



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΘΗΝΩΝ**

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Χαρακτηρισμός έξυπνης συμπεριφοράς τετραδιάστατα
εκτυπωμένων δομών από υλικό ABS »

Μαρνέρας Α. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής : Στυλιανός Γεωργατζίνος

Συγκρότημα Ευρίπου, 2024

Χαρακτηρισμός έξυπνης συμπεριφοράς τετραδιάστατα εκτυπωμένων δομών από υλικό ABS

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χαρακτηρισμός έξυπνης συμπεριφοράς τετραδιάστατα εκτυπωμένων δομών από υλικό ABS

Μαρνέρας Α. Κωνσταντίνος

A.M : 1116202000061

Επιβλέπων καθηγητής : Στυλιανός Γεωργατζίνος

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάδειξη της έξυπνης συμπεριφοράς των τετραδιάστατα εκτυπωμένων θερμοπλαστικών δομών και συγκεκριμένα από υλικό ABS (Acrylonitrile butadiene styrene), μέσα από μία μεθοδική πειραματική διεργασία. Ειδικότερα το φαινόμενο που μελετάται είναι η τετραδιάστατη εκτύπωση (4D printing), μια προηγμένη τεχνολογία που συνδυάζει την τρισδιάστατη εκτύπωση με τη δυνατότητα των υλικών να αλλάζουν μορφή και ιδιότητες όταν εκτίθενται σε εξωτερικά ερεθίσματα, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το φως ή άλλες φυσικές συνθήκες. Η συγκεκριμένη έρευνα εστιάζει στην απόκριση αυτών των τρισδιάστατα εκτυπωμένων δομών από ABS σε θερμικά ερεθίσματα και διερευνάται πως διάφορες παράμετροι εκτύπωσης επηρεάζουν τις δυνατότητες αλλαγής του σχήματος τους. Για την απλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας και την καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν το φαινόμενο, έγινε η χρήση της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi, η οποία επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο πολλών παραμέτρων με αποδοτικό τρόπο. Επίσης πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση με την μέθοδο ANOVA (Analysis of Variance) για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης των παραμέτρων που συνέβαλαν στην αλλαγή σχήματος. Τέλος αναπτύχθηκαν εξισώσεις παλινδρόμησης, που επιτρέπουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των θερμοπλαστικών δομών, δίνοντας τη δυνατότητα για βελτιστοποίηση της τετραδιάστατης εκτύπωσης και ανοίγοντας νέες προοπτικές για την εφαρμογή της σε διάφορους τομείς.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

4D εκτύπωση, αλλαγή σχήματος, θερμικό ερέθισμα, παράμετροι εκτύπωσης, μέθοδος Taguchi, ανάλυση ANOVA, εξισώσεις παλινδρόμησης

Abstract

The present thesis focuses on the demonstration of the smart behaviour of four-dimensionally printed thermoplastic structures, specifically from ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) material, through a methodical experimental process. In particular, the phenomenon studied is 4D printing, an advanced technology that combines 3D printing with the ability of materials to change shape and properties when exposed to external stimuli such as temperature, humidity, light or other physical conditions. This research focuses on the response of these 3D printed ABS structures to thermal stimuli and investigates how various printing parameters affect their shape change capabilities. To simplify the experimental procedure and to better understand the parameters affecting the phenomenon, the Taguchi experimental design method was used, which allows simultaneous control of several parameters in an efficient manner. Statistical analysis was also performed using ANOVA (Analysis of Variance) to quantify the effect of the parameters that contributed to the shape change. Finally, regression equations were developed, allowing the prediction of the behavior of thermoplastic structures, enabling the optimization of four-dimensional printing and opening new perspectives for its application in different fields.

KEYWORDS

4D printing, shape change, thermal stimulus, printing parameters, Taguchi method, ANOVA analysis, regression equations

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον καθηγητή μου, κ. Στυλιανό Γεωργατζίνο, καθηγητή του τμήματος Αεροδιαστημικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, για την ευκαιρία και την δυνατότητα που μου παρείχε να διερευνήσω ένα κομμάτι της τετραδιάστατης εκτύπωσης και να πραγματοποιήσω την πτυχιακή μου εργασία πάνω σε αυτό. Επιπλέον θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον κ. Γρηγόριο Κωστόπουλο, υποψήφιου Διδάκτορα , για την απέραντη στήριξη, καθοδήγηση και βοήθεια που παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος , ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στην οικογένεια μου και τους αγαπημένους μου ανθρώπους για την ανεκτίμητη υποστήριξη που παρείχαν σε όλο αυτό το ταξίδι.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	3
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	3
Abstract	4
KEYWORDS	4
Ευχαριστίες.....	5
Κατάλογος Εικόνων	8
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων.....	11
Συνομογραφίες & Ακρωνύμια	12
1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	14
1.2 Πρώιμο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (πριν από το 1980).....	14
1.3 Το φυσικό ξεκίνημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης (1981-1990).....	15
1.4 Το στάδιο ανάπτυξης I (1991-2000).....	17
1.5 Το στάδιο ανάπτυξης II (2001-2010).....	19
1.6 Η εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η κορύφωση της στην σύγχρονη εποχή	22
2. Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης.....	26
2.1 Τομείς τρισδιάστατης εκτύπωσης	26
2.2 Μέθοδοι Εκτύπωσης Τρισδιάστατων Εκτυπωτών	30
2.2.1 Εκτόξευση υλικού (MJ)	31
2.2.2 Εκτόξευση Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting - BJ)	33
2.2.3 Πολυμερισμός Vat (VP)	35
2.2.4 Σύντηξη σε κλίση σκόνης (PBF).....	39
2.2.5. Εναπόθεση Κατευθυνόμενης Ενέργειας (DED)	44
2.2.6 Πλαστικοποίηση Φύλλων (SL).....	46
2.7. Εξώθηση Υλικού (ME)	48
3 Τύποι υλικών εκτύπωσης.....	51
3.1 Πλαστικά υλικά στη διαδικασία 3D εκτύπωσης	51
3.2 Μέταλλα στην εκτύπωση 3D.....	53
3.3 Ρητίνες σε 3D εκτύπωση.....	53
3.4 Σύνθετα υλικά και άλλα υλικά σε 3D εκτύπωση.....	54

4. 4D printing – Προσθετική κατασκευή τρισδιάστατων ευφών δομών.....	55
4.1 Εισαγωγή στην προσθετική κατασκευή τετραδιάστατων δομών.....	55
4.2 4D Εκτύπωση- 4D printing.....	55
4.2.1 Σύγκριση 3d και 4d εκτύπωσης.....	55
4.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την 4D Εκτύπωση.....	56
4.2.3 Νόμοι της 4D εκτύπωσης.....	57
4.2.3 Υλικά που Χρησιμοποιούνται στην 4D Εκτύπωση.....	58
4.2.4 Ιδιότητες 4D Εκτυπωμένων Υλικών.....	61
4.3 Εφαρμογές 4D Εκτύπωσης.....	62
5 Σχεδιασμός Πειραμάτων.....	64
5.1 Εισαγωγή.....	64
5.1.1 Εξοπλισμός.....	64
5.2 Σχεδιασμός Δοκιμίου.....	67
5.3 Πειραματική Διαδικασία.....	67
5.4 Μέθοδος Taguchi.....	68
6.Αποτελέσματα Πειραμάτων.....	70
6.1 Ανάλυση Κύριων Επιδράσεων - Main Effects Analysis.....	70
6.2 Διαγράμματα Κύριων Επιδράσεων.....	71
6.2.1 Ανάλυση διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων.....	74
6.3 Ανάλυση Διακύμανσης – ANOVA.....	77
6.3.1 Επεξήγηση Μεγεθών.....	78
6.4 Ανάλυση Παλινδρόμησης - Regression Analysis.....	87
7. Συμπεράσματα.....	90
Βιβλιογραφία.....	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 : Ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής SLA-1 (πηγή: 3DINSIDER).....	16
Εικόνα 2 : Z Corp Z402 (πηγή : 3dsourced).....	18
Εικόνα 3 : Electron Beam Melting 3D printer από την Arcam (πηγή: 3dsourced)....	19
Εικόνα 4 : Ένας από τους πρώτους εκτυπωτές SLS της DTM . (Πηγή:3dsourced)...	20
Εικόνα 5 : Οι πρώτες μηχανές RepRap (Πηγή:3dsourced).....	21
Εικόνα 6 : BfB RepMan (Πηγή:3dsourced).....	21
Εικόνα 7 : Cupcake CNC (Πηγή:3dsourced).....	21
Εικόνα 8 : Οι εκτυπωτές του Carbon 3D χρησιμοποιούν τεχνολογία CLIP, η οποία είναι παρόμοια με την SLA. (πηγή: 3dsourced).....	24
Εικόνα 9 : Ο Ultimaker 3. (πηγή: 3dsourced).....	25
Εικόνα 10 : Αναπαράσταση 4D εκτυπωμένων υλικών. (Πηγή: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Springer Nature, AIP Publishing).....	61
Εικόνα 11 : Εκτυπωτής Pro2 Series της RAISE 3D (πηγή : printspace3d).....	64
Εικόνα 12 : 3Dedge ABS-9003 Ivory Filament.....	65
Εικόνα 13 : Φούρνος SNOL 6.7/1300 LSM01 (πηγή: Snol).....	65
Εικόνα 14: Αυτοσχέδια κατασκευή για την συγκράτηση των δοκιμίων	66
Εικόνα 15 : Αυτοσχέδια κατασκευή μέσα στον φούρνο και πάνω στις λάμες από μπρούτζο.....	66
Εικόνα 16 : Κύριες επιδράσεις μέσου όρου (R1).....	71
Εικόνα 17 : R1 μέσος όρος των λόγων S/N για κάθε συντελεστή.....	72
Εικόνα 18 : Κύριες επιδράσεις μέσου όρου(R2).....	72
Εικόνα 19 : R2 μέσος όρος των λόγων S/N για κάθε συντελεστή.....	73
Εικόνα 20 : Κύριες επιδράσεις μέσου όρου (R3).....	73
Εικόνα 21 : R3 μέσος όρος των λόγων S/N για κάθε συντελεστή.....	74
Εικόνα 22 : Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές R1.....	88
Εικόνα 23 : Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές R2.....	88
Εικόνα 24 : Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές R3.....	89

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 : Το αρχικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας FDM (πηγή: 3dsourced).....	17
Σχήμα 2 : Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το SLS που έληξε το 2014. (Πηγή:3dsourced).....	23
Σχήμα 3 : Οι αρχικές πατέντες του SLA που έληξαν το 2014. (Πηγή:3dsourced)....	23
Σχήμα 4 Σχήμα 4 : Ιστορικό 3D εκτύπωσης και ανάπτυξη πολυμερών για εκτύπωση 3D (πηγή : www.cell.com).....	25
Σχήμα 5 : Επισκόπηση των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης βάσει πρότυπου ISO/ASTM 52900: 2015 (πηγή: Siencedirect).....	30
Σχήμα 6 : Σχηματικό διάγραμμα εκτόξευσης υλικού (MJ) (πηγή: Siencedirect).....	31
Σχήμα 7 : Τρόποι απόθεσης εκτόξευσης υλικού : α) συνεχές και β) σταγονίδιο ζήτησης πτώσης (πηγή: Siencedirect).....	32
Σχήμα 8 : Σχηματικό διάγραμμα εκτόξευσης συνδετικού υλικού (BJ) (πηγή: Siencedirect).....	33
Σχήμα 9 : Διαδικασία εκτύπωσης 3D Binder Jetting (πηγή: Siencedirect).....	33
Σχήμα 10 : Σχηματικό διάγραμμα φωτοπολυμερισμού ΦΠΑ (VP) (πηγή: Siencedirect).....	35
Σχήμα 11 : Διαγραμματική αναπαράσταση στερεολιθογραφίας (SLA) (πηγή: Siencedirect).....	36
Σχήμα 12 : Σχηματικό διάγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (DLP) (πηγή: Siencedirect).....	38
Σχήμα 13 : Σχηματικό διάγραμμα σύντηξης σε κλίνη σκόνης (PBF) (πηγή: Siencedirect).....	39
Σχήμα 14 : Διαδικασία σύντηξης σκόνης (PBF) (πηγή: Siencedirect).....	39
Σχήμα 15 : Σχηματικό διάγραμμα διεργασιών SLS/SLM (πηγή: Siencedirect).....	41
Σχήμα 16 : Σχηματικό διάγραμμα και διαδικασία του συστήματος EBM (πηγή: Siencedirect).....	43
Σχήμα 17 : Σχηματικό Άμεσης εναπόθεσης ενέργειας (DED) (πηγή: Siencedirect).....	44
Σχήμα 18 : Σχηματικό διάγραμμα α) συστήματος τροφοδοσίας σκόνης λέιζερ και β) συστήματος τροφοδοσίας σύρματος δέσμης ηλεκτρονίων. (πηγή: Siencedirect).....	45
Σχήμα 19 : Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος (LOM) (πηγή: Siencedirect).....	46
Σχήμα 20 : Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος UAM(πηγή: Siencedirect).....	47

Σχήμα 21 : Σχηματικό διάγραμμα εξώθησης υλικού (ME) (πηγή: Siencedirect).....	49
Σχήμα 22 : Σχηματική επισκόπηση καθενός από τα τρία συστήματα εξώθησης υλικών: α) με βάση το νήμα, β) με κοχλία και γ) με βάση το έμβολο (πηγή: Siencedirect).....	50
Σχήμα 23 : Διαγραμματική αναπαράσταση των παραγόντων που ευθύνονται για την 4D εκτύπωση. (πηγή: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim).....	57
Σχήμα 25: Σχηματική περιγραφή των παραμέτρων παραμορφωμένου σχήματος (Πηγή : MDPI).....	68

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Διαφορετικές μεταβλητές ελέγχου και τα επίπεδά τους (Levels, ($6^1 \times 3^4$)).....	68
Πίνακας 2 : Taguchi L18 ($6^1 \times 3^4$) ορθογώνιος πίνακας.....	69
Πίνακας 3 : Response Table for Means (R1).....	76
Πίνακας 4 : Response Table for SNR (R1).....	76
Πίνακας 5 : Response Table for Means (R2).....	76
Πίνακας 6 : Response Table for SNR (R2).....	77
Πίνακας 7 : Response Table for Means (R3).....	77
Πίνακας 8 : Response Table for SNR (R3).....	77
Πίνακας 9 : Analysis of Variance for Means (R1).....	81
Πίνακας 10 : Analysis of Variance for SN ratios (R1).....	82
Πίνακας 11 : Analysis of Variance for Means (R2).....	83
Πίνακας 12: Analysis of Variance for SN ratios (R2).....	84
Πίνακας 13: Analysis of Variance for Means (R3).....	85
Πίνακας 14 : Analysis of Variance for SN ratios (R3).....	86

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

4D	4 Dimension
3D	3 Dimension
STL	Standard Template Library
CNC	Computer Numerical Control
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
CAD	Computer-Aided Design
AM	Additive Manufacturing
VP	Vat Photopolymerization
MJ	Material Jetting
PBF	Powder Bed Fusion
ME	Material Extrusion
DED	Directed Energy Deposition
SL	Sheet Lamination
CLIP	Continuous Liquid Interface Production
EBM	Electron Beam Melting
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
SLM	Selective Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
PLA	Polylactic Acid
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
TPU	Thermoplastic Polyurethane
ASA	Acrylonitrile Butadiene Glycol
DIY	Do It Yourself

BIM Building Information Modeling

MIT Massachusetts Institute of Technology

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing), γνωστή και ως προσθετική κατασκευή , είναι μία διαδικασία κατασκευής πρότυπων τρισδιάστατων αντικειμένων από ψηφιακά μοντέλα σχεδίου. Η δημιουργία του τρισδιάστατου αντικειμένου επιτυγχάνεται με την προσθήκη διαδοχικών στρώσεων υλικού, μέχρι την επίτευξη της τελικής μορφής.

Παραδοσιακά, οι βιομηχανίες χρησιμοποιούσαν την αφαιρετική μέθοδο κατασκευής για την δημιουργία προϊόντων, σύμφωνα με την οποία τα σχέδια σκαλίζονταν από ένα συμπαγές μπλοκ υλικού [1], την διαμόρφωση κατά την οποία ένα μπλοκ υλικού υφίσταται αλλαγές στις διαστάσεις του όταν εφαρμόζεται δύναμη ή την χύτευση όπου το υλικό από στερεή μορφή λιώνει σε υγρή μορφή και το υγρό μέταλλο στη συνέχεια χύνεται σε ένα συγκεκριμένο καλούπι για να αποκτήσουμε το αντικείμενο. Η ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων ήταν μία από τις πρώτες χρήσεις της προσθετικής κατασκευής. Επέτρεψε στους κατασκευαστές να δημιουργούν πρωτότυπα πολύ πιο γρήγορα, διευκολύνοντας την αξιολόγηση και τη δοκιμή των σχεδίων πριν από την παραγωγή ενός τελικού προϊόντος.[2]

Η τρισδιάστατη εκτύπωση παρουσιάζει σημαντικές βιώσιμες πτυχές, όπως η μειωμένη σπατάλη υλικών, η ελάχιστη μεταγενέστερη επεξεργασία και το χαμηλό κόστος κατασκευής, ακόμη και για σύνθετα εξαρτήματα. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την τεχνολογία αυτή μια προοπτική για το μέλλον. Άλλες βιώσιμες ιδιότητες περιλαμβάνουν τη δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης πλαστικών υλικών, καθώς και τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Επιπλέον, η 3D εκτύπωση μπορεί να παράγει σχέδια με σύνθετες και βελτιστοποιημένες γεωμετρίες, οι οποίες συμβάλλουν στη δημιουργία εξαρτημάτων με μικρό βάρος και βελτιωμένες αναλογίες αντοχής προς βάρος. Συνολικά, η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης προωθεί τη δημιουργία βιώσιμων σχεδίων.[2]

1.2 Πρώιμο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης (πριν από το 1980)

Η ιδέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να εντοπιστεί πίσω στο 1860, όταν ο Παριζιάνος φωτογράφος Francis Willene εφηύρε τη "μηχανική γλυπτική". Αυτή η καινοτομία επέτρεπε τη δημιουργία τρισδιάστατων πορτρέτων χρησιμοποιώντας φωτογραφική μηχανή, φωτογραφία και παντογράφο, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ακρίβεια και μειώνοντας τον χρόνο κατασκευής σε μόλις 48 ώρες, συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους που απαιτούσαν μήνες. Το 1892, ο Blancher πρότεινε τη δημιουργία τοπογραφικού χάρτη μέσω της μεθόδου διαστρωμάτωσης, θέτοντας την εννοιολογική βάση για τη σύγχρονη προσθετική κατασκευή. Μετά από αυτές τις ιδέες, δεν υπήρξε σημαντική πρόοδος μέχρι τη δεκαετία του 1940, όταν ο Pereyra

χρησιμοποίησε μια παρόμοια τεχνική για τη δημιουργία τρισδιάστατων χαρτών κόβοντας και κολλώντας γραμμές περιγράμματος σε φύλλα από χαρτόνι.

Αργότερα, ο Zang (1964) και ο Gaskin (1973) ανέπτυξαν περαιτέρω την ιδέα, προτείνοντας τη χρήση διαφανών πλακών με τοπολογικές εξηγήσεις και τρισδιάστατων γεωλογικών διδακτικών συσκευών για το σχεδιασμό χαρτών. Στη δεκαετία του 1960, στο Ινστιτούτο Battelle Memorial στο Οχάιο, έγινε η πρώτη έρευνα στη χρήση φωτοπολυμερών για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Στόχος του πειράματος ήταν ο πολυμερισμός ρητίνης μέσω της διασταύρωσης δύο ακτινών λέιζερ διαφορετικών μηκών κύματος. Ο Wyn Swainson υπέβαλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1971 για μια παρόμοια μέθοδο με διπλές δέσμες λέιζερ, την οποία ονόμασε "φωτοχημική κατεργασία". Στη συνέχεια, ίδρυσε την εταιρεία Formigraphic Engine Company στην Καλιφόρνια, αλλά αυτή η τεχνολογία δεν κατέληξε ποτέ σε εμπορικά διαθέσιμο προϊόν.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, η Dynell Electronics Corporation ανέπτυξε τη "στερεά φωτογραφία", μια τεχνολογία που χρησιμοποιούσε λέιζερ ή μηχανή φρεζαρίσματος για να κόβει διατομές βασισμένες σε μοντέλα υπολογιστή και στη συνέχεια να τις στοιβάζει για να δημιουργήσει αντικείμενα. Το 1972, ο Matsubara από τη Mitsubishi Motors πρότεινε μια τοπολογική μέθοδο για τη δημιουργία στρωματοποιημένων υλικών με χρήση φωτοπολυμερούς ρητίνης, επικαλυμμένης πάνω σε πυρίμαχα σωματίδια. Το 1974, ο DiMatteo διαπίστωσε ότι αυτή η τεχνική θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε άλλα υλικά που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν με άλλες μεθόδους, όπως οι έλικες, οι αεροτομές, τα τρισδιάστατα έγκεντρα και οι μήτρες.[1][3]

1.3 Το φυσικό ξεκίνημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης (1981-1990)

Η δεκαετία αυτή σηματοδότησε την επίσημη εισαγωγή δύο από τους πιο γνωστούς και χρησιμοποιούμενους τύπους τρισδιάστατων εκτυπωτών, του επιλεκτικού πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS) και της μοντελοποίησης με εναπόθεση λιωμένου υλικού (FDM). Η πρώτη προσέγγιση της τρισδιάστατης εκτύπωσης έγινε τον Μάιο του 1981 από τον Δρ. Hideo Kodama από το Δημοτικό Ινστιτούτο Βιομηχανικής Έρευνας της Ναγκόγια στην Ιαπωνία, ο οποίος δημοσίευσε λεπτομέρειες σχετικά με μια καινοτόμο τεχνική «ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων». Παρά την αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας που υποβλήθηκε το 1980, η πατέντα δεν ολοκληρώθηκε. Στα έτη 1980 και 1981, δημοσιεύτηκαν άρθρα που περιέγραφαν τις μεθόδους του για την αυτόματη κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας και φωτοευαίσθητης ρητίνης, όπου μια μάσκα χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχο της έκθεσης στην πηγή UV. Αυτές οι τεχνικές, που περιλάμβαναν τη στερεοποίηση λεπτών στρωμάτων φωτοπολυμερούς, αποτέλεσαν τη βάση για τη στερεολιθογραφία (SLA).[1,2]

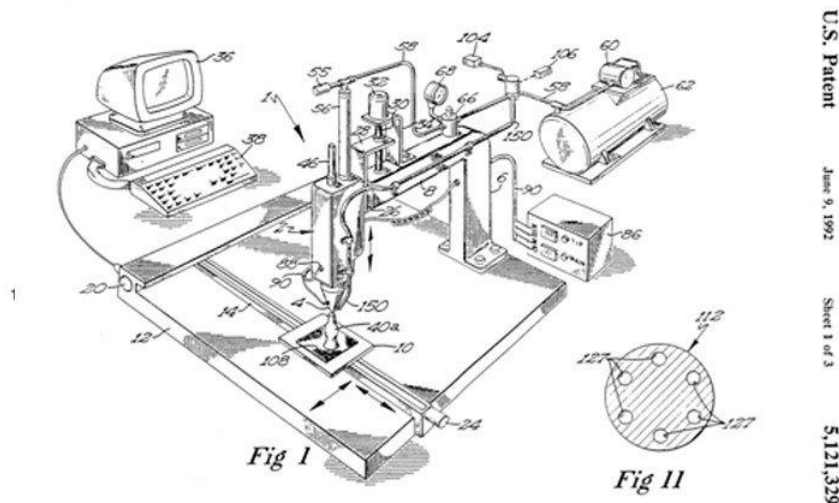
Το 1984, τρεις Γάλλοι μηχανικοί, οι Alain Le Méhauté, Olivier de Witte και Jean Claude André, κατέθεσαν το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη διαδικασία της στερεολιθογραφίας.[4] Το 1986 ο Charles 'Chuck' Hull στις ΗΠΑ κατέθεσε το δικό

του δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη "συσκευή παραγωγής τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω στερεολιθογραφίας". Η διαδικασία αυτή περιλάμβανε τη χρήση υπεριώδους φωτός για τη σκλήρυνση υγρών πολυμερών, σχηματίζοντας διαδοχικά στρώματα ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Η μέθοδος βασιζόταν σε ψηφιακά δεδομένα και σε υπολογιστικά ελεγχόμενη δέσμη φωτός για τη δημιουργία κάθε στρώματος. Ο Hull ανέπτυξε επίσης το αρχείο Standard Tessellation Language (STL), που μεταφράζει ψηφιακά μοντέλα σε τρισδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα. Ίδρυσε την εταιρεία 3D Systems, η οποία παρήγαγε και διέθεσε εμπορικά μηχανήματα στερεολιθογραφίας, συμπεριλαμβανομένου του πρώτου εμπορικού εκτυπωτή SLA, τον SLA-1, το 1988.[1,5,6,7]



Εικόνα 1 : Ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής SLA-1 (πηγή: 3DINSIDER)

Το ίδιο έτος, ο Carl R. Deckard, φοιτητής στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την πρώτη μηχανή SLS, γνωστή ως "Betsy". Αυτή η μηχανή μπορούσε να συγχωνεύει σωματίδια πλαστικού, μετάλλου, κεραμικών ή γυαλιού για να δημιουργήσει τρισδιάστατα αντικείμενα, χρησιμοποιώντας λέιζερ υψηλής ενέργειας. Οι Scott και Lisa Crump ίδρυσαν την εταιρεία Stratasys και το 1989 κατέθεσαν δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια μέθοδο ταχείας πρωτοτυποποίησης γνωστή ως FDM. Σε αυτή τη μέθοδο, ένα πλαστικό νήμα ή μεταλλικό σύρμα θερμαίνονται σε ένα ακροφύσιο και εξωθείται, με τη διαδικασία να καθοδηγείται από έναν υπολογιστή με βάση ένα ψηφιακό μοντέλο. Τα στρώματα διατηρούνταν σε θερμοκρασία λίγο κάτω από το σημείο στερεοποίησης για να εξασφαλίσουν καλή πρόσφυση μεταξύ τους. Η Stratasys ανέπτυξε συστήματα θερμοπλαστικών και εκτυπωτών για τρισδιάστατη εκτύπωση.



Σχήμα 1: Το αρχικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας FDM (πηγή: 3dsourced)

Το 1989, ο Hans Langer στη Γερμανία ίδρυσε την Electro Optical Systems (EOS), με στόχο την άμεση πυροσυσσωμάτωση μετάλλων με λέιζερ για την κατασκευή τρισδιάστατων εξαρτημάτων απευθείας από ψηφιακά μοντέλα. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιούσε την επιλεκτική ακτινοβολή ενός λέιζερ σε μεταλλική σκόνη για την πυροσυσσωμάτωση της υγρής φάσης. Η EOS παρουσίασε το πρώτο της στερεοσκοπικό σύστημα το 1994 και σήμερα είναι γνωστή για τις βιομηχανικές της λύσεις πρωτοτυποποίησης. Το 2004, η EOS απέκτησε τα δικαιώματα σε όλα τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας της DTM που σχετίζονταν με το SLS.[1,4]

1.4 Το στάδιο ανάπτυξης I (1991-2000)

Κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας σημειώθηκαν πολλές εξελίξεις στους υπάρχοντες τρισδιάστατους εκτυπωτές, όπως και σε νέους εκτυπωτές και υλικά. Οι αρχικοί εκτυπωτές είχαν αρκετούς τεχνικούς περιορισμούς και ελαττώματα, γεγονός που καθιστούσε δύσκολη τη χρήση τους για μαζική παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων. Ως αποτέλεσμα, υπήρξε σημαντική έρευνα για τη βελτίωση της απόδοσης των εκτυπωτών. Αυτές οι βελτιώσεις περιλάμβαναν κυρίως τη δημιουργία αντικειμένων με διαδοχικά στρώματα, τη σκλήρυνση σε στερεά βάση, την άμεση παραγωγή κελυφών και την εκτύπωση μεγάλης κλίμακας με τη μέθοδο SLS. Επίσης, αναπτύχθηκαν νέοι τύποι εκτυπωτών, όπως ο τρισδιάστατος εκτυπωτής κεριών, οι εκτυπωτές Z και οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μετάλλων.

Αυτή η περίοδος περιλάμβανε, επίσης, σημαντικά ορόσημα και εκπληκτικές ανακαλύψεις, με σημαντικές καινοτομίες όπως η ανάπτυξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης οργάνων, περιλαμβανομένης μιας ουροδόχου κύστης που δημιουργήθηκε από τα κύτταρα του ίδιου του ασθενούς. Παράλληλα, οι δυνατότητες σχεδιασμού

επεκτάθηκαν για να επιτρέψουν την εκτύπωση τόσο σκληρών όσο και μαλακών υλικών, με διαφορετικές αισθητικές και λειτουργικές ιδιότητες.

Η μέθοδος κατασκευής με βαλλιστικά σωματίδια, που κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον William Masters, περιλάμβανε την εκτόξευση μικροσταγονιδίων λιωμένου κεριού από μία πίδακα που κινείται σε επίπεδο X και Y, δημιουργώντας λεπτές διατομές. Η πλατφόρμα εκτύπωσης μετακινείται κατά μήκος του άξονα Z για την προσθήκη κάθε στρώματος του τρισδιάστατου αντικειμένου. Το 1993, στο MIT αναπτύχθηκε μια καινοτόμα τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασιζόταν σε εκτυπωτές inkjet, όπως αυτούς που χρησιμοποιούμε για τις καθημερινές εκτυπώσεις σε χαρτί. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνολογία 2D για να δημιουργήσουν 3D αντικείμενα, η ZCorp κυκλοφόρησε τον πρώτο της 3D εκτυπωτή, τον Z Corp Z402. Αρχικά, η τεχνολογία ονομαζόταν Zprinting, αλλά πλέον είναι γνωστή ως Binder Jetting. Ο πρώτος αυτός εκτυπωτής χρησιμοποιούσε υλικά σε μορφή σκόνης, όπως άμυλο και γύψο, ενώ για τη σύνδεση των υλικών χρησιμοποιούσε ένα συνδετικό υλικό με βάση το νερό.



Εικόνα 2: Z Corp Z402 (πηγή : 3dsourced)

Την ίδια χρονιά, το 1993, εμφανίστηκε στην αγορά μια άλλη καινοτόμος λύση τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ο Royden Sanders ίδρυσε τη Solidscape (αρχικά γνωστή ως Sanders Prototype Inc.), η οποία ανέπτυξε τρισδιάστατους εκτυπωτές που χρησιμοποιούσαν κεριό. Αυτοί οι εκτυπωτές δεν δημιουργούσαν τα συνηθισμένα πρωτότυπα όπως άλλες τεχνολογίες, αλλά αντιθέτως παρήγαγαν καλούπια από κεριό. Τα καλούπια αυτά χρησιμοποιούνταν στη χύτευση επενδύσεων για να δημιουργηθούν αντικείμενα από πιο ανθεκτικά υλικά. Το 1994, η Solidscape παρουσίασε τον Model Maker, τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή που χρησιμοποιούσε κεριό, και έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής στους κοσμηματοπώλες που ήθελαν να δημιουργούν τρισδιάστατα εκτυπωμένα κοσμήματα. Μέσα σε λιγότερο από δέκα χρόνια, η τρισδιάστατη εκτύπωση εξελίχθηκε από μια ιδέα σε μια πρακτική επιλογή για την κατασκευή σε μικρή κλίμακα. Το 1995, ο Michael Feygin κατέθεσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια τεχνική κατασκευής με απανωτά στρώματα, η οποία

χρησιμοποιούσε αυτόματη κοπή τομών από υλικά φύλλων, βασισμένη σε ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Τα στρώματα στη συνέχεια στοιβάζονταν και συγκολλούνταν για να σχηματίσουν το στερεό αντικείμενο. Η τεχνική σκλήρυνσης σε στερεά βάση, που εφευρέθηκε από τον Itzchak Pomerantz, χρησιμοποιούσε ένα οπτικό σύστημα μάσκας για την επιλεκτική έκθεση στρωμάτων φωτοευαίσθητης ρητίνης. Το εναπομείναν υγρό αφαιρείτο και αντικαθίστατο με κερί, το οποίο στη συνέχεια φρεζάρεται για να δημιουργηθεί ένα επίπεδο υπόστρωμα για το επόμενο στρώμα. Το 1997, δημιουργήθηκε η Arcam, μια εταιρεία που ειδικεύεται στην κατασκευή τρισδιάστατων εκτυπωτών μετάλλου, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Electron Beam Melting (EBM). Αυτή η μέθοδος κατασκευής αντικειμένων γίνεται μέσω της χρήσης δέσμης ηλεκτρονίων. [3,4]



Εικόνα 3: Electron Beam Melting 3D printer από την Arcam (πηγή: 3dsourced)

1.5 Το στάδιο ανάπτυξης II (2001-2010)

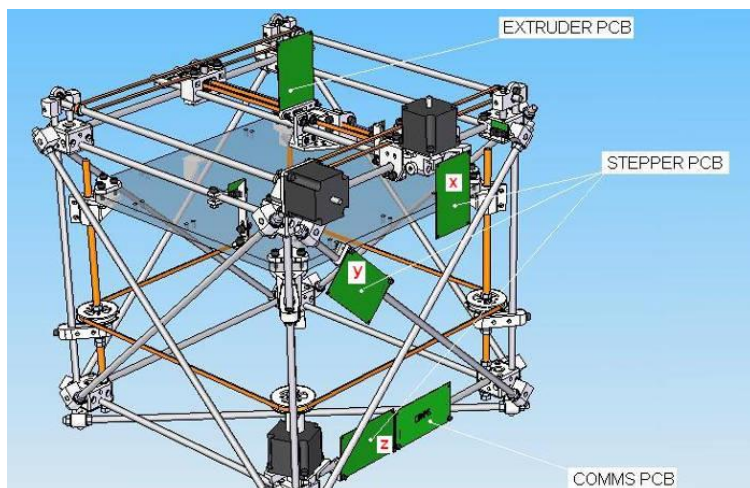
Αυτή η δεκαετία χαρακτηρίστηκε από σημαντικές εξελίξεις όπως η ευελιξία λειτουργίας, η μαζική προσαρμογή, η ακρίβεια, η υψηλή ανάλυση, οι οικιακοί προσωπικοί εκτυπωτές, η ευκολία χρήσης και η απλή προσβασιμότητα. Παράλληλα, υπήρξε μια σημαντική ώθηση στην έρευνα για την ανάπτυξη νέων υλικών με προχωρημένα χαρακτηριστικά προϊόντων. Το 2001, η Envisiontec παρουσίασε το Perfactory Machine, το οποίο είχε την ικανότητα να παράγει πολύ μεγάλα εξαρτήματα με υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια. Στα επόμενα χρόνια, εμφανίστηκαν συστήματα όπως το εμπορικό σύστημα τήξης με δέσμη ηλεκτρονίων λιώνοντας μεταλλική σκόνη και ο πολύχρωμος τρισδιάστατος εκτυπωτής της Z Corp. Τον Απρίλιο του 2001, η 3D Systems εξαγόρασε την DTM (Desktop Manufacturing), ενισχύοντας σημαντικά τη θέση της στην αγορά της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτή η εξαγορά καθιέρωσε την 3D Systems ως ηγέτιδα εταιρεία σε δύο βασικές τεχνολογίες, την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με laser (SLS) και τη στερεολιθογραφία (SLA), επιτρέποντάς της να παράγει αντικείμενα με μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια.



Εικόνα 4: Ένας από τους πρώτους εκτυπωτές SLS της DTM . (Πηγή:3dsourced)

Μία από τις πιο καινοτόμες ιδέες της δεκαετίας ήταν το πρότζεκτ RepRap, που ιδρύθηκε από τον Adrian Bowyer, ανώτερο λέκτορα μηχανολογίας στο Πανεπιστήμιο του Bath. Το πρότζεκτ αυτό έφερε την τρισδιάστατη εκτύπωση στα σπίτια μέσω ενός ανοιχτού κώδικα και της δυνατότητας αυτοαναπαραγωγής των εκτυπωτών. Σημαντικές υλικές καινοτομίες αυτής της περιόδου περιλαμβάνουν το πρώτο τρισδιάστατα εκτυπωμένο νεφρό από Κινέζους ερευνητές, ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο αιμοφόρο αγγείο, προσθετικά χωρίς ανάγκη συναρμολόγησης εξαρτημάτων, την παραγωγή καταναλωτικών προϊόντων, το πρώτο ένδυμα (τρειςδιάστατα εκτυπωμένο μπικίνι), μαριονέτες για ταινίες κινουμένων σχεδίων και τρισδιάστατα εκτυπωμένα έπιπλα. Ένα, εξίσου, σημαντικό γεγονός της δεκαετίας ήταν η λήξη της πατέντας της μεθόδου FDM, γεγονός που διέυρνε την προσβασιμότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Χιλιάδες άνθρωποι σε όλο τον κόσμο άρχισαν να χρησιμοποιούν την τεχνολογία αυτή εύκολα και άμεσα. Επιπλέον, η σημαντική ανάπτυξη των υλικών κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας οδήγησαν στην ανάπτυξη του πρώτου προτύπου ASTM για τα προσθετικά κατασκευασμένα προϊόντα, προσφέροντας μια αναφορά ποιότητας και ορολογίας.

Ο πρώτος εκτυπωτής του RepRap, ο Darwin, κυκλοφόρησε το 2007, ενώ ο δεύτερος, με το όνομα Mandel, το 2009. Οι χρήστες μπορούσαν να κατεβάσουν τα αρχεία για την κατασκευή των πλαστικών μερών του εκτυπωτή, ενώ τα απαραίτητα μεταλλικά μέρη ήταν εύκολα διαθέσιμα σε καταστήματα υλικών.

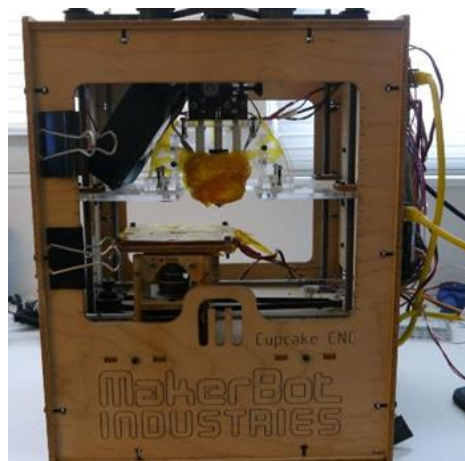


Εικόνα 5 :Οι πρώτες μηχανές RepRap (Πηγή:3dsourced)

Ωστόσο, αυτοί οι πρώτοι εκτυπωτές ήταν δύσκολο να συναρμολογηθούν και δεν ήταν πάντα αξιόπιστοι στη λειτουργία τους. Το Prusa Mendel, που κυκλοφόρησε το 2010, αποτέλεσε μια απλοποιημένη έκδοση που βοήθησε στην ανάπτυξη καλύτερων μοντέλων εκτυπωτών. Τελικά, ο στόχος έγινε η δημιουργία ολοκληρωμένων κιτ εκτυπωτών που θα ήταν εύκολα στη χρήση από τους καταναλωτές. Το πρώτο διαθέσιμο κιτ βασισμένο στο RepRap ήταν το BfB RapMan, που κυκλοφόρησε τον Ιανουάριο του 2009, ακολουθούμενο από το MakerBot Cupcake CNC τον Απρίλιο του 2009 και το MakerBot Thing-O-Matic το 2010.[1,3,4,5]



Εικόνα 6 :BfB RepMan (Πηγή:3dsourced)



Εικόνα 7: Cupcake CNC (Πηγή:3dsourced)

Το Fab@Home, που αναπτύχθηκε από τον Evan Malone, υποψήφιο διδάκτορα στο Πανεπιστήμιο Cornell, και τον Dr. Hod Lipson, επίκουρο καθηγητή μηχανολογίας και αεροδιαστημικής μηχανικής στο ίδιο πανεπιστήμιο, είχε παρόμοιο στόχο με το RepRap, δηλαδή την ανάπτυξη χαμηλού κόστους τρισδιάστατων εκτυπωτών με έργα ανοιχτού κώδικα. Για να προωθήσουν την κοινότητα των χρηστών, δημιούργησαν

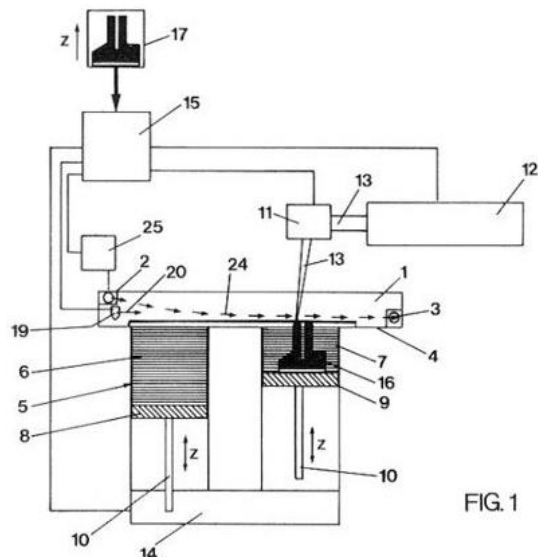
έναν ιστότοπο με λεπτομερείς οδηγίες και λογισμικό, καθώς και ένα διαδικτυακό φόρουμ για τη διευκόλυνση των συζητήσεων. Κατά τους πρώτους έξι μήνες, ο ιστότοπος δέχθηκε πάνω από 4,3 εκατομμύρια αιτήματα από περισσότερους από 150.000 χρήστες. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε σε πολλές εφαρμογές, από την εκτύπωση σοκολάτας και τυριού έως μπαταρίες και αγωγίμα καλώδια. Αξιοσημείωτο είναι ότι το έργο Fab@School αναπτύχθηκε για τη χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών σε δημοτικά σχολεία, με υλικά όπως το play-doh. Το έργο Fab@Home ολοκληρώθηκε το 2012, καθώς οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έγιναν ευρέως διαθέσιμοι στους καταναλωτές, επιτυγχάνοντας τον αρχικό στόχο του πρότζεκτ.[1,8]

1.6 Η εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η κορύφωση της στην σύγχρονη εποχή

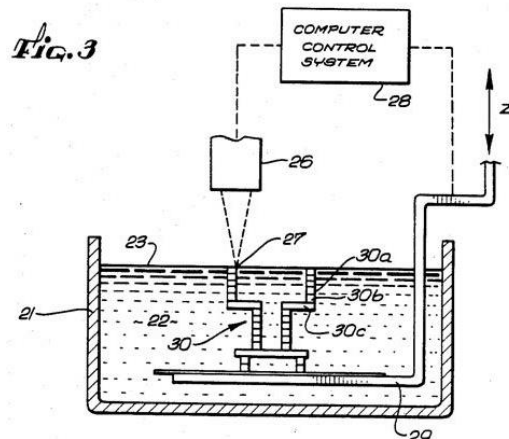
Αυτή η περίοδος χαρακτηρίζεται από τη μείωση του κόστους των τρισδιάστατων εκτυπωτών, καθιστώντας τους οικονομικά προσιτούς και επιτρέποντας τη χρήση τους σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, από προσωπικά αντικείμενα έως βιομηχανικά προϊόντα. Η τεχνολογία αξιοποιήθηκε για την παραγωγή διαφόρων υλικών, με χρήση σε τομείς όπως τα τρόφιμα, τα παιχνίδια, τα κοσμήματα, τα αυτοκίνητα, τα κτίρια, τα αεροσκάφη, τα ρούχα και τα αξεσουάρ μόδας, τη βιοϊατρική και τη ρομποτική. Το κόστος των τρισδιάστατων εκτυπωτών τεχνολογίας FDM μειώθηκε δραστικά το 2012-2013, πέφτοντας από πενταψήφια σε τετραψήφια και ακόμη και σε τριψήφια ποσά, κάνοντας την τεχνολογία προσιτή σε περισσότερους ανθρώπους.

Αν και τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας για τη Στερεολιθογραφία είχαν λήξει πέντε χρόνια πριν, δεν υπήρχε ακόμα προσιτός εκτυπωτής SLA 3D στην αγορά μέχρι τον Ιούνιο του 2012. Πλατφόρμες χρηματοδότησης από το κοινό, όπως το Kickstarter, διευκόλυναν την έναρξη νέων εταιρειών τρισδιάστατης εκτύπωσης, επιτρέποντας στους επιχειρηματίες να αντλήσουν χρηματοδότηση μέσω της δημόσιας υποστήριξης. Το 2012, με χρηματοδότηση από το Kickstarter, κυκλοφόρησε ο B9Creator, βασισμένος στην τεχνολογία DLP, ενώ ακολούθησε ο εκτυπωτής στερεολιθογραφίας Form 1, που συγκέντρωσε σχεδόν 3 εκατομμύρια δολάρια. Το 2013, ο Buccaneer, ένας εκτυπωτής που βασίζεται σε νήματα, συγκέντρωσε περίπου 1,5 εκατομμύρια δολάρια μέσω του Kickstarter. Από τότε, πολλές σχετικές με την τρισδιάστατη εκτύπωση καμπάνιες και τεχνολογίες έχουν βρει επιτυχία σε αυτήν την πλατφόρμα.[1,6]

Το 2014 ήταν καθοριστική χρονιά για την τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς η NASA χρησιμοποίησε το πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωμένο αντικείμενο στο διάστημα, ενώ έληξαν σημαντικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας που επέτρεψαν την ανάπτυξη πιο προσιτών εκτυπωτών SLS και SLA. [3]



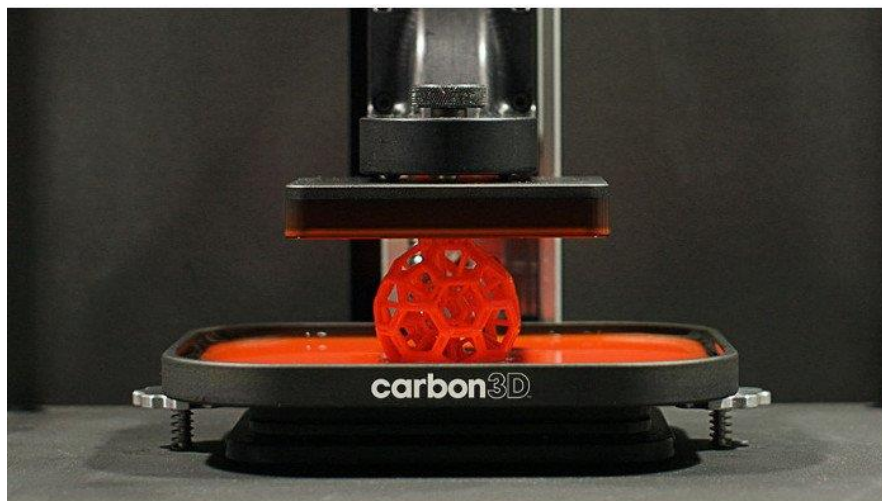
Σχήμα 2: Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το SLS που έληξε το 2014. (Πηγή:3dsourced)



Σχήμα 3: Οι αρχικές πατέντες του SLA που έληξαν το 2014. (Πηγή:3dsourced)

Παράλληλα, η Formlabs κατέληξε σε συμφωνία με την 3D Systems για πληρωμή δικαιωμάτων 8% στις πωλήσεις της. Επιπλέον αυτή η περίοδος χαρακτηρίστηκε από έντονη δραστηριότητα εξαγορών από τις 3D Systems και Stratasys, αλλά και από την εμφάνιση νέων ανταγωνιστών όπως οι Ultimaker, Lulzbot και Prusa στην αγορά επιτραπέζιων εκτυπωτών, καθώς και εταιρειών όπως η Desktop Metal και η Carbon 3D στον βιομηχανικό τομέα. Το 2014, η εταιρεία Carbon 3D ιδρύθηκε από τους Joseph και Philip DeSimone στην Καλιφόρνια, με την επαναστατική τεχνολογία CLIP (Continuous Liquid Interface Production), εμπνευσμένη από την ταινία "Terminator 2". Μέχρι το 2017, η Carbon 3D είχε αποτιμηθεί στα 1,7 δισεκατομμύρια δολάρια, υπερβαίνοντας τις Stratasys και 3D Systems. Τον Μάρτιο του 2015, ο Joseph DeSimone παρουσίασε στο TED Talk την 3D εκτύπωση 100 φορές πιο γρήγορη, γεγονός που προσέελκυσε παγκόσμιο ενδιαφέρον για την Carbon 3D.

Μια άλλη σημαντική startup ήταν η Desktop Metal, που ιδρύθηκε τον Οκτώβριο του 2015. Η εταιρεία συγκέντρωσε πάνω από 200 εκατομμύρια δολάρια και η αξία της ξεπέρασε το 1 δισεκατομμύριο δολάρια. Η τεχνολογία της, Bound Metal Deposition, επιτρέπει την εκτύπωση μετάλλων πολύ φθηνότερα από τις παραδοσιακές μεθόδους, γεγονός που προσέελκυσε επενδυτές όπως η Ford, η Google και η BMW.



Εικόνα 8: Οι εκτυπωτές του Carbon 3D χρησιμοποιούν τεχνολογία CLIP, η οποία είναι παρόμοια με την SLA. (πηγή: 3dsourced)

Παράλληλα, ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής της 3D Systems, ο SLA-1, αναγνωρίστηκε ως ορόσημο Ιστορικής Μηχανολογίας από την Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών, δείχνοντας την εξέλιξη της 3D εκτύπωσης από τη δεκαετία του '80. Επίσης, νέες τεχνολογίες και startups, όπως η Markforged, η Formlabs, και η Xact Metal, προκάλεσαν το ενδιαφέρον των επενδυτών, ελπίζοντας να επιτύχουν την ίδια επιτυχία.[4]

Ο τότε πρόεδρος των ΗΠΑ Ομπάμα ανακοίνωσε μια επιχορήγηση 30 εκατομμυρίων δολαρίων στο Εθνικό Ινστιτούτο Καινοτομίας Προσθετικής Κατασκευής στο Οχάιο, για να προωθήσει την έρευνα στην προσθετική κατασκευή και την τρισδιάστατη εκτύπωση, κατά τη διάρκεια της ομιλίας του για την κατάσταση της Ένωσης. Το 2011, το περιοδικό Time συμπεριέλαβε στις 50 καλύτερες εφευρέσεις της χρονιάς το τρισδιάστατα εκτυπωμένο εύκαμπτο φόρεμα της Iris van Herpen.

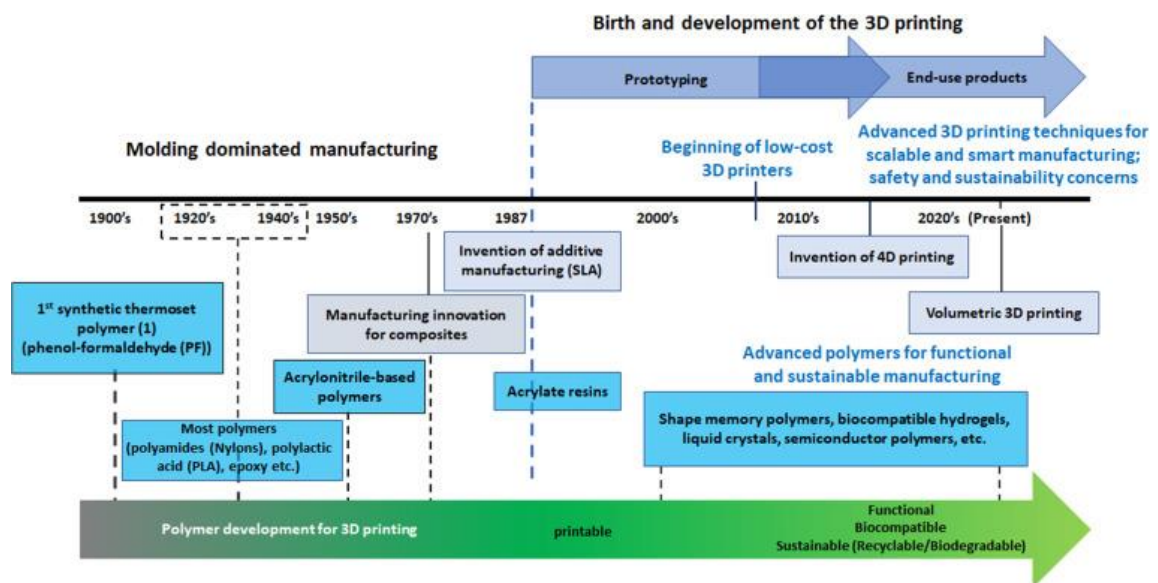
Ένα άρθρο του Guardian χαρακτήρισε τον Chuck Hull ως τον "πατέρα" της τρισδιάστατης εκτύπωσης, σημειώνοντας ότι προέβλεψε πως η εφεύρεσή του θα χρειαζόταν περίπου 30 χρόνια για να γίνει καθημερινή σε οικιακές εφαρμογές. Σήμερα, οι δυνατότητες της τεχνολογίας φαίνονται ατελείωτες, με πολλά ακόμα εκπληκτικά επιτεύγματα να αναμένονται. Για παράδειγμα, το 2016, οι Matsuzaki et al. παρουσίασαν τρισδιάστατα εκτυπωμένα σύνθετα υλικά με συνεχή ίνα, προσθέτοντας δυνατότητες για τη ρύθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των εκτυπωμένων εξαρτημάτων, επιτρέποντας την κατασκευή πολύπλοκων υλικών στο μέλλον.[3]

Το 2016, η Ultimaker κυκλοφόρησε τον εκτυπωτή Ultimaker 3, ενισχύοντας τη θέση της στην αγορά και προωθώντας την τεχνολογία ανοικτού κώδικα. Η ανάπτυξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης στις κατασκευές άρχισε να κερδίζει έδαφος, με την Apis Cor να κατασκευάζει ένα σπίτι σε 24 ώρες και να προχωρά σε μεγαλύτερα έργα, όπως ένα τεράστιο κτίριο στο Ντουμπάι το 2019.



Εικόνα 9 : Ο Ultimaker 3. (πηγή: 3dsourced)

Συνοψίζοντας, οι εξελίξεις στην 3D εκτύπωση οδήγησαν σε σημαντικές επενδύσεις και τεχνολογικές καινοτομίες, ενώ νέες εταιρείες έκαναν την εμφάνισή τους, διεκδικώντας ένα κομμάτι από την αγορά.[4]



Σχήμα 4 : Ιστορικό 3D εκτύπωσης και ανάπτυξη πολυμερών για εκτύπωση 3D (πηγή : www.cell.com)

2. Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

2.1 Τομείς τρισδιάστατης εκτύπωσης

Αεροδιαστημική Βιομηχανία

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης προσφέρει εξαιρετική ευελιξία στον σχεδιασμό και την κατασκευή εξαρτημάτων. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη δημιουργία ελαφρύτερων εξαρτημάτων με περίπλοκες γεωμετρίες, γεγονός που μπορεί να μειώσει τις απαιτήσεις σε ενέργεια και πόρους. Επιπλέον, η χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης συμβάλλει στην εξοικονόμηση καυσίμων, καθώς μειώνεται η ποσότητα υλικών που απαιτείται για την κατασκευή αεροδιαστημικών εξαρτημάτων. Έχει εφαρμοστεί ευρέως στην παραγωγή ανταλλακτικών για διάφορα αεροδιαστημικά εξαρτήματα, όπως οι κινητήρες. Τα μέρη των κινητήρων, που συχνά υφίστανται φθορές και χρειάζονται τακτική αντικατάσταση, μπορούν να παραχθούν αποτελεσματικά με τη βοήθεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στην αεροδιαστημική, τα κράματα που βασίζονται στο νικέλιο είναι ιδιαίτερα δημοφιλή λόγω των εξαιρετικών μηχανικών τους ιδιοτήτων, της αντοχής τους στην οξείδωση και τη διάβρωση, καθώς και της ικανότητάς τους να αντέχουν σε βλάβες.

Αυτοκινητοβιομηχανία

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει φέρει σημαντικές αλλαγές στην αυτοκινητοβιομηχανία, επιτρέποντας τον σχεδιασμό και την κατασκευή νέων προϊόντων με καινοτόμους τρόπους. Στον τομέα αυτό, έχει διευκολύνει τη δημιουργία ελαφρύτερων και πιο πολύπλοκων δομών σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, η εταιρεία Local Motors κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης το 2014. Εκτός από τα αυτοκίνητα, η Local Motors έχει επίσης επεκταθεί στη δημιουργία άλλων οχημάτων, όπως το OLLI, ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο λεωφορείο που είναι ηλεκτρικό, ανακυκλώσιμο, χωρίς οδηγό και εξαιρετικά έξυπνο. Παράλληλα, η Ford έχει πρωτοστατήσει στη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή πρωτοτύπων και εξαρτημάτων κινητήρα. Η BMW χρησιμοποιεί επίσης αυτή την τεχνολογία για την κατασκευή εργαλείων χειρός που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές και τη συναρμολόγηση αυτοκινήτων. Επιπλέον, το 2017, η AUDI συνεργάστηκε με την S Solution Group AG για την παραγωγή ανταλλακτικών και πρωτοτύπων.

Συνολικά η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην αυτοκινητοβιομηχανία δίνει τη δυνατότητα στις εταιρείες να εξετάζουν διάφορες επιλογές και να εστιάζουν ακριβώς στις απαιτούμενες βελτιώσεις, προωθώντας έτσι τον ιδανικό και αποδοτικό σχεδιασμό. Επιπλέον, αυτή η τεχνολογία βοηθά στη μείωση της σπατάλης υλικών και της κατανάλωσης πόρων, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το κόστος και τον χρόνο παραγωγής, επιτρέποντας την ταχεία δοκιμή νέων σχεδίων.

Βιομηχανία τροφίμων

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν περιορίζεται μόνο στην αεροδιαστημική βιομηχανία, αλλά επεκτείνεται και στον τομέα των τροφίμων. Υπάρχει μια αυξανόμενη ζήτηση για την ανάπτυξη τροφίμων που είναι προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες διατροφικές ανάγκες, όπως αυτές των αθλητών, των παιδιών, των εγκύων γυναικών και των ασθενών, που απαιτούν διαφορετικά επίπεδα θρεπτικών συστατικών, μειώνοντας ταυτόχρονα τα περιττά συστατικά και ενισχύοντας τα υγιεινά στοιχεία. Η δημιουργία αυτών των εξατομικευμένων τροφίμων απαιτεί προσεκτική και καινοτόμο προσέγγιση, και εδώ η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Η διαδικασία, γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων, κατασκευάζει τρόφιμα μέσω της τοποθέτησης διαδοχικών στρωμάτων, χρησιμοποιώντας δεδομένα σχεδιασμένα με τη βοήθεια υπολογιστή. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων δομών και σχημάτων με την ανάμιξη συγκεκριμένων υλικών. Ζάχαρη, σοκολάτα, πολτοποιημένα τρόφιμα και επίπεδα τρόφιμα όπως ζυμαρικά, πίτσα και κράκερ είναι μερικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία καινοτόμων τροφίμων με ενδιαφέροντα σχέδια και σχήματα.

Συμπερασματικά η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων αποτελεί μια ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία, που προσφέρει ποιοτικό έλεγχο, περιβαλλοντική φιλικότητα και χαμηλό κόστος παραγωγής. Επιπλέον, αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη δημιουργία υγιεινών τροφίμων προσαρμοσμένων στις ατομικές προτιμήσεις και ανάγκες. Μέσω της αυτοματοποιημένης προσαρμογής των συστατικών σύμφωνα με τις πληροφορίες του καταναλωτή, είναι δυνατή η δημιουργία διατροφών που μπορούν να ικανοποιήσουν προσωπικές ανάγκες χωρίς την ανάγκη για άσκηση.

Τομέας υγείας και ιατρική βιομηχανία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει βρει πολλές εφαρμογές στον τομέα της υγείας, όπως την εκτύπωση δερματικών ιστών, την ανάπτυξη φαρμάκων και φαρμακευτικών προϊόντων, καθώς και την παραγωγή οστών και χόνδρων. Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την κατασκευή υποκατάστατων ιστών, οργάνων, για την έρευνα στον καρκίνο, αλλά και για τη δημιουργία εκπαιδευτικών μοντέλων και τη διευκόλυνση της επικοινωνίας.

Τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης στα βιοϊατρικά προϊόντα περιλαμβάνουν:

Εκτύπωση δέρματος: Η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να δημιουργήσει δερματικά αντίγραφα με χαμηλό κόστος, που είναι χρήσιμα για τη δοκιμή φαρμάκων, καλλυντικών και χημικών προϊόντων, αποφεύγοντας έτσι τη χρήση ζωικού δέρματος. Αυτό προσφέρει πιο ακριβή αποτελέσματα.

Εκτύπωση φαρμάκων: Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την παραγωγή φαρμάκων με ακριβή έλεγχο της δόσης και του μεγέθους των δισκίων, προσφέροντας υψηλή αναπαραγωγιμότητα και δυνατότητα δημιουργίας φαρμακευτικών μορφών με σύνθετα προφίλ απελευθέρωσης.

Εκτύπωση οστών και χόνδρων: Η τεχνολογία επιτρέπει την παραγωγή αντικατάστατων για οστικά κενά ή κατεστραμμένους χόνδρους λόγω τραυματισμών ή ασθενειών, προσφέροντας μια εναλλακτική στις παραδοσιακές μεταμοσχεύσεις.

Ιστοί αντικατάστασης: Οι τρισδιάστατα εκτυπωμένοι ιστοί μπορούν να αντικαταστήσουν ή να αποκαταστήσουν τη λειτουργία των φυσικών ιστών, προσφέροντας βιοσυμβατότητα και κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες.

Εκτύπωση οργάνων: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία οργάνων που αντικαθιστούν τα φυσικά, που έχουν υποστεί βλάβη από ασθένειες ή ατυχήματα.

Έρευνα καρκίνου: Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων καρκινικών ιστών για την επιτάχυνση της έρευνας και την απόκτηση πιο ακριβών δεδομένων.

Εκπαιδευτικά μοντέλα: Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικούς σκοπούς, βοηθώντας τους νευροχειρουργούς να εξασκηθούν και να βελτιώσουν τις χειρουργικές τους τεχνικές, επιτρέποντας τη μείωση του χρόνου εκπαίδευσης και την προσομοίωση πραγματικών ιατρικών καταστάσεων.

Αρχιτεκτονική, κατασκευές και κατασκευαστική βιομηχανία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία, προσφέροντας απεριόριστες δυνατότητες στην υλοποίηση σύνθετων γεωμετριών. Στον τομέα των κατασκευών, αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την κατασκευή ολόκληρων κτιρίων όσο και για την παραγωγή μεμονωμένων δομικών στοιχείων. Η χρήση του Building Information Modeling (BIM) συμβάλλει στη βελτίωση της εφαρμογής της τρισδιάστατης εκτύπωσης, παρέχοντας μια ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου. Το BIM λειτουργεί ως αξιόπιστη πηγή πληροφόρησης και γνώσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κτιρίου, από τον αρχικό σχεδιασμό μέχρι την κατεδάφιση, βοηθώντας στη λήψη αποφάσεων και στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του δομημένου περιβάλλοντος.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει στις εταιρείες να σχεδιάζουν και να υλοποιούν την οπτική απεικόνιση ενός κτιρίου γρήγορα και με χαμηλό κόστος, αποφεύγοντας καθυστερήσεις και εντοπίζοντας προβληματικές περιοχές. Βελτιώνει επίσης την επικοινωνία μεταξύ μηχανικών, κατασκευαστών και πελατών, επιτρέποντας τη σαφή απεικόνιση των ιδεών πέρα από τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού με χαρτί και μολύβι.

Παραδείγματα εφαρμογής τρισδιάστατης εκτύπωσης στην κατασκευή κτιρίων περιλαμβάνουν το Apis Cor Printed House στη Ρωσία και το Canal House στο Άμστερνταμ. Αυτές οι κατασκευές δείχνουν πως η τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να μετατρέψει γρήγορα και οικονομικά μια ιδέα σε πραγματικότητα .

Βιομηχανία υφασμάτων και μόδας

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει αρχίσει να επηρεάζει τη βιομηχανία λιανικής, με την εμφάνιση προϊόντων όπως παπούτσια, κοσμήματα, καταναλωτικά αγαθά και ρούχα. Η συνδυασμένη χρήση αυτής της τεχνολογίας με τη μόδα μπορεί να μην φαίνεται αρχικά ως φυσική συνύπαρξη, αλλά σταδιακά γίνεται κοινή πρακτική παγκοσμίως. Μεγάλες εταιρείες, όπως οι Nike, New Balance και Adidas, εξερευνούν την δυνατότητα μαζικής παραγωγής τρισδιάστατα εκτυπωμένων παπουτσιών, δημιουργώντας είδη για αθλητές, κατά παραγγελία και αθλητικά παπούτσια.

Προσφέρει νέες δημιουργικές δυνατότητες στον σχεδιασμό της μόδας, επιτρέποντας την κατασκευή πρωτότυπων σχημάτων χωρίς την ανάγκη καλουπιών. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενδυμάτων μέσω συστημάτων πλέγματος και για την εκτύπωση διακοσμητικών στοιχείων πάνω σε παραδοσιακά υφάσματα. Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν περιορίζεται μόνο στην ένδυση, αλλά εκτείνεται και στην κατασκευή δερμάτινων ειδών και αξεσουάρ, όπως κοσμήματα, ρολόγια και άλλα.

Οι σχεδιαστές και οι λιανοπωλητές βλέπουν την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης όχι ως μέσο για την αντιγραφή υπαρχόντων προϊόντων, αλλά ως εργαλείο για την βελτίωση των σχεδίων, προσφέροντας μοναδικά και εξατομικευμένα προϊόντα στους πελάτες. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η δυνατότητα παραγωγής κατά παραγγελία προϊόντων με μοναδικό στυλ, ενώ παράλληλα μειώνει το κόστος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την παραγωγή και την παράδοση προϊόντων σε μικρές ποσότητες με ταχείς ρυθμούς.

Ηλεκτρική και ηλεκτρονική βιομηχανία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς γίνεται πιο προσιτή και διαδεδομένη, προσφέρει νέες και συναρπαστικές δυνατότητες στον τομέα της ηλεκτρικής και ηλεκτρονικής βιομηχανίας. Η τεχνολογία αυτή έχει ήδη χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη δημιουργία δομικών ηλεκτρονικών συσκευών, όπως ενεργά ηλεκτρονικά υλικά και ηλεκτροδία, επιτρέποντας την προσαρμογή σχεδίων και την ενσωμάτωση αγωγών σε τρισδιάστατα εκτυπωμένες συσκευές. Η παραγωγή τρισδιάστατων ηλεκτροδίων με την τεχνική Fused Deposition Modelling (FDM) προσφέρει μια οικονομική και ταχεία λύση για την μαζική παραγωγή ηλεκτροδίων. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ηλεκτροδία, όπως εκείνα από αλουμίνιο, χαλκό ή άνθρακα, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα ηλεκτροδία μπορούν να σχεδιαστούν και να προσαρμοστούν εύκολα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και εξαιρετικά ακριβής, επιτρέποντας την παραγωγή οκτώ ηλεκτροδίων σε μόλις 30 λεπτά.

Επιπροσθέτως, ενεργά ηλεκτρονικά στοιχεία, όπως τρανζίστορ, δίοδοι, λειτουργικοί ενισχυτές, LED και μπαταρίες, είναι συσκευές που μπορούν να ενισχύουν και να ελέγχουν την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η κατασκευή αυτών των στοιχείων είναι πιο περίπλοκη σε σύγκριση με τα παθητικά στοιχεία, λόγω των σύνθετων λειτουργιών

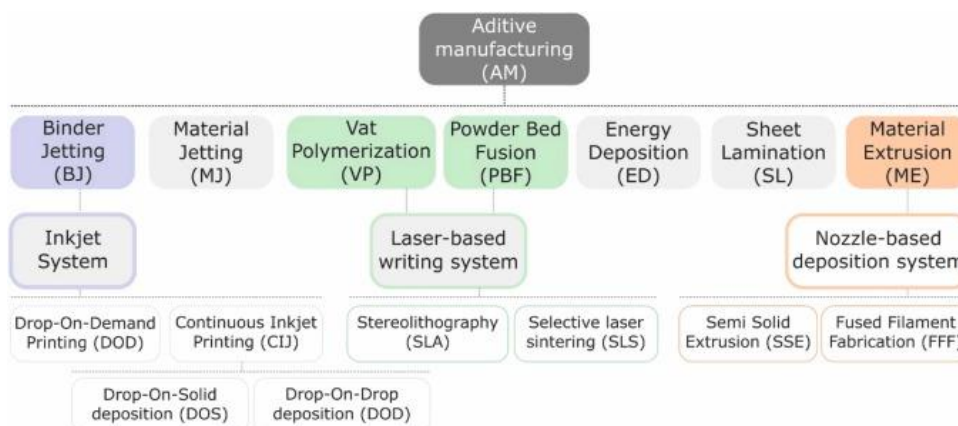
τους. Η τρισδιάστατη εκτύπωση παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στην επεξεργασία και την ενσωμάτωση αυτών των ηλεκτρονικών στοιχείων σε προϊόντα.

Η χρήση πολλαπλών υλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη του ηλεκτρονικού συστήματος στο πλαίσιο της Βιομηχανικής Επανάστασης 4.0, διευκολύνοντας την δημιουργία πιο καινοτόμων σχεδίων μέσω μιας ενιαίας διαδικασίας. Επείγει η ανάπτυξη οικολογικών ηλεκτρονικών συσκευών που να είναι οικονομικές, ασφαλείς, αξιόπιστες και να κατασκευάζονται γρήγορα, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η περιβαλλοντική ρύπανση της σύγχρονης κοινωνίας.[9,10]

2.2 Μέθοδοι Εκτύπωσης Τρισδιάστατων Εκτυπωτών

Οι παραδοσιακές μέθοδοι παραγωγής απαιτούν αυξημένη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας και συχνά βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε ανθρώπινη εργασία. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, από την άλλη, αυτοματοποιεί αυτές τις διαδικασίες και στηρίζεται στον προγραμματισμό CAD για την εκτύπωση αντικειμένων με τη χρήση διαφόρων υλικών. Αυτό μειώνει σημαντικά την ανάγκη για πολύπλοκη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν απαιτεί ακριβά καλούπια ή εξοπλισμό για μηχανικές επεξεργασίες, όπως διαμόρφωση και διάτρηση, γεγονός που την καθιστά οικονομικά αποδοτική.

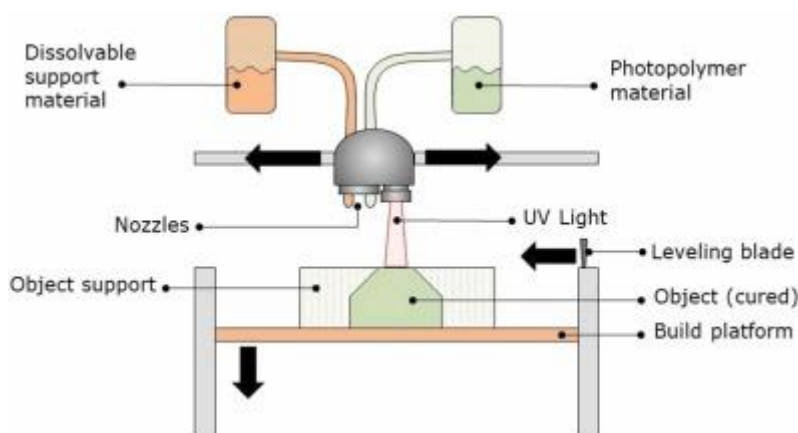
Σύμφωνα με την ευρέως χρησιμοποιούμενη ταξινόμηση μεθόδων προσθετικής κατασκευής που αναφέρεται στο πρότυπο ISO/ASTM 52900: 2015, οι μέθοδοι κατηγοριοποιούνται σε επτά μεγάλες κατηγορίες : (1) Φωτοπολυμερισμός σε δεξαμενή (VP), (2) Εκτόξευση Υλικού (MJ), (3) Εκτόξευση Συνδετικού Υλικού (BJ), (4) Σύντηξη σε Κλίνη Σκόνης (PBF), (5) Εξώθηση Υλικού (ME), (6) Εναπόθεση Κατευθυνόμενης Ενέργειας (DED) και (7) Πλαστικοποίηση Φύλλων (SL).



Σχήμα 5 : Επισκόπηση των μεθόδων τρισδιάστατης εκτύπωσης βάσει πρότυπου ISO/ASTM 52900: 2015 (πηγή: Siencedirect)

2.2.1 Εκτόξευση υλικού (MJ)

Η τεχνολογία εκτόξευσης υλικού (MJ) χρησιμοποιεί μικροακροφύσια για να τοποθετήσει λεπτά στρώματα φωτοπολυμερούς ή κεριού στην επιφάνεια της πλατφόρμας κατασκευής, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Αρχικά, ένα στρώμα υγρού εκτυπώνεται και στη συνέχεια σκληραίνει με υπεριώδη ακτινοβολία. Η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει έτσι ώστε να μπορέσει να τοποθετηθεί το επόμενο στρώμα επάνω στο προηγούμενο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, και το αντικείμενο κατασκευάζεται στρώμα-στρώμα. Η MJ επιτρέπει την ταυτόχρονη παραγωγή πολλών υλικών χρησιμοποιώντας μία ή περισσότερες κεφαλές εκτυπωτή, όπου κάθε συστοιχία ακροφυσίων λειτουργεί ως ξεχωριστό κανάλι. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την εκτύπωση πολύπλοκων σχημάτων με διαλυτά στηρίγματα, τα οποία αφαιρούνται εύκολα μετά την εκτύπωση, αφήνοντας ένα τελικό προϊόν με άριστη επιφάνεια.

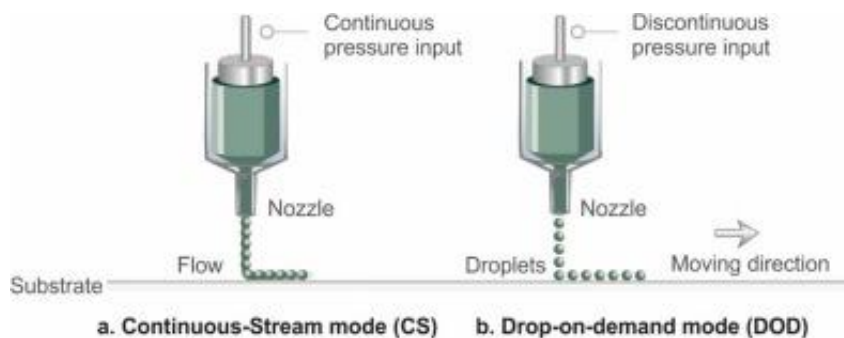


Σχήμα 6 : Σχηματικό διάγραμμα εκτόξευσης υλικού (MJ) (πηγή: Siencedirect)

Οι εκτυπωτές MJ μπορούν να δημιουργήσουν στρώματα πάχους 25-50 μικρομέτρων, παράγοντας αντικείμενα υψηλής ανάλυσης. Η MJ προσφέρει πλεονεκτήματα όπως υψηλή παραγωγικότητα, μεγάλη γκάμα μεγεθών εξαρτημάτων και ποικιλία υλικών, υπερέχοντας σε αυτούς τους τομείς σε σύγκριση με άλλες τεχνικές όπως ο φωτοπολυμερισμός VAT. Η απλότητα του μηχανισμού της MJ και η υψηλή ταχύτητα κατασκευής αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου, καθώς βασίζεται σε εκατοντάδες ή χιλιάδες ακροφύσια για να επιτύχει ταχύτητα, υψηλή ανάλυση και καλό φινίρισμα επιφάνειας. Επιπλέον, η δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών υλικών και χρωμάτων την καθιστά ξεχωριστή από άλλες τεχνολογίες AM.

Ωστόσο, η MJ έχει και μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος, τα φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά (καθώς τα φωτοπολυμερή που σκληρύνονται με υπεριώδη ακτινοβολία τείνουν να χάνουν τις ιδιότητές τους με την πάροδο του χρόνου), την περιορισμένη ανθεκτικότητα και την επιλογή υλικών.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι MJ, οι οποίοι διακρίνονται με βάση τον τρόπο παραγωγής και απελευθέρωσης των σταγονιδίων: η συνεχής ροή (MJ-CS, σχήμα 7α) και η πτώση κατά ζήτηση (MJ-DOD, σχήμα 7β).



Σχήμα 7 : Τρόποι απόθεσης εκτόξευσης υλικού : α) συνεχές και β) σταγονίδιο ζήτησης πτώσης (πηγή: Siencedirect)

2.2.1.1 Κατάσταση συνεχούς ροής (MJ-CS)

Στη λειτουργία συνεχούς ροής (MJ-CS) το ρευστό ρέει συνεχώς υπό σταθερή πίεση και διαχωρίζεται σε σταγονίδια κατά την απελευθέρωσή του από το ακροφύσιο. Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να προκληθεί από δονήσεις, διαταραχές ή διαμόρφωση του πίδακα. Τα σταγονίδια περνούν μέσα από μια ζώνη φόρτισης, όπου ελέγχεται η ταχύτητα εναπόθεσής τους, πριν εκτραπούν προς τους προορισμούς τους μέσω πλακών εκτροπής υψηλής τάσης. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ο γρήγορος ρυθμός εναπόθεσης, κάτι που μπορεί να έχει εφαρμογές στη φαρμακευτική επισήμανση. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την ανάγκη το υλικό που χρησιμοποιείται να μπορεί να μεταφέρει το ηλεκτρικό φορτίο, καθώς και το κόστος ανακύκλωσης ή επαναχρησιμοποίησης των σταγονιδίων που εκτρέπονται μετά την απελευθέρωση του υγρού.

2.2.1.2 Λειτουργία κατ' απαίτηση (MJ-DOD)

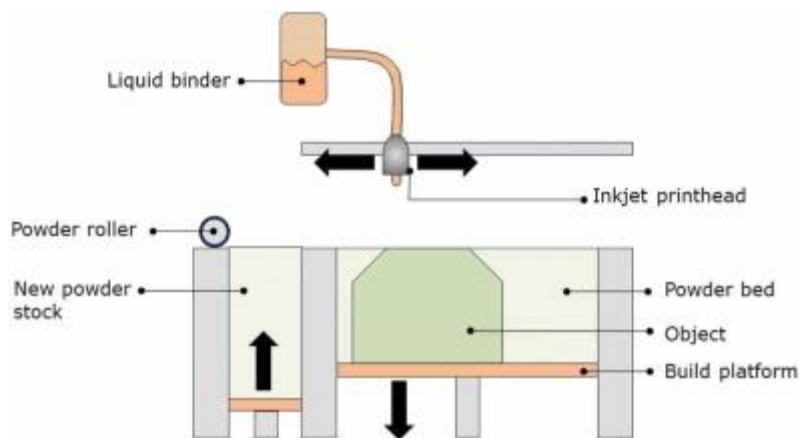
Σε αντίθεση με τη συνεχή ροή, η λειτουργία κατ' απαίτηση (MJ-DOD) παράγει διακριτά σταγονίδια αμέσως κατά την έξοδο από το ακροφύσιο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω αυξήσεων πίεσης μέσα σε κάθε ακροφύσιο, που προκαλούν το σχηματισμό των σταγονιδίων σε καθορισμένες χρονικές στιγμές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω θερμικών, πιεζοηλεκτρικών, ηλεκτροστατικών, ακουστικών ή άλλων τύπων ενεργοποιητών. Στη λειτουργία MJ-DOD, το υγρό υλικό εκτοξεύεται από το ακροφύσιο και σπάει σε μεμονωμένα σταγονίδια μετά την έξοδό του από την κεφαλή ψεκασμού. Για να εξασφαλιστεί ότι ο πίδακας διαχωρίζεται σε σταγονίδια σταθερού μεγέθους, οι δονήσεις μπορούν να ρυθμίσουν τον χρόνο διάσπασης. Μετά την έξοδο από το ακροφύσιο, τα σταγονίδια πρέπει να κατευθυνθούν στην επιθυμητή θέση, διασφαλίζοντας ότι ψεκάζονται με ακρίβεια μόνο στο προβλεπόμενο σημείο. Για να επιτευχθεί αυτό, τα σταγονίδια είτε διαθέτουν ήδη ηλεκτρικό φορτίο είτε φορτίζονται αφού περάσουν μέσα από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Στο πεδίο εκτροπής, τα σταγονίδια κατευθύνονται στο επιθυμητό σημείο.

Το πλεονέκτημα της προσέγγισης MJ-DOD είναι ότι παράγει σημαντικά μικρότερα σταγονίδια, επιτρέποντας καλύτερη ανάλυση στο τελικό αντικείμενο. Ωστόσο, η MJ-CS μπορεί να κατασκευάσει σταγονίδια πολύ πιο γρήγορα. Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι

οι ανεπιθύμητες σταγόνες πρέπει είτε να απορριφθούν είτε να επαναχρησιμοποιηθούν, κάτι που μπορεί να σπαταλήσει υλικό ή να μειώσει τη στεριότητα του ανακυκλωμένου υγρού.

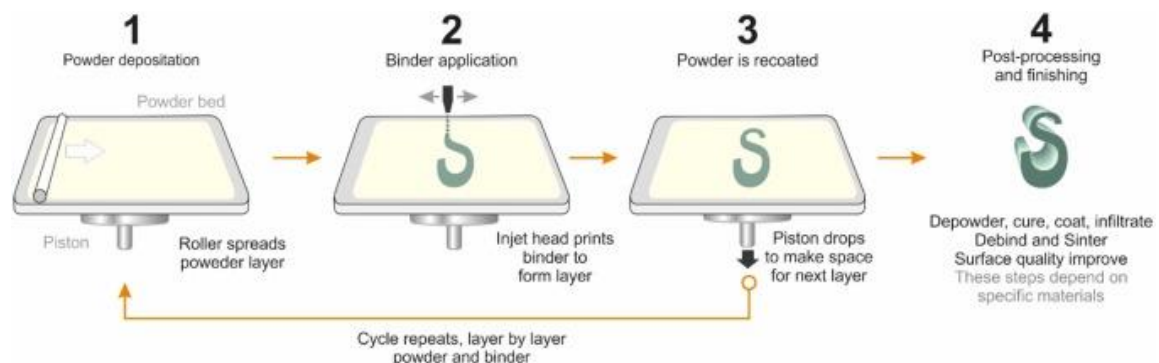
2.2.2 Εκτόξευση Συνδετικού Υλικού (Binder Jetting - BJ)

Η τεχνολογία Εκτόξευσης Συνδετικού Υλικού (BJ), όπως περιγράφεται από τους Sachs et al., αποτελεί μια συγχώνευση των τεχνικών Μικροεκτόξευσης Υλικού (MJ-AM) και Εκτύπωσης Σκόνης με Laser (PBF-AM) . Συχνά αναφέρεται και ως εκτύπωση inkjet, και είναι η δεύτερη πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία . Η εγκατάσταση BJ αποτελείται από δύο βασικούς θαλάμους: έναν που λειτουργεί ως δεξαμενή σκόνης και έναν άλλον που περιέχει την πλατφόρμα κατασκευής .



Σχήμα 8 : Σχηματικό διάγραμμα εκτόξευσης συνδετικού υλικού (BJ) (πηγή: Siencedirect)

Η διαδικασία BJ συνδέει σωματίδια που μπορεί να είναι πολυμερή , κεραμικά , μέταλλα ή σύνθετα υλικά , σύμφωνα με ένα τρισδιάστατο μοντέλο, μέσω της χρήσης ενός αριθμού ακροφυσίων που εκτοξεύουν ένα υγρό συνδετικό υλικό πάνω στην κλίνη σκόνης. Η διαδικασία ξεκινά με την εναπόθεση μιας λεπτής στρώσης συνδετικού υλικού στην κλίνη εκτύπωσης, η οποία ακολούθως επικαλύπτεται με στρώματα σκόνης που σχηματίζουν το σχέδιο της τρέχουσας στρώσης . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ολοκληρωθεί η κατασκευή του τελικού αντικειμένου, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.



Σχήμα 9 : Διαδικασία εκτύπωσης 3D Binder Jetting (πηγή: Siencedirect)

Η τεχνολογία BJ δεν απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες ή λέιζερ για την κατασκευή του αντικειμένου, καθώς η συγκόλληση των σωματιδίων επιτυγχάνεται μέσω του υγρού συνδετικού υλικού και όχι με πυροσυσσωμάτωση ή τήξη. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή μεγάλων εξαρτημάτων με σχετικά χαμηλό κόστος. Το παραγόμενο αντικείμενο, γνωστό και ως "πράσινο σώμα", αφαιρείται από την πλατφόρμα κατασκευής για περαιτέρω μετα-επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει ενοποίηση με βάση την ενέργεια για τη βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος.

Διαδικασία και Μετα-Επεξεργασία στο BJ

Η διαδικασία BJ περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Εκτύπωση: Η διαδικασία εκτύπωσης BJ παραμένει σταθερή από την αρχική της μορφή, ανεξάρτητα από το υλικό.
- Κύκλος Σκλήρυνσης: Το BJ χρησιμοποιεί συχνά έναν κύκλο σκλήρυνσης για να εξαλείψει το συνδετικό υλικό και να ενισχύσει τη δέσμευση μεταξύ των σωματιδίων μέσω περαιτέρω πολυμερισμού και διασύνδεσης.
- Αποκονίωση: Μετά τη σκλήρυνση, το "πράσινο σώμα" καθαρίζεται από περιττή σκόνη για να είναι αρκετά ανθεκτικό για χειρισμό.
- Πυρόλυση/Εξουθένωση: Τα σκληρυμένα πράσινα σώματα υφίστανται πυρόλυση για την εξάλειψη του υπολειπόμενου συνδετικού υλικού.
- Πυροσυσσωμάτωση ή Διείσδυση: Για την επίτευξη της επιθυμητής πυκνότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων, πραγματοποιείται περαιτέρω πυκνωση.
- Φινιρίσμα: Το τελικό προϊόν υφίσταται διαδικασίες φινιρίσματος για τη βελτίωση της επιφάνειας.

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της BJ

Η BJ διαθέτει αρκετά πλεονεκτήματα:

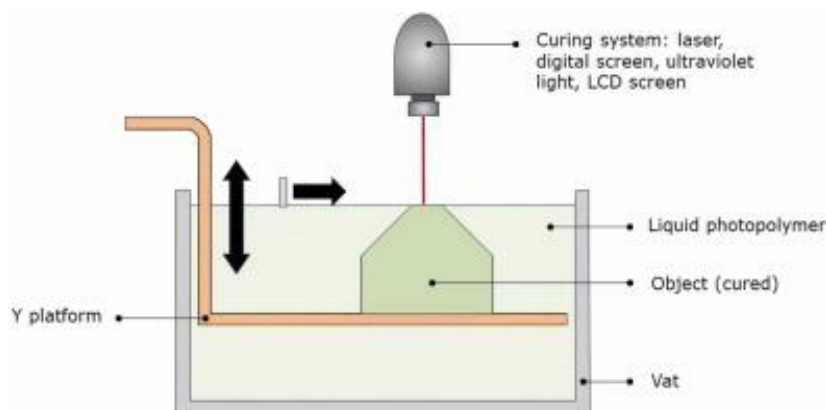
- Είναι συμβατή με σχεδόν όλα τα κονιοποιημένα υλικά.
- Δεν απαιτείται ειδική θερμική επεξεργασία κατά την κατασκευή, μειώνοντας τις τάσεις και τις στρεβλώσεις στα εξαρτήματα.
- Είναι μια διαδικασία υψηλής ταχύτητας και χαμηλού κόστους, κατάλληλη για μαζική παραγωγή.

Ωστόσο, έχει και σημαντικά **μειονεκτήματα**:

- Οι μετα-επεξεργασίες πυκνότητας και σκλήρυνσης είναι απαραίτητες, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε γεωμετρική παραμόρφωση.
- Παρουσιάζει χαμηλότερη ανάλυση και υψηλότερη τραχύτητα επιφάνειας σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.
- Η διαδικασία BJ είναι λιγότερο ακριβής στην κατασκευή εξαρτημάτων από κράματα, και το παραγόμενο προϊόν παρουσιάζει χαμηλότερη αντοχή σε σύγκριση με άλλες τεχνικές.

2.2.3 Πολυμερισμός Vat (VP)

Η τεχνολογία Πολυμερισμού Vat (Vat Photopolymerization - VP) βασίζεται στην εκτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω της σταδιακής σκλήρυνσης υγρών φωτοπολυμερών ρητινών υπό την επίδραση υπεριώδους φωτός (UV-Vis). Η βασική αρχή της διαδικασίας είναι η εκλεκτική έκθεση της ρητίνης στο φως, που προάγει τον πολυμερισμό της και, κατ' επέκταση, τη στερεοποίησή της, με αποτέλεσμα να δημιουργείται το επιθυμητό αντικείμενο στρώμα προς στρώμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.[11]



Σχήμα 10 : Σχηματικό διάγραμμα φωτοπολυμερισμού ΦΠΑ (VP) (πηγή: Siencedirect)

Πλεονεκτήματα του VP

- Ακρίβεια διαστάσεων και φινίρισμα επιφάνειας: Η τεχνολογία VP ξεχωρίζει για την υψηλή ακρίβεια και την ποιότητα φινιρίσματος που επιτυγχάνεται στα τελικά προϊόντα. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα σε εφαρμογές που απαιτούν λεπτομέρεια και υψηλή ποιότητα, όπως στην κατασκευή ιατρικών και οδοντιατρικών εμφυτευμάτων, καθώς και κοσμημάτων.
- Πολύπλοκες γεωμετρίες: Η δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων δομών με εξαιρετικά μικρές λεπτομέρειες είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του VP, που καθιστά αυτή την τεχνολογία ιδανική για την κατασκευή εξαρτημάτων με πολύπλοκα σχήματα.

Περιορισμοί του VP

- Κόστος: Ένας από τους μεγαλύτερους περιορισμούς της τεχνολογίας VP είναι το υψηλό κόστος των υλικών και του εξοπλισμού, κάτι που μπορεί να περιορίσει την εφαρμογή της σε βιομηχανίες που απαιτούν μεγαλύτερη κλίμακα παραγωγής.
- Περιορισμένη επιλογή υλικών: Η τεχνολογία VP χρησιμοποιεί αποκλειστικά φωτοσκλήρυνόμενα πολυμερή, περιορίζοντας την ποικιλία των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κατά συνέπεια την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου σε διαφορετικούς τομείς.
- Αφαίρεση δομών στήριξης και μεταεπεξεργασία: Η διαδικασία παραγωγής με τη χρήση VP συχνά απαιτεί την προσθήκη υποστηρικτικών δομών, οι οποίες πρέπει να αφαιρεθούν χειροκίνητα μετά την εκτύπωση. Επιπλέον, η ανάγκη για

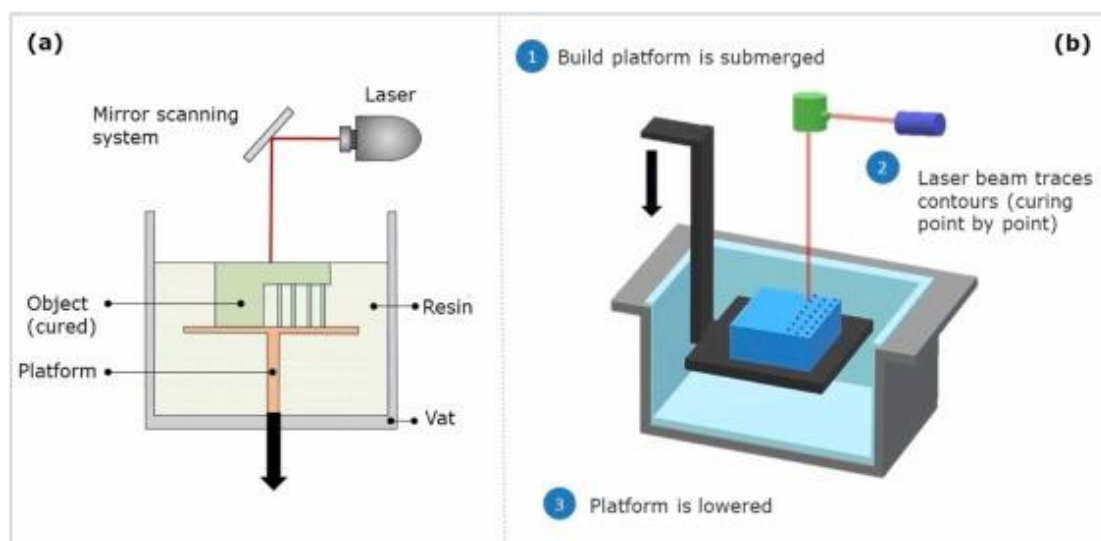
μεταεπεξεργασία των τελικών προϊόντων αποτελεί επιπρόσθετο βήμα που αυξάνει τον χρόνο και το κόστος παραγωγής.

Νέες εξελίξεις

Για να αντιμετωπιστούν αυτοί οι περιορισμοί και να επεκταθεί η χρήση της τεχνολογίας VP, έχουν αναπτυχθεί νέες ρητίνες και υλικά, όπως νανοσύνθετα, που ενσωματώνουν νανοκλίμακας ενισχύσεις. Αυτές οι προσθήκες προσφέρουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και διευρύνουν το φάσμα εφαρμογών της τεχνολογίας.

2.2.3.1 Στερεολιθογραφία (SLA)

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος που χρησιμοποιείται στη διαδικασία Πολυμερισμού Vat (VP-AM). Στηρίζεται στη χρήση λογισμικού CAD/CAM για τον προγραμματισμένο σχεδιασμό του τρισδιάστατου αντικειμένου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συγκέντρωση ενός λέιζερ UV σε μια δεξαμενή γεμάτη με φωτοπολυμερή υγρή ρητίνη. Το λέιζερ προκαλεί φωτοχημικό πολυμερισμό της ρητίνης, στερεοποιώντας την για να σχηματίσει ένα στρώμα του επιθυμητού αντικειμένου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε επίπεδο του σχεδίου μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του 3D αντικειμένου, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 11α και σχήμα 11β.



Σχήμα 11 : Διαγραμματική αναπαράσταση στερεολιθογραφίας (SLA) (πηγή: Siencedirect)

Πλεονεκτήματα της SLA

Υψηλή ανάλυση και ταχύτητα: Η SLA προσφέρει εξαιρετική ανάλυση και ταχύτητα, καθιστώντας την ιδανική για την κατασκευή αντικειμένων με λεπτομερείς γεωμετρίες και υψηλή ακρίβεια διαστάσεων.

Μειονεκτήματα της SLA

- **Ανάγκη για δομές στήριξης:** Για να αποφευχθούν παραμορφώσεις που προκαλούνται από τη βαρύτητα ή για να στηριχθούν νέα τμήματα του αντικειμένου κατά την εκτύπωση, απαιτούνται δομές στήριξης. Αυτές οι δομές πρέπει να αφαιρεθούν χειροκίνητα μετά την εκτύπωση, γεγονός που προσθέτει επιπλέον βήματα στη διαδικασία και αυξάνει τον χρόνο και το κόστος παραγωγής .
- **Χρονοβόρα διαδικασία:** Παρά την ταχύτητα εκτύπωσης σε σχέση με άλλες μεθόδους AM, κάθε στρώμα κατασκευάζεται μέσω μιας γραμμής λέιζερ UV που διατρέχει την επιφάνεια της ρητίνης. Αυτή η γραμμή προς γραμμή διαδρομή μπορεί να είναι χρονοβόρα, ειδικά για αντικείμενα με μεγάλο όγκο ή υψηλή πολυπλοκότητα .
- **Περιορισμένη βιοϊατρική χρησιμότητα:** Η υπεριώδης ακτινοβολία, αν και απαραίτητη για τον πολυμερισμό της ρητίνης, μπορεί να προκαλέσει βλάβες σε ζωντανά κύτταρα και ιστούς. Αυτό περιορίζει την εφαρμογή της SLA σε βιοϊατρικές εφαρμογές που απαιτούν την άμεση χρήση ή επαφή του εκτυπωμένου υλικού με το ανθρώπινο σώμα .

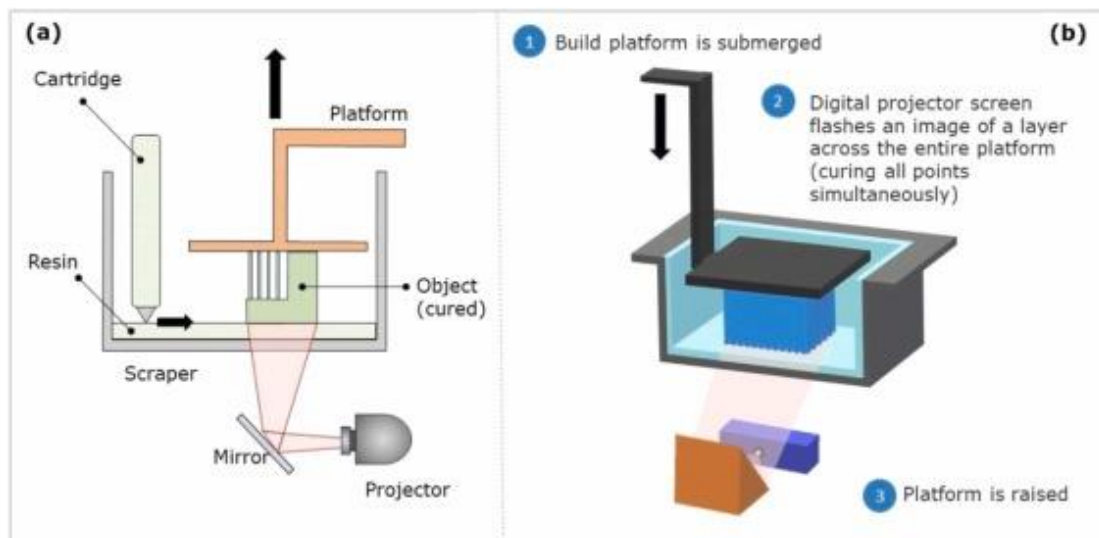
Παρά τα πλεονεκτήματά της, οι περιορισμοί της SLA απαιτούν περαιτέρω εξελίξεις και προσαρμογές, ειδικά για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως αυτές στη βιοϊατρική.

2.2.3.2 Ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP) και συνεχής φύση υγρής διεπαφής (CLIP)

Οι τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας Φωτός (DLP) και Συνεχούς Φύσης Υγρής Διεπαφής (CLIP) αναπτύχθηκαν για να αντιμετωπίσουν τα μειονεκτήματα της παραδοσιακής μεθόδου SLA.

Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (DLP)

Η DLP, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 12α, χρησιμοποιεί ψηφιακή μικροσκοπία για να προβάλλει μια φωτομάσκα που θεραπεύει ολόκληρο το στρώμα της φωτοπολυμερούς ρητίνης ταυτόχρονα. Αυτή η διαδικασία, που φαίνεται στο σχήμα 12β, επιτρέπει ταχύτερη κατασκευή αντικειμένων σε σύγκριση με τη μέθοδο SLA, όπου το λέιζερ θεραπεύει κάθε σημείο του στρώματος διαδοχικά.



Σχήμα 12 : Σχηματικό διάγραμμα ψηφιακής επεξεργασίας φωτός (DLP) (πηγή: Siencedirect)

Συνεχής Φύση Υγρής Διαπεφής (CLIP)

Η CLIP προχωρά ένα βήμα παραπέρα, επιτρέποντας τη συνεχόμενη κατασκευή αντικειμένων χωρίς το παραδοσιακό στρώμα προς στρώμα σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας "νεκρής ζώνης" μη σκληρυμένης ρητίνης που δημιουργείται ανάμεσα στη σκληρυμένη ρητίνη και μια μεμβράνη διαπερατή από οξυγόνο. Το οξυγόνο λειτουργεί ως αναστολέας του φωτοπολυμερισμού, εμποδίζοντας τη ρητίνη να προσκολληθεί στο υπόστρωμα εκτύπωσης. Ως αποτέλεσμα, τα αντικείμενα μπορούν να εκτυπωθούν με συνεχόμενη κίνηση, και όχι διακοπτόμενα στρώμα προς στρώμα, καθιστώντας την διαδικασία πολύ ταχύτερη με ταχύτητες που φτάνουν έως και 100 φορές αυτές του DLP.

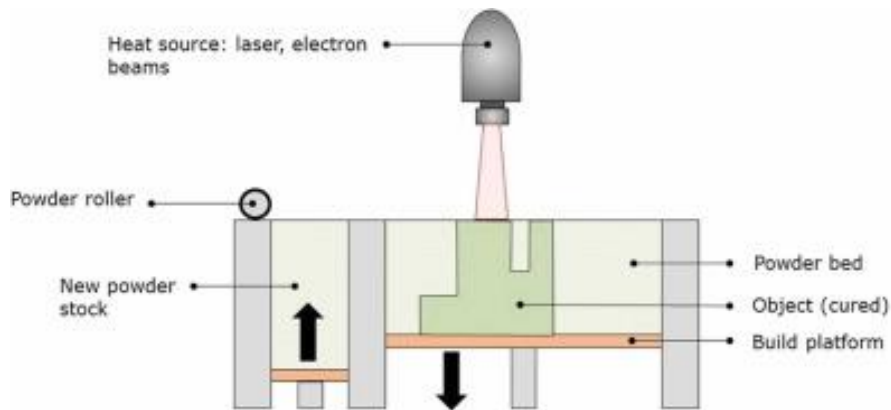
Πλεονεκτήματα της CLIP

- Ταχύτητα: Η δυνατότητα για συνεχή εκτύπωση επιτρέπει τη δραματική μείωση του χρόνου κατασκευής, καθιστώντας την CLIP εξαιρετικά αποδοτική για γρήγορη παραγωγή.
- Ισότροπες Μηχανικές Ιδιότητες: Επειδή η εκτύπωση δεν πραγματοποιείται στρώμα προς στρώμα, το τελικό αντικείμενο εμφανίζει ισότροπες μηχανικές ιδιότητες, δηλαδή οι ιδιότητες του υλικού είναι ομοιόμορφες σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό είναι σημαντικό για την παραγωγή αντικειμένων υψηλής αντοχής και αξιοπιστίας.

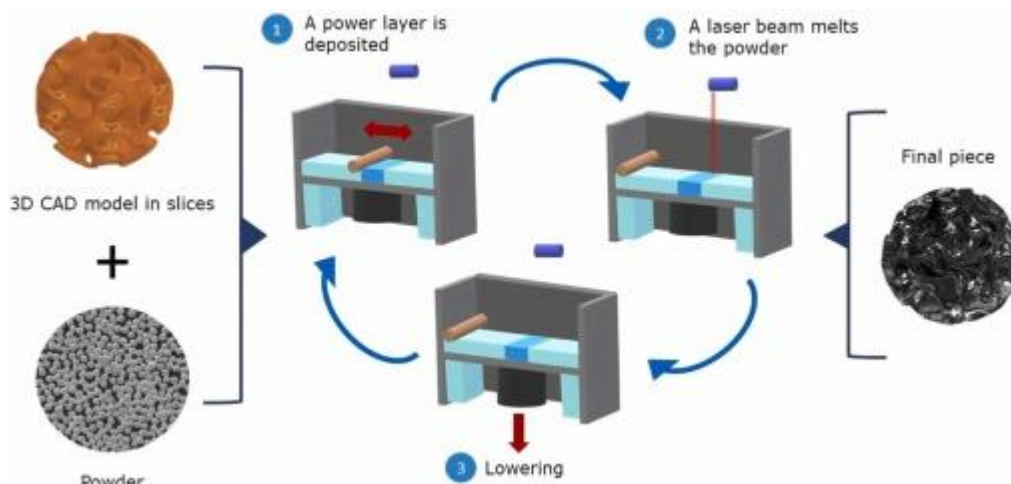
Αυτές οι τεχνικές, και ειδικά η CLIP, αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πρόοδο στις διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, προσφέροντας όχι μόνο ταχύτητα αλλά και καλύτερη ποιότητα και ομοιογένεια στο τελικό προϊόν.

2.2.4 Σύντηξη σε κλίνη σκόνης (PBF)

Η τεχνική Σύντηξης σε Κλίνη Σκόνης (PBF), όπως απεικονίζεται στο σχήμα 13, είναι μια προηγμένη μέθοδος προσθετικής κατασκευής (AM) που βασίζεται στην τήξη κονιοποιημένων υλικών, όπως πολυμερή, μέταλλα ή κεραμικά, χρησιμοποιώντας θερμική ενέργεια (π.χ., λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων). Η διαδικασία ξεκινά με την πυροσυσσωμάτωση ενός στρώματος σκόνης, το οποίο ακολουθείται από την προσθήκη ενός νέου στρώματος σκόνης πάνω από το ολοκληρωμένο στρώμα. Η δέσμη ενέργειας κατευθύνεται στην κλίνη σκόνης για να δημιουργήσει μια φέτα του αντικείμενου σύμφωνα με τα τρισδιάστατα δεδομένα, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.



Σχήμα 13 : Σχηματικό διάγραμμα σύντηξης σε κλίνη σκόνης (PBF) (πηγή: Siencedirect)



Σχήμα 14 : Διαδικασία σύντηξης σκόνης (PBF) (πηγή: Siencedirect)

Χαρακτηριστικά και Εφαρμογές του PBF

- Ακρίβεια και Ανάλυση: Το PBF επιτυγχάνει εξαιρετική ακρίβεια διαστάσεων και υψηλή ποιότητα εκτύπωσης, κάτι που το καθιστά ιδανικό για την κατασκευή αντικειμένων με περίπλοκες δομικές λεπτομέρειες.

- **Υλικά:** Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την εκτύπωση ενός ευρέος φάσματος υλικών, όπως σύνθετα υλικά, μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή, προσφέροντας σημαντική ευελιξία στις εφαρμογές της.
- **Τομείς Χρήσης:** Η PBF χρησιμοποιείται ευρέως σε τομείς αιχμής, όπως η αεροδιαστημική, η ηλεκτρονική, και η μηχανική ιστών, όπου απαιτούνται αντικείμενα με υψηλή ακρίβεια και πολυπλοκότητα.

Μειονεκτήματα και Περιορισμοί

Παρά τα πλεονεκτήματα, η PBF έχει ορισμένα μειονεκτήματα που περιορίζουν τη χρήση της:

- **Χρόνος και Κόστος:** Η τεχνική έχει αργό χρόνο επεξεργασίας και υψηλό κόστος, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για ορισμένες εφαρμογές.
- **Πορώδες Προϊόντων:** Τα τελικά προϊόντα μπορεί να παρουσιάζουν υψηλό πορώδες, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται συνδεδετικά υλικά.
- **Επιλογή Σκόνης:** Οι παράμετροι που αφορούν τα σωματίδια σκόνης, όπως το σχήμα, η κατανομή μεγέθους και το μέγεθος των σωματιδίων, πρέπει να επιλέγονται με προσοχή για την επίτευξη των καλύτερων αποτελεσμάτων. Συνήθως, προτιμώνται σφαιρικά σωματίδια συγκεκριμένου μεγέθους.

Υποκατηγορίες της PBF

Η PBF χωρίζεται σε τέσσερις κύριες υποκατηγορίες:

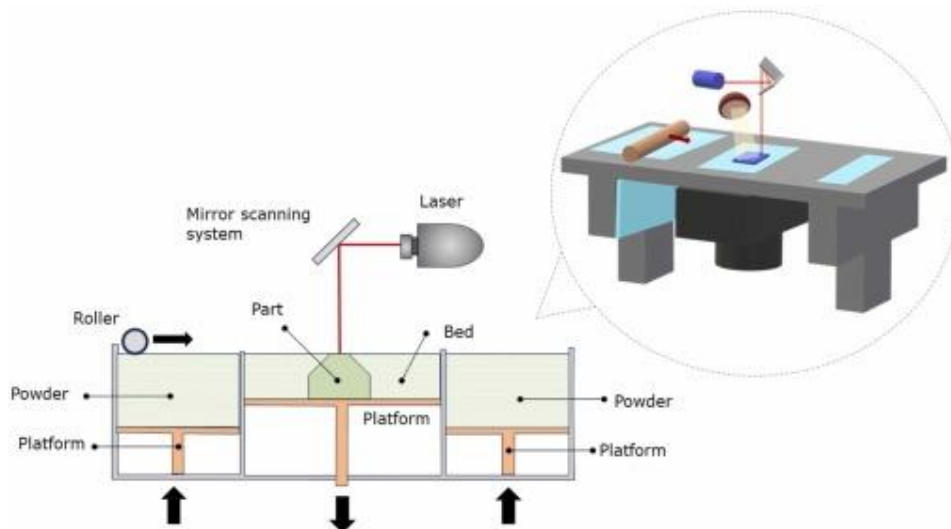
1. Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση Λείζερ (SLS): Χρησιμοποιείται κυρίως για πλαστικά.
2. Άμεση Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ Μετάλλων (DMLS): Εφαρμόζεται για μέταλλα, συμπεριλαμβανομένων των κραμάτων.
3. Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ (SLM): Επίσης χρησιμοποιείται για μέταλλα, με παρόμοια διαδικασία όπως το DMLS.
4. Τήξη Δέσμης Ηλεκτρονίων (EBM): Παρόμοια με το SLM, αλλά χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για λέιζερ για την τήξη των μεταλλικών σωματιδίων.

Η κατανόηση των διαφορετικών αυτών τεχνικών είναι κρίσιμη για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου PBF, ανάλογα με τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος και το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί.

2.2.4.1. Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση λέιζερ (SLS)

Η τεχνική Selective Laser Sintering (SLS), όπως φαίνεται στο σχήμα 15, περιλαμβάνει τη θέρμανση μικροσκοπικών σωματιδίων με τη χρήση ισχυρού λέιζερ, ώστε να φτάσουν σε θερμοκρασίες που επιτρέπουν στα μόρια να συγχωνευθούν χωρίς να λιώσουν πλήρως. Για να επιτευχθεί αυτό, η δέσμη ενέργειας πρέπει να ρυθμιστεί με ακρίβεια. Για παράδειγμα, τα συστήματα SLS χρησιμοποιούν λέιζερ CO₂, με

έλεγχο θαλάμου και ισχύ εξόδου στην περιοχή των 30-200 W. Η τεχνική SLS εφαρμόζεται για την πυροσυσσώματωση οποιουδήποτε κονιοποιημένου υλικού που δεν αποσυντίθεται υπό δέσμη λέιζερ, όπως πολυμερή (π.χ. πολυαιθερική κετόνη, PEEK) ή κεραμικά (π.χ. υδροξυαπατίτης, HA) .



Σχήμα 15 : Σχηματικό διάγραμμα διεργασιών SLS/SLM (πηγή: Siencedirect)

Η SLS έχει χρησιμοποιηθεί για την πυροσυσσώματωση μιας σειράς υλικών σε μορφή σκόνης, όπως πολυαμίδιο, χάλυβας, τιτάνιο, μεταλλικά κράματα και κεραμικές σκόνες. Ωστόσο, αυτή η τεχνική πλέον δεν χρησιμοποιείται συχνά για την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων .

2.2.4.2. Άμεση Πυροσυσσώματωση Λείζερ Μετάλλων (DMLS)

Η Άμεση Πυροσυσσώματωση Λείζερ Μετάλλων (DMLS) είναι μια καταξιωμένη μέθοδος για την παραγωγή μεταλλικών κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική και η οδοντιατρική. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας DMLS, δημιουργείται υγρή φάση, γεγονός που σημαίνει ότι η ίδια η σκόνη δεν μπορεί να λειτουργήσει ως στήριγμα, καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση εξωτερικών υποστηρικτικών δομών.

Η σκόνη που χρησιμοποιείται στην DMLS αποτελείται από δομικά συστατικά και συνδετικά υλικά, τα οποία μπορούν να παραχθούν με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

a) Ξεχωριστά σωματίδια: Η τελική σκόνη περιέχει ξεχωριστά δομικά και συνδετικά σωματίδια που έχουν αναμιχθεί σχολαστικά. Μικρότερα σωματίδια συνδετικού υλικού μπορούν να οδηγήσουν σε μικρότερη συρρίκνωση και μειωμένο πορώδες στα τελικά προϊόντα, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία.

b) Σύνθετα σωματίδια: Αυτά τα σωματίδια περιέχουν τόσο δομικά όσο και συνδετικά στοιχεία σε κάθε μεμονωμένο σωματίδιο. Η δημιουργία σύνθετων σωματιδίων γίνεται συχνά μέσω μηχανικού κραματισμού. Αυτά τα σωματίδια προσφέρουν

βελτιωμένη ποιότητα επιφάνειας στα τελικά προϊόντα σε σύγκριση με τα ξεχωριστά σωματίδια.

c) Επικαλυμμένα σωματίδια: Τα σωματίδια αυτά διαθέτουν δομικό υλικό επικαλυμμένο με συνδετικό υλικό, βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά ροής, την απορρόφηση ενέργειας από το λέιζερ και τη συνοχή των σωματιδίων.

d) Προ-κραματοποιημένα σωματίδια: Κάθε σωματίδιο είναι ένα κράμα που περιέχει και τα δομικά και τα συνδετικά συστατικά. Αυτός ο τύπος σωματιδίων δεν μπορεί να διαχωριστεί σε επιμέρους τμήματα, διαφοροποιώντας τον από τα σύνθετα σωματίδια. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, μόνο ένα μέρος του σωματιδίου λιώνει, και η δημιουργία υγρής φάσης οδηγεί σε αναδιάταξη των σωματιδίων, χωρίς να τα διασπάσει σε μικρότερα κομμάτια.

2.2.4.3. Επιλεκτική Τήξη Λείζερ (SLM)

Η Επιλεκτική Τήξη Λείζερ (SLM) είναι μια προηγμένη μέθοδος που χρησιμοποιεί ισχυρή ενέργεια λέιζερ για να λιώσει και να συγχωνεύσει σωματίδια σκόνης (όπως ανοξείδωτο χάλυβα 316L, κράματα κοβαλτίου-χρωμίου και τιτανίου) στρώμα προς στρώμα. Η διαδικασία καθοδηγείται από δεδομένα CAD, με το λέιζερ να λιώνει τη σκόνη και να συνδέει τα νέα στρώματα με τα ήδη σχηματισμένα, δημιουργώντας τελικά ένα τρισδιάστατο προϊόν με συμπαγή δομή, εξαιρετική διαστασιακή ακρίβεια και άριστες μηχανικές ιδιότητες .

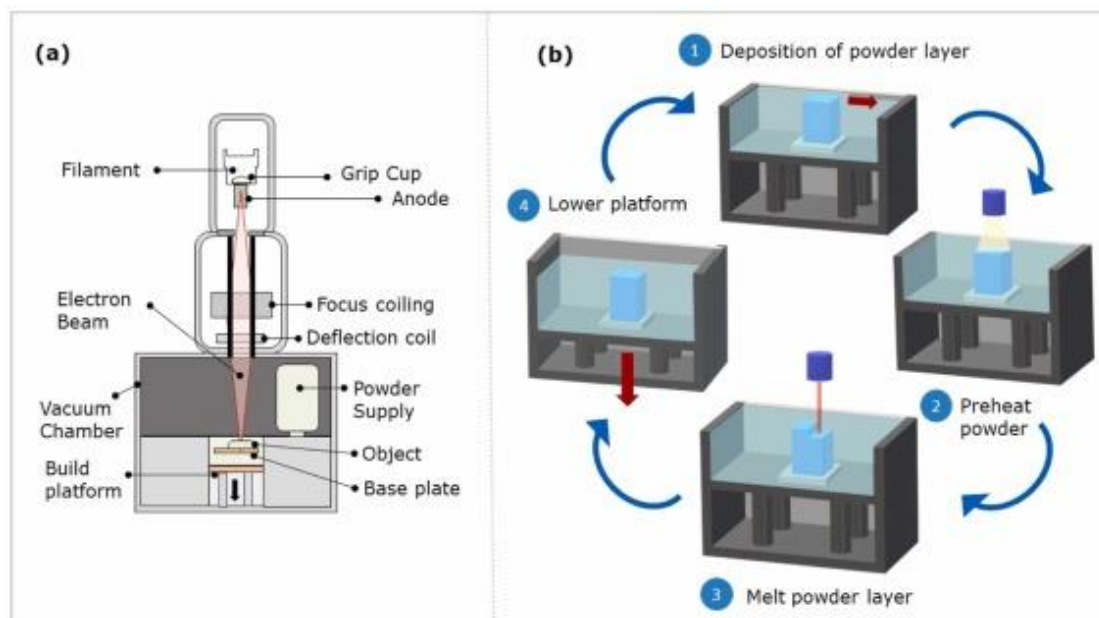
Με την εισαγωγή σύγχρονων μηχανών που διαθέτουν τεχνολογία πολλαπλών λέιζερ, έχει καταστεί δυνατή η εκτύπωση με στρώματα πάχους 75-150 μm, ενισχύοντας την ακρίβεια και την ταχύτητα παραγωγής . Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά στο SLM είναι μεταλλικά κράματα και ημικρυσταλλικά πολυμερή. Για παράδειγμα, το νάιλον, ένα ημικρυσταλλικό πολυμερές, πρέπει να λιώσει πλήρως για να επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή του υλικού. Μεταλλικά μέρη από κράματα όπως χρώμιο-κοβάλτιο, χάλυβα, ανοξείδωτο χάλυβα, αλουμίνιο και τιτάνιο έχουν εξαιρετικές ιδιότητες όταν κατασκευάζονται με τη μέθοδο SLM, χάρη στις υψηλές θερμοκρασίες τήξης και στερεοποίησης που επιτυγχάνει η διαδικασία, προσφέροντας χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τις παραδοσιακές τεχνικές χύτευσης .

Παρόλα αυτά, η τεχνική SLM παρουσιάζει προκλήσεις, όπως η οξείδωση των μεταλλικών σωματιδίων κατά τη διαδικασία τήξης. Τα σωματίδια με οξείδιο στην επιφάνειά τους έχουν μειωμένη διαβρεξιμότητα, και τα παγιδευμένα οξείδια μέσα στο λιωμένο μέταλλο μπορούν να δημιουργήσουν αδύναμα σημεία στο τελικό προϊόν, επηρεάζοντας τις μηχανικές του ιδιότητες. Επιπλέον, μέταλλα με υψηλή ανακλαστικότητα, όπως το αλουμίνιο, απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ λέιζερ, αυξάνοντας το κόστος ενέργειας και υλικών λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας αυτών των μετάλλων .

2.2.4.4. Τήξη Δέσμης Ηλεκτρονίων (EBM)

Η Τήξη Δέσμης Ηλεκτρονίων (EBM) είναι μια τεχνική παρόμοια με την Επιλεκτική Τήξη Λείζερ (SLM), αλλά χρησιμοποιεί μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας για να λιώσει σωματίδια μεταλλικής σκόνης αντί για λέιζερ. Στο EBM, δύο

μαγνητικά πεδία εστιάζουν τα ηλεκτρόνια στο επιθυμητό σημείο με διάμετρο περίπου 0,1 mm, αφού εκπέμπονται από ένα θερμό νήμα βολφραμίου. Όταν η δέσμη χτυπά την κλίνη σκόνης, η κινητική ενέργεια των γρήγορων ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία προκαλεί την τήξη της σκόνης.



Σχήμα 16 : Σχηματικό διάγραμμα και διαδικασία του συστήματος EBM (πηγή: Siencedirect)

Η μονάδα EBM περιλαμβάνει ένα σύστημα διανομής σκόνης, έναν θάλαμο κενού (10⁻⁴ torr), μια δεξαμενή κατασκευής και πιστόλια δέσμης ηλεκτρονίων. Η σκόνη τροφοδοτείται στο κρεβάτι μέσω ενός πλαισίου τσουγκράνας και θερμαίνεται από τη δέσμη ηλεκτρονίων στο αρχικό στάδιο. Αυτό αρχικά προκαλεί ένα παχύ στρώμα σκόνης, το οποίο σταδιακά μειώνεται σε κατάλληλο πάχος με την τήξη του. Μετά την ολοκλήρωση κάθε στρώματος, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει κατά ένα συγκεκριμένο πάχος (0,05-0,2 mm), και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Η ψύξη, που μπορεί να διαρκέσει έως και 6 ώρες ανάλογα με το μέγεθος και τη φύση του αντικειμένου, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ήλιο.

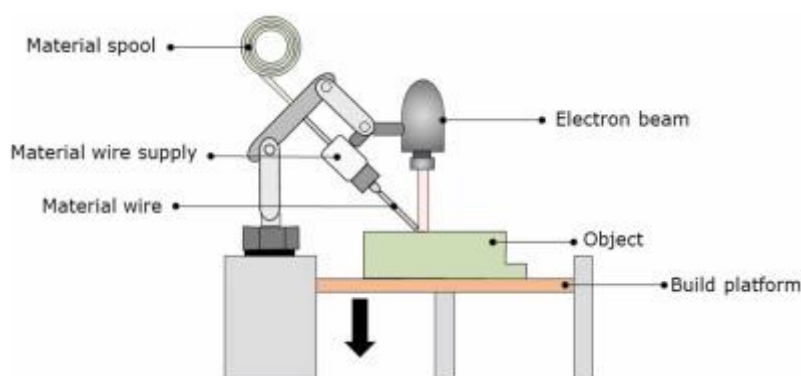
Το EBM χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η ιατρική και η αεροδιαστημική για την κατασκευή εξαρτημάτων από υπερκράματα, τιτάνιο και κράματα κοβαλτίου, όπως το Inconel 718. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του EBM έναντι της τεχνολογίας λέιζερ είναι το χαμηλότερο κόστος ενέργειας για την ίδια ενέργεια εισόδου, καθώς και η γρήγορη κίνηση της δέσμης, που επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία κατασκευής. Επιπλέον, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας κλίνης στο EBM σε σύγκριση με την τεχνολογία λέιζερ, παρατηρούνται ελάχιστες υπολειμματικές τάσεις στα παραγόμενα εξαρτήματα, γεγονός που θεωρείται σημαντικό πλεονέκτημα.

Ωστόσο, η τεχνική EBM έχει περιορισμούς, κυρίως στην επιλογή των υλικών. Μόνο μεταλλικές σκόνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς η αγωγιμότητα της κλίνης

σκόνης είναι κρίσιμη για την αποφυγή φόρτισης των ηλεκτρονίων. Επιπλέον, η ηλεκτρική αγωγιμότητα από την πλάκα στη σκόνη είναι απαραίτητη για την αποφυγή συσσώρευσης φορτίου, που θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά τη διαδικασία.

2.2.5. Εναπόθεση Κατευθυνόμενης Ενέργειας (DED)

Η Εναπόθεση Κατευθυνόμενης Ενέργειας (DED), όπως φαίνεται στο σχήμα 17, συχνά αναφέρεται ως Άμεση Εναπόθεση Μετάλλων (DMD) και λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τη Μέθοδο FDM. Το DED είναι μια ευέλικτη τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορα υλικά, όπως σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, πολυμερή και κεραμικά, αν και είναι πιο διαδεδομένη για την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων.



Σχήμα 17 : Σχηματικό Άμεσης εναπόθεσης ενέργειας (DED) (πηγή: Siencedirect)

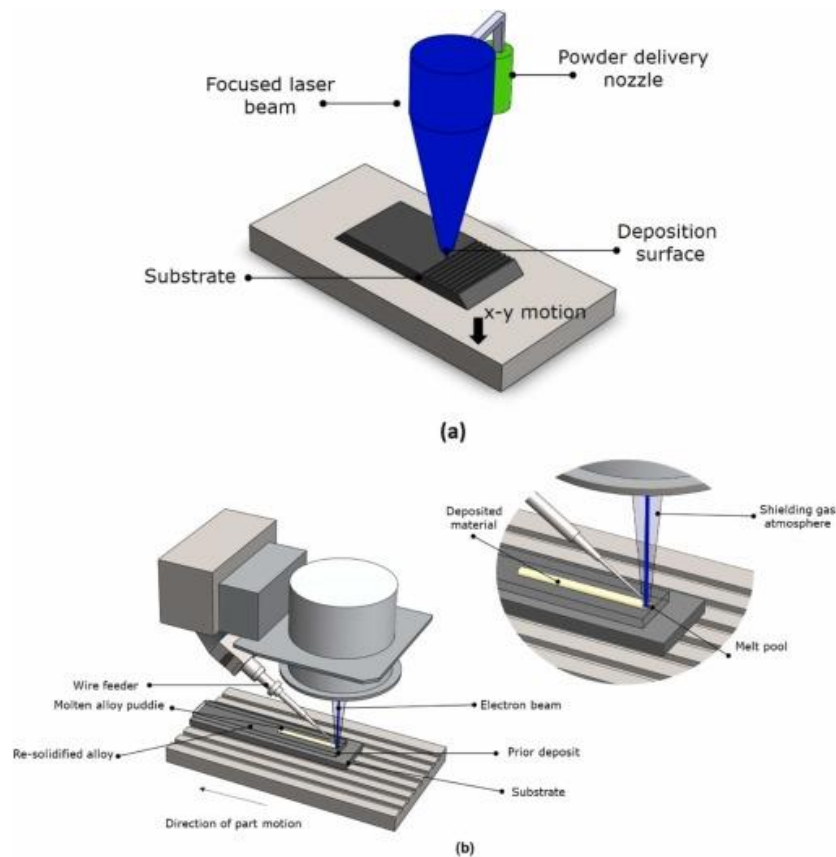
Στην τεχνολογία DED, η κεφαλή εκτύπωσης λιώνει το μέταλλο, το οποίο μπορεί να είναι σε μορφή σκόνης ή σύρματος, χρησιμοποιώντας μια δέσμη ηλεκτρονίων ή λέιζερ. Το λιωμένο μέταλλο εξωθείται από το ακροφύσιο και στη συνέχεια ψύχεται για να σχηματίσει το επιθυμητό σχήμα. Παρόμοια με την εξώθηση υλικού (ME), το DED επιτρέπει στο ακροφύσιο να κινείται σε πολλαπλές κατευθύνσεις, έως και πέντε άξονες, σε αντίθεση με τους τρεις άξονες που είναι τυπικοί στις μηχανές ME. Αυτή η ευελιξία καθιστά το DED ιδανικό για την κατασκευή προϊόντων υψηλής ποιότητας και για εργασίες συντήρησης.

Κοινές Τεχνολογίες DED

Optomec LENS Technology: Τα συστήματα LENS (Laser Engineered Net Shaping) χρησιμοποιούν λέιζερ για την κατασκευή προϊόντων στρώμα προς στρώμα, χρησιμοποιώντας μεταλλικές σκόνες, κράματα, κεραμικά ή σύνθετα υλικά. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε σφραγισμένο χώρο με αργό για να διατηρούνται εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα οξυγόνου και υγρασίας, αποφεύγοντας την οξείδωση και διασφαλίζοντας την καθαρότητα του τελικού προϊόντος. Μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης, το αντικείμενο μπορεί να υποβληθεί σε περαιτέρω επεξεργασία, όπως θερμική επεξεργασία, ισοστατική συμπίεση, κατεργασία ή γυάλισμα.

Optomec Aerosol Jet Technology: Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται για την εκτύπωση λειτουργικών κεραιών και ηλεκτρονικών συσκευών σε πολύπλοκες επιφάνειες, με εφαρμογές στην κατασκευή ηλεκτρονικών, αεροδιαστημικών συστημάτων και βιοεπιστημών. Η τεχνολογία Aerosol Jet είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την κατασκευή και τη συντήρηση συσκευών υψηλής απόδοσης, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων ημιαγωγών και αγώγιμων μετάλλων.

Laser Deposition Welding (LDW) and Hybrid Manufacturing: Η τεχνολογία LDW-AM, όπως ενσωματώνεται στις μηχανές 5 αξόνων της DMG MORI, συνδυάζει την προσαρμοστικότητα της τεχνολογίας εναπόθεσης μετάλλων λέιζερ με την ακρίβεια της κατεργασίας, επιτρέποντας την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας.



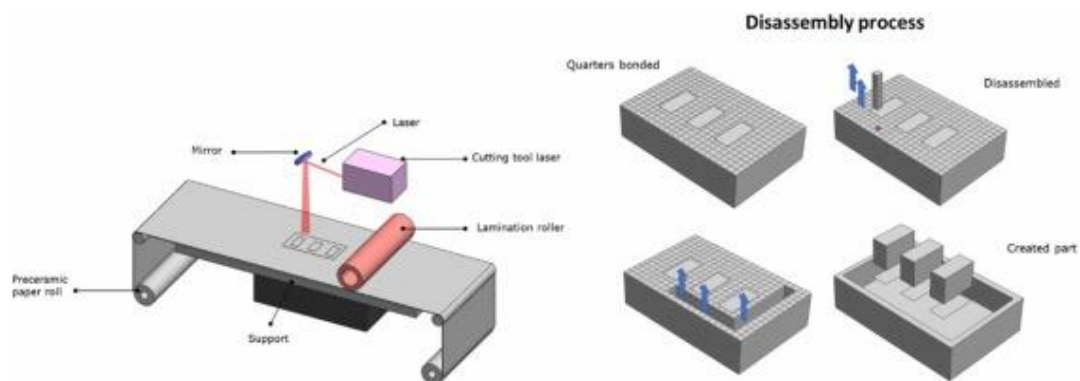
Σχήμα 18 : Σχηματικό διάγραμμα α) συστήματος τροφοδοσίας σκόνης λέιζερ και β) συστήματος τροφοδοσίας σύρματος δέσμης ηλεκτρονίων. (πηγή: Siencedirect)

Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM): Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί μια δέσμη ηλεκτρονίων για την κατασκευή μεγάλων μεταλλικών εξαρτημάτων, με ρυθμούς απόθεσης μετάλλων που κυμαίνονται από 3 έως 9 κιλά ανά ώρα. Το EBAM είναι ιδανικό για τη δημιουργία μαζικών μεταλλικών εξαρτημάτων από τιτάνιο, ταντάλιο και νικέλιο, και χρησιμοποιείται επίσης για την επισκευή κατεστραμμένων εξαρτημάτων.

Η κύρια πρόκληση με το DED είναι η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ της ταχύτητας παραγωγής και της ποιότητας της επιφάνειας. Παρ' όλα αυτά, η ευελιξία και η ικανότητα επεξεργασίας ποικίλων υλικών καθιστούν το DED μια πολύτιμη τεχνική στην κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων και στη συντήρηση.

2.2.6 Πλαστικοποίηση Φύλλων (SL)

Η Πλαστικοποίηση Φύλλων (SL), γνωστή και ως Laminated Object Manufacturing (LOM), είναι μια τεχνική Προσθετικής Κατασκευής (AM) που εμπλέκει την κοπή και συγκόλληση φύλλων υλικού για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 19, αυτή η διαδικασία αρχικά εφαρμόστηκε για την κατασκευή αρχιτεκτονικών μοντέλων από χαρτί, αλλά πλέον χρησιμοποιείται με ευρεία γκάμα υλικών, συμπεριλαμβανομένων μετάλλων, κεραμικών και σύνθετων ινών.



Σχήμα 19 : Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος (LOM) (πηγή: Siencedirect)

Διαδικασία Πλαστικοποίησης Φύλλων (SL)

Στη διαδικασία SL, τα φύλλα υλικού στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο και κάθε στρώμα συνδέεται με το κάτω από αυτό μέσω κόλλας. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το επιθυμητό τρισδιάστατο αντικείμενο. Μόλις ένα στρώμα συνδεθεί, κόβεται ή διαμορφώνεται σύμφωνα με το σχέδιο του αντικειμένου χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η κοπή με λέιζερ ή η κοπή με μαχαίρι. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την κατασκευή αντικειμένων από διάφορα υλικά με πάχος φύλλων αρκετών χιλιοστών.

Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις της SL

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της SL είναι το χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με άλλες τεχνικές AM, καθώς και η δυνατότητα για ταχεία παραγωγή μεγάλων κομματιών. Επιπλέον, το πλεονάζον υλικό που απομένει μετά την κοπή μπορεί να ανακυκλωθεί, μειώνοντας περαιτέρω το κόστος και τα απόβλητα. Ωστόσο, η διαδικασία έχει ορισμένες δυσκολίες, ιδιαίτερα όσον αφορά την κατασκευή της

εσωτερικής δομής κατά τη φάση κοπής των αποβλήτων, κάτι που περιορίζει τη χρήση της σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές.

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η SL δεν είναι τόσο κατάλληλη για την παραγωγή αντικειμένων με περίπλοκα σχήματα και απαιτητική ακρίβεια επιφάνειας. Επιπλέον, η χρήση φύλλων μεγαλύτερου πάχους μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα αλλά οδηγεί σε ένα φαινόμενο γνωστό ως "φαινόμενο σκάλας", όπου τα περιγράμματα των στρωμάτων γίνονται πιο εμφανή, μειώνοντας την ποιότητα της τελικής επιφάνειας.

Κατηγορίες SL

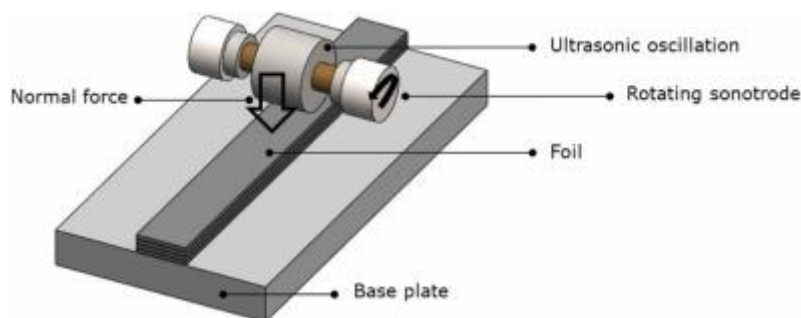
Η SL χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. **"Bond then form"**: Τα φύλλα συνδέονται πρώτα και στη συνέχεια κόβονται στο επιθυμητό σχήμα.
2. **"Form then bond"**: Τα φύλλα κόβονται πρώτα στο σχήμα και στη συνέχεια συγκολλούνται μεταξύ τους.

Αν και η πλαστικοποίηση φύλλων προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα στην κατασκευή, η περιορισμένη της ακρίβεια και οι σχεδιαστικοί περιορισμοί έχουν περιορίσει την ευρεία εφαρμογή της σε σχέση με άλλες τεχνικές Προσθετικής Κατασκευής.

2.2.6.1. Κατασκευή Προσθέτων με Υπερήχους (UAM)

Η Κατασκευή Προσθέτων με Υπερήχους (Ultrasonic Additive Manufacturing - UAM), γνωστή επίσης ως Υπερηχητική Ενοποίηση (Ultrasonic Consolidation - UC), είναι μια τεχνική που συνδυάζει την υπερηχητική συγκόλληση μεταλλικών συνδέσεων με την αφαιρετική κατεργασία για τη δημιουργία αντικειμένων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 20, η UAM είναι μια καινοτόμος μέθοδος που επιτρέπει την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων με ελάχιστες αλλαγές στα χαρακτηριστικά του υλικού, καθώς η διαδικασία διεξάγεται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, κυμαινόμενες από τη θερμοκρασία δωματίου έως περίπου 200°C .



Σχήμα 20 : Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος UAM (πηγή: Siencedirect)

Διαδικασία UAM

Στη διαδικασία UAM, τα φύλλα υλικού συγκολλούνται μεταξύ τους μέσω υπερηχητικής συγκόλλησης και η τελική μορφή του αντικειμένου επιτυγχάνεται με

άλεση. Η συγκόλληση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός sonotrode, το οποίο είναι ένα εργαλείο που ταλαντεύεται σε συχνότητα υπερήχων χαμηλής ενέργειας. Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια θερμαινόμενη πλάκα, ενώ το sonotrode πιέζει τα στρώματα μεταξύ τους, δημιουργώντας μια ισχυρή μεταλλουργική σύνδεση.

Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ποιότητα Συγκόλλησης

Η ποιότητα της συγκόλλησης στο UAM εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το πλάτος ταλάντωσης, τη δύναμη που ασκείται, την ταχύτητα διαδρομής του sonotrode και τη θερμοκρασία. Το πλάτος ταλάντωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς καθορίζει την ποσότητα της υπερηχητικής ενέργειας που εφαρμόζεται. Έρευνες δείχνουν ότι η αύξηση της εισροής υπερηχητικής ενέργειας βελτιώνει τη συγκόλληση, ωστόσο υπάρχει ένας ιδανικός βαθμός ενέργειας εισόδου που εξαρτάται από το υλικό, το πάχος και το σχήμα του αντικειμένου .

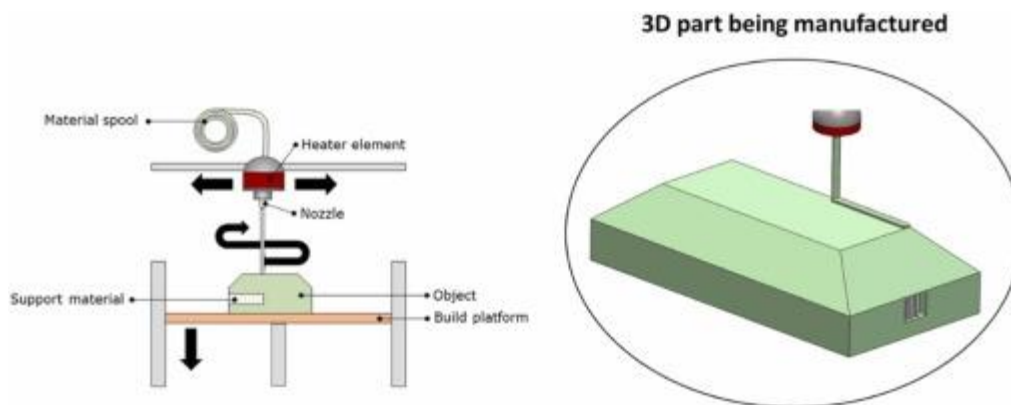
Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις του UAM

Το UAM προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα κατασκευής μεταλλικών εξαρτημάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που μειώνει τις εσωτερικές τάσεις και τις αλλαγές στη μικροδομή των υλικών. Ωστόσο, η διαδικασία απαιτεί την εφαρμογή επαρκούς φορτίου στα στρώματα για να επιτευχθεί η βέλτιστη σύνδεση, ενώ η υπερβολική θερμότητα μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις, οδηγώντας σε υποβάθμιση της ποιότητας του συνδέσμου .

Η UAM είναι ιδανική για την κατασκευή σύνθετων μεταλλικών δομών και την ενσωμάτωση διαφορετικών υλικών σε ένα μόνο εξάρτημα, καθιστώντας την μια πολύτιμη τεχνολογία σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου απαιτούνται μεταλλικά μέρη με υψηλή αντοχή και μικροδομική ακεραιότητα.

2.7. Εξώθηση Υλικού (ME)

Η Εξώθηση Υλικού (Material Extrusion - ME), όπως φαίνεται στο σχήμα 21, είναι μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής (3D printing) λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας χρήσης της με ελάχιστο ή καθόλου πρόσθετο εξοπλισμό. Η τεχνική αυτή αναφέρεται επίσης ως Fused Deposition Modeling (FDM), Fused Filament Fabrication (FFF), ή Direct Ink Writing (DIW), ιδιαίτερα όταν το εξωθημένο υλικό είναι ένα εξαιρετικά ιξώδες και συμπυκνωμένο πολυμερές .



Σχήμα 21 : Σχηματικό διάγραμμα εξώθησης υλικού (ME) (πηγή: Siencedirect)

Διαδικασία Εξώθησης Υλικού

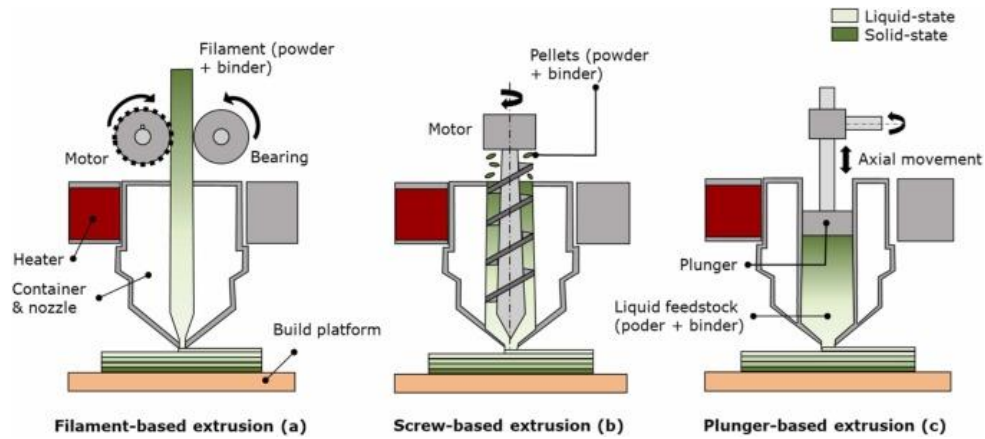
Η διαδικασία εξώθησης περιλαμβάνει τη θέρμανση και τήξη των υλικών, τα οποία στη συνέχεια εξωθούνται μέσω ακροφυσίων για τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων στρώμα προς στρώμα. Ο εκτυπωτής καταθέτει το υλικό σε κάθε επίπεδο και, μόλις ολοκληρωθεί ένα στρώμα, η πλατφόρμα κατασκευής κατεβαίνει και το επόμενο στρώμα εναποτίθεται πάνω από το προηγούμενο.

Τύποι Εξωθητών

Οι κυριότεροι τύποι εξωθητών που χρησιμοποιούνται στην εξώθηση υλικού είναι οι εξής:

1. Εξωθητής με βάση το νήμα (FDM/FFF): Σε αυτή τη μέθοδο, το νήμα πολυμερούς που έχει ήδη σχηματιστεί, λιώνει εκ νέου και εξωθείται για να δημιουργηθεί το επιθυμητό σχήμα, το οποίο σκληραίνει γρήγορα. Η τεχνική αυτή είναι επίσης γνωστή ως Fused Deposition Modeling (FDM) ή Fused
2. Filament Fabrication (FFF): Εύκολη στη χρήση και οικονομική. Η διαδικασία είναι κατάλληλη για μια ευρεία γκάμα πολυμερών και σύνθετων υλικών. Ωστόσο το νήμα πρέπει να πληροί αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας και διαστάσεων για να εξασφαλιστεί η συνεχής εκτύπωση. Συνήθως, το νήμα πρέπει να έχει διάμετρο με ακρίβεια $\pm 20 \mu\text{m}$ και να διατηρεί την κατάλληλη ακαμψία και ευελιξία.
3. Εξωθητής με κοχλία (Screw-based Extruder): Ένα θερμαινόμενο δοχείο εξώθησης χρησιμοποιείται για να μαλακώσει ή να υγροποιήσει μια στερεή σφαιροποιημένη πρώτη ύλη πριν προχωρήσει μέσω του ανοίγματος ακροφυσίων περιστρέφοντας μια ελικοειδή βίδα. Επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες εξώθησης και στερεά φόρτωση. Χρησιμοποιεί σφαιρίδια που μπορούν να φορτωθούν με ευκολία. Η διαδικασία μπορεί να απαιτεί προσεκτική ρύθμιση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας περιστροφής της βίδας για να διασφαλιστεί η σωστή τήξη του υλικού.
4. Εξωθητής εμβόλου (Piston-based Extruder): Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί ένα έμβολο για την εξώθηση ενός υλικού υγρής κατάστασης με υψηλή περιεκτικότητα

σε στερεά. Δεν απαιτεί την προετοιμασία σφαιριδίων ή νημάτων, κάνοντάς την πιο ευέλικτη στη χρήση διαφορετικών υλικών. Συχνά είναι λιγότερο ακριβής στις φάσεις εκκίνησης και διακοπής σε σύγκριση με τους εξωθητές με βάση το νήμα ή το κοχλία.[11,12,13,14,15,16]



Σχήμα 22 : Σχηματική επισκόπηση καθενός από τα τρία συστήματα εξώθησης υλικών: α) με βάση το νήμα, β) με κοχλία και γ) με βάση το έμβολο (πηγή: Siencedirect)

3 Τύποι υλικών εκτύπωσης

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, το ευρύ φάσμα των υλικών 3D εκτύπωσης για τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εξελιχθεί και προσαρμοστεί πολλές φορές. Παρακάτω παρουσιάζονται στις σημαντικότερες κατηγορίες με τις ιδιότητες και τις εφαρμογές τους.

3.1 Πλαστικά υλικά στη διαδικασία 3D εκτύπωσης

Τα πλαστικά είναι ιδιαίτερα δημοφιλή υλικά στην εκτύπωση 3D λόγω της ευελιξίας τους, της ευκολίας στην εκτύπωση και της ευρείας χρήσης τους από οικιακά αντικείμενα μέχρι πρωτότυπα. Μερικοί από τους πιο δημοφιλείς υποτύπους τους αποτελούν τα :

PLA (πολυγαλακτικό οξύ): Προερχόμενο από ανανεώσιμες πηγές, όπως το άμυλο καλαμποκιού, το PLA είναι βιοδιασπώμενο και φιλικό προς το χρήστη. Γνωστό για τη χαμηλή θερμοκρασία εκτύπωσης και την ελάχιστη στρέβλωση, το PLA είναι ιδανικό για την εκτύπωση διακοσμητικών αντικειμένων και πρωτοτύπων που δεν απαιτούν υψηλή αντοχή στη θερμότητα. Οι τιμές θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 180-220 °C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι 50-60 °C. [17]

ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο): Ένα ανθεκτικό και σκληρό πολυμερές που προσφέρει καλή αντοχή σε κρούσεις και θερμότητα, έχοντας ως βάση το πετρέλαιο, που χρησιμοποιείται σε επαγγελματικές εφαρμογές. Είναι κατάλληλο για τη δημιουργία λειτουργικών πρωτοτύπων και εξαρτημάτων τελικής χρήσης, ειδικά στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ωστόσο, απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες εκτύπωσης και καλό εξαερισμό κατά την εκτύπωση λόγω αναθυμιάσεων. Επιπλέον, το ABS δεν έχει επαρκή αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Οι τιμές θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 220-250 °C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι 95-110 °C.

PETG (Τερεφθαλική Γλυκόλη Πολυαιθυλενίου): Το PETG συνδυάζει την ευκολία εκτύπωσης χρησιμοποιώντας PLA με τη δύναμη και την ανθεκτικότητα του ABS. Ιδανικό για μηχανικά μέρη, είναι δημοφιλές στους χομπίστες και για βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες, γι' αυτό και χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή επίπλων κήπου, εργαλείων και βάζων. Οι τιμές θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 235-250 °C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι 70- 90 °C.[18,19]

TPU (Θερμοπλαστική Πολυουρεθάνη): Αυτό το εύκαμπτο υλικό που μοιάζει με καουτσούκ έχει εξαιρετική ελαστικότητα και αντοχή στην τριβή και τα έλαια. Παρέχει ευελιξία για την κατασκευή αντικειμένων που απαιτούν κάμψη ή ελαστικότητα, όπως παρεμβύσματα και φορετά αντικείμενα. Είναι ιδανικό για ανταλλακτικά αυτοκινήτων, ιατρικές συσκευές και θήκες τηλεφώνου. Οι τιμές

θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 220 -250 ° C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι 40 -60 ° C.[20]

Νάιλον (Πολυαμίδιο - PA) : Η αντοχή και η ευελιξία του καθιστούν το νάιλον ιδανικό για λειτουργικά μέρη που απαιτούν ανθεκτικότητα. Απορροφά την υγρασία, η οποία μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητές του και την ακρίβεια των διαστάσεων. Με θερμοκρασία τήξης περίπου 220 - 260 ° C (428 ° F - 500 ° F) και αυτανάφλεξη σε περίπου 424 ° C (795 ° F), το νάιλον είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά σε λειτουργικά μέρη που απαιτούν σκληρότητα και αντοχή στην κρούση, καθιστώντας το ιδανικό για ανθεκτικές στη θερμότητα εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη μηχανική και τις βιομηχανίες καταναλωτικών προϊόντων.

Πολυανθρακικό (PC): Η υψηλή αντοχή και η εξαιρετική ανοχή στη θερμότητα καθιστούν το PC ιδανικό για μηχανικές και επαγγελματικές εφαρμογές. Αλλά απαιτεί υψηλή θερμοκρασία εκτύπωσης 260-310° C. και θερμοκρασία ευφλεκτότητας περίπου 580 ° C (1076 ° F). Η εξαιρετική αντοχή στην κρούση και οι ιδιότητες εκτροπής θερμότητας το καθιστούν πρωταρχική επιλογή για μηχανολογικές εφαρμογές που απαιτούν διαφάνεια και υψηλή αντοχή στη θερμότητα, όπως προστατευτικά εργαλεία, εξαρτήματα αυτοκινήτων και περιβλήματα.[21]

PVA (Polyvinyl Alcohol): Χρησιμοποιείται κυρίως ως υλικό στήριξης επειδή είναι υδατοδιαλυτό, το PVA βοηθά στην εκτύπωση σύνθετων μοντέλων με προεξοχές σε εκτυπωτές διπλής εξώθησης.

ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate): Παρόμοιο με το ABS αλλά με καλύτερη αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, καθιστώντας το κατάλληλο για εξωτερικές εφαρμογές. Διατηρεί το χρώμα και τις ιδιότητες του όταν εκτίθεται στο ηλιακό φως. Το ASA είναι ένα θερμοπλαστικό γνωστό για τη σταθερότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία και την αντοχή του στις καιρικές συνθήκες. Οι τιμές θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 240-260° C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι 90 – 110 ° C.[22]

HIPS (High Impact Polystyrene): Συχνά χρησιμοποιείται ως υλικό στήριξης για εκτυπώσεις ABS λόγω της διαλυτότητάς του στο λεμονένιο. Είναι ιδανικό για την κατασκευή ελαφρών πρωτοτύπων. Είναι γνωστό για την αντοχή του στην κρούση και την ευκολία βαφής. Οι τιμές θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 230 -240° C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι 90 – 110 ° C. [23]

PC-ABS: Ένα μείγμα από πολυανθρακικό και ABS που προσφέρει την ευκολία εκτύπωσης ABS με αντοχή και αντοχή στη θερμότητα του υπολογιστή. Ιδανικό για εφαρμογές αυτοκινήτων, αεροδιαστημικής και καταναλωτικών αγαθών.

TPE (Θερμοπλαστικό Ελαστομερές): Μια ομάδα υλικών που μοιάζουν με καουτσούκ και συνδυάζουν τις ιδιότητες των πλαστικών με την ευκαμψία του καουτσούκ. Το TPE είναι ιδανικό για αντικείμενα που απαιτούν απαλή αίσθηση. Παρέχουν ευελιξία για την κατασκευή αντικειμένων που απαιτούν κάμψη ή ελαστικότητα, όπως παρεμβύσματα και φορετά αντικείμενα. Οι τιμές θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 220-230 ° C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι περίπου 45 ° C.[24]

PP (Πολυπροπυλένιο): Γνωστό για την αντοχή του στην κόπωση, τις ημι-εύκαμπτες ιδιότητες και τη χημική αντοχή. Το PP είναι δύσκολο να εκτυπωθεί, αλλά είναι ιδανικό για ενεργούς μεντεσέδες και εύκαμπτα εξαρτήματα. Οι τιμές θερμοκρασίας στο ακροφύσιο που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 200-220 °C, ενώ στην επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να είναι 60-80 °C.[25]

3.2 Μέταλλα στην εκτύπωση 3D

Η εκτύπωση 3D μετάλλων φέρνει επανάσταση σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική και η υγειονομική περίθαλψη. Μέταλλα όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, το τιτάνιο, ακόμη και τα πολύτιμα μέταλλα μπορούν να δημιουργήσουν πολύπλοκα συστατικά υψηλής αντοχής.[2]

Ανοξείδωτο ατσάλι: Η αντοχή και η ανοχή του στη διάβρωση το καθιστούν ιδανικό για τη δημιουργία ανθεκτικών και λειτουργικών εξαρτημάτων σε πολλές διαφορετικές βιομηχανίες.

Τιτάνιο: Η υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος και η βιοσυμβατότητα καθιστούν το τιτάνιο ιδανικό για ιατρικά εμφυτεύματα και άλλα ακριβή εξαρτήματα. Το τιτάνιο είναι ένα μέταλλο ανθεκτικό στη διάβρωση, με ισχυρές ιδιότητες και συγχρόνως χαρακτηρίζεται από την ελαφρότητά του.

Ανοξείδωτος χάλυβας : Λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς του σε άνθρακα, είναι εξαιρετικά ανθεκτικός στη διάβρωση. Τα αντικείμενα που κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα έχουν επίσης υψηλή αντοχή, καλές θερμικές ιδιότητες και μεγάλη ελαστικότητα. Η 3D εκτύπωση με ανοξείδωτο χάλυβα είναι ιδανική για την παραγωγή μηχανικών εξαρτημάτων και εφαρμογών που πρέπει να είναι ασφαλείς για τρόφιμα.

3.3 Ρητίνες σε 3D εκτύπωση

Οι ρητίνες είναι συνώνυμες με την υψηλή ακρίβεια και το άψογο φινίρισμα της επιφάνειας. Χρησιμοποιούνται εκτενώς στη στερεολιθογραφία (SLA) και στην ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP), αυτά τα υγρά πολυμερή σκληρύνουν υπό υπεριώδες φως για να σχηματίσουν στερεά αντικείμενα. Οι ρητίνες παρέχουν ευελιξία σε εφαρμογές που απαιτούν περίπλοκες λεπτομέρειες ακριβείας και λείες επιφάνειες, όπως οδοντιατρικά μοντέλα, πρωτότυπα κοσμημάτων και έργα τέχνης.

Τυποποιημένες ρητίνες: Προσφέρουν ισορροπία ισχύος και σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας. Ιδανικές για εννοιολογικά μοντέλα, αυτές οι ρητίνες παρέχουν λείο φινίρισμα επιφάνειας.

Μηχανικές ρητίνες: Οι ειδικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητές τους καθιστούν αυτές τις ρητίνες ιδανικές για λειτουργικά πρωτότυπα και εξαρτήματα τελικής χρήσης στη μηχανική και το σχεδιασμό προϊόντων. Υλικά όπως η σκληρή ρητίνη μιμούνται τη δύναμη και την ακαμψία του πλαστικού ABS, ενώ η ρητίνη υψηλής θερμοκρασίας

αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας την κατάλληλη για ανθεκτικά στη θερμότητα φωτιστικά.

3.4 Σύνθετα υλικά και άλλα υλικά σε 3D εκτύπωση

Τα σύνθετα υλικά συνδυάζουν πλαστικά με ενισχύσεις όπως ανθρακονήματα ή ίνες γυαλιού, αντέχουν υψηλές φορτίσεις και επιβαρύνσεις, προσφέροντας ανώτερη αντοχή και θερμικές ιδιότητες. Είναι ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν βελτιωμένες ιδιότητες υλικών πέρα από τα παραδοσιακά πλαστικά, όπως στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και τα αθλητικά είδη. Κάθε σύνθετο υλικό παρέχει βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, ακαμψία και ανθεκτικότητα.

Υλικά ενισχυμένα με ίνες: Αυτά συνδυάζουν πλαστικό με ψιλοκομμένα ανθρακονήματα, προσφέροντας απaráμιλλη αντοχή και ακαμψία. Αντέχουν στην αυστηρή χρήση και έχουν εξαιρετική αντοχή στην κόπωση, ιδανικά για ανταλλακτικά αεροδιαστημικής και αυτοκινήτων.

Εύκαμπτα και ελαστικά υλικά: Υλικά όπως TPU (θερμοπλαστική πολυουρεθάνη) και TPE (θερμοπλαστικά ελαστομερή) παρέχουν ευελιξία για την κατασκευή αντικειμένων που απαιτούν κάμψη ή ελαστικότητα, όπως παρεμβύσματα και φορετά αντικείμενα.

Βιοσυμβατά υλικά: Αυτά τα υλικά είναι κατάλληλα για μοντέλα ειδικά για ασθενείς ή χειρουργικούς οδηγούς στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης. Πρέπει να τηρούν αυστηρά πρότυπα ασφάλειας και συμβατότητας.

Αγώγιμα και μαγνητικά υλικά: Αυτός ο τύπος σύνθετου υλικού επιτρέπει τη δημιουργία λειτουργικών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, ηλιακών συλλεκτών και μαγνητικών εξαρτημάτων.[16,26,27]

4. 4D printing – Προσθετική κατασκευή τρισδιάστατων ευφυών δομών

4.1 Εισαγωγή στην προσθετική κατασκευή τετραδιάστατων δομών

Η έννοια της 4D εκτύπωσης είναι η κατασκευή σύνθετων τρισδιάστατων δομών που έχουν τη δυνατότητα να υιοθετούν διαφορετικά σχήματα, μορφές, ιδιότητες και λειτουργικότητα όταν υποβάλλονται σε διαφορετικά περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Μερικοί ερευνητές βλέπουν απλώς την εκτύπωση 4D ως μια εκτεταμένη τεχνική 3D εκτύπωσης ή προσθετικής κατασκευής με τον πρόσθετο περιορισμό του χρόνου. Ωστόσο, ο μοναδικός μηχανισμός αλλαγής σχήματος που παρουσιάζεται σε αυτή τη διαδικασία είναι ένας συνδυασμός προγραμματισμού σχήματος και χρήσης έξυπνων ενεργών υλικών κυρίως πολυμερών. Η πλειονότητα της έρευνας που πραγματοποιείται στον τομέα της 4D εκτύπωσης επικεντρώνεται στην ικανότητα αλλαγής σχήματος, όπως η επιμήκυνση, η κάμψη, η κυρτότητα και η συστροφή των 4D εκτυπωμένων υλικών.

4.2 4D Εκτύπωση- 4D printing

Το 2012 ο Skylar Tibbits στην παρουσίασή του στο συνέδριο TED που διεξήχθη στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) παρουσίασε πως μπορεί να επιτευχθεί ο μετασχηματισμός ενός αντικειμένου που έχει εκτυπωθεί μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς περνά ο χρόνος. Ο Tibbits ανέδειξε την ιδέα της "4D εκτύπωσης", όπου τα αντικείμενα δεν παραμένουν απλά στατικά αλλά αλλάζουν τη μορφή τους και τις δομές τους με την πάροδο του χρόνου. Μετά την ομιλία του, η έννοια της 4D εκτύπωσης κέρδισε δημοτικότητα ανάμεσα σε ερευνητές και μηχανικούς σε διάφορους τομείς .

Η πρώτη επιστημονική εργασία σχετικά με την 4D εκτύπωση δημοσιεύθηκε το 2013, όπου χρησιμοποιήθηκε η έννοια των <<τυπωμένων ενεργών σύνθετων υλικών>> για να δείξει πώς ένα αρχικό εκτυπωμένο φύλλο μετατρέπεται σε περίπλοκη δομή μέσω του φαινομένου <<μνήμης σχήματος>>. Από τότε, η έρευνα στην 4D εκτύπωση έχει εκθετικά αυξηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της 4D εκτύπωσης είναι ότι δεν είναι στατική, αλλά μπορεί να αναδιαμορφωθεί με τον χρόνο με προκαθορισμένη εντολή από τον υπολογιστή.

4.2.1 Σύγκριση 3d και 4d εκτύπωσης

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αξιοποιηθεί για την κατασκευή στατικών δομών από ψηφιακά δεδομένα σε τρισδιάστατες συντεταγμένες. Ωστόσο, η 4D εκτύπωση προσθέτει τη δυνατότητα αλλαγής της εκτυπωμένης δομής με την πάροδο του χρόνου, ανάλογα με τα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Η διαδικασία της 3D και της 4D εκτύπωσης είναι σχεδόν παρόμοιες, ξεκινώντας με το σχεδιασμό

προϊόντων σε προγράμματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), και συνεχίζοντας με την εκτύπωση του σχεδίου με τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Η κύρια διαφορά της 4D εκτύπωσης έγκειται στον "έξυπνο" σχεδιασμό και τα "έξυπνα" υλικά, τα οποία επιτρέπουν στις εκτυπωμένες δομές να μεταβάλλονται σε σχήμα ή λειτουργία. Συνεπώς, ο σχεδιασμός των 4D εκτυπωμένων δομών πρέπει να είναι πλήρως προγραμματισμένος, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν μελλοντικές μεταβολές στις ιδιότητες του αντικειμένου. Μια άλλη βασική πτυχή της 4D εκτύπωσης είναι η χρήση έξυπνων υλικών, τα οποία μπορούν να επεκτείνονται, να γίνονται πιο εύκαμπτα ή να παραμορφώνονται ως απάντηση σε διάφορα ερεθίσματα.

Για να υποστηριχθούν οι 4D δομές, είτε πρέπει να αναπτυχθούν νέες έννοιες εκτυπωτών 4D είτε οι υπάρχοντες τρισδιάστατοι εκτυπωτές να βελτιωθούν. Σε σύγκριση με την 3D εκτύπωση, η 4D εκτύπωση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η ταχεία ανάπτυξη έξυπνων και πολλαπλών υλικών, πιο ευέλικτες και παραμορφώσιμες δομές, καθώς και νέες δυνατότητες εφαρμογών. Επίσης σύμφωνα με τις τελευταίες διαθέσιμες εκθέσεις, οι ερευνητικές δημοσιεύσεις σχετικά με την 4D εκτύπωση αυξάνονται κάθε χρόνο. Η 4D εκτύπωση προσφέρει βελτιωμένη απόδοση και ποιότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνικές, με τις 4D εκτυπωμένες δομές να έχουν τη δυνατότητα να βελτιώνουν τις ιδιότητές τους. Επιπλέον, η χαμηλότερη κατανάλωση υλικών στην 4D εκτύπωση συμβάλλει στη διατήρηση της βιώσιμης ανάπτυξης. Η ανάπτυξη λογισμικών όπως το Kinematics από το Nervous Systems και το Project Cyborg από την Autodesk Research έχει διευκολύνει την εκτύπωση 4D δομών, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να απεικονίσουν τη δομή πριν την εκτύπωση, οδηγώντας έτσι σε πιο αποτελεσματική κατασκευή.[28]

4.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την 4D Εκτύπωση

Η εκτύπωση 4D εξαρτάται κυρίως από πέντε παράγοντες, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης. Αυτοί οι παράγοντες είναι:

Η διαδικασία πρόσθετης κατασκευής (AM), η οποία επιτρέπει την παραγωγή του εκτυπωμένου υλικού από ψηφιακά δεδομένα χωρίς τη χρήση ενδιάμεσων εργαλείων. Υπάρχουν διάφορες διαδικασίες AM, όπως η στερεολιθογραφία (SLA), η επιλεκτική πυροσυσσώματωση λέιζερ (SLS), η μοντελοποίηση εναπόθεσης με τήξη (FDM), η εκτύπωση με εκτόξευση υλικού (3DP), η επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM), η άμεση γραφή μελανιού (DIW) και η τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων (EBM). Σχεδόν όλες αυτές οι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση 4D, εφόσον το υλικό που επιλέγεται είναι συμβατό με τον εκτυπωτή.

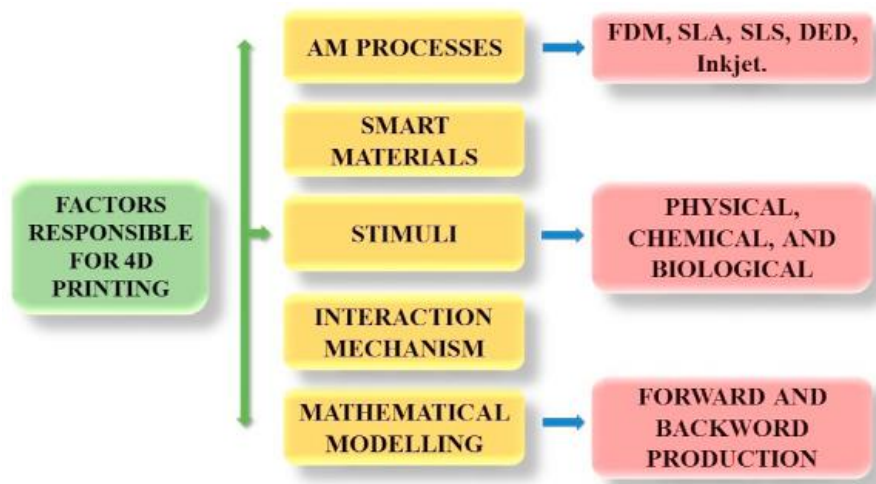
Το υλικό εκτύπωσης, το οποίο πρέπει να ανταποκρίνεται στα ερεθίσματα ενώ διαμορφώνεται στρώμα προς στρώμα. Αυτά τα υλικά, γνωστά και ως προγραμματιζόμενα ή έξυπνα υλικά, καθορίζουν το είδος των ερεθισμάτων που θα

χρησιμοποιηθούν, καθώς και την ικανότητα του υλικού να αυτομετασχηματίζεται σε απάντηση σε αυτά τα ερεθίσματα.

Τα ερεθίσματα που χρησιμοποιούνται κατά την εκτύπωση 4D, τα οποία μπορεί να είναι φυσικά, χημικά ή βιολογικά. Τα φυσικά ερεθίσματα περιλαμβάνουν το φως, την υγρασία, την ηλεκτρική και μαγνητική ενέργεια, τη θερμοκρασία και την υπερϊώδη ακτινοβολία. Τα χημικά ερεθίσματα περιλαμβάνουν τις χημικές ουσίες, το επίπεδο pH και τη χρήση οξειδωτικών ή αναγωγικών παραγόντων, ενώ τα βιολογικά ερεθίσματα περιλαμβάνουν ένζυμα και γλυκόζη. Όταν εφαρμόζονται αυτά τα ερεθίσματα, προκαλούνται φυσικές ή χημικές αλλαγές στο υλικό, όπως η αλλαγή φάσης ή η μετακίνηση μορίων, που οδηγούν στην παραμόρφωση της δομής.

Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης και η μαθηματική μοντελοποίηση. Όταν ένα ερέθισμα εφαρμόζεται σε ένα έξυπνο υλικό, δεν μπορούν όλα τα υλικά να μετασχηματιστούν όπως απαιτείται. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί ένας μηχανισμός αλληλεπίδρασης, όπως η μηχανική φόρτιση ή άλλος φυσικός τρόπος χειρισμού, που θα καθορίσει πώς το υλικό θα αλλάξει σχήμα. Μετά την καθιέρωση του μηχανισμού, απαιτείται μαθηματική μοντελοποίηση για να οριστεί η χρονική διάρκεια κατά την οποία το ερέθισμα θα επιδράσει στο υλικό.

Συνοπτικά, υπό το πρίσμα των παραπάνω παραγόντων η εκτύπωση 4D μπορεί να περιγραφεί ως εξής: "Ένα ερέθισμα εφαρμόζεται σε ένα έξυπνο υλικό μέσω ενός κατάλληλου μηχανισμού αλληλεπίδρασης και μαθηματικής μοντελοποίησης κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας πρόσθετης κατασκευής, οδηγώντας στη δημιουργία μιας 4D εκτυπωμένης δομής".



Σχήμα 23 : Διαγραμματική αναπαράσταση των παραγόντων που ευθύνονται για την 4D εκτύπωση. (πηγή: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim)

4.2.3 Νόμοι της 4D εκτύπωσης

Οι F. Momeni και J. Ni ανέπτυξαν τρεις νόμους που εξηγούν τον τρόπο με τον οποίο αλλάζουν σχήμα οι 4D εκτυπωμένες δομές. Αυτοί οι νόμοι μας βοηθούν να κατανοήσουμε τη φυσική διαδικασία που επιτρέπει σε αυτές τις δομές να μετασχηματίζονται. Οι νόμοι περιγράφονται ως εξής:

Πρώτος Νόμος

Ο πρώτος νόμος δηλώνει ότι όλες οι συμπεριφορές που σχετίζονται με την αλλαγή σχήματος, όπως η συστροφή, το δίπλωμα, το κύρτωμα κ.λπ., οφείλονται στη διαφορά διαστολής ανάμεσα σε ενεργά και παθητικά υλικά. Οι δομές αυτές αποτελούνται από πολλαπλά υλικά, τα οποία αντιδρούν διαφορετικά στα ερεθίσματα, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του σχήματός τους.

Δεύτερος Νόμος

Ο δεύτερος νόμος υποστηρίζει ότι υπάρχουν τέσσερις βασικοί φυσικοί παράγοντες που ευθύνονται για την αλλαγή σχήματος στις 4D δομές: διάχυση μάζας, θερμική διαστολή, μοριακός μετασχηματισμός και οργανική ανάπτυξη. Αυτοί οι παράγοντες δημιουργούν διαφορές στη διαστολή μεταξύ των ενεργών και παθητικών υλικών, οδηγώντας σε αλλαγές στο σχήμα όταν οι δομές εκτίθενται σε ερεθίσματα.

1. **Διάχυση μάζας:** Όταν τα υλικά απορροφούν ή προσροφούν ερεθίσματα όπως νερό ή ιόντα, η μάζα τους μεταβάλλεται, προκαλώντας διαστολή και αλλαγή στο σχήμα.
2. **Θερμική διαστολή:** Οι αλλαγές θερμοκρασίας, όπως η αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας, προκαλούν αλλαγές στην απόσταση μεταξύ των ατόμων και των μορίων, προκαλώντας διαστολή και παραμόρφωση της δομής.
3. **Μοριακός μετασχηματισμός:** Υπό την επίδραση ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων, φωτός, μηχανικής δύναμης κ.λπ., τα μόρια ενός υλικού μπορεί να αναδιαταχθούν, προκαλώντας αλλαγές στο σχήμα.
4. **Οργανική ανάπτυξη:** Αναφέρεται στην αύξηση μήκους και βάρους σε ζωντανούς οργανισμούς, που οδηγεί σε διαστολή των ενεργών και παθητικών υλικών, προκαλώντας αλλαγές στο σχήμα. Η οργανική ανάπτυξη μπορεί να ενεργοποιηθεί από ηλεκτρικά ερεθίσματα και χρησιμοποιείται σε 4D βιοεκτύπωση για δομές όπως κύτταρα, ιστούς και όργανα.

Ο τρίτος νόμος της 4D εκτύπωσης αναφέρει ότι «η συμπεριφορά αλλαγής σχήματος με βάση τον χρόνο σχεδόν όλων των 4D εκτυπωμένων δομών πολλαπλών υλικών διέπεται από δύο "χρονικές σταθερές"». Αυτές οι σταθερές ποικίλλουν ανάλογα με τα υλικά και τα ερεθίσματα που χρησιμοποιούνται, και μπορεί να είναι ίσες, μεγαλύτερες ή ακόμα και να εξαφανιστούν σε σχέση με άλλες. Επιπλέον, αναπτύχθηκε ένας μαθηματικός τύπος διπλής εκθετικής μορφής που συνδέεται με την τέταρτη διάσταση, και αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μελλοντική μοντελοποίηση 4D εκτυπωμένων δομών μέσω λογισμικού και υλικού.[29,30]

4.2.3 Υλικά που Χρησιμοποιούνται στην 4D Εκτύπωση

Λόγω των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων στην 3D εκτύπωση, οι εκτυπωτές μπορούν πλέον να τοποθετούν υλικά με μεγαλύτερη ακρίβεια και ευελιξία. Αυτό οδήγησε στη βελτίωση της 4D εκτύπωσης. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτήν

την τεχνολογία ονομάζονται Έξυπνα Υλικά, επειδή μπορούν να αλλάζουν ιδιότητες και σχήματα με την πάροδο του χρόνου όταν εκτίθενται σε εξωτερικά ερεθίσματα. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν λειτουργίες όπως αυτοσυναρμολόγηση, μνήμη σχήματος και αλλαγή χρώματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Παρακάτω εξετάζονται διαφορετικοί τύποι έξυπνων υλικών και οι αντίστοιχες εφαρμογές τους.

4.2.4.1 Υλικά που Ανταποκρίνονται στην Υγρασία: Υδρογέλες

Τα υλικά που ανταποκρίνονται στην υγρασία, γνωστά και ως υδρογέλες, έχουν την ικανότητα να απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού και να διαστέλλονται έως και 200% του αρχικού τους όγκου. Αυτές οι υδρογέλες είναι εξαιρετικά βιοσυμβατές και χρησιμοποιούνται συχνά για την ανάπτυξη πολύπλοκων δομών που μπορούν να διπλωθούν, να τεντωθούν ή να αλλάξουν σχήμα με γεωμετρική ακρίβεια. Ωστόσο, το μειονέκτημα τους είναι η αργή αντίστροφη απόκρισή τους, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζονται για να στεγνώσουν και να επανέλθουν στο αρχικό τους μέγεθος. Για να ξεπεραστεί αυτό, ερευνητικές ομάδες έχουν αναπτύξει μεθόδους που βελτιώνουν την ταχύτητα απόκρισης, όπως η προσθήκη κυτταρινικών ινών και η χρήση ελεγχόμενης θερμοκρασίας στο υδατικό περιβάλλον.

4.2.4.2 Υλικά που Ανταποκρίνονται στη Θερμοκρασία

Αυτά τα έξυπνα υλικά ανταποκρίνονται στη θερμότητα ή στις αλλαγές θερμοκρασίας, μέσω μηχανισμών όπως το εφέ αλλαγής σχήματος (SCE) και το εφέ μνήμης σχήματος (SME). Τα υλικά με μνήμη σχήματος (SMM) μπορούν να επιστρέψουν στο αρχικό τους σχήμα μετά από παραμόρφωση, χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο θερμικό ερέθισμα. Τα πιο συνηθισμένα SMM είναι τα πολυμερή με μνήμη σχήματος (SMP), τα κράματα με μνήμη σχήματος (SMA) και τα κεραμικά με μνήμη σχήματος (SMC). Οι ερευνητές έχουν βελτιώσει τα SMPs για να εκμεταλλευτούν τις μοναδικές τους ιδιότητες, όπως η ανθεκτικότητα και η βιοσυμβατότητα, καθιστώντας τα δημοφιλή σε εφαρμογές εκτύπωσης. Τα SMA, όπως η νιτινόλη, χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιοϊατρικές εφαρμογές λόγω της υψηλής τους αντοχής και ελαστικότητας, αν και είναι πιο ακριβά από τα SMP.

Παρά τους περιορισμούς, όπως το κόστος και η χαμηλή ευκαμψία των SMA, έχουν αναπτυχθεί σύνθετα υλικά με μνήμη σχήματος (SMC) που συνδυάζουν τις ιδιότητες SMP και SMA για να βελτιώσουν τη μηχανική αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσης. Τέλος, τα υβριδικά υλικά με μνήμη σχήματος (SMH) προσφέρουν μια συνδυασμένη απόκριση σε πολλαπλά ερεθίσματα, καθιστώντας τα κατάλληλα για πολύπλοκες εφαρμογές.

4.2.4.3 Υλικά που ανταποκρίνονται στο φως: Φωτο-ανταποκρινόμενα

Το φως μπορεί να λειτουργήσει ως έμμεσο ερέθισμα για την παραμόρφωση των έξυπνων υλικών. Όταν ένα φωτο-ανταποκρινόμενο υλικό εκτεθεί στο φως, απορροφά την ενέργεια, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας. Η θερμότητα αυτή, όπως

αναφέρθηκε νωρίτερα, προκαλεί αλλαγή στο σχήμα του υλικού. Επομένως, το φως θεωρείται έμμεσο ερέθισμα, καθώς δεν φέρνει την αλλαγή άμεσα όπως η θερμότητα ή η υγρασία, αλλά μέσω της δημιουργίας θερμότητας. Ένα παράδειγμα είναι η εργασία των Liu et al., όπου το φως προκαλεί αλλαγή στο σχήμα μέσω θέρμανσης των αρθρώσεων. Η απόκριση εξαρτάται από την ένταση του φωτός και το χρώμα των υλικών που χρησιμοποιούνται.

4.2.4.4 Υλικά που ανταποκρίνονται στην ηλεκτρική ενέργεια: Ηλεκτροανταποκρινόμενα

Όπως το φως, έτσι και το ηλεκτρικό ρεύμα δρα ως έμμεσο ερέθισμα για την παραμόρφωση έξυπνων υλικών, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της ωμικής αντίστασης του υλικού. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ανάπτυξη ενός τεχνητού μυός από αιθανόλη και ελαστομερές πυριτίου, όπου το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί την εξάτμιση της αιθανόλης και αλλαγή στο σχήμα του μυός. Επιπλέον, το υλικό πολυπυρρόλη (PPy) μπορεί να αλλάξει την απορρόφηση νερού υπό την επίδραση ηλεκτρισμού, κάτι που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ενός μικρορομπότ origami.

4.2.4.5 Υλικά που ανταποκρίνονται στη μαγνητική ενέργεια: Μαγνητοανταποκρινόμενα

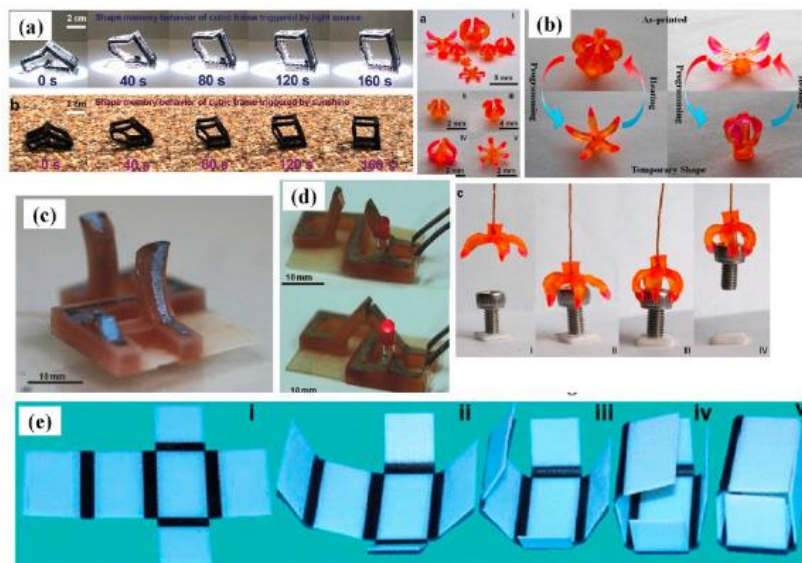
Τα μαγνητικά πεδία μπορούν επίσης να προκαλέσουν παραμόρφωση σε έξυπνα υλικά. Για παράδειγμα, νανοσωματίδια σε εκτυπωμένα μικροεργαλεία από υδρογέλη ανταποκρίνονται σε μαγνητικά πεδία, επιτρέποντας τον τηλεχειρισμό των κατασκευών. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται συχνά σε μικρές δομές, όπου η μαγνητική δύναμη μπορεί να προκαλέσει κίνηση και παραμόρφωση.

4.2.4.6 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν ασκείται μηχανική πίεση. Αυτή η ιδιότητα τα καθιστά χρήσιμα για εφαρμογές 4D εκτύπωσης, καθώς μπορούν να μετατρέψουν μηχανική δύναμη σε ηλεκτρικό φορτίο και αντίστροφα, προκαλώντας αλλαγές στο σχήμα.

4.2.4.7 Υλικά που ανταποκρίνονται στο pH

Αυτά τα υλικά αλλάζουν σχήμα και όγκο ανάλογα με την τιμή του pH του περιβάλλοντος τους. Τα πολυμερή που ανταποκρίνονται στο pH, όπως οι πολυηλεκτρολύτες, μπορούν να δέχονται ή να χάνουν πρωτόνια, προκαλώντας αλλαγές στη δομή τους. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως η χορήγηση φαρμάκων, τα μαλακά ρομπότ και οι ενεργοποιητές.



Εικόνα 10 : Αναπαράσταση 4D εκτυπωμένων υλικών. (Πηγή: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Springer Nature, AIP Publishing)

4.2.4 Ιδιότητες 4D Εκτυπωμένων Υλικών

Η τεχνολογία της 4D εκτύπωσης, από τη στιγμή που εμφανίστηκε, έχει παρουσιάσει πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά της είναι η μείωση του χώρου αποθήκευσης στις δομές που εκτυπώνονται, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη δημιουργία δομών που μπορούν να αλλάξουν μορφή με την πάροδο του χρόνου. Έχουμε τη δυνατότητα είτε να δημιουργήσουμε σύνθετες δομές απευθείας με τον 3D εκτυπωτή είτε να εκτυπώσουμε απλές δομές που αργότερα μπορούν να συναρμολογηθούν σε μια πιο περίπλοκη μορφή. Η 4D εκτύπωση έχει μεταμορφώσει την παραδοσιακή, στατική 3D εκτύπωση, καθιστώντας την πιο δυναμική και προσαρμόσιμη στις ανάγκες του χρήστη.

Οι 4D εκτυπωμένες δομές έχουν τρεις βασικές ιδιότητες που τις καθιστούν εξαιρετικά χρήσιμες σε πρακτικές εφαρμογές: **αυτοσυναρμολόγηση**, **αυτοπροσαρμογή** και **αυτοεπισκευή**.

1. Αυτοσυναρμολόγηση

Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στα υλικά να συναρμολογούνται αυτόματα από απλές 3D εκτυπωμένες μορφές και να μετατρέπονται σε πιο σύνθετες 4D δομές. Αυτή η δυνατότητα είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε συνθήκες όπου η άμεση ανθρώπινη παρέμβαση είναι δύσκολη, όπως στο διάστημα. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία δορυφόρων ή άλλων συσκευών που μπορούν να συναρμολογηθούν αυτόματα σε τροχιά. Επίσης, μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατασκευή κτιρίων με μικρή ανθρώπινη παρέμβαση, όπως σε περιπτώσεις καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, ή για την επιδιόρθωση ελαττωμάτων σε κατασκευές, παρέχοντας μια αυτόνομη λύση συναρμολόγησης και επισκευής.

2. Αυτοπροσαρμογή

Η ικανότητα προσαρμογής στο περιβάλλον είναι μια άλλη χρήσιμη ιδιότητα των 4D υλικών. Αυτά τα υλικά μπορούν να αλλάζουν μορφή ή να συναρμολογούνται γρήγορα ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες, όπως οι μεταβολές στη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, σε βιοϊατρικές εφαρμογές, 4D υλικά μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες του ανθρώπινου σώματος, είτε για την ανάπτυξη ιστών είτε για τη δημιουργία προσαρμόσιμων ιατρικών συσκευών.

3. Αυτοεπισκευή

Τα 4D εκτυπωμένα υλικά έχουν την ιδιότητα να επιδιορθώνουν τα ελαττώματά τους αυτόνομα, κάτι που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές όπως οι σωληνώσεις, η ανακύκλωση και άλλα έργα που απαιτούν αυτοθεραπεία. Αυτή η ιδιότητα έχει ήδη δοκιμαστεί με υδρογέλες, ενώ η έρευνα συνεχίζεται για να αξιοποιηθεί η αυτοεπισκευή σε ακόμη περισσότερους τομείς.

4.3 Εφαρμογές 4D Εκτύπωσης

Σε αυτή την ενότητα, θα εξετάσουμε κάποιους τομείς όπου τα 4D εκτυπωμένα υλικά έχουν αποδείξει την αξία τους. Αν και η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, έχει ήδη τραβήξει την προσοχή πολλών ερευνητών και τεχνολογικών κλάδων. Ένα παράδειγμα είναι ο αμερικανικός στρατός, ο οποίος έχει ξεκινήσει συνεργασία με τρία πανεπιστήμια για την ανάπτυξη 4D υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην άμυνα. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν 4D επενδύσεις για αμυντικά οχήματα που θα προσαρμόζονται στις περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλάζοντας σχήμα και μορφή. Επίσης, στολές από 4D υλικά θα μπορούσαν να τροποποιούνται όταν έρχονται σε επαφή με αιχμηρά αντικείμενα, προσφέροντας καλύτερη προστασία.

Αυτά τα υλικά μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο και στην καθημερινή ζωή. Τα προϊόντα που εκτυπώνονται σε 4D μπορούν να προσαρμόζονται στις αλλαγές του περιβάλλοντος (όπως υγρασία, θερμοκρασία ή πίεση) με βάση τις ανάγκες του χρήστη. Επιπλέον, η 4D εκτύπωση επιτρέπει τη μείωση του όγκου των προϊόντων, κάνοντας τη μεταφορά και αποθήκευσή τους πιο εύκολη και λιγότερο δαπανηρή. Μετά τη χρήση, τα προϊόντα αυτά μπορούν να προσαρμοστούν ή να επισκευαστούν για νέες εφαρμογές.

Στον τομέα της διαστημικής τεχνολογίας, οι δυνατότητες των 4D υλικών είναι τεράστιες. Για παράδειγμα, ηλιακά πάνελ και κεραίες για δορυφόρους και διαστημικά οχήματα μπορούν να εκτυπωθούν σε 4D, να συναρμολογηθούν αυτόματα στο διάστημα και να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του διαστήματος. Επίσης, η ιατρική επιστήμη είναι ένας πολλά υποσχόμενος τομέας για τη χρήση της 4D εκτύπωσης. Για παράδειγμα, 4D εκτυπωμένα στεντ μπορούν να εισαχθούν στο σώμα μέσω μιας μικρής τομής και να αλλάξουν σχήμα μόλις φτάσουν στο επιθυμητό σημείο. Παράλληλα, οι νανοσυσκευές εκτύπωσης 4D μπορούν να

αυτοσυναρμολογούνται μέσα στο σώμα για να εκτελέσουν συγκεκριμένες λειτουργίες.

Η 4D εκτύπωση έχει ήδη αρχίσει να ενσωματώνεται και στη ρομποτική, όπου μπορεί να αντικαταστήσει πολύπλοκα και ακριβά εξαρτήματα όπως κινητήρες και αισθητήρες. Τα 4D υλικά μειώνουν το μέγεθος και την πολυπλοκότητα των ρομπότ, ενώ παρέχουν επιπλέον λειτουργικότητα, όπως αυτοεπισκευή. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι η χρήση 4D υλικών σε αυτοθεραπευόμενες σωληνώσεις και υδρογέλες, που αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο σε διάφορες μελλοντικές εφαρμογές, όπως η κατασκευή τεχνητών οργάνων και αισθητήρων.[31,32]

5 Σχεδιασμός Πειραμάτων

5.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διαδικασία της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας εστιάζει στον χαρακτηρισμό της έξυπνης συμπεριφοράς τετραδιάστατα εκτυπωμένων δομών από υλικό ABS. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τον εκτυπωτή τρισδιάστατης εκτύπωσης RAISE 3D Pro2, το νήμα εκτύπωσης (3Dedge), τον κλίβανο (SNOL 6.7/1300 LSM01) και μία αυτοσχέδια κατασκευή για την στήριξη των τρισδιάστατα εκτυπωμένων δομών (Εικόνα 14, 15).

5.1.1 Εξοπλισμός

Ο εκτυπωτής Pro2 Series της RAISE 3D , τεχνολογίας FFF, αποτελεί βραβευμένη σειρά Pro2 της Raise3D και αναγνωρίζεται ως σημείο αναφοράς και πρότυπο για επαγγελματικές εφαρμογές 3D εκτύπωσης. Διαθέτει επαρκή όγκο κατασκευής 300 x 300 x 305mm και προσφέρει εξαιρετική ανάλυση εκτύπωσης, μειώνοντας το ελάχιστο πάχος στρώσης στα 0,01 mm. Ο εκτυπωτής μπορεί να αναπτύξει θερμοκρασία έως και 300 ° C, καθιστώντας το συμβατό σχεδόν με οποιοδήποτε νήμα εκτύπωσης 3D FDM , όπως PLA, ABS, HIPS, TPU, PC, Νάιλον, TPE, FLEX, PETG, Μεταλλικό PLA, Ξύλο PLA, Carbon Fiber, κ.λπ. Διαθέτει επίσης ένα μαγνητικό σύστημα εναλλάξιμου κρεβατιού εκτύπωσης, επιτρέποντας στους χρήστες να αλλάζουν απρόσκοπτα τις πλάκες κατασκευής και να βελτιστοποιούν τη διαδικασία εκτύπωσης, ενώ κάτω από την κύρια πλάκα χρησιμοποιείται ένα θερμαινόμενο μαξιλάρι σιλικόνης. [33,34]



Εικόνα 11 : Εκτυπωτής Pro2 Series της RAISE 3D (πηγή : printspace3d)

Ο τύπος του νήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι ABS-9003, υψηλής ποιότητας, με διάμετρο 1.75 mm, της εταιρείας 3Dedge και αποτελεί το μοντέλο Ivory. Οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο ακροφύσιο για το συγκεκριμένο υλικό συνίσταται να είναι 220-250⁰ C , σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ώστε να μπορεί να εκτυπωθεί σωστά, , ενώ η επιφάνεια εκτύπωσης να είναι 95-110⁰ C , έχοντας τις πόρτες του εκτυπωτή κλειστές για την καλύτερη κατανομή και διατήρηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 12 : 3Dedge ABS-9003 Ivory Filament

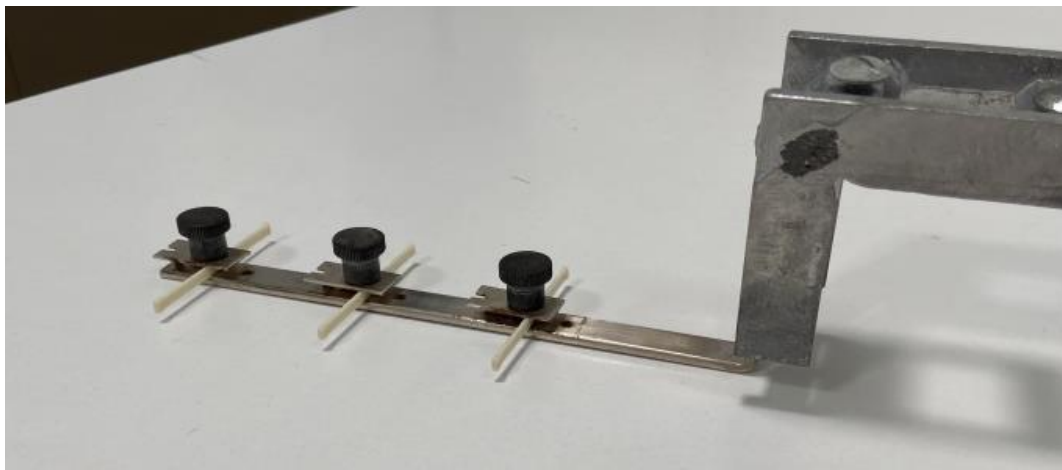
Ο κλίβανος ή αλλιώς φούρνος (SNOL 6.7/1300 LSM01) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του εξωτερικού θερμικού ερεθίσματος. Πρόκειται για έναν εργαστηριακής χρήσης φούρνο με δυνατότητα μέγιστης θερμοκρασίας 1300⁰C , χωρητικότητας 6.7 L και εσωτερικής διάστασης 133*160*295. Οι θερμοκρασίες που επιλέγονται ως θερμικό ερέθισμα είναι πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του ABS.[35,36]



Εικόνα 13 : Φούρνος SNOL 6.7/1300 LSM01 (πηγή: Snol)

Η κατασκευή για την συγκράτηση και την διατήρηση των δοκιμών σε επίπεδη επιφάνεια για όση ώρα παραμένουν στον φούρνο, χωρίς τα πειράματα να επηρεάζονται, παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες. Οι βίδες που συγκρατούν τα δοκίμια ασκούν την απαιτούμενη δύναμη που χρειάζεται ώστε να μην αλλοιώνουν

την μορφή και τις ιδιότητες του υλικού. Οι δύο λάμες, από μπρούτζο, που είναι τοποθετημένες δεξιά και αριστερά από την κατασκευή, χρησιμοποιούνται μέσα στον φούρνο ώστε να αποτραπεί τυχόν κατακόρυφη κάμψη των δοκιμίων, αλλοιώνοντας τα επιθυμητά μας αποτελέσματα.



Εικόνα 14 : Αυτοσχέδια κατασκευή για την συγκράτηση των δοκιμίων



Εικόνα 15 : Αυτοσχέδια κατασκευή μέσα στον φούρνο και πάνω στις λάμες από μπρούτζο

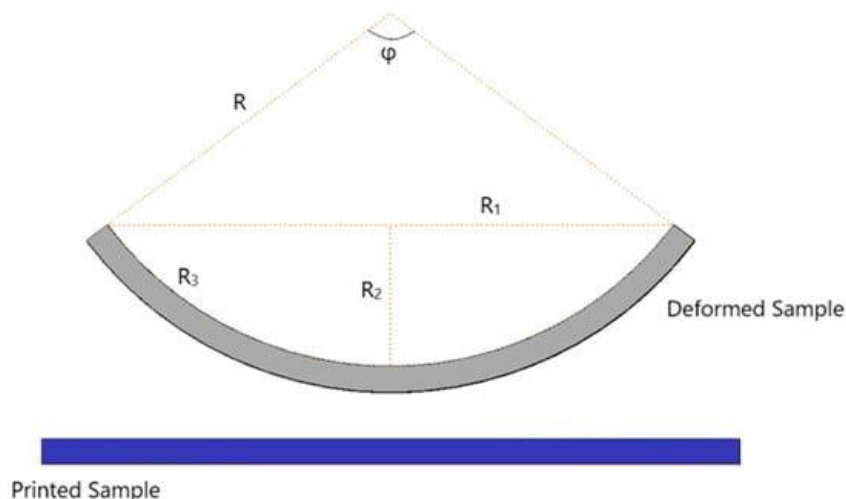
5.2 Σχεδιασμός Δοκιμίου

Οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα επιλέχθηκε να είναι $L = 60 \text{ mm}$, $b = 3.5 \text{ mm}$, $h = 1.2 \text{ mm}$. Για την δημιουργία των δειγμάτων δοκιμής χρειάστηκε μια λεπτομερής διαδικασία ξεκινώντας από τον ψηφιακό τους σχεδιασμό με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, χρησιμοποιώντας το λογισμικό σχεδιασμού CAD (Autodesk Inventor 2023). Έπειτα, τα δείγματα προετοιμάστηκαν για την 3D εκτύπωση. Το στάδιο αυτό περιελάμβανε τον καθορισμό διαφόρων παραμέτρων εκτύπωσης στο λογισμικό τεμαχισμού, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας και λειτουργικότητας της εκτύπωσης. Σημαντικές παράμετροι που τέθηκαν σε αυτό το στάδιο αποτελούσαν η ταχύτητα εκτύπωσης, η θερμοκρασία ακροφυσίου, το ύψος και το πλάτος στρώματος, η θερμοκρασία ενεργοποίησης, καθεμία από τις οποίες συνέβαλε σημαντικά στα τελικά φυσικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων.

5.3 Πειραματική Διαδικασία

Η διαδικασία περιλαμβάνει 18 διαφορετικά πειράματα όπου για κάθε ένα από αυτά εκτυπώνονται 5 δοκίμια. Τα δοκίμια είναι, αρχικά, σε ευθεία μορφή, χωρίς καμία παραμόρφωση. Τα σημάδια μετασχηματισμού τους εμφανίζονται όταν θερμαίνονται και ο επαρκής χρόνος θέρμανσης τους, ώστε να παρθεί η τελική μορφή, εκτιμήθηκε έπειτα από δοκιμές 15 λεπτά. Οι θερμοκρασίες ενεργοποίησης (Activation temperature) στον φούρνο επιλέχθηκαν να είναι 140, 150, 160^o C. Μετά την αφαίρεση των δοκιμίων από τον φούρνο αφήνονται να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος και φωτογραφίζονται ώστε έπειτα να επεξεργαστούν σε κάποιο πρόγραμμα CAD παίρνοντας τις μετρήσεις που χρειαζόμαστε. Μετρώντας την κάμψη των δοκιμίων διαπιστώνουμε, επίσης, αν υπάρχει επαναληψιμότητα μεταξύ τους. Τέλος μέσω μεθόδων στατιστικής Taguchi καταλήγουμε στα αποτελέσματα που αναζητάμε.

Για τα συγκεκριμένα πειράματα οι μετρήσεις που καταγράφηκαν είναι η **R1**: Χορδή παραμορφωμένης δομής – αντιπροσωπεύει την ευθεία απόσταση μεταξύ των δύο άκρων της καμπύλης, **R2**: Παραμόρφωση δέσμης – μετρά την έκταση απόκλισης ή μετατόπισης της δέσμης από την αρχή της θέσης, **R3**: Εξωτερικό τόξο – καταγράφει την καμπυλότητα εντός του παραμορφωμένου σχήματος.



Σχήμα 25: Σχηματική περιγραφή των παραμέτρων παραμορφωμένου σχήματος (Πηγή : MDPI)

5.4 Μέθοδος Taguchi

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του στατιστικού λογισμικού Minitab 17, προκειμένου να εντοπιστεί ο τρόπος με τον οποίο οι διάφορες παράμετροι επηρεάζουν το αποτέλεσμα ή την απόδοση των εκτυπωμένων δομών. Με την χρήση των ορθογώνιων πινάκων ο σχεδιασμός των πειραμάτων καθίσταται πιο απλός καθότι από τα 1458 αρχικά πειράματα που διερευνήθηκαν, απλοποιήθηκαν σε ένα υποσύνολο των 18 απόλυτα αντιπροσωπευτικών και πλήρως αποδεκτών για τον στόχο της διερεύνησης μας, εστιάζοντας σε πέντε παράγοντες όπως η ταχύτητα εκτύπωσης (printing speed), το ύψος στρώματος (layer height), το πλάτος στρώματος (layer width), την θερμοκρασία ακροφυσίου (Nozzle temperature) και θερμοκρασία ενεργοποίησης (Activation temperature). Με την χρήση του L 18 Design of Experiments (DoE) του Taguchi, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα , παρουσιάζονται οι παράμετροι ελέγχου και τα επίπεδα τους.

Πίνακας 1

Διαφορετικές μεταβλητές ελέγχου και τα επίπεδά τους (Levels, ($6^1 \times 3^4$)).

Code	Control Parameters	Unit	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
A	Printing Speed	mm/s	75	90	105	120	135	150
B	Layer Height	mm	0.15	0.2	0.3	-	-	-
C	Layer Width	mm	0.4	0.48	0.52	-	-	-
D	Activation Temperature	° C	140	150	160	-	-	-
E	Nozzle Temperature	° C	220	230	240	-	-	-

Το πειραματικό σχέδιο είναι για τέσσερις παραμέτρους (nozzle temperature, activation temperature, layer width, layer height) με τρία επίπεδα (3^4) και μία παράμετρο (printing speed) με έξι επίπεδα (6^1).

Πίνακας 2

Taguchi L18 ($6^1 \times 3^4$) ορθογώνιος πίνακας

Experiment Number	Printing Speed (mm/s)	Layer Height (mm)	Layer Width (mm)	Nozzle Temperature ($^{\circ}$ C)	Activation Temperature ($^{\circ}$ C)
1	75	0.15	0.4	220	140
2	75	0.2	0.48	230	150
3	75	0.3	0.52	240	160
4	90	0.15	0.4	230	150
5	90	0.2	0.48	240	160
6	90	0.3	0.52	220	140
7	105	0.15	0.48	220	160
8	105	0.2	0.52	230	140
9	105	0.3	0.4	240	150
10	120	0.15	0.52	240	150
11	120	0.2	0.4	220	160
12	120	0.3	0.48	230	140
13	135	0.15	0.48	240	140
14	135	0.2	0.52	220	150
15	135	0.3	0.4	230	160
16	150	0.15	0.52	230	160
17	150	0.2	0.4	240	140
18	150	0.3	0.48	220	150

6. Αποτελέσματα Πειραμάτων

6.1 Ανάλυση Κύριων Επιδράσεων - Main Effects Analysis

Για την εκτίμηση της επίδρασης του κάθε συντελεστή ελέγχου στην απόκριση, υπολογίζονται οι μέσες τιμές και οι λόγοι σήματος προς θόρυβο (S/N). Ο λόγος αυτός είναι ένα μέτρο ανθεκτικότητας που βοηθά στον εντοπισμό διαμορφώσεων παραγόντων ελέγχου που ελαχιστοποιούν αποτελεσματικά τη μεταβλητότητα ή τον θόρυβο στη διαδικασία. Για τις μετρήσεις R2, σε αυτήν την μελέτη, επιλέχθηκε το κριτήριο « Όσο μεγαλύτερο τόσο το καλύτερο» για να μεγιστοποιηθεί η ανταπόκριση, ενώ για τις μετρήσεις R1 και R3 χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο «Όσο μικρότερο τόσο το καλύτερο». Οι λόγοι (S/N) για τα κριτήρια αυτά υπολογίζονται με την χρήση της εξίσωσης (6.1) για το «Όσο μεγαλύτερο τόσο το καλύτερο» και της εξίσωσης (6.2) για το «Όσο μικρότερο τόσο το καλύτερο».

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{Y^2} \right) \right] \quad (6.1)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y^2 \right) \right] \quad (6.2)$$

Το y υποδηλώνει αποκρίσεις για τον δεδομένο συνδυασμό επιπέδου παράγοντα και το n τον αριθμό των αποκρίσεων στον συνδυασμό επιπέδου παράγοντα.

Για ένα δεδομένο επίπεδο συντελεστή, ο μέσος όρος των λόγων S/N προκύπτει από τον μέσο όρο των λόγων S/N όλων των πειραματικών δοκιμών όπου υπάρχει το συγκεκριμένο επίπεδο. Μαθηματικά εκφράζεται από την εξίσωση (6.3)

$$M_{\frac{S}{N}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{S}{N} \right)_i \quad (6.3)$$

Όπου k ο αριθμός των πειραματικών εκτελέσεων που περιλαμβάνουν το συγκεκριμένο επίπεδο του παράγοντα που αναλύεται.

Η μέση απόκριση για κάθε επίπεδο παράγοντα περιλαμβάνει τον μέσο όρο των τιμών απόκρισης για όλες τις πειραματικές δοκιμές όπου υπάρχει το επίπεδο του παράγοντα. Η εξίσωση που το αντιπροσωπεύει είναι η (6.4)

$$M_{Response} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overline{R_{xi}} \quad (6.4)$$

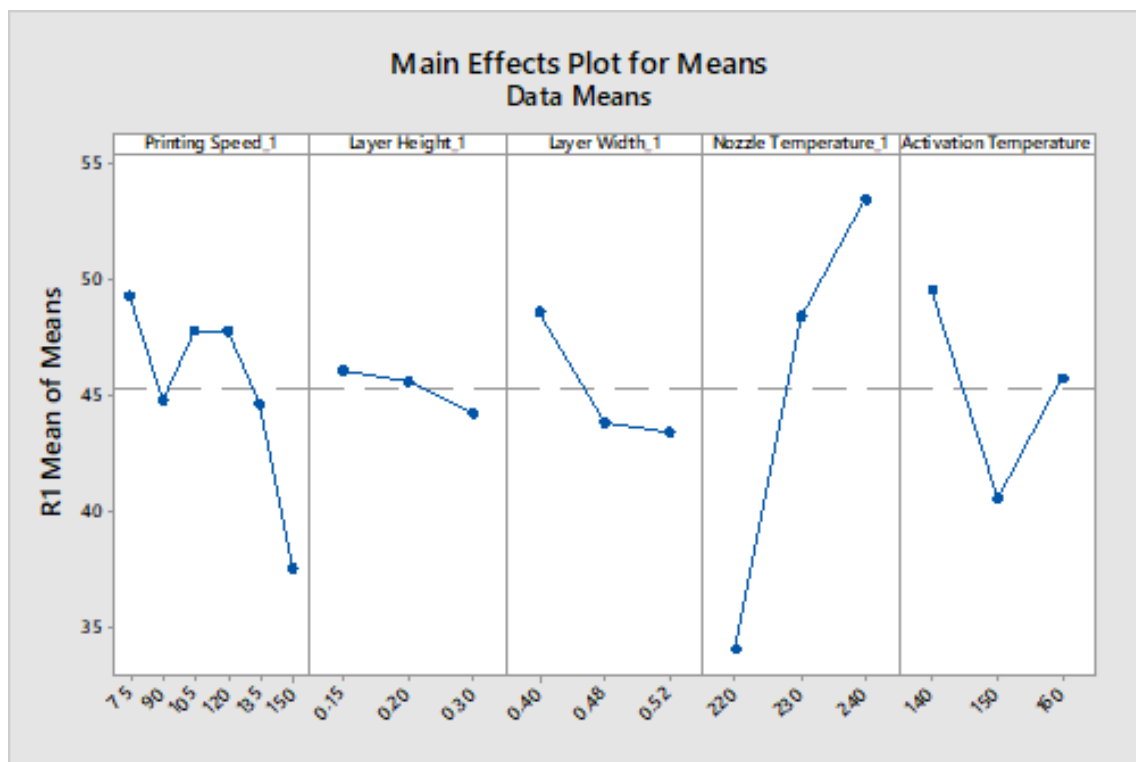
Το $\overline{R_{xi}}$ αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή απόκρισης για την i -οστή πειραματική εκτέλεση.

Ο λόγος S/N (Signal-to-Noise) είναι μια κρίσιμη μέτρηση στη μηχανική ποιότητας, ιδιαίτερα στη μέθοδο Taguchi. Αξιολογεί τη σχέση μεταξύ του επιθυμητού σήματος (δηλαδή του χαρακτηριστικού ποιότητας) και του θορύβου (δηλαδή της ανεπιθύμητης μεταβλητότητας στη διαδικασία). Στα πλαίσια της μεθόδου Taguchi, ο μέσος όρος αναφέρεται στον μέσο όρο της απόκρισης που παράγεται για κάθε συνδυασμό

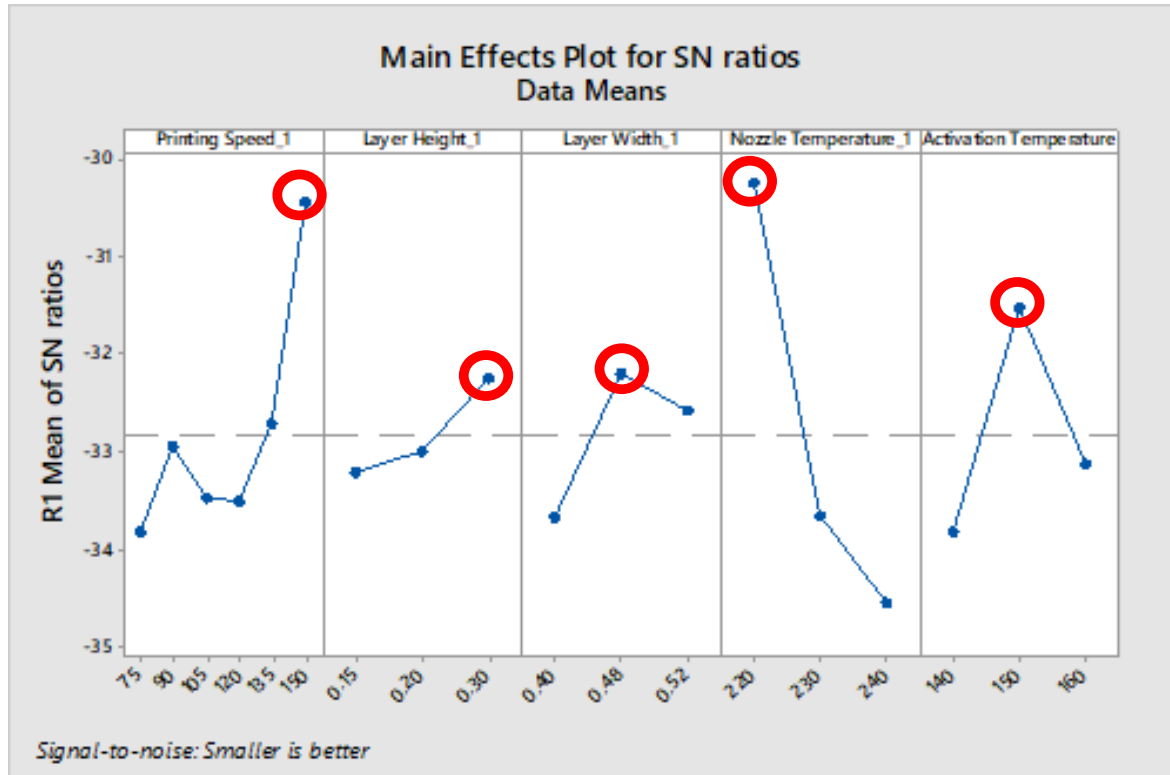
επιπέδων παραγόντων ελέγχου σε έναν στατικό σχεδιασμό Taguchi. Ένας υψηλός λόγος S/N σημαίνει ότι το χαρακτηριστικό ποιότητας είναι σαφώς ισχυρότερο και πιο συνεπές σε σχέση με τον θόρυβο, υποδεικνύοντας έτσι μια πιο σταθερή και ανθεκτική διαδικασία. Κατά την βελτιστοποίηση διεργασιών, στόχος είναι η επίτευξη του υψηλότερου δυνατού λόγου S/N, ώστε η διαδικασία να παρουσιάζει τη μέγιστη σταθερότητα και την ελάχιστη ευαισθησία σε τυχαίες διακυμάνσεις. Στα διαγράμματα (Σχήμα 17, 19, 21), τα βέλτιστα επίπεδα παραμέτρων που επιτυγχάνουν τον υψηλότερο λόγο S/N επισημαίνονται με κόκκινους κύκλους, διευκολύνοντας έτσι τον εντοπισμό τους για περαιτέρω βελτιώσεις.

6.2 Διαγράμματα Κύριων Επιδράσεων

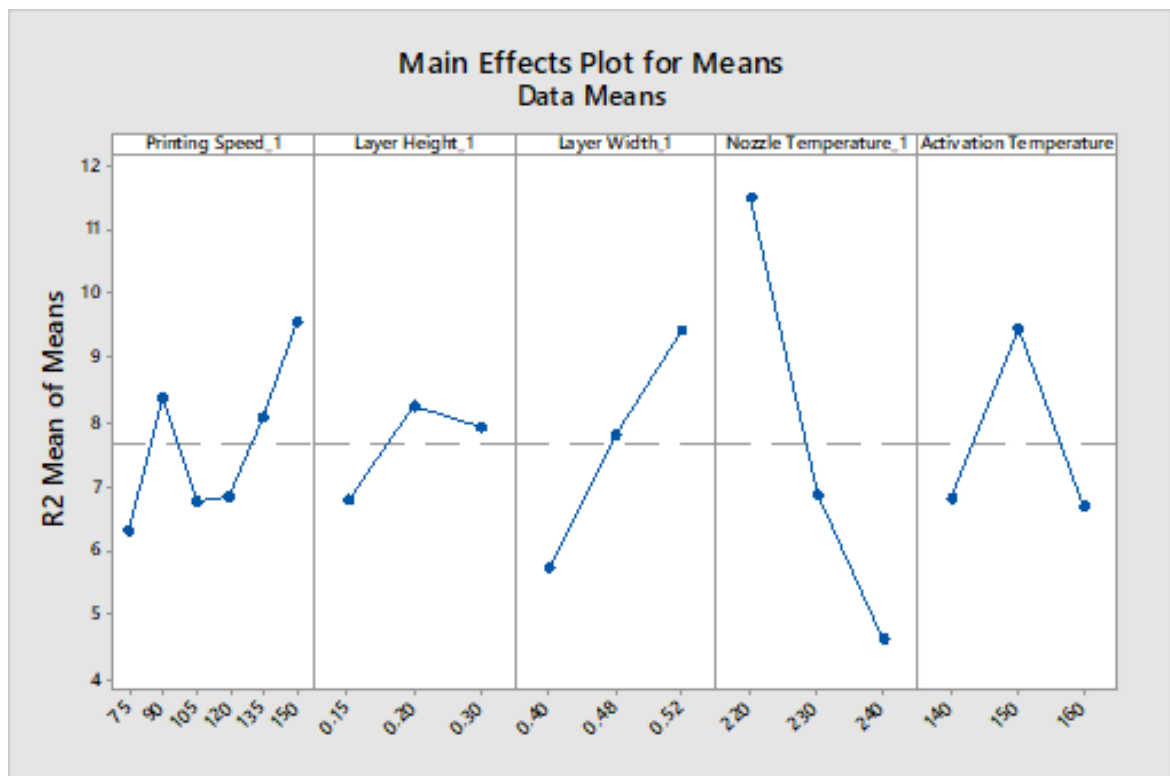
Για την ανάλυση θορύβου (SN ratios) και του μέσου όρου (Means) έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα για την κάθε μέτρηση ξεχωριστά (R1, R2, R3) και οι επακόλουθοι πίνακες Response Table for Means (3,4,5,6,7,8) προκύπτουν με την χρήση της μεθόδου Taguchi και μας δίνουν τις τιμές των σημείων πάνω στα διαγράμματα.



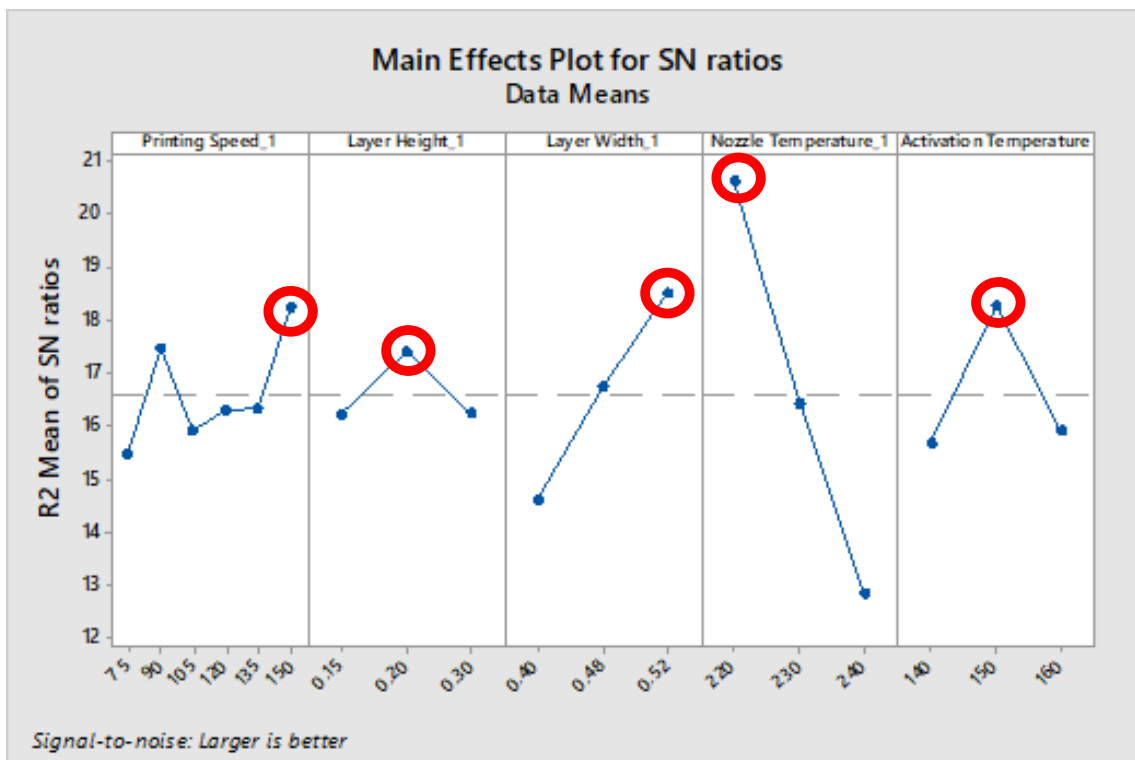
Εικόνα 16 : Κύριες επιδράσεις μέσου όρου (R1)



Εικόνα 17 : R1 μέσος όρος των λόγων S/N για κάθε συντελεστή



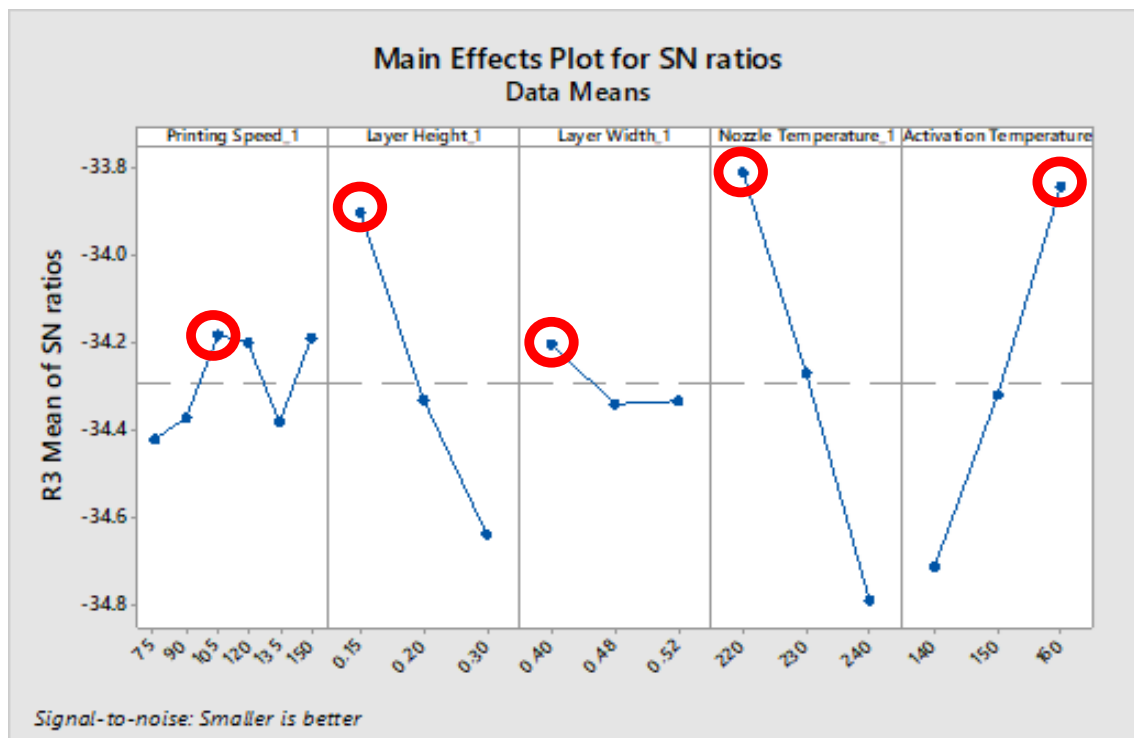
Εικόνα 18 : Κύριες επιδράσεις μέσου όρου (R2)



Εικόνα 19 : R2 μέσος όρος των λόγων S/N για κάθε συντελεστή



Εικόνα 20 : Κύριες επιδράσεις μέσου όρου (R3)



Εικόνα 21 : R3 μέσος όρος των λόγων S/N για κάθε συντελεστή

6.2.1 Ανάλυση διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων

Στο γράφημα της εικόνας 16 παρατηρούμε ότι η μέση τιμή (Means) του R1 εμφανίζει μια μικρή αύξηση στην ταχύτητα 90 mm/s, στις ταχύτητες 105 mm/s έως 120 mm/s φαίνεται να παραμένει ίδια, ενώ στις 75 mm/s και 120 mm/s έως 150 mm/s παρατηρείται μία φαινομενική μείωση καθώς αυξάνεται η ταχύτητα εκτύπωσης (printing speed). Με την αύξηση του ύψους στρώματος (layer Height) παρουσιάζεται μείωση από τα 0.15 mm έως τα 0.3 mm, όπως επίσης το ίδιο συμβαίνει και με την αύξηση του πλάτους στρώματος (layer width) από τα 0.4 mm έως τα 0.52 mm. Όσο αναφορά την θερμοκρασία ακροφυσίου (nozzle temperature), καθώς μεγαλώνει, αυξάνεται και η μέση τιμή. Τέλος για την θερμοκρασία ενεργοποίησης (activation temperature) η μέση τιμή μειώνεται για θερμοκρασία 140^o C και αυξάνεται για θερμοκρασία 150^o C έως 160^o C.

Στο γράφημα της εικόνας 17 έχουμε τις επιδράσεις σήματος – θορύβου (SN ratios). Για την μέτρηση του R1 χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο «Smaller is better» (όσο μικρότερο τόσο το καλύτερο), αναδεικνύοντας το βέλτιστο συνδυασμό επιπέδων των παραγόντων που επιτυγχάνουν τη μικρότερη δυνατή απόκριση (ή τιμή) του R1 και ελαχιστοποιούν τη μεταβλητότητα ή το θόρυβο στη διεργασία. Για να επιτευχθεί αυτό, επιλέγουμε τα επίπεδα των παραγόντων που μεγιστοποιούν την τιμή του λόγου S/N. Επομένως ο βέλτιστος συνδυασμός των επιπέδων των παραγόντων για την ελαχιστοποίηση του R1 είναι το επίπεδο 6 για την ταχύτητα εκτύπωσης (150 mm/s), το επίπεδο 3 για το ύψος στρώματος (0.3 mm), το επίπεδο 2 για το πλάτος στρώματος (0.48 mm), το επίπεδο 1 για την θερμοκρασία ακροφυσίου (220^o C) και το επίπεδο 2 για την θερμοκρασία ενεργοποίησης (150^o C).

Στο γράφημα της εικόνας 18 παρατηρούμε ότι η μέση τιμή (Means) του R2 εμφανίζει μια μικρή αύξηση στις ταχύτητες 75 mm/s, 90 mm/s, 120mm/s έως 150 mm/s, ενώ στην ταχύτητα 90 mm/s παρατηρείται μείωση. Για το ύψος στρώματος αύξηση παρουσιάζεται για 0.15 mm , ενώ μείωση για 0.2 mm έως 0.3 mm. Για το πλάτος στρώματος αύξηση παρουσιάζεται, στην μέση τιμή, καθώς αυξάνεται, εν αντιθέσει με την θερμοκρασία ακροφυσίου που εμφανίζει μείωση. Τέλος για την θερμοκρασία ενεργοποίησης εμφανίζει αύξηση για 140^o C και μείωση για 150^o C έως 160^o C.

Στο γράφημα της εικόνας 19 παρουσιάζονται οι επιδράσεις σήματος-θορύβου (SN ratios). Για την μέτρηση του R2 χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο «larger is better» (όσο μεγαλύτερο τόσο το καλύτερο), αναδεικνύοντας το βέλτιστο συνδυασμό επιπέδων των παραγόντων που επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη δυνατή απόκριση (ή τιμή) του R2 και ελαχιστοποιούν τη μεταβλητότητα ή το θόρυβο στη διεργασία. Για να επιτευχθεί αυτό, επιλέγουμε τα επίπεδα των παραγόντων που μεγιστοποιούν την τιμή του λόγου S/N. Επομένως ο βέλτιστος συνδυασμός των επιπέδων των παραγόντων είναι το επίπεδο 6 για την ταχύτητα εκτύπωσης (150 mm/s), το επίπεδο 2 για το ύψος στρώματος (0.2 mm), το επίπεδο 3 για το πλάτος στρώματος (0.52 mm), το επίπεδο 1 για την θερμοκρασία ακροφυσίου (220^o C) και το επίπεδο 2 για την θερμοκρασία ενεργοποίησης (150^o C).

Στο γράφημα της εικόνας 20 παρατηρούμε ότι η μέση τιμή (Means) του R3 εμφανίζει μία μικρή μείωση στις ταχύτητες εκτύπωσης 75 mm/s, 90 mm/s, 135 mm/s έως 150 mm/s, ενώ στην 105 mm/s έως 120 mm/s παραμένει σχεδόν αμετάβλητη και από 120 mm/s -135 mm/s υπάρχει μικρή αύξηση. Με την αύξηση του ύψους στρώματος υπάρχει αύξηση της μέσης τιμής. Για το πλάτος στρώματος αύξηση παρατηρείται για 0.4 mm, ενώ μείωση για 0.48 mm έως 0.52 mm. Με την αύξηση της θερμοκρασίας ακροφυσίου παρατηρείται αύξηση της μέσης τιμής, ενώ τέλος με την αύξηση της θερμοκρασίας ενεργοποίησης έχουμε μείωση της μέσης τιμής.

Στο γράφημα της εικόνας 21 παρουσιάζονται οι επιδράσεις σήματος-θορύβου (SN ratio). Για την μέτρηση του R3 χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο «smaller is better» (όσο μικρότερο τόσο το καλύτερο), αναδεικνύοντας το βέλτιστο συνδυασμό επιπέδων των παραγόντων που επιτυγχάνουν τη μικρότερη δυνατή απόκριση (ή τιμή) του R3 και ελαχιστοποιούν τη μεταβλητότητα ή το θόρυβο στη διεργασία. Για να επιτευχθεί αυτό, επιλέγουμε τα επίπεδα των παραγόντων που μεγιστοποιούν την τιμή του λόγου S/N . Επομένως ο βέλτιστος συνδυασμός των επιπέδων των παραγόντων για την ελαχιστοποίηση του R3 είναι το επίπεδο 3 για την ταχύτητα εκτύπωσης (105 mm/s), το επίπεδο 1 για το ύψος στρώματος (0.15 mm), το επίπεδο 1 για το πλάτος στρώματος (0.40 mm), το επίπεδο 1 για την θερμοκρασία ακροφυσίου (220^o C) και το επίπεδο 3 για την θερμοκρασία ενεργοποίησης (160^o C).

Πίνακας 3: Response Table for Means (R1)

Level	Printing Speed	Layer Height	Layer Width	Nozzle Temperature	Activation Temperature
1	49.27	46.08	48.62	34.14	49.58
2	44.80	45.60	43.85	48.38	40.62
3	47.76	44.26	43.47	53.43	45.75
4	47.77				
5	44.69				
6	37.59				
Maximum – Minimum value	11.68	1.82	5.16	19.30	8.96

Πίνακας 4: Response Table for SNR (R1)

Level	Printing Speed	Layer Height	Layer Width	Nozzle Temperature	Activation Temperature
1	-33.83	-33.21	-33.68	-30.24	-33.82
2	-32.94	-33.00	-32.19	-33.66	-31.51
3	-33.48	-32.25	-32.58	-34.55	-33.12
4	-33.50				
5	-32.71				
6	-30.44				
Maximum – Minimum value	3.39	0.97	1.49	4.31	2.31

Πίνακας 5: Response Table for Means (R2)

Level	Printing Speed	Layer Height	Layer Width	Nozzle Temperature	Activation Temperature
1	6.327	6.808	5.741	11.480	6.818
2	8.379	8.246	7.810	6.871	9.465
3	6.786	7.929	9.432	4.632	6.699
4	6.840				
5	8.072				
6	9.562				
Maximum – Minimum value	3.235	1.438	3.691	6.848	2.766

Πίνακας 6: Response Table for SNR (R2)

Level	Printing Speed	Layer Height	Layer Width	Nozzle Temperature	Activation Temperature
1	15.46	16.21	14.60	20.62	15.68
2	17.46	17.41	16.75	16.41	18.28
3	15.92	16.22	18.50	12.82	15.90
4	16.29				
5	16.33				
6	18.24				
Maximum – Minimum value	2.78	1.20	3.90	7.80	2.60

Πίνακας 7: Response Table for Means (R3)

Level	Printing Speed	Layer Height	Layer Width	Nozzle Temperature	Activation Temperature
1	6.327	6.808	5.741	11.480	6.818
2	8.379	8.246	7.810	6.871	9.465
3	6.786	7.929	9.432	4.632	6.699
4	6.840				
5	8.072				
6	9.562				
Maximum – Minimum value	3.235	1.438	3.691	6.848	2.766

Πίνακας 8: Response Table for SNR (R3)

Level	Printing Speed	Layer Height	Layer Width	Nozzle Temperature	Activation Temperature
1	15.46	16.21	14.60	20.62	15.68
2	17.46	17.41	16.75	16.41	18.28
3	15.92	16.22	18.50	12.82	15.90
4	16.29				
5	16.33				
6	18.24				
Maximum – Minimum value	2.78	1.20	3.90	7.80	2.60

6.3 Ανάλυση Διακύμανσης – ANOVA

Η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο στατιστικού ελέγχου σημαντικότητας με πολλαπλές συγκρίσεις πολλών μέσων όρων ομάδων. Πρωταρχικό στόχο έχει την αξιολόγηση της ατομικής επίδρασης κάθε

παράγοντα στις μεταβλητές απόκρισης R1, R2, R3. [37] Οι παρακάτω εξισώσεις μας δίνουν:

- τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας, $df_{tot} = k-1$, όπου k αντιπροσωπεύει τον συνολικό αριθμό πειραματικών διαδρομών
- τους βαθμούς ελευθερίας για κάθε παράγοντα ελέγχου $df_i = l-1$, όπου l αντιστοιχεί σε κάθε παράγοντα (A, B, C, D, E) και l είναι ο συνολικός αριθμός επιπέδων για κάθε παράγοντα
- τους βαθμούς ελευθερίας για υπολειπόμενο σφάλμα $df_{error} = df_{tot} - \sum_{i=1}^n df_i$, όπου n είναι ο αριθμός των συντελεστών ελέγχου
- το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων ($SS_r = SS_E + \sum_{i=1}^n SS_i$) αντιπροσωπεύει τη συνολική διακύμανση των τιμών απόκρισης, όπου το SS_i είναι το άθροισμα των τετραγώνων που αποδίδονται στον i-οστό συντελεστή ελέγχου και SS_E είναι το άθροισμα των τετραγώνων λόγω υπολειπόμενου σφάλματος.
- Το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων που ποσοτικοποιεί τη συνολική διακύμανση των δεδομένων απόκρισης, $SS_r = \sum_{i=1}^m (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2$, όπου \bar{Y}_i είναι η μέση τιμή απόκρισης για την i-οστή εκτέλεση του πειράματος, \bar{Y} είναι ο συνολικός μέσος όρος των τιμών απόκρισης και m είναι ο αριθμός των πειραματικών εκτελέσεων στην ορθογώνια συστοιχία.
- Το μέσο άθροισμα τετραγώνων του i-οστού παράγοντα που αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο των τετραγωνικών αποκλίσεων για έναν συγκεκριμένο παράγοντα και είναι ένα μέτρο της διακύμανσης εντός των ομάδων που ορίζονται από αυτόν τον παράγοντα, $MS_i = \frac{SS_i}{df_i}$
- Τη αναλογία F-ratio, $F_i = \frac{MS_i}{MS_E}$, όπου MS_E είναι το μέσο άθροισμα τετραγώνων του εναπομένου σφάλματος
- Τη ποσοστιαία συνεισφορά ενός παράγοντα σε ένα πείραμα, $contribution(\%) = \frac{SS_i}{SS_r} 100\%$ [38]

6.3.1 Επεξήγηση Μεγεθών

Sum of Squares

Το άθροισμα τετραγώνων (sum of squares) είναι ένα μέτρο της διακύμανσης των δεδομένων μας. Ποσοτικοποιεί την διαφορά των παρατηρήσεων (των δεδομένων μας) από τη μέση τιμή. Τύποι αθροίσματος τετραγώνων:

1. **Total Sum of Squares (SST):** Αντιπροσωπεύει τη συνολική μεταβλητότητα των δεδομένων. Είναι το άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ κάθε παρατήρησης και του συνολικού μέσου όρου. **Στο πινακάκι του ANOVA, το SST είναι το Total στην στήλη των Sum of Squares.**
2. **Between Group Sum of Squares (SSB):** Επίσης γνωστό ως άθροισμα τετραγώνων για τον παράγοντα. Μετρά τη διακύμανση μεταξύ των μέσων όρων των διαφόρων ομάδων. Αυτό βοηθά στην κατανόηση του πόσο μεγάλο μέρος της

συνολικής μεταβλητότητας οφείλεται στις διαφορές μεταξύ των μέσων όρων των ομάδων. **Στο πίνακάκι του ANOVA, τα Sum of Squares του κάθε παράγοντα αποτελούν το SSB.**

- 3. Within Group Sum of Squares (SSW):** Επίσης γνωστό ως άθροισμα τετραγώνων σφάλματος. Μετρά τη διακύμανση εντός κάθε ομάδας, η οποία αντιπροσωπεύει τη μεταβλητότητα που δεν μπορεί να εξηγηθεί από τον παράγοντα (ή τους παράγοντες) που μελετάται (ή μελετούνται). **Στο πίνακάκι του ANOVA, το Sum of Squares του Residual Error αποτελούν το SSW.**

Mean of Squares

Αποτελεί τον μέσο όρο του αθροίσματος των τετραγώνων. Υπολογίζεται διαιρώντας το άθροισμα των τετραγώνων με τους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας (DoF).

F

Είναι ένας λόγος που συγκρίνει το μέσο όρο του αθροίσματος των τετραγώνων των between groups (εξηγούμενη διακύμανση) με το μέσο όρο του αθροίσματος των τετραγώνων των within groups (ανεξήγητη διακύμανση).

$$F = \frac{MSB}{MSW} = \frac{\frac{SSB}{dof_{SSB}}}{\frac{SSW}{dof_{SSW}}}$$

P-value

Η τιμή p είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται στον στατιστικό έλεγχο υποθέσεων για να μας βοηθήσει να προσδιορίσουμε τη στατιστική σημαντικότητα των αποτελεσμάτων μας.

- Χαμηλή τιμή p (≤ 0.05): ο παράγοντας έχει επίδραση στην μεταβλητή απόκρισης (R1, R2, R3), αλλά δεν μετράει το μέγεθος της επίδρασης αυτής. Αυτό σημαίνει ότι ο παράγοντας έχει πραγματική, μη τυχαία επίδραση στη μεταβλητή απόκριση.

Παράδειγμα: Το Nozzle Temperature έχει p-value 0.002 στην ανάλυση ANOVA for Means of R1. Αυτή η πολύ χαμηλή p-value υποδηλώνει ότι η επίδραση της θερμοκρασίας ακροφυσίου στο R1 είναι στατιστικά σημαντική και είναι εξαιρετικά απίθανο οι παρατηρούμενες μεταβολές στο R1 λόγω της θερμοκρασίας του ακροφυσίου να οφείλονται στην τύχη.

- Υψηλή τιμή p-value (> 0.05): Σε αυτή την περίπτωση δεν μπορούμε να πούμε ότι ο παράγοντας έχει σημαντική επίδραση στην μεταβλητή απόκριση.

Παράδειγμα: Το Printing Speed έχει p-value 0.094 στην ανάλυση ANOVA for Means of R1. Αυτή η p-value είναι υψηλότερη από 0.05, γεγονός που υποδηλώνει ότι τυχόν

παρατηρούμενες μεταβολές στο R1 λόγω της ταχύτητας εκτύπωσης μπορεί να οφείλονται απλώς σε τυχαία διακύμανση και ότι ο παράγοντας δεν έχει σημαντική επίδραση.

Contribution(%)

Μετρά πόσο μέρος της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής απόκρισης μπορεί να αποδοθεί σε έναν συγκεκριμένο παράγοντα.

- **Υψηλή συνεισφορά:** Σημαίνει ότι ο παράγοντας εξηγεί μεγάλο ποσοστό της συνολικής μεταβλητότητας της μεταβλητής απόκρισης, καθιστώντας τον σημαντικό παράγοντα.

Παράδειγμα: Εάν ένας παράγοντας (π.χ. το Printing speed) έχει υψηλό ποσοστό συνεισφοράς, αυτό σημαίνει ότι ο παράγοντας αυτός εξηγεί μεγάλο μέρος της διακύμανσης της μεταβλητής απόκρισης. Με άλλα λόγια, οι μεταβολές που παρατηρείτε στη μεταβλητή απόκριση (π.χ. R1) οφείλονται σε μεγάλο βαθμό σε μεταβολές αυτού του παράγοντα.

- **Χαμηλή συνεισφορά:** Υποδεικνύει ότι ο παράγοντας εξηγεί μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής μεταβλητότητας, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι λιγότερο σημαντικός.

Όροι «**ισχυρή**» και «**αξιόπιστη**».

- ❖ **Ισχυρή:** Ο όρος «ισχυρή επίδραση» συνδέεται με το Contribution (%). Για παράδειγμα στην περίπτωση της θερμοκρασίας ακροφυσίου για R1, η συνεισφορά είναι 52.24%. Αυτό σημαίνει ότι περισσότερο από το ήμισυ της συνολικής μεταβλητότητας του λόγου σήματος προς θόρυβο (SN) του R1 εξηγείται από τις μεταβολές στη θερμοκρασία ακροφυσίου. Ένα υψηλό ποσοστό contribution υποδηλώνει ότι ο παράγοντας αυτός αποτελεί σημαντικό παράγοντα μεταβλητότητας της απόκρισης. Δεδομένου ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου αντιπροσωπεύει τόσο μεγάλο ποσοστό της διακύμανσης, η επίδρασή της στο R1 θεωρείται ισχυρή. Αυτό σημαίνει ότι όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ακροφυσίου, παρατηρείται σημαντική επίδραση στον λόγο SN του R1, γεγονός που υποδηλώνει ότι πρόκειται για παράγοντα με επιρροή στη διαδικασία.
- ❖ **Αξιόπιστη:** Ο όρος «αξιόπιστη επιρροή» αναφέρεται στην τιμή p-value. Μια χαμηλή τιμή p-value (≤ 0.05) υποδηλώνει ότι η παρατηρούμενη επίδραση είναι στατιστικά σημαντική. Για παράδειγμα η p-value 0.01 υποδηλώνει ότι υπάρχει μόνο 1% πιθανότητα η ισχυρή επιρροή που παρατηρείται (όπως υποδεικνύεται από το υψηλό ποσοστό contribution) να οφείλεται σε τυχαία διακύμανση των δεδομένων.

Για την συγκεκριμένη μελέτη η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των στατικά σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την έξυπνη συμπεριφορά τρισδιάστατα εκτυπωμένων θερμοπλαστικών δομών για τις

μετρήσεις R1, R2, R3. Τα αποτελέσματα της διακύμανσης για τον μέσο όρο (Means) και τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SN ratio) παρουσιάζονται ακολούθως .[39,40,41]

Πίνακας 9 : Analysis of Variance for Means (R1)

	Dof	Sum of Squares	Means of Squares	F	P	Contribution(%)
Printing Speed	5	263.84	52.769	4.22	0.094	14.13
Layer Height	2	10.65	5.326	0.43	0.680	0.57
Layer Width	2	98.97	49.485	3.96	0.113	5.30
Nozzle Temperature	2	1201.39	600.695	48.07	0.002	64.34
Activation Temperature	2	242.39	121.196	9.70	0.029	12.98
Residual Error	4	49.98	12.495	-	-	2.68
Total	17	1867.23	-	-	-	100

1. **Printing Speed:** Η ταχύτητα εκτύπωσης αντιπροσωπεύει το 14.13% της συνολικής διακύμανσης της μέσης τιμής του R1, υποδεικνύοντας μέτρια επίδραση. Ωστόσο, η τιμή p-value 0.094 υποδηλώνει ότι η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι οι διαφορές στη μέση τιμή R1 λόγω της ταχύτητας εκτύπωσης μπορεί να οφείλονται σε τυχαία διακύμανση.
2. **Layer Height:** Συμβάλλει με αμελητέο ποσοστό 0.57% στη διακύμανση της μέσης τιμής του R1. Με τιμή p-value 0.68, είναι σαφές ότι ο παράγοντας αυτός δεν επηρεάζει σημαντικά τη μέση απόκριση, καθιστώντας τον ασήμαντο παράγοντα στην παρούσα ανάλυση.
3. **Layer Width:** Συμβάλλει κατά 5.30% στη συνολική διακύμανση της μέσης τιμής του R1, γεγονός που αποτελεί μικρή επίδραση. Η τιμή p-value 0.113 δείχνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα δεν είναι στατιστικά σημαντική, υποδηλώνοντας ότι το Layer Width έχει μικρή και πιθανώς αμελητέα επίδραση στη μέση απόκριση.
4. **Nozzle Temperature:** Η θερμοκρασία ακροφυσίου είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επιρροή σε αυτή την ανάλυση, συμβάλλοντας σημαντικά κατά 64.34% στη διακύμανση της μέσης τιμής του R1. Η τιμή p-value 0.002 είναι μικρότερη από 0.05, επιβεβαιώνοντας ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου έχει στατιστικά σημαντική και ισχυρή επίδραση στη μέση τιμή του R1. Ο παράγοντας αυτός είναι κρίσιμος για τον καθορισμό της συνολικής απόκρισης και θα πρέπει να ελέγχεται αυστηρά.
5. **Activation Temperature:** Συμβάλλει κατά 12.98% στη συνολική διακύμανση της μέσης τιμής του R1, η οποία είναι σημαντική αλλά μικρότερη από τη θερμοκρασία ακροφυσίου. Η τιμή p-value 0.029 δείχνει ότι η επίδραση αυτή είναι στατιστικά σημαντική, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία ενεργοποίησης έχει αξιόπιστη επίδραση στη μέση απόκριση και πρέπει να θεωρείται σημαντικός παράγοντας.

Πίνακας 10 : Analysis of Variance for SN ratios (R1)

	Dof	Sum of Squares	Means of Squares	F	P	Contribution(%)
Printing Speed	5	22.806	4.561	2.63	0.185	19.19
Layer Height	2	3.092	1.546	0.89	0.479	2.60
Layer Width	2	7.138	3.569	2.06	0.243	6.01
Nozzle Temperature	2	62.086	31.043	17.88	0.01	52.24
Activation Temperature	2	16.785	8.392	4.83	0.086	14.12
Residual Error	4	6.944	1.736	-	-	5.84
Total	17	118.85	-	-	-	100

1. **Printing Speed:** Η ταχύτητα εκτύπωσης συνεισφέρει σχεδόν 19,19% στη διακύμανση των λόγων SN. Ωστόσο, η p-value 0.185 υποδηλώνει ότι η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι η παρατηρούμενη επίδραση θα μπορούσε να οφείλεται σε τυχαία διακύμανση και όχι σε πραγματική επίδραση.
2. **Layer Height:** Το Layer Height έχει πολύ χαμηλή συνεισφορά (2.60%) στη διακύμανση των λόγων SN. Η υψηλή p-value 0.479 δείχνει ότι το layer height δεν έχει στατιστικά σημαντική επίδραση στην ευρωστία του R1, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι σχετικά ασήμαντος παράγοντας.
3. **Layer Width:** Το layer width συμβάλλει κατά 6.01% στη διακύμανση των λόγων SN, που εξακολουθεί να είναι σχετικά μικρό. Η p-value 0.243 σημαίνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα στους λόγους SN του R1 δεν είναι στατιστικά σημαντική, καθιστώντας τον παράγοντα αυτό δευτερεύοντα.
4. **Nozzle Temperature:** Η θερμοκρασία ακροφυσίου είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας σε αυτή την ανάλυση, με contribution 52.24%. Η πολύ χαμηλή p-value 0.01 δείχνει ότι η επίδρασή της στον λόγο SN είναι στατιστικά σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι έχει **ισχυρή και αξιόπιστη** επίδραση στους λόγους SN του R1.
5. **Activation Temperature:** Το activation temperature συμβάλλει κατά 14.12% στη διακύμανση των λόγων SN. Η p-value 0.086 είναι κοντά στο 0.05, υποδηλώνοντας ότι ο παράγοντας αυτός μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στους λόγους SN, αλλά η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική. Είναι ένας παράγοντας που αξίζει να παρακολουθείται, ειδικά εάν περαιτέρω δεδομένα δείξουν πιο συνεπή αποτελέσματα.

Πίνακας 11 : Analysis of Variance for Means (R2)

	Dof	Sum of Squares	Means of Squares	F	P	Contribution(%)
Printing Speed	5	22.553	4.510	8.12	0.032	9.08
Layer Height	2	6.852	3.426	6.16	0.060	2.75
Layer Width	2	41.060	20.530	36.94	0.003	16.53
Nozzle Temperature	2	146.281	73.140	131.59	0.000	58.91
Activation Temperature	2	29.340	14.670	26.39	0.005	11.81
Residual Error	4	2.223	0.5558	-	-	0.89
Total	17	248.309	-	-	-	100

1. **Printing Speed:** Η ταχύτητα εκτύπωσης αντιπροσωπεύει το 9.08% της συνολικής διακύμανσης της μέσης τιμής του R2, υποδεικνύοντας μέτρια επίδραση. Ωστόσο, η τιμή p-value 0.032 υποδηλώνει ότι η επίδραση αυτή είναι στατιστικά σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι οι διαφορές στη μέση τιμή R2 λόγω της ταχύτητας εκτύπωσης μπορεί να μην οφείλονται σε τυχαία διακύμανση.
2. **Layer Height:** Συμβάλλει με ελάχιστο ποσοστό 2.75% στη διακύμανση της μέσης τιμής του R2. Με τιμή p-value 0.060, ο παράγοντας αυτός δεν επηρεάζει σημαντικά τη μέση απόκριση, καθιστώντας τον ασήμαντο παράγοντα στην παρούσα ανάλυση.
3. **Layer Width:** Συμβάλλει κατά 16.53% στη συνολική διακύμανση της μέσης τιμής του R2, γεγονός που αποτελεί μέτρια επίδραση. Η τιμή p-value 0.003 δείχνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα είναι στατιστικά σημαντική, υποδηλώνοντας ότι το Layer Width είναι ένας αξιόπιστος παράγοντας που χρειάζεται να διερευνηθεί .
4. **Nozzle Temperature:** Η θερμοκρασία ακροφυσίου είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επιρροή σε αυτή την ανάλυση, συμβάλλοντας σημαντικά κατά 58.91% στη διακύμανση της μέσης τιμής του R2. Η τιμή p-value 0.000 μας επιβεβαιώνει ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου έχει στατιστικά σημαντική και ισχυρή επίδραση στη μέση τιμή του R2. Ο παράγοντας αυτός είναι κρίσιμος για τον καθορισμό της συνολικής απόκρισης και θα λέγαμε πως είναι ισχυρός και αξιόπιστος.
5. **Activation Temperature:** Συμβάλλει κατά 11.81% στη συνολική διακύμανση της μέσης τιμής του R2, η οποία είναι σημαντική αλλά μικρότερη από τη θερμοκρασία ακροφυσίου. Η τιμή p-value 0.005 δείχνει ότι η επίδραση αυτή είναι στατιστικά σημαντική, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία ενεργοποίησης έχει αξιόπιστη επίδραση στη μέση απόκριση και πρέπει να θεωρείται σημαντικός παράγοντας.

Πίνακας 12: Analysis of Variance for SN ratios (R2)

	Dof	Sum of Squares	Means of Squares	F	P	Contribution(%)
Printing Speed	5	162.21	32.441	3.94	0.104	39.35
Layer Height	2	43.74	21.869	2.66	0.184	10.61
Layer Width	2	48.12	24.060	2.92	0.165	11.67
Nozzle Temperature	2	99.36	49.682	6.04	0.062	24.10
Activation Temperature	2	25.85	12.923	1.57	0.314	6.27
Residual Error	4	32.93	8.232	-	-	7.98
Total	17	412.20	-	-	-	100

1. **Printing Speed:** Η ταχύτητα εκτύπωσης συνεισφέρει 39,35% στη διακύμανση των λόγων SN. Ωστόσο, η p-value 0.104 υποδηλώνει ότι παρά το υψηλό συνεισφοράς, η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι η παρατηρούμενη επίδραση θα μπορούσε να οφείλεται σε τυχαία διακύμανση και όχι σε πραγματική επίδραση.
2. **Layer Height:** Το Layer Height έχει μέτρια συνεισφορά 10.61% στη διακύμανση των λόγων SN. Η υψηλή p-value 0.184 δείχνει ότι το layer height δεν έχει στατιστικά σημαντική επίδραση στην ευρωστία του R2, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι σχετικά ασήμαντος παράγοντας.
3. **Layer Width:** Το layer width συμβάλλει κατά 11.67% στη διακύμανση των λόγων SN, που εξακολουθεί να είναι σχετικά μικρό. Η p-value 0.165 σημαίνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα στους λόγους SN του R2 δεν είναι στατιστικά σημαντική, καθιστώντας τον παράγοντα αυτό δευτερεύοντα.
4. **Nozzle Temperature:** Η θερμοκρασία ακροφυσίου σε αυτή την ανάλυση έχει μία μέτρια επίδραση 24.10%. Η p-value 0.062 δείχνει ότι η επίδρασή της στον λόγο SN δεν είναι στατιστικά σημαντική.
5. **Activation Temperature:** Το activation temperature συμβάλλει με χαμηλό ποσοστό 6.27% στη διακύμανση των λόγων SN. Η υψηλή τιμή p-value 0.314 υποδηλώνοντας ότι η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Πίνακας 13: Analysis of Variance for Means (R3)

	Dof	Sum of Squares	Means of Squares	F	P	Contribution(%)
Printing Speed	5	4.902	0.980	3.14	0.145	2.04
Layer Height	2	55.315	27.657	88.57	0.000	20.03
Layer Width	2	2.514	1.2571	4.03	0.110	1.04
Nozzle Temperature	2	99.949	49.974	160.03	0.000	41.62
Activation Temperature	2	76.222	38.110	122.04	0.000	31.74
Residual Error	4	1.249	0.3123	-	-	0.52
Total	17	240.151	-	-	-	100

1. **Printing Speed:** Η ταχύτητα εκτύπωσης αντιπροσωπεύει το 2.04% της συνολικής διακύμανσης της μέσης τιμής του R3, υποδεικνύοντας ασήμαντη επίδραση. Επίσης, η τιμή p-value 0.145 υποδηλώνει ότι η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι οι διαφορές στη μέση τιμή R3 λόγω της ταχύτητας εκτύπωσης μπορεί να οφείλονται σε τυχαία διακύμανση.
2. **Layer Height:** Συμβάλλει με ένα μέτριας επίδρασης ποσοστό 20.03% στη διακύμανση της μέσης τιμής του R3. Με τιμή p-value 0.00, είναι σαφές ότι ο παράγοντας αυτός επηρεάζει σημαντικά τη μέση απόκριση, καθιστώντας τον σημαντικό παράγοντα στην παρούσα ανάλυση.
3. **Layer Width:** Συμβάλλει κατά 1.04% στη συνολική διακύμανση της μέσης τιμής του R3, γεγονός που αποτελεί ελάχιστη επίδραση. Η τιμή p-value 0.110 δείχνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα δεν είναι στατιστικά σημαντική, υποδηλώνοντας ότι το Layer Width έχει μικρή και πιθανώς αμελητέα επίδραση στη μέση απόκριση.
4. **Nozzle Temperature:** Η θερμοκρασία ακροφυσίου είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επιρροή σε αυτή την ανάλυση, συμβάλλοντας σημαντικά κατά 41.62% στη διακύμανση της μέσης τιμής του R1. Η τιμή p-value 0.000, επιβεβαιώνει ότι η θερμοκρασία ακροφυσίου έχει στατιστικά σημαντική και ισχυρή επίδραση στη μέση τιμή του R3. Ο παράγοντας αυτός είναι κρίσιμος για τον καθορισμό της συνολικής απόκρισης και θα πρέπει να ελέγχεται αυστηρά.
5. **Activation Temperature:** Συμβάλλει κατά 31.74% στη συνολική διακύμανση της μέσης τιμής του R3, η οποία είναι αρκετά σημαντική αλλά μικρότερη από τη θερμοκρασία ακροφυσίου. Η τιμή p-value 0.000 δείχνει ότι η επίδραση αυτή είναι στατιστικά σημαντική, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμοκρασία ενεργοποίησης έχει αξιόπιστη επίδραση στη μέση απόκριση και πρέπει να θεωρείται σημαντικός παράγοντας.

Πίνακας 14 : Analysis of Variance for SN ratios (R3)

	Dof	Sum of Squares	Means of Squares	F	P	Contribution(%)
Printing Speed	5	0.18422	0.03684	2.77	0.173	2.6
Layer Height	2	1.63991	0.81996	61.57	0.001	23.08
Layer Width	2	0.07155	0.03578	2.69	0.182	1.00
Nozzle Temperature	2	2.88837	1.44419	108.44	0.00	40.65
Activation Temperature	2	2.26690	1.13345	85.11	0.001	31.90
Residual Error	4	0.05327	0.01332	-	-	0.74
Total	17	7.10423	-	-	-	100

1. **Printing Speed:** Η ταχύτητα εκτύπωσης συνεισφέρει ελάχιστα με 2.6% στη διακύμανση των λόγων SN. Η p-value 0.173 υποδηλώνει ότι η επίδραση αυτή δεν είναι στατιστικά σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι η παρατηρούμενη επίδραση θα μπορούσε να οφείλεται σε τυχαία διακύμανση και όχι σε πραγματική επίδραση.
2. **Layer Height:** Το Layer Height έχει μέτρια συνεισφορά 23.08% στη διακύμανση των λόγων SN. Η πολύ χαμηλή p-value 0.001 δείχνει ότι το layer height έχει στατιστικά σημαντική επίδραση στην ευρωστία του R3, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι σημαντικός και αξιόπιστος παράγοντας.
3. **Layer Width:** Το layer width συμβάλλει κατά 1.00% στη διακύμανση των λόγων SN, που είναι εξαιρετικά μικρό. Η p-value 0.182 σημαίνει ότι η επίδραση αυτού του παράγοντα στους λόγους SN του R3 δεν είναι στατιστικά σημαντική, καθιστώντας τον παράγοντα αυτό δευτερεύοντα.
4. **Nozzle Temperature:** Η θερμοκρασία ακροφυσίου είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας σε αυτή την ανάλυση, με contribution 40.65%. Η πολύ χαμηλή p-value 0.000 δείχνει ότι η επίδρασή της στον λόγο SN είναι στατιστικά σημαντική, γεγονός που φανερώνει την **αξιόπιστη** επίδραση του στους λόγους SN του R3.
5. **Activation Temperature:** Το activation temperature συμβάλλει κατά 31.90% στη διακύμανση των λόγων SN. Η p-value 0.001 είναι χαμηλότερη από το 0.05, υποδηλώνοντας ότι ο παράγοντας αυτός έχει σημαντική στατιστική επίδραση στους. Είναι ένας παράγοντας αξιόπιστος, που αξίζει να παρακολουθείται

6.4 Ανάλυση Παλινδρόμησης - Regression Analysis

Με την χρήση της ανάλυσης παλινδρόμησης, σε αυτήν την έρευνα, καθορίστηκαν οι σχέσεις μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών (παράμετροι ελέγχου) και εξαρτημένων μεταβλητών (απαντήσεις R1, R2, R3). Η αποτελεσματικότητα αυτών των σχέσεων ποσοτικοποιείται χρησιμοποιώντας το R^2 , ένα στατιστικό μέτρο που αξιολογεί την εγκυρότητα του μοντέλου παλινδρόμησης

Οι προγνωστικές εξισώσεις για την μέση απόκριση R1, R2, R3 (σε mm) , που προκύπτουν από την ανάλυση παλινδρόμησης εκφράζονται ως :

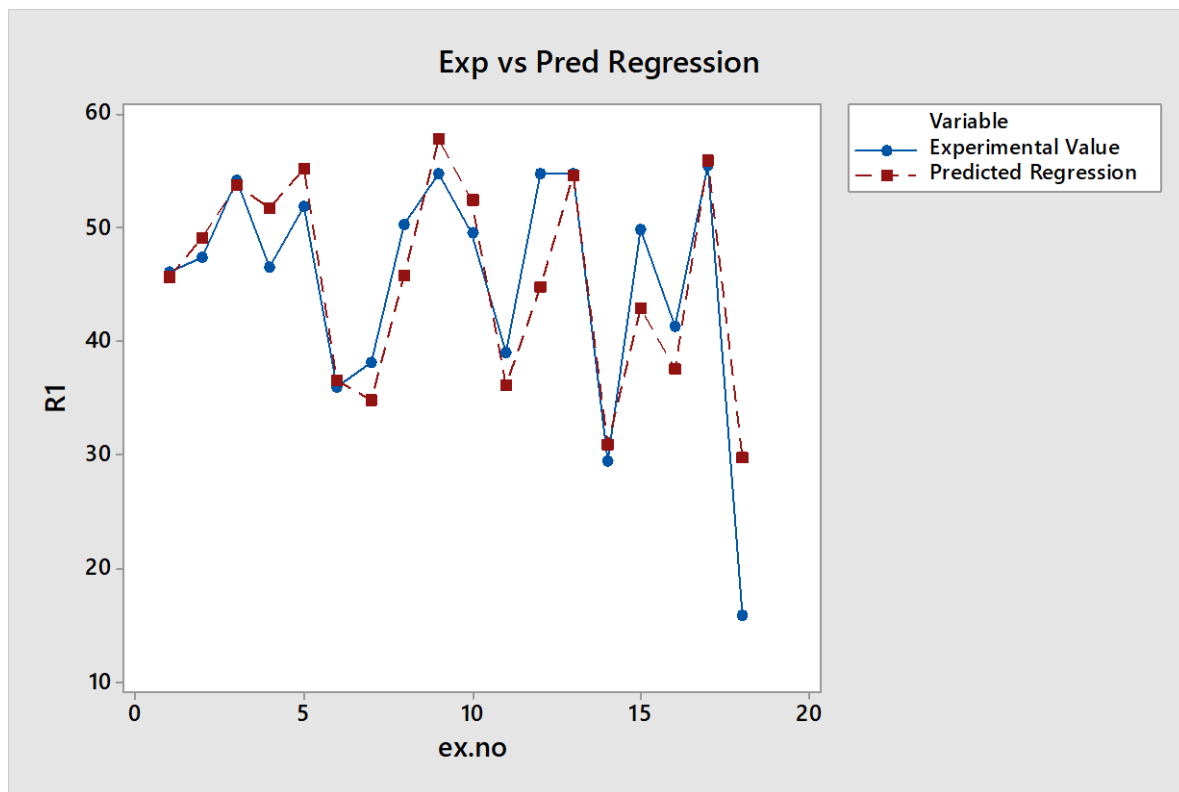
$$R1 = -111.5 - 0.1118 \text{ Printing Speed}_1 - 12.3 \text{ Layer Height}_1 - 45.3 \text{ Layer Width}_1 + 0.965 \text{ Nozzle Temperature}_1 - 0.191 \text{ Activation Temperature} \quad (R^2 = 75.59\%) \quad (6.5)$$

$$R2 = 68.7 + 0.0292 \text{ Printing Speed}_1 + 5.95 \text{ Layer Height}_1 + 30.1 \text{ Layer Width}_1 - 0.3424 \text{ Nozzle Temperature}_1 - 0.0059 \text{ Activation Temperature} \quad (R^2 = 78.01\%) \quad (6.6)$$

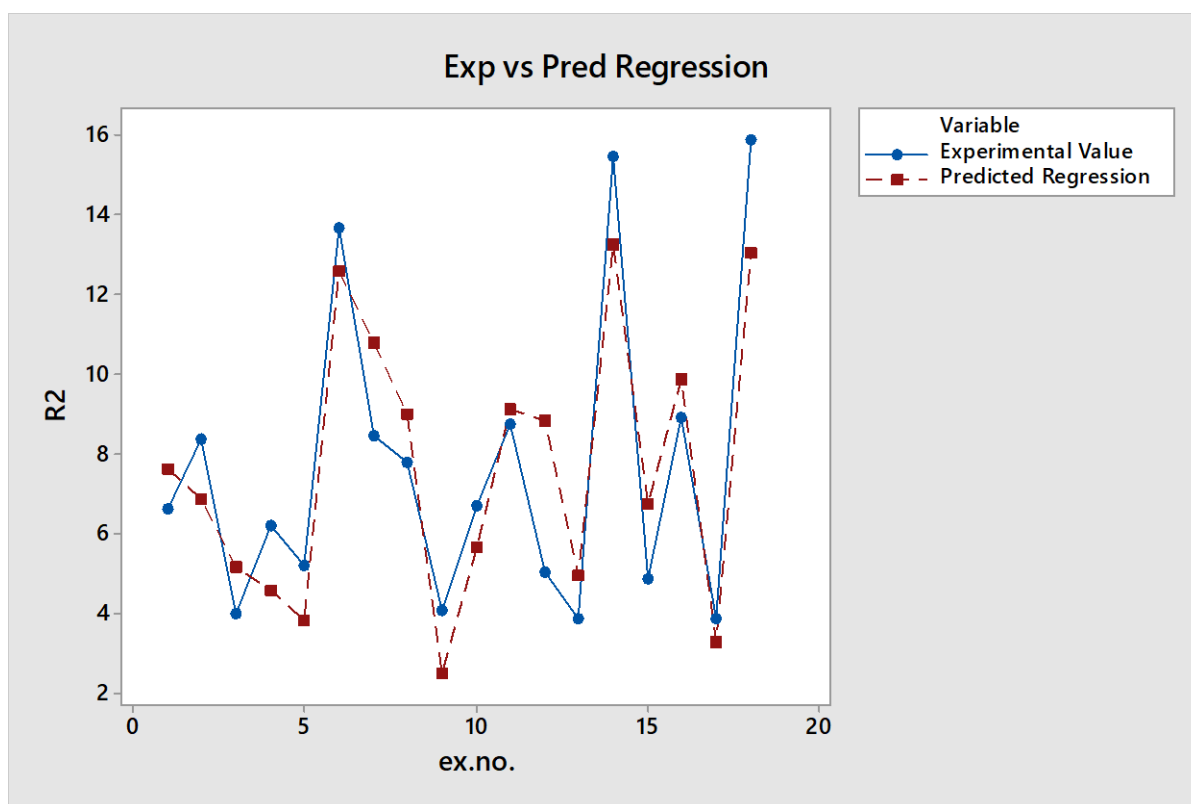
$$R3 = 15.77 - 0.01159 \text{ Printing Speed}_1 + 27.02 \text{ Layer Height}_1 + 6.68 \text{ Layer Width}_1 + 0.2883 \text{ Nozzle Temperature}_1 - 0.2520 \text{ Activation Temperature} \quad (R^2 = 96.03\%) \quad (6.7)$$

Το R^2 με τιμή 96.03% δείχνει μια εξαιρετική ταύτιση μεταξύ του μοντέλου και των παρατηρούμενων δεδομένων, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό στην πρόβλεψη R3. Σε ιδανική περίπτωση, το R^2 θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ του 0.8 και 1,0 για να θεωρηθεί το μοντέλο ιδιαίτερα αποτελεσματικό. Άρα αυτές οι εξισώσεις είναι κατάλληλες για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μορφοποίησης σχήματος των δομών ABS 4D εκτύπωσης.[38,42,43]

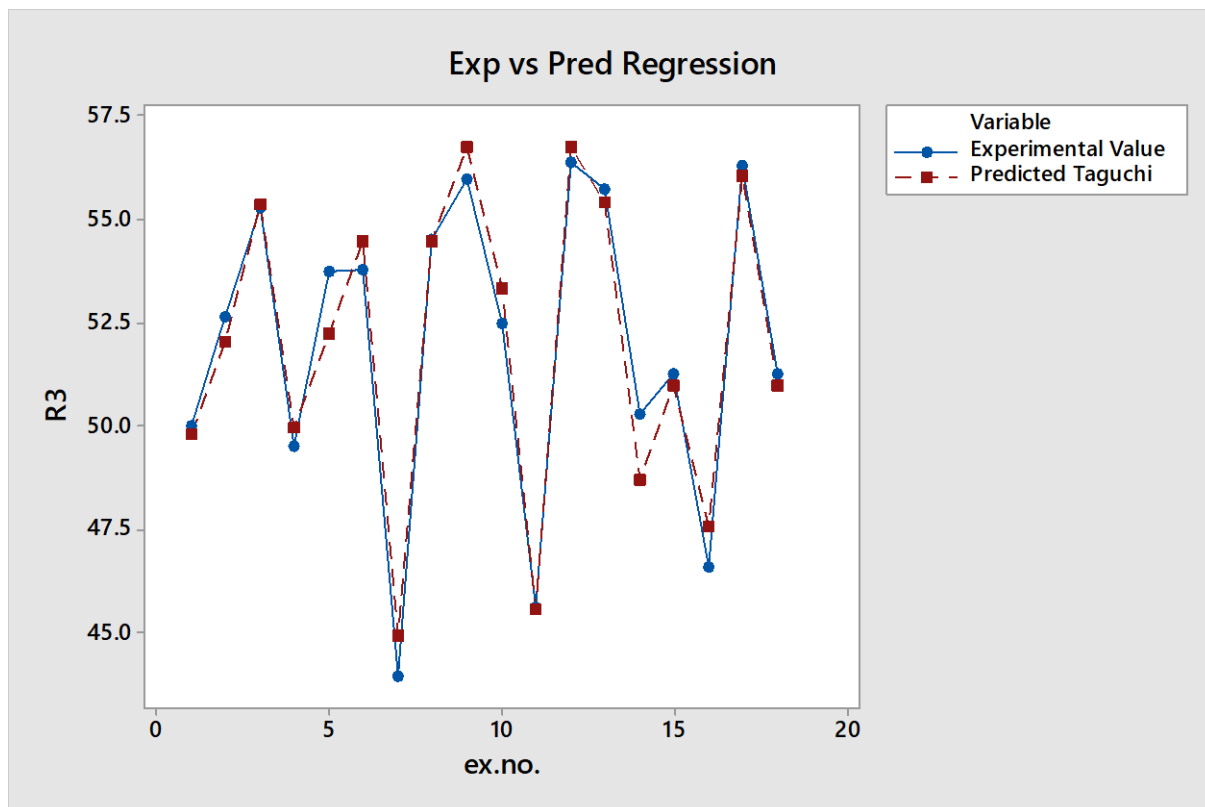
Ακολουθούν οι γραφικές απεικονίσεις των σχέσεων μεταξύ των πειραματικών και των προβλεπόμενων τιμών.



Εικόνα 22 : Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές R1



Εικόνα 23 : Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές R2



Εικόνα 24 : Πειραματικές και προβλεπόμενες τιμές R3

Εικόνα 36: βλέπουμε το διάγραμμα των τιμών της μέσης τιμής του R1 με τις τιμές των προβλεπόμενων τιμών, το R^2 έχει τιμή 75. 59%. Η πρόβλεψη έγινε με την εξίσωση (6.5) στο αντίστοιχο διάγραμμα.

Εικόνα 37: βλέπουμε το διάγραμμα των τιμών της μέσης τιμής του R2 με τις τιμές των προβλεπόμενων τιμών, το R^2 έχει τιμή 78. 01%. Η πρόβλεψη έγινε με την εξίσωση (6.6) στο αντίστοιχο διάγραμμα.

Στην εικόνα 38 : βλέπουμε το διάγραμμα των τιμών της μέσης τιμής του R3 με τις τιμές των προβλεπόμενων τιμών, το R^2 έχει τιμή 96. 03%. Η πρόβλεψη έγινε με την εξίσωση (6.7) στο αντίστοιχο διάγραμμα.

7. Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, με αφορμή την εκτέλεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκε η συμπεριφορά των τετραδιάστατα εκτυπωμένων δομών από ABS, υπό το ερέθισμα της θερμοκρασίας, συμβάλλοντας στην πρόοδο και στην εξέλιξη της 4D εκτύπωσης. Η έρευνα εστιάζει στον κρίσιμο ρόλο συγκεκριμένων παραμέτρων εκτύπωσης που επηρεάζουν τον μετασχηματισμό τέτοιων δομών, προσφέροντας πληροφορίες και αποτελέσματα έπειτα από μεθοδική μελέτη. Από τα βασικά ευρήματα της έρευνας συμπεραίνεται πως :

- Μέσα από τα διαγράμματα ανάλυσης κύριων επιδράσεων, για τις μετρήσεις R1 έχουμε βέλτιστες αποδόσεις για ταχύτητα εκτύπωσης 150 mm/s, ύψος στρώματος 0.3 mm, πλάτος στρώματος 0.48 mm, θερμοκρασία ακροφυσίου 220⁰ C και θερμοκρασία ενεργοποίησης 150⁰ C. Για τις μετρήσεις R2 αντίστοιχα για ταχύτητα εκτύπωσης 150 mm/s, ύψος στρώματος 0.2 mm, , πλάτος στρώματος 0.52 mm, θερμοκρασία ακροφυσίου 220⁰ C και θερμοκρασία ενεργοποίησης 150⁰ C. Τέλος για τις μετρήσεις R3 για ταχύτητα εκτύπωσης 105 mm/s, ύψος στρώματος 0.15 mm, πλάτος στρώματος 0,40 mm, θερμοκρασία ακροφυσίου 220⁰ C και θερμοκρασία ενεργοποίησης 160⁰ C.
- Μέσω της ανάλυσης, της αναλογίας S/N, από τα αποτελέσματα της μεθόδου ANOVA, η θερμοκρασία ακροφυσίου (Nozzle Temperature) πρωτίστως και έπειτα η θερμοκρασία ενεργοποίησης (Activation Temperature) αναδείχτηκαν ως οι σημαντικότεροι παράγοντες ενεργοποίησης στην επίδραση συμπεριφοράς αλλαγής σχήματος.
- Τα μοντέλα παλινδρόμησης που αναπτύχθηκαν για την πρόβλεψη των αποκρίσεων R1, R2, R3 έδειξαν ισχυρές συσχετίσεις με τα παρατηρούμενα δεδομένα, υπογραμμίζοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραμέτρων εκτύπωσης και των αποτελεσμάτων μορφοποίησης σχήματος.

Τα δεδομένα αυτά αποτελούν βάση για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας εκτύπωσης, για την αξιοποίηση των πλήρων δυνατοτήτων των υλικών στην σχηματική τους μεταβολή σε διάφορες εφαρμογές. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα προβλέπεται να έχει δυναμικές επιδράσεις σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας και της κοινωνικής αναβάθμισης.

Βιβλιογραφία

1. Su A, Al'Aref SJ. History of 3D Printing. 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine 2018; 1–
10.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128039175000018>
2. Jandyal A, Chaturvedi I, Wazir I, Raina A, Ul Haq MI. 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0. Sustainable Operations and Computers 2022; 3: 33–
42.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666412721000441>
3. Kabir SMF, Mathur K, Seyam AFM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. Compos Struct 2020; 232: 111476.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822319322706>
4. The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2023 - 3DSourced. <https://www.3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/> (24 August 2024, date last accessed).
5. The complete history of 3D printing - UltiMaker. <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/> (24 August 2024, date last accessed).
6. History of 3D Printing Timeline: Who Invented 3D Printing - 3D Insider. <https://3dinsider.com/3d-printing-history/> (24 August 2024, date last accessed).
7. When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing -. <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> (24 August 2024, date last accessed).
8. Wohlers TT. Wohlers report 2012 : additive manufacturing and 3D printing state of the industry : annual worldwide progress report. 2012; 286.<https://en.wikipedia.org/wiki/Fab@Home>
9. Shahrubudin N, Lee TC, Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Procedia Manuf 2019; 35: 1286–1296.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308169>
10. Dunham S, Mosadegh B, Romito EA, Zgaren M. Applications of 3D Printing. 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine 2018; 61–
78.<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128039175000043>
11. Li B, Zhang M, Lu Q *et al.* Application and Development of Modern 3D Printing Technology in the Field of Orthopedics. Biomed Res Int 2022; 2022: 8759060.<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/8759060>
12. Elhadad AA, Rosa-Sainz A, Cañete R *et al.* Applications and multidisciplinary perspective on 3D printing techniques: Recent developments and future trends. Materials Science and Engineering: R: Reports 2023; 156: 100760.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X23000463>

13. Pandian A, Belavek C. A review of recent trends and challenges in 3D printing. 2016;https://asee-ncs.org/wp-content/uploads/2021/12/proceedings/2016/faculty_regular_papers/2016_ASEE_NC_S_paper_10.pdf
14. Jin Z, Li Y, Yu K *et al.* 3D Printing of Physical Organ Models: Recent Developments and Challenges. *Advanced Science* 2021; 8: 2101394.<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.202101394>
15. Srinivasan D, Meignanamoorthy M, Ravichandran M *et al.* 3D Printing Manufacturing Techniques, Materials, and Applications: An Overview. *Advances in Materials Science and Engineering* 2021; 2021: 5756563.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2021/5756563>
16. Park S, Shou W, Makatura L, Matusik W, Fu K (Kelvin). 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. *Matter* 2022; 5: 43–76.
[https://www.cell.com/matter/fulltext/S2590-2385\(21\)00517-8](https://www.cell.com/matter/fulltext/S2590-2385(21)00517-8)
17. Mastering PLA Temperature: Best Temperature for PLA Filament.
<https://store.anycubic.com/blogs/3d-printing-guides/pla-printing-temperature> (23 September 2024, date last accessed).
18. How to 3D Print PETG Filament Like a Pro - Ultimate Guide & FAQ - 3D Printerly.
<https://3dprinterly.com/filament-printing-guide/petg/> (23 September 2024, date last accessed).
19. PETG Bed Temperature, Nozzle Temperature & Cooling Settings.
<https://www.wevolver.com/article/petg-temperature-considerations-nozzle-temperature-heated-bed-cooling> (23 September 2024, date last accessed).
20. The Complete TPU Filament 3D Printing Guide - 3DSourced.
<https://www.3dsourced.com/3d-printer-materials/tpu-filament-3d-printing/> (23 September 2024, date last accessed).
21. How to 3D Print Polycarbonate Like A Pro - Ultimate Guide & FAQ - 3D Printerly.
<https://3dprinterly.com/filament-printing-guide/polycarbonate/> (23 September 2024, date last accessed).
22. ASA Filaments: Everything you need to know - AzureFilm.
<https://azurefilm.com/2023/07/10/asa-filaments-everything-you-need-to-know/> (23 September 2024, date last accessed).
23. HIPS Filament Properties and Best Brands - 3D Insider. <https://3dinsider.com/hips-filament/> (23 September 2024, date last accessed).
24. 2024 TPE Filament For 3D Printing – The Ultimate Buyer’s Guide - Pick 3D Printer.
<https://pick3dprinter.com/tpe-filament/> (23 September 2024, date last accessed).
25. 3D Printing PP (Polypropylene) - Why and how? - Magigoo.
<https://magigoo.com/blog/3d-printing-polypropylene-why-and-how/> (23 September 2024, date last accessed).

26. 3D Printing Materials: Guide to Filament & Resin Types for 3D Printing – Raise3D: Reliable, Industrial Grade 3D Printer. <https://www.raise3d.com/blog/3d-printing-materials/> (23 September 2024, date last accessed).
27. 3D εκτύπωση - τα πάντα για τη διαδικασία 3D εκτύπωσης | print24. <https://print24.com/gr-el/journal/printing-basics/3d-printing> (23 September 2024, date last accessed).
28. Joshi S, Rawat K, C K *et al.* 4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges. *Appl Mater Today* 2020; 18: 100490. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352940719306092>
29. Sunte J. A Review on 4D-Printing Design Materials. [.https://ijsrmme.com/paper/IJSRMME2263215.pdf](https://ijsrmme.com/paper/IJSRMME2263215.pdf)
30. Momeni F, Ni J. Laws of 4D Printing. *Engineering* 2020; 6: 1035–1055. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809920302101>
31. Ahmed A, Arya S, Gupta V, Furukawa H, Khosla A. 4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges. *Polymer (Guildf)* 2021; 228: 123926. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386121005498>
32. Li X, Shang J, Wang Z. Intelligent materials: A review of applications in 4D printing. *Assembly Automation* 2017; 37: 170–185. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/AA-11-2015-093/full/html#sec003>
33. Affordable Dual Extruder 3D printer | Raise3D. <https://www.raise3d.com/pro2-series/> (23 September 2024, date last accessed).
34. Raise3D Pro2 3D Printer: Review the Specs | All3DP Pro. <https://all3dp.com/1/raise3d-pro2-review-3d-printer/> (23 September 2024, date last accessed).
35. SNOL 6.7/1300 LSM01 - LINKMAN GROUP (HIGH ROCK LTD). <https://www.linkman-group.eu/en/laboratory-ovens-snol/723-723-snol-67-1300-lsm01.html> (23 September 2024, date last accessed).
36. 500 - Whoops We Can't Find That Page | LabX.com. <https://www.labx.com/item/snol-6-7-1300-lsm01/DIS-96958-19922> (23 September 2024, date last accessed).
37. Τι είναι ο Υπολογισμός ANOVA; <https://www.greelane.com/el/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7-%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1-%CE%BC%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC/%CE%BC%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AC/example-of-an-anova-calculation-3126404/> (23 September 2024, date last accessed).
38. Kostopoulos G, Stamoulis K, Lappas V, Georgantzinou SK. Shape Morphing of 4D-Printed Polylactic Acid Structures under Thermal Stimuli: An Experimental and Finite

- Element Analysis. Aerospace 2024, Vol 11, Page 134 2024; 11: 134.<https://www.mdpi.com/2226-4310/11/2/134>
39. Bademlioglu AH, Canbolat AS, Yamankaradeniz N, Kaynakli O. Investigation of parameters affecting Organic Rankine Cycle efficiency by using Taguchi and ANOVA methods. Appl Therm Eng 2018; 145: 221–228.https://www.researchgate.net/publication/327539496_Investigation_of_parameters_affecting_Organic_Rankine_Cycle_efficiency_by_using_Taguchi_and_ANOVA_methods
 40. Celik N, Turgut E. Design analysis of an experimental jet impingement study by using Taguchi method. Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung 2012; 48: 1407–1413.<https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-012-0989-7>
 41. Sthle L, Wold S. Analysis of variance (ANOVA). Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 1989; 6: 259–272.[https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80095-4](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80095-4)
 42. Kuram E, Tasci E, Altan AI, Medar MM, Yilmaz F, Ozcelik B. Investigating the effects of recycling number and injection parameters on the mechanical properties of glass-fibre reinforced nylon 6 using Taguchi method. Mater Des 2013; 49: 139–150.<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.027>
 43. Ozcelik B. Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method. International Communications in Heat and Mass Transfer 2011; 38: 1067–1072.<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.04.025>

