Ο πιο εύκολος τρόπος και οικονομικός όσο αναφορά την αποθήκευση εξαρτημάτων είναι ο ψηφιακός, σε σχέση με την φυσική αποθήκευση. (Ian Gibson, 2017)

Στην βιομηχανία αεροδιαστημικής υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, καθώς πολλά εξαρτήματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη, είτε της πολιτικής, είτε της πολεμικής αεροπορίας έχουν κατασκευαστεί με αυτή τη μέθοδο. Μια από αυτές τις εταιρίες είναι και η Boeing, η οποία αναφέρει, ότι έχουν χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον 200 εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής σε πάνω από 16 μοντέλα παραγωγής της. (Wohlert, 2014)



Η χρήση εξαρτημάτων για τις αεροδιαστημικές εφαρμογές είχε καθυστερήσει λόγω της αδυναμίας τους, όσο αναφορά τις προδιάγραφες αναφλεξιμότητας των πλαστικών υλικών AM. Η χρήση των AM σε αυτές τις εφαρμογές πραγματοποιήθηκε όταν χρησιμοποιηθήκαν PBF πολυμερή, τα οποία είχαν το χαρακτηριστικό της επιβραδυνόμενης ανάφλεξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πιστοποίηση μεταλλικών υλικών με χρήση διεργασίας προσθετικής μεθόδου καθυστέρησε και αυτή. (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 3 Εξαρτήματα τύπου στηριγμάτων από το αεροσκάφος μοντέλου Airbus A320  
(ByronBlakey-Milner, 2021)

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται εξαρτήματα τύπου στηριγμάτων από το αεροσκάφος μοντέλου Airbus A320. Στην αριστερή πλευρά της εικόνας παρουσιάζεται το σχέδιο, το οποίο βελτιώνεται σταδιακά όσο αναφορά την προσπάθεια για μείωση της μάζας του εξαρτήματος. Στα δεξιά το πάνω εικονιζόμενο εξάρτημα είναι το αρχικό προϊόν από υλικό τύπου ατσαλιού και το κάτω δεξιά εξάρτημα είναι το βελτιωμένο προϊόν από διεργασίες προσθετικών κατασκευών και υλικού Ti6Al4V. Η βελτίωση της μείωσης της μάζας, είναι της τάξεως του 64% , καθώς επιτυγχάνεται μείωση από 918g στα 326g. (ByronBlakey-Milner, 2021)

### 2.3.3 Αυτοκινητοβιομηχανία

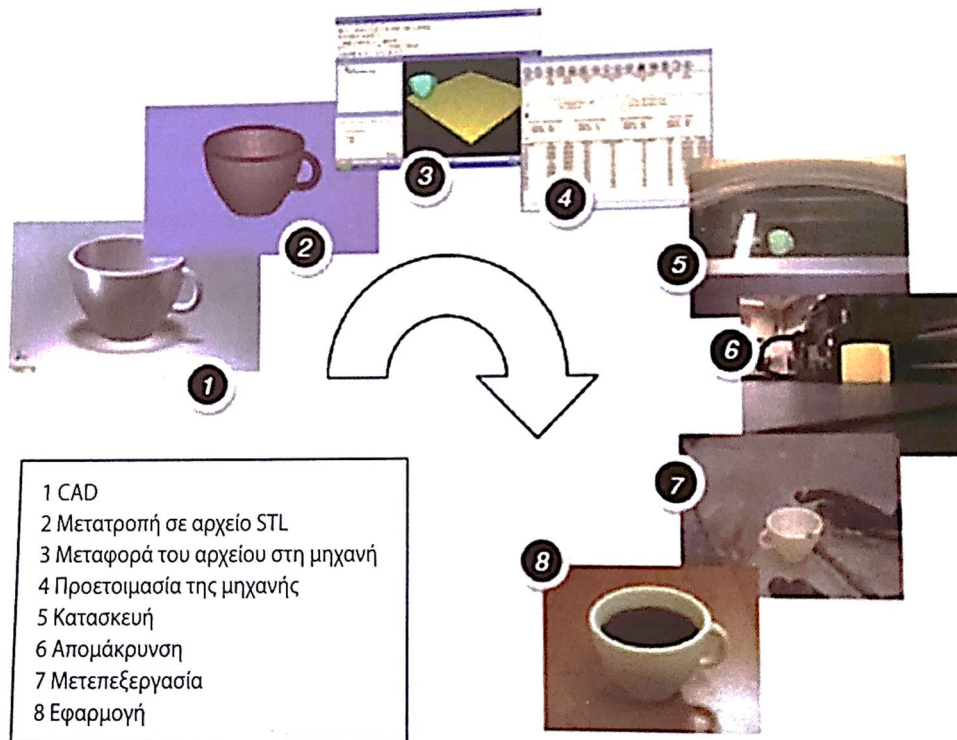
Από τους πρώτους τομείς που χρησιμοποίησαν την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής ήταν η αυτοκινητοβιομηχανία. Η χρήση της σε αυτό το τομέα έχει αποτελέσει σημαντικό κομμάτι όσο αναφορά τους συνολικούς κύκλους εργασίας των προσθετικών κατασκευών. Για παράδειγμα το έτος 2013 οι

αυτοκινητοβιομηχανίες ευθυνόντουσαν για το 17% της συνολικής χρήσης αυτής της τεχνολογίας. Με τα στοιχεία που υπάρχουν για το ίδιο έτος η χρήση των προσθετικών κατασκευών στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι τρίτη σε ποσοστό χρήσης της τεχνολογίας, μόλις πίσω από την εφαρμογή για μηχανήματα εμπορικού χαρακτήρα (18,5%) και για χρήση της τεχνολογίας στο πεδίο των ηλεκτρονικών(18%). Να αναφερθεί ότι οι προσθετικές κατασκευές θεωρούνται δαπανηρές μέθοδοι αν χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές μεγάλης συνεχομένης παραγωγής, όπως οι αυτοκινητοβιομηχανίες, με την αντίθεση να υπάρχει στην σύγκριση με το πεδίο της αεροδιαστημικής. Συνήθως για παράγωγες ειδικών αυτοκινήτων ή αυτοκίνητων περιορισμένης παραγωγής η προσθετική μέθοδος κατασκευής θα μπορούσε να είναι οικονομικά αποδεκτή λύση. (Ian Gibson, 2017)

Μερικά παραδείγματα αυτοκινητοβιομηχανιών, οι οποίες έχουν επενδύσει στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής είναι η BMW, η οποία έχει εγκαταστάσεις παραγωγής στο Μόναχο και παράγει πάνω από 100000 εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής κάθε χρόνο. Η VOLKSWAGEN επίσης εξετάζει την παραγωγή πάνω από 100000 εξαρτημάτων προσθετικής κατασκευής ετησίως. (futurebridge, 2019)

#### **2.4 Βήματα της AM Διεργασίας**

Τα βήματα για να δημιουργηθεί ένα τελικό προϊόν από ένα τρισδιάστατο μοντέλο CAD είναι αρκετά ενώ ο βαθμός διεργασίας του καθενός είναι άμεση συνάρτηση του εκάστοτε τελικού προϊόντος που θα δημιουργηθεί. Στα μοντέλα που είναι μικρά σε μέγεθος συνήθως η AM έχει τον χαρακτήρα της απεικόνισης των εξωτερικών διαστάσεων τους, ενώ σε μεγαλύτερες και πιο πολύπλοκες κατασκευές η AM μπορεί να φέρνει τον χαρακτήρα της επαναληπτικής δοκιμής σχεδιασμού. Επίσης να αναφερθεί ότι η AM μπορεί να χρησιμοποιηθεί, λόγω της ταχύτητας που προσφέρει στα αρχικά στάδια κατασκευής, και σε μεταγενέστερα βήματα καθώς μπορεί να διαχειριστεί πολύπλοκες μορφές χωρίς να χρειάζονται επιπλέον ειδικά εργαλεία διαμόρφωσης. Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά ξεχωριστά στα βασικά βήματα της AM τεχνολογίας. (Ian Gibson, 2017)



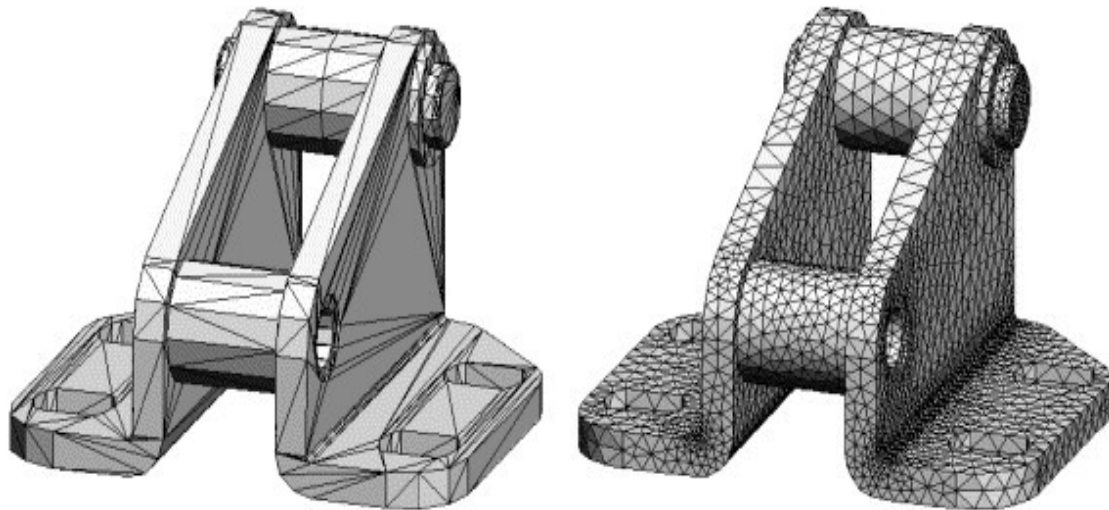
Εικόνα 4 Βήματα της AM Διεργασίας (Ian Gibson, 2017)

Βήμα 1<sup>ο</sup> : Computer -Aided – Design (CAD).

Ως βασική προϋπόθεση για την λειτουργία της τεχνολογίας AM είναι να μοντελοποιηθεί η αρχική γεωμετρία του τεμαχίου που θα τεθεί προς κατασκευή. Αρχικά πρέπει να είναι σε τρισδιάστατη απεικόνιση σε λογισμικό τύπου CAD, να σημειωθεί επίσης ότι υπάρχει η δυνατότητα μοντελοποίησης και από συστήματα αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης (reverse engineering). (Ian Gibson, 2017)

Βήμα 2<sup>ο</sup> : Η μετατροπή του CAD μοντέλου σε αρχείο STL.

Τα συστήματα AM «διαβάζουν» τα δεδομένα του CAD αρχείου από την εξαγωγή του σε αρχείο STL. Η STL μορφή αναγράφει την εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου και αποτελεί την αρχική συνιστώσα για τον υπολογισμό των στρώσεων που θα πραγματοποιηθούν. (Ian Gibson, 2017)



*Εικόνα 5 Στην εικόνα παρουσιάζεται στο αριστερό σκέλος η μορφή ενός STL αρχείου ενώ στο δεξιό σκέλος ένα διαβαθμισμένο πλέγμα που χρησιμεύει για υπολογιστικές αναλύσεις αντοχών. (D.Rypl, 2006)*

Βήμα 3<sup>ο</sup> : Εισαγωγή στην AM μηχανή και ρύθμιση του αρχείου STL.

Αφού γίνει η εξαγωγή του CAD αρχείου σε STL, θα πρέπει να γίνει η μεταφορά του στην μηχανή AM και να ρυθμιστεί το επιθυμητό μέγεθος του μοντέλου, καθώς και η θέση εκτύπωσης. (Ian Gibson, 2017)

Βήμα 4<sup>ο</sup> : Προετοιμασία της AM μηχανής.

Οι AM μηχανές πρέπει να προετοιμαστούν καταλληλά για την εκτύπωση των προϊόντων. Η προετοιμασία του εξοπλισμού είναι ανάλογη του είδους της AM μηχανής. Κοινές συνιστώσες προετοιμασίας είναι το υλικό κατασκευής, το μέγεθος, το ύψος των στρώσεων και οι διαφοροποιήσεις στις ταχύτητες εκτύπωσης. (Ian Gibson, 2017)

Βήμα 5<sup>ο</sup> Εκτύπωση

Η εκτύπωση αποτελεί κυρίως μια αυτόματη διαδικασία, η οποία μπορεί να χρειαστεί μια μερική επίβλεψη, προς αποφυγήν κάποιου λάθους στην τροφοδοσία της μηχανής με το υλικό εκτύπωσης, στη παροχή ρεύματος του εξοπλισμού ή για κάποιο πρόβλημα στο λογισμικό. (Ian Gibson, 2017)

Βήμα 6<sup>ο</sup> : Εξαγωγή κομματιού από την AM μηχανή ( Απομάκρυνση)

Όταν ολοκληρωθεί η εκτύπωση του προϊόντος, το τεμάχιο πρέπει να απομακρυνθεί από την AM μονάδα. Αυτό προαπαιτεί ανθρώπινη ενέργεια, η οποία πρέπει να γίνεται με ασφάλεια. Για παράδειγμα οι θερμοκρασίες να είναι σε φυσιολογικά επίπεδα και να μην υπάρχουν κινούμενα εξαρτήματα. (Ian Gibson, 2017)

#### Βήμα 7<sup>ο</sup> : Μετεπεξεργασία

Ανάλογα το είδος της AM μηχανής και το αποτέλεσμα που πρέπει να επιτευχθεί, το προϊόν της εκτύπωσης μπορεί να χρειαστεί επιπλέον επεξεργασία. Για παράδειγμα τον καθαρισμό του προϊόντος ή την αφαίρεση στηριγμάτων ή και την περεταίρω ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του. Αυτές οι μετεπεξεργασίες πρέπει να γίνονται από το αντίστοιχο έμπειρο προσωπικό. (Ian Gibson, 2017)

#### Βήμα 8<sup>ο</sup> : Εφαρμογή

Η εφαρμογή των προϊόντων ανάλογα τον προορισμό και την χρήση τους είναι πιθανόν να είναι σε θέση λειτουργίας. Βέβαια να σημειωθεί ότι τα παραγόμενα τεμάχια μπορεί να χρειαστούν επιπλέον μικροεπεξεργασία, όπως φινιρίσμα για βελτίωση της επιφάνειας ή αστάρωμα και βαφή. Τα προϊόντα μπορεί να αποτελούν κομμάτια από συναρμολόγημα, οπότε μπορεί να χρειαστεί συναρμολόγηση για την δημιουργία του τελικού προϊόντος. Να αναφερθεί ότι οι συγκεκριμένες μηχανές αυτής της τεχνολογίας (AM) χρειάζονται τακτική συντήρηση καθώς αποτελούνται για παράδειγμα από laser ακριβείας. Επίσης ο χώρος εργασίας πρέπει να λειτουργεί χωρίς ρύπους και με χαμηλές εντάσεις θορύβων, αν και αυτές οι μηχανές έχουν κατασκευαστεί και μελετηθεί έτσι ώστε να λειτουργούν αυτόματα με μερική επίβλεψη. Για την σωστή λειτουργία τους θα πρέπει να γίνεται η αντίστοιχη συντήρηση, η οποία είναι διαφορετική ανάλογα με το είδος του AM εξοπλισμού. Να αναφερθεί επίσης ότι δεν υπάρχει πληθώρα διεθνών προτύπων, που να έχουν σχεδιαστεί και να λειτουργούν για τις AM τεχνολογίες, για αυτόν τον λόγο παρατηρείται αυξημένη προσοχή από την τεχνική επιτροπή F42 (που ανήκει στην ASTM) για τις τεχνολογίες AM. Η επιτροπή έχει ως σκοπό να λύσει το πρόβλημα της απουσίας των AM τεχνολογιών από τα διεθνής πρότυπα. Οι κατασκευαστές των μηχανών AM προτρέπουν τους αγοραστές, βάση καθορισμένων χρονικών διαστημάτων, να κάνουν τις αντίστοιχες συντηρήσεις ώστε τα μηχανήματα να είναι λειτουργικά σε βάθος χρόνου. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι και αυτός ένας

παράγοντας, στον οποίο πρέπει να δοθεί προσοχή στο κομμάτι της συντήρησης, καθώς υπάρχουν οι περιορισμοί στην λήξη λειτουργίας του υλικού ή και στις συνθήκες που πρέπει να αποθηκεύεται, για να μην πραγματοποιηθούν χημικές ανεπιθύμητες αντιδράσεις, στην αποφυγή των περιοχών που υφίσταται υγρασία, καθώς και στην έκθεση του υλικού σε ρύπους. Το υλικό το οποίο δεν θα στερεοποιηθεί και θα <<περισσέψει >> μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του μπορεί να υποβαθμίσει τις τελικές ιδιότητες του παραγομένου προϊόντος, για αυτό το λόγο συνιστάται η διαδικασία να είναι καθορισμένη ώστε να υπάρχουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. (Ian Gibson, 2017)

## 2.5 Ορολογία για τεχνολογίες AM

Προσθετική κατασκευή

Ο ορός αναφέρεται έτσι γιατί έχουμε προσθετικό υλικό το οποίο εφαρμόζεται σε μορφή επαναλαμβανομένης στρώσης. Αυτός ο ορός αποτελεί έναν αρκετά ικανοποιητικό προσδιορισμό της τεχνολογίας που αναφέρεται. (Ian Gibson, 2017)

Αυτοματοποιημένη κατασκευή (Autofab – Automated Fabrication)

Ο Marshall Burns δημιούργησε αυτόν τον ορό χάρις το ομότιτλο βιβλίο το οποίο δημοσίευσε στις αρχές της δεκαετίας του 90. Το βιβλίο προάγει και εξηγεί την αυτοματοποίηση της δημιουργίας προϊόντων και κατά συνέπεια την διευκόλυνση της κατεργασίας, όπως επίσης της ελαχιστοποίησης της παρέμβασης του ανθρώπου. Στόχος είναι η παρακολούθηση των δεδομένων της διεργασίας από το υπολογιστικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από υπολογιστές και μικροελεγκτές όπως και ο αντίστοιχος έλεγχος των ενεργοποιητών. Αυτός ο ορός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κατεργασίες οι οποίες είναι αφαιρετικού χαρακτήρα, καθώς δεν αναφέρει τον τρόπο αφαίρεσης ή εφαρμογής του υλικού, όπως ούτε τα βασικά βήματα τα οποία αναφέρονται στην AM τεχνολογία. Να αναφερθεί ότι στο βιβλίο του Marshall αναφέρονται οι έως τότε τεχνολογίες AM. (Ian Gibson, 2017)

Κατασκευή ελεύθερης μορφής στερεού (Solid Freeform Fabrication)



Ο όρος αυτός αναφέρεται στην δυνατότητα των AM τεχνολογιών στο να δημιουργούν αντικείμενα με πολύπλοκες εξωτερικές μορφές. Φράσεις οι οποίες υποδηλώνουν την συγκριτική ευκολία της AM τεχνολογίας σε σύγκριση με τις αφαιρετικές τεχνολογίες στο πεδίο της κατασκευής πολύπλοκων μορφών είναι το <<complexity for free>> το οποίο αναφέρεται στο γεγονός ότι δεν έχουμε σχετική συγκριτική αύξηση του κόστους παραγωγής με την αύξηση της πολυπλοκότητας των προϊόντων όπως συμβαίνει στις αφαιρετικές τεχνολογίες. Επίσης ο χρόνος που απαιτείται δεν αυξάνεται με την γεωμετρική πολυμορφία των τρισδιάστατων μοντέλων. Εν κατακλείδι ο όρος ελεύθερης μορφής δηλώνει την μη εξάρτηση του κατασκευαστικού μέρους με την τρισδιάστατη μορφή του μοντέλου. (Ian Gibson, 2017)

#### Στρωματική κατασκευή (Layer – Based – Manufacturing)

Αυτός ο όρος υποδηλώνει τον τρόπο δομής της κατασκευαστικής μεθόδου AM. Η κατασκευή των τεμαχίων πραγματοποιείται διαστρωματικά με προσθήκη υλικού. Η διαδικασία είναι αντίθετη σε σχέση με τις αφαιρετικές κατεργασίες όπου εκεί πραγματοποιείται μείωση της μάζας του αρχικού υλικού που είναι προς επεξεργασία. Στη σημερινή εποχή οι διαθέσιμες τεχνολογίες που βρίσκονται στην αγορά λειτουργούν με την διαστρωματική μέθοδο, αλλά να σημειωθεί ότι αυτό δεν αποτελεί προϋπόθεση για να θεωρηθεί μια τεχνολογία AM καθώς στο μέλλον μπορεί να εμφανιστεί προσθετική μέθοδος που δεν θα λειτουργεί διαστρωματικά. (Ian Gibson, 2017)

#### Στερεολιθογραφία (Stereolithography)

Οι πρώτες χρήσεις αυτού του ορού χρησιμοποιήθηκαν ώστε να υποδείξουν τις αντίστοιχες εξειδικευμένες μηχανές. Αυτός ο όρος (Στερεολιθογραφία) έχει δημιουργηθεί από την 3D Systems και η ονομασία της 3D εκτύπωσης έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται από το επιστημονικό προσωπικό στο MIT, αυτός ο όρος που περιγράφει την τεχνολογία, έχει κοινές βασικές αρχές με την τεχνολογία της ink-jet εκτύπωσης, αυτοί οι τεχνολογικοί οροί προσδιορίζονται από δυσδιάστατες εργασίες εκτύπωσης, όπως αντίστοιχα και λιθογραφίας, οι οποίες αναπτύσσονται στην τρίτη διάσταση. Να αναφερθεί επίσης ότι ο όρος που

χρησιμοποιείται περισσότερο, όταν υπάρχει αναφορά στην τεχνολογία AM είναι της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης. (Printing). (Ian Gibson, 2017)

Ταχεία πρωτοτυποποίηση (RP , Rapid Prototyping)

Αυτός ο όρος χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει την δυνατότητα της AM τεχνολογίας στο να δημιουργεί πρωτότυπα μοντέλα. Πριν χρησιμοποιηθούν οι τεχνολογίες AM στην δημιουργία πρωτοτύπων, η κατασκευή πρωτοτύπων ήταν πολύπλοκη, χρονοβόρα και κοστοβόρα. Η τεχνολογία Rapid Prototyping μείωσε τους χρόνους κατασκευής των πρωτοτύπων. Στην σημερινή εποχή δεν χρησιμοποιείται αυτός ο ορός καθώς οι τεχνολογίες AM δεν περιορίζονται μόνο στα πεδία κατασκευών των πρωτοτύπων μοντέλων. Καθώς η αναβάθμιση τους στην ακρίβεια και στις μηχανικές ιδιότητες κανουν τις χρήσεις τους να αποτελούν πλέον λύσεις ευρείας χρήσεως. (Ian Gibson, 2017)

## 2.6 Προσθετικές και αφαιρετικές κατεργασίες

Το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι και οι δυο κατεργασίες είναι ελεγχόμενες και καθοδηγούμενες από ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

### 2.6.1 Διαφοροποιήσεις υλικού

Στις διεργασίες AM τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά είναι τα πολυμερή, κάποια είδη κεριών και είδη τύπων χαρτιών, όσο αναπτύχθηκε η τεχνολογία ακολουθήσαν υλικά όπως τα κεραμικά , τα σύνθετα και πρόσφατος τα μεταλλικά.

Οι μηχανές αφαιρετικού χαρακτήρα μπορούν να κατεργαστούν μαλακά υλικά για παράδειγμα το (MDF - medium density fiberboard), όπως ακόμα και αφρώδη υλικά , πολυμερή και κεριά. Όμως οι αφαιρετικές μηχανές όσο αναφορά τα μαλακά υλικά λειτουργούν κατά κύριο λόγο μόνο σε κατεργασίες προετοιμασίας μοντέλων που έχουν συνήθως πολλά βήματα. Αν οι αφαιρετικές μηχανές χρησιμοποιηθούν για δημιουργία τελικών τεμαχίων με χρήση σκληρών η και ψαθυρών υλικών τότε παρουσιάζουν πολύ καλές ποιότητες και λεπτομέρειες. Επίσης έχουν επιθυμητές καθορισμένες μηχανικές ιδιότητες και πολύ καλή γεωμετρική ακρίβεια, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως είναι χάλυβες η και πολλά κράματα μετάλλων. Σε αντίθεση, στις μηχανές προσθέτων διεργασιών (AM) υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστούν εσωτερικοί πόροι η και ανισορροπία , διάφορες οι οποίες οφείλονται



στον γεωμετρικό προσανατολισμό της εκτύπωσης η που έχουν συσχέτιση με τους παραμέτρους εκτύπωσης η την εισαγωγή των δεδομένων. (Ian Gibson, 2017)

### 2.6.2 Ταχύτητα

Οι κατεργασίες οι οποίες γίνονται με χρήση αφαιρετικών τεχνολογιών έχουν το χαρακτηριστικό της γρήγορης αφαίρεσης υλικού. Μια αφαιρετική κατεργασία μπορεί να αφαιρέσει υλικό πιο γρηγορά σε σχέση με την αντίστοιχη ποσότητα υλικού που μπορεί να εφαρμόσει με πρόσθεση υλικού μια διεργασία τύπου AM. Να σημειωθεί όμως ότι η προσθετική κατασκευή είναι μιας φάσης διεργασία, σε αντίθεση με τις αφαιρετικές κατεργασίες οι οποίες αποτελούνται από περισσότερες φάσεις, ειδικότερα όταν το προϊόν κατεργασίας έχει πολύπλοκη εξωτερική μορφή. Για να κατασκευαστεί ένα τελικό προϊόν με αφαιρετικές μεθόδους είναι πιθανών να χρειαστούν πολλά βήματα, επίσης μπορεί να χρειαστούν αλλαγές στα επιμέρους εξαρτήματα της μηχανής ή αλλαγή θέσης του τεμαχίου διαφοροποιήσεις οι οποίες αυξάνουν τον χρόνο παραγωγής τεμαχίων (Ian Gibson, 2017)

### 2.6.3 Πολυπλοκότητα

Στα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής είχε αναφερθεί ότι η δυσκολία κατασκευής τεμαχίων δεν αποτελεί άμεση συνάρτηση της πολυπλοκότητας των ιδίων. Στις αφαιρετικές κατασκευαστικές μεθόδους, η παραγωγή ενός τεμαχίου με τα τελικά γεωμετρικά στοιχεία του με μόνο μια φάση κατεργασίας είναι υπερβολικά δύσκολη ή και αδύνατη αν το τεμάχιο προς κατεργασία είναι πολύπλοκο. Ένα παράδειγμα αποτελεί η θέση του κοπτικού εργαλείου της μηχανής καθώς μπορεί να μην γίνεται η πρόσβαση το σημείο κοπής και έτσι να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί σωστά η κατεργασία. Αυτού του είδους οι δυσκολίες δεν υπάρχουν στις διεργασίες προσθετικών κατασκευών καθώς πολύπλοκα εσωτερικά χαρακτηριστικά και σημεία που είναι δύσκολα σε πρόσβαση από άλλες κατεργασίες μπορούν ευκολά να εκτυπωθούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν τεμάχια τα οποία δεν μπορούν να κατασκευαστούν ολόκληρα, με κατεργασίες αφαιρετικού χαρακτήρα και για αυτό τον περιορισμό κατασκευάζονται μεμονωμένα και στην συνέχεια πραγματοποιείτε η συναρμολόγηση τους. (Ian Gibson, 2017)

#### 2.6.4 Ακρίβεια

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής μπορούν να πέτυχουν (ανάλογα το είδος της AM) ακρίβεια της τάξεως των μερικών δεκάδων μικρών. Να σημειωθεί ότι η ακρίβεια που επιτυγχάνουν είναι κατά κανόνα διαφορετική ανάλογα τον άξονα επεξεργασίας, δηλαδή οι άξονες προσδιορισμού επιπέδου (X,Y) παρουσιάζουν καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τον κάθετο άξονα (Z) ο οποίος περιλαμβάνει το ύψος των στρώσεων. Η ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται από τον τρόπο που έχουν τοποθετηθεί οι μηχανισμοί οι οποίοι αποτελούνται κύριος από μικροκινητήρες και από διατάξεις ελέγχου όπως και μειώτρες στροφών. Να αναφερθεί ότι ανάλογα με την τεχνολογία AM, οι κεφάλες εξώθησης όπως και η διάμετρος του laser είναι πεπερασμένου μεγέθους, ο συνδυασμός των παραπάνω μηχανισμών καθορίζουν και την τελική μέγιστη ακρίβεια κατασκευής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στα συστήματα αφαιρετικής κατεργασίας η ακρίβεια επιτυγχάνεται και από την διάμετρο των κοπτικών εργαλείων, τις γωνίες προσβολής του κοπτικού, την τοποθέτηση του και από τα χαρακτηριστικά των κινητήρων που κάνουν τις μετατοπίσεις στους άξονες κατεργασίας. (Ian Gibson, 2017)

#### 2.6.5 Γεωμετρία

Η τεχνολογία AM λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μετατρέψει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο το οποίο είναι πιο σύνθετο ως πρόβλημα σε ένα απλούστερο δυο διαστάσεων το οποίο με την χρήση της διαστρωματικής μεθόδου. Με τα αντίστοιχα επαναλαμβανόμενα ύψη του κάθε στρώματος στον κάθετο άξονα (Z) επιτυγχάνει να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο χωρίς να υπάρχει η εξαρχής πολυπλοκότητα των τρισδιάστατων συνδέσεων. Στις κατεργασίες αφαιρετικού χαρακτήρα το σύστημα διεύθυνσης του κοπτικού λειτουργεί με χρήση δυο σημείων αρχή και τέλους, τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και με τον προσανατολισμό του εξαρτήματος αφαίρεσης υλικού να είναι σταθερός, στις ελεύθερες επιφάνειες αν υπάρχουν αλλαγές στο προσανατολισμό του αφαιρετικού εξαρτήματος, είναι δυσκολότερο να κατασκευαστούν από μια αφαιρετική μηχανή ακόμα και αν είναι πολυαξονική, τέτοιες επιφάνειες μπορεί να είναι για παράδειγμα εσωτερικά γεωμετρικά

χαρακτηριστικά τα οποία απαιτούν ειδικές φάσεις επεξεργασίας για να δημιουργηθούν. (Ian Gibson, 2017)



*Εικόνα 6 Σημεία που κατά την αφαιρετική κατεργασία θα υπήρχε αδυναμία κοπής. (Ian Gibson, 2017)*

### 2.6.6 Προγραμματισμός

Η διαδικασία του προγραμματισμού μιας αφαιρετικής μηχανής είναι μια διαδικασία πιο δυσεπίλυτη σε σύγκριση με την διαδικασία προγραμματισμού μιας μηχανής προσθετικών κατασκευών καθώς απαιτεί την επιλογή σωστής ταχύτητας των κοπτικών εξαρτημάτων, την επιλογή των κοπτικών, τις συντεταγμένες του κοπτικού και την γωνιά προσβολής του εξαρτήματος. Οι μηχανές προσθετικών κατασκευών έχουν κατά κανόνα διαφοροποιήσεις παραμέτρων της εκτύπωσης, οι οποίες πρέπει να επιλεχτούν από τον χειρίστη του μηχανήματος. Ως διαδικασία αποτελούν ευκολότερες από τον αντίστοιχο προγραμματισμό μιας αφαιρετικής μηχανής, σε περίπτωση σφάλματος προγραμματισμού από τον χειριστή μια AM μηχανή θα έχει ως αποτέλεσμα ένα παραγόμενο κομμάτι με εσφαλμένα χαρακτηριστικά. Σε μια αφαιρετική μηχανή που έχει προγραμματιστεί λάθος ο κίνδυνος ανθρωπίνου ατυχήματος ή καταστροφής του μηχανήματος είναι αυξημένος. (Ian Gibson, 2017)

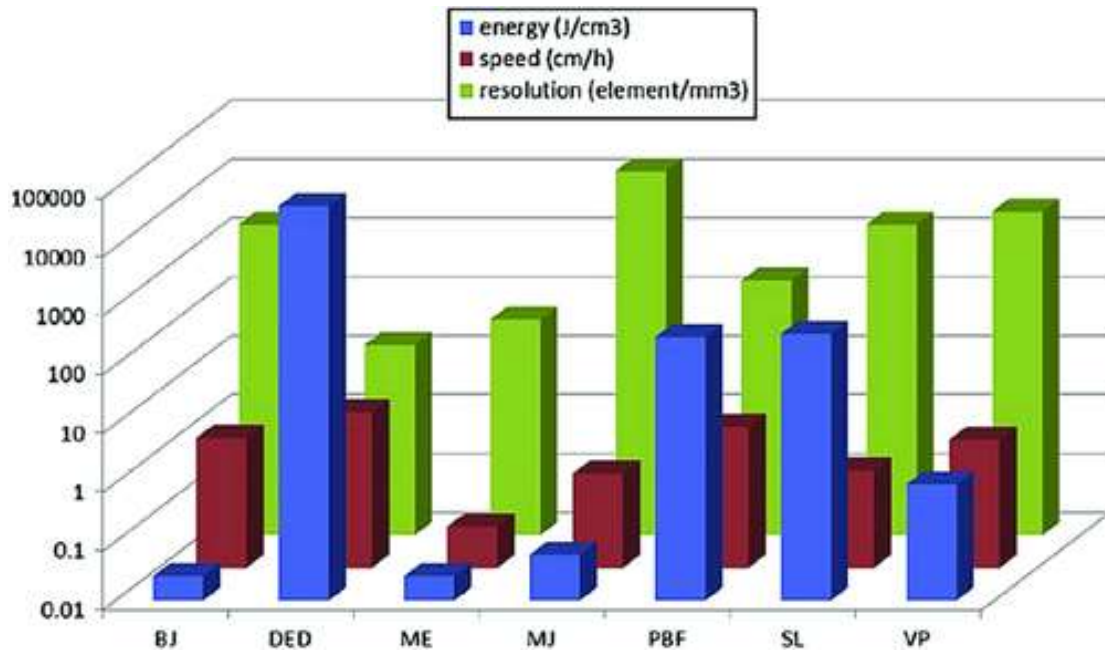
## 2.7 Τεχνολογίες AM

Τα είδη των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής που υπάρχουν στο εμπόριο διαφέρουν μεταξύ τους. Αρχικά όσο αναφορά το πάχος των στρώσεων. Αξίζει να αναφερθεί ότι ξεχωρίζουν από τον γενικό εμπειρικό κανόνα που δίνει πάχος (0,1 mm). Για να υπάρξει ένα μετρό σύγκρισης της απόκλισης από την γενική τιμή πάχους, ας αναφερθεί το παράδειγμα ορισμένων μηχανών τύπου FDM των οποίων το πάχος των στρώσεων τους είναι (0,254mm). Αντίστοιχα για τις τεχνολογίες φωτοπολυμερισμού είναι σύνηθες οι τιμές πάχους στρώσεων (0,5—1) mm, όταν υπάρχει ανάγκη για έμφαση στην λεπτομέρεια, με χρήση τεχνολογιών εναπόθεσης υλικού για δημιουργία τεμαχίων χύτευσης, χρησιμοποιούνται στρώσεις με πάχος 0,01mm. Μια λειτουργία που υπάρχει σε μερικές από αυτές τις τεχνολογίες είναι η δυνατότητα μεταβολής του πάχους των στρώσεων, αυτό γίνεται για να βελτιωθεί η ταχύτητα εκτύπωσης καθώς με μεγαλύτερο πάχος ανά στρώση υφίσταται βελτίωση του χρόνου κατασκευής, αλλά το προϊόν θα υστερεί σε ανάλυση ακρίβειας. (Ian Gibson, 2017)

| Additive Manufacturing (AM) Processes |                          |        |                      |             |                   |                  |                   |               |  |  |
|---------------------------------------|--------------------------|--------|----------------------|-------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------|--|--|
| Process                               | Laser Based AM Processes |        |                      |             | Extrusion Thermal | Material Jetting | Material Adhesion | Electron Beam |  |  |
|                                       | Laser Melting            |        | Laser Polymerization |             |                   |                  |                   |               |  |  |
| Process Schematic                     |                          |        |                      |             |                   |                  |                   |               |  |  |
| Name Material                         | SLS                      | DMD    | SLA                  | FDM         | 3DP               | LOM              | EBM               |               |  |  |
|                                       | SLM                      | LENS   | SGC                  | Robocasting | IJP               | SFP              |                   |               |  |  |
|                                       | DMLS                     | SLC    | LTP                  |             |                   |                  | MJM               |               |  |  |
|                                       |                          | LPD    | BIS                  |             |                   |                  | BPM               |               |  |  |
|                                       |                          |        | HIS                  |             |                   |                  | Thermojet         |               |  |  |
| Bulk Material Type                    |                          | Powder | Liquid               | Solid       |                   |                  |                   |               |  |  |

*Εικόνα 7 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η κατανομή των διεργασιών προσθετικής κατανομής ανάλογα την τεχνολογία στην οποία βασίζονται και στο είδος του υλικού που χρησιμοποιείται (Sunpreet Singh, 2017)*

Η ανάλυση και η κατανάλωση ενέργειας που μπορούν να πέτυχουν οι τεχνολογίες AM διαφέρουν, στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι διάφορες τους σε αυτά τα πεδία. (Syed A.M.Tofail, 2018)



*Εικόνα 8 Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται οι τεχνολογίες AM συγκριτικά ανάλογα την ενέργεια που χρειάζονται την ταχύτητα της διεργασίας, και την ανάλυση που μπορούν να πέτυχουν. (Syed A.M.Tofail, 2018)*

Οι διεργασίες προσθετικών κατασκευών διαφέρουν επίσης ανάλογα και με το είδος υλικού που χρησιμοποιούν. Το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιούν για να επεξεργαστούν το υλικό, καθώς και με τα διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που τις διακατέχουν. (Ian Gibson, 2017)

AM τεχνολογίες που χρησιμοποιούν φωτοπολυμερή

Η διαδικασία προετοιμασίας κατασκευής στα συστήματα φωτοπολυμερισμού είναι συγκριτικά εύκολη διαδικασία. Τα συστήματα δημιουργούν αρχεία με σκοπό την κατασκευή στηριγμάτων, με χρήση του ίδιου υλικού με αυτό της εκτύπωσης. Σε αντίθεση με τα συστήματα εναπόθεσης τα οποία έχουν την δυνατότητα να κατασκευάσουν και από άλλο υλικό τις απαιτούμενες στηρίξεις με την εφαρμογή ενός ακόμα ink- jet εξαρτήματος. Τα συστήματα τα οποία βασίζονται στον

φωτοπολυμερισμο μπορούν να επιτύχουν καλές ακρίβειες. Έχουν βελτιωθεί με την πάροδο των ετών καθώς στο παρελθόν παρουσίαζαν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Στην παρούσα εποχή οι ρητίνες νέας τεχνολογίας έχουν αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά με την προϋπόθεση ότι πρέπει να πραγματοποιηθεί η UV επικάλυψη ώστε να έχει καλύτερες ιδιότητες το παραγόμενο τεμάχιο. (Ian Gibson, 2017)

AM τεχνολογίες που βασίζονται στο υλικό της πούδρας

Η ύπαρξη στηριγμάτων σε αυτού του είδους προσθετικής τεχνολογίας, δεν είναι απαραίτητη (εκτός από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν μεταλλικά υλικά), η πούδρα προσθέτετε με επαναλαμβανομένη διαστρωματική μέθοδο (σε μορφή τύπου κλίνης). Το προϊόν κατασκευής μπορεί να είναι και έγχρωμο αλλά ως αντίκτυπο η διαδικασία κωδικοποίησης είναι πιο χρονοβόρα, καθώς εμπεριέχει και δεδομένα για το χρωματισμό. Αξίζει να αναφερθεί ότι χρωματικά προϊόντα μπορούν να κατασκευαστούν και με πρότυπα όπως το VRML και όχι μόνο ως AFM. Στην τεχνολογία που χρησιμοποιείτε σύντηξη της πούδρας σε κλίνη, μετά από κάθε εκτύπωση υπάρχει υλικό το οποίο πλεονάζει αυτό το υλικό μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί αλλά επειδή έχει υποστεί θερμική καταπόνηση πρέπει να γίνει με χρήση αναλυτικής προσέγγισης, με χρήση μεθοδολογίας ανακύκλωσης καθώς η θερμική καταπόνηση έχει αλλοιώσει τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Τέτοιου είδους μηχανήματα συνήθως χρησιμοποιούν θαλάμους οι οποίοι τροφοδοτούν το υλικό εκτύπωσης (πούδρα) σε ένα από τα δυο μέρη της πλατφόρμας της μηχανής. Το πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί είναι ότι η πυκνότητα της πούδρας στο πάνω μέρος είναι μικρότερη από τα χαμηλά σημεία του θαλάμου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό οφείλεται στην συμπίεση που επιδέχονται τα χαμηλότερα στρωματά της πούδρας εξαιτίας της μάζας του ίδιου υλικού που βρίσκεται στα άνω μέρη του θαλάμου. Ως αποτέλεσμα παρουσιάζεται διαφοροποίηση της ποσότητας πούδρας που αντιστοιχεί σε κάθε στρώση, αρά της πυκνότητας που κατά συνέπεια τις αλλάζει τις προβλεπόμενες ιδιότητες του τελικού προϊόντος, η λύση αυτού του προβλήματος μπορεί να επιτευχθεί με την σωστή συμπίεση του υλικού στους αντίστοιχους θαλάμους πριν την έναρξη της διεργασίας καθώς επίσης

με την σωστή θερμοκρασία και της αντίστοιχης τροφοδοσίας υλικού εκτύπωσης. (Ian Gibson, 2017)

AM τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τηγμένο υλικό τροφοδοσίας

Σε αυτές τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής η χρήση στηριγμάτων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για λειτουργία τους καθώς το υλικό είναι σε υγρή μορφή, τα στηρίγματα αυτής της τεχνολογίας δημιουργούνται αυτόματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα συστήματα εξώθησης ή καθοδηγούμενης δέσμης προσφέρουν στον χρήστη επιλογές για το πως και που θα εφαρμοστούν οι στηρίξεις, οι οποίες όταν είναι από υλικό το οποίο διαλύεται με την χρήση νερού δεν αποτελεί ζήτημα το που θα εφαρμοστούν. Αντίθετος αν οι στηρίξεις είναι από το ίδιο υλικό με το προϊόν προς κατασκευή τότε πρέπει να αφαιρεθούν με τη θραύση τους, ως συνέπεια θα δημιουργήσουν ατέλειες στα σημεία επαφής των στηρίξεων με το κομμάτι της κατασκευής, για αυτό τον λόγο ενδείκνυται να εκλεχθεί η θέση τους αρχικά από τον χρήστη της μηχανής. Τα μοτίβα συμπλήρωσης που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες εξώθησης μπορούν να επηρεαστούν με σκοπό τη επίτευξη βέλτιστου αποτελέσματος. Για παράδειγμα αν υπάρχει στόχος η μείωση των κενών στο εσωτερικό τους, μπορεί να επιλεχθεί να εξωθείται περισσότερο υλικό στην συγκεκριμένη περιοχή με αποτέλεσμα την μείωση των εσωτερικών κενών αλλά σε αντίκτυπο μειώνεται και η ακρίβεια. Η χρήση κέρινων υλικών σε κατασκευή με τεχνολογία εναπόθεσης υλικού μπορεί να δημιουργήσει και να αναδείξει πολύ αναλυτικά τα γεωμετρικά στοιχεία του τεμαχίου. Αλλά δεν παρουσιάζουν καλές αντοχές και σε συνδυασμό με την ψαθυρότητα τους τα καθιστούν μη διαχειρίσιμα. Σε αντίθεση με τα τεμάχια που έχουν κατασκευαστεί με το υλικό τύπου ABS με εφαρμογή της τεχνολογίας εξώθησης καθώς εμφανίζουν πολύ υψηλή αντοχή, αλλά ενδείκνυται η εφαρμογή φινιρίσματος ώστε για να χρησιμοποιηθεί σε τελική λειτουργική χρήση καθώς η ακρίβεια τους είναι σε χαμηλότερα επίπεδα. (Ian Gibson, 2017)

AM τεχνολογίες που χρησιμοποιούν φύλλα στερεού υλικού

Σε αυτήν την τεχνολογία δεν χρειάζονται στηρίξεις. Καθώς οι στρώσεις φύλλων εφαρμόζονται και μετά τεμαχίζονται, το υλικό το οποίο θα αφαιρεθεί πρέπει να έχει κοπεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση του από το τεμάχιο, η



διαδικασία θέλει προσήλωση στα σημεία που χρειάζεται έμφαση στην λεπτομέρεια, Η διαδικασία του καθαρισμού από το υλικό που περισσεύει πρέπει να πραγματοποιηθεί με προσοχή στις διαστάσεις του τελικού προϊόντος με σκοπό την αποφυγή του τραυματισμού του τεμαχίου. Όταν το υλικό κατασκευής είναι τύπου χαρτιού για να αποφευχθούν τυχών προβλήματα πρέπει να γίνει φινίρισμα, επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σφραγιστικά είδη υλικών, χρήση επικαλύψεων ή και στόκος και βερνίκι ξύλου. Η χρήση φύλλων υλικού τύπου πολυμερούς καθιστά το τελικό τεμάχιο πιο ανθεκτικό σε σχέση με την χρήση χαρτιού, επίσης μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία με φύλλα μετάλλου στα οποία η σύνδεση τους γίνεται αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι απαραίτητες κοπές και έτσι δεν υπάρχει η ανάγκη αφαίρεσης υλικού.

| CATEGORIES                 | TECHNOLOGIES  | PRINTED "INK"   | POWER SOURCE                 | STRENGTHS / DOWNSIDES  |
|----------------------------|---|---|------------------------------|--|
| Material Extrusion         | Fused Deposition Modeling (FDM)                                   | Thermoplastics, Ceramic slurries, Metal pastes  | Thermal Energy               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Inexpensive extrusion machine</li> <li>Multi-material printing</li> <li>Limited part resolution</li> <li>Poor surface finish</li> </ul>   |
|                            | Contour Crafting  |   |                              |  |
| Powder Bed Fusion          | Selective Laser Sintering (SLS)                                   | Polyamides /Polymer   | High-powered Laser Beam      | <ul style="list-style-type: none"> <li>High Accuracy and Details</li> <li>Fully dense parts</li> <li>High specific strength &amp; stiffness</li> <li>Powder handling &amp; recycling</li> <li>Support and anchor structure</li> <li>Fully dense parts</li> <li>High specific strength and stiffness</li> </ul> |
|                            | Direct Metal Laser Sintering (DMLS)                               |   |                              |  |
|                            | Selective Laser Melting (SLM)                                     | Atomized metal powder (17-4 PH stainless steel, cobalt chromium, titanium Ti6Al-4V), ceramic powder |                              |  |
|                            | Electron Beam Melting (EBM)                                       |   | Electron Beam                |  |
| Vat Photopolymerization    | Stereolithography (SLA)   | Photopolymer, Ceramics (alumina, zirconia, PZT)   | Ultraviolet Laser            | <ul style="list-style-type: none"> <li>High building speed</li> <li>Good part resolution</li> <li>Overcuring, scanned line shape</li> <li>High cost for supplies and materials</li> </ul>  |
| Material Jetting           | Polyjet / Inkjet Printing   | Photopolymer, Wax   | Thermal Energy / Photocuring | <ul style="list-style-type: none"> <li>Multi-material printing</li> <li>High surface finish</li> <li>Low-strength material</li> </ul>  |
| Binder Jetting             | Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)                             | Polymer Powder (Plaster, Resin), Ceramic powder, Metal powder                                       | Thermal Energy               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Full-color objects printing</li> <li>Require infiltration during post-processing</li> <li>Wide material selection</li> <li>High porosity on finished parts</li> </ul>   |
| Sheet Lamination           | Laminated Object Manufacturing (LOM)                              | Plastic Film, Metallic Sheet, Ceramic Tape  | Laser Beam                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>High surface finish</li> <li>Low material, machine, process cost</li> <li>Decubing issues</li> </ul>  |
| Directed Energy Deposition | Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electronic Beam Welding (EBW) | Molten metal powder   | Laser Beam                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Repair of damaged / worn parts</li> <li>Functionally graded material printing</li> <li>Require post-processing machine</li> </ul>   |

Εικόνα 9 Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι κατηγορίες των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής σε συνδυασμό με τα υλικά εκτύπωσης την πηγή ενέργειας και τα Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματά τους. (WeiGao, 2015)



## 2.8 Εξώθηση υλικού (material extrusion)

Τα συστήματα εξώθησης υλικών έχουν ως σκοπό την δημιουργία προϊόντων με χρήση ημιστερεού υλικού το οποίο εξωθείται από το ακροφύσιο σε συγκεκριμένες θέσεις. Το υλικό μετατρέπεται σε στερεό χωρίς να αλλάζει το σχήμα του και δημιουργεί στρώσεις οι οποίες είναι επαναλαμβανόμενες και συγκολλούνται η κάθε μια με την προηγούμενη της μέχρι δημιουργηθεί το προϊόν. Αυτές οι μηχανές είναι ρυθμισμένες έτσι ώστε σταματάει ή να ξεκινάει η παροχή υλικού, να υπάρχει δυνατότητα εκτύπωσης στο επίπεδο (X,Y) με καθετή αυξομείωση (Z) είτε του ακροφυσίου είτε της πλατφόρμας στερεοποίησης του τεμαχίου, ώστε να υπάρχει δυνατότητα εκτυπώσεις των στρώσεων υλικού. Οι τεχνολογίες εξώθησης χωρίζονται σε δυο είδη. Αρχικά η πιο διαδεδομένη, όπου το υλικό ελέγχεται με χρήση της θερμοκρασίας καθώς ρευστοποιείται σε έναν χώρο μέσα στο μηχάνημα και στην συνέχεια εξωθείται από το ακροφύσιο και σμίγει με την προηγούμενη στρώση. Ο δεύτερος τρόπος είναι με χρήση χημικής αλλαγής ώστε να πραγματοποιηθεί η στερεοποίηση με χρήση σκληρυντή (curing agent) και με χρήση διαλυτή. Η χρήση χημικής αντίδρασης γίνεται είτε με τον αέρα ή με ξήρανση του υλικού εκτύπωσης, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται στην βιομηχανία για εφαρμογές βιοσυμβατότητας. (Ian Gibson, 2017)

Όλες οι τεχνολογίες εξώθησης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα έχουν κάποια βασικά βήματα τα οποία είναι κοινά μεταξύ τους.

Εισαγωγή υλικού τροφοδοσίας (loading)

Τήξη του υλικού (liquification)

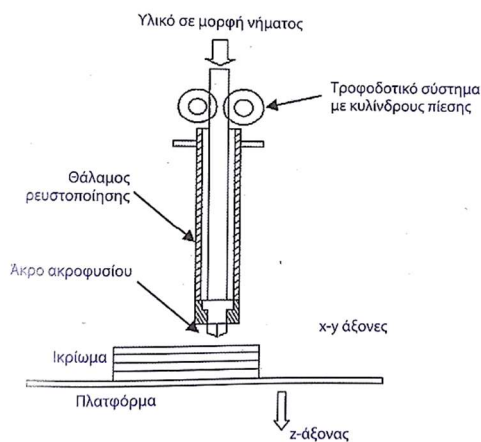
Πίεση για την μεταφορά του υλικού εσωτερικά του ακροφυσίου

Εξώθηση (extrusion)

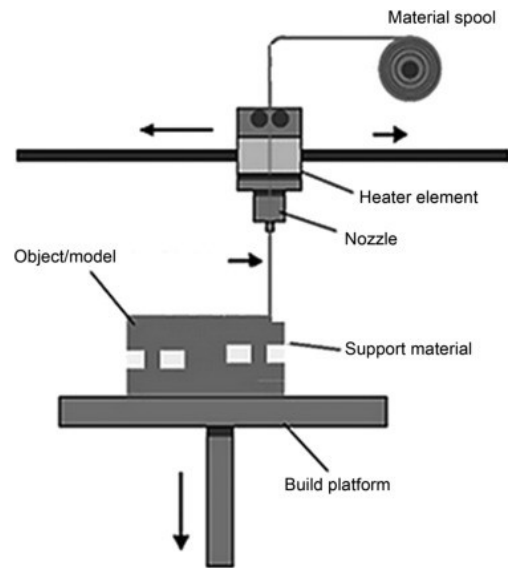
Σχεδιογράφηση στην διαδρομή που είναι προκαθορισμένη από το αντίστοιχο cad μοντέλο.(plotting)

Συγκόλληση (bonding) του υλικού τροφοδοσίας είτε στον ίδιο υλικό είτε σε κάποιο δευτερεύων, ώστε επιτευχθεί μια δομή (structure) ενός στερεού

Ενσωμάτωση (inclusion) στηρίγματα τα οποία χρησιμοποιούνται όταν η γεωμετρία του μοντέλου είναι περιπλοκή ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η εκτύπωση της (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 11 Παραπάνω απεικονίζεται σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας εξώθησης υλικού (Ian Gibson, 2017)



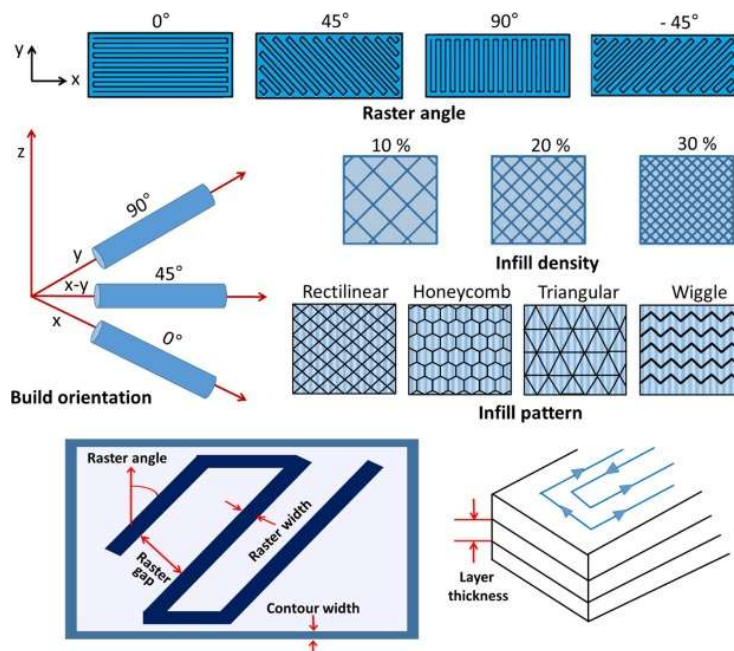
Εικόνα 10 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας εξώθησης υλικού (Rasheedat ModupeMahamood, 2021)

### 2.8.1 Μέθοδος FDM

Η μέθοδος FDM (Fused Deposition Modeling) είναι μια γνωστή τεχνολογία προσθετικής κατασκευής η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για κατασκευές εξαρτημάτων, διάφορων εργαλείων, σε κατασκευές για επίδειξη πρωτοτύπων, σε βιομηχανίες αυτοκίνητων. Η αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας οφείλεται στην δυνατότητα των (FDM) να δημιουργούν εξαρτήματα με πολύπλοκα μέρη να σημειωθεί ότι σε αυτήν τη μέθοδο υπάρχουν τα εξής αρνητικά. Έχει ανίσχυρες και ανισοτροπικές ιδιότητες επίσης αξίζει να σημειωθεί η σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων έχει καθοριστικό ρολό στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος εκτύπωσης. (ΧιαGao, 2020). Η εταιρεία που είναι κύριος υπεύθυνη για την

δημιουργία και την ανάπτυξη των FDM μηχανών είναι η Stratasys, ο ιδρυτής της εταιρείας είναι και ο κατοχυρωτής της τεχνολογίας. Η τεχνολογία FDM χρησιμοποιεί έναν θάλαμο ο οποίος αναπτύσσει υψηλή θερμοκρασία με σκοπό την υγροποίηση υλικού τύπου πολυμερούς που εισέρχεται στην μηχανή σε συνεχής μορφή υλικού σχήματος νήματος (filament). Το υλικό εισέρχεται στον θάλαμο της μηχανής από τρακτερωτούς τροφοδότες, η κίνηση που επιτυγχάνεται στο υλικό είναι και αυτή που θα δημιουργήσει την τελική πίεση εξώθησης. (Ian Gibson, 2017)

Να αναφερθεί ότι οι μηχανές τύπου FDM είναι οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής στον πλανήτη. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το πλήθος υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες πολυμερών υλικών και των τελικών τεμαχίων παραγωγής που έχουν κατασκευαστεί με προσθετικές μεθόδους. Ως μειονέκτημα αυτής της μεθόδου μπορεί να αναφερθεί η ταχύτητα η οποία γίνεται η διεργασία καθώς σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής έχουμε καθυστερήσεις λόγω αδράνειας των εξαρτημάτων τύπου κεφάλων σχεδιογράφησης. Η κίνηση του ακροφυσίου γίνεται σημειακά γεγονός που δημιουργεί πολλές αλλαγές στην κίνηση της κεφαλής με κατά συνέπεια την χρονική παράταση της εκτύπωσης (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 12 Διαδρομές εξώθησης υλικού τεχνολογίας FDM

(Vigneshwaran Shanmugam, 2021)

### 2.8.2 Υλικά FDM συστημάτων

Ως το πλέον διαδεδομένο υλικό είναι το ABSplus το οποίο έχει την δυνατότητα να εκτυπωθεί από όλες τις μηχανές FDM (Stratasys). Το συγκεκριμένο υλικό αποτελεί η εξέλιξη του πρωτοεμφανιζόμενου ABS το οποίο είχε δημιουργηθεί αρχικά για τις πρώτες μηχανές τύπου FDM, αν η φωτοδιαπερατότητα είναι στα χαρακτηριστικά που πρέπει να επιτευχθούν τότε το υλικό επιλογής είναι το ABSi στο οποίο οι μηχανικές ιδιότητες δεν έχουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. Υπάρχουν και επιλογές οι οποίες είναι μίξεις υλικών όπως για παράδειγμα το ABS σε συνδυασμό με πολυανθρακικό (Polycarbonate – PC). (Ian Gibson, 2017)

| S. no. | Description                                   | Grade      |
|--------|---|------------|
| 1      | Acrylonitrile butadiene styrene               | ABS plus   |
| 2      | Acrylonitrile butadiene styrene               | ABS-M30    |
| 3      | Acrylonitrile butadiene styrene               | ABS-M30i   |
| 4      | Acrylonitrile butadiene styrene               | ABSi       |
| 5      | Polycarbonate acrylonitrile butadiene styrene | PC-ABS     |
| 6      | Polycarbonate                                 | PC         |
| 7      | Polycarbonate                                 | PC-ISO     |
| 8      | Polyphenylsulfone                             | PPSF/PPSU  |
| 9      | FDM thermoplastic material                    | ULTEM 9085 |

*Εικόνα 13 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τεχνολογία FDM (Sunpreet Singh, 2017)*

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την τεχνολογία συνοψίζονται παρακάτω. (Ian Gibson, 2017)

| Ιδιότητα  | ABS     | ABSi    | ABSplus | ABS/PC  |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)                             | 22      | 37      | 36      | 34,8    |
| Μέτρο ελαστικότητας εφελκυσμού (MPa)                  | 1627    | 1915    | 2265    | 1827    |
| Επιμήκυνση (%)  | 6       | 3,1     | 4       | 4,3     |
| Αντοχή σε κάμψη (MPa)                                 | 41      | 61      | 52      | 50      |
| Μέτρο ελαστικότητας κάμψης (MPa)                      | 1834    | 1820    | 2198    | 1863    |
| IZOD κρούση (J/m <sup>2</sup> )                       | 106,78  | 101,4   | 96      | 123     |
| Θερμοκρασία θερμικής εκτροπής κάμψης στα 66 psi (°C)  | 90      | 87      | 96      | 110     |
| Θερμοκρασία θερμικής εκτροπής κάμψης στα 264 psi (°C) | 76      | 73      | 82      | 96      |
| Θερμική διαστολή (in/in/F)                            | 5,60E-5 | 6,70E-6 | 4,90E-5 | 4,10E-5 |
| Ειδικό βάρος (g/cm <sup>3</sup> )                     | 1,05    | 1,08    | 1,04    | 1,2     |

*Εικόνα 14 Ιδιότητες υλικών για την τεχνολογία FDM. (Ian Gibson, 2017)*

Στον παραπάνω πίνακα αναφέρονται οι ιδιότητες των υλικών εκτύπωσης, να σημειωθεί ότι οι πραγματικές αντοχές σε μπορεί να εμφανίσουν μικρότερες τιμές από αυτές που αναγράφονται στον παραπάνω πίνακα . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μπορεί να υπάρχουν κενά μέσα στο υλικό η λόγο των διεπιφανειακών περιοχών. (Ian Gibson, 2017)

Υπόλοιπα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα παρακάτω.

Υλικά που έχουν ως κύριο συστατικό το υλικό PC (polycarbonate) (υπάρχουν μεγαλύτερες αντοχές στην καταπόνηση τύπου εφελκυσμού , στην καταπόνηση σε κάμψη , τιμές στα 104 MPa).

PC\_ISO βασίζεται στα πρότυπα τύπου ISO 10993-1 & USP Class VI. Το υλικό έχει ως βάση το PC , αυτό το υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ιατρικές εφαρμογές πχ συσκευασίες και για χρήση σε περιβάλλοντα που έχουν τρόφιμα κάτι που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι το συγκεκριμένο υλικό έχει μικρότερες αντοχές σε κάμψη σε σχέση με το PC η αντοχή του κυμαίνεται στα 90MPa.

Το υλικό ULTEM 9085 είναι βασισμένο στα πρότυπα των βιομηχανικών εφαρμογών έχει πολύ καλή αντοχή στην καύση στα καλά χαρακτηριστικά του αποτελούν και η δυσκολία αναφλεξιμότητας του, ο μειωμένος καπνός που δημιουργείται και η μικρότερη τοξικότητα του, χρησιμοποιείτε κύριος σε μέσα μεταφοράς, επίγεια, θαλάσσια και εναέρια.

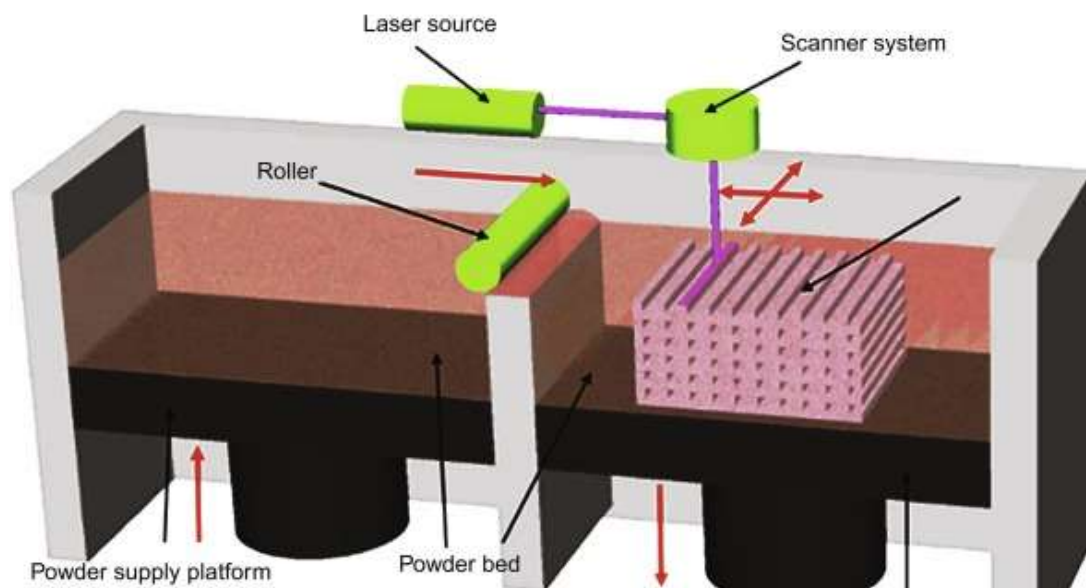
Το υλικό PPSF (πολυφαινυλοσουλφονης) χρησιμοποιείται αν επιθυμείτε να υπάρχει αντοχή στο φαινόμενο της θερμικής εκτροπής κάμψης (189C , 264 psi).

Να αναφερθεί ότι τα ( PC\_ISO , ULTEM 9085 , PPSF) μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές οι οποίες είναι στις νεότερες γενιές των FDM συστημάτων.

(Ian Gibson, 2017)

## 2.9 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion - PBF)

Η σύντηξη πούδρας σε κλίνη είναι από τις πρώτες διεργασίες προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε στο εμπόριο. Τα μηχανήματα που λειτουργούν με αυτήν την τεχνολογία ( Powder Bed Fusion ) χρησιμοποιούν ένα ή περισσότερα είδη πηγών θερμότητας, με σκοπό να πραγματοποιηθεί σύντηξη της σκόνης (σωματίδια τύπου πούδρας). Η διεργασία γίνεται με τρόπο ελεγχόμενο σε κάθε στρώση , επίσης πραγματοποιείται η εφαρμογή νέων στρώσεων με σκοπό την δημιουργία του εκάστοτε τεμαχίου, για την σύντηξη χρησιμοποιείται συνήθως Laser, η ονομασία της τεχνολογίας είναι ( Laser Sintering -LS). Να αναφερθεί ότι υπάρχει και τεχνολογία με εφαρμογή δέσμης ηλεκτρονίων. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την δημιουργία πολυμερών πρωτοτύπων με την χρήση laser, η χρήση επεκτάθηκε από τα πολυμερή σε υλικά όπως κεραμικά και μεταλλικά , σύνθετα,. Σήμερα η τεχνολογία αυτή έχει πρόσθετες πηγές θερμότητας, η χρήση της είναι πολύ δημοφιλής καθώς οι μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων τεμαχίων τείνουν να γίνουν εφάμιλλές με αποτελέσματα συμβατικών τεχνολογιών.



Εικόνα 15 Μια τυπική διάταξη μηχανής sls (AqibMuzaffar, 2020)



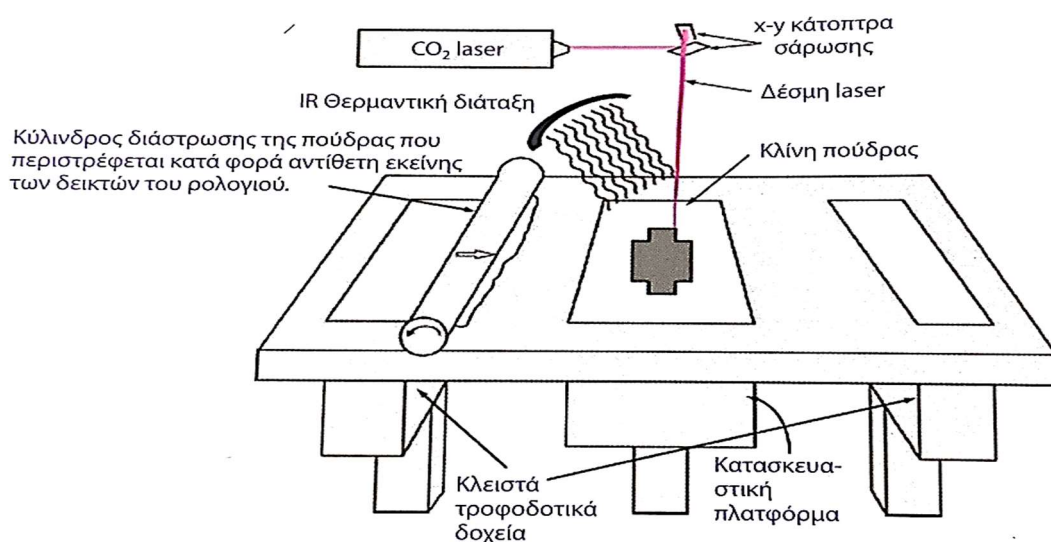
Στην παραπάνω σχήμα φαίνεται μια τυπική διάταξη μηχανής η οποία λειτουργεί βάση της τεχνολογίας SLS. Η διάταξη αποτελείται από το laser , μια πλατφόρμα που η χρήση της είναι να τροφοδοτεί με πούδρα το σύστημα , έναν κύλινδρο που μεταφέρει και διαστρωματώνει την πούδρα , ένα σύστημα σάρωσης και τον χώρο εκτύπωσης. (AqibMuzaffar, 2020)

Διάφορες αναμεσα στην τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων και Συσσωμάτωση μετάλλων με laser.

| Χαρακτηριστικό             | Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων         | Συσσωμάτωση μετάλλων με laser                                 |
|----------------------------|-----------------------------------|---|
| Θερμική πηγή               | Δέσμη ηλεκτρονίων                 | Laser   |
| Ατμόσφαιρα                 | Κενό                              | Αδρανές αέριο   |
| Σάρωση                     | Πηγία εκτροπής                    | Γαλβανόμετρα  |
| Απορρόφηση ενέργειας       | Αγωγιμότητα - περιορισμένη        | Απορροφητικότητα - περιορισμένη                               |
| Προθέρμανση πούδρας        | Χρήση δέσμης ηλεκτρονίων          | Χρήση θερμαντικών διατάξεων υπερύθρων ή ηλεκτρικών αντιστάτων |
| Ταχύτητες σάρωσης          | Ταχύτατη, μαγνητικά κατευθυνόμενη | Περιορισμένη από την αδράνεια γαλβανομέτρων                   |
| Κόστος ενέργειας           | Μέτριο                            | Υψηλό   |
| Ποιότητα επιφάνειας        | Μέτρια προς πενιχρή               | Εξαιρετική προς μέτρια  |
| Ανάλυση χαρακτηριστικών    | Μέτρια                            | Εξαιρετική  |
| Υλικά                      | Μέταλλα (αγωγοί)                  | Πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά                                |
| Μέγεθος σωματιδίου πούδρας | Μεσαίο                            | Ψιλό  |

Εικόνα 16 Διαφορετικά χαρακτηριστικά ανάλογα την τεχνολογία εκτύπωσης (EBM , MLS) (Ian Gibson, 2017)

### 2.9.1 Λειτουργία της διεργασίας σύντηξης πούδρας σε κλίνη

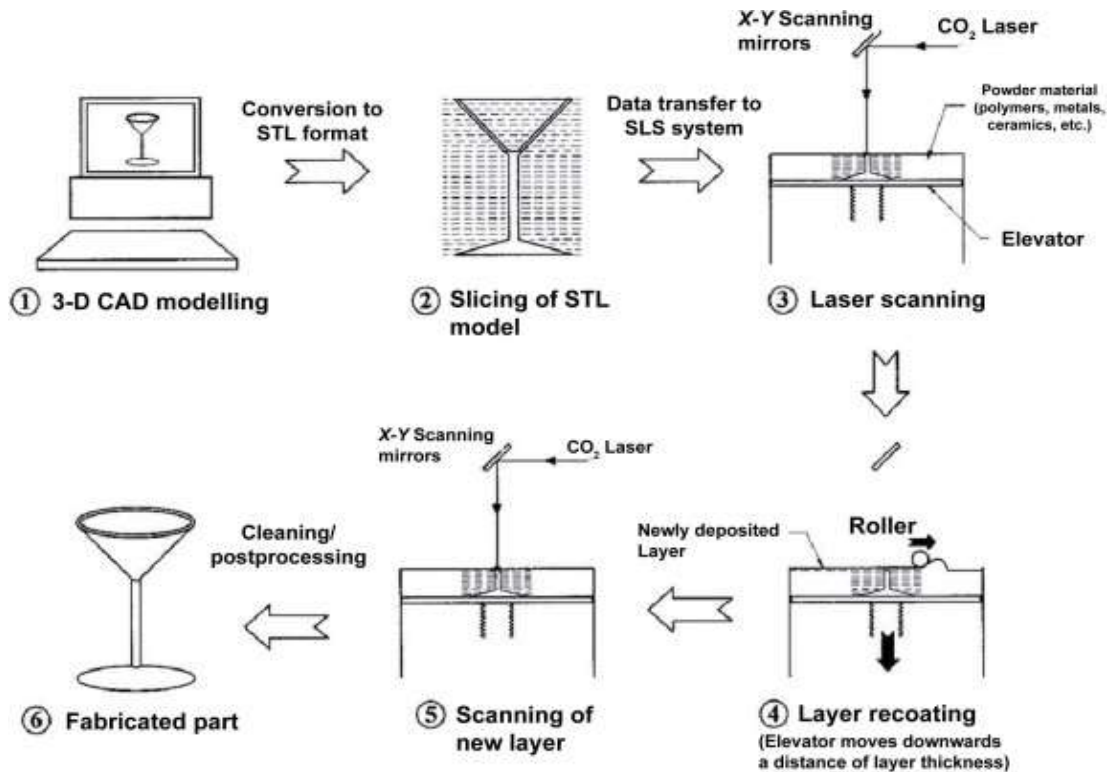


Εικόνα 17 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η διεργασία τύπου SLS και τους βασικούς μηχανισμούς που την απαρτίζουν (Ian Gibson, 2017)

Η διεργασία γίνεται στο εσωτερικό ενός θαλάμου στον οποίο περιέχεται αέριο συνήθως τύπου αζώτου με σκοπό να μειωθεί η επίδραση της οξείδωσης όπως και η αποτροπή της αποδόμησης του υλικού εκτύπωσης. Τα στρώματα υλικού που δημιουργούνται από έναν κύλινδρο έχουν συνήθως πάχος ( 0,075-0,1mm) η θερμοκρασία του χώρου κατασκευής και του χώρου τροφοδοσίας είναι υψηλή, συγκεκριμένα λίγο κάτω από όριο τήξης του κατά εκτύπωσης υλικού. (Ian Gibson, 2017) Οι λόγοι που το υλικό θερμαίνεται είναι για να διευκολυνθεί η σύντηξη από τον μηχανισμό του laser όπως επίσης για να μην υπάρξει στρέβλωση του τεμαχίου λόγω των θερμικών διαστολών - συστολών που θα οφείλονται στην μη ομογενής κατανομής θερμοκρασίας στον χώρο. Όταν είναι στην επιθυμητή θερμοκρασία και δημιουργηθούν οι στρώσεις, τότε το laser CO<sub>2</sub> σημαδεύει το αντίστοιχο σημείο εκτύπωσης για την αντίστοιχη στρώση, η στόχευση του laser γίνεται με χρήση γαλβανομέτρων, στην συνέχεια πραγματοποιείται επιλεκτική σύντηξη του στρώματος της πούδρας. Σε γενικές γραμμές δεν χρειάζονται επιπλέον στηρίξεις, καθώς η περίσσια σκόνη που περιβάλλει το σημείο της εκτυπώσεως στηρίζει τις εξωτερικές διατομές του προϊόντος. Όταν η διεργασία ολοκληρώσει την επιλεκτική σύντηξη ενός στρώματος, τότε η πλατφόρμα κατασκευής μειώνει το επίπεδο της τόσο όσο και το ύψος του στρώματος. Ένας κύλινδρος που περιστρέφεται αριστερόστροφα εισάγει και δημιουργεί ένα νέο ισόπεδο στρώμα στο οποίο το laser κάνει την αντίστοιχη σύντηξη σε αυτό. Η διεργασία επαναλαμβάνεται μέχρι ολοκληρωθεί το αντικείμενο εκτύπωσης, συνήθως η αφαίρεση του κομματιού γίνεται με το πέρας μιας χρονικής περιόδου ώστε να μειωθεί ομαλά και ομογενός η θερμοκρασία σε όλο το κομμάτι. Αν εκτεθούν τα παραγόμενά προϊόντα σε μικρό διάστημα στις εξωτερικές θερμοκρασίες και στο εξωτερικό περιβάλλον όπου υπάρχει και παρουσία οξυγόνου, στα τεμάχια μπορεί να παρουσιαστεί στρέβλωση η οποία θα προκληθεί από θερμικές διαστολές, επίσης υπάρχει το ενδεχόμενο να υπάρξει κάποια θραύση. (Ian Gibson, 2017)

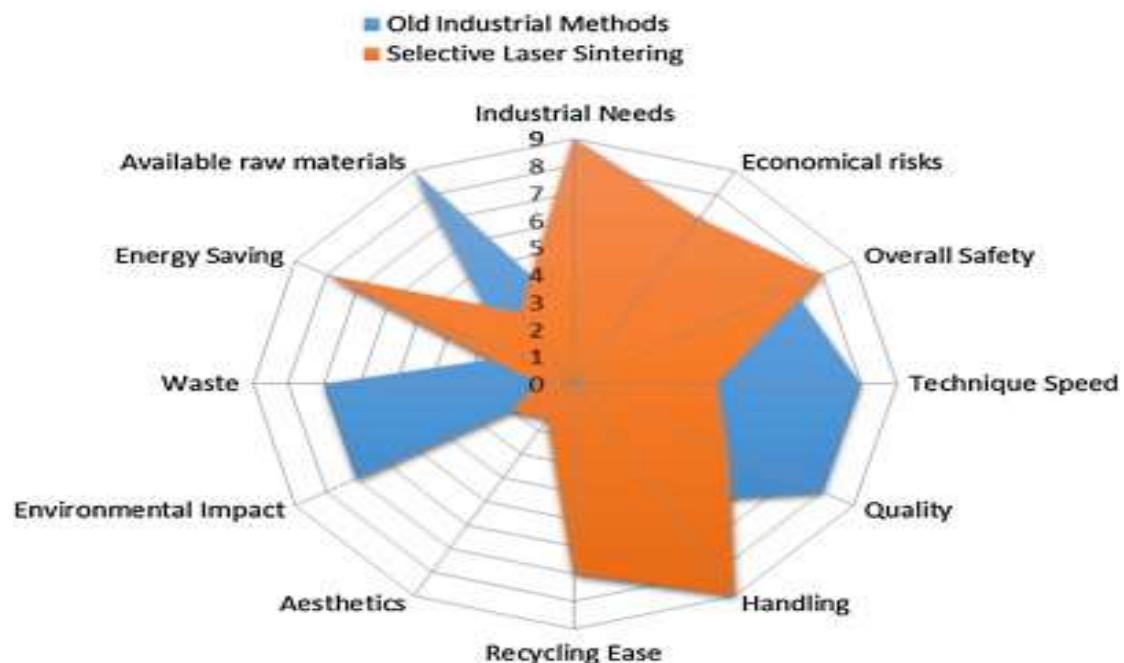


Στη συνέχεια το τεμάχιο εξέρχεται από την μηχανή και ακολουθεί ο καθαρισμός του και ανάλογα την ποιότητα επιφάνειας που είναι επιθυμητή μπορεί να ακολουθηθεί και κατεργασία φινιρίσματος. (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 18 Η διαδικασία από το cad μοντέλο στο τελικό προϊόν μέσω της διεργασίας της τεχνολογίας SLS (WeiZhu, 2015)

Η τεχνολογία sls διαφοροποιείται σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους έχοντας τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. (Syed A.M.Tofail, 2018)



Εικόνα 19 Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η σύγκριση της τεχνολογίας SLS με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας (Syed A.M.Tofail, 2018)

### 2.9.2 Υλικά εκτύπωσης

Τα υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τεχνολογία PBF πρέπει να έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό την τήξη και την δυνατότητα να ξανά στερεοποιηθούν.

### 2.9.3 Σύνθετα και πολυμερή

Η χρήση θερμοπλαστικών ως υλικό αυτής της τεχνολογίας, είναι ευνοούμενη καθώς έχουν χαμηλό θερμοκρασιακό σημείο τήξης, με την εφαρμογή αυτού του είδους υλικών στα τελικά προϊόντα δημιουργούνται λίγα σφαιρίδια. Να αναφερθεί ότι υπάρχει μικρή θερμική αγωγιμότητα. Τα πλαστικά υλικά αποτελούνται από δυο κατηγορίες τα θερμοπλαστικά (thermoplastics) και τα θερμοσκληρυνόμενα (thermoset). Η χρήση των θερμοσκληρυνόμενων δεν ενδείκνυται για χρήση στην τεχνολογία PBF καθώς δεν υπάρχει τήξη του υλικού με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά ρευστοποίηση αυτού. Τα υλικά που ανήκουν στα θερμοπλαστικά χωρίζονται ανάλογα την κρυσταλλικότητα τους σε κρυσταλλικά και άμορφα πολυμερή. Τα άμορφα έχουν μια δομή η οποία είναι απρόβλεπτη και αποτελούνται από τυχαίες πεπλεγμένης μορφής αλυσίδες (πολυμερικές) και υπάρχει μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος όσο αναφορά την διαδικασία τήξης ενός τέτοιου υλικού, τα κρυσταλλικά πολυμερή έχουν σταθερή δομή αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι είναι πιο σπάνια σαν υλικά και έχουν πιο συγκεκριμένες θερμοκρασίες όσο αναφορά το σημείο τήξης τους. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα ημικρυσταλλικά υλικά όπου είναι ένας συνδυασμός των δυο. (Ian Gibson, 2017)

Πολυαμίδιο είναι γνωστό και ως νάιλον. Κατά κανόνα τα πολυαμίδια έχουν αρκετά υψηλή κρυσταλλικότητα και χαρακτηρίζονται ως ημικρυσταλλικά. Η θερμοκρασία τήξης αυτού του υλικού είναι μικρού εύρους που παρέχει προβλεψιμότητα και αξιοπιστία στην διεργασία. Η Αριθμητική ονομασία του πολυαμιδίου [πχ 11,12] αποτελεί ένδειξη για τα άτομα άνθρακα τα οποία προέρχονται από ένα μονομερές το οποίο μετά την αντίδραση θα δημιουργήσει το υλικό του πολυαμιδίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πολυμερή ο αριθμός κρυσταλλικότητας όσο αυξάνεται τόσο το υλικό συρρικνώνεται. Η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί σε αυξημένο βαθμό που πλέον οι μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων που έχουν δημιουργηθεί, βελτιώνονται και με

την πάροδο των ετών πλησιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες από συμβατικές μεθόδους. (Ian Gibson, 2017)

Το PA 11 (POLYAMIDE 11) Το πολυαμίδιο ή αλλιώς νάιλον έχει καλές χημικές και θερμικές, μηχανικές αντοχές. Το PA 12 (POLYAMIDE 12) Έχει επίσης την ονομασία νάιλον έχει τα χαρακτηριστικά ότι είναι στιβαρό, χημικά σταθερό και αρκετά ευέλικτο. (sinterit, 2022) Αλλά υλικά όπως το πολυστυρένιο και τα προϊόντα που έχουν βάση αυτό, αν και θεωρούνται άμορφα πολυμερές η χρήση τους είναι κύριος για κατασκευές καλουπιών ακρίβειας. (Ian Gibson, 2017) Τα ελαστομερή θερμοπλαστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές που υπάρχει ως στόχος και το χαρακτηριστικό της ελαστικότητας (Ian Gibson, 2017). Για χρήση σε βιοιατρικές εφαρμογές έχουν δοκιμαστεί τα πολυκαπρολακτονη (polycaprolactone - PCL), επίσης υλικά όπως τα (polylactide -PLA), (poly-L-lactide-PLLA), PCL. (Ian Gibson, 2017) Να αναφερθεί ότι για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρώματα από υλικά όπως PA 12 & σφαιρίδια γυαλιού (Duraform GF) όπως επίσης και πολύ μικρά κομμάτια από αλουμίνιο και ίνες από υλικό τύπου άνθρακα. (Ian Gibson, 2017)

#### **2.9.4 Μέταλλα και σύνθετα αυτών.**

Στις διεργασίες PBF μπορούν κατά κανόνα να χρησιμοποιηθούν ως υλικά εκτύπωσης μια ομάδα μετάλλων τα μέταλλα τα οποία έχουν την δυνατότητα να συγκολλούνται είναι καταλληλά και για αυτήν την διεργασία. Κάποια επιμέρους παραδείγματα από υλικά τα οποία είναι συμβατά με αυτήν την τεχνολογία είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες όπως επίσης και το τιτάνιο, οι διασταυρώσεις αυτού με άλλα υλικά, κράματα (νικελίου, χρώμιου, αλουμίνιου και κοβάλτιου). Τα τελευταία έτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης υλικά όπως ο χρυσός και ο αργυρός. (Ian Gibson, 2017)

#### **2.9.5 Κεραμικά και σύνθετα αυτών.**

Τα κεραμικά υλικά μπορούν και αυτά να χρησιμοποιηθούν ως υλικό εκτύπωσης για την τεχνολογία της σύντηξης πούδρας σε κλίση, κύριος αυτά τα υλικά είναι είτε νιτρίδια, είτε καρβίδια, είτε συνδυασμός αυτών όπως οξειδίων μετάλλου, αλουμίνιου, τιτάνιου. (Ian Gibson, 2017)

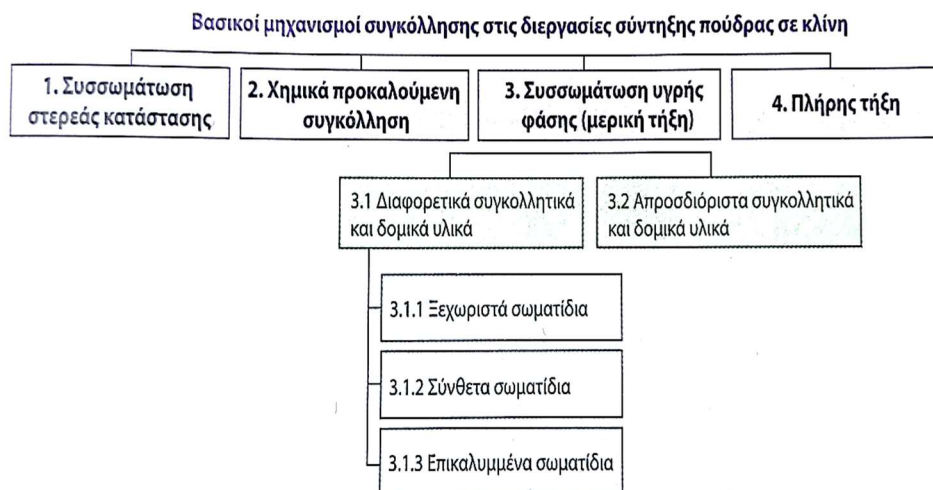
## 2.9.6 Τύποι υλικών που χρησιμοποιούνται στους εκτυπωτές τύπου SLS

PAEK (POLYARYLETHETERKETONES) Μεγάλης απόδοσης πλαστικά τα οποία έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (sinterit, 2022)

TPE (THERMOPLASTIC ELASTOMERS) είναι αρκετά παραπλήσιο σε μηχανικές ιδιότητες με τα ελαστομερή , είναι αρκετά εύκαμπτα σε φυσιολογικές θερμοκρασίες. (sinterit, 2022)

PS (POLYSTYRENE) έχει τις ιδιότητες της μεγάλης ακαμψίας, μεσαίου επιπέδου αντοχής και σκληρότητας αλλά μικρή αντοχή στην καταπόνηση τύπου κρούσης (sinterit, 2022)

PP (POLYPROPYLENE) χημικά είναι πολύ κοντά στο πολυαιθυλένιο αλλά έχει ιδιότητες οι οποίες είναι ανώτερες όσο αναφορά την αντοχή τους , την σκληρότητα τους και την σταθερότητα τους σε υψηλές θερμοκρασίες. (sinterit, 2022)



Εικόνα 20 Οι μηχανισμοί σύντηξης για που υπάρχουν είναι τέσσερις, οι οποίοι αναφέρονται παραπάνω (Ian Gibson, 2017).

## 2.10 Μηχανισμοί σύντηξης της πούδρας

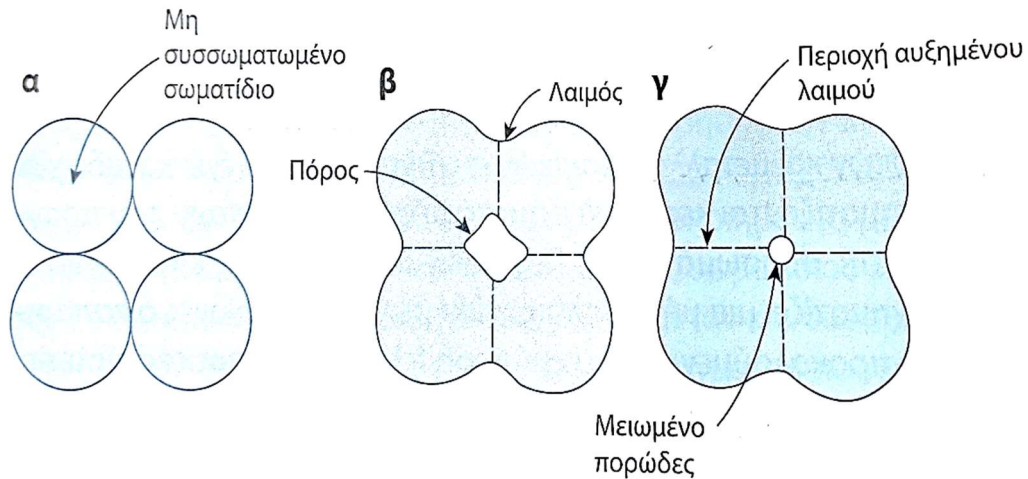
### 2.10.1 Στέρεης κατάστασης συσσωμάτωση.

Η συγκόλληση των σωματιδίων γίνεται σε αυξημένες θερμοκρασίες λίγο χαμηλότερης από την θερμοκρασία τήξης του υλικού. Η λειτουργία αυτού του μηχανισμού ακολουθεί τον τύπο.

$$E_s = Y_s * S_a \text{ (} Y_s \text{ ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας) , (} S_a \text{ επιφάνεια σωματιδίων).}$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι όσο η επιφάνεια μικραίνει τόσο η ταχύτητα που πραγματοποιείται η συσσωμάτωση μειώνεται, αν υπάρχει σαν στόχος η μείωση του πορώδους τότε ως λύση μπορεί να θεωρηθεί η αύξηση του χρόνου συσσωμάτωσης, ή η αύξηση της θερμοκρασίας, είτε η εφαρμογή πίεσης η οποία θα μειώσει τον χρόνο συσσωμάτωσης.

(Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 21 Μορφές σωματιδίων (Ian Gibson, 2017)

Παραπάνω απεικονίζονται

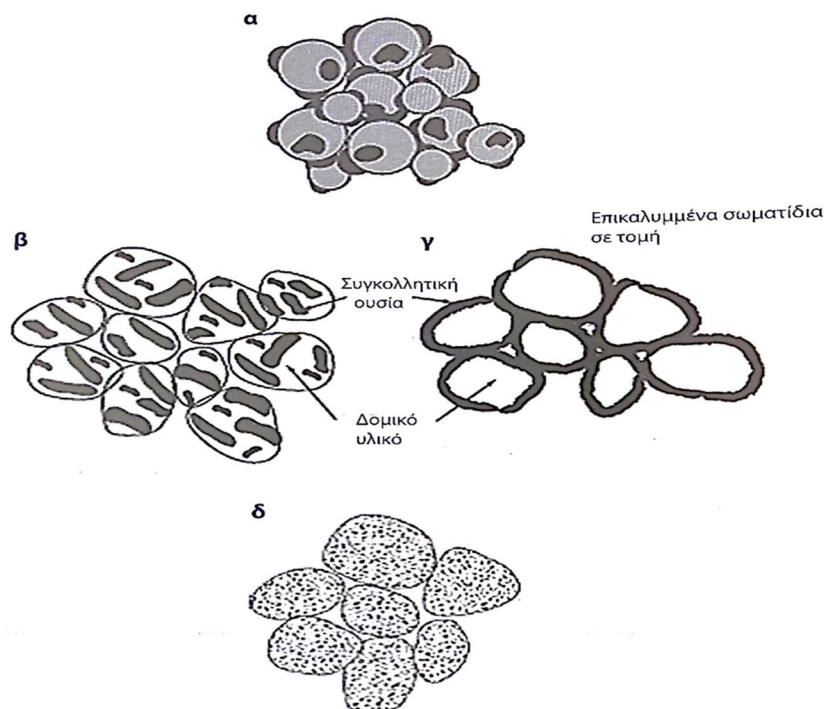
- A) Τα σωματίδια σε κατάσταση πριν την συσσωμάτωση
- B) Η μορφή των σωματιδίων σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από την την τιμή της μισής της απολυτού θερμοκρασίας τήξης.
- Γ) Κατά την συσσωμάτωση ο λαιμός έχει την τάση να επεκτείνεται και η οπή στο κέντρο να μειώνεται.

(Ian Gibson, 2017)

### 2.10.2 Υγρής κατάστασης συσσωμάτωση (LPS)

Η χρήση αυτού του ορού υποδηλώνει την τήξη μόνο ενός τμήματος από το σύνολο της πούδρας που χρησιμοποιείται, ενώ το υπόλοιπο κομμάτι του συνόλου είναι σε στερεά κατάσταση. Το υγροποιημένο κομμάτι χρησιμεύει ως μιας μορφής κολλάς η οποία ενώνει τα στερεά σωματίδια, με την τελική μορφή να είναι ένα ενιαίο σώμα το οποίο δεν χρειάστηκε να γίνει πλήρης τήξη του, ούτε συσσωμάτωση των ιδίων των σωματιδίων.

(Ian Gibson, 2017)



*Εικόνα 22 Στην παραπάνω εικόνα δείχνονται οι διάφορες μεταξύ των παραλλαγών που υπάρχουν μεταξύ στα συστήματα υγρής φάσης συσσωμάτωσης. (Ian Gibson, 2017)*

- A) Σωματίδια τα οποία είναι σε ξεχωριστή μορφή.
- B) Σωματίδια που βρίσκονται σε συνθέτη μορφή.
- Γ) Σωματίδια τα οποία είναι σε μορφής επικάλυψης.
- Δ) Μείγματα τα οποία είναι απροσδιόριστης μορφής.

(Ian Gibson, 2017)



## **2.11 Η τήξη σε όλο το υλικό (πλήρης τήξη)**

Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται συνήθως σε διεργασίες μεταλλικών και ημι-κρυσταλλικών πολυμερών. Σε αυτήν την τεχνολογία, η ενέργεια η οποία χρησιμοποιείτε δημιουργεί τήξη του υλικού σε πάχος μεγαλύτερο από το πάχος της ίδιας στρώσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και με τις επόμενες επιστρώσεις να τήκονται σε βάθος μεγαλύτερο από το πάχος τους, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα τελικό προϊόν με ενοποιούμενες στρώσεις και με υψηλή πυκνότητα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι (νάιλον πολυαμίδιο, ανοξείδωτοι χάλυβες, τιτάνιο κ.λ.π.) (Ian Gibson, 2017)

### **2.11.1 Χημική συγκόλληση**

Η διαδικασία είναι τύπου θερμικής αντίδρασης η οποία προκαλείτε μεταξύ υλικών τύπων πούδρων, είτε σε σύνδεσμο με ατμοσφαιρικά αέρια. Εχει αποδειχθεί ότι μείγματα κεραμικών μπορούν να υποστούν χημική αντίδραση με χρήση laser, η διεργασία είναι εξώθερμη και μέσω της χημικής αντίδρασης μπορούν να δημιουργηθούν αντικείμενα με χρήση λιγότερης ενέργειας από το laser. Στη συνέχεια συνήθως γίνεται μια συσσωμάτωση σε υψηλές θερμοκρασίες για να υπάρχουν στο τελικό αποτέλεσμα μεγαλύτερες πυκνότητες, είτε μια διήθηση νέων χημικών αντιδράσεων με σκοπό την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων κομματιών. (Ian Gibson, 2017)

### **2.11.2 Εναπόθεση υλικού**

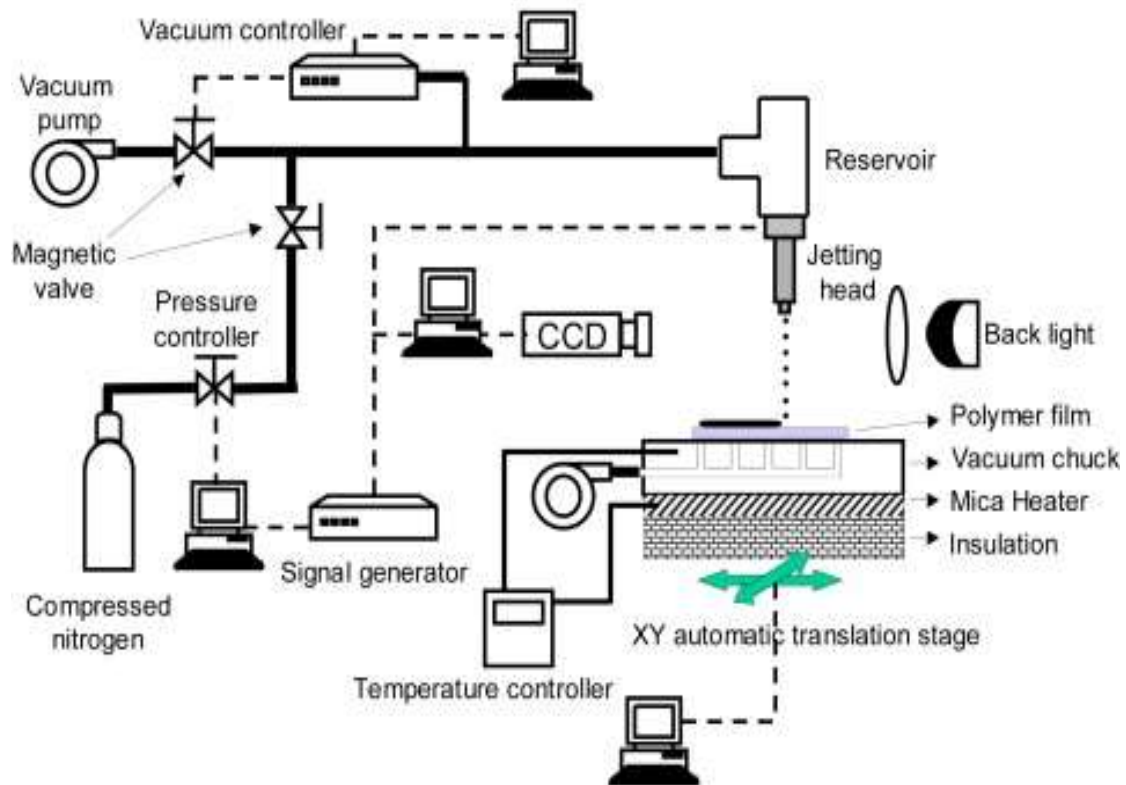
### **2.11.3 Γενικά**

Η δυσδιάστατη πλευρά της τεχνολογίας αυτής χρησιμοποιείτε από την δεκαετία του 1960 και η χρήση της βρίσκει εφαρμογές κύριος στις εκτυπώσεις εγγράφων όπως και φωτογραφιών. Η διεργασία παραμένει εμπορικά διαθέσιμη από εταιρείες όπως η Canon και η HP. Η τρισδιάστατη μορφή της τεχνολογίας αναπτύχθηκε για πρώτη φορά κατά την δεκαετία του 1980 και χρησιμοποιούσε εκτόξευση σωματιδίων. Η πρώτη πετυχημένη εμπορική μηχανή που εμφανίστηκε ήταν η ModelMaker από την εταιρεία Sanders Prototype η οποία έγινε εμπορικά διαθέσιμη κατά το έτος 1994. Η διεργασία πραγματοποιούταν με την χρήση κηροειδούς υλικού το οποίο εκτυπωνόταν και με την εφαρμογή θερμότητας, αυτό τηκόταν.

Στην συνέχεια εταιρείες εισήλθαν στην αγορά αυτής της τεχνολογίας όπως η 3D Systems με το μοντέλο Actua 2100 το οποίο ήταν ένα μηχάνημα το οποίο χρησιμοποιούσε ως υλικό εκτύπωσης συνθετικά κεριά, στην συνέχεια στο προϊόν πραγματοποιήθηκαν αλλαγές και κυκλοφόρησε στην αγορά ως Thermojet. Άλλες εταιρίες που εισχωρήσαν στην αγορά αυτής της τεχνολογίας μηχανήματων είναι η Sanders Desing International το 2001 με την κυκλοφορία του Rapid ToolMaker. Να σημειωθεί ότι οι πρώτες γενιάς μηχανές αυτής της τεχνολογίας χρησιμοποιούσαν ως υλικό κατασκευής προϊόντων, κηροειδή θερμαινόμενα θερμοπλαστικά, τα οποία είναι καταλληλά για δημιουργία προϊόντων τύπου πρωτοτύπων. Καθώς επίσης και για την χρήση μοντέλων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία καλουπιών χύτευσης ακρίβειας.

Στα πιο πρόσφατα έτη, το ενδιαφέρον έχει μετατοπιστεί στην εναπόθεση υλικού το οποίο είναι ακρυλικό και φωτοπολυμερές. Η λειτουργία του μηχανισμού στερεοποίησης γίνεται με τη δημιουργία υλικού από σταγονίδια μονομερούς τα οποία πολυμερίζονται με την χρήση υπεριώδους φωτός. Η διεργασία είναι παρόμοια σε αυτό το σημείο με την διεργασία φωτοπολυμερισμού σε κάδο, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι η διεργασία διαφοροποιείται σε αλλά στάδια της. Η εξέλιξη των μηχανών άρχισε όταν εμφανίστηκε το μηχάνημα Quadra, της Objet Geometries κατά το έτος 2000 και το επόμενο μοντέλο QuadraTempo το 2001. Τα δυο μηχανήματα έκαναν εναπόθεση υλικού το οποίο ήταν φωτοπολυμερές. Η εναπόθεση πραγματοποιούνταν από περισσότερα από 1500 ακροφύσια. Η εταιρεία 3D Systems στην συνέχεια κατά το έτος 2003 παρουσίασε το Multi-Jet-Modeling όπου ήταν μια καινούργια επέκταση στις δυνατότητες που πρόσφερε η σειρά των μοντέλων Thermojet. (Ian Gibson, 2017)





Εικόνα 23 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η διεργασία Drop On Demand και τα συστήματα τα οποία την υποβοηθούν για να πραγματοποιηθεί η λειτουργία της (HwanKo, 2015)

#### 2.11.4 Υλικά που χρησιμοποιούνται.

Στην βιομηχανία έχουν παρουσιαστεί μηχανήματα τα οποία κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούν ως υλικό εκτύπωσης κηροειδή πολυμερή όπως και φωτοπολυμερη. Στο ερευνητικό κομμάτι έχουν γίνει δοκιμές σχετικά με την εφαρμογή άλλων υλικών για εκτύπωση με χρήση αυτής της τεχνολογίας. Τα υλικά τα οποία δοκιμαστήκαν με σκοπό την μελλοντική χρήση τους σε αυτήν την διεργασία είναι τα κεραμικά, τα μέταλλα και τα πολυμερή. Η συνεκτικότητα η οποία ενδείκνυται το υλικό να έχει για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η εκτύπωση πρέπει να είναι μεταξύ 20-40 cP (στην θερμοκρασία που πραγματοποιείται η εκτύπωση). Να αναφερθεί ότι για να πραγματοποιηθεί η διεργασία θα πρέπει τα υλικά τα οποία στην θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι σε στερεή μορφή να θερμανθούν ώστε να γίνει η τήξη τους. Το ρευστοποιημένο υλικό εάν διατηρεί η μεγάλη συνεκτικότητα θα πρέπει να μειωθεί στα επίπεδα που πραγματοποιείτε η διεργασία. Για να επιτευχθεί η μείωση θα

πρέπει το υλικό είτε να θερμανθεί είτε να αναμειχθεί με αλλά υλικά με μειωμένη συνεκτικότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις η συνεκτικότητα μπορεί να μειωθεί κατά την διάρκεια της εναπόθεσης και αυτό οφείλεται στην δημιουργία διατμητικών τάσεων στο εσωτερικό του υλικού. Τέτοιοι εκτυπωτές είναι οι DOD (Drop On Demand). Να αναφερθεί ότι το αποτέλεσμα της διεργασίας επηρεάζεται και από την πυκνότητα, όπως επίσης από την επιφανειακή τάση που διαθέτει το υλικό και τον σχεδιασμό των ακροφυσίων εναπόθεσης. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιορίζονται κατά κύριο λόγο από τον παράγοντα της συνεκτικότητας. (Ian Gibson, 2017)

#### **2.11.5 Πολυμερή υλικά**

Τα εμπορικά συστήματα που βασίζονται σε αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιούν ως υλικό εκτύπωσης πολυμερή, να αναφερθεί ότι εμπορικές μηχανές όπως η ThermoJet και η T66 Solidscape της 3D Systems χρησιμοποιούν ως υλικό εκτύπωσης θερμοπλαστικό το οποίο αποτελείται από συνδυασμό διάφορων πολυμερών καθώς και κεριών. Σε αυτά τα υλικά να διατυπωθεί ότι η φάση τους είναι στερεή, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά κατά την έναρξη της εκτύπωσης λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, αυτά τα υλικά ρευστοποιούνται. Άλλες προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν ήταν για παράδειγμα από την εταιρεία 3D systems, με χρήση διάφορων μίξεων από πολυμερική ρητίνη η οποία είχε το χαρακτηριστικό της χαμηλής συρρίκνωσης, υλικού τυπου κερι παραφίνης με την ιδιότητα της χαμηλής συνεκτικότητας που χρειάζεται να έχει η διεργασία. Συνδυαστικέ επίσης με κερι το οποίο ήταν μικρο-κρυσταλλικό, λίγες ποσότητες πλαστικοποιητή, ένα πολυμερές που είχε την χρήση του ενισχυτικού σκλήρυνσης, επίσης έγινε χρήση αντιοξειδωτικών και θερμο-απορροφητικών υλικών. Τα υλικά αυτά είχαν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν τα χαρακτηριστικά της συνεκτικότητας 18-25 Cp, η επιφανειακή τάση τους να είναι μεταξύ 24-29 dyn/cm και με θερμοκρασία κατά την διάρκεια της διεργασίας 130C. Τα τελευταία έτη η λύση των προβλημάτων που έχουν σχέση με την συνεκτικότητα είναι με την χρήση προ-πολυμερών για την διεργασία τεμαχίων από πολυμερή. Ένα ακόμα πρόβλημα που τίθεται σε λύση είναι η μειωμένη θερμοκρασία εκτύπωσης σε σύγκριση με την διεργασία εναπόθεσης θερμού τήγματος, η αιτία που δεν μπορεί να αυξηθεί η

θερμοκρασία της διεργασίας είναι γιατί τα προ-πολυμερή κάνουν αντίδραση πολυμερισμού όταν η θερμοκρασία είναι πολύ αυξημένη για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Όταν πολυμερίζονται έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνεκτικότητας τους, με τελικό αποτέλεσμα την αδυναμία χρήσης τους για την διεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς με αυξημένη συνεκτικότητα θα υπάρξει πιθανότητα φραγή του ακροφυσίου της μηχανής. Εξατίας του πολυμερισμού που συμβαίνει μετά την διεργασία θα πρέπει να γίνει διαστασιολογικός έλεγχος στο προϊόν το οποίο έχει κατασκευαστεί. (Ian Gibson, 2017)

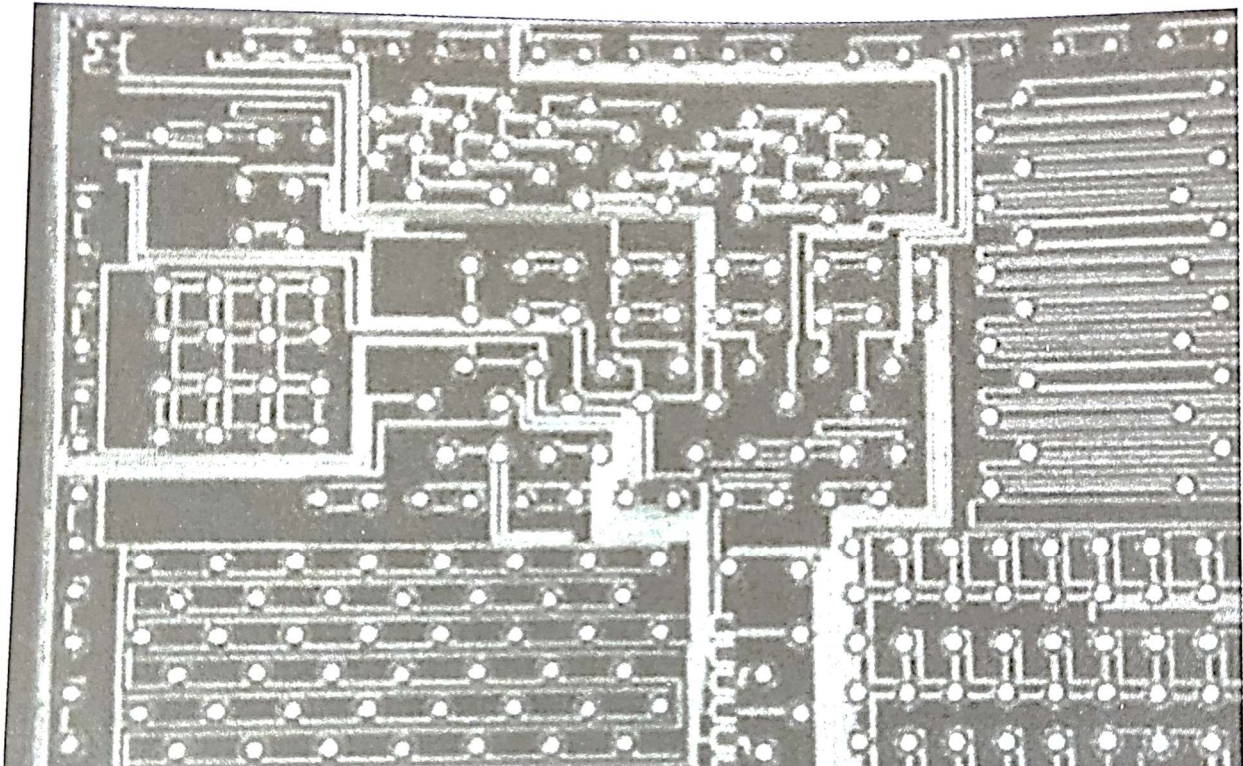
#### **2.11.6 Κεραμικά**

Τα κεραμικά έχουν μελετηθεί σε ερευνητικό επίπεδο για την χρήση τους σε αυτήν την διεργασία. Οι μελέτες έχουν γίνει με βάση τις αλλαγές στην ταχύτητα σάρωσης, την απόσταση στην σειρά δυο σταγονιδίων, στο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα, στην απόσταση μεταξύ των γραμμών εκτύπωσης, καθώς και στις μορφές πολυστρώσης. Στα πειράματα έχει εξεταστεί η χρήση πούδρας ζirkονίου, διαλυτών και διάφορων προσθέτων, επίσης έχει γίνει χρήση από ερευνητές υλικό σωματιδίων αλουμίνας. Τα σωματίδια εκτυπώνονται μέσω ενός φορέα ο οποίος είναι από κηροειδή υλικά. Η εκτύπωση πραγματοποιήθηκε με συγκέντρωση στέρεων εναιωρημάτων σε ποσοστό 40%, και με συνεκτικότητα μεταξύ 2,9 και 38,0 cP με θερμοκρασία διεργασίας 100C. Η συγκέντρωση της πούδρας να αναφερθεί ότι δεν είναι εφικτό να αυξηθεί γιατί αυξάνεται η συνεκτικότητα σε μη επιτρεπτά όρια. (Ian Gibson, 2017)

#### **2.11.7 Μέταλλα**

Η χρήση της τεχνολογίας αυτής στα μέταλλα έχει επικεντρωθεί κύριος στην ηλεκτρονική για την εκτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων καθώς και συνδέσεων, κατάλληλο υλικό για αυτήν την εφαρμογή με χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι το καλαί καθώς παρουσιάζει χαμηλό σημείο τήξης. Οι ερευνητές έχουν κάνει χρήση σταγονιδίων διαμέτρου 25-500 μm, σε ερευνητικές εργασίες έχει αναφερθεί ότι η εναπόθεση κασσίτερου γίνεται σε με χρήση πίεσης 138 kPa και η συνεκτικότητα, η οποία κατά την διάρκεια της διεργασίας ήταν 1,3 cP, ερευνητές της MikroFab Technologies έχουν χρησιμοποιήσει αυτήν την τεχνολογία και έχουν καταφέρει να εκτυπώσουν στήλες καλαί με διάμετρο 25 μm. Αλλά μέταλλα τα οποία έχουν

χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής με εναπόθεση υλικού είναι ο χαλκός ο υδράργυρος και ο κασσίτερος, να σημειωθεί ότι στα μέταλλα η κυρία δυσκολία είναι ότι υπάρχει πολύ υψηλό θερμοκρασιακό σημείο τήξης των υλικών με αυτό να συνεπάγεται σε πιθανή βλάβη στο σύστημα της διεργασίας. (Ian Gibson, 2017)



*Εικόνα 24 Παραπάνω απεικονίζεται πλακέτα IC με χρήση σταγονιδίων από κασσίτερο (καλαί) τα σταγονίδια είναι διαμέτρου 70 μm από Sn63/Pb37. (Ian Gibson, 2017)*

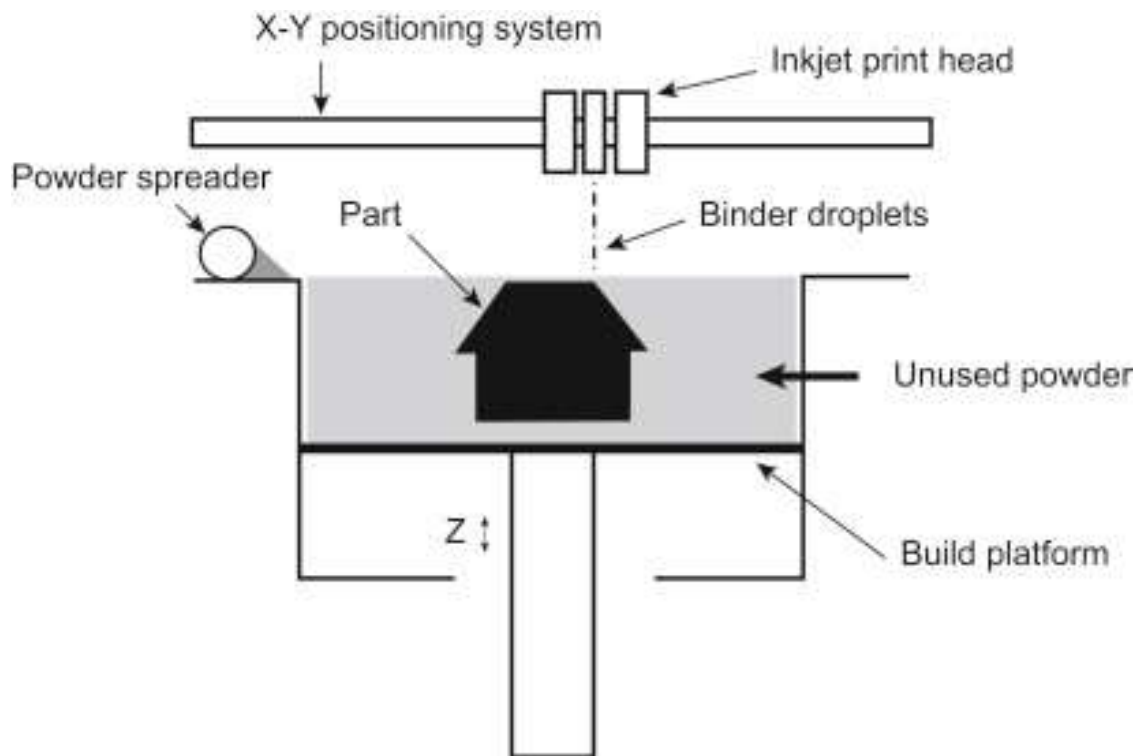
## **2.12 Εναπόθεση συγκολλητικού υλικού (Binder Jetting -BJ)**

### **2.12.1 Γενικές γνώσεις.**

Η διεργασία δημιουργήθηκε αρχικά στις ΗΠΑ στο MIT και το αρχικό όνομα που πήρέ ήταν το 3DP ( Three-Dimensional Printing ), η διεργασία γίνεται σε περιβάλλον

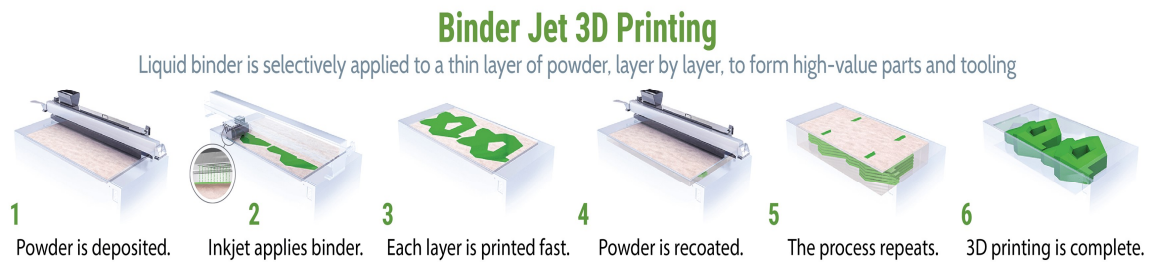
κλίνης πούδρας και χρησιμοποιείται υλικό το οποίο έχει συγκολλητικές ιδιότητες. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί μικρή ποσότητα υλικού η οποία εξέρχεται από την οπή του εξαρτήματός της κεφαλής και το υπόλοιπο μεγαλύτερο ποσοστό προέρχεται από την κλίνη της πούδρας. Η διαδικασία συνεχίζει με τα σταγονίδια ( $D=80\mu\text{m}$ ) τα οποία εξέρχονται από την κεφαλή εκτύπωσης inkjet να ενώνονται με τα σωματίδια του υλικού τύπου πούδρας και να δημιουργείται μίξη σωματιδίων και συγκολλητικής ουσίας η συγκολλητική ουσία δίνει επίσης την δυνατότητα συγκόλλησης του νέου στρώματος με το προηγούμενο, η κλίνη πούδρας μειώνει το ύψος της κατά το πάχος ενός στρώματος και δημιουργείται ένα νέο στρώμα σκόνης τύπου πούδρας από έναν αντίστροφο περιστροφικό εξάρτημα τύπου κυλίνδρου, τα βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να δημιουργηθεί πλήρως το παραγόμενο τεμάχιο.

(Ian Gibson, 2017)



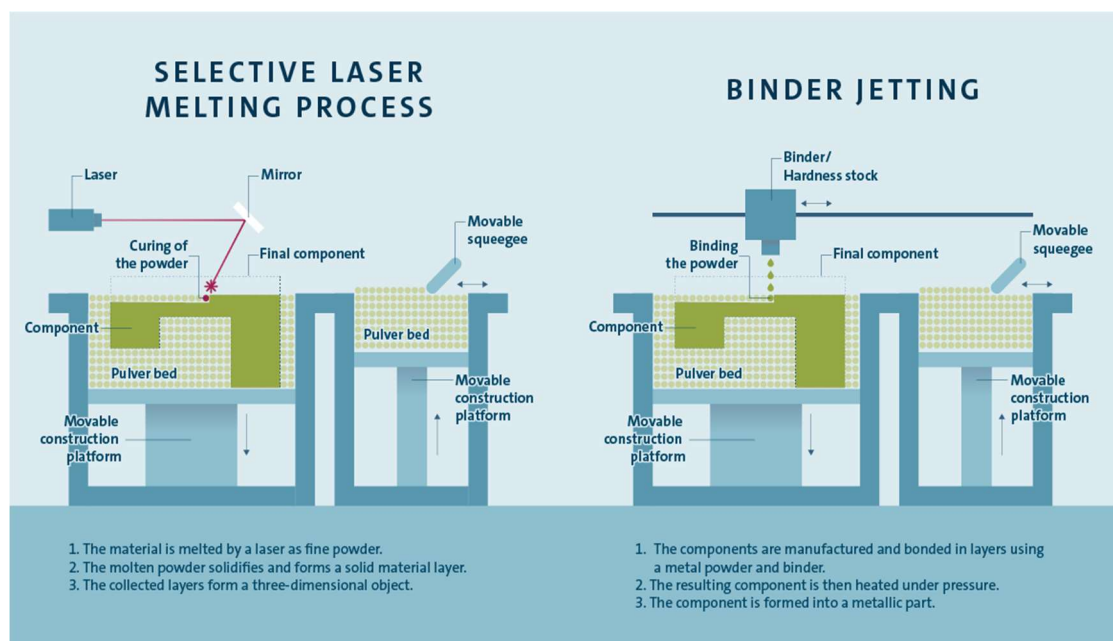
Εικόνα 25 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη μιας μηχανής διεργασίας τύπου εναπόθεσης συγκολλητικού υλικού. (SoniaHolland, 2019)





Εικόνα 26 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα βήματα της διεργασίας Εναπόθεση συγκολλητικού υλικού (exone, 2022)

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλά ακροφύσια για εφαρμογή στις κεφαλές εκτύπωσης που σημαίνει ότι στη διεργασία μπορούν να αλλάξουν τα μονοπάτια εκτύπωσης ώστε να μεταβληθεί η ταχύτητα εκτύπωσης. Η τεχνολογία αυτή έχει μικρό κόστος λειτουργίας καθώς δεν υπάρχουν υψηλής ενεργειακής χρήσεις ενεργειακές πηγές. Μετα το πέρας της διεργασίας της εκτύπωσης το τεμάχιο που παράχθηκε παραμένει μέσα στον κατασκευαστικό χώρο μέχρι να στερεοποιηθεί το συγκολλητικό υλικό. Στην συνέχεια το τεμάχιο εξέρχεται από τον κατασκευαστικό χώρο και καθαρίζεται από υπολείμματα επιπλέον υλικού πούδρας. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν επεξεργασίες για την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του προϊόντος οι λεγόμενοι οι διηθητικοί παράγοντες (infiltrants) (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 27 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι διαφορές στις διατάξεις μεταξύ των τεχνολογιών SLM και BINDER JETTING. (additivalab, 2022)

### 2.12.2 Υλικά που χρησιμοποιούνται

Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την τεχνολογία ήταν ένα προϊόν που είχε ως βάση το άμυλο και η εταιρία που το εφάρμοσε στο μισό της δεκαετίας του ενενήντα ήταν η Z Corporation. Το δευτερεύων είχε το ρολό του συγκολλητικού υλικού. Ήταν κοινή κολλά με βάση το νερό. Το υλικό της πούδρας που χρησιμοποιούνται την σήμερα είναι τύπου γύψου και πιο συγκεκριμένα (ημιδρίτης θειικού ασβεστίου) (Ian Gibson, 2017). Η εταιρεία 3D Systems προσφέρει για εμπορική χρήση υλικά όπως το ColorBond το οποίο έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με το Superglue, όπως επίσης χρησιμοποιείται το StrengthMax για την ιδιότητα του να είναι διηθητικό. Το Salt Water Cure του οποίου η χρήση είναι φιλική στον άνθρωπο και στο περιβάλλον(3dsystems, 2022). Κοινό χαρακτηριστικό στις μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών είναι η δυσκαμψία τους όπως επίσης και το γεγονός ότι τα υλικά για αυτήν την τεχνολογία παρουσιάζουν μικρότερες αντοχές και μικρότερες δυνατότητες επιμήκυνσης σε σύγκριση με τα υλικά που κατατάσσονται στα θερμοπλαστικά, όπως και τις ρητίνες που προορίζονται για διεργασίες φωτοπολυμερισμού (Ian Gibson, 2017). Άλλες εταιρείες που παράγουν υλικά για αυτήν την τεχνολογία είναι η Voxeljet, με υλικά όπως το PMMA (πολυμεθακρυλικό μεθύλιο) (voxeljet, 2022). Η ExOne που διαθέτει ως υλικά σκόνες τύπου πούδρας από μέταλλα και άμμο και ως διηθητικό υλικό χρησιμοποιείται το υλικό του μπρούτζου, όταν πρέπει να γίνει συνδυασμός με το υλικό του ανοξειδωτού χάλυβα (exone, 2022). Η ExOne προσφέρει για εμπορική χρήση υλικό το οποίο προσδιορίζεται για διακοσμήσεις και αποτελεί συνδυασμό γυαλιού και νατρασβεστίου. (exone, 2022). Αξίζει να αναφερθεί ότι ως ερευνητικό αντικείμενο εξετάζεται και η χρήση κεραμικών υλικών σε αυτήν την τεχνολογία. (Ian Gibson, 2017)

## 2.13 Επάλληλων φύλλων (LOM - Laminated Object Manufacturing)

### 2.13.1 Γενικές γνώσεις

Η τεχνολογία αυτή ήταν από τις πρώτες διεργασίες προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιήθηκαν για εμπορική χρήση. Η τεχνολογία λειτουργεί με χρήση στρώσεων φύλλων χαρτιού, οι οποίες συγκροτούνται μεταξύ τους και κόβονται από

ένα laser τύπου CO<sub>2</sub>. Οι στρώσεις διατίθενται από το laser σε διαδρομές έχουν προέλθει από τα δεδομένα του συστήματος CAD, του μοντελοποιημένου τεμαχίου, το υλικό το οποίο είναι έξω από το περίγραμμα κοπής κόβεται σε κύβους (crosshatch). Η μεθοδολογία αλλάζει ανάλογα την εφαρμογή για παράδειγμα οι στρώσεις φύλλων μπορούν πρώτα να κοπούν και μετά να συγκροτηθούν ή το αντίστροφο. (Ian Gibson, 2017)

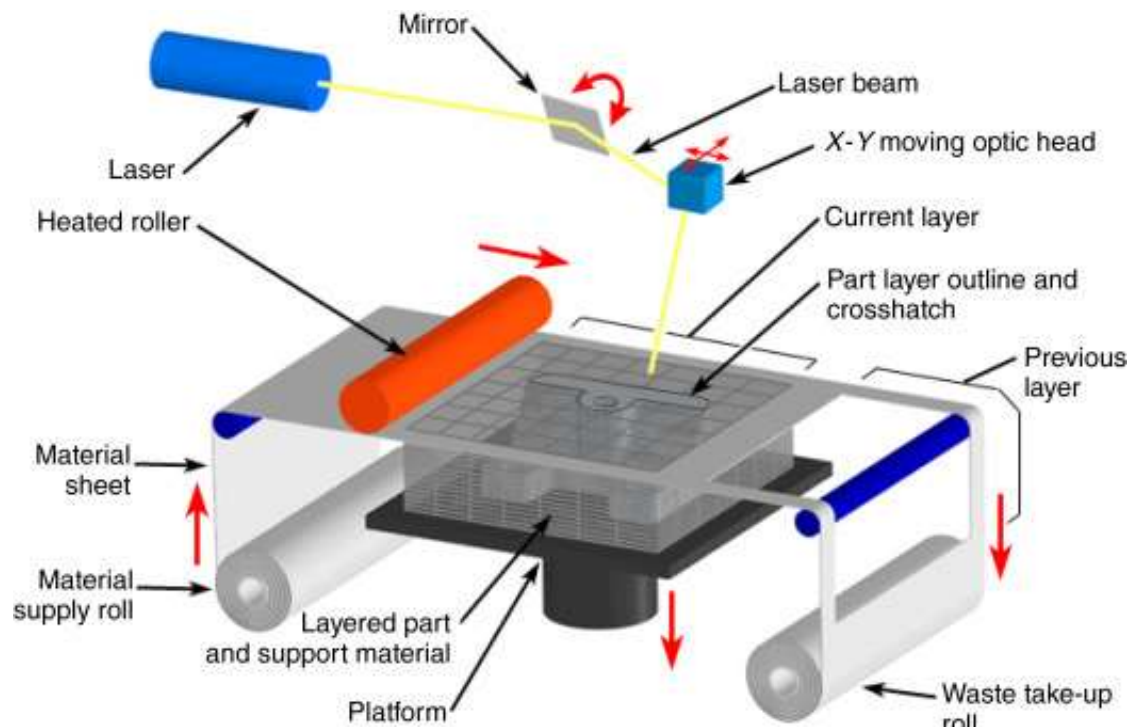
Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο συγκόλλησης των επιμέρους στρώσεων.

Συγκόλληση με χρήση κολλάς.

Συγκόλληση με χρήση θερμότητας.

Ένωση με χρήση σύσφιξης.

Συγκόλληση με χρήση υπέρηχων. (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 28 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας προσθετικής κατασκευής με χρήση επάλληλων φύλλων (TassiloMoritz, 2018)



### 2.13.2 Υλικά που χρησιμοποιούνται

Η τεχνολογία συγκόλλησης επάλληλων φύλλων μπορεί να χρησιμοποιήσει υλικά όπως πλαστικά, μέταλλα, κεραμικά υλικά όπως και υλικά βασισμένα στο χαρτί. Στην πρώτη χρήση αυτής της τεχνολογίας χρησιμοποιήθηκε υλικό τύπου χαρτιού κρεοπωλείου από την εταιρεία Helisys. Αποτελούνταν από υλικό επιφάνειας θερμοπλαστικού, το θερμοπλαστικό είχε το χαρακτηριστικό της τήξης με την επαφή του με το επόμενο στρώμα, και με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιούνταν η συγκόλληση. Το αποτέλεσμα ήταν, αν πρόκειται για υλικά με πάχος άνω των 5-6 mm, προϊόντα με ανθεκτικές ιδιότητες στα οποία η μετεπεξεργασία ήταν παρόμοια με αυτήν που γίνεται στα ξύλινα προϊόντα. Σε νεότερα μηχανήματα της εταιρείας (Mcor Technologies) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κοινά φωτοτυπικά χαρτιά μεγέθους A4, σαν υλικό συγκόλλησης χρησιμοποιείται κολλά τύπου υδάτινης βάσης.

Επίσης χρησιμοποιούνται μέταλλα τύπου αλουμίνιου και χάλυβες με μικρή ποσότητα σε άνθρακα. Αν η χρήση προορίζεται για λειτουργικά κομμάτια θα προτιμηθεί η χρήση υλικού τύπου εργαλειοχάλυβα. Αν η συγκόλληση γίνει με χρήση υπέρηχων τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, Inconel, το τιτάνιο, το αλουμίνιο, ο ορείχαλκος όπως επίσης και ο χαλκός. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν κεραμικά υλικά τα οποία θα είναι σε μορφή ταινιών με εσωτερικό κεραμικό υλικό πούδρας. Ως πολυμερή έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά τύπου PVC από εταιρείες όπως η Solidmension.

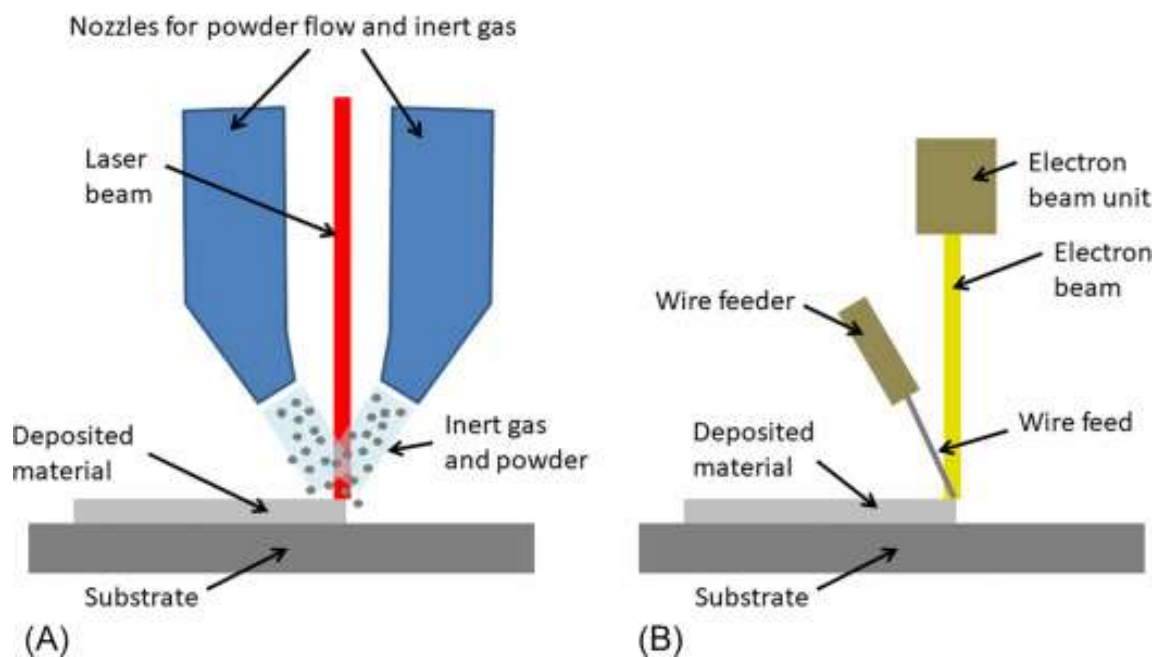
(Ian Gibson, 2017)

## 2.14 Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (DED-DIRECTED ENERGY DEPOSITION)

### 2.14.1 Γενικά

Αυτή η διεργασία χρησιμοποιεί μια σημειακή θερμική πηγή, είτε τύπου laser, είτε τύπου δέσμης ηλεκτρονίων. Σκοπός είναι η τήξη του υλικού μορφής πούδρας που εξωθείται από την κεφαλή ταυτόχρονα με την εναπόθεση του. Η κεφαλή με κάθε εναπόθεση - τήξη που πραγματοποιεί, δημιουργεί διαδοχικές γραμμές διάδρομων, που σε συνδυασμό αυτών, δημιουργούν μια στρώση υλικού. Η διαδικασία δεν πρέπει να συσχετίζεται με την διεργασία σύντηξης πούδρας σε περιβάλλον κλίσης,

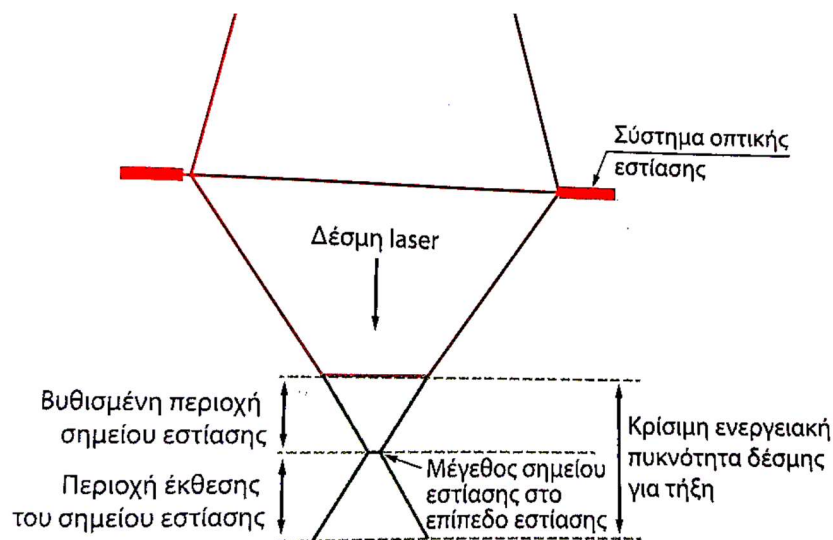
καθώς η τεχνολογία DED δεν συσσωματώνει ή τήκει υλικό, το οποίο είναι σε μορφή στρώσεων, αλλά η τήξη γίνεται ταυτόχρονα με την εναπόθεση. Η τεχνολογία έχει μεγάλη εφαρμογή στα υλικά μετάλλου, για αυτό και έχει και επιπλέον ονομασία εναπόθεση μετάλλου, αν και αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κεραμικά και σε πολυμερή. Αν το προς κατασκευή προϊόν είναι περίπλοκης γεωμετρίας τότε θα πρέπει να εφαρμοστούν στηρίξεις ή να χρησιμοποιηθούν πολυαξονικές κεφαλές εναπόθεσης υλικού. Για την διεξαγωγή της διεργασίας, η μικροδομή που έχουν τα προϊόντα αυτής της τεχνολογίας μπορεί να διαφέρει από στρώμα σε στρώμα ή ακόμα και στο περιβάλλον της ίδιας της στρώσης, χαρακτηριστικό των προϊόντων αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή πυκνότητα που πετυχαίνετε λόγω της εναπόθεσης, τήξης και στερεοποίησης του υλικού κατασκευής. (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 29 Στην παραπάνω σχηματική αναπαράσταση απεικονίζονται δυο τεχνολογίες DED με διαφορετικές πηγές θερμότητας. (S.L.Sing, 2020)

Στην Α) σχηματική αναπαράσταση χρησιμοποιείτε ως πηγή θερμότητας laser και το υλικό εξωθείτε σε μορφή πούδρας. Στην Β) η τήξη πραγματοποιείτε με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων και το υλικό τήκεται προερχόμενο από μορφή τύπου σύρματος.

Οι τεχνολογία DED μπορεί να χρησιμοποιήσει υλικά τα οποία είναι υπό μορφής πούδρας ή υπό μορφής νήματος. Όταν χρησιμοποιείτε ως υλικό μορφής πούδρας τότε, η ποσότητα της πούδρας που θα πρέπει να εφαρμοστεί είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που θα στερεοποιηθεί, καθώς δεν γίνεται πλήρης εκμετάλλευση. Το χαρακτηριστικό αυτό δεν είναι μόνο αρνητικό, καθώς η διεργασία γίνεται πιο ευέλικτη και μπορούν να γίνουν αλλαγές κατά την διάρκεια της διεργασίας με δυναμικό τρόπο. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται επικάλυψη των διάδρομων εκτύπωσης, χωρίς να συμβαίνει υπερδιόγκωση της στρώσης και κατά συνέπεια του τελικού προϊόντος. Να σημειωθεί επίσης ότι η ενεργειακή πυκνότητα που πρέπει να προσδίδει το laser στο υλικό πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, ώστε να πραγματοποιηθεί τήξη και στο υπόστρωμα του υλικού. (Ian Gibson, 2017)



*Εικόνα 30 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι περιοχές κάτω και επάνω από το σημείο εστίασης του laser, στο σημείο εστίασης η ενεργειακή πυκνότητα έχει πολύ μεγάλες τιμές και γίνεται η τήξη του υλικού. (Ian Gibson, 2017)*

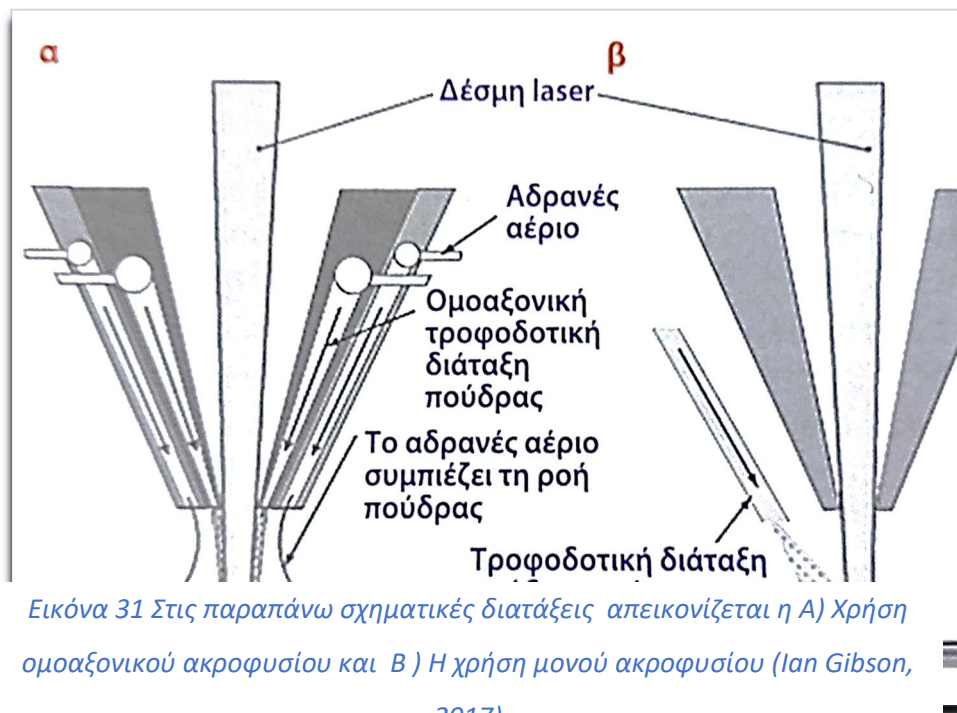
Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι στην τεχνολογία DED οι στρώσεις εφαρμόζονται με διαφορετική θέση προσανατολισμού. Οι γωνίες σε κάθε στρώση είναι κατά κανόνα πολλαπλάσια των 30, 45, και 90 μοιρών, ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι για να αποτραπεί η συνεχής ανάπτυξη των κόκκων προς μια κατεύθυνση όπως και οι ανισοτροπικές ιδιότητες και οι παραμένουσες τάσεις που θα είχαν δημιουργηθεί.

(Ian Gibson, 2017).

Τροφοδοσία τεχνολογίας εναπόθεσης κατευθυνόμενης ενεργειακής δέσμης

Χρήση πούδρας

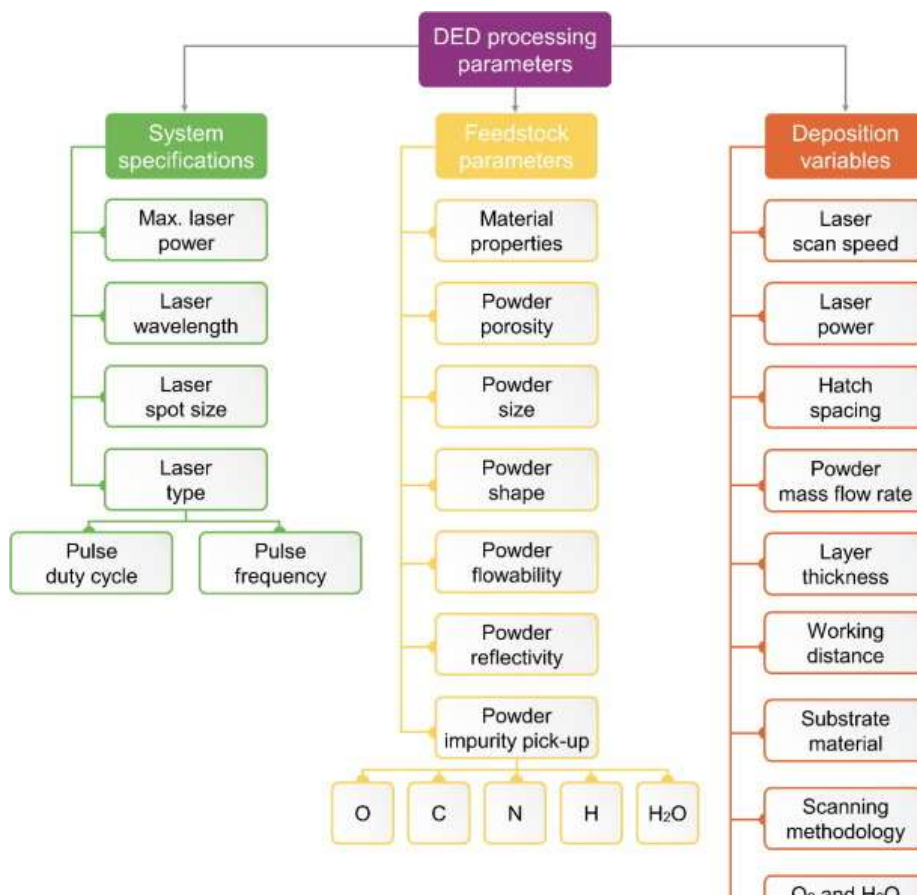
Ο τρόπος που το υλικό της πούδρας εφαρμόζεται στο σημείο κατασκευής της στρώσης είτε μέσω ομοαξονικού τρόπου τροφοδοσίας (χρήση τεσσάρων ακροφυσίων) είτε μέσω ενός μονού ακροφυσίου. Στη περίπτωση του ομοαξονικού συστήματος η πούδρα προστατεύεται από ένα αδρανές αέριο, που προστατεύει την κατασκευή από το φαινόμενο της οξειδωσης αν η διεργασία γίνεται σε περιβάλλον παρουσίας οξυγόνου. Στο ομοαξονικό σύστημα, η αξιοποίηση του υλικού της πούδρας επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό, βασικό μειονέκτημα είναι όμως το κόστος του ομοαξονικού συστήματος. Όταν χρησιμοποιείται ένα ακροφυσιο έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πιο απλή η συσκευή που σημαίνει και οικονομικότερη, μειονέκτημα του μονού ακροφυσίου είναι ότι η κατεύθυνσή της πρόωσης προσδιορίζει και την κατεύθυνση των διαδρόμων εναπόθεσης που δημιουργούν την γεωμετρία του τεμαχίου. (Ian Gibson, 2017)



## Χρήση νήματος

Με χρήση αυτής της τεχνολογίας η ποσότητα που εναποθέτετε είναι ίσα με την ποσότητα που λαμβάνεται από το νήμα υλικού, που σημαίνει ότι υπάρχει πλήρης αξιοποίηση αυτού. Τα νήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για διεργασίες οι οποίες είναι πιο απλές και δεν έχουν διαβαθμίσεις πάχους στα στρωματά τους. Αν οι απαιτήσεις είναι αυξημένες πρέπει να γίνεται έλεγχος στους παράγοντες που επηρεάζουν την γεωμετρία, πχ το ύψος της στρώσης, ο ρυθμός τροφοδοσίας του υλικού, η διάμετρος του νήματος όπως και η περιοχή σάρωσης. Να σημειωθεί ότι στις διεργασίες DED κατά κανόνα η δυνατότητα να δημιουργηθεί τελικό προϊόν με χαμηλό πορώδες, είναι πολύ σημαντική σε βαθμό που ξεπερνάει μέχρι και την γεωμετρική ακρίβεια του προϊόντος. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν νήμα ως υλικό τροφοδοσίας είναι καταλληλά μόνο για εφαρμογές οι οποίες έχουν προκαθορισμένη γεωμετρία υλικού εναπόθεσης, γνωστή προκαθορισμένη ακρίβεια και αν είναι δυνατόν κάποιον υβριδικό συνδυαστικό μηχανισμό με μια τεχνολογία αφαιρετικού χαρακτήρα (Ian Gibson, 2017)

## Παράμετροι της διεργασίας DED



Εικόνα 32 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την DED διεργασία (DavidSvetlizky, 2021)

### 2.14.2 Υλικά που χρησιμοποιούνται

Η χρήση αυτής της τεχνολογίας έχει ως σκοπό την παραγωγή τελικών προϊόντων τα οποία θα είναι λειτουργικά. Τα υλικά που έχουν υλοποιηθεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι αυτά που παρουσιάζουν σταθερή κατάσταση όταν βρίσκονται σε μορφή τηγματος. Τα μεταλλικά υλικά είναι αυτά τα οποία κατά κύριο λόγο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως υλικά συγκόλλησης. Τα υλικά δεν πρέπει να έχουν τα χαρακτηριστικά της μεγάλης ανάκλασης και της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας, καθώς αυτά δυσκολεύουν την λειτουργία της διεργασίας. Στο περιβάλλον της διεργασίας είναι επιθυμητό να υπάρχουν συνθήκες οι οποίες θα αποτρέπουν την δημιουργία οξειδίων.

Η χρήση κεραμικών υλικών για αυτήν την διεργασία είναι πιο σπάνια, καθώς η θερμοκρασία τήξεως τους είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί. Παρατηρείται το φαινόμενο δημιουργίας ρωγμών κατά την ψύξη του προϊόντος. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην απότομη θερμική μεταβολή, για αυτόν τον λόγο τα κεραμικά υλικά θα χρησιμοποιηθούν περισσότερο ως μέρος ενός συνθέτου υλικού.

Η διεργασία χρησιμοποιεί υλικό πούδρας σωματιδίων κατά προσέγγιση μεγέθους από 20 μm έως και 150μm. Η επιλογή αυτών των διαστάσεων των μικροσωματιδίων έχει ως σκοπό την καλύτερη τροφοδότηση στον χώρο της διεργασίας και την δυνατότητα ρευστοποίησης της πούδρας. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την διεργασία μπορούν να δημιουργηθούν πολλά κράματα από αρχική ανάμιξη των υλικών τύπου πούδρας.

(Ian Gibson, 2017)

Τα κυρία υλικά που χρησιμοποιούνται είναι χάλυβες (κράματα, ανοξείδωτοι) επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως υλικά και κράματα, από το νικέλιο, το κοβάλτιο, το αλουμίνιο, το τιτάνιο όπως και σύνθετα με προσθήκες μέχρι και κεραμικών.

(DavidSvetlizky, 2021)

## 2.15 Φωτοπολυμερισμός σε κάδο

### 2.15.1 Γενικά

Η διεργασία του φωτοπολυμερισμού σε κάδο χρησιμοποιεί υλικά τα οποία απαρτίζονται από ρητίνες, οι οποίες με την έκθεση τους σε ακτινοβολία αυτές στερεοποιούνται. Οι περισσότερες ρητίνες αντιδρούν χημικά, με τα μήκη κύματος ακτινοβολίας να είναι σε μεγέθη του υπεριώδους φάσματος. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και διατάξεις αυτής της τεχνολογίας που χρησιμοποιούν και ορατού φάσματος φως. Η τεχνολογία της στερεοποίησης των ρητινών μέσω χημικής αντίδρασης ονομάζεται φωτοπολυμερισμός. (Ian Gibson, 2017)

Οι τεχνολογίες φωτοπολυμερισμού λειτουργούν διαστρωματικά με την χρήση laser το οποίο θα στερεοποιήσει επιλεκτικά ρητίνη και θα δημιουργήσει ένα στρώμα. Η διαδικασία θα επαναληφθεί με το επόμενο στρώμα που θα τοποθετηθεί επάνω στο προηγούμενο, μέχρι να δημιουργηθεί ένα τελικό τρισδιάστατο προϊόν (Ian Gibson, 2017)

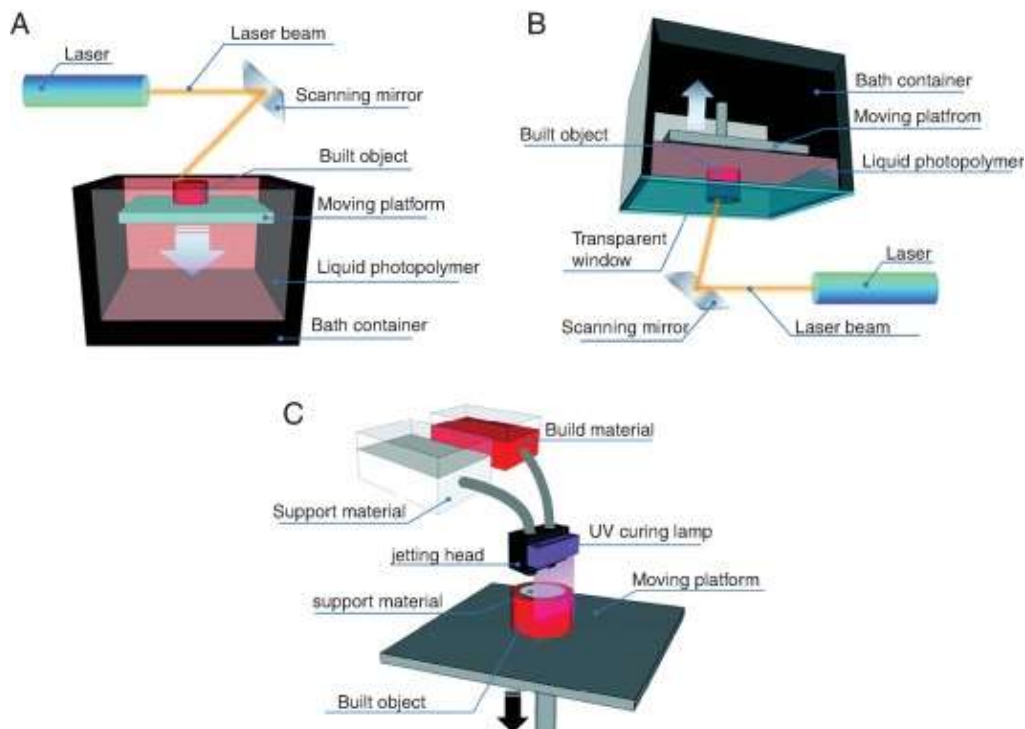
Η διεργασία έχει χρησιμοποιήσει σε διατάξεις που υπάρχουν στην αγορά ακτινοβολίες τύπου (X, γ, UV, ορατό φως). Οι διατάξεις όσο αναφορά την μορφή της λειτουργίας της διεργασίας συνήθως είναι μια από τις παρακάτω (Ian Gibson, 2017)

Οι μηχανές οι οποίες, χρησιμοποιούν laser το οποίο στοχεύει σε συγκεκριμένο σημείο και λειτουργεί με διανυσματική προσέγγιση. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η προσέγγιση είναι η πιο διαδεδομένη στην αγορά. (Ian Gibson, 2017)

Η δεύτερη προσέγγιση γίνεται με στόχο την ταυτόχρονη ολόκληρη προβολή της επιφάνεια του στρώματος ονομάζεται φωτοπολυμερισμός, με χρήση μάσκας ή μπορεί να διατυπωθεί και ως διαστρωματική. (Ian Gibson, 2017)

Η χρήση ακρίβειας μπορεί να επιτευχθεί με χρήση δυο φωτονίων οι οποίες χρησιμοποιούν σημειακές συντεταγμένες (Ian Gibson, 2017)





Εικόνα 33 Διατάξεις τεχνολογίας φωτοπολυμερισμού. (A.Patel, 2020)

Στην Α εικόνα παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας της τεχνολογίας μιας μηχανής στερεολιθογραφίας (τύπου SLA) με την διάταξη να είναι τύπου βυθισμένης πλατφόρμας που χαμηλώνει το ύψος της στον Z άξονα με σκοπό να δημιουργήσει νέα στρώση (Ian Gibson, 2017).

Στην Β εικόνα η πλατφόρμα λειτουργεί αντίθετα από την πρώτη, δηλαδή είναι έξω από την δεξαμενή ρητίνης και έχουμε αύξηση του ύψους της πλατφόρμας κάθε φορά που δημιουργείτε μια νέα στρώση. (Ian Gibson, 2017)

Στην C απεικονίζεται η διεργασία γίνεται με χρήση της τεχνολογίας ink-jetted με εφαρμογή υλικού εκτύπωσης όπως επίσης και του υλικού στήριξης. (A.Patel, 2020)

Φωτοπολυμερισμός σε κάδο με χρήση σάρωσης τύπου laser

Η διεργασία χρησιμοποιεί τον μηχανισμό της επιλεκτικής στερεοποίησης του υλικού με χρήση UV laser. Το υλικό τύπου ρητίνης και η στερεοποίηση γίνεται με την χρήση φωτοπολυμερισμού. Η διεργασία πραγματοποιείται σε μια πλατφόρμα, η οποία έχει επαφή με το υλικό της ρητίνης που βρίσκεται στον κάδο, στην συνέχεια η δέση laser πραγματοποιεί την επιλεκτική στερεοποίηση μιας στρώσης. Όταν ολοκληρωθεί αυτή η στερεοποίηση της στρώσης η διαδικασία θα επαναληφθεί για

τα αντίστοιχα δεδομένα των άλλων στρώσεων του προϊόντος, Τα δεδομένα έχουν προκύψει από ένα CAD μοντέλο το οποίο έχει μετατραπεί σε ένα STL αρχείο. Στην συνέχεια διατίθεται στον αριθμό των στρώσεων του κομματιού ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος της κάθε στρώσης και μέσω αλγορίθμων έχει μετατραπεί σε γλώσσα μηχανής ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η διεργασία. Αφού πραγματοποιηθεί η διεργασία από το προϊόν πρέπει να αφαιρεθεί η υπολιπούσα ρητίνη και τα στηρίγματα και το προϊόν να πολυμεριστεί σε UV ακτινοβολία για την βελτίωση των ιδιοτήτων και της σταθερότητας του. (Ian Gibson, 2017)

### **Το πάχος της στρώσης**

Το πάχος της στρώσης κατά την διεργασία του πολυμερισμού έχει άμεση σχέση με το βάθος που θα γίνει η εστίαση, η ισχύς του laser, η ταχύτητα που θα πραγματοποιηθεί η σάρωση και η διάρκεια που θα διαρκέσει η διεργασία. Ο τύπος που μπορεί να περιγράψει αυτό το φαινόμενο είναι ο παρακάτω (AshishM.TECH, 2019)

$$\text{Πάχος στρώματος } CD = DP * \ln\left(\frac{E}{Ec}\right)$$

(AshishM.TECH, 2019)

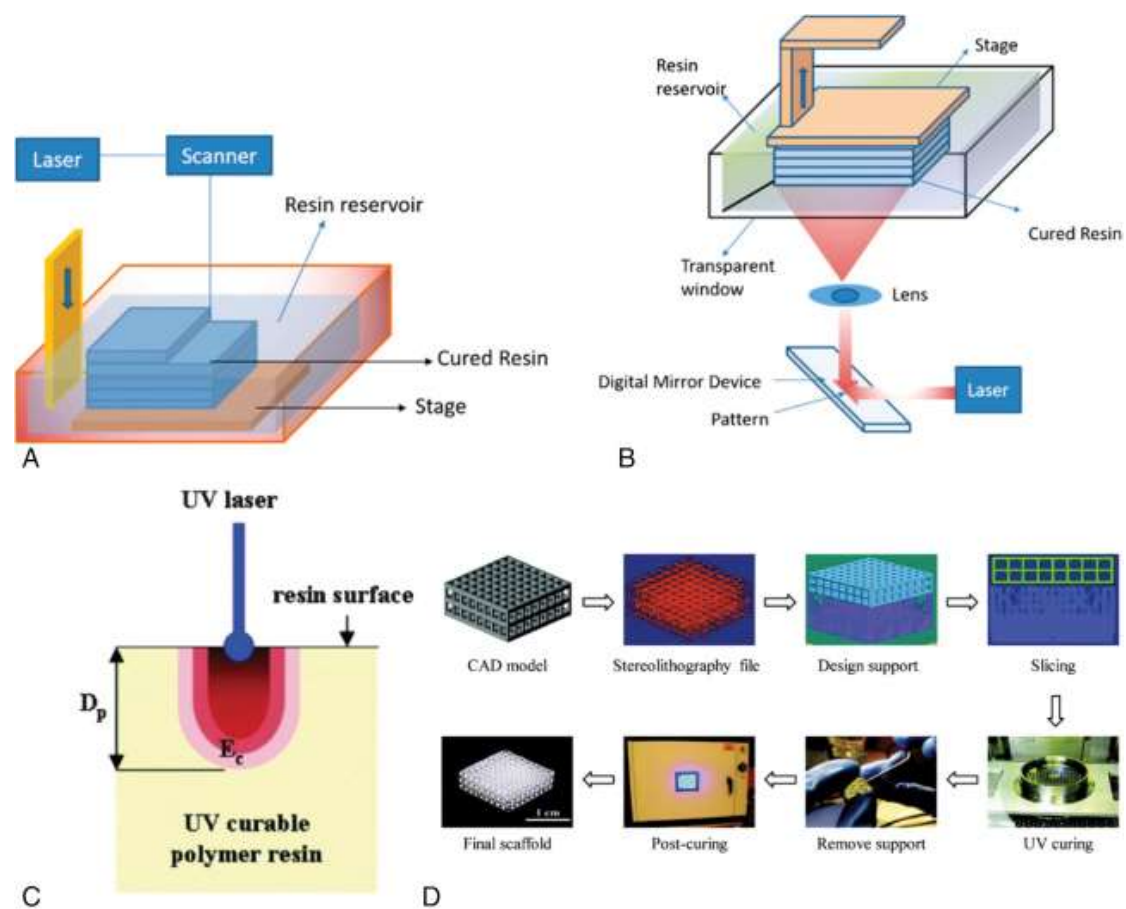
Οπού ο ορός DP αποτελεί το βάθος που θα διεισδύσει η ακτινοβολία.

Ec είναι η κρίσιμη ενέργεια του υλικού ρητίνης που χρησιμοποιείται.

Ο ορός E υποδηλώνει την ενέργεια που εξέρχεται από την πηγή ακτινοβολίας.

Η διεργασία και το αποτέλεσμα της επηρεάζονται και από παραμέτρους όπως τα χαρακτηριστικά του υλικού (σύνθεση του υλικού, ιξώδες του υλικού, δυνατότητα στερεοποίησης). Η θέση εκτύπωσης και ο προσανατολισμός και η ταχύτητα της διεργασίας, όπως και μετά την διεργασία της εκτυπωσης η εισαγωγή της σε μεταπολυμερισμό. Για παράδειγμα σε UV ακτινοβολία, το χρονικό διάστημα που θα παραμείνει σε αυτήν έχει επίδραση στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος (AshishM.TECH, 2019)

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακρίβειά στον κάθετο άξονα, έχει άμεση σχέση με το πάχος των στρωμάτων της διεργασίας, ενώ στους άξονες της επιφάνειας η ακρίβεια είναι συνάρτηση της διαμέτρου της δέσμης ενέργειας. Η δέσμη έχει μέγεθος κατά προσέγγιση ( $D = 80-200 \mu\text{m}$ ) οι διατάξεις συνήθως χρησιμοποιούν εξαρτήματα λαμπών τύπου Xenon και όσο αναφορά την πηγή ενέργειας τύπου laser χρησιμοποιούνται τύπου HeCd. Αν ως πρώτο μέλημα της διεργασίας είναι η ακρίβειά τότε χρησιμοποιούνται laser δυο φωτονίων (AshishM.TECH, 2019)



Εικόνα 34 Απεικόνιση διατάξεων τύπου bath και τύπου vat, C) βάθους επίδρασης UV laser και D) βήματα της διεργασίας. (AshishM.TECH, 2019)

Στο A σκέλος της παραπάνω εικόνας παρουσιάζεται η διεργασία στερεολιθογραφίας. Με χρήση μηχανήματος εκτύπωσης σε διαμόρφωση ελεύθερης επιφάνειας (Bath configuration). Η χρήση αυτής της μεθόδου μηχανήματος έχει περιορισμούς οι οποίοι είναι χωροταξικοί, δηλαδή λόγω του μεγέθους του κάδου και κατά συνέπεια του μειωμένου ύψους που μπορεί να

επιτευχθεί η εκτύπωση. Μετα το πέρας της διεργασίας ο καθαρισμός της μηχανής από υπολείμματα ρητίνης είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Δεν θα πρέπει να γίνεται χημική αντίδραση μεταξύ του υλικού εκτύπωσης (ρητίνης) και του οξυγόνου που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Όσο αναφορά την αποτελεσματικότητα του μηχανήματος που λειτουργεί με αυτό το είδος διάταξης, εξαρτάται από χαρακτηριστικά της δέσμης. Το βάθος που μπορεί να γίνει η εστίαση η ταχύτητα, και η δύναμη της δέσμης, όπως επίσης και από χαρακτηριστικά του υλικού της σύστασης και των ιδιοτήτων αυτής. Βέβαια υπάρχουν και οι παράμετροι που σχετίζονται με την διαδικασία της διεργασίας όπως ο προσανατολισμός της εκτύπωσης το επιλεγμένο πάχος των στρώσεων και η ταχύτητα της διεργασίας (AshishM.TECH, 2019)

Στο Β σκέλος της εικόνας παρουσιάζεται η διάταξη τύπου bat περιορισμένης επιφάνειας (constrained surface) η διάταξη χρησιμοποιεί συσκευή η οποία είναι τύπου ψηφιακού καθρέπτη. Αποτελείται από πολλούς μικρότερους καθρέπτες. Η διεργασία στερεοποιεί ένα στρώμα ρητίνης. Η διάταξη έχει την πηγή ενέργειας στο κάτω μέρος της και στοχεύει από πάνω της, στο χώρο που βρίσκεται το υλικό (ρητίνη). Η πηγή ενέργειας λειτουργεί με χρήση φωτοπολυμερισμού, με σκοπό να στερεοποιήσει την ρητίνη που βρίσκεται κάτω από την κινούμενη πλατφόρμα και πάνω από μια διαπερατή και διαφανή στο φως επιφάνεια. Στα επόμενα βήματα της διεργασίας η πλατφόρμα θα αυξήσει το ύψος της με σκοπό την είσοδο μη στερεοποιημένης ρητίνης στην επιφάνεια που έχει ήδη σκληρυνθεί και την αποκόλληση της ήδη στερεωμένης ρητίνης από την βάση του χώρου της ρητίνης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να πραγματοποιηθεί η όλη η διεργασία της εκτύπωσης (AshishM.TECH, 2019)

Η χρήση του φωτοπολυμερισμού μέσω της διάταξης περιορισμένης επιφάνειας (Bat) είναι πιο γνωστή στην αγορά καθώς εμπεριέχει πλεονεκτήματα σε σχέση με την διάταξη ελεύθερης επιφάνειας (Bath). Μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η διάταξη τύπου (Bat) είναι ότι το προϊόν εκτύπωσης δεν έχει μεγάλο περιορισμό όσο αναφορά το ύψος εκτύπωσης. Η χρήση υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την διαδικασία είναι μικρότερη, επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την διάταξη η ρητίνη κατά την διάρκεια του φωτοπολυμερισμού δεν έχει

επαφή με το οξυγόνο που βρίσκεται στο περιβάλλον. Η χημική αντίδραση γίνεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής ρητίνης, σε αντίθεση η διάταξη ελεύθερης επιφάνειας (Bath) παρουσιάζει πλεονέκτημα όσο αναφορά την δομή του προϊόντος αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην διεργασία περιορισμένης επιφάνειας (Bat ) η αποκόλληση του υλικού από την βάση του χώρου της ρητίνης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα είτε την θραύση του προϊόντος , είτε την αύξηση της τραχύτητας.

Η απόδοση που προκύπτει από διατάξεις περιορισμένης επιφανείας (Bat) είναι συνάρτηση των παρακάτω παραμέτρων.

Της ενέργειας φωτός που εξέρχεται από την πηγή ( χρόνος και ένταση).

Της πλατφόρμας της διεργασίας ( όπου υπάρχουν τα εξαρτήματα προβολής και ο χώρος της ρητίνης ).

Η ρύθμιση του φωτός ( από τους ρυθμιστές της ενεργειακής δέσμης και τα εξαρτήματα των καθρεφτών).

Και το χρονικό περιθώριο το οποίο θα υπάρξει μετά από την διάρκεια της ωρίμανσης.

(AshishM.TECH, 2019)

Για να αναβαθμιστούν οι μηχανικές ιδιότητες και να υπάρξουν προβλεπόμενες αντοχές και σίγουρος πολυμερισμός όλης της ρητίνης που υπάρχει στο προϊόν η διαδικασία που ακολουθεί και στις δυο διατάξεις είναι η μετασκληρυνση σε διάταξη τύπου σκλήρυνσής με χρήση υπεριώδης ακτινοβολίας (UV Curing).

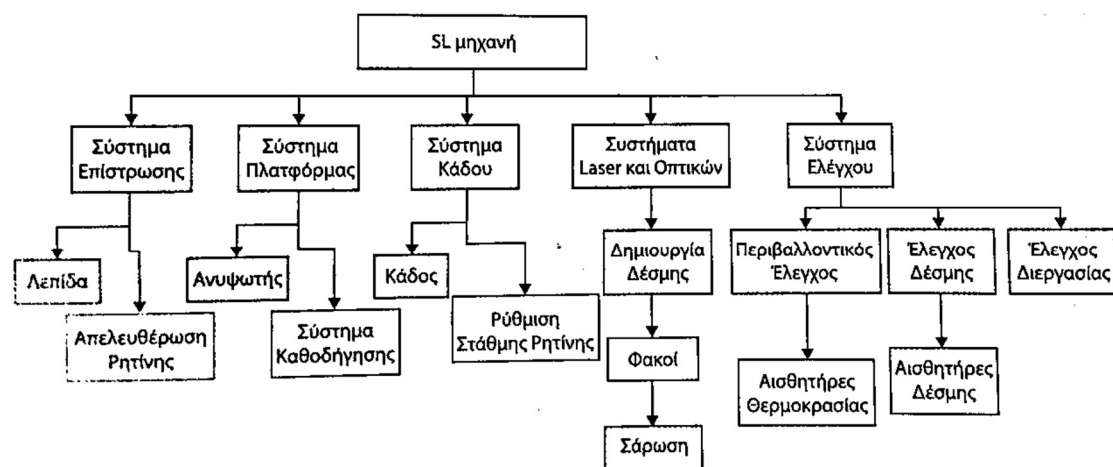
(AshishM.TECH, 2019)

Για να βελτιωθεί η διάταξη στην ανάλυση των προϊόντων αλλά να γίνει και πιο γρήγορη όσο αναφορά την παραγωγή των προϊόντων. Χρησιμοποιείται τεχνολογία οποία έχει ως σκοπό να μην πραγματοποιείται ένωση μεταξύ πρόσφατα σκληρυνθέντος υλικού (ρητίνης) και της βάσης της δεξαμενής . Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται DPL και λειτουργεί με χρήση οξυγόνου που δημιουργεί ένα στρώμα το οποίο δεν επιτρέπει στην επιφάνεια της βάσης να γίνεται φωτοπολυμερισμός της ρητίνης. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και πιο εξελιγμένες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό η CDLP η οποία αναφέρεται ως συνεχής

επεξεργασία φωτός, η CLIP όπου αποτελεί την χρήση της τεχνολογίας υγρής διεπαφής.(AshishM.TECH, 2019)

Στις τεχνολογίες αυτές, που χρησιμοποιούν διεργασίες φωτοπολυμερισμού δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χρήση πολλών ρητινών σε μια διεργασία (ταυτόχρονα), επίσης αυτές οι ρητίνες είναι είτε εποξικές είτε ακρυλικές. Επίσης να σημειωθεί ότι τα υλικά έχουν την τάση να συρρικνώνονται κατά την διεργασία του φωτοπολυμερισμού. (AshishM.TECH, 2019)

Τα υποσυστήματα που απαρτίζουν μια μηχανή τύπου SL



*Εικόνα 35 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται και κατηγοριοποιούνται τα υποσυστήματα που απαρτίζονται σε μια SL μηχανή (Ian Gibson, 2017)*

Η χρήση του συστήματος της πλατφόρμας έχει ως σκοπό την στήριξη του προϊόντος και περιλαμβάνει ένα σύστημα ανύψωσης και αντίστοιχα μείωσης του ύψους της το σύστημα αλλαγής ύψους λειτουργεί με χρήση κοχλία τύπου κίνησης (Ian Gibson, 2017).

Ο κάδος είναι μια ανοικτή δεξαμενή η οποία έχει ως σκοπό να περιέχει το υλικό της ρητίνης και μαζί με αυτόν υπάρχει και το σύστημα που ελέγχει την στάθμη της ρητίνης και αναπληρώνει την ρητίνη όταν η στάθμη μειώνεται.

(Ian Gibson, 2017)

Το οπτικό το οποίο συγκαταλέγεται σε συνδυασμό με το laser, στο οποίο χρησιμοποιούνται οπτικά για την εστίαση του σε συγκεκριμένα σημεία, επίσης στο μηχανισμό συμπεριλαμβάνονται και γαλβανόμετρα τα οποία έχουν το ρολό της

διαδρομής του laser όταν πραγματοποιείται σάρωση πάνω στην επιφάνεια του κάδου. Να σημειωθεί ότι οι σύγχρονες μηχανές αυτής της τεχνολογίας έχουν lasers στέρεας κατάστασης τα οποία έχουν το πλεονέκτημα της καλύτερης σταθερότητας σε σχέση με τα lasers αερίου. (Ian Gibson, 2017)

Ο έλεγχος της διεργασίας όσο αναφορά την σειρά που πραγματοποιούνται οι εργασίες στην μηχανή γίνεται από τον εκλεκτή της διεργασίας, ο έλεγχος της διεργασίας έχει πολλά υποσυστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την έναρξη και την λήξη των εργασιών όπως για την εφαρμογή της λεπίδας επίστρωσης ή για να έρθει στα σωστά επίπεδα η ποσότητα ρητίνης. Για να χρησιμοποιηθεί η δέσμη του laser ή επίσης και οι ελεγκτές οι οποίοι ελέγχουν τους παραμέτρους του laser, το βάθος που θα πραγματοποιηθεί η διείσδυση ο ρυθμός που θα πραγματοποιηθεί η σάρωση, να σημειωθεί ότι υπάρχουν και εκλεχτές ανάδρασης. Άλλη μια κατηγορία εκλεχτών είναι οι εκλεχτές περιβάλλοντος οι οποίοι ρυθμίζουν την θερμοκρασία της ρητίνης και σε μερικά μοντέλα μηχανών είναι δυνατή και η ρύθμιση της υγρασίας στο χώρο της διεργασίας. (Ian Gibson, 2017)

Σύστημα επίστρωσης, αυτό το εξάρτημα χρησιμοποιεί μια λεπίδα η οποία έχει ως σκοπό την εξομάλυνση της ρητίνης που βρίσκεται στον χώρο της διεργασίας, αλλά και την απώθηση νέων στρωμάτων ρητίνης. Η λεπίδα είναι γνωστή με την ονομασία Zephyr η λειτουργία της γίνεται με χρήση συστήματος κενού, και η διαδικασία πραγματοποιείται με απώθηση ρητίνης στα σημεία τα οποία δεν υπάρχει το υλικό της ρητίνης. Ο μηχανισμός για την απόθεση χρησιμοποιεί το βάρος της ρητίνης το οποίο είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με το κενό, να σημειωθεί ότι σημαντικοί παράμετροί της διεργασίας μπορούν να θεωρηθούν, η ευθυγράμμιση του εξαρτήματος της λεπίδας όπως και η ταχύτητα της ή και η απόσταση από το υλικό. (Ian Gibson, 2017)

### **2.15.2 Υλικά**

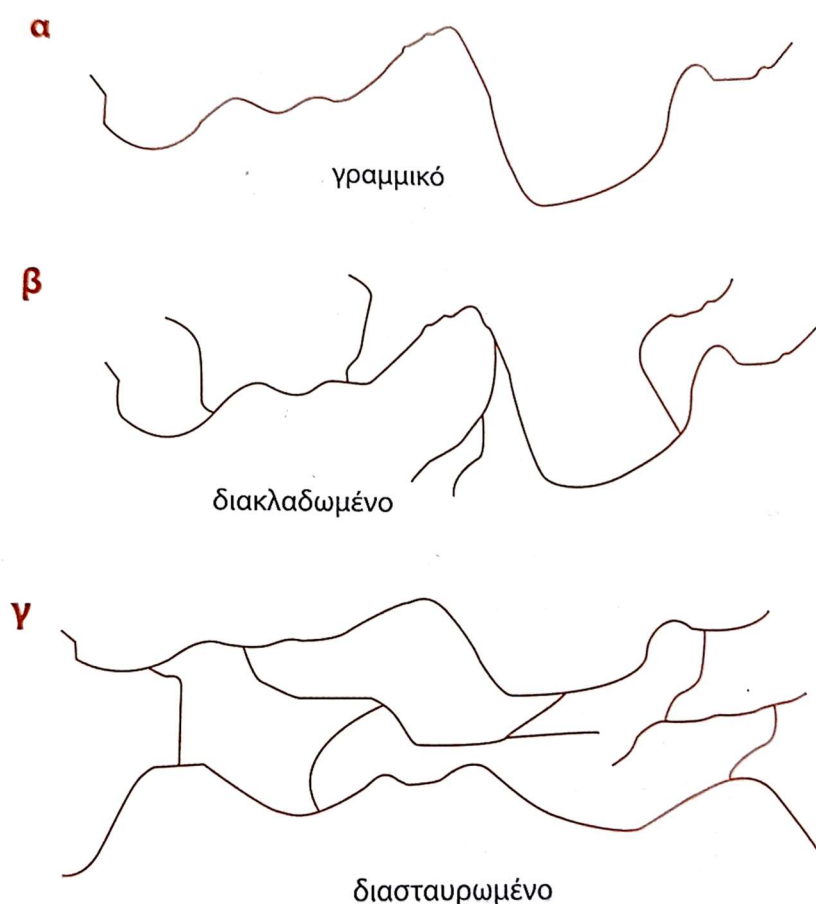
#### **Φωτοπολυμερη**

Στην τεχνολογία SL χρησιμοποιείτε η UV ακτινοβολία ώστε να γίνει η χημική αντίδραση και να πραγματοποιηθεί η στερεοποίηση.



Τα υλικά πολυμερών που κατηγοριοποιούνται όσο αναφορά την μοριακή δομή τους σε γραμμικά ή διακλαδωμένα είναι κατά κύριο λόγο τα θερμοπλαστικά, οι συγκεκριμένες μοριακές δομές επιτρέπουν στο υλικό την τήξη και την στερεοποίηση τους σε ρυθμούς επαναλαμβανόμενους. (Ian Gibson, 2017)

Τα υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως VP φωτοπολυμερή έχουν ως είδος μοριακής δομής τύπου διασταυρωμένου, όπου σε αυτό το είδος δομής δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί η τήξη του υλικού. Στα υλικά με αυτήν την δομή παρατηρούνται λιγότερα φαινόμενα τύπου χαλάρωσης και ερπυσμού. (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 36 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται οι μοριακές δομές που συναντιούνται στα θερμοπλαστικά και στα VP φωτοπολυμερή. (Ian Gibson, 2017)

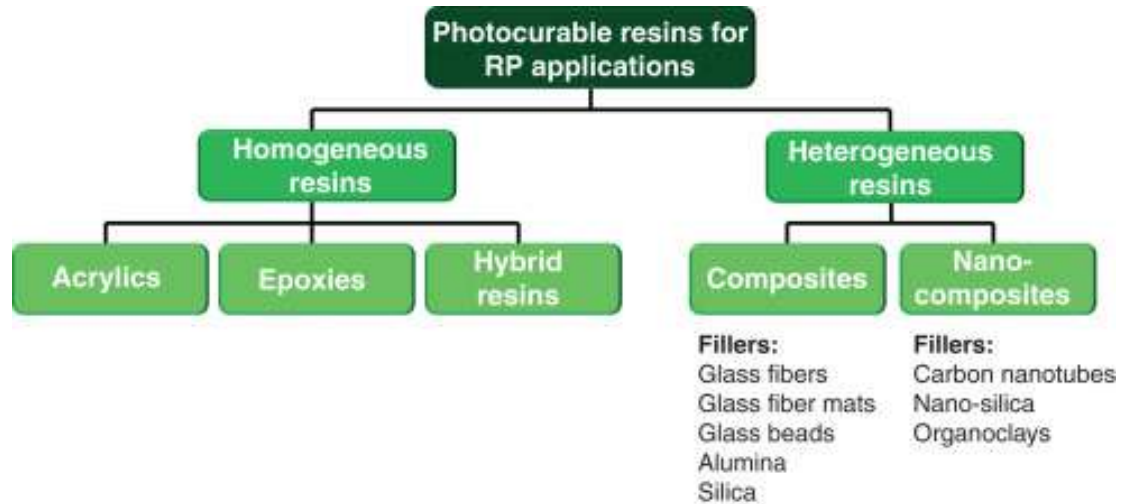
Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι εποξειδικά είτε και ακρυλικά είτε συνδυασμός αυτών. (Ian Gibson, 2017)

Τα υλικά τα οποία ανήκουν στις εποξειδικές ρητίνες έχουν το χαρακτηριστικό ότι τα προϊόντα που παράγουν είναι καλύτερα στις ιδιότητες που έχουν σχέση με την

ανθεκτικότητα αλλά και την σκληρότητα τους. Η επίτευξη της καλύτερης ακρίβειας είναι γεγονός, σε αντίθεση με τις ακρυλικές ρητίνες, αυτό οφείλεται στο ότι οι ακρυλικές ρητίνες συρρικνώνονται όταν στερεοποιούνται σε βαθμό (5-20)% που υποβαθμίζει την ακρίβεια της διεργασίας σε αντίθεσή με τις εποξειδικές ρητίνες οι οποίες έχουν συρρίκνωση της τάξεως του (1-20) %. Η μικρότερη συρρίκνωση των εποξειδικών ρητινών δίνει το πλεονέκτημα έναντι των ακρυλικών της καλύτερης επικόλλησης και τις μειωμένες τάσεις που μπορούν να δημιουργηθούν κατά την διεργασία της χημικής αντίδρασης – στερεοποίησης. Να αναφερθεί ότι στην χρήση εποξειδικών ρητινών δεν χρειάζεται να σταματήσει η διεργασία του φωτοπολυμερισμού, αν στο περιβάλλον υπάρχει το στοιχείο του οξυγόνου. Με αυτό το δεδομένο χρειάζεται μικρότερος αριθμός φωτοεκκινήτων, που έχει ως πλεονέκτημα το χαρακτηριστικό, ότι θα υπάρχουν κατά την διεργασία λιγότερες οσμές. (Ian Gibson, 2017)

Μειονέκτημα των εποξειδικών ρητινών μπορεί να θεωρηθεί το χαρακτηριστικό της ψαθρότητας όπως και οι μειωμένοι ρυθμοί που παρουσιάζουν όσο αναφορά την φωτοταχύτητα των προϊόντων της διεργασίας. Να σημειωθεί ότι παρουσιάζουν αδυναμία στην επίτευξη της διεργασίας όταν στο περιβάλλον υπάρχει υγρασία. Για να υπάρξει σταθερότητα όσο αναφορά τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος προστίθεται στο υλικό ακρυλικό. Η μίξη των υλικών έχει ως αποτέλεσμα στην διεργασία να γίνεται πιο ταχύτερα με την αντοχή του υλικού να φτάνει πιο γρηγορά στα επιθυμητά επίπεδα και έτσι να αποφεύγεται η εμφάνιση στρεβλώσεων. Η χρήση εποξειδικών ρητινών με χρήση προσθήκης ακρυλικού έχει επίσης το χαρακτηριστικό της μείωσης του φαινομένου της ψαθρότητας. (Ian Gibson, 2017).

Στην αγορά οι περισσότερες ρητίνες οι οποίες είναι διαθέσιμες για αγορά είναι τύπου εποξειδικών με προσθήκη ακρυλικού, ώστε να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα και των δυο τύπων υλικού. (Ian Gibson, 2017)



Εικόνα 37 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα είδη των υλικών τύπου ρητινών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μηχανές τεχνολογίας SLA. (M.Gurr, 2012)

Στα ετερογενή υλικά ρητινών υπάρχουν προσθήκες από σύνθετα και νανοσύνθετα υλικά για βελτίωση των ιδιοτήτων των ρητινών. (M.Gurr, 2012)

#### Χημεία των φωτοπολυμερών

Τα υλικά που ανήκουν στην κατηγορία VP φωτοπολυμερών αποτελούνται από πολλούς τύπους υλικών, μερικά από αυτά είναι τα αραιωτικά, οι φωτοεκκινητές, όπως και τα υλικά τα οποία έχουν ως σκοπό να ελέγξουν την ευκαμψία του υλικού που προορίζεται για φωτοπολυμερισμό, επίσης χρησιμοποιούνται υλικά όπως οι σταθεροποιητές όπως και μονομερή σε υγρή μορφή.

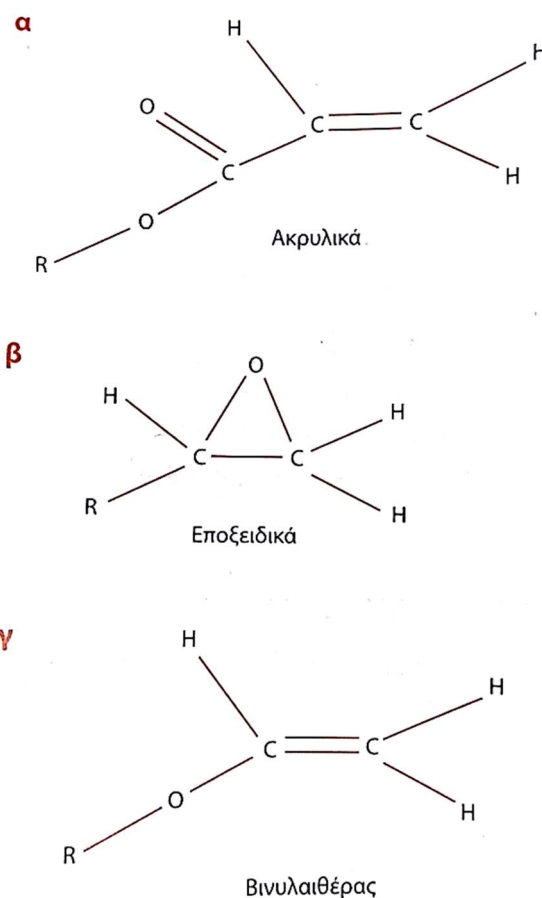
Τα μονομερή που βρίσκονται σε υγρή μορφή έχουν το χαρακτηριστικό να αντιδρούν μαζί με τους φωτοεκκινητές όταν εκτίθενται σε ακτινοβολία τύπου UV. Οι φωτοεκκινητές ενεργοποιούνται, ένας φωτοεκκινητής δρα χημικά με ένα μόριο μονομερούς υλικού και δημιουργείται η αλυσίδα, στην συνέχεια γίνονται και άλλες αντιδράσεις που ως αποτέλεσμα έχουν την δημιουργία πολυμερικών αλυσίδων μακρομορίων και έπειτα ο μηχανισμός λειτουργεί με την σύνδεση τους η οποία είναι διασταυρούμενης μορφής. Ως αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθούν ισχυροί

δεσμοί (ομοιοπολικοί) μεταξύ των αλυσίδων. Η διεργασία του πολυμερισμού μπορεί να χαρακτηριστεί ως ο μηχανισμός ο οποίος τα μικρά μόρια θα ενωθούν και θα δημιουργήσουν μεγαλύτερα. (Ian Gibson, 2017)

Στην αγορά τα συστήματα όποια χρησιμοποιούνται λειτουργούν κατά κανόνα με τα παρακάτω συστήματα χημείας.

- Ακρυλικός Φωτοπολυμερισμός ( ελευθέρων ριζών)
- Εποξειδικός φωτοπολυμερισμός και με χρήση Βινυλαιθέρας (Κατιοντικός)

(Ian Gibson, 2017)



*Εικόνα 38 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η μοριακή δομή των υλικών που συγκαταλέγονται στα VP μονομερή. (Ian Gibson, 2017)*

Η χρήση γραμμάτων υποδηλώνουν τον αριθμό των ατόμων όπου C = άνθρακας, H = υδρογόνο και ο ορός R χρησιμοποιείται για να δηλώσει την συμπλοκή των μορίων. Να σημειωθεί ότι μια συμπλοκή βινυλίου αποτελείται από έναν δεσμό ο οποίος είναι διπλός και απαρτίζεται από μια δυάδα ατόμων του άνθρακα, αυτοί οι

σχηματισμοί του βινυλίου είναι που επιτρέπει στον μηχανισμό να δημιουργήσει δεσμούς οι οποίοι να είναι διασταυρωμένοι. (Ian Gibson, 2017)

Αν και τα ακρυλικά πολυμερή εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς στερεοποίησης, δεν χρησιμοποιούνται τόσο όσο τα εποξειδικά πολυμερή. Το μειονέκτημα της συρρίκνωσης και τα προβλήματα τύπου κύρτωσης και στρέβλωσης είναι πιο πιθανά να συμβούν. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούνται περισσότερο τα εποξειδικά η και τα υλικά με χρήση βινυλαιθέρων, είναι γιατί δεν παρουσιάζεται μεγάλο ποσοστό συρρίκνωσης. Τα εποξειδικά υλικά έχουν δακτυλίους οι οποίοι κατά την διεργασία έχουν την τάση να διαστέλλονται και να εμφανίζονται κενά, που έχουν ως αποτέλεσμα άλλους χημικούς δεσμούς, η μεγέθυνση αυτών των δακτυλίων δεν επιφέρει μεγάλη αλλαγή στον χώρο που καταλαμβάνει το υλικό κατά την χημική αντίδραση, γιατί ο αριθμός και ο τύπος αυτών των δεσμών δεν αλλάζουν πριν και μετά την χημική διεργασία. (Ian Gibson, 2017)

Επίσης να αναφερθεί ότι η διεργασία πολυμερισμού μονομερών τύπου VP αποτελεί εξώθερμη αντίδραση (Ian Gibson, 2017)

## **2.16 Πλεονεκτήματα Μειονεκτήματα AM Διεργασίας**

Η τεχνολογία AM έχει δημιουργήσει πολλές θετικές απόψεις και προοπτικές ανάπτυξης, καθώς θεωρείτε ότι θα αναδιαμορφώσει την κατασκευαστική παραγωγή προϊόντων και πιστεύεται ότι πιθανών θα προκαλέσει μια νέα βιομηχανική επανάσταση. (Ian Gibson, 2017)

Ένα από τα πλεονεκτήματα τα οποία υπάρχουν στην χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι, η αύξηση της ταχύτητας παραγωγής. Αναλύεται στην μείωση στον χρόνο παραγωγής ενός προϊόντος, αλλά και προγενέστερα καθώς από την διαδικασία σχεδιασμού του προϊόντος μέχρι και της κατασκευής γίνεται με αποκλειστική χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, που δίνει άμεση συσχέτιση των δεδομένων του σχεδιαστικού τρισδιάστατου μοντέλου CAD της μετατροπής και της κατασκευής του. (Ian Gibson, 2017)

Η μείωση των βημάτων από τον σχεδιασμό στην τελική κατασκευή ( η οποία αποτελείτε από ένα βημα) και το γεγονός ότι η πολυπλοκότητά των παραγόμενων τεμαχίων δεν επηρεάζει αρνητικά την κατασκευαστική λειτουργία. Σε αντίθεση με

τις αφαιρετικές κατεργασίες όπου η αύξησης της πολυπλοκότητας αποτελεί άμεση συνάρτηση της δυσκολίας κατασκευής του παραγόμενου προϊόντος.

Η μείωση των υλικών τροφοδοσίας και η μείωση του περιθωρίου λάθους από τους χείριστες καθώς η διαδικασία γίνεται πιο απλούστερη αν συγκριθεί με κατεργασίες τύπου CNC ή Χύτευσης. (Ian Gibson, 2017)

### 2.16.1 FDM

Ως πλεονεκτήματα της τεχνολογίας FDM είναι η δυνατότητα αγοράς ενός εκτυπωτή με μεγάλο κατασκευαστικό χώρο εκτύπωσης σε τιμή / όγκο εργασίας η οποία να είναι ασυναγώνιστη σε σχέση με τις άλλες μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι λόγω της σταδιακής μειώσεις των τιμών των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται. (Grames, 2020)

Χρησιμοποιούμενα υλικά

Τα υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι αρκετά και είναι διαφορετικής χημικής σύστασης, που σημαίνει ότι η τεχνολογία FDM παρουσιάζει ευελιξία στην επιλογή των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

(Grames, 2020)

Μειονεκτήματα της τεχνολογίας FDM

Ταχύτητα κατασκευής

Η ταχύτητα ενός συστήματος τύπου FDM καθορίζεται από την σχεδιογράφηση που θα δημιουργηθεί και από την ταχύτητα που θα τροφοδοτείται. Η τροφοδοσία εξαρτάται από το ρυθμό που μπορεί ο ρευστοποιητής να ρευστοποιήσει το υλικό ώστε να εξωθηθεί από το ακροφύσιο. Αν βελτιωθεί ο ρευστοποιητής ώστε να μπορεί να τήξει πιο γρηγορά το υλικό τότε λόγω αναβάθμισης κατά κανόνα πιθανόν θα αυξηθεί και η μάζα του που κατά συνέπεια θα μείωνε την ταχύτητα που μπορεί να κινηθεί η κεφαλή εξώθησης. Η προσπάθεια για να λυθεί αυτό το πρόβλημα έγινε με εφαρμογή διατάξεων που ως σκοπό έχουν την μείωση της τριβής της κεφαλής με χρήση της τεχνολογίας Magnadrive αν και η τριβή μειωνόταν σημαντικά το

κόστος της εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας για το αντίστοιχο χρονικό κέρδος δεν ήταν ισάξιο και για αυτόν τον λόγο σταμάτησε αυτή η προσπάθεια.

(Ian Gibson, 2017)

#### Η ακρίβεια κατασκευής

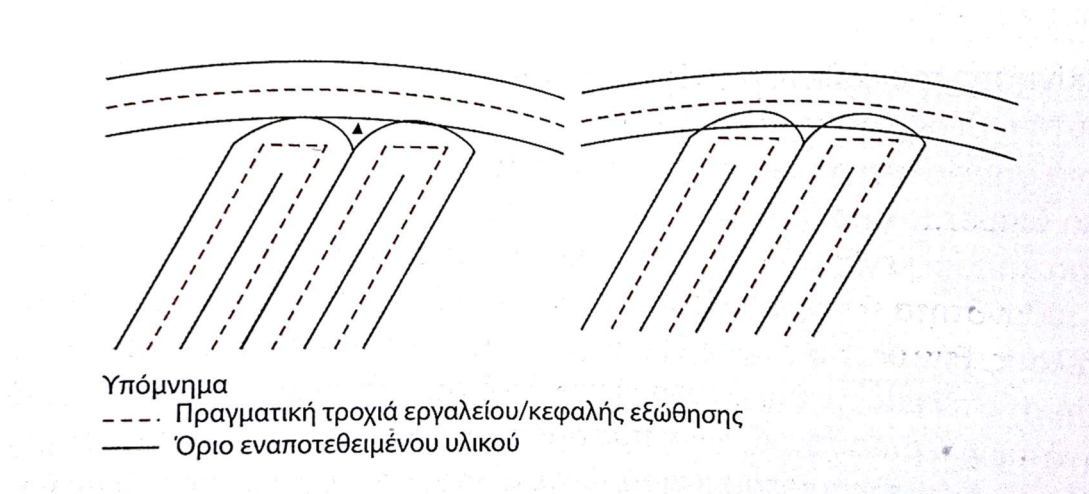
Τα νεότερά συστήματα FDM της εταιρείας Stratasys μπορούν να επιτύχουν πάχη στρώσης 0,078mm αλλά αυτό το πάχος είναι διαθέσιμο για τα πιο εξελιγμένα και ακριβά συστήματα FDM. Να σημειωθεί ότι τα ακροφύσια που εξωθούν το υλικό κατασκευής είναι κυκλικής διατομής που συνεπάγεται ότι δεν μπορούν να δημιουργηθούν καθαρές γωνίες στα τεμάχια παράγωγης, αλλά μόνο αντίστοιχες στρογγυλεύσεις στο μέγεθος της ακτίνας του ακροφύσιου. Η ακρίβεια του τελικού τεμαχίου είναι συνδυασμός της διαμέτρου, του ακροφύσιου της ταχύτητας εκτύπωσης και των ιδιοτήτων του υλικού εκτύπωσης. Το σύστημα σχεδιογράφησης χρησιμοποιεί στα ακριβότερα μηχανήματα κοχλίες κίνησης και ο κύριος λόγος εφαρμογής τους είναι για να επιτευχθεί ακρίβεια στις εκτυπώσεις. Εναλλακτική επιλογή είναι με χρήση ιμάντων οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή σε πιο οικονομικά μηχανήματα λόγω της μειωμένης ακρίβειας σε σύγκριση με τον κοχλία κίνησης.

(Ian Gibson, 2017)

#### Ανισοτροπικές ιδιότητες

Λόγο της διαφοράς της γεωμετρίας στην κατασκευή των στρώσεων παρατηρείται ότι οι μηχανικές αντοχές δεν είναι εφάμιλλες σε όλο το προϊόν κατασκευής, με συνέπεια να μην υπάρχει επακριβής αντοχή σε όλη την επιφάνεια της κατασκευής. Να αναφερθεί ότι ο ανισοτροπικός χαρακτήρας είναι υπαρκτός και στο οριζόντιο επίπεδο, αν δεν υπάρχει συγκεκριμένη διαδρομή εκτύπωσης, αλλά φυσικά και στο κάθετο επίπεδο. Το οριζόντιο επίπεδο μπορεί να δεχθεί μεγαλύτερες δυνάμεις καθώς η αντοχή του είναι μεγαλύτερη. Το μοντέλο αν προορίζεται για εργασίες που έχουν παράλαβες δυνάμεων και καταπονήσεις, προτείνεται η εκτύπωση να γίνει έτσι ώστε οι δυνάμεις να είναι παράλληλες στο οριζόντιο επίπεδο σε αντίθεση με το κάθετο επίπεδο, όπου λόγω της συγκόλλησης των στρώσεων δεν μπορεί να υπάρξει αντίστοιχη αντοχή. (Ian Gibson, 2017)





Εικόνα 39 Στην εικόνα παρατηρείται στο αριστερό σκέλος η διαδρομή εκτύπωσης ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατόν ακρίβεια, στο δεξιό σκέλος της εικόνας παρατηρείται η διαδρομή για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού με στόχο την καλύτερη αντοχή του τεμαχίου (Ian Gibson, 2017)

### 2.16.2 Σύντηξης πούδρας σε κλίνη (Powder Bed Fusion - PBF)

Η χρήση της αυτής της τεχνολογίας έχει πολλά θετικά όπως για παράδειγμα η πληθώρα των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αν και η χρήση κρυσταλλικών και ημικρυσταλλικών υλικών είναι ευκολότερη αυτή η τεχνολογία έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει και άμορφα υλικά για την κατασκευή προϊόντων. Πλεονέκτημα μπορεί να χαρακτηριστεί και το γεγονός ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να τροφοδοτηθεί και να κατασκευάσει υλικά όπως τα μέταλλα και ορισμένα είδη κεραμικών.

Αυτή η τεχνολογία επίσης δεν χρειάζεται την ύπαρξη εξωτερικών στηρίξεων (εκτός από τα μεταλλικά υλικά. Το επιπλέον υλικό της πούδρας λειτουργεί ως συγκράτηση για το προϊόν που παράγεται και έτσι οι πολύπλοκες γεωμετρικές διεργασίες μπορούν να δημιουργηθούν. (Ian Gibson, 2017)

Η χρήση στηρίξεων χρειάζεται στην περίπτωση που το υλικό εκτύπωσης είναι μεταλλικό. Ο λόγος είναι ότι δημιουργούνται τάσεις κατά την διεργασία, οι οποίες μπορεί να επιφέρουν στρέβλωση στο τεμάχιο. Η χρήση στηριγμάτων κάνει πιο περιπλοκή κοστοβόρα και χρονοβόρα την διεργασία, επίσης χρειάζεται να

προσθεθεί και το κομμάτι της μετεπεξεργασίας. Η δυσκολία στην διαδικασία πετυχημένης εκτύπωσης αυξάνεται καθώς οι στηρίξεις πρέπει να τοποθετηθούν σωστά και το αντικείμενο οριστεί σωστά στον χώρο εκτύπωσης. (Ian Gibson, 2017)

Το μέγεθος των σωματιδίων έχει καθοριστικό ρόλο στη τελική ακρίβεια του τεμαχίου εκτύπωσης, επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι συνήθως οι διεργασίες προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιούν υγρής μορφής υλικό εκτύπωσης με σκοπό να πετυχαίνουν καλύτερες ποιότητες επιφάνειας. Αν χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια τότε υπάρχει πιο καλή διαχείριση και γρηγορότερη διασταύρωση τους. (Ian Gibson, 2017)

Ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος παραγωγής ενός τεμαχίου με αυτήν την τεχνολογία είναι μεγαλύτερος σε σχέση με άλλες τεχνολογίες AM καθώς υπάρχουν τα επιπλέον στάδια της προθέρμανσης και ψύξης του μηχανήματος. Στις πιο προηγμένες τεχνολογικά μηχανές υπάρχουν αποσπόμενα μέρη στα οποία η προθέρμανση και η ψύξη μπορούν να γίνουν έξω από την μηχανή, δίδοντας έτσι την ευελιξία που χρειάζεται ώστε να πραγματοποιούν καλύτεροι κατασκευαστικοί χρόνοι και πιο παραγωγικές μηχανές.

(Ian Gibson, 2017)

### **2.16.3 Εναπόθεσης υλικού**

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής είναι αρχικά η μεγάλη ταχύτητα κατασκευής προϊόντων. Η αυξημένη ταχύτητα επιτυγχάνεται με την χρήση πολλών ακροφυσίων τα οποία έχουν την δυνατότητα να εκτυπώνουν με μεγάλο ρυθμό υλικό και να καλύπτουν γρηγορά τα στρωματά της διεργασίας. Πλεονέκτημα αποτελεί και το χαμηλό κόστος αυτών των μηχανήματων, σε σύγκριση με μηχανήματα που χρησιμοποιούν lasers. Να αναφερθεί ότι αυτά τα μηχανήματα εναπόθεσης απαρτίζονται κατά κύριο λόγο από εξαρτήματα τα οποία έχουν το χαρακτηριστικό ότι είναι τυποποιημένα και όχι εξειδικευμένα και αυτός είναι ένας ακόμα παράγοντας που κρατάει χαμηλό το κόστος αγοράς αυτών των μηχανήματων. Μερικά μειονεκτήματα τα οποία υπάρχουν σε αυτήν την τεχνολογία είναι η αδυναμία εύρεσης πολλών συμβατών υλικών εκτύπωσης, καθώς χρησιμοποιούνται σήμερα κεριά και φωτοπολυμερή. Η ακρίβεια των εκτυπωμένων

προϊόντων δεν είναι τόσο καλή όσο σε άλλες διεργασίες προσθετικής κατασκευής όπως ο φωτοπολυμερισμός σε κάδο ή η διεργασία εξώθησης. (Ian Gibson, 2017)

#### **2.16.4**

#### **2.16.5 Εναπόθεσης συγκολλητικού υλικού (Binder Jetting -BJ)**

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι τα παρακάτω :

Ταχύτητα εκτύπωσης, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι δεν χρειάζεται να διοχετευτεί μεγάλο ποσοστό του υλικού από το εξάρτημα της κεφαλής εκτύπωσης. Φυσικά πρέπει να αναφερθεί ότι η εφαρμογή του υλικού της πούδρας από τον κύλινδρο για την δημιουργία κάθε στρώματος είναι διαδικασία η οποία δεσμεύει επιπλέον χρόνο.

Η χρήση δυο υλικών από αυτήν τεχνολογία δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθούν χημικές συστάσεις, οι οποίες θα ήταν αδύνατες με άλλες μεθόδους προσθετικών διεργασιών. Το υλικό το οποίο είναι σε μορφή πολτού που περιέχει μεγάλη ποσότητα στερεού υλικού δίνει την δυνατότητα να παραχθούν καλύτερα αποτελέσματα στα τελικά προϊόντα. Κατασκευάζονται με χρήση μεταλλικών και κεραμικών υλικών σε σύγκριση με την τεχνολογία εναπόθεσης υλικού.

Αυτή η τεχνολογία έχει την δυνατότητα παραγωγής τεμαχίων με χρωματικούς τόνους. Σε αυτήν την τεχνολογία κατά κανόνα δεν χρειάζεται η χρήση στηριγμάτων γιατί υπάρχει στήριξη από το υλικό της υπόλοιπης πούδρας.

Να σημειωθεί επίσης ότι υπάρχει χαμηλό κόστος λειτουργίας γιατί δεν υπάρχει ενεργειακή πηγή αυξημένης ισχύος. Αλλά ως μειονέκτημα τα παραγόμενα τεμάχια δεν έχουν τις ακρίβειες και την αντίστοιχη ποιότητα επιφάνειας σε σύγκριση με την τεχνολογία εναπόθεσης υλικού. (Ian Gibson, 2017)

#### **2.16.6 Επάλληλων φύλλων**

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διεργασίας είναι ότι τα προϊόντα έχουν χαμηλές εσωτερικές τάσεις και επίσης παρουσιάζουν και χαμηλή ευθραυστότητα. Η διεργασία χρησιμοποιεί υλικά κατασκευής τα οποία είναι οικονομικότερα σε σχέση με άλλες μεθόδους προσθετικών κατασκευών, το κόστος λειτουργίας είναι και αυτό

χαμηλό, επίσης μπορούν να επιτευχθούν υψηλές ποιότητες φινιρίσματος. Η δυσκολία αποκωδικοποίησης του υλικού που περισσεύει μετά την διαδικασία κοπής αποτελεί μια προσθετή δυσκολία.

(WeiGao, 2015)

### **2.17 Εναπόθεση με κατευθυνόμενη ενεργειακή δέσμη (DED-DIRECTED ENERGY DEPOSITION)**

Τα πλεονεκτήματα τα οποία έχει αυτή η διεργασία, είναι κατά κύριο λόγο η δυνατότητα ελέγχου των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των παραγόμενων προϊόντων. Η διεργασία αυτή έχει την δυνατότητα να παράξει προϊόντα τα οποία θα έχουν λειτουργικό χαρακτήρα και αν είναι επιθυμητό υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της σύστασης του προϊόντος στους άξονες της διεργασίας.

Τα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα των DED διεργασιών

Η δυνατότητα της τεχνολογίας να μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος στην διεργασία όσο αναφορά το κομμάτι της μικροδομής, Το γεγονός ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταβλητότητα ώστε να αλλάξει την σύσταση και την ταχύτητα που γίνεται η στερεοποίηση δίνει το χαρακτηριστικό της μεγάλης κατασκευαστικής ελευθερίας.

Οι δομές που μπορούν να κατασκευαστούν είναι κρυσταλλικές

Αυτή η διεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επισκευή μηχανισμών ή και εξαρτημάτων.

Η διεργασία αυτή επιτρέπει την κατασκευή προϊόντων από σύνθετα υλικά και κράματα.

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει εξαρτήματα όσο αναφορά την εξωτερική επένδυση με χαμηλού πάχους στρωματά για βελτίωση των ιδιοτήτων τους και της διεύρυνσης του χρόνου λειτουργίας τους.

(Ian Gibson, 2017)

Ως μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας μπορεί να χαρακτηριστεί η επιφάνεια που δεν έχει την αντίστοιχη ποιότητα (κατά προσέγγιση τιμές μέχρι 25  $\mu\text{m}$ ) και η

μειωμένη ανάλυση ακρίβειας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες AM (μέχρι 0,25mm). Να σημειωθεί ότι η ταχύτητα περάτωσης της διεργασίας είναι χαμηλή (κατά προσέγγιση 25-40 g/h). Για να αυξηθεί η ταχύτητα της διεργασίας θα πρέπει να μειωθεί η ακρίβεια της, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της δέσμης laser και από τους ρυθμούς εναπόθεσης του υλικού τύπου πούδρας. Μικρότερη εστίαση laser και λιγότερη παροχή υλικού συνεπάγεται με καλύτερη ακρίβεια αλλά σε αντίκτυπο υπάρχει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Μεγαλύτερη εστίαση της δέσμης και μεγαλύτερη παροχή υλικού συνεπάγεται με καλύτερη ταχύτητας παράγωγης αλλά χαμηλότερη ακρίβεια. Η δυναμική χρήση της ισχύς του laser δεν ενδείκνυται γιατί υπάρχει η πιθανότητα να αλλάξει την συνοχή της μικροδομής του προϊόντος. Η επιλογή θα είναι ένα είδος συμβιβασμού μεταξύ της μικροδομής, της ταχύτητας αλλά και της ακρίβειας του προϊόντος (Ian Gibson, 2017)

### **2.17.1 Φωτοπολυμερισμού σε κάδο**

Τα πλεονεκτήματα της διεργασίας φωτοπολυμερισμού σε κάδο εμφανίζονται στην ποιότητα που μπορούν να παράγουν τα προϊόντα τους όπως και στην ακρίβεια η οποία μπορεί να επιτευχθεί. Τα πλεονεκτήματα έκαναν αρχικά την διεργασία ιδανική για την παραγωγή πρωτοτύπων και σε μικρότερο ποσοστό ως λειτουργικά εξαρτήματα. Η ακρίβεια η οποία μπορεί να επιτευχθεί είναι 0,002 (in / in) όπου η τιμή αυτή είναι το ελάχιστο σφάλμα που μπορεί να επιτευχθεί ως προς το μήκος του προϊόντος. , η ποιότητα που μπορεί να επιτευχθεί όσο αναφορά την επιφάνεια είναι καλύτερη από μιας μονάδας ενός μικρού Ra και για κάθετες επιφάνειες μπορούν να επιλεχθούν ποιότητες της τάξης των 100 μm Ra. Άλλο ένα πλεονέκτημα μπορεί να χαρακτηριστεί και η ευελιξία που προσφέρουν αυτές οι τεχνολογίες όσο αναφορά τα είδη των μηχανών που υπάρχουν όπως και οι διαφορετικές επιλογές μεγεθών που μπορούν να επιλεχθούν, η επιλογή των εξαρτημάτων που απαρτίζουν αυτήν την διεργασία πχ η χρήση γαλβανομέτρων η η χρήση DMDs. Όσο αναφορά την ταχύτητα που μπορεί να πραγματοποιηθεί η προσθετική κατασκευή ο φωτοπολυμερισμός με χρήση μάσκας είναι καλύτερη επιλογή καθώς η διατομή μπορεί να σαρωθεί ολόκληρη σε αντίθεση με την δημιουργία στρωμάτων με χρήση διανυσματικών διαδρομών.

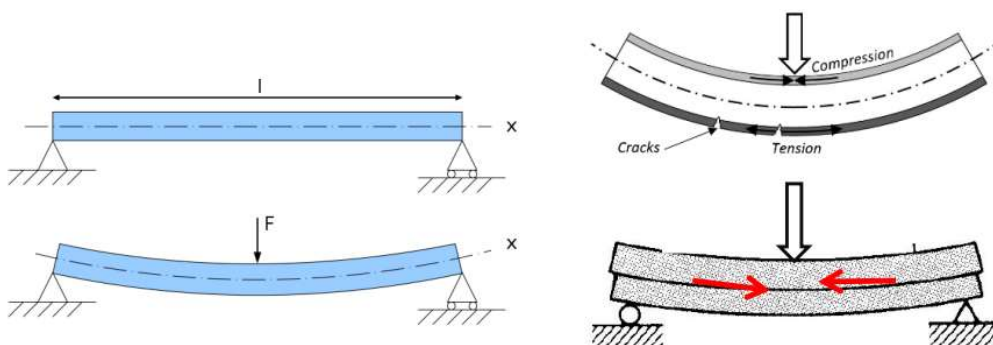
Μειονέκτημα αυτής της διεργασίας είναι η γήρανση των προϊόντων (καταπόνηση στον χρόνο) και η αντοχή τους σε καταπονήσεις όπως την εφαρμογή των προϊόντων σε φορτία σε μορφή κρούσης, και τις μειωμένες μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν σε σχέση με τα θερμοπλαστικά και τα προϊόντα έγχυσης όπως και χύτευσης. Αυτό οφείλεται στην χρήση αποκλειστικά φωτοπολυμερων και της κατά κύριο λόγο της χρήσης των υλικών που είναι ακρυλικά ή και εποξειδικά. Οι μηχανικές ιδιότητες των φωτοπολυμερων είναι και ο κύριος λόγος που τα προϊόντα αυτής της διεργασίας δεν χρησιμοποιούνται ως λειτουργικά. (Ian Gibson, 2017)

### 2.18 Κάμψη

Κάμψη θεωρείται το φαινόμενο όταν φορτία ασκούνται σε μια δοκό κάθετα στον άξονα της, η δοκός πρέπει να στηρίζεται σε ένα ή περισσότερα σημεία. Η εφαρμογή της κάμψης έχει ως αποτέλεσμα να εμφανιστούν καταπονήσεις θλιπτικές, εφελκύστηκες όπως επίσης και διατμητικές τάσεις κατά μήκος της δοκού αλλά και στην διατομή της.

(ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, 2020)

Ο όρος καθαρή κάμψη προκύπτει από την ύπαρξη καμπτικών ροπών οι οποίες επηρεάζουν το σύστημα και ως αποτέλεσμα έχουν την καταπόνηση της δοκού και την κάμψη της. Τα φορτία που δημιουργούνται είναι ορθές μηχανικές τάσεις οι οποίες οφείλονται μόνο στις καμπτικές ροπές και όχι σε φορτία τα οποία να είναι αξονικής διεύθυνσης. (Γιαννακόπουλος, 2011)

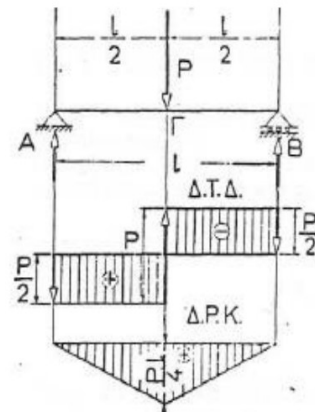


Εικόνα 40 Κάμψη τριών σημείων (ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, 2020)

Οι ορθές δυνάμεις είναι μηδενικές (αξονικές)

Το φορτίο εφαρμόζει μια τέμνουσα δύναμη η οποία είναι διάφορη του μηδενός

Η ροπή που εφαρμόζεται είναι διάφορη του μηδενός.



Εικόνα 41 Τυπικό διάγραμμα κάμψης (ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, 2020)

Οι καταπονήσεις που εμφανίζονται είναι τύπου κάμψης και διάτμησης.

(ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, 2020)

Για να πραγματοποιηθεί η καταπόνηση της κάμψης θα πρέπει να υπάρχουν οι εξής προϋποθέσεις

Η  $\Sigma F_x$  να είναι ίσα με μηδέν.

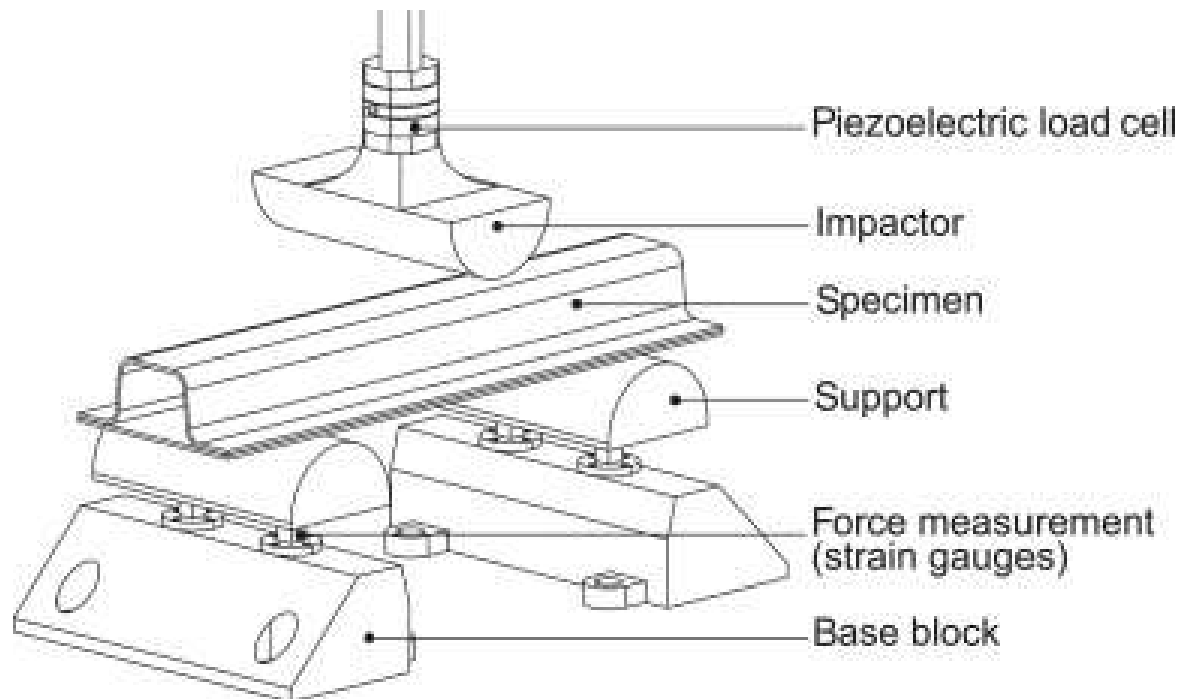
Η  $\Sigma F_y$  να είναι ίσα με το μηδέν.

Η  $\Sigma M_k$  να είναι διάφορη του μηδενός.

Η  $\Sigma M_t$  να είναι ίσα με το μηδέν.

(Γιαννακόπουλος, 2011)

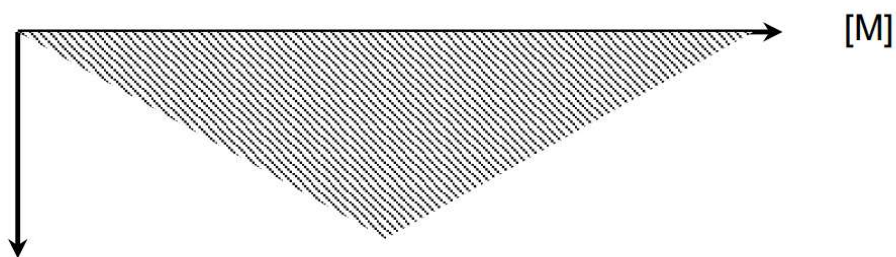




Εικόνα 42 Κάμψη τριών σημείων και απεικόνιση του μηχανισμού κάμψης πειραμάτων (M. Nebe, 2021)

Στην καταπόνηση της κάμψης τριών σημείων η δοκός υποβάλλεται σε ένα φορτίο το οποίο βρίσκεται στο μέσο του μήκους της, η δοκός στηρίζεται είτε με αμφιέρειστο τρόπο είτε ως αμφιπροεχουσα, από την λύση εξισώσεων οι οποίες είναι τύπου ισορροπίας (στερεοστατικές) και από την σχεδίαση των κατανομών των φορτίων καμπτικών ροπών στην δοκό ακολουθούν τα παρακάτω.

(Γιαννακόπουλος, 2011)



Εικόνα 43 Διάγραμμα καμπτικών ροπών. (Γιαννακόπουλος, 2011)

Οπού η μεγίστη ροπή βρίσκεται από τον παρακάτω τύπο.

$$M = \frac{P * l}{4}$$

(Γιαννακόπουλος, 2011)

Ακολουθούν οι βασικές παραδοχές οι οποίες υπάρχουν για την εφαρμογή της καθαρής κάμψης.

Η διατομή της δοκού έχει ύψος  $h$  που είναι μικρότερο από το ήμισυ του ανοίγματος  $A$  δηλαδή  $h < A/2$

Οι άξονες συμμετρίας είναι στην καθαρή κάμψη είναι περισσότεροι από έναν.

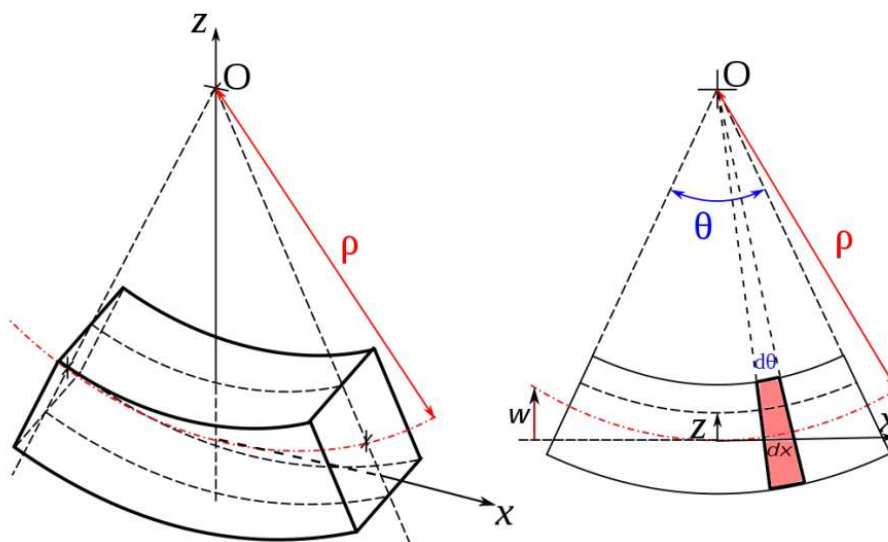
Χαρακτηριστικό του ουδέτερου άξονα είναι ότι είναι ευθύγραμμος, όταν η δοκός δεν παραλαμβάνει φορτία.

Τα φορτία που παραλαμβάνει η δοκός εφαρμόζονται κάθετα στην δοκό.

Η δοκός πρέπει να είναι από υλικό το οποίο να έχει την ίδια τιμή στο μετρώ ελαστικότητας, όσο αναφορά στην καταπόνηση σε εφελκυσμό και σε θλίψη, και οι τάσεις που θα δημιουργηθούν πρέπει να είναι κάτω από το όριο αναλογίας για το αντίστοιχο υλικό ( που σημαίνει ότι θα ισχύει ο νομός του Hooke)

Οι διατομές θα πρέπει να είναι κάθετες στον άξονα και πριν την εφαρμογή φορτίου αλλά και κατά την διάρκεια φόρτισης.

(Γιαννακόπουλος, 2011)



Εικόνα 44 Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ο τρόπος που πραγματοποιείται η καταπόνηση στο δοκίμιο, οι γραμμές θλίψης στο άνω μέρος του δοκιμίου και οι γραμμές εφελκυσμού στο κάτω σημείο του δοκιμίου. (Γιαννακόπουλος, 2011)

## 2.19 Σχεδιασμός για χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής

Ο σχεδιασμός για την διεξαγωγή διεργασιών προσθετικής κατασκευής πρέπει να γίνει με βάση τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την διεργασία αλλά και τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

### 2.19.1 Η θέση προσανατολισμού

Η θέση προσανατολισμού επηρεάζει την ακρίβεια και την ποιότητα επιφάνειας ενός προϊόντος, για παράδειγμα έναν τεθεί ένα κυλινδρικό μοντέλο προς εκτύπωση και η θέση προσανατολισμού του είναι κατακόρυφη (παράλληλη στον άξονα Z), το προϊόν που θα εκτυπωθεί θα έχει λεία πλαϊνή επιφάνεια και ο κύλινδρος θα έχει δημιουργηθεί από πολλά ενωμένα κυκλικά στρωματά και το τελικό προϊόν θα είναι ένα με καλή ποιότητα και ακρίβεια σχηματισμένο κυκλικό προϊόν, αν και αξίζει να σημειωθεί ότι οι άκρες στις στρώσεις ποτέ δεν είναι εντελώς κάθετες στις διεργασίες προσθετικών κατασκευών. Η διεργασία αν πραγματοποιηθεί με τον άξονα του κυλίνδρου παράλληλο με τον άξονα οριζοντίου επιπέδου τότε θα παρατηρηθεί ότι η επιφάνεια θα έχει κλιμακωτή μορφή λόγω των στρωμάτων που είναι παράλληλα με τον άξονα του κυλίνδρου, το αποτέλεσμα είναι η διαστασιολογική ακρίβεια και η επιφάνεια του προϊόντος να είναι σε μικρότερα επίπεδα σε σχέση με την εκτύπωση στον κατακόρυφο άξονα. Εάν ως παράμετρος τεθεί η βέλτιστη χρονική περάτωση της διεργασίας τότε αξίζει να υποθεί ότι η διαδικασία εκτύπωσης που είναι παράλληλη στον οριζόντιο άξονα θα γίνει πιο γρήγορη, σε αντίθεση με την εκτύπωση στον κατακόρυφο άξονα καθώς η διαδικασία δημιουργίας επιπλέον στρωμάτων είναι πιο χρονοβόρα σε σχέση με την μεγαλύτερη επιφάνεια εκτύπωσης στο οριζόντιο επίπεδο, βέβαια πρέπει να αναφερθεί ότι στις τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών με χρήση εξώθησης υλικού η χρονική διεργασία της διεργασίας είναι συνάρτηση από τον όγκο του προϊόντος οπότε για το παράδειγμα του κυλίνδρου η βέλτιστη λύση και αυτήν που ενδείκνυται είναι η κατακόρυφη εκτύπωση. Να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κάποιος μοναδικός τέλειος προσανατολισμός, αλλά αποτελεί επιλογή βάση της κρίσης του χειρίστη της μηχανής, ο χρόνος της διεργασίας μπορεί να χρειάζεται αντίθετη προσέγγιση σε σύγκριση με την επίτευξη ποιότητας και ακρίβειας στο προϊόν, η

επιβολή στηρίξεων και το που θα πραγματοποιηθούν όπως και το πλήθος τους είναι και αυτό ζήτημα το οποίο έχει να κάνει με τον προσανατολισμό του προϊόντος. Επίσης θετικό είναι να γινεί έτσι ο προσανατολισμός ώστε οι στηρίξεις να είναι σε επιθυμητό σημείο για να μπορούν να αφαιρεθούν, σε γενικές γραμμές η εκτύπωση με τον άξονα του προϊόντος στο κάθετο επίπεδο είναι ένας εμπειρικός κανόνας για την επίτευξη ποιότητας και ακρίβειας στα προϊόντα των διεργασιών προσθετικών κατασκευών. (Ian Gibson, 2017)

### **2.19.2 Στηρίγματα**

Όταν η διεργασία προσθετικής κατασκευής για να πραγματοποιηθεί χρειάζεται στηρίγματα, αυτό που προτείνεται είναι σε γενικές γραμμές η χρήση τους μόνο εκεί που είναι αναγκαίο και ο λόγος που προτείνεται είναι διότι τα στηρίγματα όταν θα αφαιρεθούν αφήνουν σημάδια στο προϊόν που σημαίνει περισσότερη μετεπεξεργασία αφαίρεσης στηριγμάτων και φινιρίσματος του υλικού με σκοπό να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα. Η θέση προσανατολισμού και η τοποθέτηση θα πρέπει να γίνει με βάση αν είναι δυνατόν την ύπαρξη στηρίξεων στις επιφάνειες που είναι λιγότερο σημαντικές όπου δεν υπάρχει ανάγκη για βέλτιστη ποιότητα επιφάνειας. Προσοχή θα πρέπει να δώσει ο χειρίστης της μηχανής στο ελάχιστο αριθμό στηριγμάτων καθώς ένας μικρός αριθμός στηριγμάτων μπορεί να δημιουργήσει το φαινόμενο της αποκόλλησης του προϊόντος οπότε η διεργασία δεν θα πραγματοποιηθεί σωστά. Για να πραγματοποιηθεί αφαίρεση των στηριγμάτων θα πρέπει να έχει γίνει σωστός αρχικός σχεδιασμός ώστε οι στηρίξεις να μην βρίσκονται σε σημεία τα οποία είναι δύσκολα σε πρόσβαση από του την πλευρά του χειρίστη ώστε να αφαιρεθούν, τέτοια σημεία μπορεί να είναι εσωτερικές διαμορφώσεις του τεμαχίου, για αυτόν τον λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπές οι οποίες χρησιμεύουν για την αφαίρεση των στηρίξεων και αφού πραγματοποιηθεί η εργασία αφαίρεσης οι οπές αυτές κλείνουν από τον χειρίστη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μια μέθοδος κοπής του προϊόντος για την αφαίρεση των στηρίξεων και στην συνέχεια να πραγματοποιηθεί η συνένωση του τεμαχίου. (Ian Gibson, 2017)

### **2.19.3 Σχεδίαση του προϊόντος με κοίλα τοιχώματα.**

Αν το προϊόν που θα τεθεί για την εκτύπωση στην διεργασία έχει όγκους όπως τοιχώματα τα οποία καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο και μεγάλη ποσότητα υλικού τότε προτείνεται στην μοντελοποίηση τους να εφαρμοστούν καμπύλες υπό μορφής κοιλοτήτων με την προϋπόθεση ότι αυτή η αλλαγή δεν θα επηρεάσει την λειτουργικότητα του προϊόντος, η διαδικασία αυτή γίνεται ώστε να επηρεαστεί θετικά ο χρόνος της διεργασίας αλλά και να γίνει η εκτύπωση πιο οικονομική καθώς θα χρειαστεί λιγότερο υλικό για την κάλυψη των καμπυλών σε σχέση με ογκώδη τοιχώματα, όπως επίσης και η μείωση του βάρους του προϊόντος. Ο σχεδιασμός μπορεί να γίνει έτσι ώστε να αφαιρεθεί υλικό χωρίς να υπάρχει ουσιαστικά μεγάλη απώλεια αντοχών αν χρησιμοποιηθεί εσωτερικά του προϊόντος δομή η οποία να είναι κυψελωτής μορφής η και με χρήση δικτυωμάτων, ο σχεδιασμός είναι πιο περίπλοκος αν πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση από τον χειριστή, για αυτόν τον λόγο έχουν δημιουργηθεί προγράμματα αυτομάτου σχεδιασμού για προκαθορισμένες δεδομένες μηχανικές αντοχές.

(Ian Gibson, 2017)

### **2.19.4 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά προϊόντος**

Οι διεργασίες AM μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως δοκιμαστικά πρότυπα στα οποία μπορούν δοκιμαστούν χαρακτηριστικά όπως υποκοπές, οπές, διαβαθμίσεις, γωνίες, η δυνατότητα να παράγονται με εύκολο τρόπο περίπλοκες σχεδιαστικές προτάσεις δίνουν στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής πλεονέκτημα όσο αναφορά το σχεδιαστικό κομμάτι και την βελτίωση η την ύπαρξη επιπλέον χαρακτηριστικών στο τελικό προϊόν σε σχέση με την αντίστοιχη διαδικασία την με χρήση αφαιρετικών τεχνολογιών.

(Ian Gibson, 2017)

### **2.19.5 Συνδεδετικά μέρη.**

Όταν το προϊόν το οποίο θα κατασκευαστεί είναι μεγάλων διαστάσεων και δεν μπορεί να γίνει ολόκληρο λόγω του περιορισμένου όγκου του χώρου της διεργασίας, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τακτική της σχεδιαστικής διάσπασης του προϊόντος σε μικρότερα κομμάτια τα οποία μπορούν να εκτυπωθούν μέσω του

κατασκευαστικού χώρου της διεργασίας και στην συνέχεια να γίνει σύνδεση αυτών. Ο σχεδιασμός των κομματιών που απαρτίζουν το προϊόν πρέπει να γίνει με τον βέλτιστο τρόπο, προτείνεται η χρήση χαρακτηριστικών τα οποία θα έχουν ως σκοπό την σύνδεση των κομματιών, όπως και η αύξηση των επιφανειών επαφής των κομματιών ώστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη ένωση με χρήση κολλάς. Η θέση των επιφανειών σύνδεσης συνίσταται να βρίσκονται σε σημείο στο αντικείμενο το οποίο να μην είναι ευδιάκριτο αλλά επίσης αυτό το σημείο να είναι προσβασιμο. Η χρήση της μεθόδου συνδετικών κομματιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους λόγους πέραν από την αντιμετώπιση του προβλήματος του χώρου, για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αντικείμενα που μπορούν να εκτυπωθούν ολόκληρα αλλά δεν συμφέρει από πλευράς χρόνου είτε πολλαπλών στηριγμάτων είτε συνδυασμού αυτών, πρέπει να αναφερθεί όμως ότι στα σημεία που γίνεται η σύνδεση η αντοχή επηρεάζεται αρνητικά σε τοπικό επίπεδο.

(Ian Gibson, 2017)

#### **2.19.6 Μείωση των επιμέρους κομματιών που απαρτίζουν ένα προϊόν**

Η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή λειτουργικών προϊόντων, για αυτό τον λόγο θα πρέπει στο σχεδιαστικό σκέλος να γίνει προσπάθεια απλοποίησης των συνδετικών κομματιών που για παράδειγμα μπορεί να αποτελούν μηχανισμούς με αρθρώσεις και κινουμένους μηχανισμούς, φυσικά θα πρέπει η διαδικασία της απλοποίησης να μην επηρεάζει αρνητικά την λειτουργικότητα του προϊόντος. Επίσης προτείνεται τα κομμάτια τα οποία είναι περιπλοκά, τα οποία θα σχεδιαζόντουσαν και θα κατασκευάζονταν από άλλου είδους τεχνολογίες ως ξεχωριστά λόγω πολυπλοκότητας (πχ πολλά μικρά κομμάτια από πλαστικά υλικά) να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν ως ενιαία αντικείμενα.

(Ian Gibson, 2017)

#### **2.19.7 Ταυτοποίηση των προϊόντων**

Αν και οι προσθετικές κατασκευές χρησιμοποιούνται κατά κορών για δημιουργία διαφορετικών προϊόντων, μια βιομηχανία ή κάποιος παραγωγός συνήθως παράγει πολλαπλά προϊόντα οπότε συνηθίζεται η ύπαρξη ταυτοποίησης του καθενός μέσω

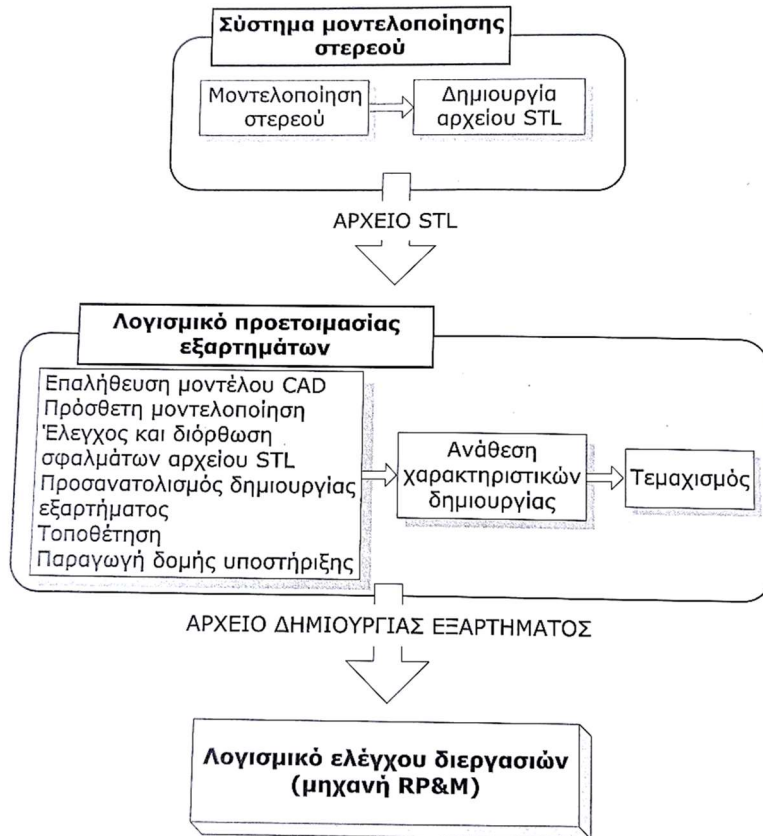
του σχεδιασμού από το ψηφιακό μοντέλο του CAD , είτε σε περίπτωση που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο λόγο σχεδίασης του προϊόντος από κάποιο άλλο πρόσωπο μπορεί να χρησιμοποιηθούν αλλά λογισμικά για σήμανση επιφανειακών τρισδιάστατων προϊόντων.

(Ian Gibson, 2017)

## **2.20 Λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής**

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιούν λογισμικό το οποίο απαρτίζεται από δυο κυριά μέρη , το λογισμικό που είναι υπεύθυνο για την ετοιμότητα των εξαρτημάτων όπως και το λογισμικό το οποίο ελέγχει τις λειτουργίες . Το λογισμικό εξαρτημάτων χρησιμοποιεί τα δεδομένα από το αρχείο CAD και αρχικά επαληθεύει την μοντελοποιημένη μορφή του, στην συνέχεια βελτιώνει αν έχουν προκύψει σφάλματα στο STL αρχείο , επίσης μπορεί να λειτουργήσει και ως προσθετική επέμβαση στο αρχείο τύπου STL , επίσης αυτό το λογισμικό είναι υπεύθυνο για την θέση , και τον προσανατολισμό του προϊόντος , την ύπαρξη βοηθητικών στηρίξεων για την διεξαγωγή της διεργασίας όπως και δυνατότητα για επανεπικαλύψεις , και την δημιουργία αρχείων τα οποία είναι συνδυασμοί πολλών χαρακτηριστικών, που ως ονομασία ορίζονται ως Αρχεία Δημιουργίας Bbuild File. Το άλλο κύριο μέρος λογισμικού που είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των διεργασιών λειτουργεί με την χρήση του αρχείου δημιουργίας και πραγματοποιεί έλεγχο της διεργασίας. (LEE, 1999)





Εικόνα 45 Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η βασική διακλάδωση των λογισμικών που έχουν τα συστήματα προσθετικής κατασκευής. (LEE, 1999)

## 2.21 Σχεδιασμός μεθοδολογίας Taguchi

Η δημιουργία του Robust Design και η εφαρμογή του στην βιομηχανία στις δεκαετίες του 1950, 1960 είχε άμεση σχέση με τον Taguchi, με την εφαρμογή της μεθοδολογίας παρατηρήθηκε βελτίωση σε πολλούς τομείς όπως για παράδειγμα στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις συσκευές που εμπεριέχουν ηλεκτρονικά μέρη, καθώς και στην γενικότερη ανάπτυξη της βιομηχανίας στην Ιαπωνία.

(JL Rosa, 2009)

Η μεθοδολογία χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε γραμμές παραγωγής και κύριος λόγος είναι η δυνατότητα αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων με χρήση λίγων μετρήσεων. Σημαντικά εργαλεία για την μεθοδολογία αποτελούν ο ορθογωνικός πίνακας ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιήσει αλγόριθμο τύπου (PIO)

για ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, να σημειωθεί ότι υπάρχει και ο αλγόριθμος τύπου (TRIO).

(Jeng-ShyangPan, 2022)

Η μεθοδολογία έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο επιθυμητό αποτέλεσμα με χρήση λιγότερων πειραματικών μετρήσεων, η μεθοδολογία λειτουργεί με χρήση ορθογωνικού πίνακα, ο οποίος κάνει συνδυασμό παραμέτρων, η μεθοδολογία ακολουθεί την λογική του σημειακού στόχου, επίσης το ποσοστό δράσης κάποιου από του παράγοντες στα πειραματικά αποτελέσματα καθορίζεται από την ανάλυση διασποράς. Η μεθοδολογία Taguchi εμπεριέχει έναν ορό S/N οπού ο σκοπός του είναι να ελαχιστοποιήσει την μεταβλητότητα.

(AsitBehera, 2020)

Πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε από τον Taguchi αποτελούν, για παράδειγμα η μείωση της μεταβλητότητας στα δεδομένα απόκρισης και επίσης με την χρήση αυτής της μεθόδου βελτιώνονται οι διεργασίες παραγωγής προϊόντων.

(JL Rosa, 2009)

### **2.21.1 Βήματα μεθοδολογίας Taguchi**

Γίνεται αρχικά η προτίμηση των μεταβλητών που θα τεθούν με χρήση της μεθοδολογίας να βελτιστοποιηθούν. (δεδομένα εξόδου απόκρισης)

Σαν δεύτερο βήμα θεωρείται η επιλογή των παραγόντων οι οποίοι έχουν επίδραση στα δεδομένα εξόδου, επίσης πρέπει να δοθούν και οι δυναμικότητες αυτών των παραγόντων.

Ως τρίτο βήμα πρέπει να γίνει χρήση του πίνακα ορθοδοντικής μορφής.

Να γίνει εισαγωγή των δεδομένων του πειράματος στο πίνακα και επίσης αντιστοίχιση των παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν την διεργασία.

Να πραγματοποιηθεί η πειραματική διαδικασία (προτείνεται οι δοκιμές των πειραμάτων να γίνουν με τυχαίο τρόπο με σκοπό να αποφευχθεί η παρουσία συστηματικού λάθους). (JL Rosa, 2009)

Στην συνέχεια πρέπει να πραγματοποιηθεί η διευκρίνιση των αποτελεσμάτων με την χρήση του λογού (S/N) που εκφράζει την το σήμα ως προς τον θόρυβο, όπως επίσης μπορεί να γίνει και ανάλυση διακύμανσης τύπου (ANOVA), για την επίτευξη και την εύρεση των καλύτερων παραγόντων που επηρεάζουν την διεργασία.

Μπορούν να γίνουν και πειράματα επαναληπτικού χαρακτήρα τα οποία θα έχουν ως σκοπό την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

(JL Rosa, 2009)

Η συνάρτηση του λογού (S/N) είναι μια λογαριθμική σχέση η οποία χρησιμοποιείται με σκοπό την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων σχεδιασμού στις διεργασίες, ο λόγος αυτός μπορεί να εκφραστεί και ως το μέγεθος το οποίο είναι αντίστροφο της διακύμανσης, ο λόγος όσο μεγαλύτερες τιμές έχει τόσο μικρότερη θα είναι η μεταβλητότητα που θα υπάρχει στο πείραμα (από άλλους παράγοντες οι οποίοι είναι μη ελεγχόμενοι). Η μείωση της μεταβλητότητας για να επιτευχθεί θα πρέπει να επιλεγεί ο παράγοντας και το αντίστοιχο επίπεδο που εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή του λογού (S/N).

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right]$$

(JL Rosa, 2009)

Για να εξακριβωθούν ποιες παράμετροι της διεργασίας είναι πιο σημαντικοί θα πρέπει να γίνει και ανάλυση τύπου ANOVA (JL Rosa, 2009)

Οπού τα μεγέθη του αθροίσματος των αποκλίσεων των τετράγωνων από τον μέσο ορό εκφράζεται από την σχέση :

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

(JL Rosa, 2009)

df : είναι ο ορός που υποδηλώνει τους βαθμούς ελευθέριας οπού σαν μέγεθος υπολογίζεται από το πλήθος των επίπεδων για όλους τους παράγοντες μείον ένα.

(JL Rosa, 2009)

MS : Χρησιμοποιείται για να δηλώσει τον μέσο ορό των τετράγωνων.

$$MS = \left( \frac{SS}{df} \right)$$

(JL Rosa, 2009)

F : είναι το κλάσμα του μέσου ορού των τετράγωνων ως προς την μέση τιμή του τετραγώνου του σφάλματος.

$$F = \left( \frac{MS\ effect}{MS\ error} \right)$$

(JL Rosa, 2009)

P : Αποτελεί την τιμή που εκφράζει την πιθανότητα η οποία δείχνει για τον εκάστοτε παράγοντα τον βαθμό της εμπιστοσύνης που τον αντικατοπτρίζει για την εκάστοτε διεργασία.

(JL Rosa, 2009)

## 2.22 Υλικά που χρησιμοποιούνται στον εκτυπωτή XYZ Part Pro 150

### ProTempSL

Αυτό το υλικό είναι κατασκευασμένο ώστε να έχει αντοχές σε υψηλές θερμοκρασίες και να παρουσιάζει ευκολία στην χρησιμοποίηση του ως υλικό κατασκευής.



Εικόνα 46 Προϊόν από υλικό εκτύπωσης ProTempSL (xyzprinting, 2020)

### Εφαρμογές

Ακριβές προϊόντα, με αυξημένες αντοχές σε έμφαση στην χρήση τους σε αυξημένες θερμοκρασίες. (xyzprinting, 2020)

| IDENTIFICATION                           |  |
|--|--|
| Product Name                             | ProTempSL  |
| Material Name                            | Liquid Resin   |
| Application                              | - Heat resistant<br>- Functional prototypes  |
| For use with                             | <input checked="" type="checkbox"/> PartPro150 xP  |
| SPECIFICATIONS (LIQUID MATERIAL)         |  |
| Appearance (25°C)                        | Grey   |
| Viscosity @25°C                          | 1000 ± 200   |
| Specific gravity @25°C                   | -  |
| Shrinkage (%)                            | -  |
| Shelf Life (Month)                       | 8  |
| MECHANICAL PROPERTIES                    |  |
| Hardness (ASTMD2240)                     | Shore D 85±10  |
| Tensile Strength (MPa)                   | 50 ~ 70  |
| Young's Modulus (MPa)                    | 2300 ~ 2800  |
| Elongation (%)                           | 0.5 ~ 3  |
| Flexural Strength (MPa)                  | 90 ~ 110   |
| Flexural Modulus (MPa)                   | 2800 ~ 3300  |
| Notched Izod Impact (J/m)                | 10 ~ 20  |
| THERMAL PROPERTIES                       |  |
| Operating temperature (°C)               | 25°C ±3°C (77 ± 37.4 °F) /60%RH  |
| Storage temperature (°C)                 | 10~32°C (50 -90 °F)  |
| Shipping temperature (°C)                | < 60°C   |
| Heat deflection temperature (°C)         | > 250°C  |
| OTHERS                                   |  |
| Advice of Cleaning & Post-curing Process | Clean liquid: 95% alcohol.<br>Clean Time: Depending on the surface cleanliness of the printed object.<br>Limit Clean (Soaking) time: < 10min.<br>Post Rinse: Recommend to rinse by alcohol can get clean object.<br>Post curing Time: 7mins ~ 10mins (Depend on Post |

Εικόνα 47 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού ProTempSL (xyzprinting, 2020)

## ProPreciseSL

Αυτό το υλικό έχει σχεδιαστεί με σκοπό να παρουσιάζει ιδιότητες υψηλών αντοχών και υψηλής ακαμψίας, έτσι είναι κατάλληλο για χρήση ως υλικό κατασκευής για προϊόντα με λεπτά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά. (xyzprinting, 2020)

## Εφαρμογές



Εικόνα 48 Προϊόντα από το υλικό ProPreciseSL τα οποία παρουσιάζουν υψηλή σκληρότητα και μπορούν να είναι και λειτουργικά. (xyzprinting, 2020)

| IDENTIFICATION                           |   |
|--|---|
| Product Name                             | ProPreciseSL  |
| Material Name                            | Liquid Resin  |
| Application                              | - Engineering prototypes with thin features.<br>- High stiff functional prototypes  |
| For use with                             | <input checked="" type="checkbox"/> PartPro150 xP   |
| SPECIFICATIONS (LIQUID MATERIAL)         |   |
| Appearance (25°C)                        | Clear   |
| Viscosity @25°C                          | 270±70  |
| Specific gravity @25°C                   | 1.1-1.2 g/cm <sup>3</sup>   |
| Shrinkage (%)                            | 4 ~ 6   |
| Shelf Life (Month)                       | 8   |
| MECHANICAL PROPERTIES                    |   |
| Hardness (ASTMD2240)                     | Shore D 80±10   |
| Tensile Strength (MPa)                   | 50 ~ 70   |
| Young's Modulus (MPa)                    | 1800 ~ 2300   |
| Elongation (%)                           | 4 ~ 8   |
| Flexural Strength (MPa)                  | 80 ~ 100  |
| Flexural Modulus (MPa)                   | 2100 ~ 2600   |
| Notched Izod Impact (J/m)                | 20 ~ 30   |
| THERMAL PROPERTIES                       |   |
| Operating temperature (°C)               | 25°C ±3°C (77 ± 37.4 °F) /60%RH   |
| Storage temperature (°C)                 | 10~32°C (50 -90 °F)   |
| Shipping temperature (°C)                | < 60°C  |
| Heat deflection temperature (°C)         | --  |
| OTHERS                                   |   |
| Advice of Cleaning & Post-curing Process | Clean liquid: 95% alcohol.<br>Clean Time: Depending on the surface cleanliness of the printed object Limit Clean (Soaking) time: < 10min.<br>Post Rinse: Recommend to rinse by alcohol can get clean object.<br>Post curing Time: 7mins ~ 10mins (Depend on Post curing machine). |

Εικόνα 49 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού ProPreciseSL (xyzprinting, 2020)

## ProPoly

Το υλικό αυτό παρουσιάζει καλή επιμήκυνση όπως επίσης μεγάλη αντοχή στην καταπόνηση της κρούσης, επίσης παρουσιάζει αυξημένη σκληρότητα κάτι το οποίο είναι ιδανικό για τις κατασκευές με προσθετικές διεργασίες. (xyzprinting, 2020)

## Εφαρμογές

Προϊόντα τα οποία μπορούν να δεχθούν υψηλή επιμήκυνση.

Επίσης κατασκευές οι οποίες έχουν αντοχή στην καταπόνηση στην κρούση.



Εικόνα 50 Προϊόντα που έχουν κατασκευαστεί από το υλικό ProPoly (xyzprinting, 2020)

| IDENTIFICATION                   |   |
|----------------------------------|---|
| Product Name                     | ProPoly   |
| Material Name                    | Liquid Resin  |
| Application                      | - High elongation prototypes,<br>- High impact prototypes   |
| For use with                     | <input checked="" type="checkbox"/> PartPro150 xP   |
| SPECIFICATIONS (LIQUID MATERIAL) |   |
| Appearance (25°C)                | Clear   |
| Viscosity @25°C                  | 1400 ± 400  |
| Specific gravity @25°C           | -   |
| Shrinkage (%)                    | -   |
| Shelf Life (Month)               | 8   |
| MECHANICAL PROPERTIES            |   |
| Hardness (ASTMD2240)             | Shore D 75±10   |
| Tensile Strength (MPa)           | 25 ~ 40   |
| Young's Modulus (MPa)            | 1000 ~ 1500   |
| Elongation (%)                   | 40 ~ 60   |
| Flexural Strength (MPa)          | 25 ~ 40   |
| Flexural Modulus (MPa)           | 600 ~ 1000  |
| Notched Izod Impact (J/m)        | 50 ~ 70   |
| THERMAL PROPERTIES               |   |
| Operating temperature (°C)       | 25°C ±3°C (77 ± 37.4 °F) /60%RH   |
| Storage temperature (°C)         | 10~32°C (50 -90 °F)   |
| Shipping temperature (°C)        | < 60°C  |
| Heat deflection temperature (°C) | --  |
| OTHERS                           |   |
| Advice of Cleaning & Post-curing | Clean liquid: 95% alcohol.<br>Clean Time: Depending on the surface cleanliness of the printed object.<br>Limit Clean (Soaking) time: < 10min. |

Εικόνα 51 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού: ProPoly (xyzprinting, 2020)

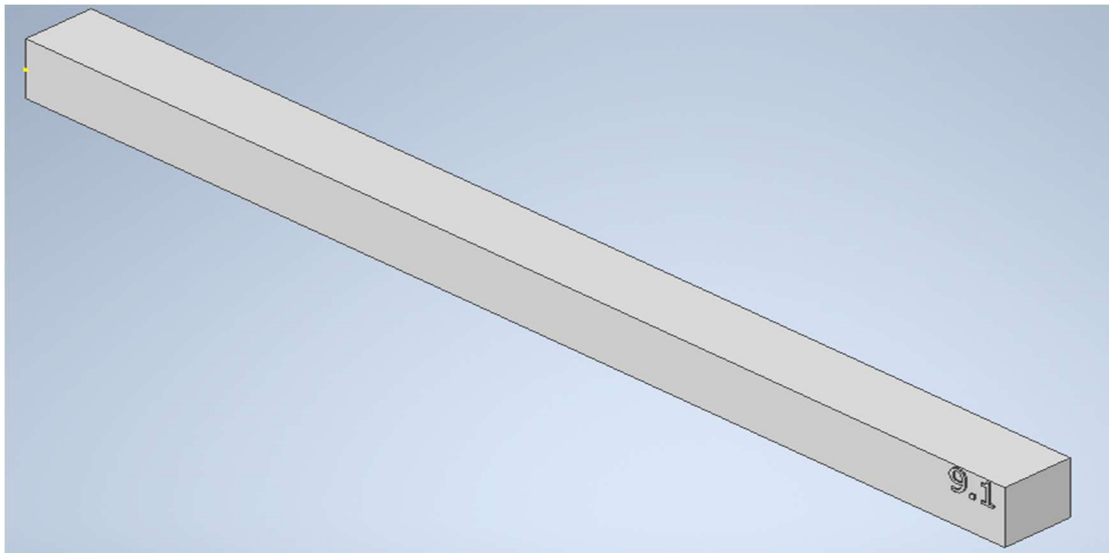


### 3 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας έγινε κατά την ακόλουθη σειρά, αναζήτηση βιβλιογραφικών πηγών σχετικά με τις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, τα πρότυπα τα οποία ακολουθούνται για τον πειραματικό υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, την λειτουργία του πειραματικού εξοπλισμού, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται, Ο σχεδιασμός πειραμάτων με τους παραμέτρους της εκτύπωσης. Στην συνέχεια έγινε χρήση σχεδιαστικού προγράμματος για την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων, στις διαστάσεις που ορίζει το πρότυπο. Πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση του slicer που χρησιμοποιεί η πειραματική διάταξη, στην συνέχεια έγιναν δοκιμαστικές διεργασίες ώστε να διατυπωθούν οι δυνατότητες εκτύπωσης των δοκιμίων από την πειραματική διάταξη, αφού αποφασίστηκε και υλοποιήθηκε ο τρόπος εκτύπωσης, πραγματοποιήθηκε η σκλήρυνση τους. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν στην καταπόνηση της κάμψης με σκοπό την μελέτη της συμπεριφοράς τους, της αντοχής τους, και η συσχέτιση των ιδιοτήτων τους ανάλογα με τους παραμέτρους εκτύπωσης του καθενός. Τέλος πραγματοποιήθηκε σύγκριση και συζήτηση των αποτελεσμάτων.

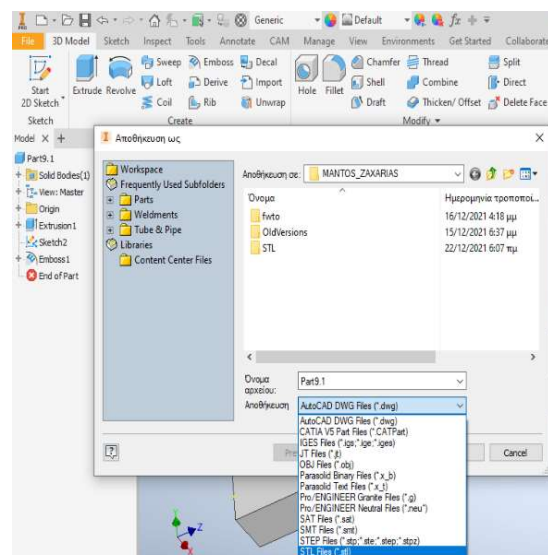
#### 4 Πειραματικό Μέρος

Το πειραματικό μέρος πραγματοποιήθηκε αρχικά με την μοντελοποίηση των δοκιμών στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Inventor της Autodesk. Οι διαστάσεις του δοκιμίου της πειραματικής διαδικασίας είναι 8mm X 8mm X 120mm βάση του προτύπου που ακολουθήθηκε ASTM D3039. Στα δοκίμια έχει χρησιμοποιηθεί αρίθμηση με σκοπό τον διαχωρισμό τους. Στον αριθμό ο οποίος επισημαίνεται υπάρχει και η ένδειξη της επανάληψης του δοκιμίου, για παράδειγμα η αρίθμηση 2.5 υποδηλώνει την 2<sup>η</sup> σειρά μεθοδολογίας πειραμάτων και είναι το δοκίμιο 5<sup>ης</sup> επανάληψης.

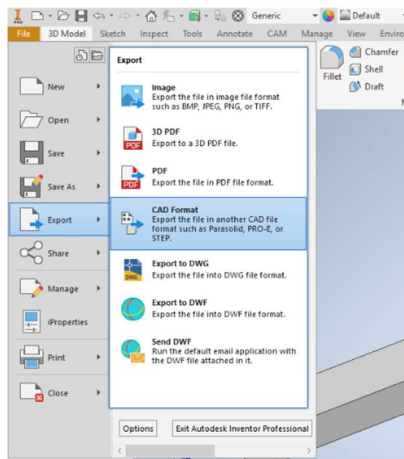


Εικόνα 52 Παραπάνω απεικονίζεται ένα από τα δοκίμια τα οποία δημιουργήθηκαν, είναι από την σειρά 9 που σημαίνει ότι εκτυπώθηκε παράλληλα στον (άξονα Z)

Στην συνέχεια αφού δημιουργηθεί το 3d μοντέλο του δοκιμίου, πραγματοποιείται εξαγωγή του σε μορφή stl. Η διαδικασία γίνεται με την επιλογή CAD Format και στην συνέχεια χρησιμοποιείται η επιλογή STL Files.

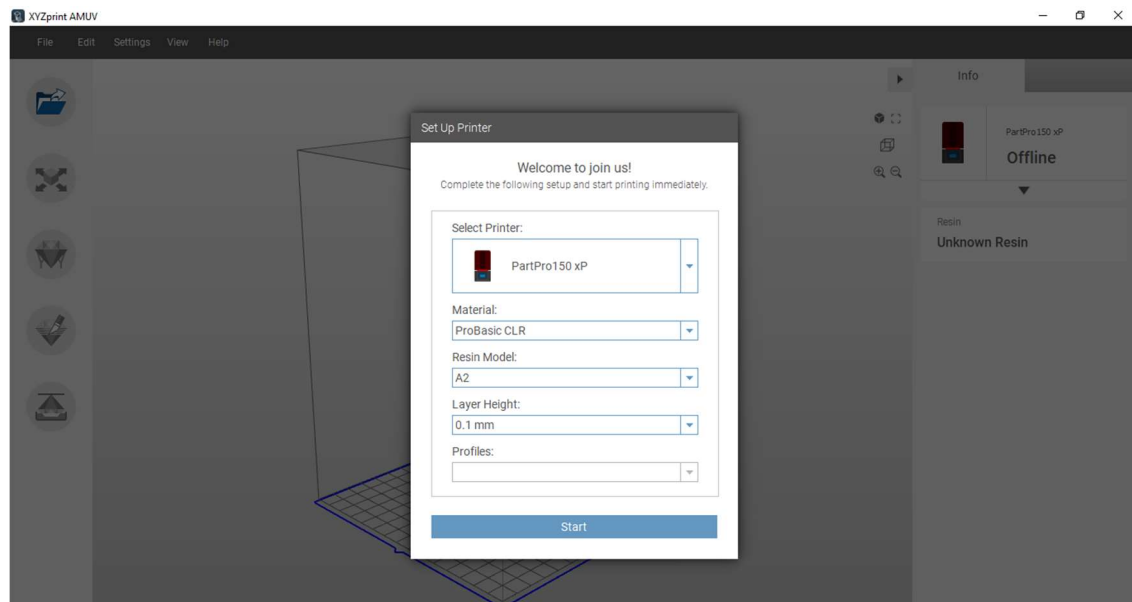


Εικόνα 53 Επιλογή STL αρχείου



Εικόνα 54 Επιλογές για εξαγωγή μοντελοποιημένου δοκιμίου

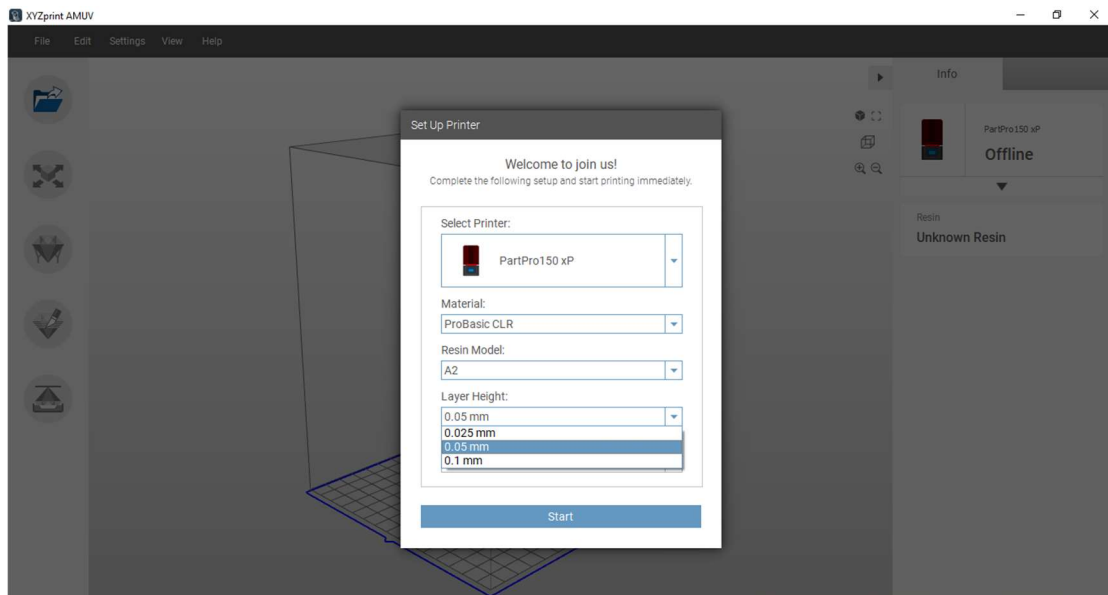
Η εξαγωγή του αρχείου γίνεται σε μορφή STL, στο πρόγραμμα τύπου slicer το οποίο θα δώσει στον χρήστη την επιλογή για την προσθήκη στηρίξεων, την ρύθμιση του πάχους των στρωμάτων, όπως και θέσης εκτύπωσης, θα κωδικοποιήσει το αρχείο stl σε G κώδικα για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διεργασία της εκτύπωσης.



Εικόνα 55 Επιλογές slicer

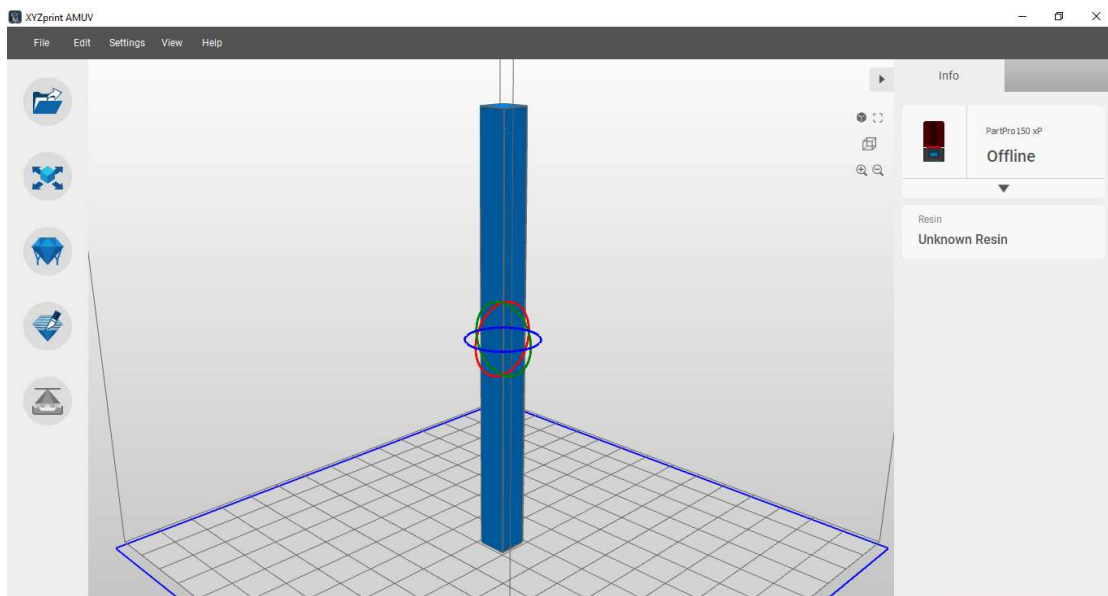
Να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα που χρησιμοποιεί ο εκτυπωτής sla (XYZ PartPro 150 Xp) είναι το XYZ print AMUV.

Για την διεξαγωγή της πειραματικής διεργασίας, η επιλογή η οποία χρησιμοποιήθηκε στο πάχος των στρώσεων είναι η : 0,05 mm όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

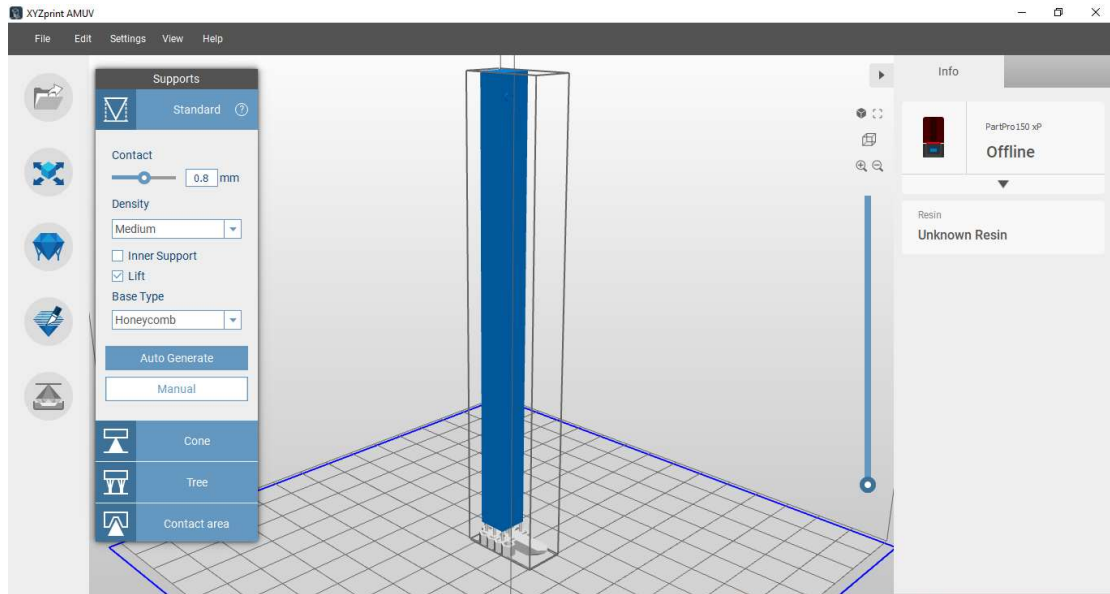


Εικόνα 56 Επιλογές πάχους στο slicer

Δίδονται οι επιλογές στον χρήστη για μετακίνηση του δοκιμίου στην επιθυμητή θέση εκτύπωσης, για την εφαρμογή στηρίξεων καθώς και η επιλογή slice η οποία αποτελεί και το τελευταίο βήμα πριν την έναρξη της εκτύπωσης.



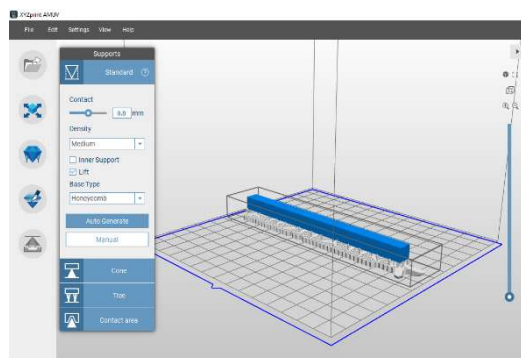
Εικόνα 57 Επιλογές θέσης εκτύπωσης στο slicer



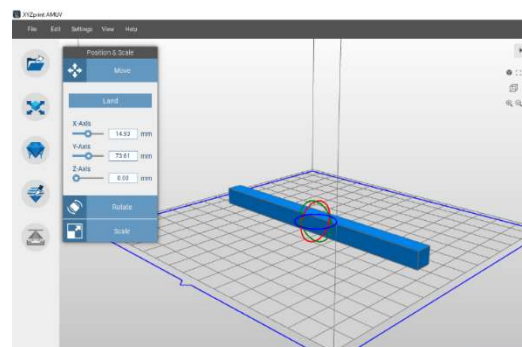
Εικόνα 58 Επιλογές στηρίξεων στο slicer

Στην επιλογή στηρίξεων πραγματοποιήθηκε η αυτόματη ρύθμιση τύπου Honeycomb καθώς παρουσίαζε ικανοποιητικά αποτελέσματα στις αρχικές δοκιμές όσο αναφορά τις εκτυπώσεις στον άξονα Z.

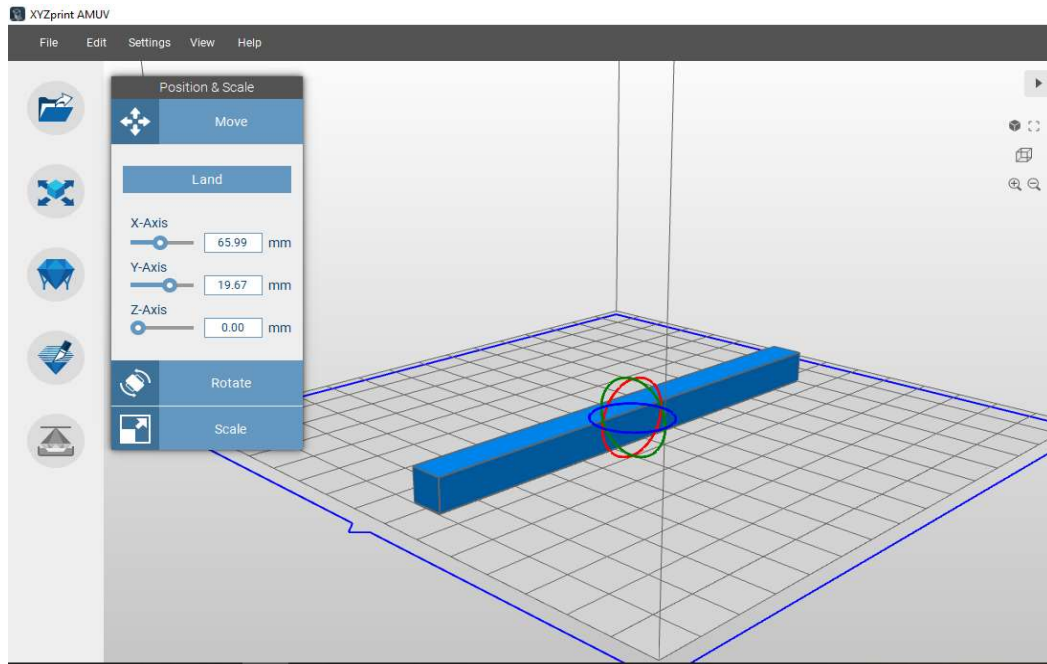
Όπως αναφέρεται και παρακάτω στις εκτυπώσεις που ήταν παράλληλες με τους άξονες επιπέδου δεν χρησιμοποιήθηκαν στηρίξεις, καθώς η χρήση τους δεν επέφερε καλύτερα αποτελέσματα στις αρχικές δοκιμαστικές εκτυπώσεις.



Εικόνα 59 Δοκίμο σε θέση εκτύπωσης παράλληλη στον άξονα X με χρήση στηρίξεων Honeycomb

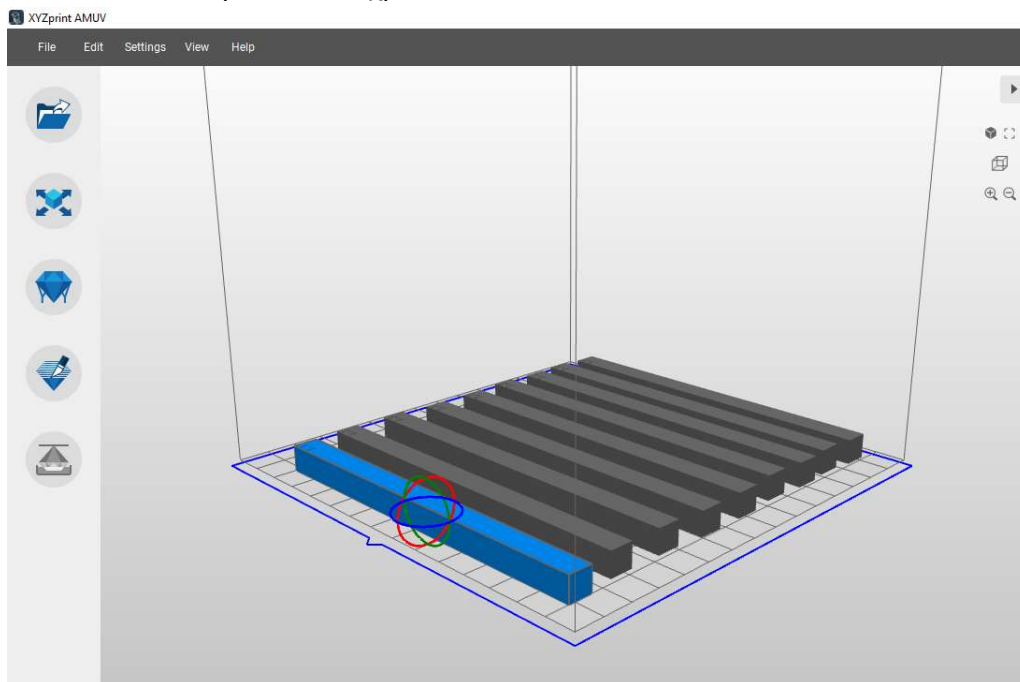


Εικόνα 60 Δοκίμο σε θέση εκτύπωσης παράλληλη στον άξονα X χωρίς χρήση στηρίξεων.



Εικόνα 61 Δοκίμιο τοποθετημένο παράλληλα στον άξονα Y εκτύπωσης, χωρίς την χρήση στηρίξεων.

Να αναφερθεί ότι στο πρόγραμμα τύπου slicer δίνεται η δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών δοκιμών ταυτόχρονα.

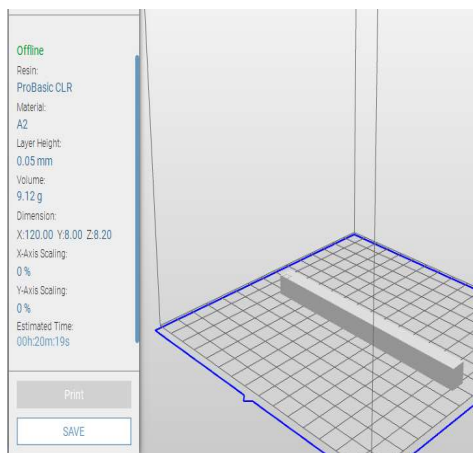


Εικόνα 62 Παράδειγμα δυνατότητας εκτύπωσης πολλαπλών δοκιμών ταυτόχρονα, παράλληλα στον άξονα Z (1.1-3.3)

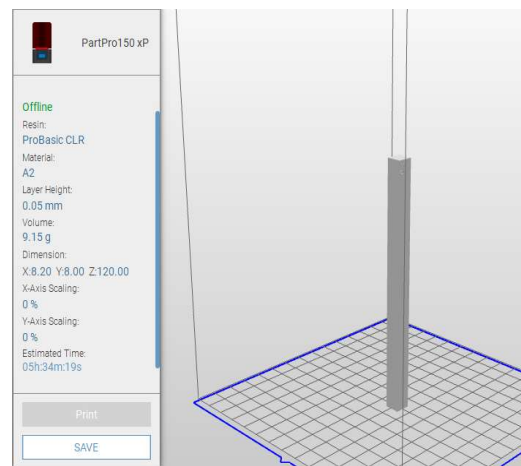
Παρατηρήθηκε ότι η απόσταση μεταξύ των δοκιμών είχε καθοριστικό ρόλο στην χρονική περάτωση της διεργασίας καθώς όσο ελαχιστοποιείτε η απόσταση τόσο μικρότερος και ο χρόνος της εκτύπωσης. Οι εκτυπώσεις οι οποίες ήταν παράλληλες



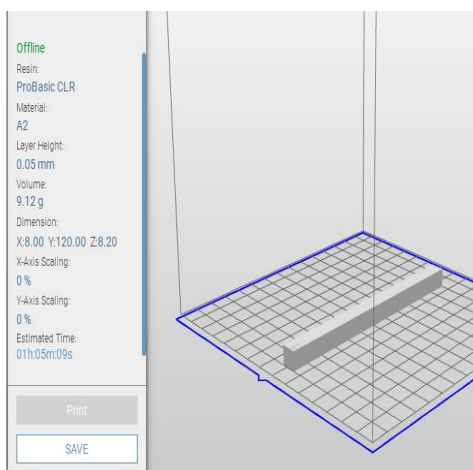
στον άξονα X ήταν ταχύτερες σε τάξη μεγέθους για αριθμό μονάδας ήταν περίπου 20 λεπτά. Οι διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν σε θέση παράλληλη με τον άξονα Y για αριθμό μονάδας χρειαστήκαν κατά προσέγγιση περίπου 1 ώρα και 5 λεπτά. Για την εκτύπωση στον Z άξονα χρειάζονται περίπου 5 ώρες και 34 λεπτά αλλά να σημειωθεί ότι στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν στηρίξεις στο κάθετο άξονα, οπότε ο χρόνος περάτωσης της διεργασίας για ένα δοκίμιο είναι κατά εκτίμηση 5 ώρες και 52 λεπτά. Οι διαφοροποιήσεις οφείλονται στην ταχύτητα που γίνονται οι μετατοπίσεις στα επίπεδα από τις σερβομηχανές και από την ταχύτητα της ανύψωσης της επιφάνειας εκτύπωσης σε κάθε στρώμα. Η αιτία της μεγάλης χρονικής διαφοράς στην καθετή εκτύπωση είναι το γεγονός πολλαπλών στρωμάτων που κατά συνέπεια σημαίνει μεγάλο αριθμό μετατοπίσεων της επιφάνειας εκτύπωσης, μετατόπιση η οποία διαρκεί μεγαλύτερο διάστημα σε σύγκριση με την μετατόπιση στο επίπεδο.



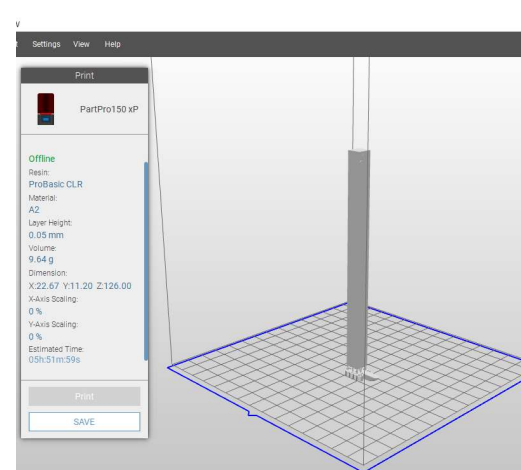
Εικόνα 63 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμίου , παράλληλα στον άξονα X



Εικόνα 64 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμίου , παράλληλα στον άξονα Z



Εικόνα 66 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμίου, παράλληλα στον άξονα Y



Εικόνα 65 Χρόνος εκτύπωσης ενός δοκιμίου , παράλληλα στον άξονα Z



#### 4.1 Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε

ProBasic

Είναι κατάλληλη για γενικές εφαρμογές, παρουσιάζει μέτρια σκληρότητα και χρησιμοποιείται για πρότυπα που υποβάλλονται για μετρήσεις μηχανικής αντοχής, επίσης υπάρχει σε πολλά χρώματα για την κάλυψη των αναγκών διάφορων εφαρμογών.

Εφαρμογές :

Πρωτότυπα μοντέλα.



Εικόνα 67 Παραπάνω εικονίζονται προϊόντα από το υλικό ProBasic (xyzprinting, 2020)

| IDENTIFICATION                           |   |
|--|---|
| Product Name                             | ProBasic  |
| Material Name                            | Liquid Resin  |
| Application                              | Hobby model Prototyping   |
| For use with                             | <input checked="" type="checkbox"/> PartPro150 xP   |
| SPECIFICATIONS (LIQUID MATERIAL)         |   |
| Appearance (25°C)                        | Clear, Black, White   |
| Viscosity @25°C                          | Clear: 520±100  |
|  | Black: 480±100  |
|  | White : 520±100   |
| Specific gravity @25°C                   | 1.1-1.2 g/cm <sup>3</sup>   |
| Shrinkage (%)                            | (Clear) 4 ~ 6, (Black, White), 6 ~ 8  |
| Shelf Life (Month)                       | 8   |
| MECHANICAL PROPERTIES                    |   |
| Hardness (ASTMD2240)                     | Shore D 80±10   |
| Tensile Strength (MPa)                   | 30 ~ 50   |
| Young's Modulus (MPa)                    | Clear: 1300 ~ 1800  |
|  | Black, White: 1100 ~ 1600   |
| Elongation (%)                           | 2 ~ 6   |
| Flexural Strength (MPa)                  | Clear: 60 ~ 80  |
|  | Black, White: 50 ~ 70   |
| Flexural Modulus (MPa)                   | Clear: 1700 ~ 2200  |
|  | Black, White: 1500 ~ 2000   |
| Notched Izod Impact (J/m)                | 15 ~ 25   |
| THERMAL PROPERTIES                       |   |
| Operating temperature (°C)               | 25°C ±3°C (77 ± 37.4 °F) /60%RH   |
| Storage temperature (°C)                 | 10~32°C (50 -90 °F)   |
| Shipping temperature (°C)                | < 60°C  |
| Heat deflection temperature(°C)          | -   |
| OTHERS                                   |   |
| Advice of Cleaning & Post-curing Process | Clean liquid: 95% alcohol.<br>Clean Time: Depending on the surface cleanliness of the printed object Limit Clean (Soaking) time: < 10min.<br>Post Rinse: Recommend to rinse by alcohol can get clean object.<br>Post curing Time: 7mins ~ 10mins (Depend on Post curing machine). |

Εικόνα 68 Παρουσιάζεται πίνακας με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υλικού ProBasic (xyzprinting, 2020)

### Εκτυπώσεις

Οι εκτυπώσεις που σχεδιαστήκαν αρχικά να πραγματοποιηθούν ήταν 3<sup>ος</sup> επαναλήψεις για κάθε ένα πείραμα, μετά τις δοκιμαστικές εκτυπώσεις, ξεκίνησε η παραγωγή δοκιμών στον Χ άξονα για τα 3 πρώτα δοκίμια της μεθοδολογίας με τις αντίστοιχες επαναλήψεις, δηλαδή 3 \* 3<sup>ος</sup> φορές το καθένα 9 δοκίμια με την την πρώτη εκτύπωση. Να τονιστεί ότι τα δοκίμια δεν έγιναν με προσθήκη στηρίξεων διότι στις αρχικές δοκιμές εμφανιζόταν έντονα το φαινόμενο της κλίσης των δοκιμών. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε αντίστοιχα η ίδια διαδικασία εκτύπωσης για τον άξονα Υ, 3<sup>ων</sup> δοκιμών 3 ης φορές το καθένα δηλαδή 9 δοκιμών.

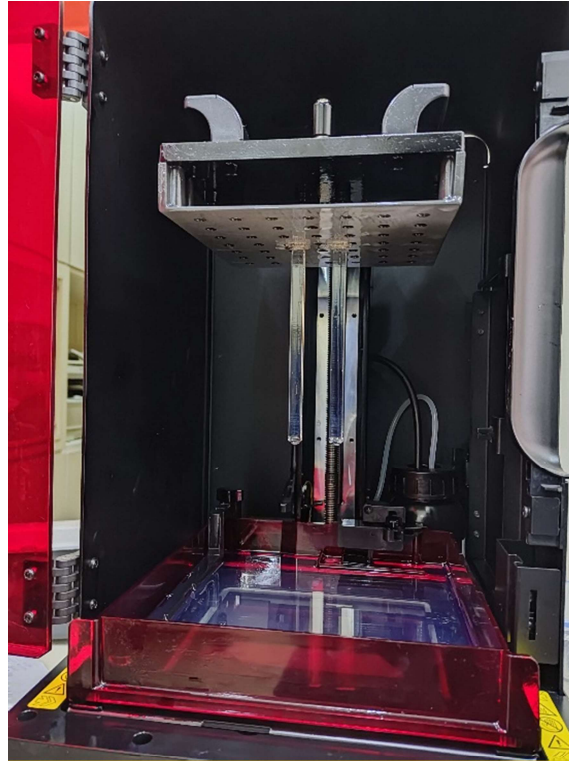
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

| N/N | FACTOR 1 | FACTOR 2 | FACTOR 3 |
|-----|----------|----------|----------|
| 1   | X        | UV1      | UT1      |
| 2   | X        | UV2      | UT2      |
| 3   | X        | UV3      | UT3      |
| 4   | Y        | UV1      | UT2      |
| 5   | Y        | UV2      | UT3      |
| 6   | Y        | UV3      | UT1      |
| 7   | Z        | UV1      | UT3      |
| 8   | Z        | UV2      | UT1      |
| 9   | Z        | UV3      | UT2      |

Αρχικά πραγματοποιήθηκε un curing στα κομμάτια των αξόνων Χ,Υ, βάση της μεθοδολογίας Taguchi τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν πριν και μετά από την διαδικασία, στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε φωτογράφιση της εγκατάστασης, Πραγματοποιήθηκε η εκτύπωση (Ζ άξονα δοκιμών) με θέση εκτύπωσης των δοκιμών στην σε πιο κοντινή θέση όσο αναφορά τον άξονα Υ καθώς έτσι παρατηρήθηκε ότι λόγω της ελαχιστοποίησης της μετατόπισής της σερβομηχανής, η

ώρα της εκτύπωσης μειώθηκε από 10 ώρες και 14 λεπτά (περίπου) σε 5 ώρες και 52 λεπτά.

Οι εκτυπώσεις των δυο δοκιμών (7.3-8.3) πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία.



*Εικόνα 69 Δοκίμια παράλληλα στον άξονα Z μετά την διεργασία της εκτύπωσης πριν την εξαγωγή τους από την επιφάνεια εκτύπωσης*

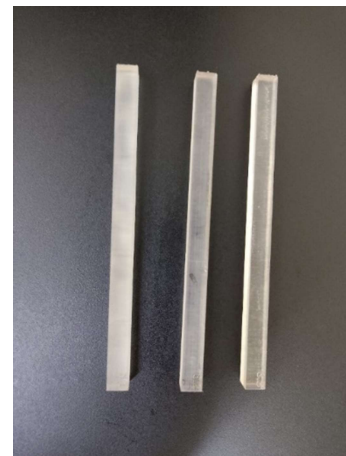
Ακολουθήσε καθαρισμός από την υπολοιπούσα ρητίνη με χρήση υποτονικής αλκοόλης, και μετά τα δοκίμια (7,1 – 7,2 - 7,3) ακολουθήσαν την προβλεπόμενη διαδικασία του UV Curing.



*Εικόνα 72 Δοκίμια (7,1 – 7,2 - 7,3), πριν το UV Curing.*



*Εικόνα 71 Δοκίμια (7,1 – 7,2 - 7,3) Μετά το UV Curing.*



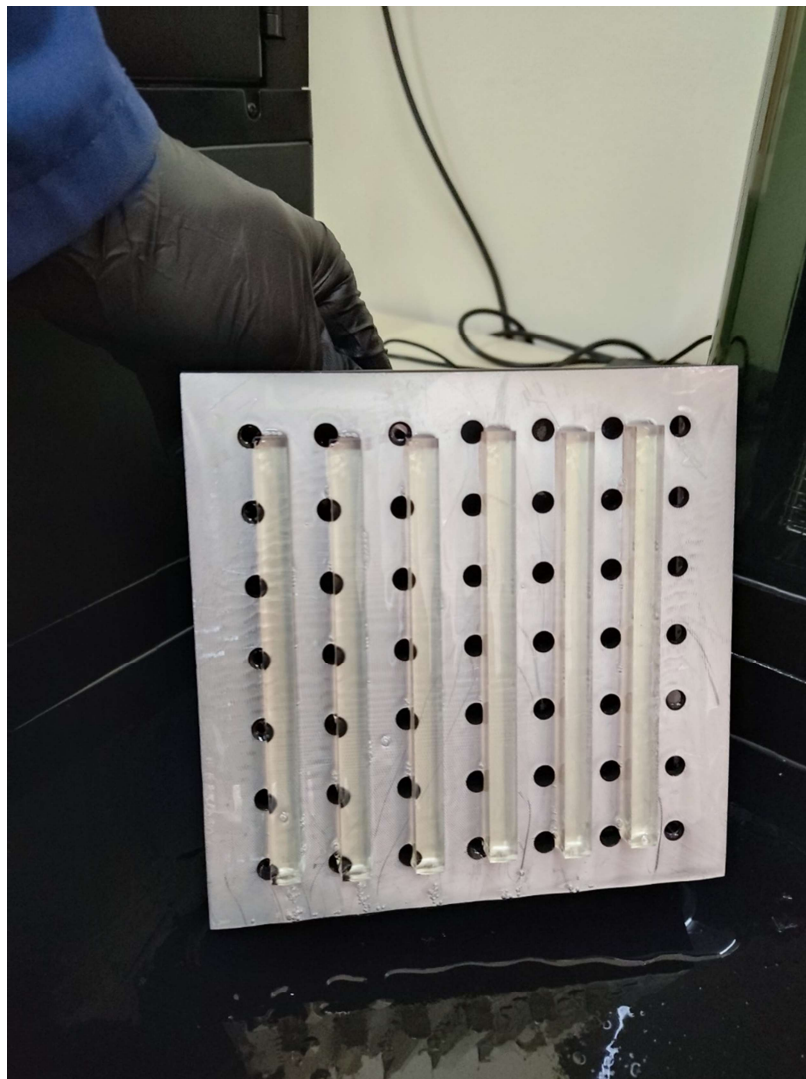
*Εικόνα 70 Αντίστοιχα και για τα δοκίμια (8.1-8.2-8.3) μετά την εφαρμογή UV Curing*

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι εκτυπώσεις των αρχικών αριθμών δοκιμών, 9 διαφορετικών δοκιμών από 3ης επαναλήψεις το καθένα (με διαφορετικούς παράγοντες διάταξης εκτύπωσης και διαφορετικούς χρόνους και εντάσεις ακτινοβολίας UV). Στην συνέχεια αποφασίστηκε με τους διδάσκοντες η αύξηση των επαναληπτικών δοκιμών από 3 σε 5 για το κάθε δοκίμιο από τα 9 με σκοπό τα πιο έγκυρα και αποδεκτά επιστημονικά δεδομένα.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτύπωση στον άξονα X για τα επιπλέον δοκίμια.

1.4 - 1.5 - 2.4 - 2.5 - 3.4 - 3.5

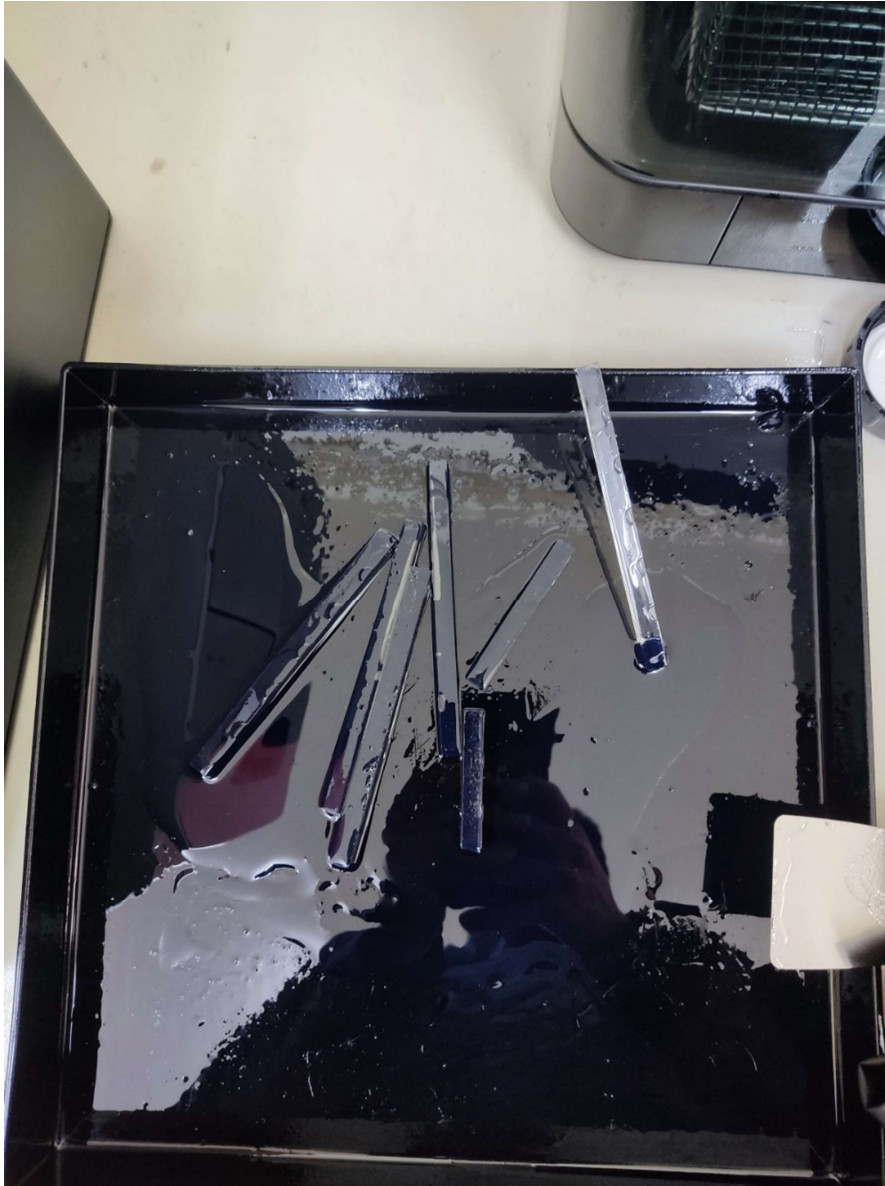
Ο χρόνος της διαδικασίας διήρκησε 1ωρα και 17 λεπτά και για τα 6 δοκίμια, ο λόγος είναι ότι οι σερβομηχανές στον χ άξονα έχουν μεγάλες ταχύτητες μετατόπισης και έτσι επιτυγχάνεται γρήγορη εκτύπωση των δοκιμών.



Εικόνα 73 Αφαίρεση της επιφάνειας εκτύπωσης από την AM μηχανή με σκοπό την αποκόλληση των πειραματικών δοκιμών.



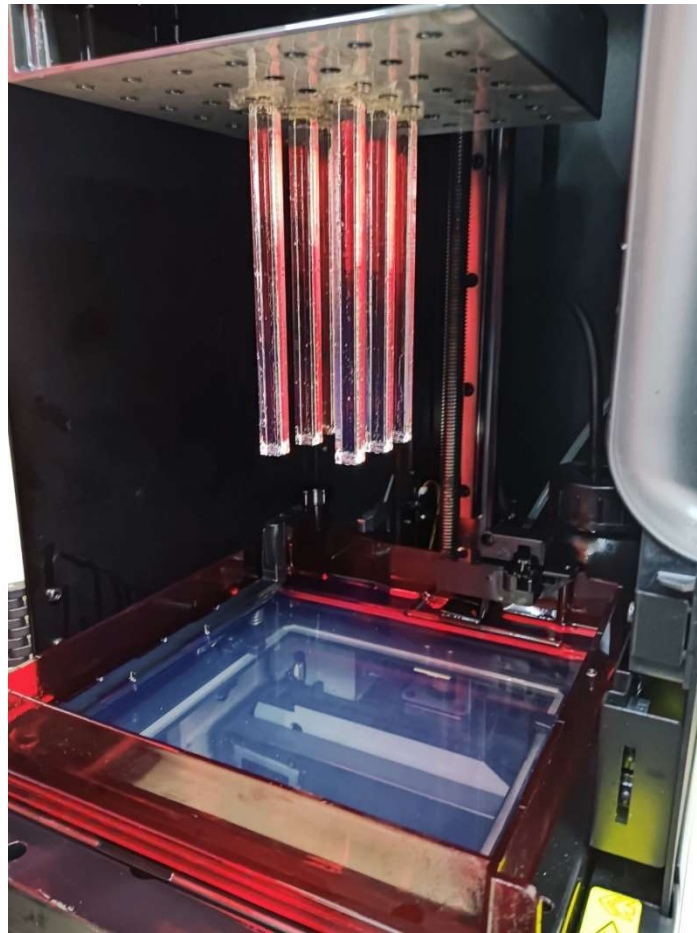
Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η αφαίρεση των κομματιών από την επιφάνεια εκτύπωσης με χρήση εργαλείου τύπου σπάτουλας.



Εικόνα 74 Εικονίζεται η διαδικασία πριν το καθαρισμό των δοκιμών από την υπολιπούσα ρητίνη.

Στην συνέχεια εκτυπωθήκαν δοκίμια που είναι τοποθετημένα για τον  $\gamma$  άξονα δηλαδή τα 4.4 -4.5 -5.4 – 5.5 - 6.4 – 6.5.

Έπειτα άρχισε η εκτύπωση των κομματιών 7.4-7.5-8.4-8.5-9.4-9.5.



Εικόνα 75 Εκτύπωση στον κατακόρυφο άξονα

Τα δοκίμια στον Z άξονα (7.4-7.5-8.4-8.5-9.4-9.5) ολοκληρωθήκαν με επιτυχία και ακολουθήσε η διαδικασία αφαίρεσης τους από την επιφάνεια εκτύπωσης. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ο καθαρισμός των τεμαχίων από τις στηρίξεις (στον άξονα Z) και από την υπολιπούσα ρητίνη με την χρήση ισοπροπυλικής αλκοόλης και του παρακάτω Μηχανήματος.



Εικόνα 76 Το form wach που χρησιμοποιήθηκε για το καθαρισμό των δοκιμίων

Τα δοκίμια μετά τον καθαρισμό τους φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 77 Τα δοκίμια μετά τον καθαρισμό τους φαίνονται στην παραπάνω εικόνα

Στην συνέχεια ακολουθήσε η διαδικασία του UV Curing στους χρόνους και τις εντάσεις ακτινοβολίας που βασίζονται στην μεθοδολογία taguigi στο παρακάτω.



Εικόνα 79 Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία του UV Curing



Εικόνα 78 Παραπάνω παρατίθενται τα δοκίμια μετά την διαδικασία του UV Curing.

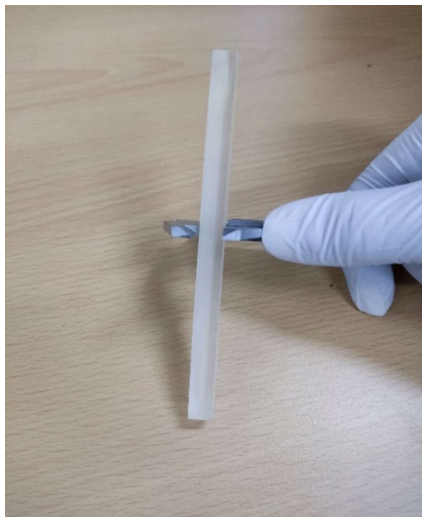


#### 4.2 Διαστασιολογικός έλεγχος

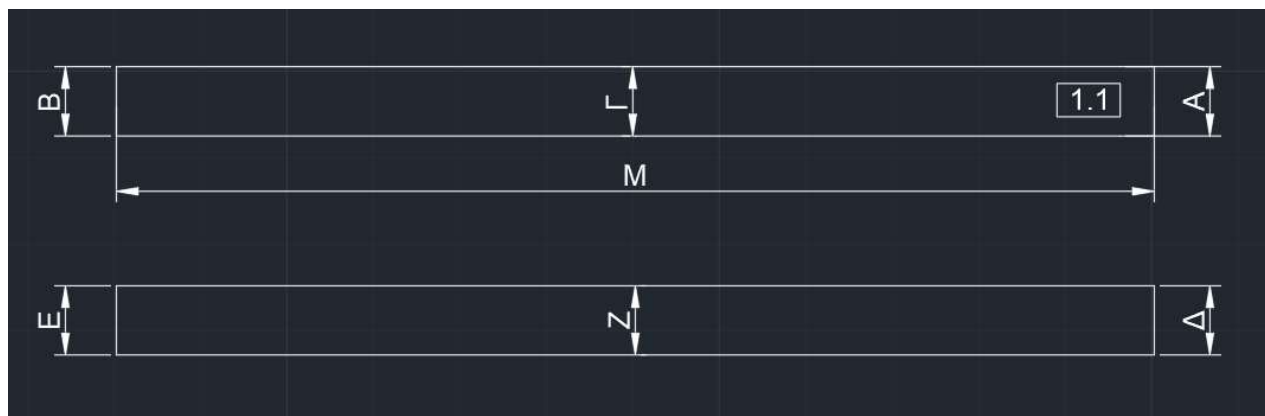


Εικόνα 80 Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια τα οποία παραχθήκαν από την πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, είναι η μέτρηση των διαστάσεων όλων των δοκιμίων σε 7 σημεία.



Σχηματική απεικόνιση των μετρήσεων των δοκιμών από σχέδιο στο autocad.



Εικόνα 81 Στο παραπάνω σχέδιο απεικονίζονται και ονομάζονται τα σημεία που έχει διεξαχθεί μέτρηση

Πίνακας αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

| A/A | (A) (mm) | (Δ) (mm) | (M) (mm) | (B) (mm) | (E) (mm) | (Γ) (mm) | (Z) (mm) |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.1 | 7,94     | 6,8      | 119,52   | 8,04     | 6,86     | 8,14     | 7,14     |
| 1.2 | 7,94     | 6,78     | 119,62   | 8        | 7,08     | 8        | 7,24     |
| 1.3 | 7,98     | 6,72     | 119,66   | 7,98     | 6,8      | 8        | 6,9      |
| 1.4 | 8,2      | 7,56     | 119,78   | 8,12     | 7,58     | 8,18     | 7,64     |
| 1.5 | 8,04     | 7,46     | 120,1    | 8,14     | 7,52     | 8,2      | 7,62     |
| 2.1 | 8        | 6,68     | 119,44   | 8        | 6,84     | 8,04     | 6,86     |
| 2.2 | 8        | 6,62     | 119,42   | 8,06     | 6,68     | 8,04     | 6,88     |
| 2.3 | 7,98     | 6,58     | 119,44   | 8        | 6,96     | 8,02     | 6,68     |
| 2.4 | 8,14     | 7,44     | 119,7    | 8,16     | 7,46     | 8,16     | 7,46     |
| 2.5 | 8,14     | 8,34     | 119,56   | 8,14     | 7,4      | 8,18     | 7,5      |
| 3.1 | 7,98     | 6,46     | 119,65   | 8        | 6,54     | 8        | 6,78     |
| 3.2 | 8,04     | 6,38     | 119,5    | 8,02     | 6,46     | 8,04     | 6,48     |
| 3.3 | 8,36     | 7,34     | 119,82   | 8,42     | 7,66     | 8,32     | 7,44     |
| 3.4 | 8,16     | 7,24     | 119,86   | 8,04     | 7,26     | 8,14     | 7,36     |
| 3.5 | 8,34     | 7,36     | 119,64   | 8,42     | 7,7      | 8,34     | 7,44     |
| 4.1 | 7,54     | 8        | 119      | 7,16     | 8,06     | 7,44     | 8,04     |
| 4.2 | 7,58     | 7,88     | 119,32   | 7,24     | 8,18     | 7,46     | 8,42     |
| 4.3 | 7,64     | 8,32     | 119,4    | 7,22     | 8,34     | 7,48     | 8,44     |
| 4.4 | 7,46     | 8,24     | 119,24   | 7,46     | 8,16     | 7,44     | 8,36     |
| 4.5 | 7,56     | 8,4      | 119,54   | 7,46     | 8,44     | 7,44     | 8,44     |
| 5.1 | 7,6      | 8,14     | 119,38   | 7,36     | 8,2      | 7,48     | 8,2      |

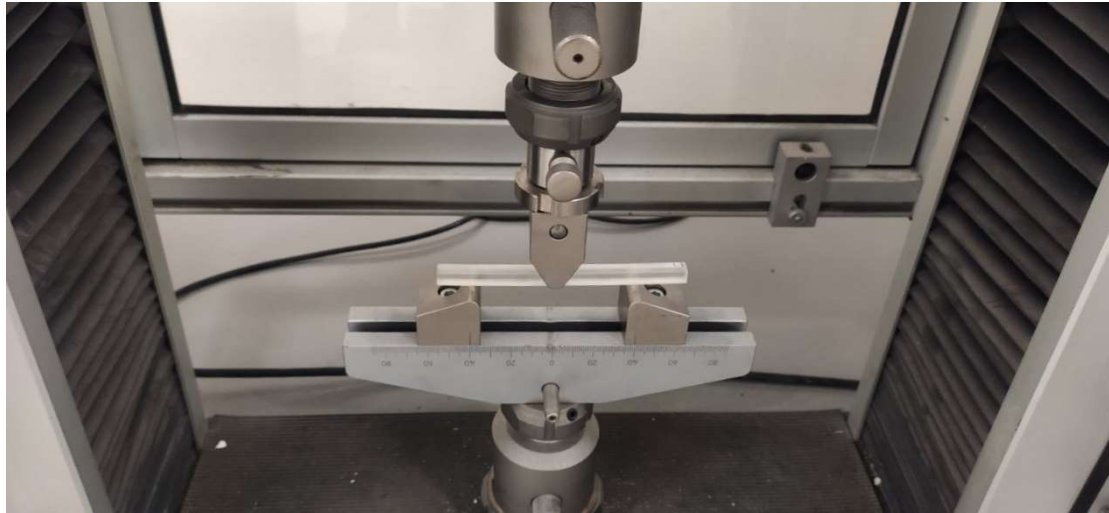
|     |      |      |        |      |      |      |      |
|-----|------|------|--------|------|------|------|------|
| 5.2 | 7,66 | 8,14 | 119,42 | 8,2  | 8,24 | 7,8  | 8,24 |
| 5.3 | 7,82 | 8,16 | 119,04 | 7,44 | 7,24 | 7,48 | 8,18 |
| 5.4 | 7,08 | 8,48 | 119,52 | 7,46 | 8,22 | 7,34 | 8,48 |
| 5.5 | 7,58 | 8,32 | 119,52 | 7,18 | 8,24 | 7,46 | 8,36 |
| 6.1 | 7,64 | 8,22 | 119,2  | 7,16 | 8,32 | 7,56 | 8,22 |
| 6.2 | 7,54 | 8,22 | 119,36 | 7,12 | 8,22 | 7,36 | 8,36 |
| 6.3 | 7,74 | 8,04 | 119,22 | 7,08 | 7,98 | 7,46 | 8,04 |
| 6.4 | 7,64 | 8,42 | 119,48 | 7,24 | 8,44 | 7,44 | 8,44 |
| 6.5 | 7,56 | 8,5  | 119,42 | 7,18 | 8,3  | 7,44 | 8,48 |
| 7.1 | 7,92 | 8    | 120,48 | 7,86 | 7,86 | 7,9  | 7,96 |
| 7.2 | 7,94 | 8    | 120,4  | 7,86 | 7,92 | 7,92 | 8    |
| 7.3 | 7,76 | 8,08 | 120,94 | 7,76 | 8    | 7,76 | 8,04 |
| 7.4 | 7,84 | 8,04 | 120,82 | 7,8  | 8    | 7,86 | 8,04 |
| 7.5 | 7,86 | 8,02 | 120,34 | 7,84 | 7,92 | 7,9  | 8    |
| 8.1 | 7,88 | 8    | 120,42 | 7,86 | 7,86 | 7,9  | 8    |
| 8.2 | 7,96 | 8    | 120,34 | 7,86 | 7,86 | 7,94 | 7,98 |
| 8.3 | 7,82 | 8,14 | 120,68 | 7,8  | 8,08 | 7,8  | 8,12 |
| 8.4 | 7,86 | 8,04 | 120,9  | 7,86 | 7,96 | 7,9  | 8,04 |
| 8.5 | 7,88 | 8    | 120,48 | 7,86 | 7,92 | 7,9  | 8,04 |
| 9.1 | 7,86 | 8    | 120,36 | 7,86 | 7,88 | 7,86 | 7,98 |
| 9.2 | 7,86 | 8    | 120,16 | 7,86 | 7,96 | 7,9  | 8,02 |
| 9.3 | 7,9  | 8,02 | 120,12 | 7,86 | 7,98 | 7,9  | 8    |
| 9.4 | 7,92 | 8,06 | 120,34 | 7,84 | 8    | 7,92 | 8    |
| 9.5 | 7,86 | 8    | 120,2  | 7,86 | 7,98 | 7,86 | 8,02 |

Στατιστική ανάλυση μετρήσεων δοκιμών

|  | A      | (Δ)    | (M)     | (B)    | (E)    | (Γ)    | (Z)    |
|--|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
|  | (mm)   | (mm)   | (mm)    | (mm)   | (mm)   | (mm)   | (mm)   |
| Μέσος όρος                             | 7,84   | 7,77   | 119,82  | 7,76   | 7,75   | 7,82   | 7,83   |
| Άθροισμα                               | 353,00 | 349,64 | 5391,75 | 349,14 | 348,56 | 352,10 | 352,36 |
| ΔΧ                                     | 0,24   | 0,61   | 0,52    | 0,37   | 0,54   | 0,29   | 0,54   |
| Σφάλμα (%)                             | 3,10   | 7,87   | 0,44    | 4,75   | 6,98   | 3,65   | 6,94   |
| Σ (Χi - Χ Μέσης<br>Τιμής) <sup>2</sup> | 2,61   | 16,47  | 12,00   | 5,98   | 12,85  | 3,58   | 12,99  |

### 4.3 Κάμψη & Διαγράμματα (Stress – Strain)

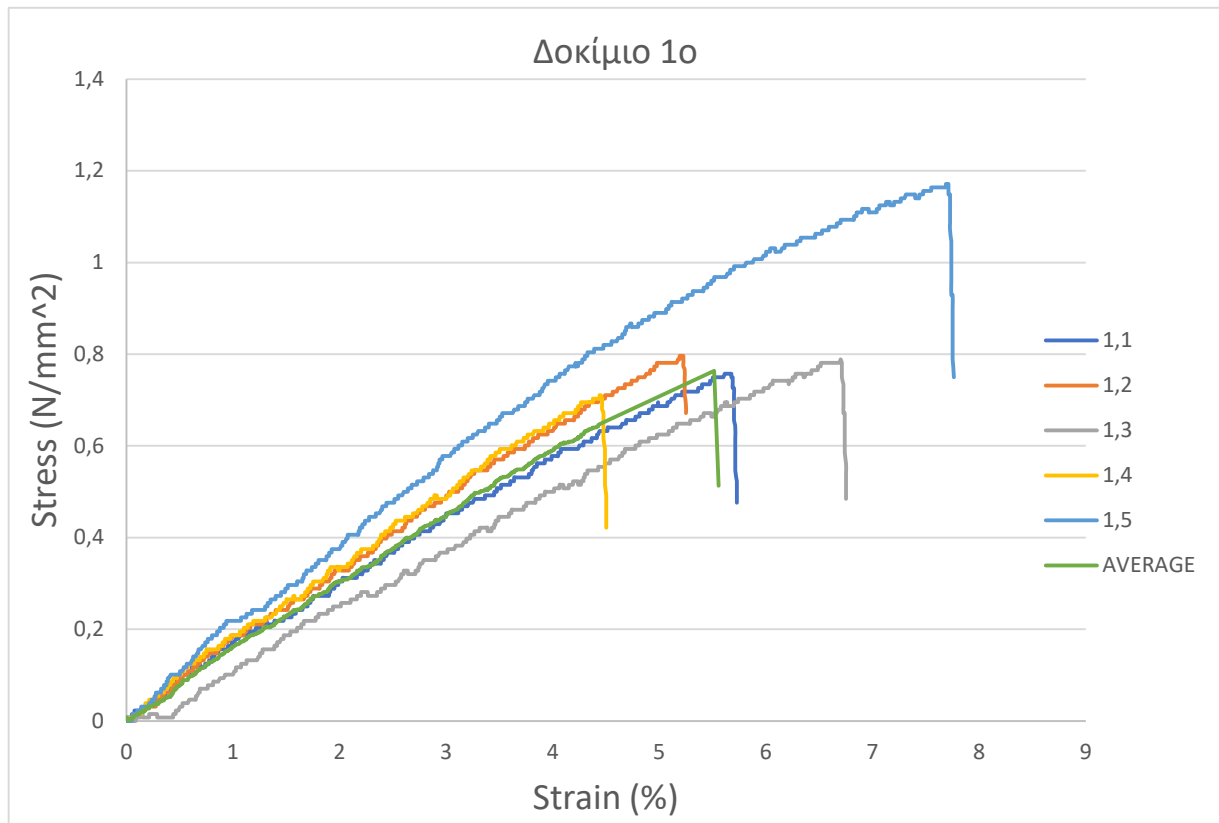
Όλες οι σειρές δοκιμών και οι επαναλήψεις τους, υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων.



Εικόνα 82 Ενδεικτική φωτογραφία της πειραματικής διαδικασίας

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την υποβολή των δοκιμών στην καταπόνηση της κάμψης είναι του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Το μοντέλο μηχανής ήταν το *galdabini quasar 100* και τα πειράματα κάμψης πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο αντοχής υλικών "Κωνσταντίνος Γιαννακόπουλος" του τμήματος, με τη βοήθεια του κ. Παπαγεωργίου Δ.

Πρώτη σειρά δοκιμών / Factor 1 : X / Factor 2 : UV1 / Factor 3 UT1



Εικόνα 83 Διάγραμμα πρώτης σειράς δοκιμών.

Η τιμή της επανάληψης 1.5 επειδή διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό από το υπόλοιπο σύνολο δοκιμών, δεν συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό του μέσου ορού.

|           | UTS Stress (N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|---------------------------------|------------|
| 1.1       | 0,76                            | 5,68       |
| 1.2       | 0,80                            | 5,23       |
| 1.3       | 0,79                            | 6,70       |
| 1.4       | 0,71                            | 4,45       |
| 1.5       | 1,17                            | 7,71       |
| AVERAGE 1 | 0,76                            | 5,51       |



Εικόνα 84 Δοκίμια 1.1-1.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



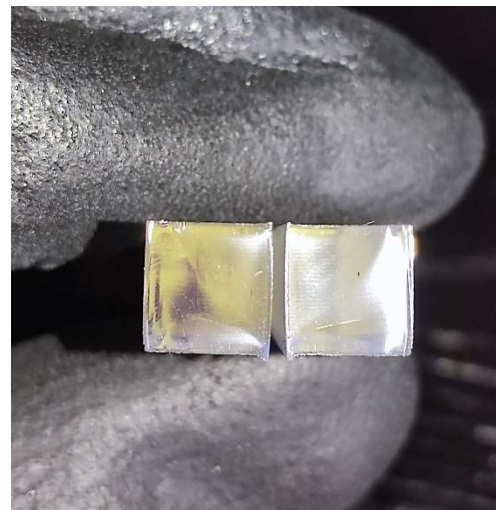
Εικόνα 85 Δοκίμιο 1.1 Σημείο θραύσης



Εικόνα 86 Δοκίμιο 1.2 Σημείο θραύσης



Εικόνα 87 Δοκίμιο 1.3 Σημείο θραύσης



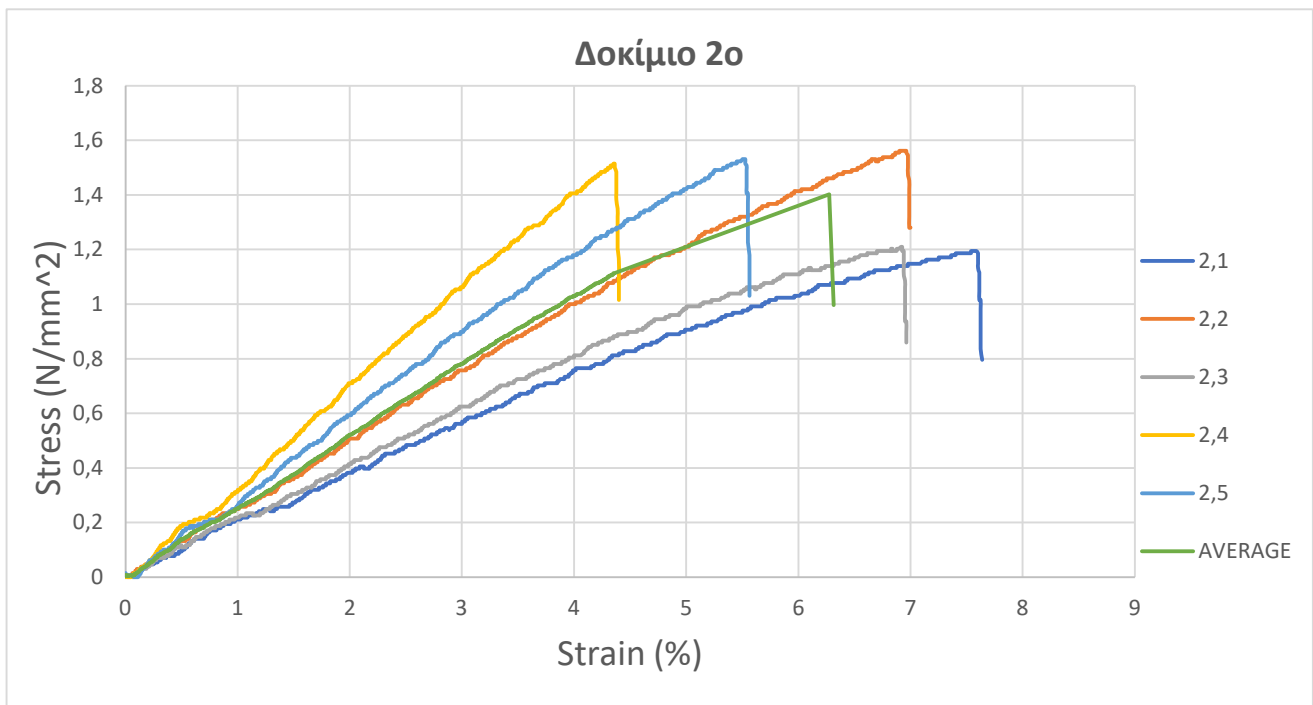
Εικόνα 88 Δοκίμιο 1.4 Σημείο θραύσης



Εικόνα 89 Δοκίμιο 1.5 Σημείο θραύσης



Δεύτερη σειρά δοκιμών / Factor 1 : X / Factor 2 : UV2 / Factor 3 : UT2



Εικόνα 90 Διάγραμμα δεύτερης σειράς δοκιμών

Οι τιμές συμπεριλαμβάνονται όλες στον υπολογισμό της μέσης τιμής.

|           | UTS Stress (N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|---------------------------------|------------|
| 2.1       | 1,20                            | 7,59       |
| 2.2       | 1,56                            | 6,96       |
| 2.3       | 1,21                            | 6,93       |
| 2.4       | 1,52                            | 4,36       |
| 2.5       | 1,53                            | 5,53       |
| AVERAGE 2 | 1,40                            | 6,27       |



Εικόνα 91 Δοκίμια 2.1-2.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.





Εικόνα 92 Δοκίμιο 2.1 Σημείο θραύσης



Εικόνα 93 Δοκίμιο 2.2 Σημείο θραύσης



Εικόνα 95 Δοκίμιο 2.3 Σημείο θραύσης

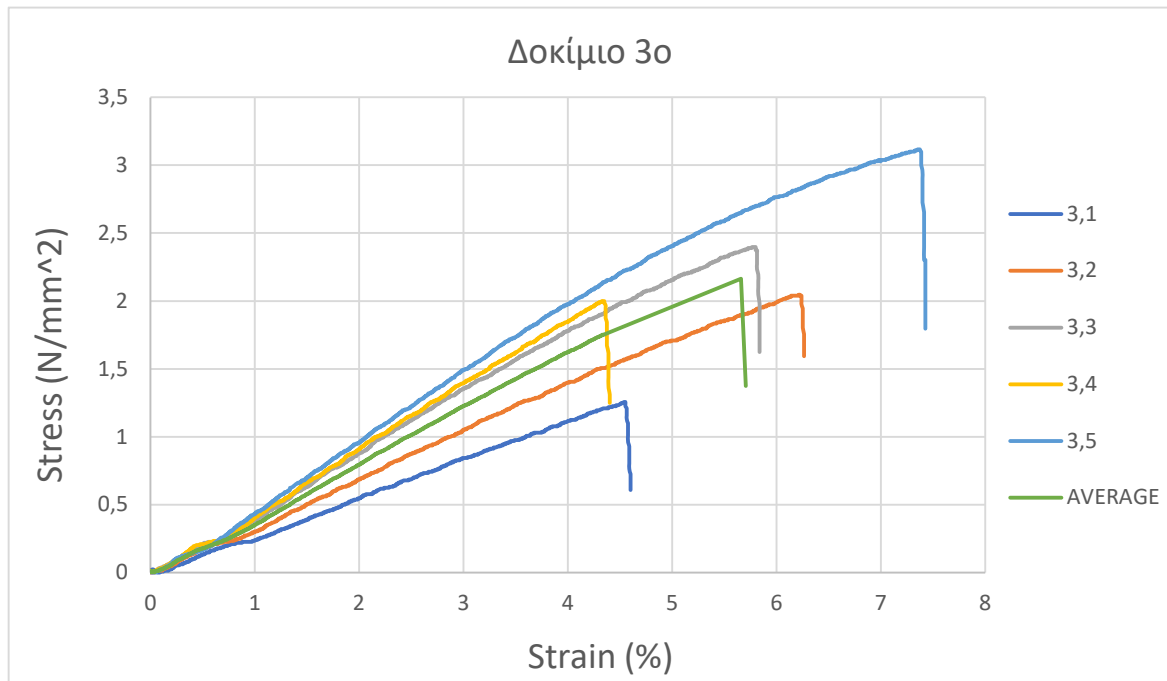


Εικόνα 94 Δοκίμιο 2.4 Σημείο θραύσης



Εικόνα 96 Δοκίμιο 2.5 Σημείο θραύσης

**Τρίτη σειρά δοκιμών / Factor 1 : X / Factor 2 : UV3 / Factor 3 : UT3**



Εικόνα 97 Διάγραμμα τρίτης σειράς δοκιμών

Οι τιμές συμπεριλαμβάνονται όλες στον υπολογισμό της μέσης τιμής.

|           | UTS Stress(N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|
| 3.1       | 1,26                           | 4,55       |
| 3.2       | 2,05                           | 6,23       |
| 3.3       | 2,40                           | 5,80       |
| 3.4       | 2,00                           | 4,35       |
| 3.5       | 3,12                           | 7,38       |
| AVERAGE 3 | 2,16                           | 5,66       |



Εικόνα 98 Δοκίμια 3.1-3.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



Εικόνα 99 Δοκίμο 3.1 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 100 Δοκίμο 3.2 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 102 Δοκίμο 3.3 Σημείο  
θραύσης



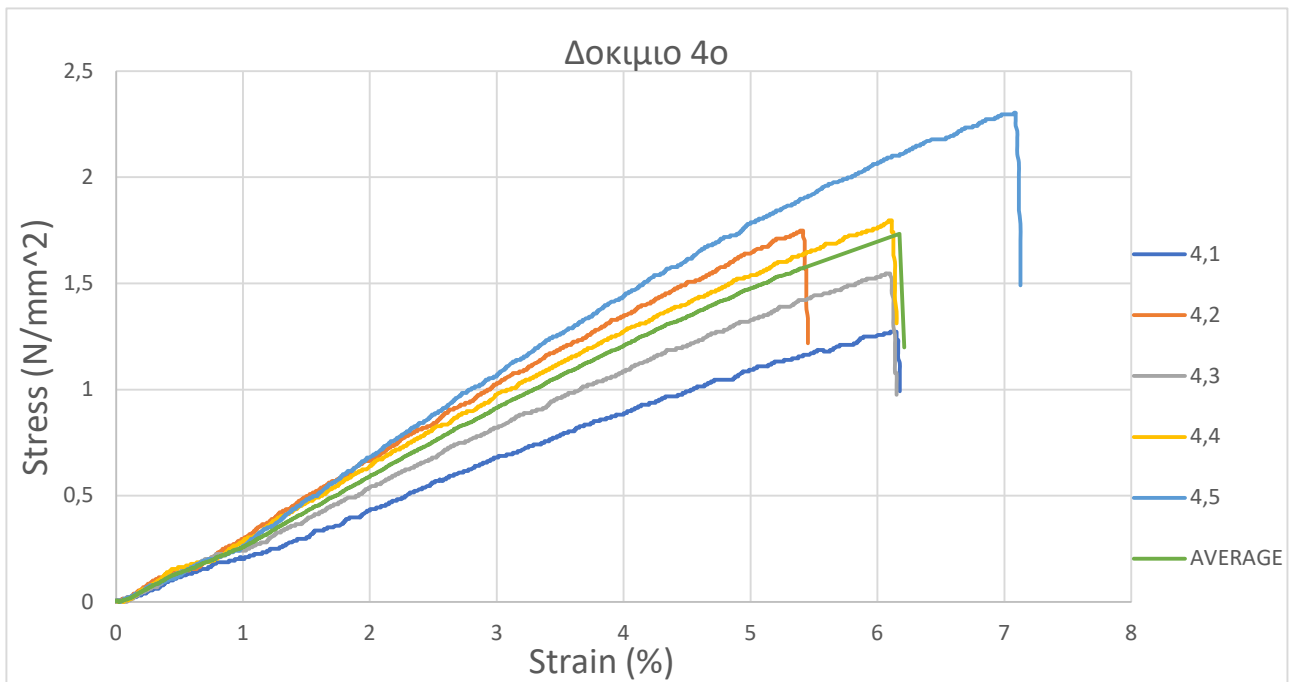
Εικόνα 101 Δοκίμο 3.4 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 103 Δοκίμο 3.5 Σημείο  
θραύσης



**Τέταρτη σειρά δοκιμών / Factor 1 : Υ / Factor 2 : UV1 / Factor 3 : UT2**



Εικόνα 104 Διάγραμμα τέταρτης Σειράς Δοκιμών

Οι τιμές συμπεριλαμβάνονται όλες στον υπολογισμό της μέσης τιμής.

|           | UTS Stress(N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|
| 4.1       | 1,27                           | 6,15       |
| 4.2       | 1,75                           | 5,41       |
| 4.3       | 1,55                           | 6,10       |
| 4.4       | 1,80                           | 6,11       |
| 4.5       | 2,30                           | 7,09       |
| AVERAGE 4 | 1,73                           | 6,17       |



Εικόνα 105 Δοκίμα 4.1-4.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



Εικόνα 107 Δοκίμιο 4.1 Σημείο θραύσης



Εικόνα 106 Δοκίμιο 4.2 Σημείο θραύσης



Εικόνα 109 Δοκίμιο 4.3 Σημείο θραύσης

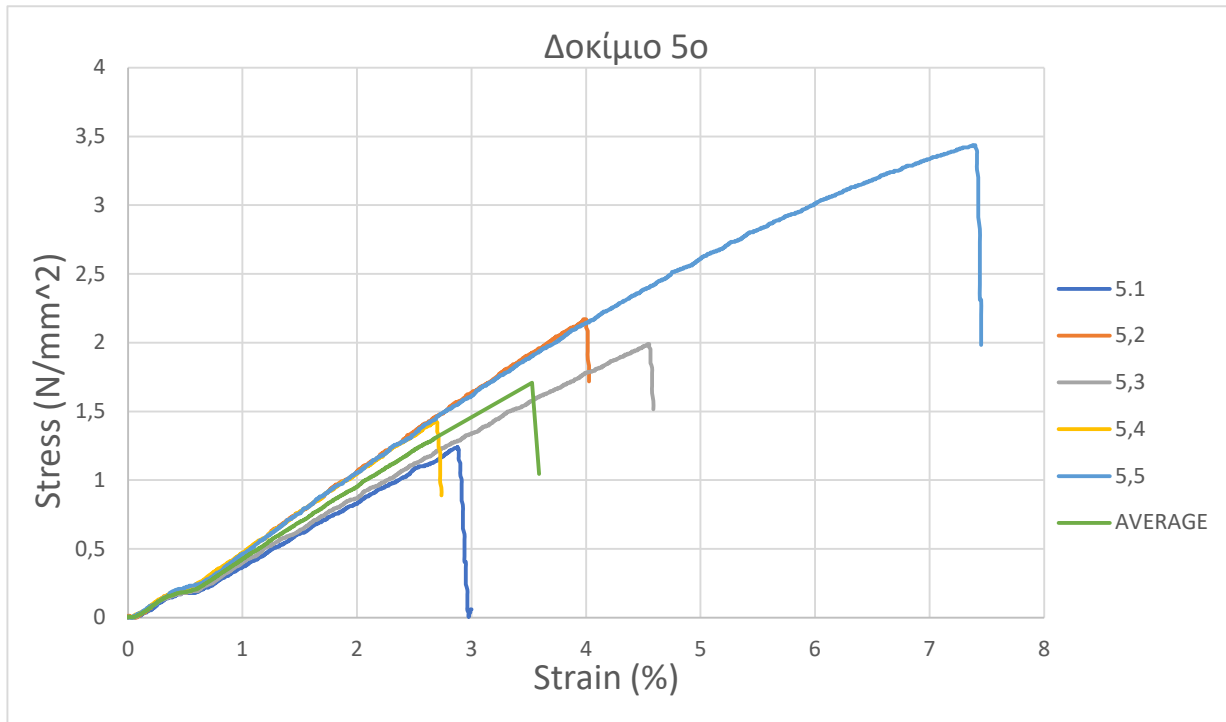


Εικόνα 108 Δοκίμιο 4.4 Σημείο θραύσης



Εικόνα 110 Δοκίμιο 4.5 Σημείο θραύσης

Πέμπτη σειρά δοκιμών / Factor 1 : Υ / Factor 2: UV2 / Factor 3 : UT3



Εικόνα 111 Διάγραμμα πέμπτης σειράς δοκιμών

Στον υπολογισμό του μέσου όρου δεν έχει υπολογισθεί η τιμή του δοκιμίου 5.5 εξαιτίας της μεγάλης απόκλισης από τις υπόλοιπες τιμές.

|           | UTS Stress(N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|
| 5.1       | 1,24                           | 2,88       |
| 5.2       | 2,17                           | 4,00       |
| 5.3       | 1,99                           | 4,55       |
| 5.4       | 1,43                           | 2,69       |
| 5.5       | 3,44                           | 7,40       |
| AVERAGE 5 | 1,71                           | 3,53       |



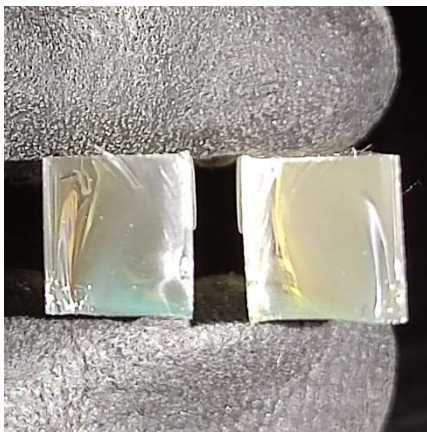
Εικόνα 112 Δοκίμια 5.1-5.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



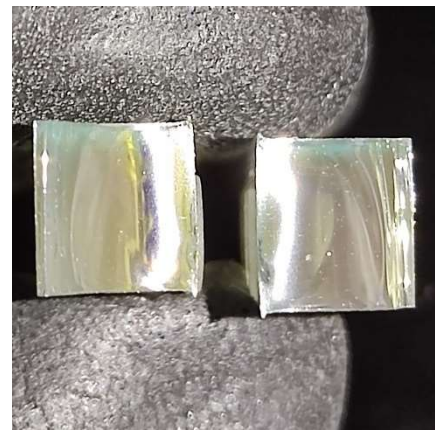
Εικόνα 114 Δοκίμιο 5.1 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 113 Δοκίμιο 5.2 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 115 Δοκίμιο 5.3 Σημείο  
θραύσης



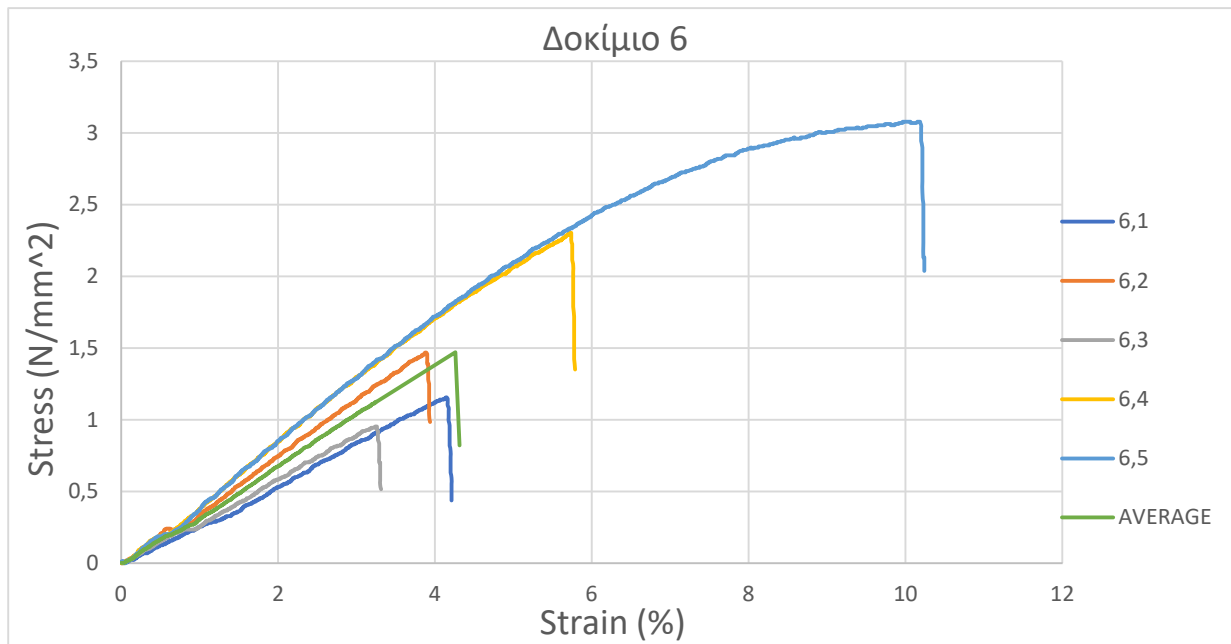
Εικόνα 116 Δοκίμιο 5.4 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 117 Δοκίμιο 5.5 Σημείο  
θραύσης



Έκτη σειρά δοκιμών / Factor 1 : Y / Factor 2: UV3 / Factor 3 : UT1



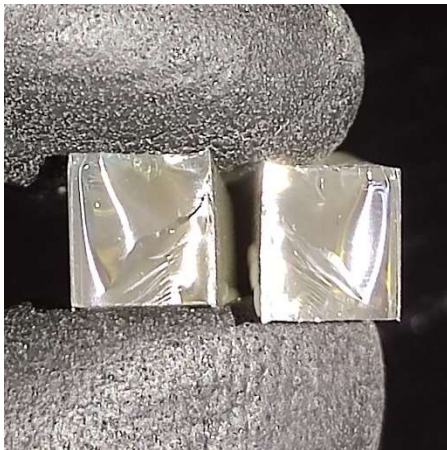
Εικόνα 118 Διάγραμμα έκτης σειράς δοκιμών

Στον υπολογισμό του μέσου όρου δεν έχει υπολογισθεί η τιμή του δοκιμίου 6.5 εξαιτίας της μεγάλης απόκλισης από τις υπόλοιπες τιμές.

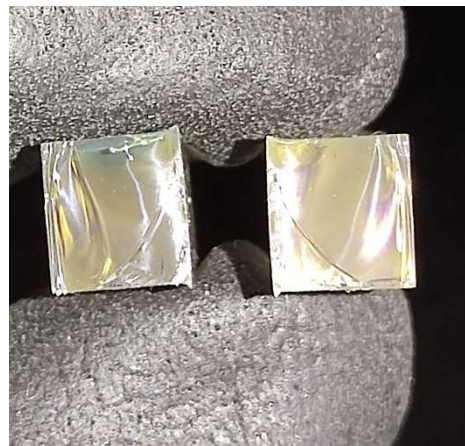
|           | UTS Stress(N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|
| 6.1       | 1,16                           | 4,15       |
| 6.2       | 1,47                           | 3,89       |
| 6.3       | 0,95                           | 3,26       |
| 6.4       | 2,30                           | 5,74       |
| 6.5       | 3,08                           | 10,19      |
| AVERAGE 6 | 1,47                           | 4,26       |



Εικόνα 119 Δοκίμια 6.1-6.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



Εικόνα 120 Δοκίμιο 6.1 Σημείο  
θραύσης



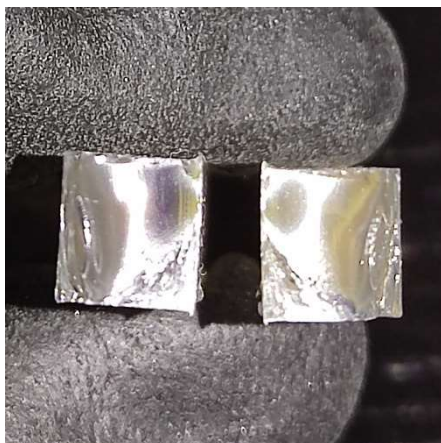
Εικόνα 121 Δοκίμιο 6.2 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 123 Δοκίμιο 6.3 Σημείο  
θραύσης

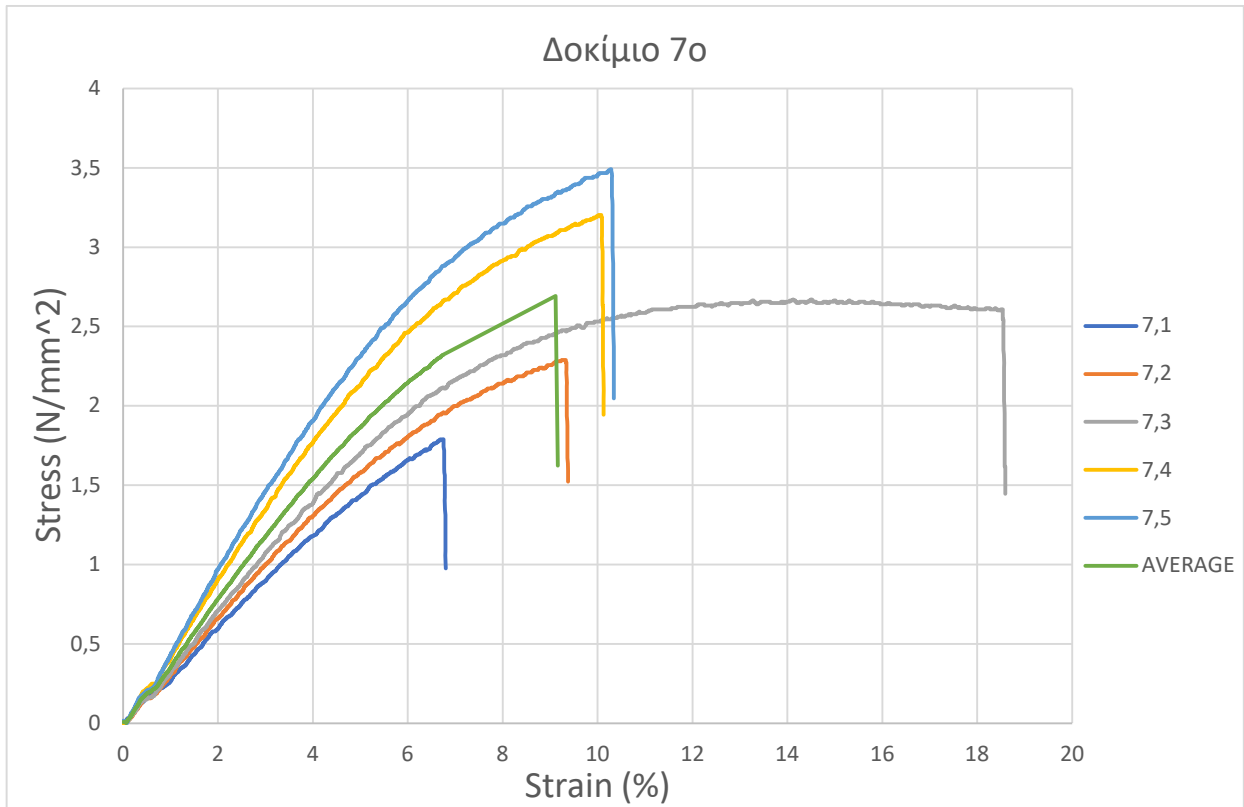


Εικόνα 122 Δοκίμιο 6.4 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 124 Δοκίμιο 6.5 Σημείο  
θραύσης

## Εβδομή σειρά δοκιμών / Factor 1 : Z / Factor 2: UV1 / Factor 3 : UT3



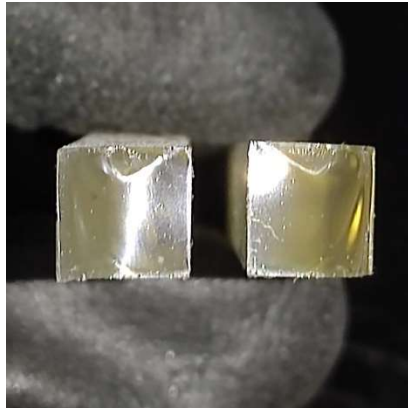
Εικόνα 125 Διάγραμμα εβδομή σειρά δοκιμών

Στον υπολογισμό του μέσου όρου δεν συμπεριλαμβάνεται το μέγεθος του 7,3 καθώς παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από το γενικό πληθυσμό στο ποσοστό της επιμήκυνσης.

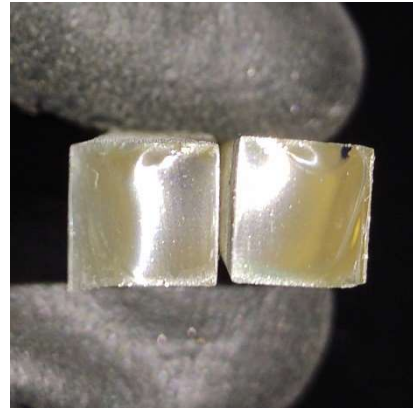
|           | UTS Stress(N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|
| 7.1       | 1,789                          | 6,750      |
| 7.2       | 2,289                          | 9,325      |
| 7.3       | 2,672                          | 14,513     |
| 7.4       | 3,203                          | 10,075     |
| 7.5       | 3,492                          | 10,288     |
| AVERAGE 7 | 2,693                          | 9,109      |



Εικόνα 126 Δοκίμια 7.1-7.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



Εικόνα 128 Δοκίμιο 7.1 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 127 Δοκίμιο 7.2 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 129 Δοκίμιο 7.3 Σημείο  
θραύσης



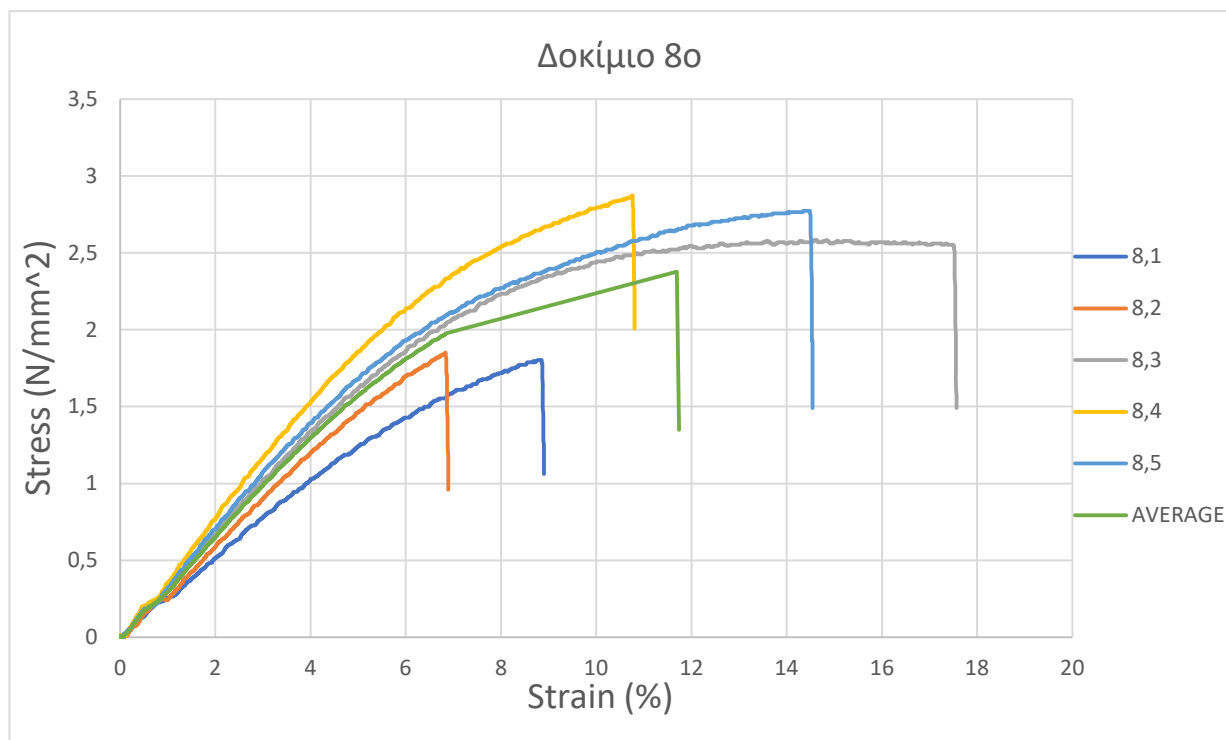
Εικόνα 130 Δοκίμιο 7.4 Σημείο  
θραύσης



Εικόνα 131 Δοκίμιο 7.5 Σημείο  
θραύσης



Ογδή σειρά δοκιμών / Factor 1 : Z / Factor 2: UV1 / Factor 3 : UT1



Εικόνα 132 Διάγραμμα ογδής σειράς δοκιμών

Οι τιμές συμπεριλαμβάνονται όλες, στον υπολογισμό της μέσης τιμής.

|           | UTS Stress(N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|
| 8.1       | 1,80                           | 8,85       |
| 8.2       | 1,85                           | 6,84       |
| 8.3       | 2,59                           | 14,63      |
| 8.4       | 2,88                           | 10,75      |
| 8.5       | 2,77                           | 14,49      |
| AVERAGE 8 | 2,38                           | 11,11      |



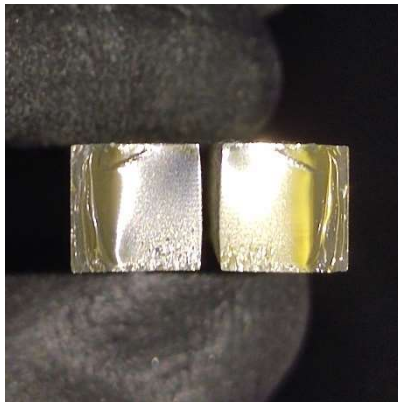
Εικόνα 133 Δοκίμια 8.1-8.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



Εικόνα 135 Δοκίμο 8.1 Σημείο θραύσης



Εικόνα 134 Δοκίμο 8.2 Σημείο θραύσης



Εικόνα 136 Δοκίμο 8.3 Σημείο θραύσης



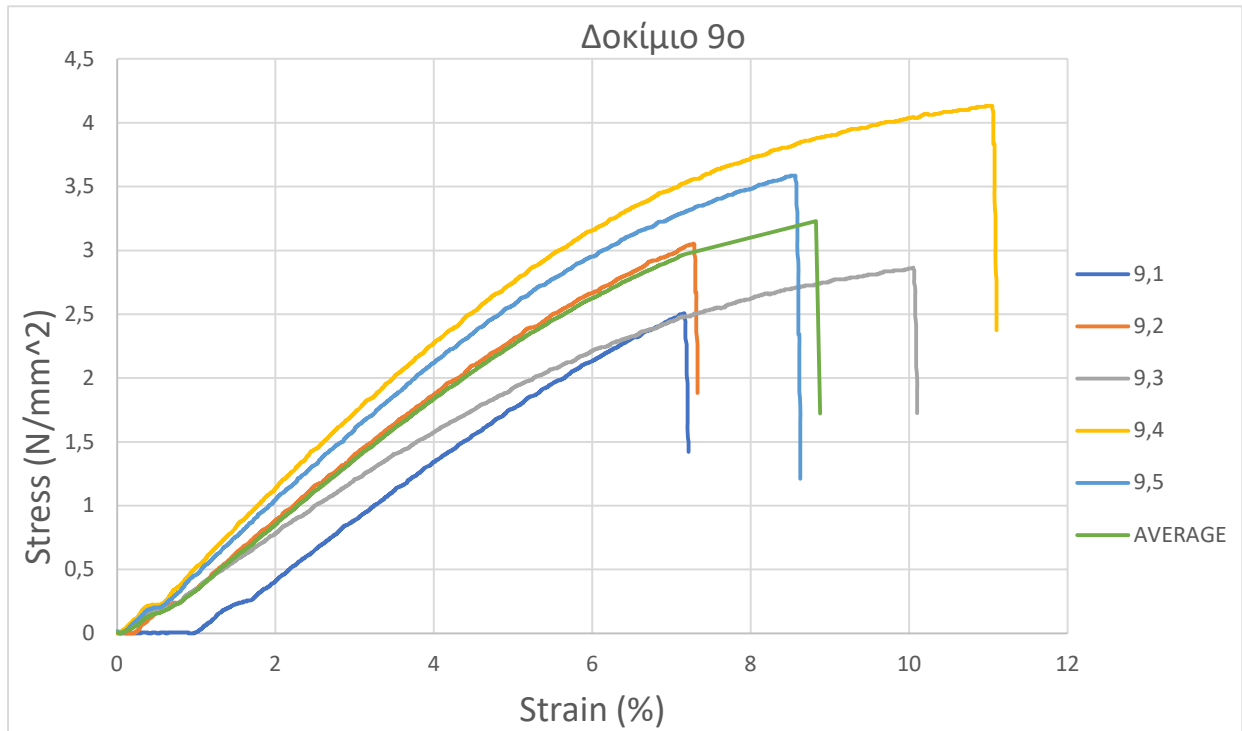
Εικόνα 137 Δοκίμο 8.4 Σημείο θραύσης



Εικόνα 138 Δοκίμο 8.5 Σημείο θραύσης



Ενάτη σειρά δοκιμών / Factor Z : Z / Factor 2: UV3 / Factor 3 : UT2



Εικόνα 139 Διάγραμμα ενάτης σειράς δοκιμών

|           | UTS Stress(N/mm <sup>2</sup> ) | Strain (%) |
|-----------|--------------------------------|------------|
| 9.1       | 2,51                           | 7,16       |
| 9.2       | 3,05                           | 7,28       |
| 9.3       | 2,87                           | 10,05      |
| 9.4       | 4,13                           | 11,05      |
| 9.5       | 3,59                           | 8,56       |
| AVERAGE 9 | 3,23                           | 8,82       |



Εικόνα 140 Δοκίμια 9.1-9.5, μετά από την υποβολή τους στην καταπόνηση της κάμψης.



Εικόνα 141 Δοκίμιο 9.1 Σημείο θραύσης



Εικόνα 142 Δοκίμιο 9.2 Σημείο θραύσης



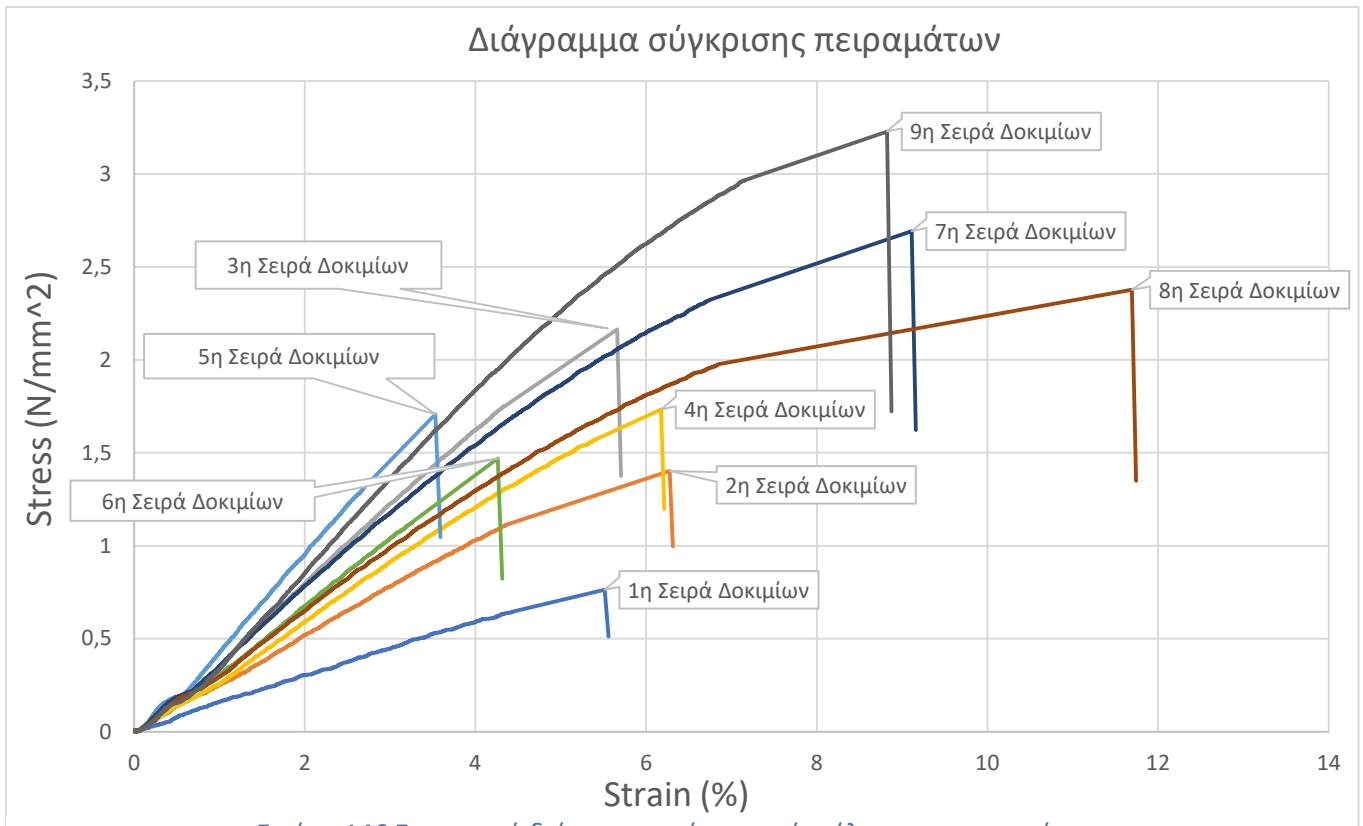
Εικόνα 144 Δοκίμιο 9.3 Σημείο θραύσης



Εικόνα 143 Δοκίμιο 9.4 Σημείο θραύσης



Εικόνα 145 Δοκίμιο 9.5 Σημείο θραύσης



#### 4.3.1 Μετρό ελαστικότητας μέσων ορών

- Πρώτης σειράς δοκιμών 0,1467 ,  $R^2 = 0,9991$ .
- Δεύτερης σειράς δοκιμών 0,259 , με  $R^2 0,9994$ .
- Τρίτης σειράς δοκιμών 0,416 ,  $R^2 = 0,9992$ .
- Τέταρτης σειράς δοκιμών 0,3021 ,  $R^2 = 0,9987$ .
- Πέμπτης σειράς δοκιμών 0,501 ,  $R^2 = 0,9969$ .
- Έκτης σειράς δοκιμών 0,3521 ,  $R^2 = 0,9984$ .
- Εβδόμης σειράς δοκιμών 0,3578 ,  $R^2 = 0,9939$ .
- Ογδός σειράς δοκιμών 0,2994 ,  $R^2 = 0,9934$ .
- Ενάτης σειράς δοκιμών = 0,4428 ,  $R^2 = 0,9946$ .

#### 4.3.2 Ενδεικτικοί υπολογισμοί

Ο εξοπλισμός του Ιδρύματος εξήγαγε αποτελέσματα σε μονάδες : Δύναμης (N) και παραμόρφωσης (mm). Πραγματοποιήθηκε μετατροπή σε μονάδες τάσης ( Stress  $N/mm^2$  ) και σε μονάδες παραμόρφωσης ανά ποσοστό (Strain %).

Επιφάνεια 8 (mm) X 8 (mm) = 64 (mm<sup>2</sup>)

$$\text{Τάση (Stress } \frac{N}{\text{mm}^2}) = \frac{\text{Δύναμη (N)}}{\text{Επιφάνεια (mm}^2)}$$

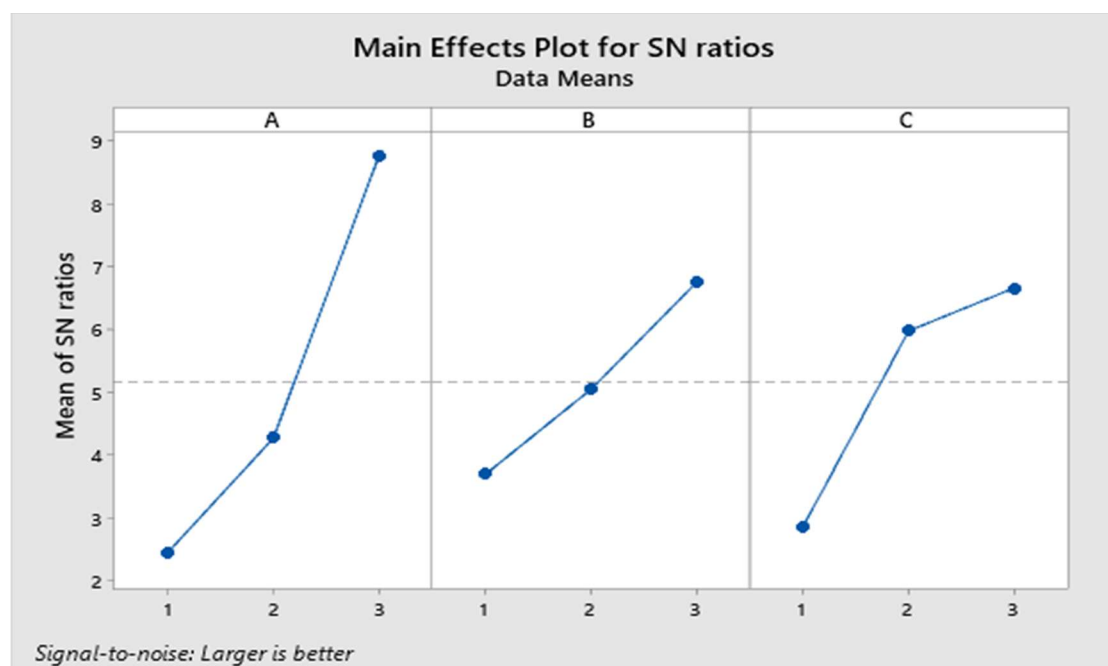
Μήκος μεταξύ των δυο στηρίξεων στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της κάμψης : Μήκος = 80 (mm) .

$$\text{Ποσοστιαία Παραμόρφωση (Strain \%)} = \frac{\text{Παραμόρφωση (mm)} * 100}{\text{Μηκος (mm)}}$$

#### 4.3.3 Παράμετροι κατά την σειρά επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων

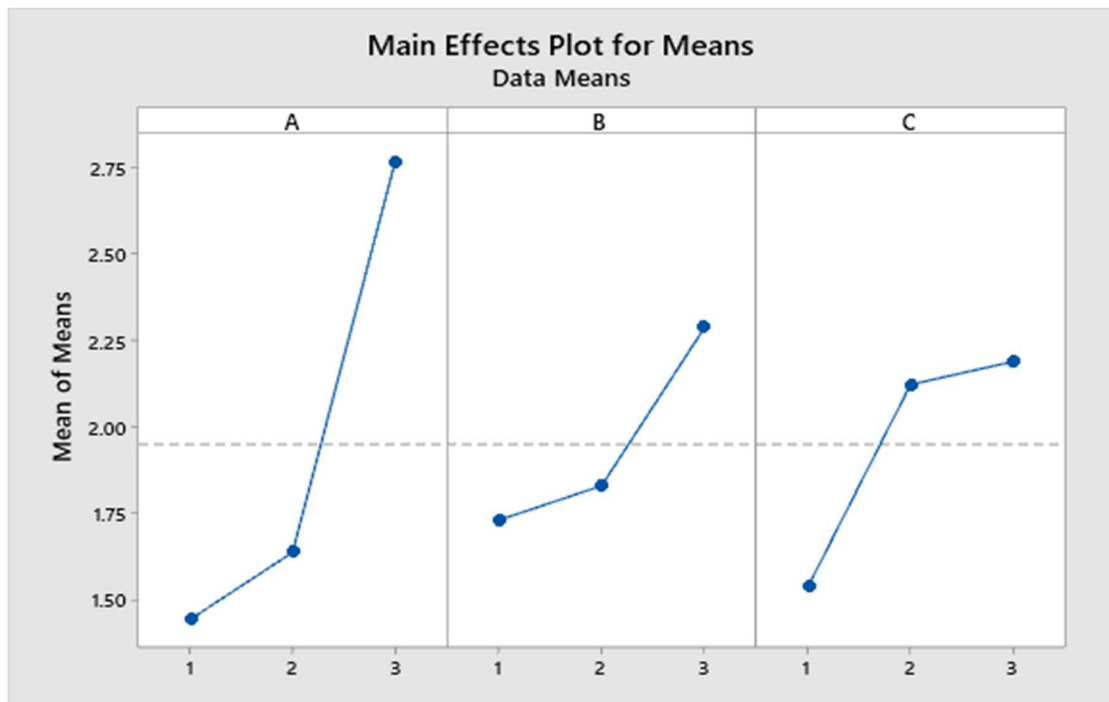
- Response Table for Signal to Noise Ratios.

| Level | A     | B     | C     |
|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 2.436 | 3.683 | 2.846 |
| 2     | 4.263 | 5.040 | 5.969 |
| 3     | 8.771 | 6.747 | 6.655 |
| Delta | 6.335 | 3.065 | 3.809 |
| Rank  | 1     | 3     | 2     |



- Response Table for Means.

| Level | A     | B     | C     |
|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 1.444 | 1.730 | 1.538 |
| 2     | 1.638 | 1.830 | 2.122 |
| 3     | 2.767 | 2.288 | 2.189 |
| Delta | 1.323 | 0.558 | 0.651 |
| Rank  | 1     | 3     | 2     |



Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι ο Παράγοντας A επηρεάζει περισσότερο τα αποτελέσματα και ακολουθούν ο C και ο B.

Η βέλτιστη τιμή stress, η οποία επικυρώθηκε και πειραματικά, δίδεται από:

Factor A – Level 3 (Z επίπεδο ).

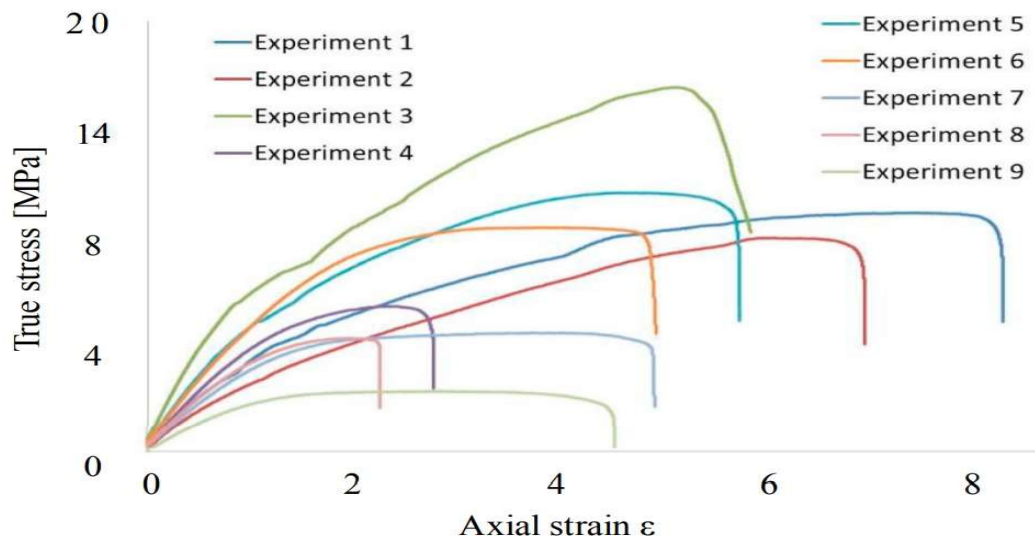
Factor B – Level 3 (UV ένταση , 3<sup>ης</sup> κλίμακας ).

Factor C – Level 3 (UT3 Χρόνος, 15 min ).

Prediction: 3.345 Mpa.

#### 4.3.4 Σύγκριση μελέτης

Σύγκριση με άλλες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, σε διαφορετικής τεχνολογίας AM & Υλικού, FDM και ABS αντίστοιχα.



Η βέλτιστη λύση μετά από την αντίστοιχη μεθοδολογία taguchi ήταν στα 18 MPa σε σύγκριση με το prediction της παρούσας εργασίας το οποίο υπολογίστηκε στα 3.345 Mpa διαφορά μεγέθους ποσοστού: 538%.



## ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### Ανασκόπηση

Για την εκπόνηση της διπλωματικής, πραγματοποιήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά έγινε μελέτη σχετικά με τις μεθόδους προσθετικής κατασκευής, τις τεχνολογίες, στα υλικά εκτύπωσης και την μέθοδο που πρέπει να ακολουθηθεί για την υλοποίηση του πειραματικού σκέλους της εργασίας. Ως βασικός στόχος της εργασίας είναι η εύρεση των μεγίστων δυνατών μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών, με χρήση του βέλτιστου συνδυασμού παραγόντων εκτύπωσης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η taguchi με χρήση ορθογωνικού πίνακα, σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό των πειραμάτων υλοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία με ελάχιστο αριθμό πειραματικών δοκιμών. Οι παράγοντες εκτύπωσης ήταν τρεις στο πλήθος τους, θέση εκτύπωσης (X,Y,Z), ένταση ακτινοβολίας σκλήρυνσης, χρόνος υποβολής δοκιμών στην υπεριώδη ακτινοβολία. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε σε σχεδιαστικό πρόγραμμα, τα δοκίμια είχαν διαστάσεις 8mm X 8mm X 120mm. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα Stress (N/mm<sup>2</sup>) – Strain (%). Η βέλτιστη επιλογή παραμέτρων υπολογίστηκε και εκτιμήθηκε το μέγιστο UTS που μπορεί να επιτευχθεί.

### Προβλήματα

Την πρώτη μέρα έγινε ανάγνωση του εγχειρίδιου χρήσης της εταιρείας και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε δοκιμαστικά η πρώτη εκτύπωση δοκιμίου της μεθοδολογίας. Η εκτύπωση πραγματοποιήθηκε με απουσία στηρίξεων και χωρίς μεγάλη απόκλιση από το μοντέλο που είχε σχεδιαστεί στο πρόγραμμα inventor, μια παρατήρηση η οποία έγινε ήταν η ύπαρξη κλίσης κατά μήκος του δοκιμίου.

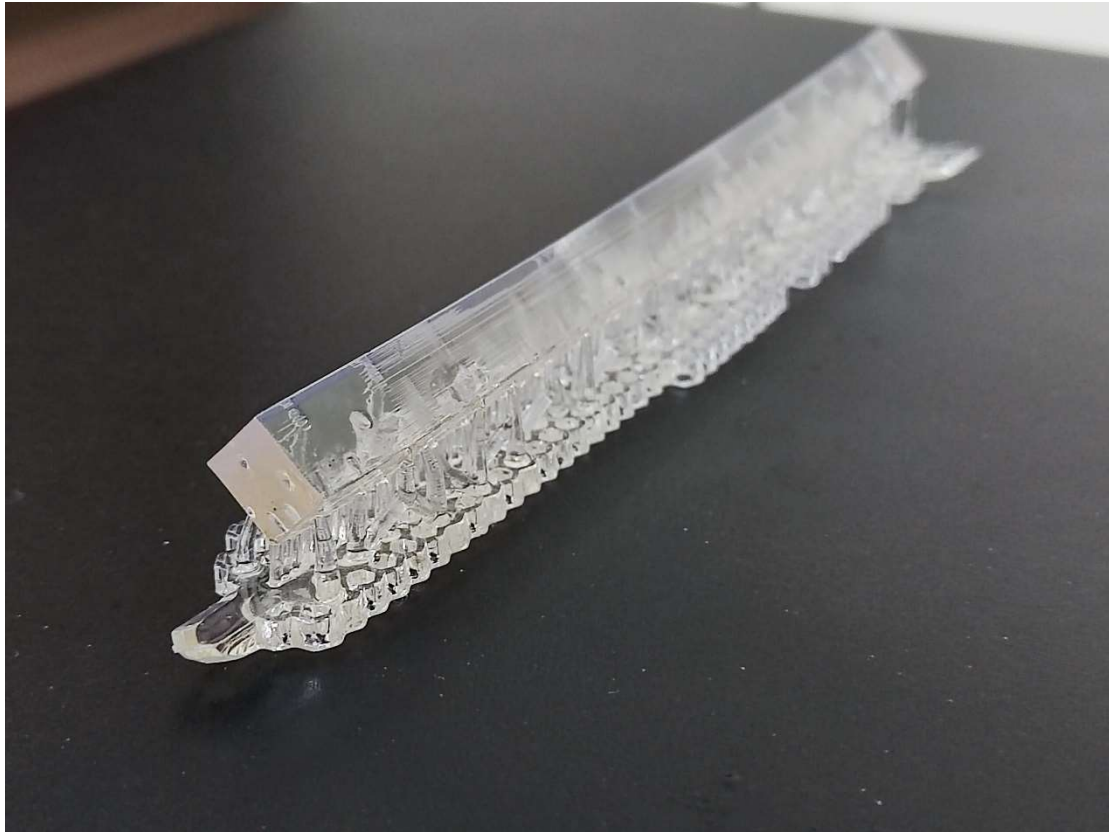
| Column            |   |   |   |   |
|-------------------|---|---|---|---|
| Experiment Number | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1                 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2                 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3                 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4                 | 2 | 1 | 2 | 3 |

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 |

| Factor   | Level 1   | Level 2   | Level 3   |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| Factor 1 | 0,025 mm  | 0,05 mm   | 0,1 mm    |
| Factor 2 | X         | Y         | Z         |
| Factor 3 | UV1       | UV2       | UV3       |
| Factor 4 | UV Time 1 | UV Time 2 | UV Time 3 |

|   | Factor 1 | Factor 2 | Factor 3 | Factor 4 |
|---|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0,025    | X        | UV1      | UV T1    |
| 2 | 0,025    | Y        | UV2      | UV T2    |
| 3 | 0,025    | Z        | UV3      | UV T3    |
| 4 | 0,05     | X        | UV2      | UV T3    |
| 5 | 0,05     | Y        | UV3      | UV T1    |
| 6 | 0,05     | Z        | UV1      | UV T2    |
| 7 | 0,1      | X        | UV3      | UV T2    |
| 8 | 0,1      | Y        | UV1      | UV T3    |
| 9 | 0,1      | Z        | UV2      | UV T1    |

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτύπωση 2 δοκίμων με σκοπό την διόρθωση της κλίσης του δοκιμίου. Η πρώτη εκτύπωση έγινε με Z=1mm και κλίση δοκιμίου 0 μοίρες όπως και στην δεύτερη δοκιμαστική εκτύπωση, όπου διαφορά ήταν ότι η κλίση στον X άξονα σε αυτήν την δοκιμή ήταν 45 μοίρες αυτή η αλλαγή δεν έδειξε βελτίωση στο πρόβλημα της κλίσης των δοκιμών, Να σημειωθεί ότι και στα δυο δοκίμια έγινε στήριξη με την αυτόματη επιλογή.



Εικόνα 147 Δοκιμαστική εκτύπωση με εφαρμογή κλίσης 45 μοιρών.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε ερευνά σχετικά με την στήριξη στην εκτύπωση στον Z άξονα , χρησιμοποιήθηκαν πλάγιες στηρίξεις στο πρόγραμμα του slicer . Η αυτόματη επιλογή συγκρατούσε μόνο το κάτω μέρος του δοκιμίου, έγινε δοκιμή η οποία κράτησε 3 ώρες και 11 λεπτά κατά την βραδινή διάρκεια.

Το δοκίμιο είχε ολοκληρωθεί την επόμενη μέρα και η εκτύπωση χαρακτηριζόταν ως επιτυχής παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκε σφάλμα στις ρυθμίσεις της ακτινοβολίας UV καθώς έγινε η θεώρηση ότι το μηχάνημα μπαίνει αυτόματα στην μεσαία σκάλα (2<sup>η</sup>) δυναμικότητας της ακτινοβολίας. Η συσκευή UV curing είχε ως αυτόματη ρύθμιση έχει την τρίτη ρύθμιση, επίσης το δοκίμιο ακτινοβολήθηκε για 15 λεπτά.

Κατά την διάρκεια υπολογισμού χρόνων κατά την εκτύπωση στους άξονες X,Y,Z για τα τρία διαφορετικά πάχη των layer παρατηρήθηκε ότι το πρόγραμμα του slicer δεν επιτρέπει εκτύπωση παράλληλη στον άξονα Z πάνω από 50mm για πάχος layer 0,025 mm Για το συγκεκριμένο υλικό Pro Basic CLR. Οι λύσεις που ερευνήθηκαν είναι η εύρεση άλλου λογισμικού τύπου slicer που να δέχεται την εκτύπωση στον Z

άξονα για όλο το μήκος του δοκιμίου ή να πραγματοποιηθεί αλλαγή στους παράγοντες που επηρεάζουν τα δοκίμια (factors) που αυτό συνεπάγεται με το μειονέκτημα ότι οι εκτυπώσεις θα έπρεπε να αρχίσουν ξανά από την αρχή. Αρχικά δοκιμαστήκαν αλλά software slicers όπως chitubox 64 , επίσης από το software του κατασκευαστή βρέθηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ρητίνη τύπου K3 για αυτήν την εκτύπωση ( Z – Layer 0,025 ) αλλά δεν υπήρχε η συγκεκριμένη ρητίνη στα αποθέματα του Πανεπιστημίου.

Η απόφαση που πάρθηκε ήταν να αλλαχτούν οι παράμετροι της διπλωματικής και να παραλειφθεί στον Z άξονα το πάχος layer 0,025 καθώς όπως προαναφέρθηκε δεν ήταν δυνατή η διεργασία από τον εξοπλισμό.

Η αλλαγή που πραγματοποιήθηκε έγινε στην μεθοδολογία όπου ο παράγοντας του πάχους του laser παραλήφθηκε καθώς δεν υπήρχε η απαραίτητη δυνατότητα μεταβολής του.

Στην συνέχεια το επόμενο πρόβλημα που υπήρξε ήταν κατά την διάρκεια της εκτύπωσης των δοκιμών στον Z άξονα.

Στην προσπάθεια εκτύπωσης στον άξονα Z 9 δοκιμών διάρκειας 16 ωρών. Η εκτύπωση δεν είχε ολοκληρωθεί καθώς η ρητίνη που είχε το μηχάνημα δεν επαρκούσε, μια ποσότητα παραμένει στο κουτί περισυλλογής, έγινε συμπλήρωση επιπλέον ρητίνης και η εκτύπωση συνεχίστηκε, από τα 9 δοκίμια τα δυο δεν πραγματοποιήθηκαν, διότι η σύνδεση στον άξονα Z είναι η πιο δύσκολη λόγω



Εικόνα 148 Αδυναμία εκτύπωσης δυο δοκιμών στον άξονα Z

μικρής επιφάνειας συναρμογής layer ανά layer.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε επαναληπτική εκτύπωση των δυο δοκιμών (7,3 – 8,3).

Η εκτύπωση των δυο επαναληπτικών δοκιμών δεν πραγματοποιήθηκε καθώς το μηχάνημα είχε βγάλει error auto refueling πραγματοποιήθηκε μια μικρού μεγέθους ερευνά σχετικά με την αίτια της μη εισαγωγής ρητίνης στον χώρο διεργασίας του AM μηχανισματος. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε αλλαγή στα σωληνάκια σε περίπτωση που είχε φραγμό ροής κάποιο, έγινε αλλαγή στο δοχείο ρητίνης, η οποία ρητίνη αναδεύτηκε αρχικά και στην συνέχεια εφαρμόστηκε στο μηχάνημα. Το πρόβλημα τελικά ήταν στην σύσφιξη μεταξύ του καπακιού με τα σωληνάκια παροχής υπερ πίεσης - υπο πίεσης που εφαρμόζεται στο δοχείο της ρητίνης.



Εικόνα 150 Μη επιτυχής εκτύπωση



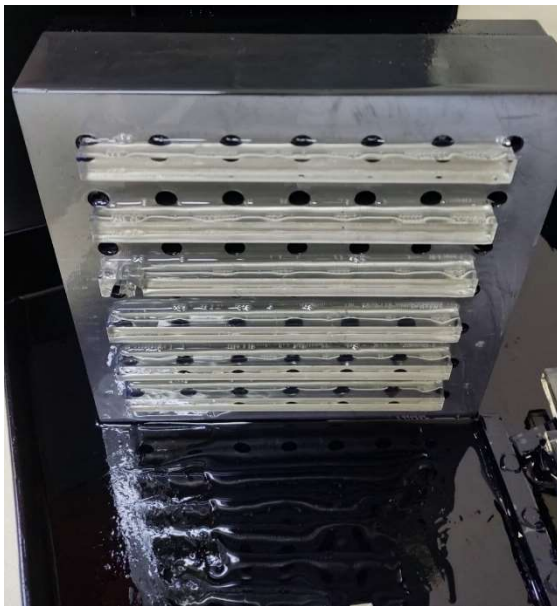
Εικόνα 149 Μη επιτυχής εκτύπωση

Κατά την διάρκεια της εκτύπωσης υπήρξε διακοπή ρεύματος και το μηχάνημα σταμάτησε να λειτουργεί. Δυστυχώς χάθηκε η πρόοδος που είχε πραγματοποιηθεί καθώς δεν μπορούσε να ξανακινήσει από το ίδιο σημείο με αποτέλεσμα η εκτύπωση τεθεί σε επανάληψη.

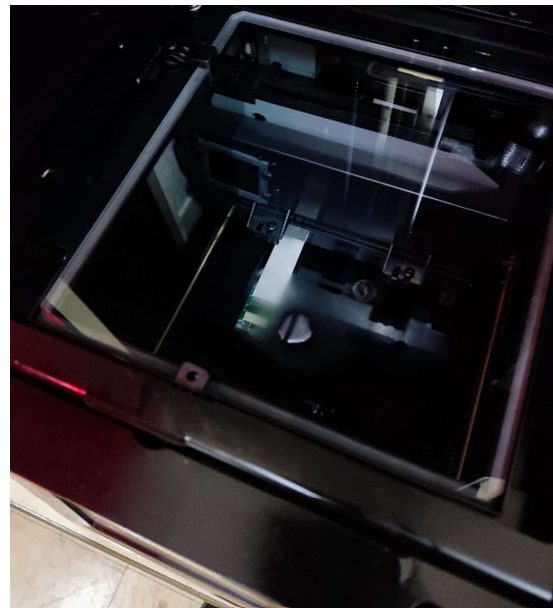


Κατά την εκτύπωση των επιπροσθέτων δοκιμίων που είχε αποφασιστεί να εκτυπωθούν για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων. Ενα κομμάτι το 3.5 έπαθε θραύση, κατά την διάρκεια αφαίρεσης του από την πλακά εκτύπωσης, στην συνέχεια η εκτύπωση τέθηκε σε επανάληψη.

Κατά την διάρκεια της εκτύπωσης στον Υ άξονα το δοκίμιο 5.4 δεν εκτυπώθηκε σωστά και επαναλήφθηκε η εκτύπωση μόνο σε αυτό το δοκίμιο.



Εικόνα 152 Αδυναμία εκτύπωσης εξαιτίας στερεωμένης σταγόνας ρητίνης



Εικόνα 151 Η στερεοποιημένη σταγόνα ρητίνης

Παρατηρήθηκε, η αίτια η οποία δεν εκτυπώθηκε το δοκίμιο 5.4 σωστά. Διαπιστώθηκε ότι κάτω από το σημείο που υπήρχε η οπή είχε πέσει μια σταγόνα ρητίνης πάνω στο τζαμί που προστατεύει το οπτικό μέσο, η οποία σταγόνα εμπόδιζε την στερεοποίηση της ρητίνης στο συγκεκριμένο σημείο, εξαιτίας της αδυναμίας διαπερατότητας του laser από την στερεοποιημένη σταγόνα.

Η διαδικασία καθαρισμού της στερεοποιημένης σταγόνας ρητίνης πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία ενός εξειδικευμένου μηχανικού από την εταιρεία κατασκευής του μηχανήματος και με τις οδηγίες του επιβλέποντος καθηγητή. Η διαδικασία άρχισε αρχικά με αφαίρεσή του γυαλιού προστασίας από το μηχάνημα και με καλό τοπικό καθαρισμό με ειδικό πανάκι που δεν αφήνει



χνούδια και με την χρήση ισοπροπυλικής αλκοόλης. Στη συνέχεια με πολύ προσοχή ώστε να μην τραυματιστεί η επιφάνεια του γυαλιού προστασίας αφαιρέθηκε η στερεοποιημένη σταγόνα και μετά από προσεκτικό καθαρισμό τοποθετήθηκε πάλι στο μηχάνημα. Για να μην παρουσιαστεί πάλι αυτό το πρόβλημα θα πρέπει το δοχείο συγκέντρωσης της ρητίνης να αφαιρείται τελευταίο από το μηχάνημα ώστε να μην τρέξει κάποια υπολειπούσα σταγόνα από την επιφάνεια εκτύπωσης.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα έγινε εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων. Το επίπεδο εκτύπωσης έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των παραγομένων δοκιμών. Ακολουθώντας ο χρόνος παραμονής των δοκιμών στην σκλήρυνση με υπεριώδη ακτινοβολία και στην συνέχεια με μικρή διάφορα μεταξύ τους η ένταση της ακτινοβολίας  $(X,Y,Z)>UV(TIME)>UV(POWER)$ . Ο άξονας εκτύπωσης που παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές τάσης ήταν ο κάθετος (Z) , με τους Y και X να ακολουθούν. . Να σημειωθεί ότι και στα τρία μέγιστα UTS, κοινό χαρακτηριστικό τους αποτελεί η καθετή εκτύπωση. Ο δεύτερος παράγοντας σε σειρά δυναμικότητας επηρεασμού, χρόνος παραμονής δοκιμών στην υπεριώδη ακτινοβολία με τον μέγιστο χρόνο UT3 (15 min ) να αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα με τους χρόνους UT2 (10 min ) και UT1 (5 min ) να ακολουθούν. Ο τρίτος σε σειρά επηρεασμού παράγοντας ήταν η ένταση της ακτινοβολίας με την UT3 να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα ακολουθώντας οι τιμές του UT2 και UT1. Από το συνδυαστικό διάγραμμα παρατηρήθηκε, το εύρος των τιμών stress ήταν μέγιστο στην 9<sup>η</sup> σειρά στα 3,23 (N/mm<sup>2</sup>) και ελάχιστο στην 1<sup>η</sup> σειρά στα 0,76 (N/mm<sup>2</sup>). Το εύρος στην τιμή strain ήταν : μέγιστο 11,11% στην 8<sup>η</sup> σειρά δοκιμών , ελάχιστο στην 5<sup>η</sup> σειρά στα 3,5%. Η μεγάλη διακύμανση που παρουσιάζουν οι τιμές προσφέρουν ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς επιδεικνύουν την αυξημένη επίδραση των παραγόντων στις μηχανικές ιδιότητες. Η βέλτιστη τιμή stress, η οποία επικυρώθηκε και πειραματικά, δίδεται από: Factor A – Level 3 (Z επίπεδο )Factor B – Level 3 (UV ένταση , 3<sup>ης</sup> κλίμακας )Factor C – Level 3 (UT3 Χρόνος, 15 min ) και με τον συνδυασμό των παραπάνω η εκτίμηση μέγιστης τιμής (Prediction) παρουσίασε τιμή 3.345 Mpa. Πραγματοποιήθηκε επίσης σύγκριση με την τεχνολογία FDM και υλικό ABS και από την σύγκριση προκύπτει ότι η τεχνολογία SLA με χρήση του υλικού ProBasic resin έχει μειωμένες μηχανικές ιδιότητες στην καταπόνηση της κάμψης σε ποσοστό 538%.

### **5.1 Μελλοντική εργασία.**

Ερευνητικό ενδιαφέρον θα αποτελούσε η διεξαγωγή πειραμάτων με το ίδιο υλικό και τεχνολογία ( ProBasic Resin & Sla ) αλλά σε διαφορετικούς τύπους καταπόνησης, με σκοπό την περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς των μηχανικών ιδιοτήτων αυτού του υλικού και αυτής της τεχνολογίας.

## 6 Βιβλιογραφία

3dsystems, 2022. *3dsystems*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <http://infocenter.3dsystems.com/materials/material-library/cjp>  
[Πρόσβαση 2 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

A.Patel, B., 2020. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128212035000130>  
[Πρόσβαση 15/3/2022 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].

additivalab, 2022. *additivalab*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.additivalab.com/binder-jetting-and-fdm-a-comparison-with-laser-powder-bed-fusion-and-metal-injection-moulding/>  
[Πρόσβαση 3 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

AqibMuzaffar, M. B. ,. K. K., 2020. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128168059000041>  
[Πρόσβαση 27 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].

AshishM.TECH, N. ,. ,., 2019. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128158906000013>  
[Πρόσβαση 10 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

AsitBehera, P. S. ,. K., 2020. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320312554>  
[Πρόσβαση 21 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

ByronBlakey-Milner, P. ,. ,. ,. ,. ,. ,. P., 2021. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127521005633>  
[Πρόσβαση 7 ΜΑΙΟΣ 2022].

D.Rypl, Z., 2006. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037704270500316X?via%3Dihub#fig1>  
[Πρόσβαση 5 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

DavidSvetlizky, M. ,. B. ,. L. ,. ,. S. ,. ,. J. M. ,. E. J. ,., 2021. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702121001139>  
[Πρόσβαση 8 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

exone, 2022. *exone*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.exone.com/en-US/resources/case-studies/what-is-binder-jetting>  
[Πρόσβαση 2 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

futurebridge, 2019. *futurebridge*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.futurebridge.com/blog/additive-manufacturing-in-the-automotive-industry/>  
[Πρόσβαση 8 ΜΑΙΟΣ 2022].

Games, E., 2020. *all3dp*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>  
[Πρόσβαση 26 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].

- HwanKo, S., 2015. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323311496000189>  
[Πρόσβαση 11 ΙΟΥΝΙΟΣ 2022].
- Ian Gibson, D. R. B. S., 2017. *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ*. 1η εκδοση επιμ. Singapore ,Atlanta , Louisville: ΚΡΙΤΙΚΗ.
- Jeng-ShyangPan, A.-Q. ,.-C., 2022. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222007666>  
[Πρόσβαση 21 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Jianping Wang, M. Y. Z. L. C. W., 2009. *pubmed*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19217257/>  
[Πρόσβαση 4 ΜΑΙΟΣ 2022].
- JL Rosa, A. R. S. B., 2009. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608002446?via%3Dihub>  
[Πρόσβαση 26 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- LEE, K., 1999. *ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ CAD/CAM/CAE*. 1η επιμ. ΣΕΟΥΛ ,ΝΟΤΙΑ ΚΟΡΕΑ: ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ.
- M. Nebe, T. S. S. W., 2021. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682020300797>  
[Πρόσβαση 28 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- M.Gurr, R., 2012. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444533494002028>  
[Πρόσβαση 15 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Mohammad Vaezi, P. D. ,. H. S., 2020. *mdpi*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/4/922/htm>  
[Πρόσβαση 8 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Omar A.Mohamed, S. H. ,. L., 2021. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128203521001036>  
[Πρόσβαση 20 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].
- Rasheedat ModupeMahamood, T. C. ,. A. ,. S. ,. O. ,. E. T., 2021. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128220566000035>  
[Πρόσβαση 22 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].
- Report, A., 2022. *AMPOWER Report*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://additive-manufacturing-report.com/technology/metal/metal-additive-manufacturing-history/>  
[Πρόσβαση 30 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- S.L.Sing, C. ,. W. Y., 2020. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081026632000022>  
[Πρόσβαση 6 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

- Seyed Hamidreza Ghaffar, J. ., M., 2018. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580517309731>  
[Πρόσβαση 18 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- sinterit, 2022. *sinterit*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://sinterit.com/materials/>  
[Πρόσβαση 15 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].
- Sonia Holland, T. ., C., 2019. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128145647000092>  
[Πρόσβαση 1 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Sunpreet Singh, S. R. ., R. S., 2017. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661251630161X>  
[Πρόσβαση 29 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].
- Syed A.M.Tofail, E. P. ., A. ., ., C., 2018. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702117301773>  
[Πρόσβαση 4 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Tassilo Moritz, S., 2018. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128121559000049>  
[Πρόσβαση 4 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Terry Wohlers, T. G., 2016. *wohlersassociates*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.wohlersassociates.com/history2016.pdf>  
[Πρόσβαση 29 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Vigneshwaran Shanmugam, O. D. ., K. B. ., U. M. ., V. D. J. J. ., R. E. N. M. S. ., S. R. ., 2021. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112320305399>  
[Πρόσβαση 23 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].
- voxeljet, 2022. *voxeljet*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.voxeljet.de/>  
[Πρόσβαση 2 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Wei Gao, Y. ., D. ., K. Y. ., C. B. ., C. ., Y. C. ., S. ., D., 2015. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448515000469>  
[Πρόσβαση 5 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].
- Wei Zhu, J. ., X. ., W. ., 2015. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128005477000023>  
[Πρόσβαση 29 ΜΑΡΤΙΟΣ 2022].
- Wohlers, 2014. *wohlersassociates*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://wohlersassociates.com/2014report.htm>  
[Πρόσβαση 7 ΜΑΙΟΣ 2022].
- Xia Gao, N. ., J., 2020. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128195352000107>  
[Πρόσβαση 1 ΜΑΙΟΣ 2022].



xyzprinting, 2020. *xyzprinting*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://pro.xyzprinting.com/en-US/3d-printer/PartPro150-xP#benefits>  
[Πρόσβαση 9 ΜΑΙΟΣ 2022].

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, Ά. Σ., 2020. *eclass.uowm*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

[https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MRE250/02\\_%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1/10\\_Kampsi\\_strepsi.pdf](https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MRE250/02_%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1/10_Kampsi_strepsi.pdf)

[Πρόσβαση 28 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].

Ι.Γιαννακόπουλος, Κ., 2011. *eclass.teipir*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/MECH104/%CE%9A%CE%B1%CE%B8%CE%B1%CF%81%CE%AE%20%CE%9A%CE%AC%CE%BC%CF%88%CE%B7.pdf>

[Πρόσβαση 28 ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022].