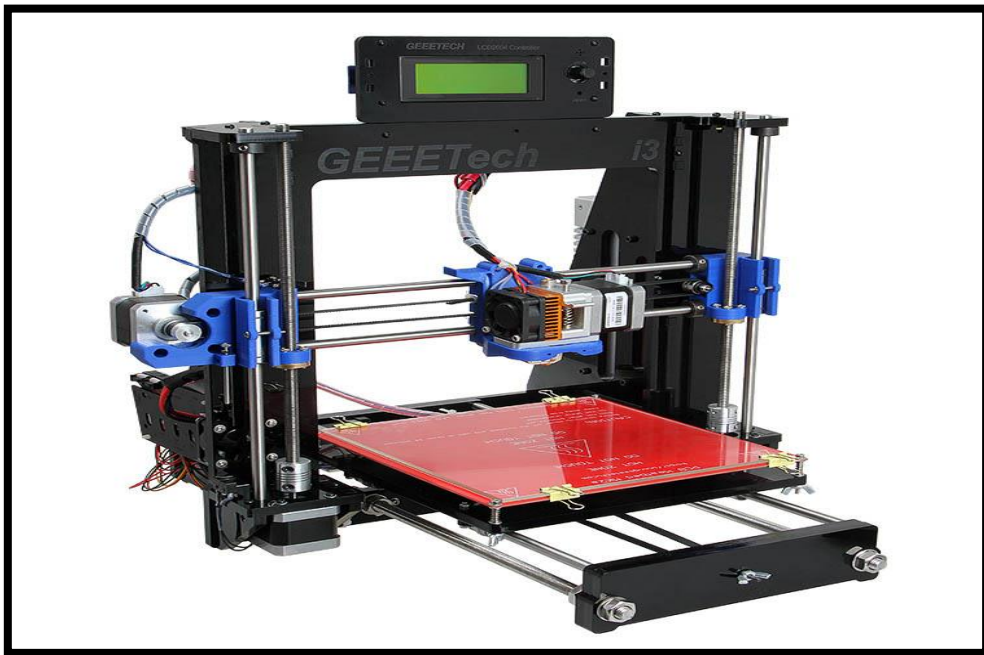


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΥ ΑΠΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΕΚΤΥΠΩΤΗ



ΦΟΙΤΗΤΕΣ :

ΔΗΜΟΒΑΣΙΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ 7130

ΒΑΡΒΑΤΣΟΥΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ 7115

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΔΙΑΜΑΝΤΑΚΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (ΠΔ 407)

ΠΑΤΡΑ 2020

[1]



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία με τίτλο «Μηχανική Συμπεριφορά Πολυμερούς Υλικού Κατασκευασμένου από Τρισδιάστατο Εκτυπωτή» εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προϋποθέσεων για τη λήψη του πτυχίου μας από το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Α.Τ.Ε.Ι ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ, με έδρα την πόλη της Πάτρας. Η ανάληψη της ορίστηκε την 20-11-2018, με υπεύθυνο καθηγητή τον κύριο Ιωάννη Διαμαντάκο. Η ολοκλήρωση της πραγματοποιήθηκε εντός των προβλεπόμενων από το Α.Τ.Ε.Ι ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ, χρονικών ορίων τον Φεβρουάριο του 2020.

Σκοπός μας κατά την διάρκεια της συγγραφής ήταν, τόσο η ορθή, όσο και η δυνατόν πληρέστερη ανάλυση του θέματος. Έγινε μεγάλη προσπάθεια έτσι ώστε το περιεχόμενο της εργασίας να είναι κατανοητό και σαφές. Για τον λόγο αυτό η παρουσίαση του θέματος και των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση πληθώρας διαγραμματικών αναπαραστάσεων, παραδειγμάτων και συγκεντρωτικών πινάκων.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μας κύριο Ιωάννη Διαμαντάκο για την βοήθεια, τις χρήσιμες ιδέες του, την άρτια προετοιμασία του, παρέχοντάς μας τον τρισδιάστατο εκτυπωτή, έτσι ώστε να φέρουμε εις πέρας το πειραματικό κομμάτι της εργασίας μας και την οριστική συγγραφή της πτυχιακής μας εργασίας. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τους επιτηρητές καθηγητές μας, κύριο Τσινόπουλο Στέφανο και τον κύριο Τσίρκα Σωτήριο για όλες τις φορές που στάθηκαν στο πλευρό μας και πρόσφεραν την βοήθεια τους.

Τέλος, ευχαριστούμε τους καθηγητές της σχολής μας που συνέβαλαν στην απόκτηση των απαραίτητων γνώσεων για την επιτυχή φοίτηση μας και την εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας, αλλά κυρίως που ενίσχυσαν την αγάπη μας για τον κλάδο της μηχανολογίας.

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Φοιτητές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι Φοιτητές :

.....



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία μας ασχολείται με το θέμα της μηχανικής συμπεριφοράς πολυμερούς υλικού κατασκευασμένου από τρισδιάστατο εκτυπωτή. Οι τρισδιάστατοι Εκτυπωτές - 3D Printers, χρησιμοποιούνται για την τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) και την κατασκευή στερεών αντικειμένων, που θα προέλθουν από ένα ψηφιακό αρχείο. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας μας αναλύουμε το αντικείμενό της. Στο δεύτερο κεφάλαιο ασχολούμαστε με τα γενικά στοιχεία και ορισμούς που σχετίζονται με την τρισδιάστατη εκτύπωση και με τη σχετική ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Επιπλέον αναλύουμε τις διάφορες τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως για παράδειγμα την Fused Deposition Modeling (FDM) και Stereolithography (SLA), καθώς και υλικά κατασκευής που συνήθως χρησιμοποιούνται, όπως για παράδειγμα τα θερμοπλαστικά PLA και ABS. Στην συνέχεια, στο 3ο κεφάλαιο μελετήσαμε τη δομή ενός 3D εκτυπωτή, η οποία βασικά αποτελείται από την κεφαλή απόθεσης υλικού, τον μηχανισμό εξώθησης του υλικού, την πλάκα εκτύπωσης, το πλαίσιο στήριξης, τα συστήματα κίνησης, καθώς και το ηλεκτρονικό κομμάτι που ελέγχει τη λειτουργία του εκτυπωτή. Τέλος στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζουμε και αναλύουμε τον προγραμματισμό του εκτυπωτή. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφουμε την κατασκευή των δοκιμών. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο ασχολούμαστε με την πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού και τις προτάσεις μας για περαιτέρω έρευνα.

**Λέξεις κλειδιά :** Τρισδιάστατος Εκτυπωτής, FDM, PLA, Τρισδιάστατη εκτύπωση, 3-d printing, Δοκιμές Εφελκυσμού

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....                                   | 3         |
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....                                   | 5         |
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....                                | 6         |
| <b>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....                                 | 8         |
| 1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....                       | 8         |
| <b>2.ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ(3-D PRINTING)</b> .....      | 10        |
| 2.1Γενικά στοιχεία – ορισμοί .....                      | 13        |
| 2.2 Ιστορική αναδρομή .....                             | 18        |
| 2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 3-D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....                      | 22        |
| 2.3.1FDM (Fused deposition modeling ) .....             | 22        |
| 2.3.2 Stereolithography (SLA) .....                     | 23        |
| 2.3.3 Powder bed fusion .....                           | 24        |
| 2.3.4 Directed energy deposition .....                  | 25        |
| 2.3.5 Vat photopolymerization .....                     | 25        |
| 2.3.6 Material jetting .....                            | 26        |
| 2.3.7 Sheet lamination .....                            | 27        |
| 2.3.8 Binder jetting .....                              | 28        |
| 2.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....                               | 29        |
| 2.4.1 PLA θερμοπλαστικό (FDM) .....                     | 29        |
| 2.4.2 ABS θερμοπλαστικό (FDM) .....                     | 30        |
| 2.4.3 Πολυμερή υλικά .....                              | 30        |
| 2.4.4 Ρητίνες .....                                     | 34        |
| 2.4.5 Διάφορα υλικά .....                               | 35        |
| 2.4.6 Μεταλλικά υλικά .....                             | 36        |
| <b>3 . 3-D ΕΚΤΥΠΩΤΕΣ FDM</b> .....                      | <b>37</b> |
| 3.1 Κατασκευαστική δομή ενός 3D εκτυπωτή τύπου FDM..... | 37        |
| 3.1.1 Κεφαλή απόθεσης υλικού.....                       | 37        |
| 3.1.2 Μηχανισμός εξώθησης υλικού.....                   | 38        |
| 3.1.3 Η πλάκα εκτύπωσης .....                           | 38        |
| 3.1.4 Πλαίσιο στήριξης .....                            | 39        |
| 3.1.5 Υλικά εκτύπωσης.....                              | 39        |
| 3.1.6 Σύστημα κίνησης και ελέγχου.....                  | 39        |
| 3.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ 3-D ΕΚΤΥΠΩΤΗ.....                   | 40        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....</b> | <b>43</b> |
| 4.1 Κατασκευή δοκιμίων.....                    | 43        |
| <b>5.ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>           | <b>48</b> |
| 5.1 Αρχή λειτουργίας μηχανής (INSTRON).....    | 48        |
| 5.2 Πρότυπο πειράματος (ASTM).....             | 50        |
| 5.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών.....     | 51        |
| 5.3.1 Επίδραση της θερμοκρασία.....            | 52        |
| 5.3.2 Επίδραση της ταχύτητας.....              | 56        |
| 5.3.3 Επίδραση του προσανατολισμού.....        | 58        |
| <b>6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>                     | <b>61</b> |
| 6.1 Συμπεράσματα.....                          | 61        |
| 6.2 Προτάσεις για περεταίρω έρευνα.....        | 66        |
| <b>Βιβλιογραφία.....</b>                       | <b>66</b> |

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η μηχανική συμπεριφορά πολυμερούς υλικού κατασκευασμένου από τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ο όρος μηχανική συμπεριφορά αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως προκύπτουν από πειράματα εφελκυσμού δοκιμίων που έχουν κατασκευαστεί με χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή και χρησιμοποιώντας μια σειρά από διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης. Το πολυμερές υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το PLA δηλαδή ένας βιοδιασπώμενος και δραστικός θερμοπλαστικός αλειφατικός πολυεστέρας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, ενώ τυπώθηκαν δοκίμια χρησιμοποιώντας διαφορετικές θερμοκρασίες και ταχύτητες εκτύπωσης, τεχνικές "γεμίματος" και προσανατολισμούς. Αρχικά εξετάστηκαν οι παράμετροι που μπορούμε να διαφοροποιήσουμε για να βελτιώσουμε τις ιδιότητες και την συμπεριφορά των δοκιμίων που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας και στη συνέχεια με την βοήθεια του τρισδιάστατου εκτυπωτή τυπώσαμε δοκίμια σε διαφορετικές θερμοκρασίες και προσανατολισμούς, τα οποία είχαν σχεδιαστεί με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος solidworks. Στη συνέχεια ζυγίσαμε τα δοκίμια έτσι ώστε να μετρηθεί η πυκνότητα υλικού, ανάλογα με τις παραμέτρους εκτύπωσης και να διαπιστώσουμε μετά το πείραμα αν αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική ή όχι. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε μηχανή εφελκυσμού για να εφελκύσουμε τα δοκίμια και να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά κάθε ομάδας δοκιμίων (με κοινές παραμέτρους εκτύπωσης). Τέλος, μελετώντας τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων που προέκυψαν από το πείραμα εφελκυσμού, εξήχθησαν συμπεράσματα για το συνδυασμό παραμέτρων (τρόπος, θερμοκρασία) ο οποίος οδηγεί στις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού του παραγόμενου υλικού.





## 2. 3-D PRINTING –ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Καθώς το 3d printing γίνεται διεθνής τάση, υποστηριζόμενη από την κατανεμημένη παραγωγή, η προσωπική παραγωγή κερδίζει έδαφος. Έτσι, η τρισδιάστατη εκτύπωση[1] διεκδικεί δυναμικά την θέση της ως νέο τεχνολογικό επίτευγμα, τροφοδοτεί ένα νέο τεχνολογικό περιβάλλον που συνδέει κατευθείαν και χωρίς διαμεσολάβηση την ιδέα του σχεδιαστή με την παραγωγή. Στο τεχνολογικό αυτό περιβάλλον όλοι οι ενδιάμεσοι παράγοντες μεταξύ σχεδιασμού και παραγωγής μοιάζει να εξαφανίζονται. Συγχρόνως, ένας μελλοντικός αλλά καθαρός στόχος τίθεται για την έρευνα και την ανάπτυξη: Να περάσει από την εκτύπωση μερών στην συνολική εκτύπωση αντικειμένων ή και κτιρίων, όπως για παράδειγμα προτείνεται στον τομέα της κατασκευής.

Ο ρόλος του τεχνολογικού περιβάλλοντος είναι να εκτοξεύει ένα βέλος στον χρόνο, προς το μέλλον και να καλεί να το ακολουθήσουμε. Είναι σχεδόν σίγουρο ότι δεν θα φτάσουμε στον προδιαγεγραμμένο στόχο του βέλους. Ταυτόχρονα, ισχυρές διακλαδώσεις του θα κάνουν την εμφάνισή τους, καθώς η τρισδιάστατη εκτύπωση θα διεκδικηθεί από μια «καθημερινή» ομότιμη παραγωγή με κοινωνική στόχευση, Ο καθένας θα μπορεί να εκτυπώνει αντικείμενα, εξαρτήματα της καθημερινότητάς του.

Τρισδιάστατη εκτύπωση, για παράδειγμα, είναι η κατασκευή σπιτιών με προσθήκη υλικού. Το σπίτι «κτίζεται» με αλληπάλληλες στρώσεις υλικού, ξεκινώντας από τη βάση του και καταλήγοντας στην κορυφή του. Εάν υπάρχει το αντικείμενο σε τρισδιάστατη ψηφιακή μορφή (είτε μέσω τρισδιάστατης σάρωσης είτε μέσω λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης), η 3D εκτύπωση είναι ο πλέον εύκολος, γρήγορος και οικονομικός τρόπος να κατασκευαστεί αυτό. Χωρίς σχεδόν κανέναν περιορισμό στην μορφή και την γεωμετρία τους, τα αντικείμενα μπορούν να «εκτυπωθούν» και να είναι έτοιμα για χρήση. Ακόμα και εάν θέλετε να κατασκευάσετε μία συναρμολογημένη διάταξη (π.χ. ένα πλαστικό μοντέλο ψαλιδιού), αυτή μπορεί να εκτυπωθεί απευθείας συναρμολογημένη και λειτουργική, γλιτώνοντας έτσι χρόνο και κόπο από την μετέπειτα συναρμολόγηση.

Προκειμένου να δημιουργηθούν τα αντικείμενα, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές ακολουθούν αλγόριθμους κατασκευής βασισμένους στα τοπογραφικά στοιχεία που περιλαμβάνονται στα αρχεία τρισδιάστατης σχεδίασης. Με αυτόν τον τρόπο, οι εκτυπωτές προσθέτουν υλικό στις κατάλληλες περιοχές και το συσσωρεύουν μέχρι να δημιουργηθεί ο όγκος του αντικειμένου. Το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο διαιρείται σε φέτες (στρώματα). Μια πολύ απλή σύγκριση είναι να φανταστεί κανείς ένα τεμαχισμένο ψωμί. Βάλτε τις φέτες διαδοχικά την μία πάνω στην άλλη και επανοικοδομήστε το ψωμί σας. Αυτό είναι ακριβώς αυτό που ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής κάνει για να χτίσει ένα αντικείμενο.

Τα περιγραφικά στοιχεία της μορφής αντικειμένου πρέπει να συνοψιστούν σε ένα ψηφιακό αρχείο, αποκαλούμενο τρισδιάστατο αρχείο. Μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρησιμοποίηση ενός λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης ή με τη μετατροπή σε

τρισδιάστατο ενός αντικειμένου που υπάρχει ήδη (για παράδειγμα με χρήση τρισδιάστατης σάρωσης). Υπάρχει διαθέσιμη μια μεγάλη ποικιλία λογισμικού, με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας, ανάλογα με τις απαιτήσεις (άτομα, βιομηχανία, σχεδιαστής, κ.λπ.).

Η τρισδιάστατη εκτύπωση κάνει μια φυσική μεταγραφή, μια «υλοποίηση» αυτών των ψηφιακών στοιχείων, τα οποία αυξάνουν τις δυνατότητες δημιουργικότητας. Αυτή η νέα μέθοδος εκτύπωσης θεωρείται συχνά ως επαναστατική, καθώς έχει μια απολύτως διαφορετική λογική και από τις παλαιότερες συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Στις παραδοσιακές βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες, οι μηχανές αφαιρούν υλικό, ενώ η τρισδιάστατη εκτύπωση προσθέτει υλικό.

Η εφεύρεση της τρισδιάστατης εκτύπωσης, έχει δύο στόχους:

- τη μείωση του χρόνου απόκτησης της πρώτης έκδοσης ενός προϊόντος (παραγωγή πρωτοτύπου) και
- τη χειραφέτηση πολλών περιορισμών που συνδέονται με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής.

Παραδείγματος χάριν, με την τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι δυνατό να τυπωθούν οι σύνθετες γεωμετρικές μορφές και τα συναρμολογούμενα μέρη δεν απαιτούν καμία περαιτέρω εργασία. Είναι επίσης δυνατό να παραχθούν αντικείμενα, σε μικρές ποσότητες, με χαμηλό κόστος και γρήγορη παράδοση. Αυτή η τεχνολογία βοηθά επίσης στη μείωση της σπατάλης υλικών. Έτσι η τρισδιάστατη εκτύπωση βοηθά την ευελιξία στη ροή παραγωγής και μειώνει τις βιομηχανικές δαπάνες. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία ανάγκη να χτιστεί αφιερωμένη γραμμή παραγωγής, βοηθά σημαντικά στην μείωση του χρόνου παραγωγής: η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει να καινοτομήσει γρηγορότερα και να μηχανοποιήσει γρηγορότερα.

Δεδομένου ότι η **τρισδιάστατη εκτύπωση** δημιουργεί αντίγραφα των τρισδιάστατων αρχείων ένα προς ένα, οι οικονομίες κλίμακας δεν μπορούν να γίνουν όταν παράγεται το ίδιο αρχείο για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα: αυτό είναι σαφώς διαφορετικό από τις μεθόδους κατασκευής σειράς που στοχεύουν στην παραγωγή των εκατομμυρίων των μονάδων των ίδιων αντικειμένων. Αντίθετα, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η τέλεια μέθοδος για παραγωγή κατόπιν παραγγελίας, και προσαρμογής σε αλλαγές.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται στο επίκεντρο των μέσων τα τελευταία χρόνια. Αυτή η τρισδιάστατη μέθοδος εκτύπωσης έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά επαγγελματικά περιβάλλοντα για σχεδόν 30 έτη αλλά μέχρι τώρα δεν ήταν προσβάσιμη στο ευρύ κοινό.

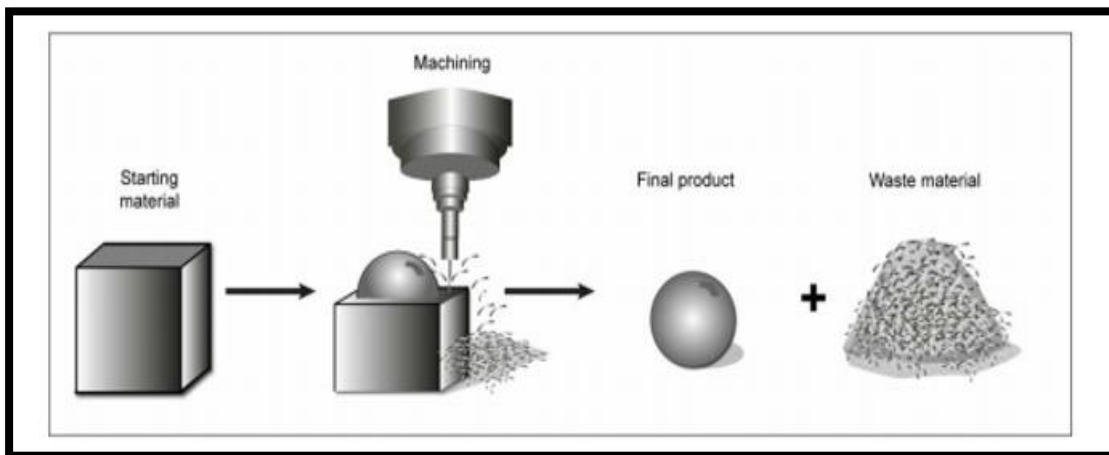
Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές καταλαμβάνουν τώρα μια θέση σημαντική στις

προτιμήσεις του κοινού και αυτό οφείλεται κυρίως στο άνοιγμα αυτής της τεχνολογίας σε αυτό. Για πολύ καιρό η τεχνολογία αυτή ήταν περιορισμένη μόνο στους επαγγελματίες και στη βιομηχανία, αλλά τώρα τρισδιάστατη εκτύπωση που επιτρέπει την εκτύπωση μερών ή τελικών προϊόντων έχει γίνει προσιτή στο ευρύ κοινό.

## **2.1 Γενικά στοιχεία – Ορισμοί**

Η μετατροπή μιας ιδέας σε σχέδιο και κατόπιν σε αντικείμενο είναι μια σύνθετη διαδικασία με λιγότερα ή περισσότερα ενδιάμεσα στάδια που αποτελούσε και αποτελεί αυτό που ονομάζουμε γενικά παραγωγή[2]. Για την μετάβαση από τον ιδεατό κόσμο του σχεδίου στον φυσικό κόσμο των αντικειμένων, απαιτείτο (παλιότερα) η μεσολάβηση ενός αριθμού εργατών και τεχνικών, οι οποίοι χρησιμοποιώντας τη δύναμη, την πείρα, τις δεξιότητες και τα εργαλεία τους, έδιναν μορφή και υλική υπόσταση στο σχέδιο.

Η αφαιρετική μέθοδος παραγωγής (Subtractive manufacturing) ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία ένα ακατέργαστο υλικό κόβεται σε ένα επιθυμητό τελικό σχήμα και μέγεθος μέσα από μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού (όπως σχηματικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1). Περιλαμβάνει την κοπή και διάτρηση του υλικού.



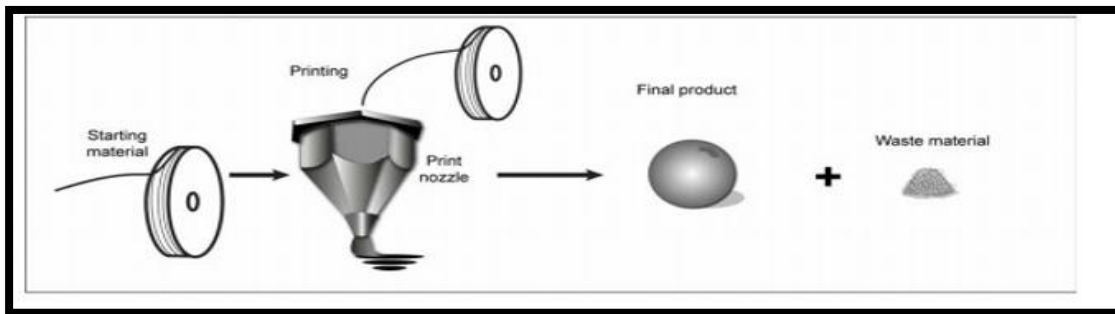
Εικόνα 2.1. Αφαιρετική μέθοδος παραγωγής .

Αντιθέτως η προσθετική μέθοδος παραγωγής (Additive Manufacturing) ή αλλιώς τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing), (όπως σχηματικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται τρισδιάστατα αντικείμενα μέσω της διαδοχικής εναπόθεσης και ένωσης επάλληλων στρώσεων υλικού.

Είναι μια διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων στερεών αντικειμένων από ένα ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Κοινό στοιχείο των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η χρήση υπολογιστή, λογισμικού 3D modeling (Computer Aided Design ή CAD), κατάλληλου εκτυπωτή και υλικού κατασκευής.

Μόλις ένα μοντέλο CAD παραχθεί, ο εκτυπωτής διαβάζει τα δεδομένα από το αρχείο

CAD και προσθέτει διαδοχικά στρώματα υγρού, σκόνης, φύλλο υλικού ή άλλο, για την κατασκευή του τρισδιάστατου αντικειμένου.



Εικόνα 2.2. Προσθετική μέθοδος παραγωγής

Χρησιμοποιώντας την αρχή του layering (διαστρωμάτωσης), οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να δημιουργήσουν νέα αντικείμενα από διάφορα είδη μετάλλων, πλαστικών και κεραμικών σε γεωμετρικά σχήματα τα οποία είναι αδύνατο να επιτευχθούν με άλλες τεχνικές κατασκευής. Επειδή ο σχεδιασμός είναι ψηφιακός, τα τελικά προϊόντα μπορούν να παραχθούν από οποιονδήποτε διαθέσιμο εκτυπωτή 3D.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων, έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής.

Εδώ και τρεις δεκαετίες περίπου σε πολλούς τομείς την παραγωγή αναλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο αυτοματοποιημένα συστήματα που βασίζονται στη ρομποτική. Σήμερα, η ανάπτυξη νέων μηχανών και τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης ανοίγει τον δρόμο στο επόμενο στάδιο εξέλιξης της αυτοματοποίησης, το οποίο περιγράφεται ως άμεση ή ταχεία παραγωγή (Rapid Manufacturing) και συνίσταται στην απευθείας μετάβαση από τον κόσμο του ψηφιακού πλέον σχεδίου ή μοντέλου, στον κόσμο των φυσικών αντικειμένων.

Οι μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιούν τα δεδομένα ψηφιακών αρχείων τα οποία έχουν δημιουργηθεί/σχεδιαστεί είτε από κάποιον μηχανικό είτε έχουν προκύψει από την σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου, για να κατασκευάσουν, τυπώνοντας σε τρεις διαστάσεις το φυσικό αντικείμενο.

Καθώς η παραγωγή σε τοπικό επίπεδο γίνεται διεθνής τάση, υποστηριζόμενη από την κατανομημένη παραγωγή, η προσωπική παραγωγή κερδίζει έδαφος. Χαμηλώνει το όριο κλίμακας παραγωγής που επιτρέπει σε μια παραγωγική μονάδα να θεωρηθεί βιομηχανία. Είναι δυνατόν να παραχθεί τοπικά αυτό που έχει σχεδιαστεί αλλού και ταυτόχρονα μπορεί να ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις της τοπικής ζήτησης, χωρίς έξοδα μεταφοράς. Η τρισδιάστατη εκτύπωση διεκδικεί δυναμικά την θέση της ως νέο

τεχνολογικό επίτευγμα, που συνδέει κατευθείαν και χωρίς διαμεσολάβηση την ιδέα του σχεδιαστή με την παραγωγή εξαφανίζοντας όλους τους ενδιάμεσους παράγοντες μεταξύ σχεδιασμού και παραγωγής.

Χωρίς κανέναν περιορισμό στη μορφή και στη γεωμετρία τους, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής, τα αντικείμενα μπορούν να «εκτυπωθούν» και να είναι έτοιμα για χρήση, με σημαντική μείωση του χρόνου απόκτησης της πρώτης έκδοσης ενός προϊόντος. Καθίσταται έτσι δυνατό να τυπωθούν σύνθετες γεωμετρικές μορφές ή μπορεί απευθείας να εκτυπωθεί λειτουργική συναρμολογημένη διάταξη, γλιτώνοντας έτσι χρόνο και κόπο από την μετέπειτα συναρμολόγηση (Forrest & Cao,2013).

Η κατασκευή ενός μοντέλου με σύγχρονες μεθόδους μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και αρκετές ημέρες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να παράγουν μοντέλα συνήθως μέσα σε λίγες ώρες αν και ο χρόνος μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος που χρησιμοποιείται, την ταχύτητα και την ακρίβεια εκτύπωσης το μέγεθος και τον αριθμό των μοντέλων που παράγονται ταυτόχρονα.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται στο επίκεντρο των μέσων τα τελευταία χρόνια. Έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά επαγγελματικά περιβάλλοντα για σχεδόν 35 έτη αλλά μέχρι τώρα δεν ήταν προσβάσιμη στο ευρύ κοινό. Για πολύ καιρό η τεχνολογία αυτή ήταν περιορισμένη μόνο στους επαγγελματίες και στη βιομηχανία, αλλά τώρα το άνοιγμα αυτής της τεχνολογίας και η πτώση των τιμών των εκτυπωτών επιτρέπει την εκτύπωση μερών ή τελικών προϊόντων και έχει γίνει προσιτή στο ευρύ κοινό. Όλα ξεκινούν με ένα τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο μπορεί να δημιουργηθεί με πληθώρα προγραμμάτων. Μπορεί η βιομηχανία να χρησιμοποιεί το 3D CAD, αλλά υπάρχουν και πολύ απλούστερες λύσεις για όλους τους άλλους. Αν δεν θέλουμε ή δεν έχει νόημα να φτιάξουμε μόνοι μας κάποιο τρισδιάστατο μοντέλο, μπορούμε να κάνουμε κάτι τελείως διαφορετικό. Αν αυτό που θέλουμε να “τυπώσουμε” υπάρχει ήδη, μπορούμε να το σκανάρουμε με “3D scanner”, από την οποία διαδικασία θα προκύψει το τρισδιάστατο μοντέλο που χρειαζόμαστε για την εκτύπωση. Όταν γίνει και αυτό, το μοντέλο που προκύπτει “κόβεται” σε “φέτες” προκειμένου να πάρει μορφή που μπορεί να κατανοήσει και να αξιοποιήσει ο εκτυπωτής. Ο εκτυπωτής, ουσιαστικά διαβάζει κάθε “φέτα”/στρώση και εναποθέτει αναλόγως τα υλικά κατά την εκτύπωση. Και στρώση-στρώση σχηματίζεται τελικά η τελική εκτύπωση, το αντικείμενο που θέλουμε δηλαδή. Όπως έχουμε ήδη παρατήρηση, η τεχνική εκτύπωσης δεν είναι μόνο μία καθώς καθεμιά έχει την ιδιαιτερότητά της. Συν τοις άλλοις, υπάρχει και ποικιλία στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση. Πλαστικά, μέταλλα, κεραμικά, ακόμη και άμμος είναι «μέσα στο παιχνίδι». Στο στάδιο της δοκιμής είναι ακόμη πιο περίεργα υλικά, όπως βιολογικά υλικά διάφορων ειδών, ακόμη και τροφές. Αυτά τα υλικά βέβαια δεν είναι ακόμη διαθέσιμα σε μεγάλη κλίμακα. Για αυτό και οι

εκτυπωτές που μπορούμε να βρούμε ως καταναλωτές περιορίζονται κυρίως στη χρήση πλαστικών και άλλων συνθετικών υλικών όπως το nylon. Πάντως, ορισμένοι πιο δαιμόνιοι χρήστες κατάφεραν να πάρουν τα πιο προσιτά μοντέλα εκτυπωτών και να τα προσαρμόσουν ώστε να τυπώνουν τροφή χρησιμοποιώντας ζάχαρη ή σοκολάτα.

Ναι, αλλά τελικά πώς λειτουργούν όλα αυτά;

Κάτι που πρέπει να ξεκαθαρίσουμε είναι πως, σε αντίθεση με την εκτύπωση φωτογραφιών, όπου όποια τεχνική και να χρησιμοποιήσουμε είναι σίγουρο ότι μπορούμε να τυπώσουμε ότι φωτογραφία θέλουμε, εδώ υπάρχει λόγος για τις διαφορετικές τεχνικές, αφού προσφέρονται για εξίσου διαφορετικά υλικά. Υπάρχουν λοιπόν εκτυπωτές που χρησιμοποιούν πλαστικά και άλλα υλικά σε σκόνη και χρειάζονται θέρμανση για να “δέσουν” οι στρώσεις. Αντίστοιχα αλλού χρησιμοποιείται κάποιου είδους συνθετική ρητίνη που προφανώς χρειάζεται διαφορετικό χειρισμό ώστε να στερεοποιηθεί όπως πρέπει. Αλλού τα υλικά εναποτίθενται με τη μορφή σταγονιδίων ενώ σε άλλες περιπτώσεις έχουμε εκτυπωτές που λιώνουν τα υλικά και τα χρησιμοποιούν αναλόγως. Μια ακόμη σημαντική σημείωση είναι πως οι εκτυπωτές που μπορεί να αγοράσει κανείς σήμερα δεν τυπώνουν με το που βγουν από το κουτί και απαιτούν λίγη προετοιμασία. Επιπλέον, κάποια απλά αντικείμενα μπορούν να τυπωθούν και να είναι έτοιμα για χρήση. Πιο πολύπλοκα όμως, ειδικά αν είναι μέρη ενός όλου, μπορεί να θέλουν συναρμολόγηση, φινίρισμα και λοιπές χειρωνακτικές εργασίες πριν πάρουν την τελική τους μορφή. Πολλά εξαρτώνται, προφανώς, από τη φιλοδοξία του καθενός δημιουργού.

Η έννοια της τρισδιάστατης εκτύπωσης με απλά λόγια μπορεί να οριστεί ως η μετατροπή ενός δυσδιάστατου σχεδίου σε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο το οποίο μεταφέρεται στον υλικό κόσμο. Η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται σε εξελισσόμενο στάδιο, καθώς η τελική της μορφή δεν έχει ακόμα διαμορφωθεί.

Η επιστήμη της 3d εκτύπωσης περιστρέφεται γύρω από τρεις βασικούς άξονες:

α) Τον σχεδιαστικό τομέα, κατά τον οποίο απαιτείται η εγκατάσταση και χρήση λογισμικού που εξειδικεύεται σε 3d σχεδιασμό. Τέτοια λογισμικά είναι γνωστά στην βιομηχανία ως CAD (Computer Aided Design) και επιτρέπουν στο χρήστη την πλήρη διαμόρφωση ενός αντικειμένου και στις τρεις διαστάσεις.

β) Τη διαδικασία της εκτύπωσης, κατά την οποία ο εκτυπωτής λαμβάνει τις εντολές του χρήστη και μετατρέπει τις πρώτες ύλες σε ένα αντικείμενο που ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές του αρχικού σχεδιασμού. Αυτή η διαδικασία απαιτεί έναν ειδικό εξοπλισμό και μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες μέχρι και αρκετές μέρες ανάλογα με το μέγεθος του προϊόντος.

γ) Την τελική φάση της εκτύπωσης, όπου ο παραγωγός μπορεί να τελειοποιήσει το προϊόν ή να εντοπίσει και να επιδιορθώσει πιθανές ατέλειες.



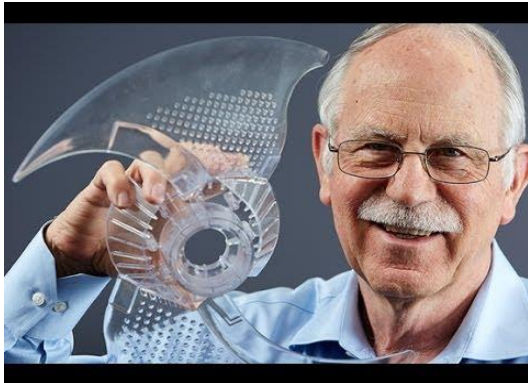
Τα πέντε κοινά στάδια που ακολουθούν όλες οι τεχνικές 3d εκτύπωσης είναι:

- α) Δημιουργία αρχικού ψηφιακού μοντέλου CAD
- β) Μετατροπή του μοντέλου CAD σε μορφή STL
- γ) Τεμαχισμός του αρχείου STL σε διατομές ελάχιστου πάχους
- δ) Κατασκευή του αντικειμένου με αλληλαπόθεση των διατομών και
- ε) Καθαρισμός και τελικό φινίρισμα του προϊόντος.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση σηματοδοτεί ένα επίτευγμα-σταθμό του σύγχρονου τεχνολογικού κόσμου. Είναι ένας από τους πιο γρήγορα αναπτυσσόμενους τομείς της επιστήμης και έχει δώσει ερεθίσματα σε πολλούς ερευνητές άλλων τομέων, ώστε όλοι μαζί να συνεισφέρουν στην γενικότερη ανάπτυξη. Δίνει τη δυνατότητα κατασκευής προϊόντων σε εκατοντάδες ανθρώπους, καθώς, παρά το ακριβό κόστος της συσκευής, το κόστος παρασκευής προϊόντων είναι σημαντικά ελαττωμένο σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Ακόμα, η τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης δίνει σαφή προτερήματα και στον τομέα της περιβαλλοντικής ανάπτυξης, με το σχεδόν μηδαμινό ποσό αποβλήτων που δημιουργεί. Αυτή η τεχνολογική καινοτομία έχει και κοινωνικές συνέπειες, καθότι ανοίγει το δρόμο της δημιουργικότητας στον καθένα που ενδιαφέρεται. Με τον τρόπο αυτό υπόσχεται ενδιαφέρουσες προοπτικές για το μέλλον. Είναι πια βέβαιο ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση θα αποτελέσει τη βιομηχανία του μέλλοντος και θα παίξει καθοριστικό ρόλο στα επόμενα χρόνια.

## **2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Η πρώτη δημοσίευση σχετικά με την τρισδιάστατη τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ότι έγινε το 1981 από τον Hideo Kodama από το Ινστιτούτο Βιομηχανικών Ερευνών της Ναγκόγια, η οποία έκανε λόγο για τις δυνατότητες ενός συστήματος ταχείας πρωτοτυποποίησης που θα χρησιμοποιούσε φωτοπολυμερή για να οικοδομήσει ένα σταθερό εκτυπωμένο αντικείμενο, χτισμένο πάνω σε στρώματα, καθένα από τα οποία θα αντιστοιχούσε σε μία διατομή ενός μοντέλου.



Εικόνα 2.3. Charles Hull

Ο Charles Hull [ Εικόνα 2.3] το **1986** ο οποίος ήταν συνιδρυτής **της εταιρείας 3D Systems**, εφηύρε τη Στερεολιθογραφία (stereolithography), μια διαδικασία που επιτρέπει στους σχεδιαστές τη δημιουργία 3D μοντέλων χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα τα οποία μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν για να δημιουργήσουν ένα συγκεκριμένο αντικείμενο (Matias & Rao, 2015).

Ο Charles Hull δημοσίευσε επίσης ένα μεγάλο αριθμό διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σχετικά με την έννοια της 3D εκτύπωσης, πολλά από τα οποία χρησιμοποιούνται και σήμερα από την “3D Systems”.



Εικόνα 2.4. Carl Deckard

Το **1987** ο Carl Deckard [ Εικόνα 2.4] εργαζόταν στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, δημοσίευσε μία πατέντα ευρεσιτεχνίας μεθόδου 3D εκτύπωσης, την επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτίνων λέιζερ (Selective Laser Sintering, SLS), η οποία έγινε γνωστή το 1989.

Ο Scott Crump [ Εικόνα 2.5 ] το **1988**, εφηύρε μία άλλη 3D μέθοδο εκτύπωσης, την Μοντελοποίηση εναπόθεσης τηγμένου υλικού (**Fused Deposition Modeling**), η οποία αποτέλεσε το θεμέλιο για την εταιρία που ίδρυσαν από κοινού με τη σύζυγό του, τη Λίζα Crump, ένα χρόνο αργότερα, τη Stratasys και η μέθοδος εκδόθηκε το 1992.



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

ως

Εικόνα 2.5. Scott Crump

Επίσης το **1992** παράχθηκε η πρώτη στερεολιθογραφική μηχανή από την 3d Systems (Wohlens & Gornet, 2012). Πρόκειται για μια μηχανή που αποτελείται από ένα υπεριώδης λέιζερ (UV laser) που στερεοποιεί το φωτοπολυμερές υλικό και κατασκευάζει πολύπλοκη δομή με διαστρωμάτωση (layer-by-layer).

Κατά τη δεκαετία **1990** εμφανίζονται και άλλες τεχνολογίες 3D εκτύπωσης και διαδικασίες όπως :

α) η βαλλιστική κατασκευή σωματιδίων (BPM) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον William Masters,

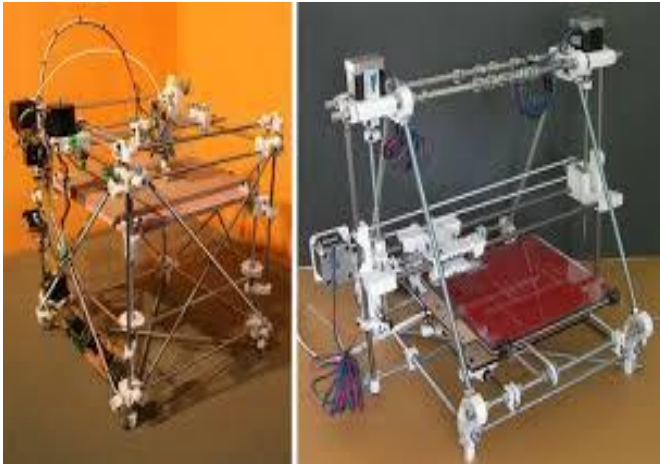
β)η συγκόλληση λεπτών φύλλων (LOM) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Michael Feygin,

γ) η ωρίμανση στερεού εδάφους (SGC) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Itzchak Pomerantz et al και «τρισεδιάστατη εκτύπωσης» (3DP) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Emanuel Sachs et al.

Το **1999** δημιουργείται το πρώτο όργανο που είναι καλλιεργημένο σε εργαστήριο. Με πειράματα αναπτύχθηκε από επιστήμονες η αναγεννητική ιατρική και άνοιξε δρόμους για την ανάπτυξη άλλων στρατηγικών για την τρισεδιάστατη εκτύπωση οργάνων. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται τα κύτταρα του ανθρώπου, ο κίνδυνος της απόρριψης από τον οργανισμό, είναι ελάχιστος έως μηδενικός (The Authority on 3d printing).

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

Το **2005** ο Δρ. Adrian Bowyer στο Πανεπιστήμιο του Bath ιδρύει την RepRap [ Εικόνα 2.6 ], μία πρωτοβουλία ανοιχτού κώδικα για την κατασκευή ενός 3D εκτυπωτή, ο



ο οποίος μπορεί να εκτυπώνει τα περισσότερα από τα εξαρτήματα του ίδιου του εκτυπωτή. Το όραμα του έργου αυτού ήταν η χαμηλού κόστους διανομή των RepRap μονάδων σε ιδιώτες παντού, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να δημιουργήσουν προϊόντα καθημερινής χρήσης από μόνοι τους.

Εικόνα 2.6. RepRap

Το **2008** εμφανίζεται ο πρώτος εκτυπωτής αυτού του είδους.

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

Το **2008** εκτυπώθηκε ένα ανθρώπινο προσθετικό μέλος και συγκεκριμένα ένα πόδι ,το οποίο είχε όλα τα μέρη εκτυπωμένα χωρίς να απαιτείται η συναρμολόγησή τους.

Έτσι έχουμε τον πρώτο άνθρωπο που περπατάει με τρισδιάστατο εκτυπωμένο πόδι.

Την ίδια χρονιά η εταιρεία Shapeways δημιουργεί μια υπηρεσία συνεργασίας και μία κοινότητα επιτρέποντας καλλιτέχνες, αρχιτέκτονες και σχεδιαστές να μετατρέψουν οικονομικά τα 3D σχέδιά τους σε φυσικά αντικείμενα.

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

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

Επίσης την ίδια χρονιά δημιουργήθηκε το πρώτο παγκοσμίως τρισδιάστατο τυπωμένο αυτοκίνητο, το Urbee (Kor, 2013). Είναι φιλικό προς το περιβάλλον, ηλεκτρικό με εναλλακτικό καύσιμο την αιθανόλη. Επιπρόσθετα έχουμε εκτύπωση σε χρυσό και ασήμι.

Η εταιρεία i.materialise γίνεται η πρώτη υπηρεσία εκτύπωσης 3D σε όλο τον κόσμο που προσφέρει χρυσό 14 καρατιών και ασήμι ως υλικά, ανοίγοντας έτσι μια νέα και λιγότερο δαπανηρή επιλογή κατασκευής για τους σχεδιαστές κοσμημάτων.

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

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

Το **2015** η Google επενδύει 100 εκατομμύρια δολάρια στην εταιρεία Carbon3D.

Το **2016** η HP παραδίδει τον πρώτο 3D εκτυπωτή τεχνολογίας Multi Jet Fusion (MJF) και η XJet Ltd παρουσίασε την τεχνολογία Νανοσωματιδίων με πίεση ακροφυσίου (NanoParticle Jetting - NPJ).

## 2.3.ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

### 2.3.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM ή αλλιώς Fused Filament Fabrication (FFF) βασίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλληπάλληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο.[3]

Χαρακτηρίζεται από υψηλή σχέση απόδοσης/τιμής συγκριτικά με άλλες μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίησης ή συμβατικής παραγωγής. Τα παραγόμενα αντικείμενα είναι ανθεκτικά και συνήθως έτοιμα προς χρήση χωρίς να απαιτείται κάποια πρόσθετη επεξεργασία. Υστερεί στο σχηματισμό πολύ λεπτών χαρακτηριστικών και στο βαθμό λεπτομέρειας που μπορεί να αποτυπώσει. Λόγω του ότι είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία αναπτύσσονται συνεχώς νέα υλικά που προσδίδουν στα αντικείμενα ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά [4][5].

#### *Κανονική - 0.3mm*

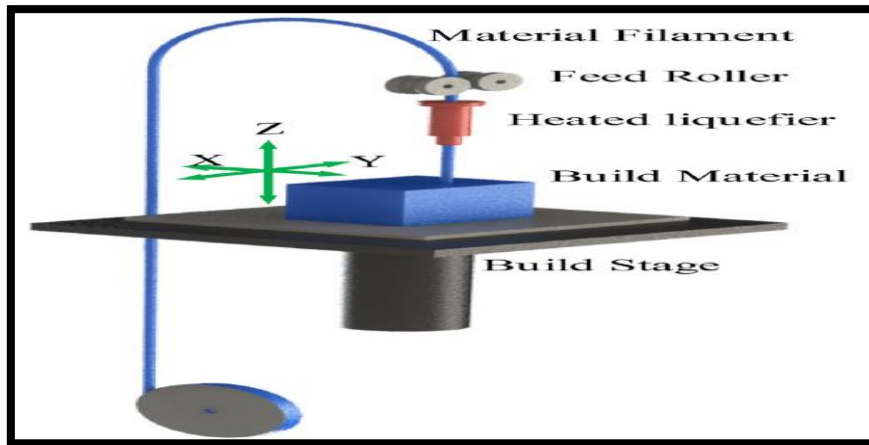
Το πάχος κάθε στρώσης ρυθμίζεται στα 0.3 χιλιοστά. Το αποτέλεσμα είναι ένα ανθεκτικό και στιβαρό αντικείμενο που όμως έχει διακριτά επίπεδα τόσο οπτικά όσο και στην αφή. Είναι η πιο γρήγορη και οικονομική επιλογή και συνιστάται για εκτυπώσεις που σας ενδιαφέρει περισσότερο η λειτουργικότητα παρά η εμφάνιση του αντικειμένου.

#### *Μεσαία - 0.2mm*

Το πάχος των στρώσεων είναι αρκετά λεπτό ώστε να μη διακρίνονται εύκολα, μπορούμε όμως να τις νιώσουμε στην αφή. Αποτελεί μια μέση λύση για να δημιουργήσουμε ένα ποιοτικά εκτυπωμένο και όμορφο αντικείμενο σε καλή τιμή, χωρίς μεγάλη αναμονή.

#### *Μέγιστη - 0.1mm*

Σε κάθε χιλιοστό ύψους του αντικειμένου αντιστοιχούν 10 στρώσεις υλικού! Οι στρώσεις αυτές είναι τόσο λεπτές που δεν μπορούμε να τις αντιληφθούμε ούτε οπτικά ούτε και στην αφή. Η επιλογή αυτή δίνει σαφώς το καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα. Η 3D εκτύπωση στα 0.1 χιλιοστά απαιτεί σημαντικά περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθεί σε σχέση με τις χαμηλότερες αναλύσεις με αποτέλεσμα να είναι και η πιο ακριβή.(Εικόνα 2.7)



Εικόνα 2.7. 3D εκτύπωση FDM

### **2.3.2 Stereolithography (SLA)**

Η στερεολιθογραφία επιτυγχάνεται μέσω του φωτοπολυμερισμού πολύ λεπτών στρώσεων, ειδικών για 3D εκτύπωση, υγρών ρητινών. Οι ρητίνες αυτές έχουν τη ξεχωριστή ιδιότητα να στερεοποιούνται όταν εκθέτονται σε υπεριώδη ακτινοβολία

Με αυτό τον τρόπο παίρνει μορφή και ενσωματώνεται η κάθε μια στρώση πάνω στην άλλη σχηματίζοντας το φυσικό αντίγραφο του ψηφιακού 3D μοντέλου. Η στερεολιθογραφία παράγει αντικείμενα εξαιρετικής ποιότητας, ακρίβειας και λεπτομέρειας σε τέτοιο βαθμό ώστε τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο να διακρίνουμε εάν το αντικείμενο είναι το τελικό προϊόν και όχι ένα εκτυπωμένο πρωτότυπο. Η επιλογή της ρητίνης που θα χρησιμοποιηθεί προσδίδει στο αντικείμενο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως δυνατότητα χύτευσης, αυξημένη αντοχή, ελαστικότητα κοκ.

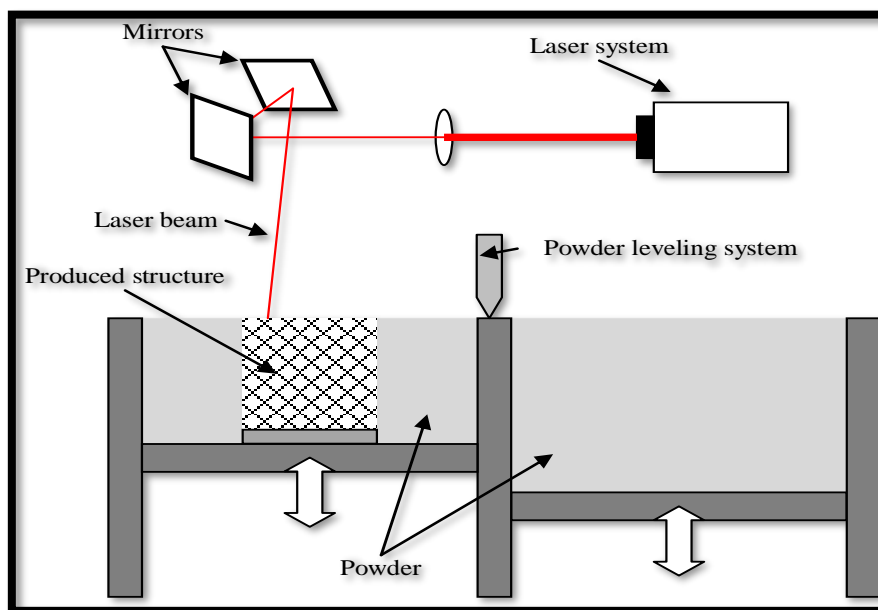
Υψηλή - 0.05mm Το πάχος κάθε στρώσης ρυθμίζεται στα 0.05 χιλιοστά.

Μέγιστη - 0.025mm Το πάχος κάθε στρώσης ρυθμίζεται στα 0.025 χιλιοστά.

### 2.3.3 Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion)

Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion): μια διαδικασία παρασκευής προσθέτων στην οποία η θερμική ενέργεια συνδέει επιλεκτικά περιοχές μιας κλίνης σκόνης. (Εικόνα 2.8)

Η σύντηξη σκόνης είναι μια διαδικασία στην οποία η θερμική ενέργεια διασυνδέει επιλεκτικές περιοχές μιας κλίνης σκόνης. Οι παραλλαγές αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν την επιλεκτική λέπτυνση με λέιζερ (SLM), την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), την άμεση επιλεκτική τήξη λέιζερ (DLSM), την πυροσυσσωμάτωση με απευθείας μέταλλο (DMLS) και την τήξη με ηλεκτρονικές δέσμες (EBM) το αναπτυγμένο επίπεδο θερμοκρασίας υλικού.[7]

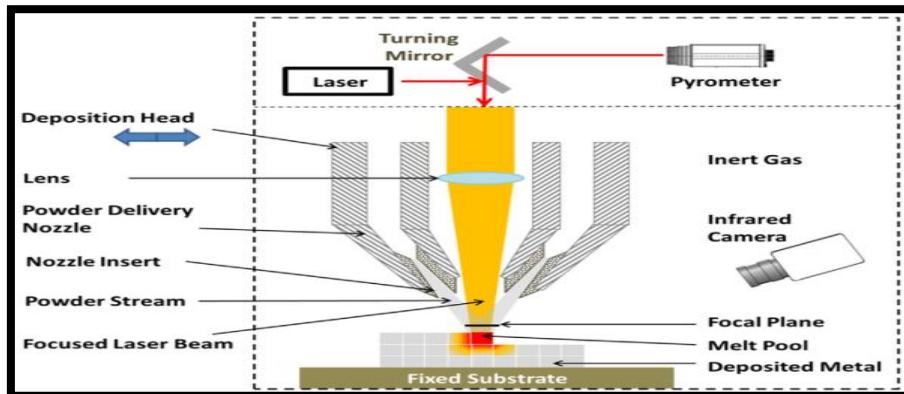


Εικόνα 2.8. Powder bed fusion



### 2.3.4 Directed energy deposition

Η εναπόθεση κατευθυνόμενης ενέργειας είναι μια διαδικασία παρασκευής προσθέτων στην οποία χρησιμοποιείται η θερμική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την τήξη των υλικών με τήξη κατά την εναπόθεσή τους. Μια δέσμη λέιζερ ή ηλεκτρονίων χρησιμοποιείται συνήθως ως πηγή θερμικής ενέργειας και μεταλλικές σκόνες ή σύρματα ως δομικά υλικά. Η αρχή της συγκεκριμένης διαδικασίας Additive Manufacturing (AM) [7] δηλαδή παραλλαγές διεργασιών παρασκευής προσθέτων, (παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.9.)



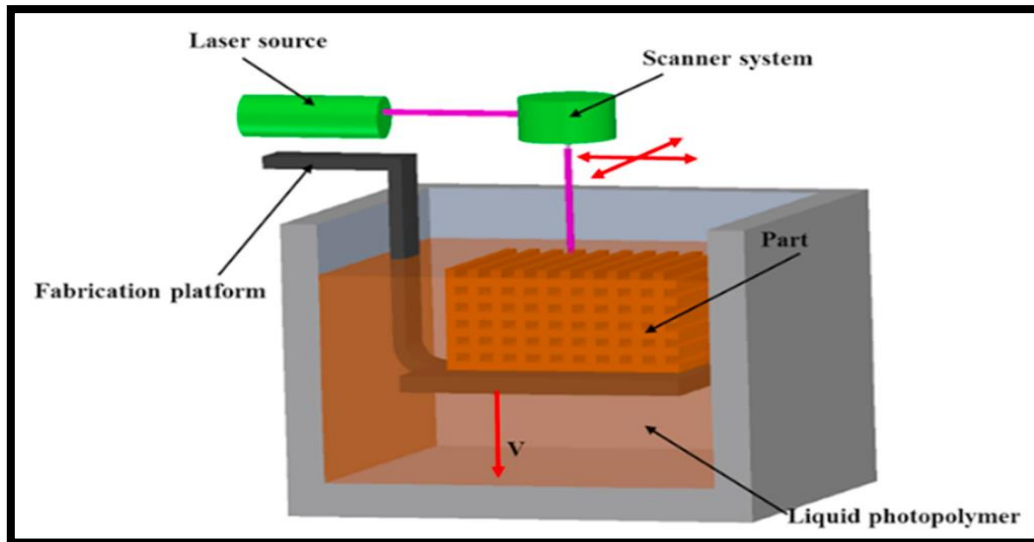
Εικόνα 2.9. Directed energy deposition

### 2.3.5 Vat photopolymerization

Ο φωτοπολυμερισμός Vat, γνωστός και ως στερεολιθογραφία, ήταν η πρώτη εμπορική AM διαδικασία από τη δεκαετία του '80. Η βασική ιδέα αυτής της διαδικασίας είναι ότι ένα υγρό φωτοπολυμερές υλικό πολυμερίζεται επιλεκτικά χρησιμοποιώντας μια μορφή φωτός. Η ρητίνη περιέχεται σε μια δεξαμενή και το τμήμα είναι συνήθως χτισμένο ανάποδα. Ξεκινώντας από την κορυφή της δεξαμενής. [7]

Η πηγή φωτός για την ενεργοποίηση της πολυμερισμού μπορεί να είναι είτε ένα λέιζερ κατευθυνόμενο από κάτοπτρα γαλβανόμετρου είτε από δίοδο εκπομπής φωτός (LED) που ελέγχεται από την τεχνολογία Digital Light Processing (DLP). (Εικόνα 2.10)

Αυτή η διαδικασία AM χρησιμοποιείται στον τομέα της αεροδιαστημικής, για να κατασκευάσει μοντέλα αεροδυναμικής σήραγγας και τμήματα επίδειξης.



Εικόνα 2.10. Vat photopolymerization

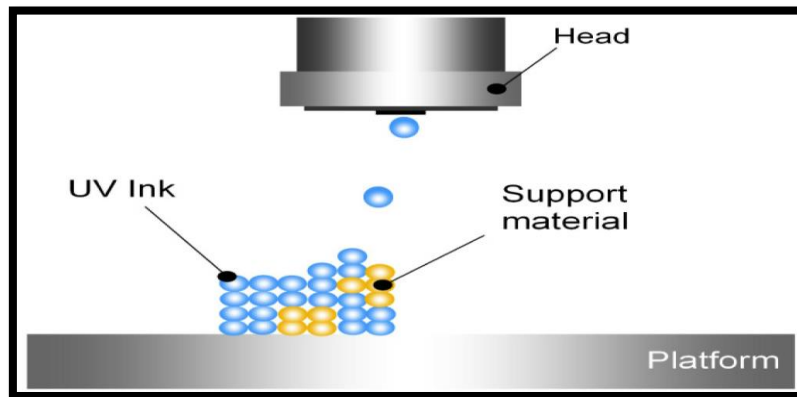
### 2.3.6 Material jetting

Στις διεργασίες εκτόξευσης υλικού δημιουργούνται αντικείμενα όμοια με έναν δισδιάστατο εκτυπωτή ψεκασμού μελάνης. Μία ή περισσότερες κεφαλές εκτύπωσης μελάνης χρησιμοποιούνται για την επιλεκτική απόθεση σταγονιδίων υλικού κατασκευής και τη δημιουργία στρώσεων στην περιοχή κατασκευής. Οι στιβάδες υλικού στη συνέχεια σκληρύνθηκαν ή σκληρύνθηκαν χρησιμοποιώντας υπεριώδες (UV) φως. Μια σχηματική απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης με το υλικό φαίνεται στο σχήμα. Δεδομένου ότι το υλικό πρέπει να είναι σε υγρή κατάσταση, ο αριθμός των υλικών που είναι διαθέσιμοι για χρήση με συστήματα AM με εκτόξευση υλικού είναι περιορισμένος. Τα φωτοπολυμερή και τα κεριά είναι κατάλληλα και συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά, λόγω της ιξώδους φύσης και της ικανότητάς τους να σχηματίζουν σταγόνες. Λόγω της φύσης των υλικών που χρησιμοποιούνται με την εκτόξευση υλικού, τα οποία είναι ευαίσθητα στο υπεριώδες φως, η διαδικασία έχει περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής στον αεροναυτικό τομέα.

Με τη διαδικασία εκτόξευσης υλικού, πολλαπλά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή ακόμα και να συνδυαστούν στο ίδιο τμήμα όταν χρησιμοποιούνται κεφαλές εκτύπωσης πολλαπλών ακροφυσίων. Έτσι, μπορούν να ληφθούν προσαρμοσμένες υλικές ιδιότητες ή χρώματα.[7]

Επιπλέον, ένα από τα υλικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία δομών υποστήριξης, ενώ τα άλλα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του εξαρτήματος. Υπάρχουν εφαρμογές εκτόξευσης υλικού όπου τα υλικά εκτύπωσης μπορούν να είναι μέταλλα με τη μορφή αερίου αερολύματος. Ωστόσο, παραμένει μια αναδυόμενη

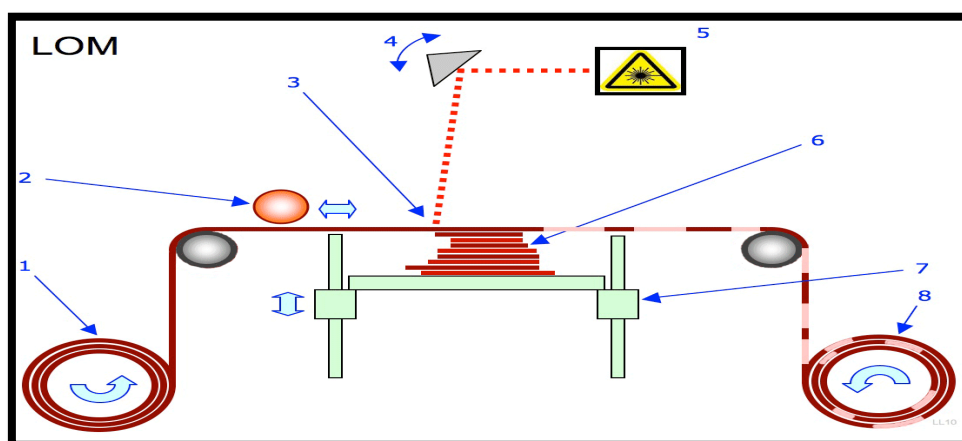
τεχνολογία που μπορεί να έχει μεγάλες δυνατότητες στην αποδοτική παραγωγή αεροναυτικών εξαρτημάτων.(Εικόνα 2.11)



Εικόνα 2.11. Material jetting

### 2.3.7 Sheet lamination

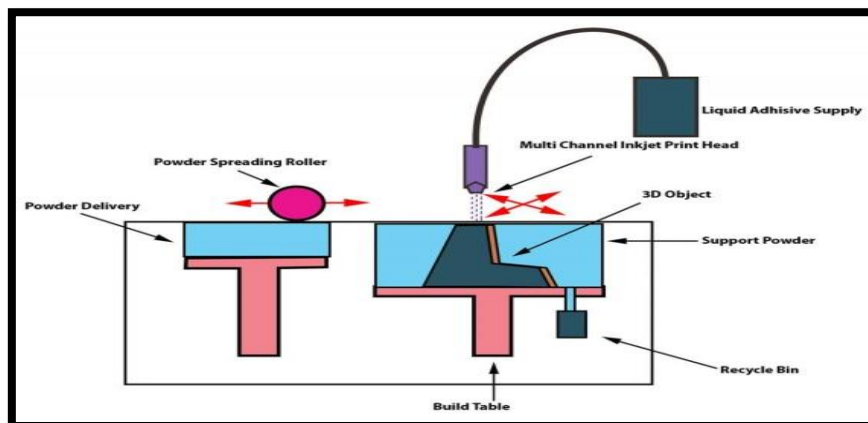
Η ελασματοποίηση φύλλων είναι η διαδικασία AM στην οποία το τελικό τμήμα κατασκευάζεται από φύλλα υλικού που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Το υλικό μπορεί να είναι είτε χαρτί είτε μέταλλο. Στην περίπτωση του χαρτιού, τα φύλλα κόβονται στην απαιτούμενη μορφή και η συγκολλητική ουσία χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των διαδοχικών στρωμάτων. Τα μεταλλικά φύλλα με τη μορφή φύλλων ή ταινιών συγκολλούνται μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας δέσμη ακτίνων λέιζερ ή υπερήχων. Στην αρχή της μεθόδου ελασματοποίησης φύλλου σχήματος απεικονίζεται σχηματικά (Εικόνα 2.12)[7]



Εικόνα 2.12. Sheet lamination

### 2.3.8 Binder jetting

Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένα υγρό συγκολλητικό υλικό για τη δέσμευση σωματιδίων σκόνης σε μια κλίνη σκόνης. Το συγκολλητικό υλικό εναποτίθεται επιλεκτικά χρησιμοποιώντας ακροφύσια κεφαλής εκτύπωσης inkjet για να συγκρατεί τη σκόνη στο επιθυμητό σχήμα. Πολυμερές, ce-ramic και μεταλλικές σκόνες είναι διαθέσιμες για χρήση με μηχανές πριτσινωτή. Δεν δημιουργούνται υπολειμματικές τάσεις στα δημιουργημένα μέρη, καθώς η εκτόξευση συνδετικού υλικού δεν χρησιμοποιεί θερμότητα κατά τη διαδικασία κατασκευής. Επιπλέον, δεν υπάρχει ανάγκη δημιουργίας δομής στήριξης, καθώς τα τμήματα στηρίζονται από τη χαλαρή σκόνη στο κουτί εργασίας. Ωστόσο, τα μεταλλικά συστατικά που δημιουργούνται με πτύεμα συνδετικού υλικού μετά τη διαδικασία κατασκευής AM απαιτούν την εφαρμογή μιας διαδικασίας πυροσυσσωμάτωσης και μερικές φορές να διεισδύσουν σε άλλο υλικό, ανάλογα με την εφαρμογή. Η θερμή ισοστατική πίεση (HIP) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη υψηλών πυκνοτήτων σε στερεά μέταλλα. Αυτή η διαδικασία AM χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία τυπωμένων πυρήνων άμμου και καλουπιών, ενώ, ακόμη και αν είναι δυνατή η εκτύπωση μεταλλικών μερών, υπάρχουν περιορισμένες αεροναυτικές εφαρμογές. (Εικόνα 2.13)[7]



Εικόνα 2.13. Binder jetting

## 2.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Υπάρχουν πολλά υλικά που χρησιμοποιούν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές για διάφορες εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Για τους κατασκευαστές και τους σχεδιαστές το κατάλληλο υλικό είναι το σημαντικότερο στοιχείο μιας κατασκευής. Ανάλογα τη χρήση για το οποίο προορίζεται το υπό κατασκευή αντικείμενο, επιλέγεται το υλικό με τις κατάλληλες μηχανικές, χημικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντολογικές πληροφορίες και θέματα ανισοτροπίας του κάθε υλικού. Συνήθως οι διάφορες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνοδεύονται από συλλογή υλικών ενώ οι άλογα με τη τεχνολογία της 3D εκτύπωσης πραγματοποιείται η επεξεργασία διαφορετικών υλικών με διαφορετικούς τρόπους για τη δημιουργία του τελικού σπιτιού. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στους 3D εκτυπωτές μπορεί να είναι σε μορφή σκόνης, με τα συσσωματώματα είτε να συγκολλούνται μεταξύ τους με χρήση ειδικής κόλλας που ψεκάζει ο εκτυπωτής, είτε να λιώνουν και να στερεοποιούνται επιλεκτικά. Αλλά μπορούν να είναι σε μορφή φύλλου πριν την επεξεργασία τους. Σε πολλές περιπτώσεις το αναλώσιμο μπορεί να βρίσκεται ή να θερμαίνεται για να βρεθεί σε ημι-στέρεα ή υγρή μορφή, για να έχουν καλύτερη συνοχή μεταξύ τους οι στρώσεις κατά την εκτύπωση. Τέλος αλλά μπορούν να είναι σε υγρή μορφή φωτοευαίσθητα τα οποία στερεοποιούνται επιλεκτικά μετά από ακτινοβολήση. Δηλαδή ανάλογα με τη τεχνολογία της 3D εκτύπωσης που χρησιμοποιείται, θα επιλεγεί και το υλικό στην κατάλληλη μορφή, η οποία θα είναι σκόνη (Powder), στερεά φύλλα (Solid Sheets), λειωμένο υλικό (Molten), φωτοπολυμερές υγρό (Photopolymer). Η σκόνη (Powder material) μπορεί να είναι από μέταλλο, από γύψο, κεραμικό, πλαστικό ή από συστατικά τροφίμων. Τα στερεά φύλλα (Solid Sheets) μπορεί να είναι από χαρτί, από μέταλλο, κεραμικό ή από πλαστικό και μπορεί να είναι ενιαία ή σκόνη πάνω σε φιλμ-ταινία. Ρευστό ή Λειωμένο υλικό (Gel or Molten material) μπορεί να είναι από πλαστικό, ξύλο, μέταλλο, Βιοσυμβατό ή άλλο υλικό και είναι συνήθως σε μορφή νήματος. Το Φωτοπολυμερές υγρό (Photopolymer liquid ) είναι από διάφορες ρητίνες με διαφορετικές ιδιότητες.

### 2.4.1 PLA Θερμοπλαστικό (Fused Deposition Modeling)

Το PLA (Poly Lactic Acid) είναι ένα βιοδιασπώμενο θερμοπλαστικό προερχόμενο κυρίως από φυτικές ανανεώσιμες πηγές το οποίο το κατατάσσει από τα πρώτα στη λίστα με τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον πλαστικά υλικά. Το PLA είναι σκληρό, ανθεκτικό και παρουσιάζει μεγαλύτερη ακαμψία σε σύγκριση με το ABS. Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει να μαλακώνει είναι περίπου οι 65 βαθμοί Κελσίου. Σε ένα σπίτι φτιαγμένο από PLA μπορεί να γίνει επεξεργασία με γυαλόχαρτο αλλά και μηχανουργική κατεργασία όπως τρύπημα, τόννευση και φρεζάρισμα. Επίσης μπορεί να βαφεί με ακρυλικά και άλλα χρώματα.

Είναι το πιο κοινά 3D εκτυπώσιμο υλικό, ιδανικό για όλες τις εφαρμογές που δεν υφίστανται υψηλές θερμοκρασίες. Χρώματα PLA Γκρι, Λευκό, Μαύρο, Κόκκινο, Κίτρινο, Πορτοκαλί, Μπλε, Πράσινο, Διαφανές.

#### **2.4.2 ABS Θερμοπλαστικό (Fused Deposition Modeling)**

Το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) είναι ένα από τα πιο κοινά είδη πλαστικών στη βιομηχανία κατασκευής προϊόντων. Τα γνωστά σε όλους μας τουβλάκια LEGO® είναι ένα τέτοιο παράδειγμα. Το ABS έχει πετρελαϊκή προέλευση κάτι που το κάνει λιγότερο "πράσινο" από το PLA. Είναι πολύ ανθεκτικό, σκληρό και σε μικρό βαθμό εύκαμπτο ώστε υπό περιορισμένη πίεση να λυγίζει αντί σπάει. Διατηρεί τη στιβαρότητα του έως τους 105 βαθμούς Κελσίου, άρα είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Όπως και το PLA μπορεί να τρυπηθεί αλλά και να λειανθεί με τρίψιμο χωρίς πρόβλημα. Χρώματα ABS Γκρι, Λευκό, Μαύρο, Κόκκινο, Κίτρινο, Πορτοκαλί, Μπλε, Πράσινο, Φυσικό Διαφανές.

#### **2.4.3 Πολυμερή υλικά**

Το Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρόλιο (Acrylonitrile Butadiene Styrene - ABS) και το Πολυγαλακτικό Οξύ (Polylactic Acid - PLA) είναι από τα πιο διαδεδομένα εμπορικά υλικά. Μπορούν να επεξεργαστούν με ακετόνη μετά την εκτύπωση για να παρέχεται ένα γυαλιστερό φινίρισμα. Κατά την αποθήκευση πρέπει να είναι στεγανός κλεισμένα, καθώς απορροφούν την υγρασία. Το ABS είναι παράγωγο πετρελαίου και εκλύονται μικρές αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση. Είναι λιγότερο εύθραυστο και πιο όλκιμο με μεγάλη θερμοκρασιακή αντίσταση Συνιστάται για πιο απαιτητικές εφαρμογές και προτυποποίηση μοντέλων. Για να «τυπωθεί» ένα αντικείμενο απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες (Θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ 220- 235 ο C ) από το PLA (Θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ 185 - 210 ο C ). Σε αντίθεση με το ABS, το PLA είναι βιοδιασπώμενο, προέρχεται από την επεξεργασία φυτικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων καλαμπόκι, πατάτες ή ζαχαρότευτλα και θεωρείται υλικό πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Υποκατηγορίες του PLA, είναι τα Soft PLA ή το Flex EcoPLA τα οποία είναι πιο εύκαμπτα και ενεργούν σαν λάστιχο και το το PolyMax PLA το οποίο είναι ανασχεδιασμένο με εξαιρετική μηχανική αντοχή.

Η Πολυβινυλική αλκοόλη (Polyvinyl Acetate – PVA), καθώς και το High Impact Polystyrene – (HIPS) είναι υδροδιαλυτά υλικά και χρησιμοποιούνται στις κατασκευές ως υλικό υποστήριξης, κατά την εκτύπωση, στα σημεία εκτύπωσης των αντικειμένων με μεγάλες κλίσεις. Το PVA είναι μη τοξικό και βιοδιασπώμενο μόλις διαλυθεί στο νερό. Συνήθως διαλύεται σε κρύο νερό αλλά η διαδικασία επιταχύνεται στο ζεστό νερό.

Το HIPS το υλικό είναι διαδεδομένο στη βιομηχανία τροφίμων και τη συσκευασία, διαλύεται σε ένα άχρωμο υγρό υδρογονάνθρακα λιμονένιο (hydrocarbon Limonene).

Το νάιλον (Nylon ή Polyamide- PA) Είναι γνωστό για τη μεγάλη βιοσυμβατότητά του, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική βιομηχανία. Η πλειονότητα των αντικαταστάσεων χόνδρου και ενός αρκετά μεγάλου αριθμού των προσθετικών μερών, γίνονται με τη χρήση αυτού του υλικού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι νάιλον που χρησιμοποιούνται στην 3D εκτύπωση όπως το Nylon 618, το οποίο έχει φυσικό λευκό χρώμα, το Nylon 645, το οποίο είναι αρκετά διαυγές, αλλά δύσκολο στην μεταχείρισή του και το Nylon PA6Polymer το οποίο είναι πολύ ανθεκτικό υλικό, με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, στιλπνότητα και ελαστικότητα και χρησιμοποιείται για την εκτύπωση εξαιρετικά στιβαρών εξαρτημάτων.

Το NylonX είναι και αυτό ένας τύπος του νάιλον που έχει προσθήκη μικρο ινών άνθρακα (carbon) για μεγαλύτερη ακαμψία. Άλλα ανθεκτικά υλικά στη κατηγορία αυτή είναι το Carbon, το Kevlar και το Fiberglass. Το Polyether ether ketone (Peek) είναι ελαφρύ θερμοπλαστικό πολυμερές και ανήκει στην κατηγορία των βιομηχανικών υλικών με τη μεγαλύτερη χημική, θερμοκρασιακή αντίσταση, καθώς και αντίσταση κατά της υγρασίας. Το Alumide κατασκευάζεται από ένα μείγμα πολυαμιδίου (ναίλον) και ένα πολύ χαμηλό ποσοστό γκρι σκόνης αλουμινίου. Το Alumide είναι ένα ισχυρό, κάπως άκαμπτο πλαστικό υλικό που μπορεί να αντέξει μικρές κρούσεις και να αντισταθεί σε κάποια πίεση ενώ είναι λυγισμένο. Η επιφάνεια έχει μια αμμώδη, κοκκώδη εμφάνιση και είναι ελαφρώς πορώδης.

Το Πολυαιθυλένιο (Polyethylene terephthalate - PET) (γνωστό από τη χρήση του στα πλαστικά μπουκάλια) είναι μια δημοφιλή εναλλακτική λύση 3D εκτύπωσης νήματος, λόγω του ότι συνδυάζει την ευκολία χρήσης του PLA με τη δύναμη και αντοχή του ABS. Είναι εγκεκριμένο από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) για δοχεία τροφίμων και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατανάλωση τροφίμων και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατανάλωση τροφίμων. Σε αντίθεση με το ABS δε στρεβλώνει και δεν παράγει οσμές ή αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση. Δεν είναι βιοδιασπώμενο, αλλά είναι 100% ανακτήσιμο. Είναι επίσης εύκολα διαχειρίσιμο στην εκτύπωση προσφέροντας κάποια χαρακτηριστικά στην απόδοση εκτύπωσης παρόμοια με το PLA. Στην αρχική του κατάσταση είναι ένα άχρωμο και πεντακάθαρο υλικό αλλά όταν θερμανθεί ή ψυχθεί το υλικό αλλάζει τη διαφάνειά του. Το υλικό έχει περισσότερο κρυσταλλική δομή όταν κρυώνει αργά μετά την εκτύπωση. Το νήμα είναι αρκετά σκληρό και ανθεκτικό στα χτυπήματα, έτσι ώστε να το καθιστά ιδανικό για ελαφριά αντικείμενα. Το PET είναι η τέλεια επιλογή για θήκες τηλεφώνου ή μηχανικά μέρη που απαιτούν ελαστικότητα και αντίσταση κρούσης ή ανθεκτικότητα.

Υποκατηγορίες του PET αποτελούν τα PETT/ G / XT / N-Vent. Το θερμοπλαστικό ελαστομερές (thermoplastic elastomer – TPE), η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (Thermoplastic Polyurethane - TPU) και το θερμοπλαστικό συμπολυεστέρα (Thermoplastic copolyester - TPC) είναι εύκαμπτα υλικά και δρουν σαν εύκαμπτο καουτσούκ. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για πώματα, ζώνες, ελατήρια, θήκες τηλεφώνου, και πολλά άλλα. Μπορούν να δημιουργήσουν 3D εκτυπώσεις που θα έχουν τις ιδιότητες ενός μαλακού ελαστικού, γεγονός που τα καθιστά ακόμη πιο ελαστικά από το Soft PLA. Το NinjaFlex και το FilaFlex είναι άλλα εύκαμπτα υλικά, έχουν θερμοκρασία εκτύπωσης που κυμαίνεται από 220 έως 230 °C, είναι μη τοξικά και ανθεκτικά σε ακετόνη, καύσιμα και διαλυτικά. Το PCTPE (Plasticized Copolyamide TPE) είναι ένας συνδυασμός από νάυλον και TPE. Όταν εκτυπωθεί, είναι εύκαμπτο σαν κανονικό TPE, αλλά το προστιθέμενο Nylon προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή. Μπορεί επίσης να βαφεί με οποιοδήποτε χρώμα βάσεως οξέως. Το FPE (Flexible PolyEster) είναι και αυτό εύκαμπτο υλικό μείγματος άκαμπτου και μαλακού πολυμερούς με θερμοκρασία εκτύπωσης που κυμαίνεται από 205 έως 250 °C. Υποκατηγορίες του ABS, είναι το Polycarbonate - PC/ABS.

Το Πολυκαρμπονικό (Polycarbonate – PC) είναι ένα εξαιρετικά ισχυρό, ανθεκτικό στα χτυπήματα θερμοπλαστικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, στην ιατρική, σε βιομηχανικές εφαρμογές σε οικιακές συσκευές, όπως τηλεοράσεις, περιβλήματα υπολογιστή, ακόμη και σε παιδικά παιχνίδια.

Έχει μεγάλες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή στη θερμότητα καθώς και τη δεύτερη υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους εξώθησης υλικών. Το υλικό είναι επίσης βιοσυμβατό και μπορεί να είναι αποστειρωμένο. Γι' αυτό είναι εξαιρετικά δημοφιλής για τις ανάγκες πρωτοτύπων, σε λειτουργικές δοκιμές, εργαλείων και σύνθετα έργα. Το υλικό πρέπει να εξωθηθεί σε θερμοκρασία πάνω από 300 °C. Το ξύλινα υλικά όπως το LayWood (LAYWOOD3), το Woodfill και το Timberfill κατασκευάζονται από ένα μείγμα PLA και ανακυκλωμένο ξύλο, έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά εκτύπωσης με το PLA, αλλά εμφάνιση παρόμοια με το ξύλο. Μπορούν να κοπούν, να τριφτούν και να βαφτούν δημιουργώντας φυσικά αντικείμενα για τη διακόσμηση σπιτιού, και για άλλες εφαρμογές. Επιφανειακά διαθέτουν χαρακτηριστικά παρόμοια με κόκκους ξύλου και με την αυξομείωση της θερμοκρασίας εξώθησης δημιουργούνται οι αποχρώσεις του ξύλου. Το Laybrick αναπτύχθηκε για να μιμηθεί τον αμμόλιθο. Περιέχει ένα μείγμα υπερλεπτής αλεσμένης κιμωλίας και co-polyesters για να παράγει μια επιφάνεια αμμόλιθου, όπως συναντάται στα αρχιτεκτονικά μοντέλα, γλυπτά, ή τοπία.

Δεν παρουσιάζει πλαστική αίσθηση και μπορούν να εκτυπωθούν με λεία ή πολύ τραχιά επιφανειακά χαρακτηριστικά, ανάλογα με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας εξώθησης. Μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το αντικείμενο παραμένει για 2-4 ώρες για επιπλέον



σκλήρυνση. Η επιφάνεια του μπορεί στη συνέχεια να χρωματιστεί ή να σφουρηλατηθεί ώστε να δημιουργηθούν μια σειρά από προϊόντα απομίμησης πέτρας.

Το Ακρυλονιτριλίου Συμπολυμερές ακρυλικού (Acrylonitrile Styrene Acrylate - ASA) είναι ένα υλικό με μεγάλη δύναμη και απaráμιλλη διατήρηση των φυσικών χαρακτηριστικών. Είναι επίσης εξαιρετικά ανθεκτικό σε καιρικές συνθήκες και σε χημικά, έτσι ώστε να μπορεί να αντέξει τις εξωτερικές συνθήκες όλων των ειδών με απaráμιλλη αντοχή.

Το Πολυπροπυλένιο (Polypropylene - PP) έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής. Ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών της καλής ευελιξίας, της καλής χημικής αντίστασης, και της ασφαλούς χρήσης για τρόφιμα κάνουν αυτό το υλικό μια εξαιρετική επιλογή για διάφορα δοχεία, συσκευασίες, καπάκια και άλλα πολλά. Το πολυοξυμεθυλενίου (POM, Acetal), επίσης γνωστή ως ακετάλη (Acetal) ή πολυακετάλη (Polyacetal), είναι ένα πλαστικό για βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν τμήματα ακρίβειας. Το φερμουάρ είναι το πιο πιθανό να γίνεται από POM πλαστικό. Λόγω της ακαμψία του, το χαμηλό συντελεστή τριβής, την εξαιρετική ελαστικότητα και αντοχή στη φθορά, είναι εξαιρετικό υλικό για εξαρτήματα με μηχανικές λειτουργίες, όπως γρανάζια και ρουλεμάν.

#### **2.4.4 Ρητίνες**

Στις μεθόδους 3D εκτύπωσης με απαιτήσεις φωτοπολυμερισμού, δεν υπάρχει αρκετά ευρύ φάσμα κατασκευαστών παραγωγής υλικών. Οι κατασκευάστριες εταιρείες, συνήθως συνοδεύουν τους εκτυπωτές με τις δικές τους ρητίνες. Με την είσοδο, στην αγορά, χαμηλού κόστους εκτυπωτών αναπτύσσεται ένα εύρος από ρητίνες σε διάφορα χρώματα και για διαφορετικές χρήσεις.

Η Ρητίνη Γενικού Σκοπού προσομοιώνει τα βασικά πλαστικά στη διάφανη κατάσταση ή σε διάφορα χρώματα, αλλά είναι κάπως εύθραυστα. Η Ανθεκτική Ρητίνη είναι σχεδιασμένη για υψηλή αντοχή στη φθορά, με αποτέλεσμα τα μέρη να μπορούν να λυγίσουν χωρίς να σπάσουν. Η ακαμψία και η υψηλή αντοχή στην κρούση, είναι παρόμοια με αυτή του πολυπροπυλενίου (PP) και έχει ομαλό, γυαλιστερό φινίρισμα, καθιστώντας το κατάλληλο για την προτυποποίηση ή τη συσκευασία. Η Σκληρή Ρητίνη είναι η προσομοίωση του πλαστικού ABS, με συγκρίσιμη αντοχή στον εφελκυσμό. Είναι ιδανική λύση για λειτουργικά πρωτότυπα και συναρμολογήσεις.

Η Υψηλής Θερμοκρασίας Ρητίνη μπορεί να αντέξει υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές, όπως παραγωγή καλουπιών για χύτευση, για θερμικές δοκιμές όπως ροή στα κανάλια που έχουν σχεδιαστεί για ζεστό αέρα ή υγρά και δημιουργία εργαλείων για θερμοδιαμόρφωση.

Η χυτεύσιμη (Castable) Ρητίνη καίγεται καθαρά χωρίς υπόλειμμα και αποτυπώνει ευκρινείς, ακριβείς λεπτομέρειες και λείες επιφάνειες. Τα κοσμηματοπωλεία και οι σχεδιαστές μπορούν να οδηγηθούν απ' ευθείας από μια 3D σχεδίαση σε ένα μοντέλο.

Η Εύκαμπτη Ρητίνη είναι εξαιρετικό υλικό για προσομοίωση καουτσούκ με διαφορετικά επίπεδα σκληρότητας και αντίσταση στο σχίσιμο. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαρτημάτων που απαιτείται να συμπιεστούν και να λυγίσουν. Η Βιοσυμβατή Ρητίνη στοχεύει στην οδοντιατρική βιομηχανία αλλά και στην ιατρική. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή οδοντικών προϊόντων, χειρουργικών οδηγών για τις επεμβάσεις και για ακουστικά βαρηκοΐας. Η Κεραμική Ρητίνη είναι ένα σύνθετο υλικό κεραμικού-φωτοπολυμερούς, κατά το οποίο το φωτοπολυμερές δεσμεύει τα κεραμικά σωματίδια. Μετά την εκτύπωση οδηγείται σε κλίβανο για να ολοκληρωθεί η κατασκευή. Υπάρχει τέλος η Ρητίνη αντίδρασης στο Φως της Ημέρας, η οποία δεν αντιδρά στο υπεριώδες φως, αλλά στο συνηθισμένο φως της ημέρας, περιορίζοντας έτσι την ανάγκη για στήριξη σε μια πηγή φωτός UV κατά την 3D εκτύπωση. Αντ' αυτού, μια οθόνη LCD μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μειώνοντας ενδεχομένως το κόστος της DLP 3D εκτύπωσης.

#### **2.4.5 Διάφορα υλικά**

Τα κεραμικά υλικά συναντιούνται σε μορφή νήματος, ταινίας, λεπτής σκόνης ή και σε επίπεδο νανοσωματιδίων η οποία ενώνεται με ένα συνδετικό υλικό, καίγεται και περνιέται με ένα λούστρο. Εκτός του ότι είναι ασφαλή για τρόφιμα, είναι ανακυκλώσιμα και ανθεκτικά στη θερμότητα. Είναι ιδανικά για πιάτα, φλιτζάνια, ακόμα και αγάλματα και ειδώλια. Είναι πυρίμαχα στους 500 οC. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι είναι εύθραυστα. Μερικές ιδιότητες τους είναι η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, οι μονωτικές ιδιότητες, ή η ημιαγώγιμη συμπεριφορά με διάφορες μαγνητικές και διηλεκτρικές ιδιότητες, και η αντίσταση στην παραμόρφωση.

Τα ψηφιακά υλικά είναι νέα σύνθετα υλικά που παράγονται, με ιδιότητες που δεν είναι διαθέσιμες στα επιμέρους συστατικά. Οι διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες δημιουργούν μία παλέτα υλικών καλύπτοντας όλες τις απαιτήσεις.

Το μεθακρυλικό πολυμεθύλιο (Polymethyl methacrylate - PMMA), ευρέως γνωστό ως ακρυλικό, είναι ένα εξαιρετικά διαφανές υλικό το οποίο είναι πολύ άκαμπτο και ανθεκτικό. Η θερμοκρασία εκτύπωσης κυμαίνεται στους 235 έως 250 °C.

Ο πολύχρωμος αμμόλιθος (Full color sandstone) είναι ιδανικό για φιγούρες και άλλα προϊόντα που προσφέρονται σε πολύχρωμη, υψηλής ποιότητας, εκτύπωση. Τα μοντέλα δημιουργούνται από την εκτύπωση του συνδετικού υλικού και από ένα χρωματιστό μελάνι, επίπεδο με επίπεδο, σε μια πλατφόρμα με βάση το γύψο σε σκόνη. Μετά την εκτύπωση, τα μοντέλα ολοκληρώνονται με ένα κυανοακρυλικό σφραγιστικό (εξαιρετικής ποιότητας κόλλα) για να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα και τα ζωντανά χρώματα. Το τελικό προϊόν είναι ένα σκληρό, εύθραυστο υλικό που λειτουργεί ιδανικά για τα οπτικά πρότυπα, αλλά δεν είναι κατάλληλο για λειτουργικά τμήματα.

Τα βρώσιμα υλικά σε μορφή σκόνης ή πάστας, καθώς και συστατικά όπως οι πρωτεΐνες χρησιμοποιούνται στις 3d εκτυπώσεις φαγητού, ενώ βιοσυμβατικές υδρογέλες (hydrogels) χρησιμοποιούνται στην βιοεξώθηση για τη δημιουργία ιστών και οργάνων.

#### **2.4.6 Μεταλλικά υλικά**

Το κράμα τιτανίου (Ti64 ή TiAl4V) είναι ένα από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέταλλα για 3D εκτύπωση και είναι σίγουρα ένα από τα πιο ευέλικτα, δεδομένου ότι είναι ισχυρό και ελαφρύ. Χρησιμοποιείται στον ιατρικό κλάδο (για εξατομικευμένα προσθετικά μέλη) και στην αεροδιαστημική/ αυτοκινητοβιομηχανία/ βιομηχανία εργαλείων (για ανταλλακτικά και πρωτότυπα). Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι είναι πολύ δραστικό, που σημαίνει ότι μπορεί εύκολα να εκραγεί όταν είναι σε μορφή σκόνης. Γι' αυτό η 3D εκτύπωση πρέπει να πραγματοποιείται σε κενό ή σε ατμόσφαιρα αργού αερίου. Ο ανοξείδωτος χάλυβας (Stainless Steel) είναι από τα πιο προσιτά μέταλλα για 3D εκτύπωση. Την ίδια στιγμή, είναι πολύ ισχυρό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία βιομηχανικών αλλά και καλλιτεχνικών / σχεδιαστικών εφαρμογών. Ένα είδος κράματος χάλυβα, το οποίο περιέχει επίσης κοβάλτιο και νικέλιο (cobalt and nickel) είναι ιδιαίτερα δύσκολο να σπάσει, ενώ την ίδια στιγμή έχει πολύ υψηλές ελαστικές ιδιότητες.

Το κοβάλτιο χρωμίου (Cobalt Chrome ) έχει μια πολύ υψηλή ειδική ισχύ (η οποία είναι η δύναμη διαιρούμενη με την πυκνότητά του, η οποία δείχνει ουσιαστικά την απαιτούμενη δύναμη ανά μονάδα επιφανείας για αποτυχία). Πιο συχνά χρησιμοποιείται για την παραγωγή τουρμπινών, οδοντικών και ορθοπεδικών εμφυτευμάτων, σε όλους δηλαδή τους τομείς όπου η 3D εκτύπωση μετάλλου γίνεται η προτιμώμενη μέθοδος κατασκευής. Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για βιομηχανικές εφαρμογές.

Το αλουμίνιο (Aluminum) έχει αντοχή στην διάβρωση, χαμηλό ειδικό βάρος σε συνδυασμό με ανθεκτικότητα, πολύ καλή ανακλαστικότητα. Είναι μη μαγνητικό υλικό με πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, αδιαπέραστο από τους μικροοργανισμούς & το φως, είναι ελατό, όλκιμο και 100% ανακυκλώσιμο.

Ο χαλκός (Copper), ο ορείχαλκος (Brass) ο Μπρούντζος (Bronze) και ο σίδηρος (iron) χρησιμοποιούνται κυρίως σε διαδικασίες χύτευσης ή ως νήμα περιεκτικότητας περίπου 80%, ενώ το υπόλοιπο είναι από PLA. Δεν είναι ιδανικά για βιομηχανικές εφαρμογές και χρησιμοποιούνται πιο συχνά στις τέχνες και στη βιοτεχνία.

Ο χρυσός (Gold), ο λευκόχρυσος (platinum), το ασήμι (Silver) χρησιμοποιούνται όσο στη Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion), όσο και σε διαδικασίες χύτευσης. Η πρόκληση είναι τόσο η διατήρηση των αισθητικών ιδιοτήτων των υλικών, όσο και η βελτιστοποίηση της διαχείρισης της πολύτιμης σκόνης. Τα πολύτιμα μέταλλα χρησιμοποιούνται για κοσμήματα, ιατρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές.

### **3. 3-D εκτυπωτές FDM**

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές διαιρούνται συνήθως σε 2 κατηγορίες: τους οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές και τους επαγγελματικούς. Αυτή η διάκριση βέβαια δεν είναι πάντα ξεκάθαρη: μερικές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν οικιακούς εκτυπωτές για τα πρώτα στάδια ενός πρωτοτύπου αλλά ακόμα και το ευρύ κοινό μπορεί να έχει πρόσβαση σε επαγγελματικούς τρισδιάστατους εκτυπωτές μέσω των FabLabs ή σε απευθείας σύνδεση με εταιρείες που προσφέρουν τρισδιάστατες υπηρεσίες εκτύπωσης όπως πχ. η Sculpteo. Εντούτοις, πρέπει να αναφέρουμε ότι η τρισδιάστατη τεχνολογία εκτύπωσης είναι σημαντικά διαφορετική μεταξύ του επαγγελματικού εκτυπωτή και του τρισδιάστατου εκτυπωτή διαθέσιμου για το ευρύ κοινό (οικιακός).

Οι περισσότεροι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούν τη μέθοδο απόθεσης ινών ευρείας χρήσης (FDM) και τα προϊόντα αντιτίθενται στο υλικό ABS ενώ οι πλαστικοί, επαγγελματικοί τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούν συνήθως υλικό PLA και μπορούν να τυπώσουν πολλά υλικά με πολύ υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας. Υπάρχουν πολλά είδη εκτυπωτών είτε για επαγγελματική χρήση είτε για προσωπική που ξεκινούν από το ποσό των 1000 ευρώ (απλός εκτυπωτής οικιακής χρήσης) και φτάνουν σε ποσά πολύ μεγαλύτερα που αφορούν κυρίως επαγγελματική χρήση.

### 3.1 Κατασκευαστική δομή ενός 3d εκτυπωτή τύπου FDM

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές παρουσιάζουν μια κοινή δομή ως προς τα μηχανικά μέρη από τα οποία αποτελούνται καθώς και ως προς τα δομικά τους στοιχεία. Αυτά μπορούν να μπουν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κεφαλή απόθεσης υλικού
- Μηχανισμός εξώθησης υλικού
- Πλάκα εκτύπωσης
- Πλαίσιο στήριξης
- Υλικά κατασκευής
- Σύστημα κίνησης και ελέγχου

#### 3.1.1 Κεφαλή απόθεσης υλικού

Η κεφαλή απόθεσης υλικού είναι από τα πιο σημαντικά μέρη του εκτυπωτή. Αυτή έχει παράλληλα πολλαπλούς ρόλους. Είναι ένα από τα πιο κρίσιμα μέρη του εκτυπωτή, όπου ο μηχανισμός εξώθησης προωθεί το νήμα είτε άμεσα είτε μέσω ενός σωλήνα. Το κρύο νήμα εισέρχεται σε έναν διάτρητο κοχλία ο οποίος εδράζεται στον «μπλοκ θέρμανσης».

Το τελευταίο με τη βοήθεια μιας αντίστασης αναπτύσσει υψηλή θερμοκρασία με σκοπό την τήξη του νήματος. Διαμετρικά τοποθετημένο βρίσκεται το ακροφύσιο. Ο μηχανισμός εξώθησης υλικού ωθεί το κρύο νήμα μέσα στον θάλαμο θέρμανσης, όπου με τη σειρά του ωθεί το ρευστοποιημένο πλέον υλικό να εξέλθει από το ακροφύσιο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, στην κεφαλή εξώθησης υλικού εδράζεται ένας αισθητήρας για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Μια ενδεικτική κεφαλή απόθεσης υλικού αποτελείται από το ακροφύσιο, έναν διάτρητο κοχλία και το «μπλοκ» θέρμανσης, το οποίο αποτελεί και τον συνδετικό κρίκο των προηγούμενων. Η σωστή επιλογή των στοιχείων επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα αλλά και το χρόνο εκτύπωσης. Το ακροφύσιο αποτελεί σημαντικό στοιχείο στη διαδικασία της εκτύπωσης.



*Εικόνα 3.1 Κεφαλή απόθεσης υλικού*

### **3.1.2 Μηχανισμός εξώθησης υλικού**

Ο μηχανισμός εξώθησης υλικού λειτουργεί σαν τροφοδότης για την κεφαλή απόθεσης υλικού. Χρησιμοποιώντας σύστημα με γρανάζια καταφέρνει να εισάγει το κρύο νήμα μέσα στο θάλαμο θέρμανσης. Σημαντικό ρόλο παίζουν η συχνότητα προώθησης του υλικού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία, τα οποία καθορίζουν την ταχύτητα εξόδου του ρευστοποιημένου νήματος. Οι πιο διαδεδομένες διατάξεις για το μηχανισμό προώθησης του νήματος είναι οι εξής: Α) Στην πρώτη ο μηχανισμός εδράζεται στον ίδιο φορέα που βρίσκεται και η κεφαλή απόθεσης του υλικού. Ο φορέας κινεί ταυτόχρονα και την κεφαλή αλλά και το μηχανισμό προώθησης προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι στο φορέα, υπάρχει όχι μόνο καλή τροφοδοσία, αλλά και σημαντικά αυξημένο βάρος. Β) Στην δεύτερη διάταξη ο μηχανισμός βρίσκεται τοποθετημένος μακριά από τον φορέα κίνησης και σταθεροποιημένος σε κάποιο σημείο της βάσης του εκτυπωτή. Έτσι, καταφέρνει να διατηρεί χαμηλό βάρος στον φορέα που βρίσκεται η κεφαλή εκτύπωσης και μέσω ενός τοξοειδούς σωλήνα το νήμα οδηγείται στην κεφαλή απόθεσης υλικού.

### **3.1.3 Η πλάκα εκτύπωσης**

Η πλάκα εκτύπωσης είναι η ωφέλιμη περιοχή στην οποία παίρνουν υλική μορφή τα αντικείμενα που έχουν σχεδιαστεί. Αυτή αποτελεί το οριζόντιο επίπεδο αλλά και το σημείο εκκίνησης μέσω του οποίου γίνεται η εκτύπωση και η εναπόθεση του υλικού. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για το υλικό χρήσης. Τα πιο διαδεδομένα είναι το γυαλί και το μέταλλο. Επίσης, χαρακτηριστική είναι η δυνατότητα ρύθμισης και ευθυγράμμισης του επιπέδου, κάτι το οποίο πραγματοποιείται μέσω των τεσσάρων κοχλιών στις γωνίες της πλάκας. Δεν πρέπει να παραληφθεί η σημασία των θερμαινόμενων πλακών, οι οποίες παρέχουν σημαντική βοήθεια για την αποφυγή του φαινομένου της αποκόλλησης του υλικού από την πλάκα λόγω της απότομης αλλαγής της θερμοκρασίας και της τήξης του νήματος.

### 3.1.4 Πλαίσιο στήριξης

Η καλή λειτουργία και η αποδοτικότητα του εκτυπωτή επηρεάζονται άμεσα από την μηχανική αντοχή και τη στιβαρότητα της βάσης του. Ο σωστός σχεδιασμός και ο έλεγχος της λειτουργίας αποτελούν βασικούς παράγοντες για να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες ή δυσλειτουργίες του εκτυπωτή. Ως πλαίσιο στήριξης του εκτυπωτή ορίζεται το σώμα του εκτυπωτή, με άλλα λόγια το σασί του. Βασικά μέρη του πλαισίου στήριξης αποτελούν: η πλάκα εκτύπωσης και η κεφαλή απόθεσης υλικού. Τα μέλη του συστήματος συμπεριφέρονται ως στερεά σώματα.

Σύμφωνα με αυτό, γίνεται η μαθηματική ανάλυση των δομικών συστημάτων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια στην χρήση συγκεκριμένων υλικών, τα οποία δέχονται πολλές παραμορφώσεις.

### 3.1.5 Υλικά κατασκευής

Ως υλικά κατασκευής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά τα οποία αναφέρονται και αναλύονται σε προηγούμενη ενότητα παραπάνω.

### 3.1.6 Σύστημα κίνησης και ελέγχου

Για την δημιουργία τριών αξόνων X, Y, Z μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία από τις παρακάτω επιλογές ή και ο συνδυασμός τους:

- Στρόγγυλοι άξονες στους οποίους "τρέχουν" γραμμικά ρουλεμάν για να επιτυγχάνεται η ομαλότερη κίνηση.
- Ράουλα ή Ρουλεμάν τύπου U ή τύπου V ή ρουλέμάν με πατούρα ή ρουλεμάν απλά τα οποία θα τρέχουν στην κατάλληλη ράγα για να επιτευχθεί ομαλή κίνηση χωρίς δυσκολία και χωρίς κενά.

Για την κίνηση των κινητών μερών μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία από τις παρακάτω επιλογές ή και ο συνδυασμός τους:

- Ιμάντας οδοντωτός (timing belt) σε συνδυασμό με τροχαλία (pulley) "χρησιμοποιείται συνήθως για την μετάδοση κίνησης στους άξονες X, Y".
- Τραπεζοειδής ατέρμονας (Trapezoidal Leadscrew) με περικόχλιο (Nut) "χρησιμοποιείται συνήθως για την μετάδοση κίνησης στον άξονα Z".
- Κοχλίες με αυλακώσεις (ballscrew) με περικόχλιο (ballnut).

Στους περισσότερους εκτυπωτές τρισδιάστατων αντικειμένων για την "ηλεκτρική" κίνηση των κινητών μερών επιλέγονται βηματικοί κινητήρες (Stepper Motors).

## Ηλεκτρονικά

Για τον έλεγχο των κινήσεων χρησιμοποιείται κεντρική πλακέτα στην οποία συνδέονται:

- Πλακέτες ελέγχου βηματικών κινητήρων (stepper drivers).
- Προαιρετικά αλλά συνήθως επιλέγεται, οθόνη απο την οποία ελέγχεται με επιλογή και με πληθώρα οπτικών πληροφοριών η κατάσταση του εκτυπωτή
- Υποδοχέα κάρτας μνήμης, για την φόρτωση των τρισδιάστατων αντικειμένων, τα οποία επιθυμούμε να εκτυπωθούν (στα τελευταία μοντέλα οθονών υπάρχει ενσωματωμένος ο υποδοχέας καρτών μνήμης).
- Τερματικοί διακόπτες (μηχανικοί, οπτικοί) για να τερματίσουν την κίνηση των κινητών μερών, όταν φθάσουν στο μέγιστο ή ελάχιστο σημείο κίνησης.

## 3.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ 3-D ΕΚΤΥΠΩΤΗ

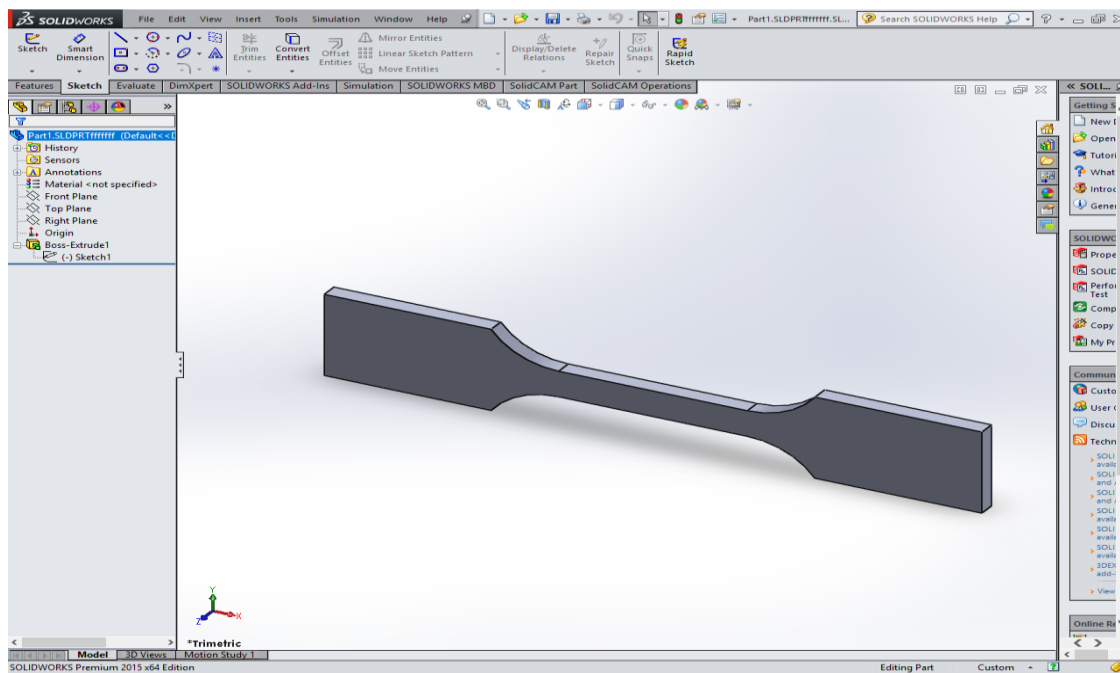
Στα πλαίσια του προγραμματισμού του τρισδιάστατου εκτυπωτή, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά λογισμικά. Τα λογισμικά ήταν το IDEAMAKER, το Repetier Host και το Cura 3.6.0. Τα δυο πρώτα λογισμικά απορρίφθηκαν επειδή δεν εξαγόταν ο gcode (κώδικας για την υλοποίηση της εκτύπωσης). Μετά από διάφορες προσπάθειες και δοκιμές επιλέχθηκε το λογισμικό Cura 3.6.0, γιατί ανταποκρινόταν καλύτερα στις εντολές που δίνουμε και ήταν πιο κατανοητό και εύχρηστο για άτομα που δεν είχαν προηγούμενη επαφή με το αντικείμενο.

Το Cura είναι μια εφαρμογή ανοιχτού κώδικα 3D τεμαχισμού τρισδιάστατων μοντέλων τύπου STL, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε 3d εκτυπωτή. Δημιουργήθηκε από τον David Braam, ο οποίος αργότερα απασχολήθηκε από την εταιρεία παραγωγής 3D εκτυπωτών Ultimaker, για τη συντήρηση του λογισμικού. Το Cura διατίθεται με άδεια LGPLv3. Το Cura κυκλοφόρησε αρχικά με την ανοικτή πηγή Affero General Public License έκδοση 3, αλλά στις 28 Σεπτεμβρίου 2017 η άδεια μετατράπηκε σε LGPLv3. Η αλλαγή αυτή επέτρεψε μεγαλύτερη ενοποίηση με εφαρμογές CAD τρίτων κατασκευαστών. Η ανάπτυξη φιλοξενείται στο GitHub. Το Ultimaker Cura χρησιμοποιείται από πάνω από ένα εκατομμύριο χρήστες παγκοσμίως, επεξεργάζεται 1,4 εκατομμύρια εργασίες εκτύπωσης την εβδομάδα και είναι το προτιμώμενο λογισμικό 3D εκτύπωσης για εκτυπωτές Ultimaker 3D, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με άλλους εκτυπωτές.

Το αρχείο του ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου που πρόκειται να κατασκευαστεί (στην προκειμένη περίπτωση του δοκιμίου εφελκυσμού) έχει δημιουργηθεί στο

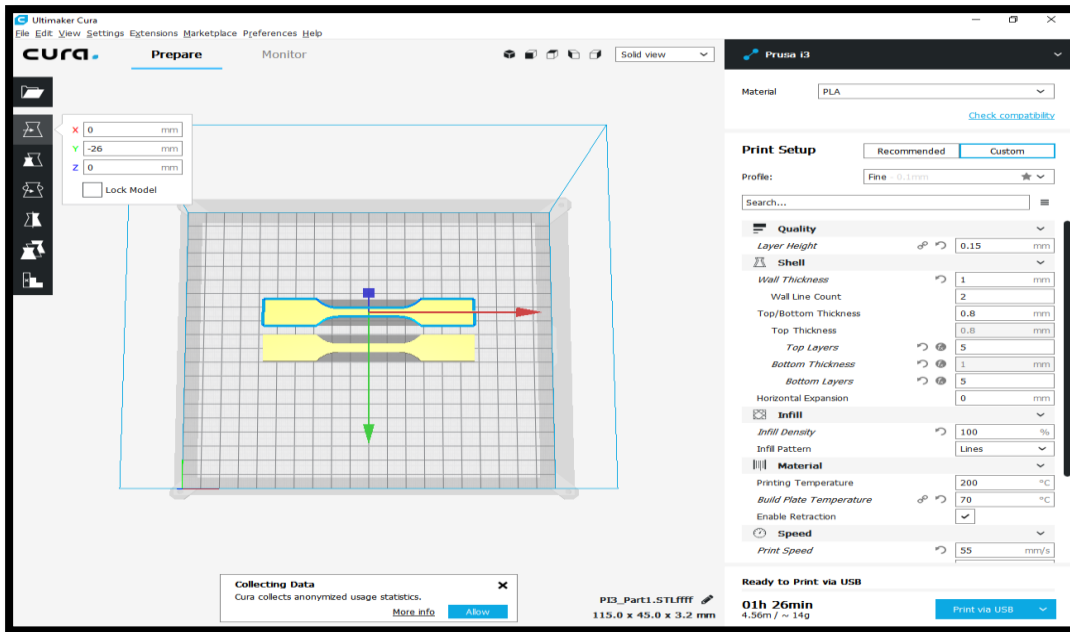


σχεδιαστικό πρόγραμμα solidworks (όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2). Το μοντέλο αποθηκεύεται σε μορφή «.STL», ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί και να εισαχθεί στο πρόγραμμα Cura.

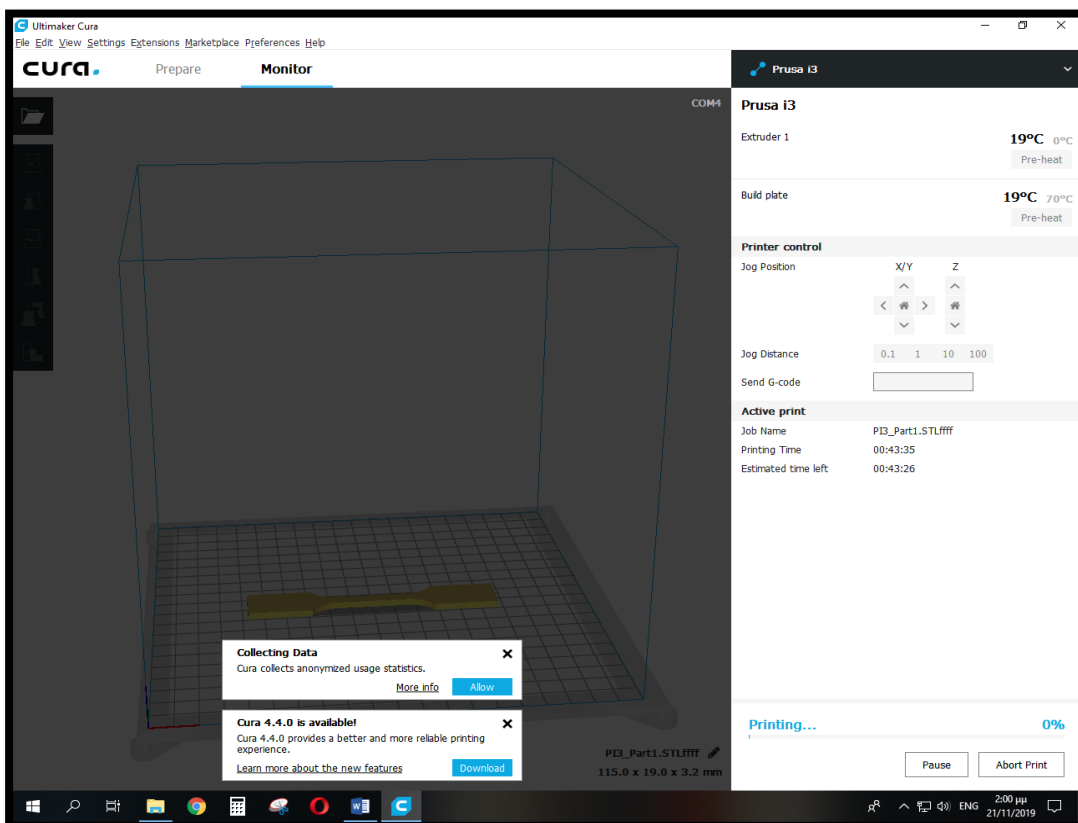


Εικόνα 3.2 Περιβάλλον σχεδίασης δοκιμίων

Για να εισαχθεί το αρχείο στο Cura, μετά την έναρξη του προγράμματος, επιλέγεται από το μενού file το open file, επιλέγεται το αρχείο του ψηφιακού μοντέλου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και στην συνέχεια open. Το αρχείο έχει εισαχθεί στο Cura και στην συνέχεια πρέπει να γίνει η ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων της εκτύπωσης. Αρχικά, επιλέγεται στην παράμετρο material το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στον 3D εκτυπωτή, ρυθμίζεται το πάχος στρώσης (layer height), τα χαρακτηριστικά του κελύφους, η πυκνότητα του γεμίσματος του αντικειμένου (infill density) και ο τρόπος δημιουργίας του γεμίσματος του αντικειμένου (infill pattern). Στην συνέχεια, επιλέγουμε τις θερμοκρασίες εκτύπωσης και πλάκας εκτύπωσης (printing temperature και built plate temperature) και έπειτα τις ταχύτητες εκτύπωσης και γεμίσματος (print speed και infill speed). Οι τιμές των θερμοκρασιών και των ταχυτήτων επιλέγονται με βάση τις ιδιότητες του υλικού και ύστερα από διαφορές διαδικασίες εκτύπωσης. Επιπλέον το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω ρυθμίσεις έτσι ώστε ανάλογα με τις απαιτήσεις του δοκιμίου να ολοκληρώνεται η εκτύπωση του. Τέλος με το πλήκτρο prepare στο κάτω δεξιό μέρος του παραθύρου του προγράμματος γίνεται ο τεμαχισμός (slicing) της γεωμετρίας του δοκιμίου και υπολογίζεται ο χρόνος που χρειάζεται για την εκτύπωση. Για να ξεκινήσει η διαδικασία της εκτύπωσης επιλέγεται το κουμπί Print via USB. (όπως παρουσιάζεται στις Εικόνες 3.3 και 3.4).



Εικόνα 3.3 Περιβάλλον εκτύπωσης δοκιμίων

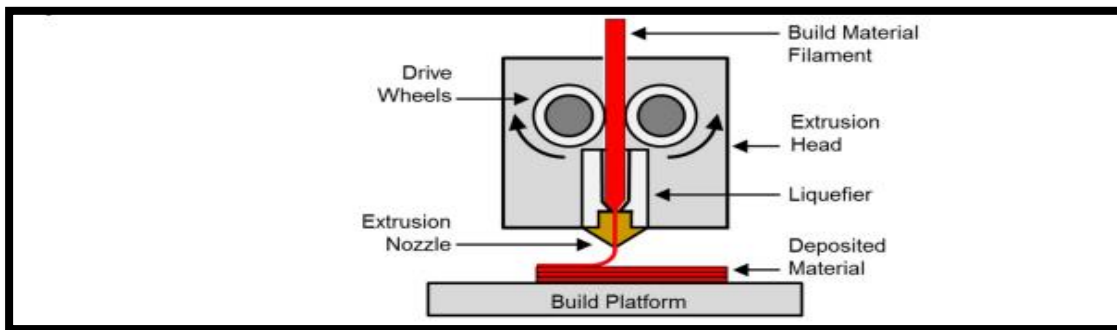


Εικόνα 3.4. Περιβάλλον εκτύπωσης δοκιμίων

## 4.ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

#### 4.1 Κατασκευή δοκιμιών

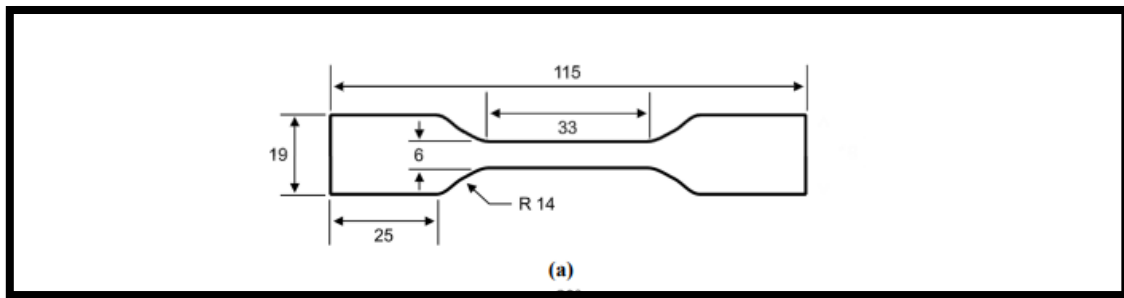
Κατά την πραγματοποίηση της κατασκευής των δοκιμιών η μεθοδολογία που χρησιμοποιήσαμε είναι η FDM η οποία είναι μια τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης η οποία περιγράφεται αναλυτικότερα σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η FDM λειτουργεί λαμβάνοντας ένα κομμάτι που έχει σχεδιαστεί με μοντέλο CAD (CAD) που εξάγεται ως αρχείο στερεογραφικής λιθογραφίας (STL) και φορτώθηκε σε ένα πρόγραμμα τεμαχισμού. Το πρόγραμμα τεμαχισμού κόβει το μοντέλο σε ξεχωριστά στρώματα καθορισμένου ύψους και μετατρέπει το επιθυμητό ύψος και άλλες ρυθμίσεις σε κώδικα G που διαβάζεται από τον εκτυπωτή. Ο εκτυπωτής διαβάζει τον κωδικό G, θερμαίνει έναν υγροποιητή στην επιθυμητή θερμοκρασία για να λιώσει το πολυμερές νήμα της επιλογής και ξεκινά την εξώθηση του υλικού. Τα νημάτια εκτύπωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη αυτή ήταν πλαστικό PLA 1,75 με πυκνότητα σε 21,5 C :1,25gr/cm<sup>3</sup>. [8]



Εικόνα 4.1. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας FDM

Το PLA ή πολυγαλακτικό οξύ παρασκευάζεται από δεξτρόζη (ζάχαρη) που εξάγεται από φυτικής προέλευσης υλικά. Είναι το πιο δημοφιλές βιοπλαστικό ή βιοπολυμερές και το μόνο που παράγεται αυτή τη στιγμή σε παγκόσμιας κλίμακας εργοστάσιο. Ως προς τις θερμικές ιδιότητες, το PLA έχει θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$  που κυμαίνεται μεταξύ 52-65° C, ενώ η θερμοκρασία τήξης  $T_m$  είναι σχετικά χαμηλή και παίρνει τιμές μεταξύ 130-180° C. Ως προς τις μηχανικές ιδιότητες, το PLA παρουσιάζει μέτρο ελαστικότητας 2-3.2 GPa, όριο διαρροής σγ 53-70 MPa και αντοχή στον εφελκυσμό 44-66 MPa

Η γεωμετρία των δοκιμιών που κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν ακολουθούν τις προδιαγραφές που περιγράφονται στο πρότυπο ASTM D-638, που αφορά τον πειραματικό χαρακτηρισμό πολυμερών υλικών σε εφελκυσμό. Ο τύπος δοκιμίου εφελκυσμού που επιλέχθηκε ήταν ο τύπος IV, οι διαστάσεις του οποίου φαίνονται στην Εικόνα 4.2 (ASTM International 2004 · ASTM International 2011).

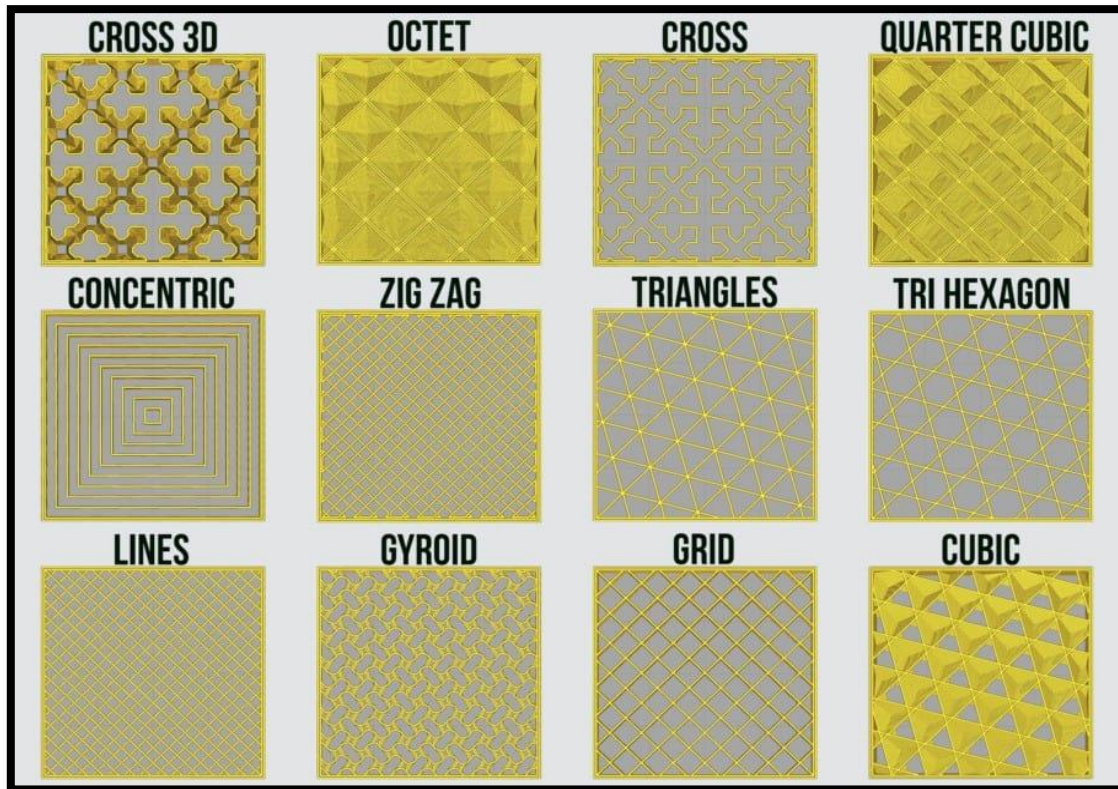


Εικόνα 4.2. Σχηματική αναπαράσταση του δείγματος εφελκυσμού ASTM D638 Τύπου IV

Το μοντέλο των δοκιμών εφελκυσμού δημιουργήθηκαν αρχικά στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks®. Στο συνέχεια εξάγονται σε μορφή στερεογραφικής λιθογραφίας (STL) και τέλος εισάγονται σε κατάλληλο λογισμικό τεμαχισμού (slicing) του 3D printer για να δημιουργηθεί ο κώδικας G (G-code) που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση κάθε δοκιμίου.

Ύστερα από κάποιες δοκιμές εκτύπωσης και χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους, όπως διαφορετικές ταχύτητες γεμίσματος, θερμοκρασίες πλάκας και υλικού καταλήξαμε σε δυο κατηγορίες, σύμφωνα με τις οποίες σχεδιαστήκαν τα δοκίμια που θα χρησιμοποιήσουμε στο πείραμα του εφελκυσμού. Αρχικά θα γίνει έλεγχος ανάμεσα στις δυο κατηγορίες γεμίσματος (cubic και line) και με διαφορετικές θερμοκρασίες υλικού θα επιλεγεί το δοκίμιο με την καλύτερη συμπεριφορά άρα και η αντίστοιχη θερμοκρασία (200-210-220°C). Αυτή η επιλογή θα γίνει με τη διαδικασία τριών παρόμοιων δοκιμών σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (συνολικά 18 δοκιμια-18 πειράματα εφελκυσμού).

Στη συνέχεια αφού επιλεγεί η καταλληλότερη θερμοκρασία θα ελέγξουμε την παράμετρο της ταχύτητας (print speed and infill speed) με τρία πειράματα, τριών διαφορετικών ταχυτήτων. Αφού επιλεγεί η κατάλληλη ταχύτητα στη συνέχεια θα στραφούμε στη παράμετρο του προσανατολισμού σύμφωνα με τις προδιαγραφές που διέπουν την ανάλογη παράμετρο .



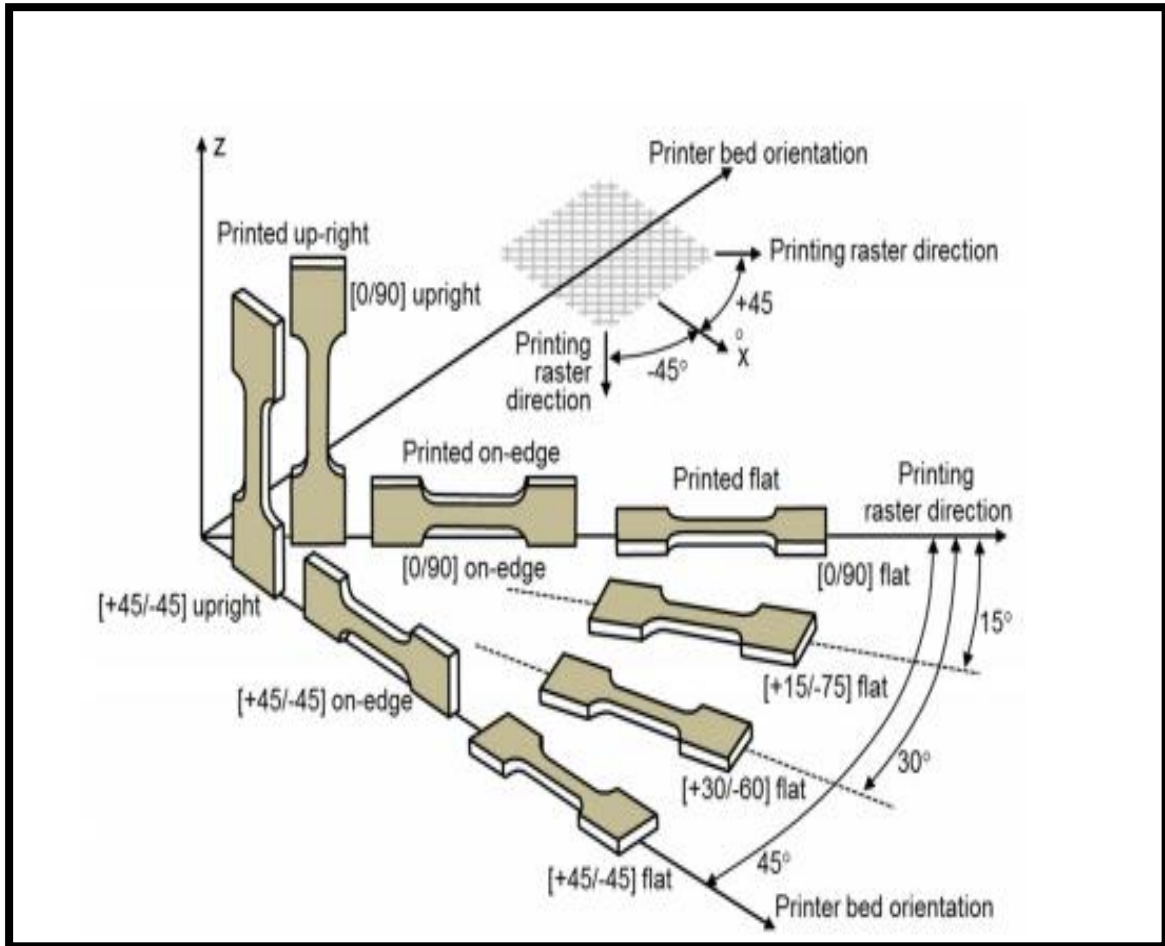
*Εικόνα 4.3. Κατηγορίες γεμίσματος δοκιμίου*

Οι δυο κατηγορίες γεμίσματος (infill patterns-όπως φαίνονται στην Εικόνα 4.3) που επιλέχτηκαν είναι η cubic και η line. Στην cubic το αντικείμενο τυπώνεται με ρομβοειδείς κινήσεις ενώ στην line οι κινήσεις ακροφυσίου τραπεζιού είναι γραμμικές. Όλα τα δοκίμια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και είναι ομαδοποιημένα με βάση την κατηγορία, θερμοκρασία, ταχύτητα και προσανατολισμό.

Κατά τη διαδικασία εκτύπωσης κατασκευάστηκαν 35 πρότυπα δοκίμια ορισμένα εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για ρυθμιστικό σκοπό. Τα κύρια δοκίμια είναι 28 και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.

| CUBIC                                       |        |                    | LINE                |                    |        |
|---|--------|--------------------|---------------------|--------------------|--------|
| 200 °C                                      | 210 °C | 220 °C             | 200 °C              | 210 °C             | 220 °C |
| Δ-21  | Δ-11   | Δ-31               | Δ-14                | Δ24                | Δ-34   |
| Δ-22  | Δ-12   | Δ-32               | Δ-15                | Δ25                | Δ-35   |
| Δ-23  | Δ-13   | Δ-33               | Δ-16                | Δ26                | Δ-36   |
|   |        |                    |                     |                    |        |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ                                    |        |                    |                     |                    |        |
| Δ-40(35-45 mm/sec)                          |        | Δ-41(45-55 mm/sec) |                     | Δ-42(55-65 mm/sec) |        |
|   |        |                    |                     |                    |        |
| ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ(LINE 210 °C , 45-55 mm/sec) |        |                    |                     |                    |        |
|   | Δ-43   |                    | [0/90]κατακόρυφα    |                    |        |
|   | Δ-44   |                    | [-45/+45]κατακόρυφα |                    |        |
|   | Δ-45   |                    | [+45/-45]           |                    |        |
|   | Δ-46   |                    | [+30/-60]           |                    |        |
|   | Δ-47   |                    | [+15/-75]           |                    |        |
|   | Δ-48   |                    | [0/90]οριζόντια     |                    |        |
|   | Δ-49   |                    | [+45/-45]οριζόντια  |                    |        |

**Πίνακας 1.Κατάταξη δοκιμών**



Εικόνα 4.4 Γραφική αναπαράσταση των προσανατολισμών της κλίνης του εκτυπωτή (επίπεδη, άκρη και άνω δεξιά) και προσανατολισμοί ράστερ ([+ 45 / -45] [+ 30 / -60], [+ 15 / 90])

## 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 5.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Η μηχανή γενικών δοκιμών Instron 8802 (που φαίνεται και στην Εικόνα 5.1) είναι ένα σύστημα μηχανικών δοκιμών μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου 250 kN, το οποίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις τόσο στατικών όσο και δυναμικών δοκιμών. Τα συστήματα 8802 περιλαμβάνουν μια ποικιλία διαμορφώσεων, για την παροχή ολοκληρωμένων λύσεων δοκιμών για την ικανοποίηση των αναγκών των εξελιγμένων υλικών και δοκιμών. Ο σχεδιασμός του πλαισίου 8802 το καθιστά ιδανικό για εγκατάσταση μέσα σε εργαστηριακό περιβάλλον, γενικά χωρίς την ανάγκη για παράθυρα ή ανώμαλο ύψος οροφής.[9]

Το 8802 είναι εφοδιασμένο με έναν ψηφιακό ελεγκτή 8800MT που παρέχει πλήρη έλεγχο του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου του ελεγκτή συντονισμού που βασίζεται στη δυσκαμψία, τον έλεγχο πλάτους, την προστασία δείγματος, την ανάλυση 19-bit σε όλο το φάσμα των μετατροπών και την προσαρμοστική τεχνολογία ελέγχου. Επίσης, επιτρέπει την πρόσβαση σε WaveMatrix™ Dynamic Δοκιμές λογισμικού, Bluehill λογισμικό για στατικές δοκιμές, και άλλα λογισμικά.

#### Χαρακτηριστικά

- Διπλό Σερβοϋδραυλικό έμβολο με εφαρμοζόμενη δύναμη έως  $\pm 250$  kN ( $\pm 56$  kip).
- Υψηλή ακαμψία, ευθυγραμμισμένο πλαίσιο ακριβείας και δίδυμες στήλες και έμβολο στην κάτω βάση.
- 150 χιλιοστά (6 ίντσες) διαδρομή εμβόλου.
- Επιλογή υδραυλικής διαμόρφωσης και δυναμικής απόδοσης σύμφωνα με την εφαρμογή.
- Άνω πλαίσιο ρυθμιζόμενο με υδραυλικά έμβολα και κλειδαριές που είναι σταθερά.
- Τεχνολογία Dynacell προηγμένων κυψελών φόρτισης για ταχύτερη διεξαγωγή δοκιμών και μείωση των εσωτερικών σφαλμάτων.
- Υδραυλικό έμβολο με έδρανα υψηλής αντοχής στο πλευρικό φορτίο για εφαρμογές όπως η ολιγοκυκλική κόπωση.
- Συμβατό με μια μεγάλη γκάμα αρπαγών, ιδιοσυσκευών, θαλάμων, οπτικών επιμηκυνσιομέτρων, προστατευτικών και άλλων αξεσουάρ.





*Εικόνα 5.1 . Μηχανή εφελκυσμού (INSTRON 8802)*

## 5.2 Πρότυπο πειράματος

Κατά την πειρατική διαδικασία και σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-638[6] δοκιμάστηκαν 3 δοκίμια για κάθε κατηγορία για τον έλεγχο της παραμέτρου της θερμοκρασίας, της ταχύτητας και τον τρόπο δημιουργίας των δοκιμίων (cubic, line). Πριν από τα τελικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικά πειράματα ελέγχου και ρύθμισης της μηχανής εφελκυσμού INSTRON 8802 για την σωστή και αποτελεσματική υλοποίηση του πειράματος.

Η ταχύτητα της δοκιμής είναι ο σχετικός ρυθμός κίνησης των αρπαγών της μηχανής κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η ταχύτητα δοκιμής επιλέχτηκε από πίνακες σύμφωνα με το πρότυπο ASTM και είναι 5 mm/s (0,2)+-25% (speed of testing).

Όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν με τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία). Πριν τη διαδικασία για όλα τα δοκίμια μετρήθηκαν οι διαστάσεις (πλάτος, ύψος, πάχος) με ακρίβεια 0,025mm με τη βοήθεια κλίμακας Βερνιέρου (παχύμετρο).

Κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στις αρπάγες της μηχανής ευθυγραμμίσαμε τα δοκίμια για να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή δυνάμεων συγκράτησης ώστε να μην δημιουργούνται τάσεις λυγισμού, ολίσθησης ή καταστροφής του δοκιμίου.(Εικόνα 5.2)

Έπειτα κατά την πειραματικής διαδικασίας καταγράψαμε την καμπύλη φορτίου-επιμήκυνσης ώστε να δημιουργηθούν τα κατάλληλα διαγράμματα και να προκύψουν τα ανάλογα αποτελέσματα.

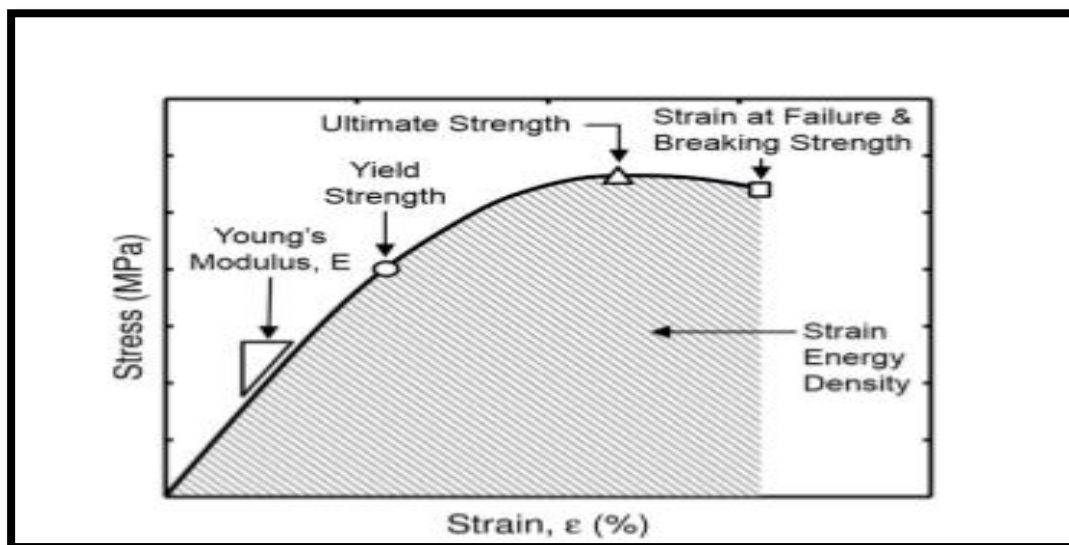


Εικόνα 5.2 Συγκράτηση δοκιμίου πριν την πειραματική διαδικασία

## 5.3 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

Κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και εφόσον εισήχθησαν στο λογισμικό ελέγχου της μηχανής τα απαραίτητα γεωμετρικά στοιχεία εκτιμήθηκαν διάφορες μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως αντοχή σε εφελκυσμό, επιμήκυνση, παραμόρφωση και μέτρο ελαστικότητας. Η αντοχή σε εφελκυσμό προκύπτει από τη διαίρεση του φορτίου (N) με τη διατομή του δοκιμίου ( $\text{mm}^2$ ) και έτσι προκύπτει το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων. Η παραμόρφωση αντίστοιχα είναι το πηλίκο της επιμήκυνσης ( $\Delta l$ ) προς το αρχικό μήκος ( $l$ ). Ως μέτρο ελαστικότητας ορίζεται το πηλίκο ( $\sigma/\epsilon$ ) τάσης με παραμόρφωση και δείχνει την κλίση της ευθείας στο διάγραμμα εφελκυσμού(τάσεων – παραμορφώσεων), μονάδα μέτρησης είναι το Pa (Pascal) και τα πολλαπλάσιά του (MPa,GPa).

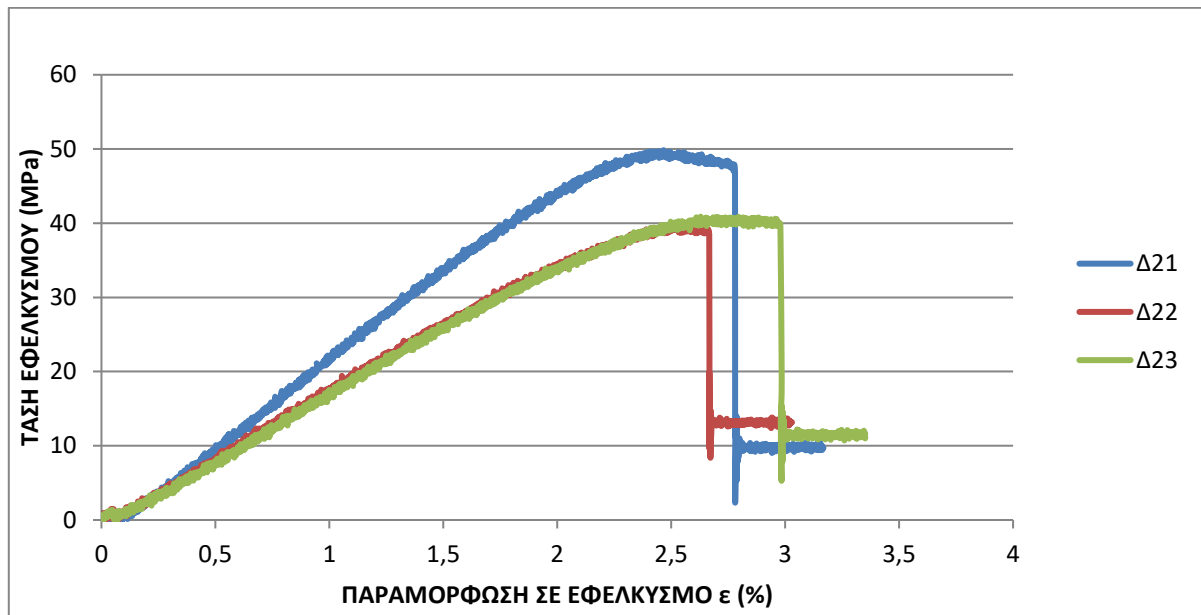
Το διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης που πρόεκυψε για κάθε δοκίμιο μετατράπηκε σε διάγραμμα τάσης –παραμόρφωσης (διάγραμμα εφελκυσμού) και από αυτό έγινε η εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας. Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης και οι βασικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού που προκύπτουν από αυτό.



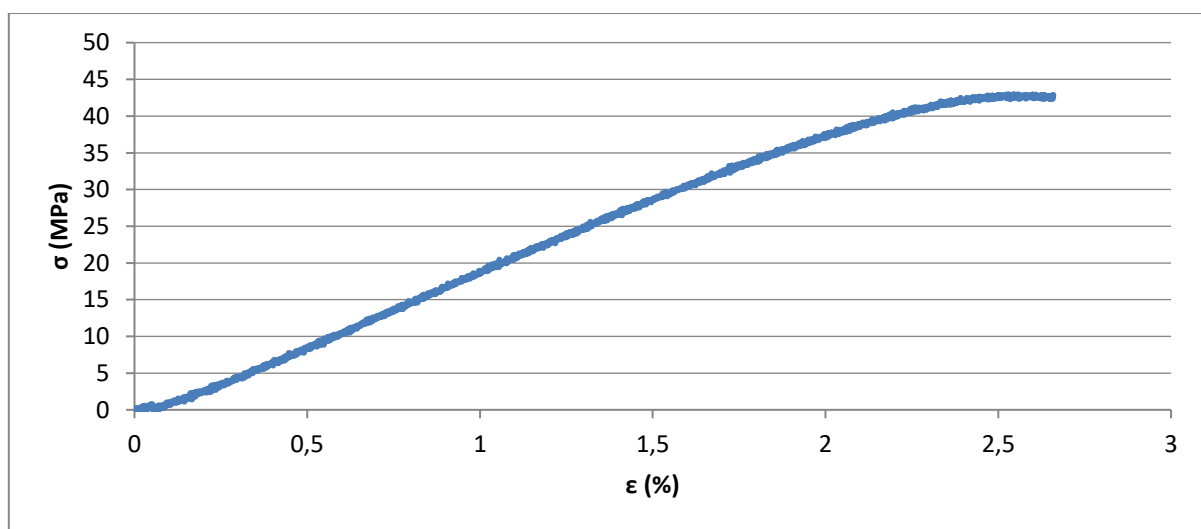
Εικόνα 5.3. Επεξήγηση των σχετικών ιδιοτήτων τάσης εφελκυσμού-καταπόνησης που αξιολογήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης

### 5.3.1 Επίδραση της θερμοκρασία.

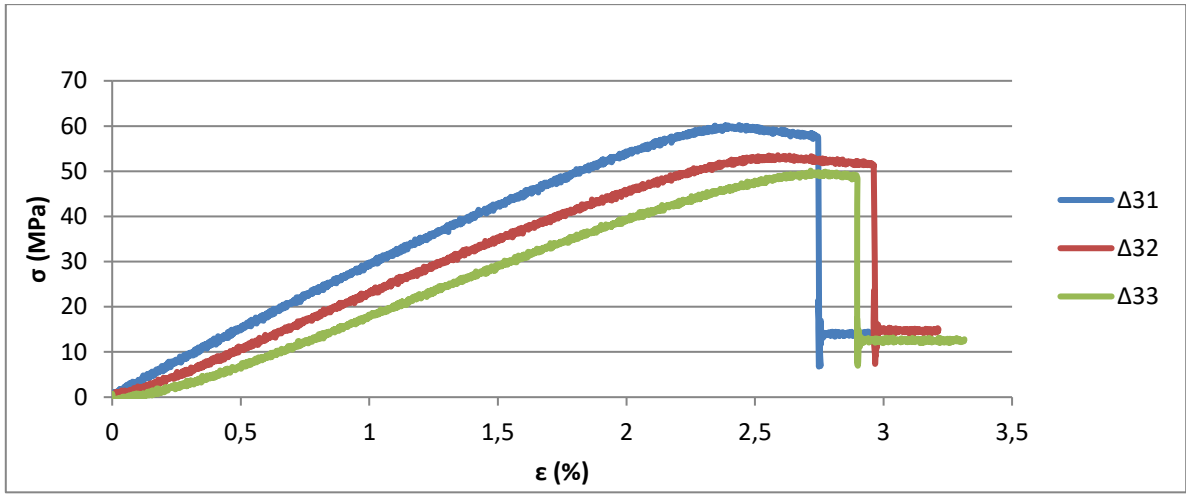
Παρακάτω παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας απόθεσης υλικού(200-210-220 °C) για τις δυο κατηγορίες γεμίματος των δοκιμών μας και η μέση τιμή αυτών ώστε να καταλήξουμε στα συμπεράσματα. Αυτό φαίνεται στις Εικόνες 5.4,5.5,5.6,5.7,5.8,5.9,5.10,5.11,5.12,5.13



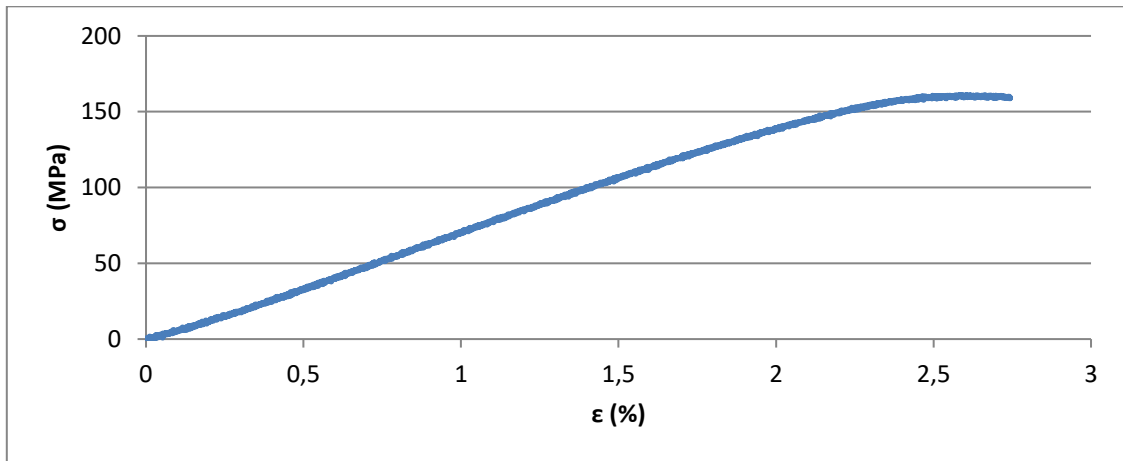
Εικόνα 5.4 Κατηγορία cubic σε θερμοκρασία 200 °C



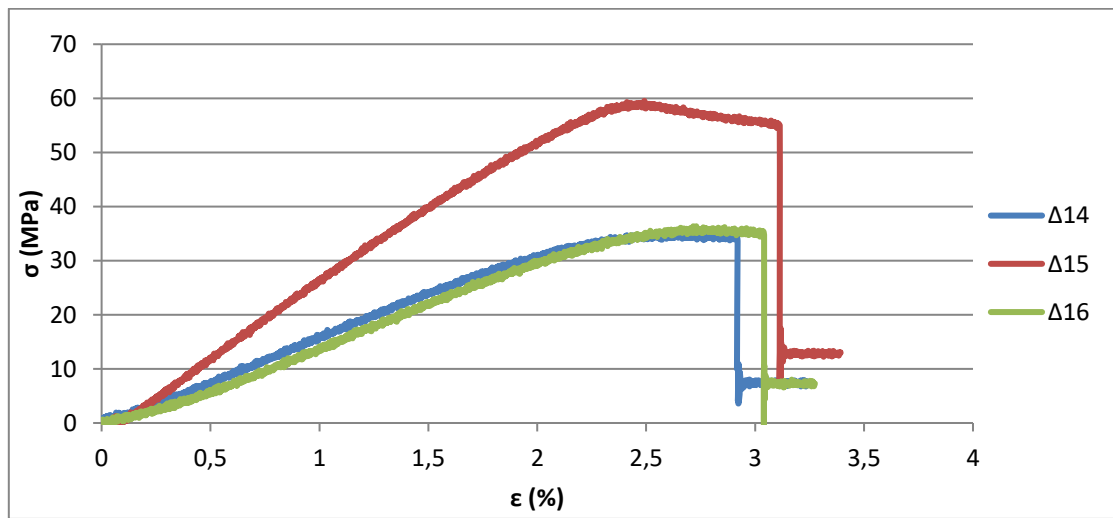
Εικόνα 5.5 Μέση τιμή για την κατηγορία cubic σε θερμοκρασία 200 °C



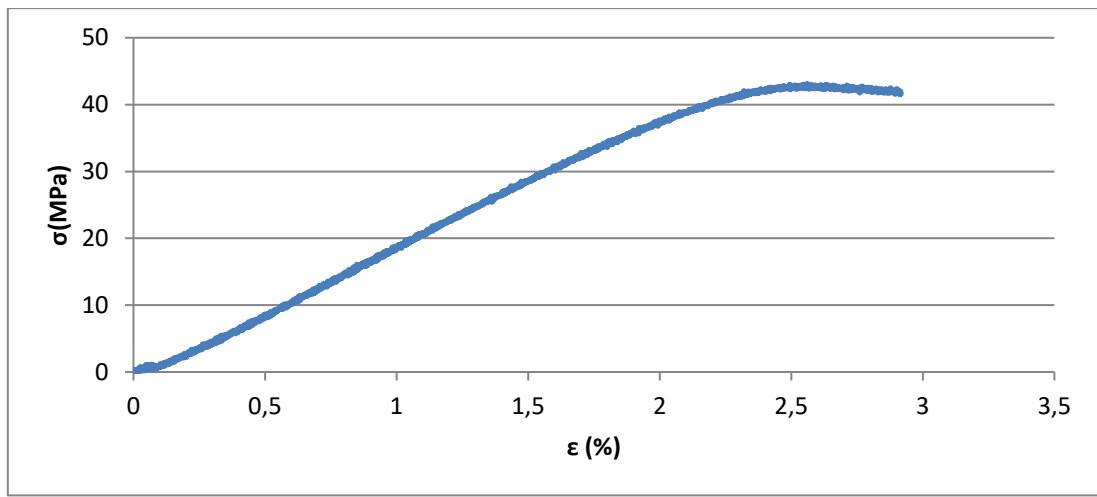
Εικόνα 5.6 Κατηγορία cubic σε θερμοκρασία 220 °C



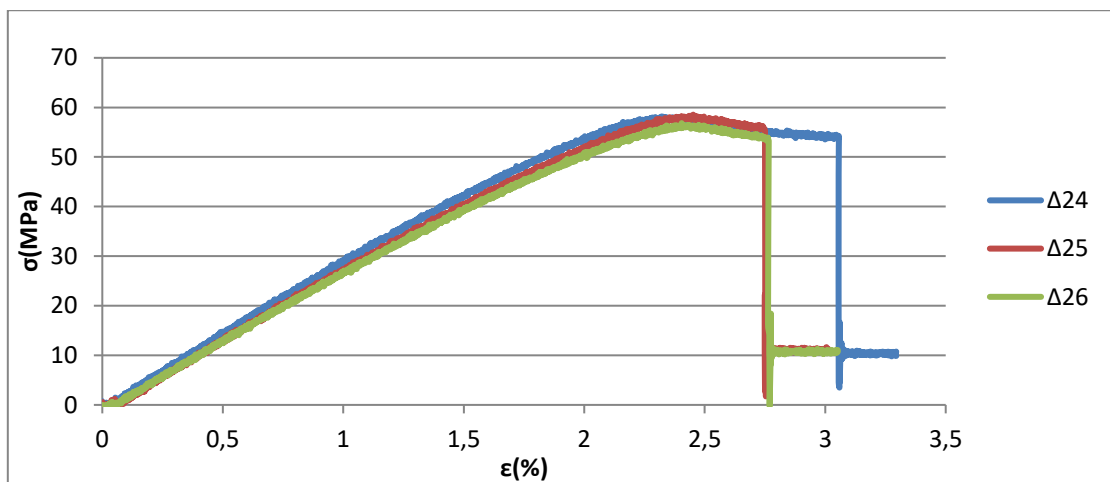
Εικόνα 5.7 Μέση τιμή για την κατηγορία cubic σε θερμοκρασία 220 °C



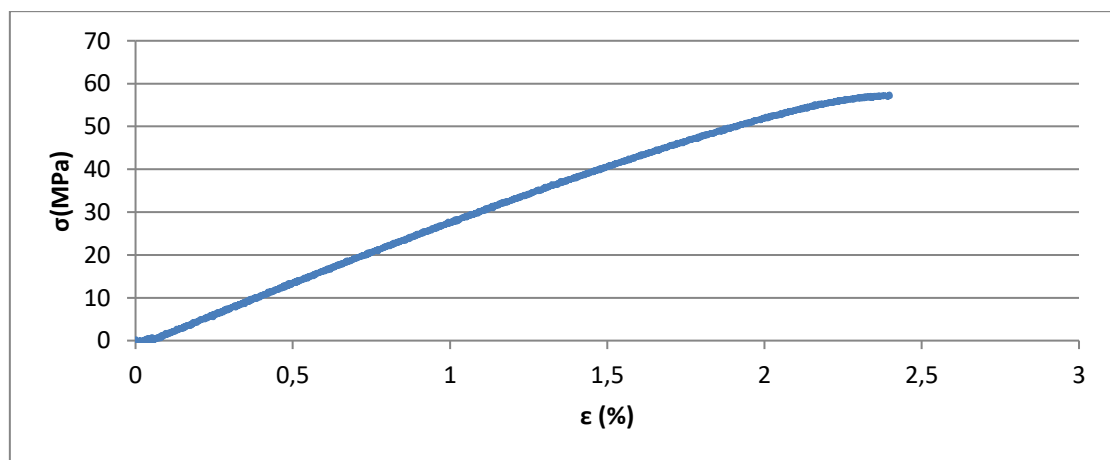
Εικόνα 5.8. Κατηγορία line σε θερμοκρασία 200 °C



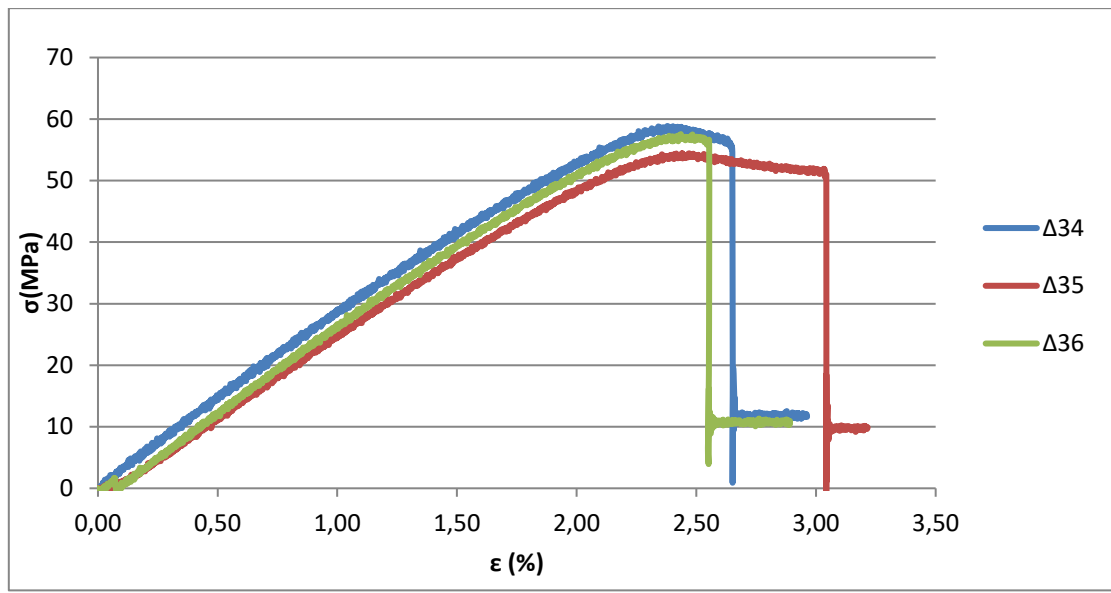
Εικόνα 5.9. Μέση τιμή για την κατηγορία line σε θερμοκρασία 200 °C



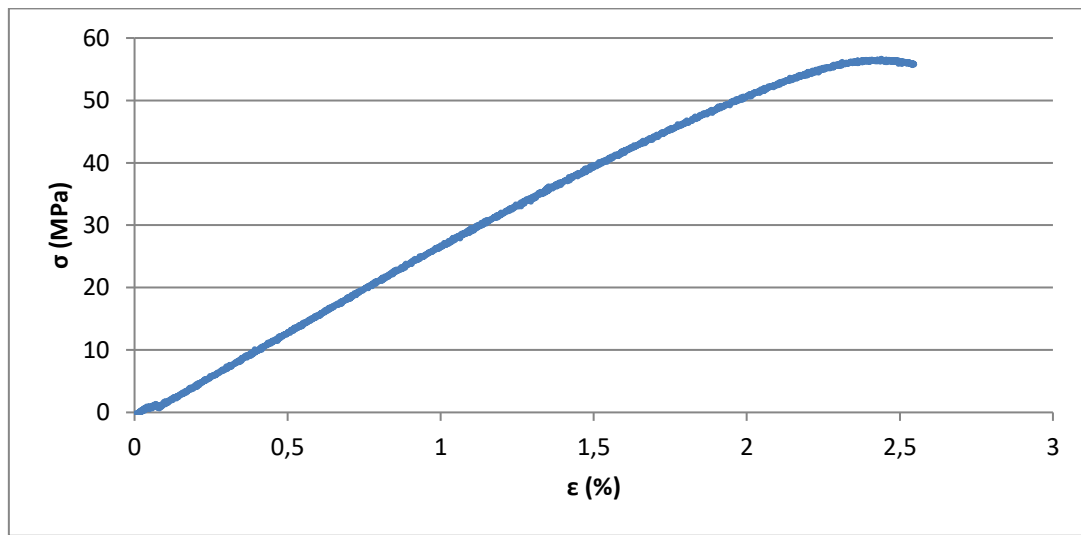
Εικόνα 5.10. Κατηγορία line σε θερμοκρασία 210 °C



Εικόνα 5.11 Μέση τιμή για την κατηγορία line σε θερμοκρασία 210 °C



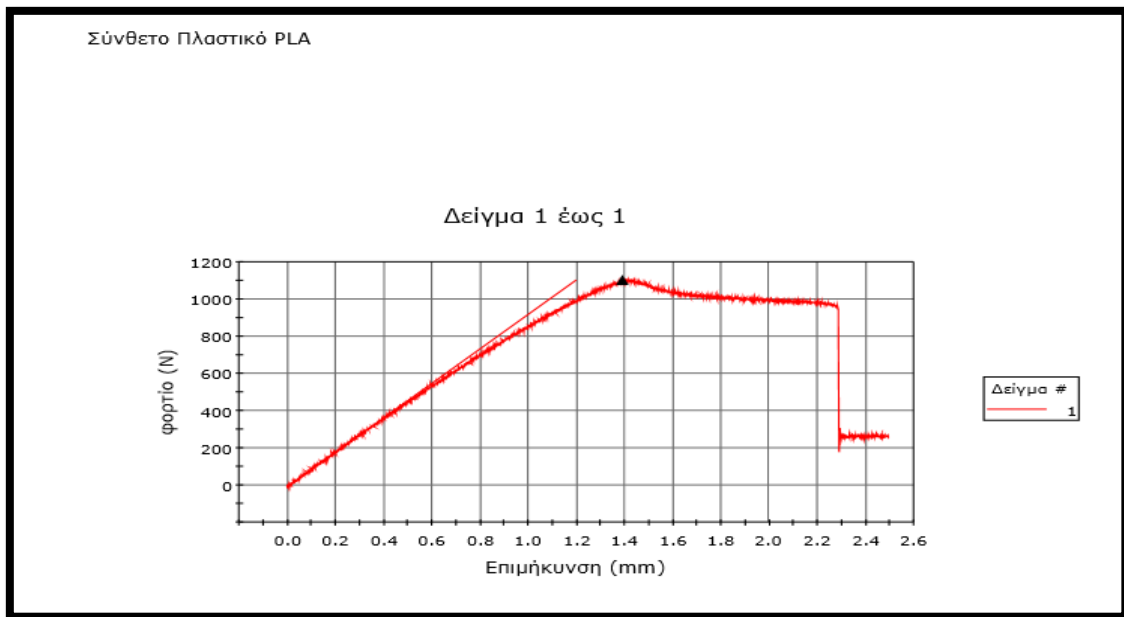
Εικόνα 5.12 Κατηγορία line σε θερμοκρασία 220 °C



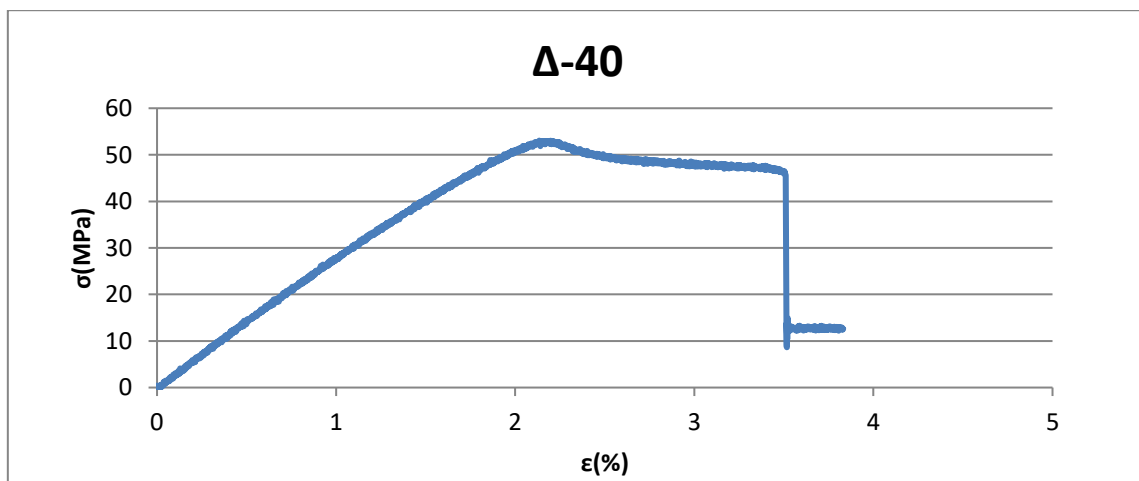
Εικόνα 5.13 Μέση τιμή για την κατηγορία line σε θερμοκρασία 220 °C

### 5.3.2 Επίδραση της ταχύτητας

Στις παρακάτω Εικόνες 5.14,5.15,5.16,5.17 φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας γεμίματος και εκτύπωσης των δοκιμίων μας .Δηλαδή ο ρυθμός γεμίματος αλλά και εκτύπωσης .

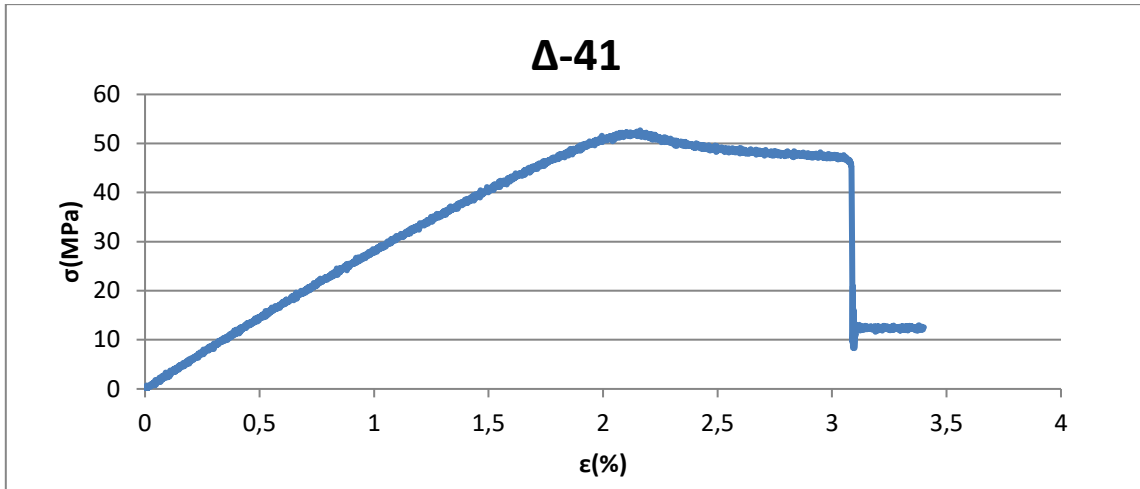


Εικόνα 5.14 Απεικόνιση φορτίου – επιμήκυνσης (Δ-40)

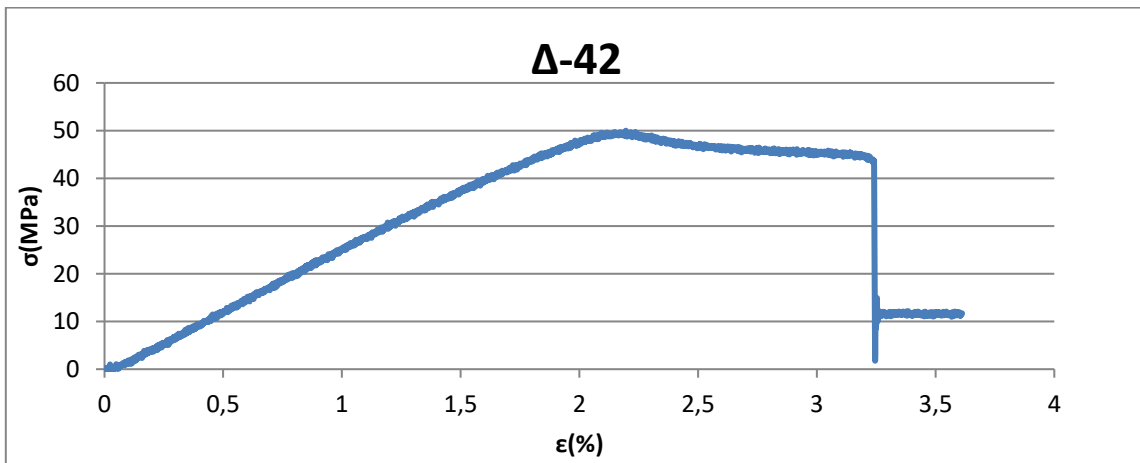


Εικόνα 5.15 Τάσεων – παραμορφώσεων με ταχύτητα 35 – 45mm/s





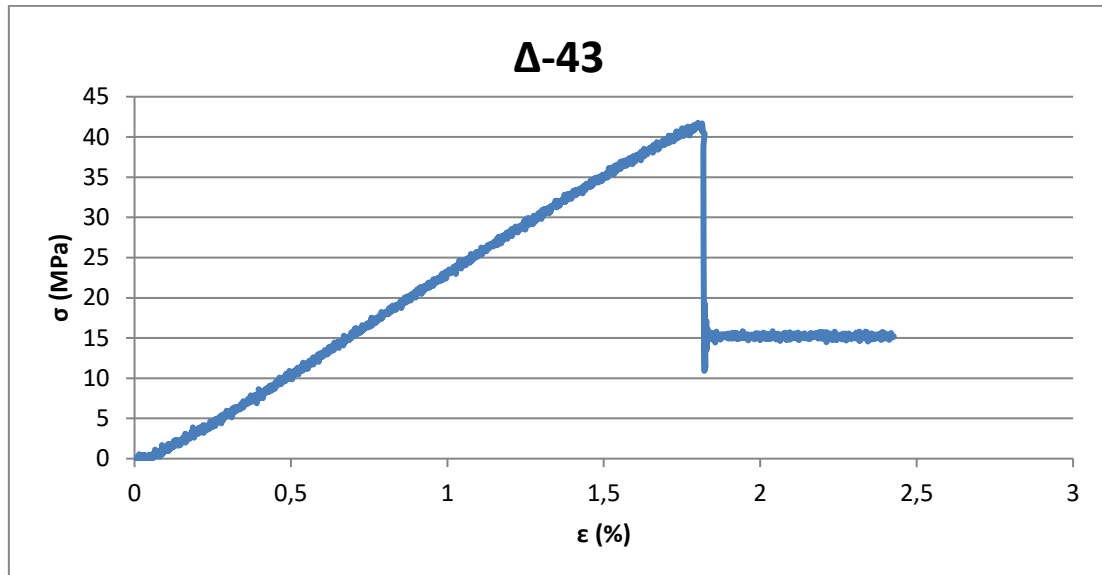
Εικόνα 5.16 Τάσεων – παραμορφώσεων με ταχύτητα 45 – 55mm/s



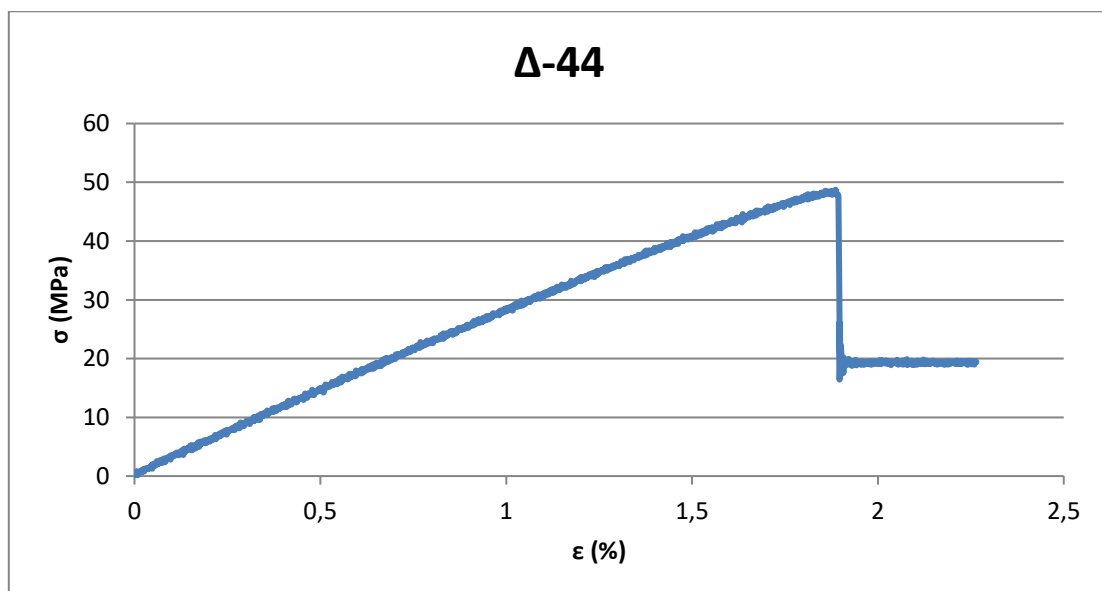
Εικόνα 5.17 Τάσεων – παραμορφώσεων με ταχύτητα 55 – 65mm/s

### 5.3.3 Επίδραση του προσανατολισμού:

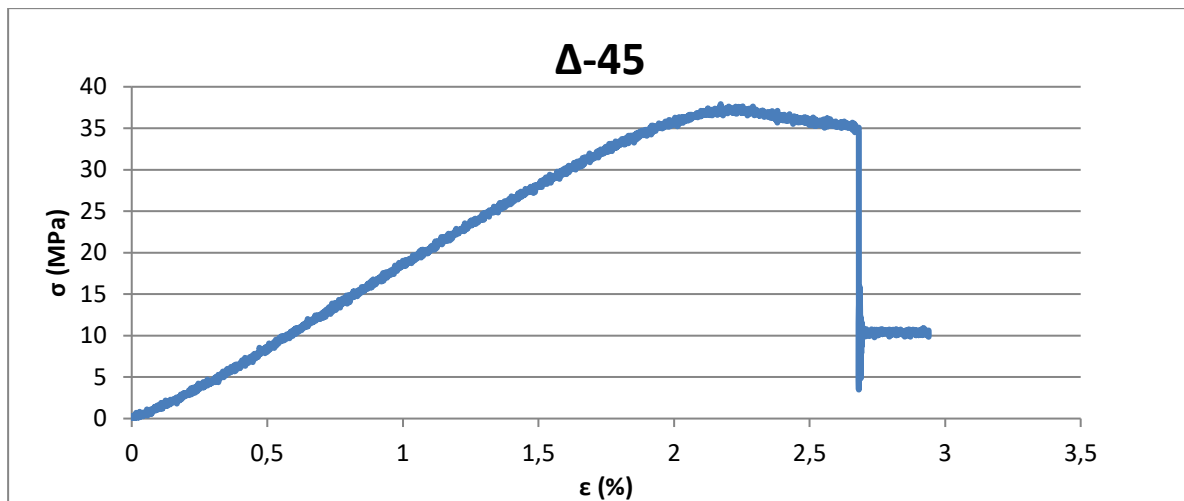
Στις Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η επίδραση του προσανατολισμού των δοκιμίων σχετικά με την πλάκα εκτύπωσης .Ο προσανατολισμός αυτός απεικονίζεται και στην Εικόνα 4.4



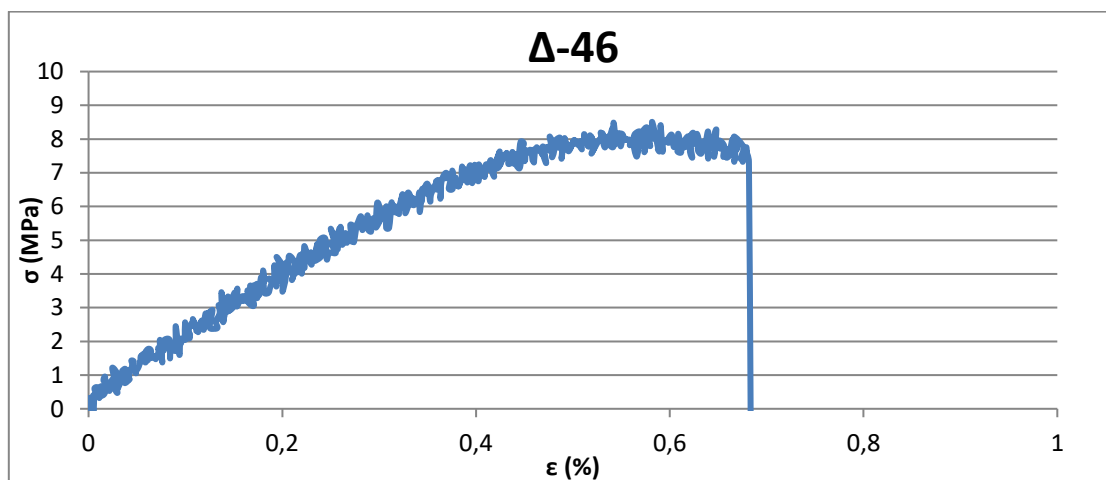
Εικόνα 5.18 Τάσεων – παραμορφώσεων με προσανατολισμό 0/90 κατακόρυφα .



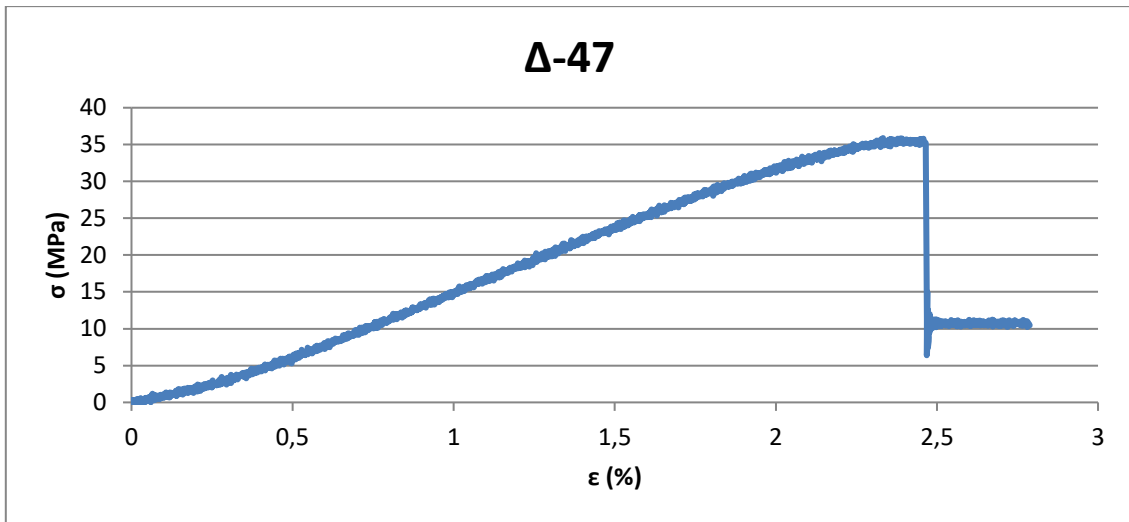
Εικόνα 5.19. Τάσεων – παραμορφώσεων με προσανατολισμό -45/+45 κατακόρυφα .



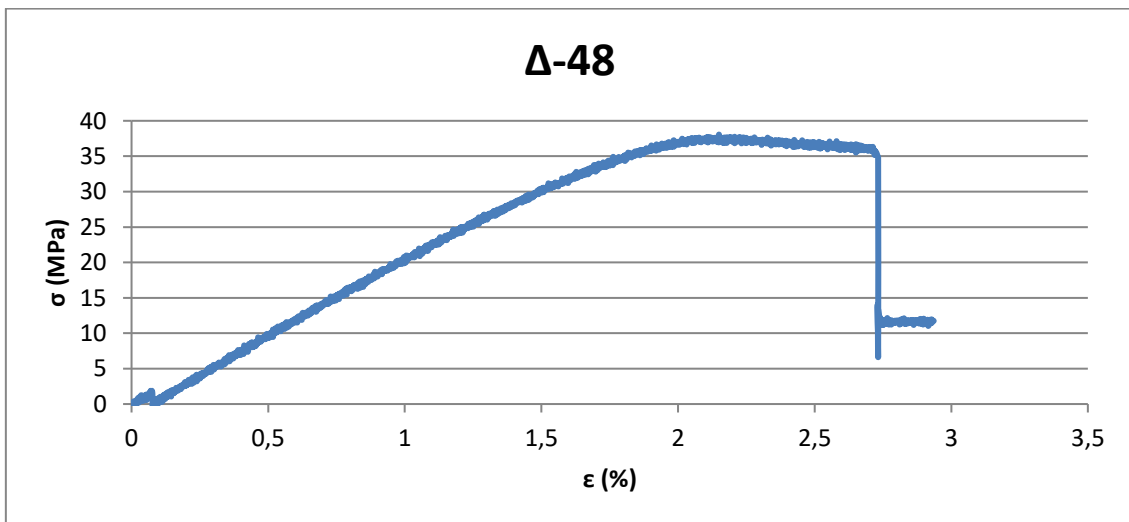
Εικόνα 5.20. Τάσεων – παραμορφώσεων με προσανατολισμό -45/+45



Εικόνα 5.21 Τάσεων – παραμορφώσεων με προσανατολισμό +30/-60



Εικόνα 5.22 Τάσεων – παραμορφώσεων με προσανατολισμό +15/-75.



Εικόνα 5.23 Τάσεων – παραμορφώσεων με προσανατολισμό 0/90 οριζόντια.

## Κεφάλαιο 6

### 6.1 Συμπεράσματα

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε την επίδραση των παραμέτρων εκτύπωσης στο μέτρο ελαστικότητας και στην αντοχή σε εφελκυσμό και η μελέτη αυτού προκύπτει στους παρακάτω πίνακες. Οι πίνακες αυτοί περιέχουν το μετρό ελαστικότητας και την αντοχή σε εφελκυσμό της κάθε κατηγορίας με την μεγαλύτερη ακρίβεια έτσι ώστε να έχουμε βέλτιστα αποτελέσματα. Επίσης δημιουργήσαμε ραβδογράμματα για κάθε παράμετρο σχετικά με τις δυο ιδιότητες τα υλικού και παρουσιάζονται πιο κάτω στις Εικόνες 6.1,6.2,6.3,6.4,6.5,6.6

| ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ |        |                         |          |
|---------------------|--------|-------------------------|----------|
| ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ          | E(MPa) | ΑΚΡΙΒΕΙΑ R <sup>2</sup> | ΕΠΙΛΟΓΗ  |
| CUBIC (200)         | 18,433 | 0,9937                  | LINE 210 |
| CUBIC (220)         | 22,394 | 0,9938                  |          |
| LINE (200)          | 18,395 | 0,9934                  |          |
| LINE (210)          | 25,49  | 0,9937                  |          |
| LINE (220)          | 24,861 | 0,9942                  |          |

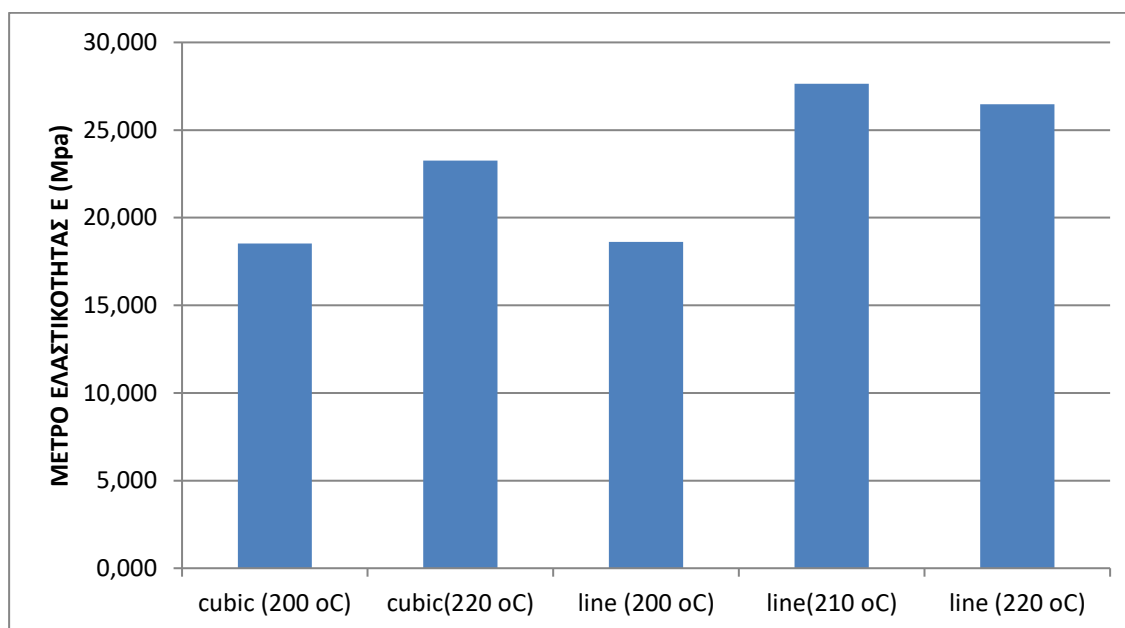
Πίνακας 2.Μέτρο ελαστικότητας για κατηγορίες cubic και line.

| ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ |                     |  |                            |          |
|---------------------|---------------------|--|----------------------------|----------|
| ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ    | ΤΑΣΗ $\sigma$ (MPa) | ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ $\epsilon$ (%) $\approx$ 1(ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ) | E= $\sigma/\epsilon$ (MPa) | ΣΥΓΚΡΙΣΗ |
| Δ-40                | 27,68786            | 1,000609   | 27,67100836                | Δ-41     |
| Δ-41                | 28,26631            | 1,00007  | 28,2643315                 |          |
| Δ-42                | 25,14233            | 1,00061  | 25,12700253                |          |
| Δ-43                | 23,23218            | 1,001729   | 23,19208089                | Δ-44     |
| Δ-44                | 28,09802            | 1,00061  | 28,08089066                |          |
| Δ-45                | 18,69329            | 1,001188   | 18,67110872                |          |
| Δ-46                | 7,975245            | 0,5012344  | 15,91120841                |          |
| Δ-47                | 14,5442             | 1,000154   | 14,54196054                |          |
| Δ-48                | 20,00202            | 1,003873   | 19,92485105                |          |
| Δ-49                | 23,44215            | 1,0007   | 23,42575197                |          |

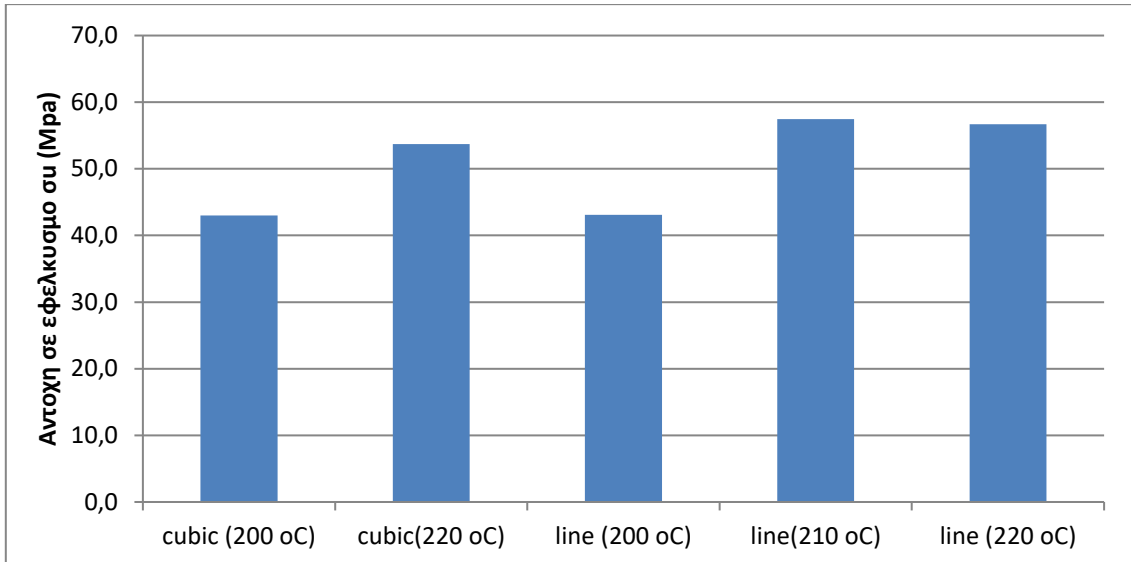
Πίνακας 3.Μέτρο ελαστικότητας για κατηγορίες ταχύτητας και προσανατολισμού.

| Αντοχή σε εφελκυσμό σι | Θερμοκρασία °C      | E (MPa)       |
|------------------------|---------------------|---------------|
| 42,993                 | cubic (200 °C)      | 18,531        |
| 53,698                 | cubic(220 °C)       | 23,250        |
| 43,098                 | line (200 °C)       | 18,614        |
| <b>57,458</b>          | <b>line(210 °C)</b> | <b>27,643</b> |
| 56,680                 | line (220 °C)       | 26,478        |

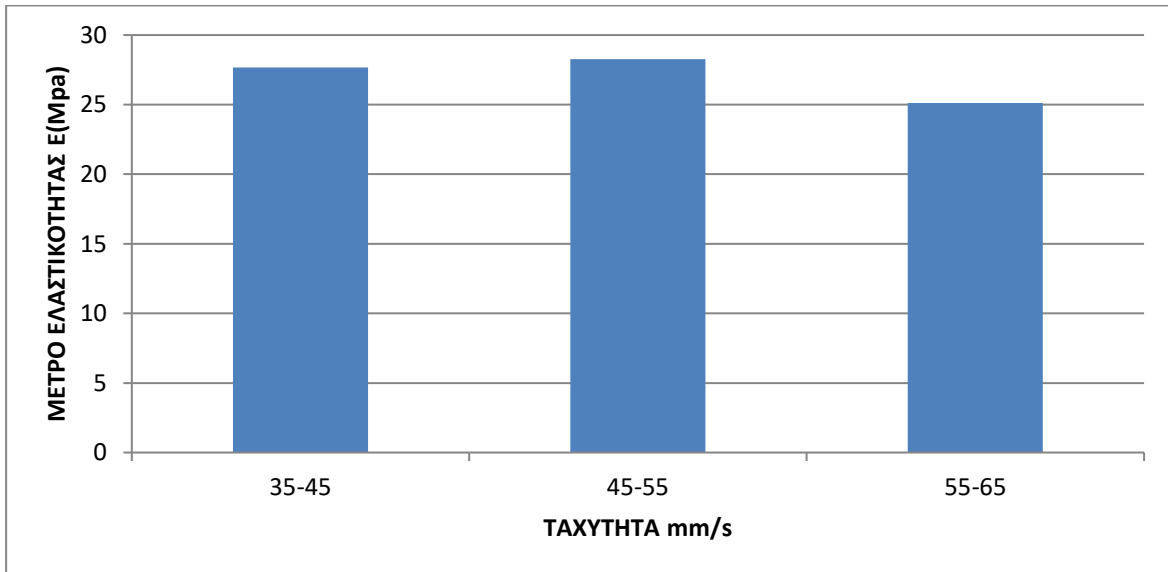
Πίνακας 4.Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή σε εφελκυσμό και στο μέτρο ελαστικότητας



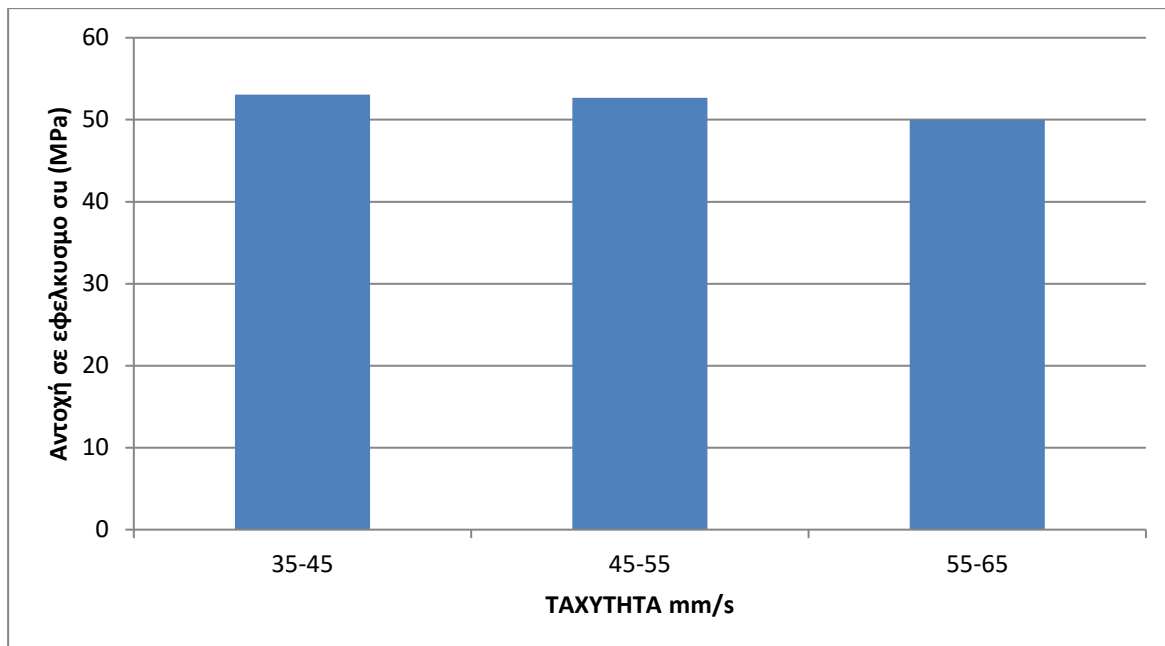
Εικόνα 6.1.Επίδραση θερμοκρασίας με το μέτρο ελαστικότητας



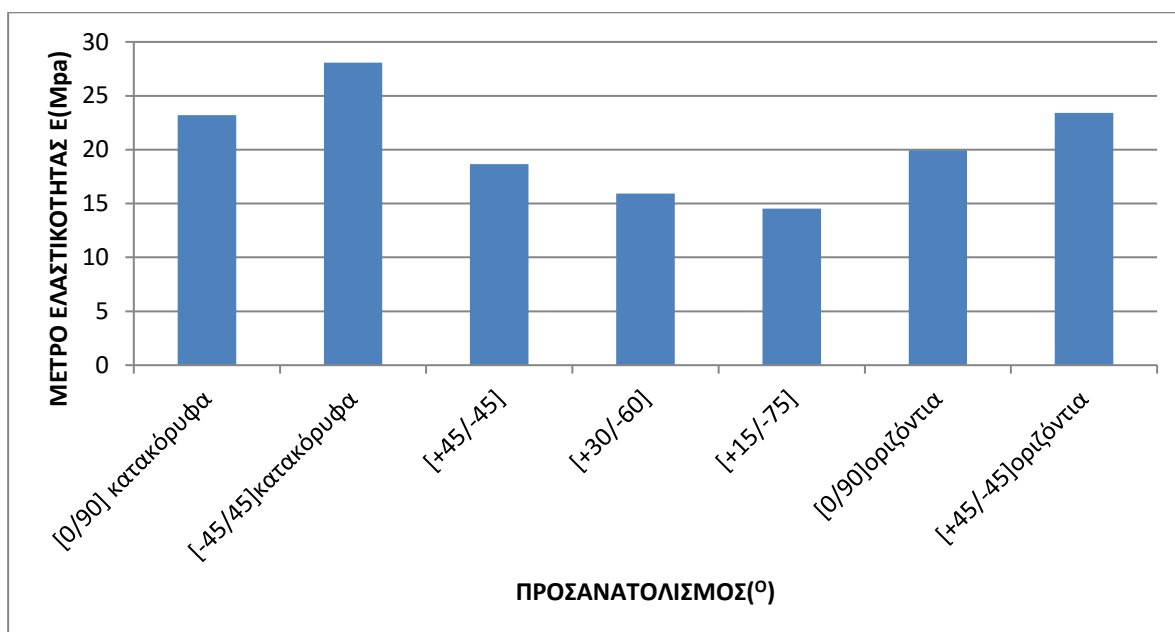
Εικόνα 6.2 Επίδραση θερμοκρασίας με την αντοχή εφελκυσμού



Εικόνα 6.3 Επίδραση ταχύτητας με το μέτρο ελαστικότητας

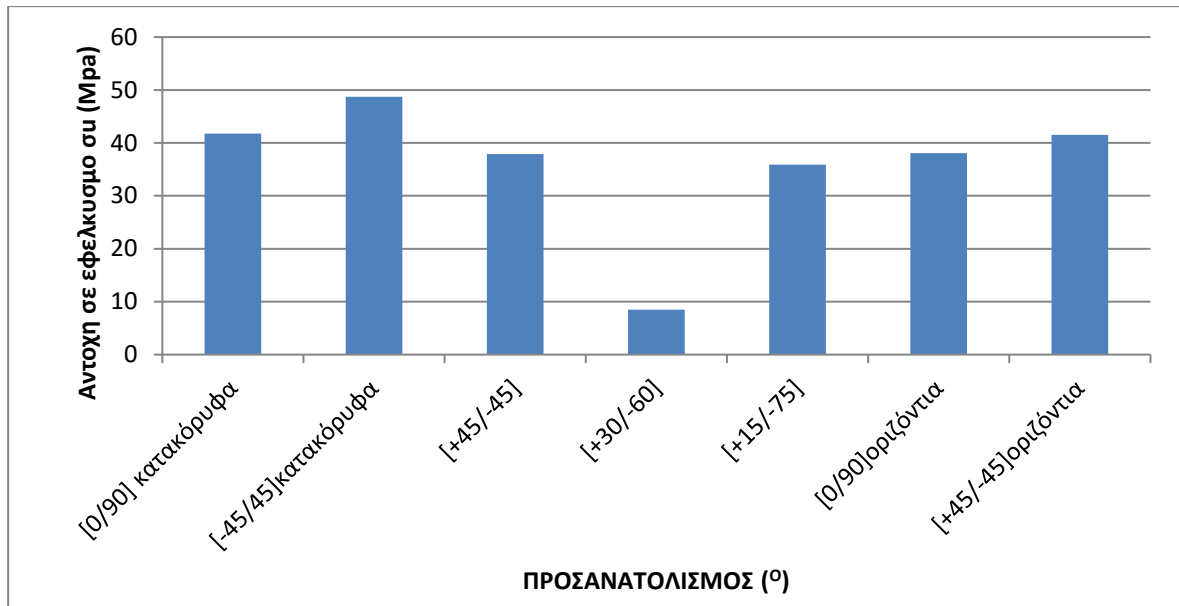


Εικόνα 6.4 Επίδραση ταχύτητας με την αντοχή σε εφελκυσμό



Εικόνα 6.5 Επίδραση του προσανατολισμού με το μέτρο ελαστικότητας





*Εικόνα 6.6 Επίδραση του προσανατολισμού με την αντοχή σε εφελκυσμό*

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που συλλέξαμε από το πείραμα του εφελκυσμού συμπεράναμε ότι το καταλληλότερο δοκίμιο για επεξεργασία και για να συνεχίσουμε τον έλεγχο είναι το δοκίμιο της κατηγορίας LINE 210 °C. Αυτό πρόεκυψε όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.2 δηλαδή έχει την μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό όπου είναι και η κύρια ιδιότητα του υλικού μας αλλά και μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας .

Στη συνέχεια μελετήσαμε την συμπεριφορά στις διαφορετικές ταχύτητες και επιλέχθηκε η ταχύτητα 45 – 55 mm/sec ( infill speed – print speed). Αυτό απεικονίζεται και στην Εικόνα 6.4 που αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία .

Έπειτα μελετώντας τους διαφορετικούς προσανατολισμούς καταλήξαμε ότι ο πιο αποτελεσματικός είναι ο -45/+45 κατακόρυφα Δοκίμιο 44 αφού έχει την μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό (Εικόνα 6.6) αλλά και το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας E (MPa) (όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.5)

## 6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Παρακάτω αναφέρουμε κάποιες προτάσεις για περαιτέρω ερευνά :

- Χρήση άλλων εκτυπωτών
- Χρήση άλλης τεχνολογίας εκτύπωσης
- Χρήση άλλου υλικού
- Άλλες ιδιότητες π.χ. σε διάτμηση/στρέψη

### Βιβλιογραφία

[1] [https://el.wikipedia.org/wiki/Τρισδιάστατη\\_εκτύπωση](https://el.wikipedia.org/wiki/Τρισδιάστατη_εκτύπωση)

[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)

[3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication)

[4] <http://www.stratasys.com/fdm-technology>

[5] <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>

[6] Πρότυπο πειράματος (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Designation: D638 – 14)

[7] Additive Manufacturing (AM) process variations

[8] Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts

[9] Εγχειρίδιο χρήσης μηχανής INSTRON