

# ΠΡΩΤΟΠΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Καραγιάννης Χρήστος

Τρανός Μάρκος



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Βόλος 2022



# Περιεχόμενα

Εικόνες .....	6
Πίνακες.....	8
Γραφήματα .....	9
Ενότητα 1 – Βασικές Έννοιες .....	10
1.1    Εισαγωγή.....	10
1.1.1    Ευχαριστίες .....	10
1.1.2    Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας.....	10
1.1.3    Κίνητρο και Σκοπός .....	10
1.2    Βασική περιγραφή μεθόδου προσθετικής παραγωγής .....	13
1.3    Παραγωγή 3D μοντέλου – Λογισμικό Slicer .....	16
Ενότητα 2 – Εξώθηση Υλικού (FDM).....	17
2.1    Περιγραφή της μεθόδου.....	17
2.2    Υποκατηγορίες FDM εκτυπωτών .....	18
2.3    Μηχανικά μέρη .....	20
2.3    Παράμετροι εκτύπωσης.....	22
2.4    Πρώτες ύλες.....	23
2.6    Εφαρμογές της μεθόδου .....	25
2.7    Περιορισμοί της μεθόδου.....	28
2.8    Μελλοντική έρευνα .....	32
Ενότητα 3 – Φωτοπολυμερισμός .....	33
3.1    Περιγραφή μεθόδου.....	33
3.2    Διαφορές των μεθόδων φωτοπολυμερισμού .....	34
3.2.1    Στερεολιθογραφία SLA .....	34
3.2.2    Στερεοποίηση με ορατό φως.....	36
3.2.3    Συνεχόμενη εκτύπωση CDLP/CLIP.....	39
3.3    Φωτοπολυμερή υλικά .....	40
3.4    Εφαρμογές της μεθόδου φωτοπολυμερισμού.....	42
3.5    Περιορισμοί της μεθόδου φωτοπολυμερισμού.....	47
3.5    Μελλοντική έρευνα .....	49
Ενότητα 4 – Material Jetting (Ψεκάσμος Υλικού).....	50
4.1    Περιγραφή της μεθόδου.....	50

4.2 Τρόποι ψεκασμού .....	51
4.2.1 Material Jetting συνεχόμενου ψεκασμού .....	51
4.2.2 Material Jetting διακοπτόμενου ψεκασμού .....	52
4.2.3 Material Jetting κρύου ψεκασμού CSAM .....	53
4.3 Υλικά που χρησιμοποιούνται στο Material Jetting.....	54
4.3.1 Πολυμερή.....	54
4.3.2 Κεραμικά.....	55
4.3.3 Μέταλλα .....	55
4.4 Εφαρμογές της μεθόδου .....	56
4.5 Περιορισμοί της μεθόδου.....	57
4.6 Μελλοντική έρευνα .....	58
Ενότητα 5 – Binder Jetting (Ψεκασμός Συνδεδειγμένου Μέσου) .....	59
5.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	59
5.2 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	59
5.3 Χαρακτηριστικά .....	61
5.4 Παράμετροι της κατεργασίας.....	61
5.5 Binder Jetting με μεταλλικά υλικά.....	62
5.6 Binder Jetting με αμμώδη υλικά.....	63
5.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα .....	64
5.8 Μελλοντική έρευνα .....	64
Ενότητα 6 – Powder Bed Fusion (Σύντηξη Σκόνης).....	65
6.1 Τεχνολογίες Powder Bed Fusion .....	65
6.2 Selective Laser Sintering (Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ) .....	65
6.2.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	65
6.2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	66
6.2.3 Υλικά - Δυνατότητες.....	67
6.2.4 Παράμετροι της κατεργασίας.....	67
6.2.5 Εφαρμογές .....	68
6.2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα .....	69
6.2.7 Μελλοντική έρευνα .....	69
6.3 High Speed Sintering (Ταχεία Πυροσυσσωμάτωση).....	70
6.3.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	70
6.3.2 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	70

6.3.3 Χαρακτηριστικά .....	70
6.3.4 Υλικά.....	71
6.3.5 Παράμετροι της κατεργασίας .....	71
6.3.6 Εφαρμογές .....	72
6.3.7 Σύγκριση των μεθόδων SLS και MJF .....	73
6.3.8 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα .....	73
6.4 Selective Laser Melting (Επιλεκτική Τήξη με Λέιζερ).....	74
6.4.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	74
6.4.2 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	74
6.4.3 Χαρακτηριστικά .....	75
6.4.4 Παραμένουσες τάσεις .....	75
6.4.5 Παράμετροι της κατεργασίας .....	76
6.4.6 Απαλοιφή των παραμενουσών τάσεων .....	77
6.4.7 Ανισοτροπία.....	78
6.4.8 Υλικά και εφαρμογές .....	79
6.4.9 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα .....	80
6.4.10 Μελλοντική έρευνα .....	80
6.5 Electron Beam Melting (Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων) .....	80
6.5.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	80
6.5.2 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	80
6.5.3 Χαρακτηριστικά .....	82
6.5.4 Παράμετροι της κατεργασίας .....	82
6.5.5 Σύγκριση των EBM και SLM .....	83
6.5.6 Εφαρμογές .....	84
6.5.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα .....	86
6.5.8 Μελλοντική έρευνα .....	86
Ενότητα 7 - Direct Energy Deposition (Εναπόθεση Ενέργειας) .....	87
7.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	87
7.2 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	87
7.3 Παράμετροι της Κατεργασίας.....	90
7.4 Υλικά.....	91
7.5 Μετεπεξεργασία .....	92
7.6 Εφαρμογές .....	92

7.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα .....	94
7.8 Μελλοντική έρευνα .....	94
Ενότητα 8 – Sheet Lamination .....	95
8.1 Τεχνολογίες Sheet Lamination.....	95
8.2 Ultrasonic Additive Manufacturing (Προσθετική Παραγωγή με Υπέρηχους) .....	95
8.2.1 Περιγραφή της μεθόδου.....	95
8.2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας.....	97
8.2.3 Παράμετροι της κατεργασίας.....	98
8.2.4 Μηχανικές ιδιότητες.....	99
8.2.5 Εφαρμογές .....	99
8.2.6 Μελλοντική έρευνα .....	101
Ενότητα 9 – Πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού και συμπεράσματα .....	102
9.1 Περιγραφή πειραματικής μεθόδου .....	102
9.2 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού .....	104
9.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	110
9.4 Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας.....	117
Ενότητα 10 - Επίλογος .....	119
Πηγές.....	121

## Εικόνες

Εικόνα 1 - Αφαιρετική και προσθετική παραγωγή - (2) .....	11
Εικόνα 2 - Στάδια βελτιστοποίησης τοπολογίας - (4).....	12
Εικόνα 3 - Ιστορία της προσθετικής παραγωγής – [6].....	13
Εικόνα 4 - Βήματα προσθετικής παραγωγής - (7) .....	14
Εικόνα 5 - Τεχνολογίες προσθετικής παραγωγής - (8) .....	15
Εικόνα 6 - 3D μοντέλο σε σχεδιαστικό περιβάλλον (Solidworks) - (9).....	16
Εικόνα 7 - Λειτουργία εκτυπωτή FDM - (9) .....	17
Εικόνα 8 - Κινηματική διαφορετικών διατάξεων μάντα σε καρτεσιανούς εκτυπωτές - (11) .....	18
Εικόνα 9 - Κινηματική εκτυπωτών τύπου δέλτα - (11) .....	19
Εικόνα 10 - Διατάξεις αξόνων FDM εκτυπωτών - (12) .....	20
Εικόνα 11 - Μέρη ενός hotend - (13).....	21
Εικόνα 12 - Διαφορές direct και bowden extruder - (13).....	21
Εικόνα 13 - Επίδραση της ανάλυσης εκτύπωσης σε διαφορετικές γεωμετρίες - (14).....	23
Εικόνα 14α - Στάδια παραγωγής νήματος - (15) .....	24
Εικόνα 15α - Εξάρτημα ανύψωσης κινητήρων – [19] .....	26
Εικόνα 16 - Εκτυπωμένο κέλυφος αεροσκάφους σχεδιασμένο με βελτιστοποίηση τοπολογίας - (19)....	27

Εικόνα 17 - Ικριώματα για αναγέννηση κυττάρων - (22) .....	27
Εικόνα 18 - Είδη infill - (23) .....	28
Εικόνα 19 - Γεωμετρία δοκιμίου ASTM D638 Type IV - (25).....	30
Εικόνα 20 - Διεύθυνση στρώσεων δοκιμίων με διαφορετικό προσανατολισμό κατά την εκτύπωση – [25] .....	30
Εικόνα 21 - Γωνία σάρωσης - (25) .....	31
Εικόνα 22 - Επιφάνεια θραύσης δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες σάρωσης - (28) .....	32
Εικόνα 23 - Λειτουργία ενός εκτυπωτή φωτοπολυμερισμού - (8).....	33
Εικόνα 24 - Μέρη ενός SLA εκτυπωτή – [32] .....	34
Εικόνα 25 - Διαφορά απλής SLA με TPP SLA - (33) .....	35
Εικόνα 26 - Μέρη ενός εκτυπωτή DLP – [32].....	36
Εικόνα 27 - Εφέ βόξελ και Stairstepping - [35] .....	37
Εικόνα 28 - Μέρη μιας LCD οθόνης MSLA εκτυπωτή - (36).....	38
Εικόνα 29 - Μέρη ενός CDLP εκτυπωτή – [32] .....	39
Εικόνα 30 - Σύγκριση συνεχόμενης εκτύπωσης με (α) οξυγόνο και (β) ακτινοβολία καταστολής - (38)...	40
Εικόνα 31 - Προστατευτικοί νάρθηκες (αριστερά), Οδηγοί χειρουργείου (δεξιά) - (41).....	43
Εικόνα 32 - Διαδικασία injection molding με εκτυπωμένα καλούπια - (42).....	44
Εικόνα 33 - Καλούπι εκτυπωμένο από ρητίνη υψηλών θερμοκρασιών και λουριά από πολυαιθυλένιο - (43) .....	45
Εικόνα 34 - Απλή γεωμετρία τυπώνεται κεκλιμένη και με στηρίξεις σε έναν εκτυπωτή φωτοπολυμερισμού - (44).....	48
Εικόνα 35 - Λειτουργία ενός εκτυπωτή MJ - (9) .....	50
Εικόνα 36 - MJ συνεχόμενου ψεκασμού - (46).....	52
Εικόνα 37 - MJ διακοπτόμενου ψεκασμού (αριστερά), σχηματισμός σταγόνων κατά το συνεχόμενο και διακοπτόμενο ψεκασμό αντίστοιχα (δεξιά) - (46) .....	52
Εικόνα 38 - Θερμικοί (πάνω) και πιεζοηλεκτρικοί (κάτω) ενεργοποιητές - (33).....	53
Εικόνα 39 - Λειτουργία CSAM - (47) .....	53
Εικόνα 40 - Γρανάζι από κερι - (48) .....	54
Εικόνα 41 - Προπέλα από αλουμίνια - (50) .....	55
Εικόνα 42 - Εκτυπωμένη πλακέτα - (51) .....	55
Εικόνα 43 - Παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα εκτύπωσης στο MJ - (33).....	57
Εικόνα 44 - Μηχάνημα Binder Jetting της ExOne - (55) .....	60
Εικόνα 45 - Βασικά μηχανικά μέρη ενός συστήματος BJ - (56).....	60
Εικόνα 46 - Πτερωτή αντλίας πριν και μετά την πυροσυσσωμάτωση - (59) .....	62
Εικόνα 47 - Μοντέλο ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης που πάσχει από σκολίωση - (59).....	63
Εικόνα 48 - Καλούπι για πτερωτή αντλίας και το τελικό χυτό εξάρτημα - (59) .....	64
Εικόνα 49 - Μηχανικά μέρη ενός εκτυπωτή SLS - (61) .....	66
Εικόνα 50 - Προϊόντα SLS - (65) .....	69
Εικόνα 51 - Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Multi Jet Fusion - (67) .....	71
Εικόνα 52 - Προϊόντα Multi Jet Fusion - (68) .....	72
Εικόνα 53 - Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας SLM - (72).....	74
Εικόνα 54 - Μηχανήματα SLM της εταιρίας EOS στο κέντρο προσθετικής παραγωγής της Audi - (73)....	75
Εικόνα 55 - Παράμετροι της κατεργασίας SLM - (74).....	76
Εικόνα 56 - Επίδραση του προσανατολισμού του τεμαχίου στο χρόνο παραγωγής - (74) .....	77

Εικόνα 57 - Σχηματική αναπαράσταση του της γωνίας πλήρωσης εσωτερικού - (75) .....	78
Εικόνα 58 - (75) .....	78
Εικόνα 59 - Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας EBM - (78) .....	81
Εικόνα 60 - Μοτίβο πλήρωσης παράλληλων γραμμών (αριστερά) και περιμετρικό μοτίβο (δεξιά) - (79) .....	83
Εικόνα 61 - Εμφυτεύματα γονάτου και ισχίου κατασκευασμένα με τη μέθοδο Electron Beam Melting - (79) .....	85
Εικόνα 62 - Κατεργασία Direct Energy Deposition με δέσμη ηλεκτρονίων και πρώτη ύλη σε μορφή σύρματος – (82) .....	88
Εικόνα 63 - Κατεργασία Direct Energy Deposition με λέιζερ και πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης - (82) .....	88
Εικόνα 64 - Κατεργασία DED - (82) .....	89
Εικόνα 65 - Εξαρτήματα κατασκευασμένα με τη μέθοδο DED - (86) .....	92
Εικόνα 66 - Προσθήκη γεωμετρικών στοιχείων - (87) .....	93
Εικόνα 67 - Επισκευή τμήματος οδόντωσης - (88) .....	93
Εικόνα 68 - Μηχάνημα SonicLayer 4000 της εταιρίας Fabrisonic - (90) .....	96
Εικόνα 69 - Μηχανικά μέρη και βασικές αρχές λειτουργίας της κατεργασίας UAM - (94) .....	97
Εικόνα 70 - Ποιότητα συγκόλλησης της κατεργασίας Ultrasonic Additive Manufacturing με α) χαμηλή και β) υψηλή ισχύς εισόδου - (91) .....	98
Εικόνα 71 - Δοκός αλουμινίου-Nitinol κατασκευασμένη με τη μέθοδο Ultrasonic Additive Manufacturing - (92) .....	100
Εικόνα 72 - Άρθρωση στερεάς κατάστασης - (92) .....	100
Εικόνα 73 - Τομή αλουμινένιου τεμαχίου ενισχυμένο με στρώσεις MetPreg. (1) Υλικό βάσης, (2) 4 στρώσεις ταινίας Al 6061, (3) 1 στρώση MetPreg, (4) στρώσεις ταινίας Al 6061 - (92) .....	100
Εικόνα 74 - Μοντέλο CAD του εναλλάκτη θερμότητας - (93) .....	101
Εικόνα 75 - Δοκίμια D638 Type I .....	104
Εικόνα 76 – Επιφάνεια θραύσης δοκιμίων FDM με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης .....	111
Εικόνα 77 - Επιφάνεια θραύσης δοκιμίων FDM με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης .....	112
Εικόνα 78 - Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 45 μοιρών (πάνω) και οριζοντίου (κάτω) .....	117

## Πίνακες

Πίνακας 1 - Ιδιότητες κοινών πρώτων υλών από FDM εκτυπωτές - (16) .....	25
Πίνακας 2 – Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίου - (25) .....	29
Πίνακας 3 - Μηχανικές ιδιότητες απλής ρητίνης - (32) .....	41
Πίνακας 4 - Βήματα κατά το σχεδιασμό εκτυπωμένων καλουπιών – (43) .....	45
Πίνακας 5 - Σύγκριση χρόνου και κόστους διαφορετικών μεθόδων παραγωγής – (43) .....	46
Πίνακας 6 - Εφαρμογές φωτοπολυμερισμού - (32) .....	47
Πίνακας 7 – Κοινές παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων FDM .....	102
Πίνακας 8 - Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων FDM που διαφέρουν ανά υλικό .....	102
Πίνακας 9 - Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίων MSLA .....	103
Πίνακας 10 - Αποτελέσματα δοκιμίων ASA .....	104
Πίνακας 11 - Αποτελέσματα δοκιμίων PLA .....	106
Πίνακας 12 - Αποτελέσματα δοκιμίων PETG .....	107
Πίνακας 13 - Σύγκριση μεθόδων ΠΠ .....	119



## Γραφήματα

Γράφημα 1 - Επίδραση προσανατολισμού δοκιμίου κατά την εκτύπωση στην αντοχή σε εφελκυσμό - (26)	30
Γράφημα 2 - Επίδραση προσανατολισμού του δοκιμίου κατά την εκτύπωση σε αντοχή σε θλίψη.....	31
Γράφημα 3 - σ-ε Δοκιμίου ASA με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης .....	105
Γράφημα 4 - σ-ε Δοκιμίου ASA με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης .....	105
Γράφημα 5 - σ-ε Δοκιμίου PLA με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης.....	106
Γράφημα 6 - σ-ε Δοκιμίου PLA με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης.....	107
Γράφημα 7 - σ-ε Δοκιμίου PETG με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης .....	108
Γράφημα 8 - σ-ε Δοκιμίου PETG με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης .....	108
Γράφημα 9 - σ-ε Δοκιμίου ρητίνης με διεύθυνση εκτύπωσης 45 μοιρών .....	109
Γράφημα 10 – $\sigma_{UTS}$ των τριών υλικών στους δύο προσανατολισμούς εκτύπωσης .....	112
Γράφημα 11 - σ-ε Όλων των δοκιμίων και στις 2 διευθύνσεις εκτύπωσης .....	113
Γράφημα 12 - Μέγιστη παραμόρφωση των τριών θερμοπλαστικών υλικών στους δύο προσανατολισμούς εκτύπωσης .....	114
Γράφημα 13 - Μέτρο ελαστικότητας των τριών θερμοπλαστικών υλικών στους δύο προσανατολισμούς εκτύπωσης .....	115
Γράφημα 14 – Διαφορές μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης δοκιμίων ρητίνης μεταξύ των δύο προσανατολισμών εκτύπωσης .....	116
Γράφημα 15 - Διαφορές μέγιστης δύναμης και μέτρου ελαστικότητας δοκιμίων ρητίνης μεταξύ των δύο προσανατολισμών εκτύπωσης .....	116

# Ενότητα 1 – Βασικές Έννοιες

## 1.1 Εισαγωγή

### 1.1.1 Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μας εργασίας θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της.

Ευχαριστούμε θερμά τον κ. Αλέξη Κερμανίδη για την βοήθεια του κατά τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και την εμπιστοσύνη που μας έδειξε όταν δέχτηκε να μας αναθέσει την εργασία συνεργατικά παρά τις ιδιαίτερες συνθήκες.

Επίσης ευχαριστούμε την Στέλλα και τον Απόστολο Νασίκα για τις πολυάριθμες υποδείξεις και βοήθεια που προσέφεραν, βοηθώντας σημαντικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστούμε τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τα οποία με τις εύστοχες παρατηρήσεις τους μας βοήθησαν να μάθουμε και να γίνουμε καλύτεροι.

### 1.1.2 Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

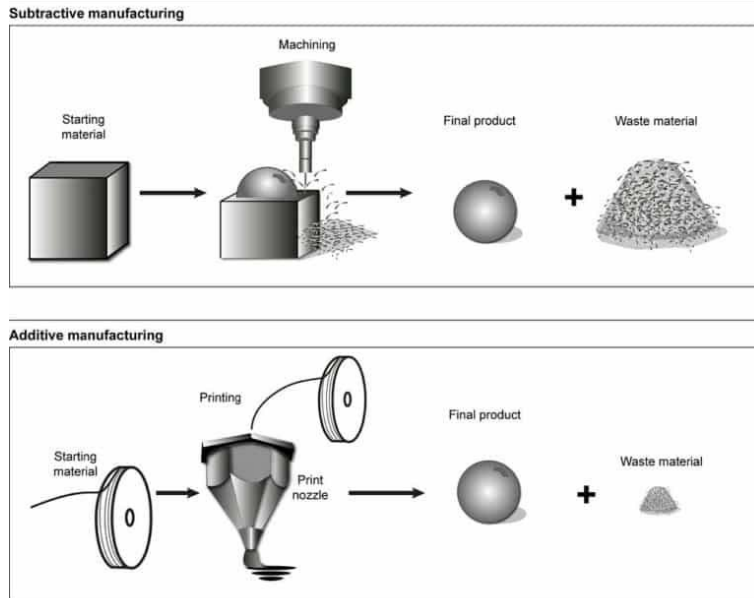
Η 1<sup>η</sup> ενότητα εξηγεί το κίνητρο πίσω από την εργασία καθώς και τον σκοπό της. Επίσης παραθέτει τις βασικές εννοιές πίσω από τις μεθόδους προσθετικής παραγωγής.

Οι ενότητες 2 έως 8 παρουσιάζουν κάθε οικογένεια μεθόδων σε βάθος, αναφέροντας την προέλευση τους, τον τρόπο λειτουργίας και τα μηχανικά τους μέρη, τα υλικά που χρησιμοποιούν, καθώς και τις εφαρμογές, τα πλεονεκτήματα και περιορισμούς τους.

Η 9<sup>η</sup> ενότητα περιλαμβάνει μια πειραματική διαδικασία, κατά την οποία γίνονται δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια που έχουν παραχθεί από τις μεθόδους FDM και MSLA, προσφέροντας μια σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, εστιάζοντας στην ανισοτροπία των τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων.

### 1.1.3 Κίνητρο και Σκοπός

Η προσθετική παραγωγή (Additive manufacturing), είναι μια ραγδαία εξελισσόμενη τεχνολογία στον τομέα παραγωγής. Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία μια πρώτη ύλη χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός τρισδιάστατου προϊόντος σε στρώσεις. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να παρασκευασθούν τεμάχια με εξαιρετικά συνθέτη γεωμετρία, ενώ ταυτόχρονα το κόστος παρασκευής διατηρείται συχνά χαμηλότερο (1) συγκριτικά με παραδοσιακές μεθόδους αφαίρεσης υλικού (Subtractive Manufacturing). Η διαφορά στην προσέγγιση των μεθόδων απεικονίζεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1 - Αφαιρετική και προσθετική παραγωγή - (2)

Ένα βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων ΠΠ έναντι παραδοσιακών είναι η σημαντική μείωση των αποβλήτων, κάτι το οποίο πέρα από εξοικονόμηση χρημάτων έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Κατά την παραγωγή ενός εξαρτήματος με αφαιρετικές μεθόδους ο όγκος του υλικού που πρέπει να αφαιρεθεί και καταλήγει ως απόβλιττο εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του, κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις μεθόδους ΠΠ οι οποίες συνήθως παράγουν μηδαμινά απόβλιττα. Οι Henri et. Al. μελέτησαν την διαφορά μεταξύ των αφαιρετικών και προσθετικών μεθόδων ως προς την επιβάρυνση του περιβάλλοντος με βάση πολλαπλούς παράγοντες (3). Συγκεκριμένα, μελετάται η περιβαλλοντική επίδραση της παραγωγής μίας προπέλας από τιτάνιο με τελικό όγκο  $53.56cm^3$ . Ως αφαιρετική μέθοδος χρησιμοποιείται το φρεζάρισμα, ενώ ως προσθετική χρησιμοποιείται η EBM, μέθοδος η οποία αναλύεται στην ενότητα 6 αυτής της εργασίας. Για την παραγωγή της προπέλας με φρεζάρισμα χρειάζεται να αφαιρεθεί το 87% του όγκου από ένα κύλινδρο τιτανίου με αρχικό όγκο  $406cm^3$ . Στην περίπτωση της EBM η πρώτη ύλη βρίσκεται σε μορφή σκόνης. Κατά την κατασκευή της προπέλας με EBM υπάρχει και πάλι κάποιο ποσοστό αποβλήτων σε μορφή στηρίξεων, είναι ωστόσο εξαιρετικά μικρά συγκριτικά με αυτό που παράχθηκε από την αφαιρετική μέθοδο. Οι ερευνητές καταλήξαν ότι η EBM έχει πάντα μικρότερη αρνητική επίδραση στο περιβάλλον συγκριτικά με το φρεζάρισμα για αντικείμενα με λόγο όγκου πρώτης ύλης προς όγκο τελικού προϊόντος μεγαλύτερο του 7. Σε χαμηλότερους λόγους η επιλογή μεθόδου δεν είναι τόσο σαφής, καθώς η EBM απαιτεί μεγαλύτερα ποσά ενέργειας κατά την κατεργασία. Συνεπώς, η παραγωγή αντικειμένων με περίπλοκη γεωμετρία τα οποία απαιτούν την αφαίρεση μεγάλου ποσοστού υλικού ενδείκνυται να γίνεται με μεθόδους ΠΠ εφόσον ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Η δυνατότητα των μεθόδων ΠΠ να παράγουν αντικείμενα με ιδιαίτερα περίπλοκη γεωμετρία δίνει την δυνατότητα βελτιστοποίησης των εξαρτημάτων με μεθόδους όπως η βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization). Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα να παράγονται αντικείμενα με πολύ καλύτερο λόγο αντοχής προς βάρος, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό σε πολλές εφαρμογές οι οποίες

απαιτούν «ελαφριές κατασκευές». Στην εικόνα 2 φαίνεται πώς με την παραπάνω μέθοδο βελτιστοποιείται ένα σχετικά βαρύ εξάρτημα, αφήνοντας υλικό μόνο στις περιοχές οι οποίες φορτίζονται κατά τη λειτουργία του εξαρτήματος. Το τελικό αποτέλεσμα έχει μια ιδιαίτερη όψη και η περίπλοκη γεωμετρία του θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να παραχθεί με παραδοσιακές μεθόδους (4).



Εικόνα 2 - Στάδια βελτιστοποίησης τοπολογίας - (4)

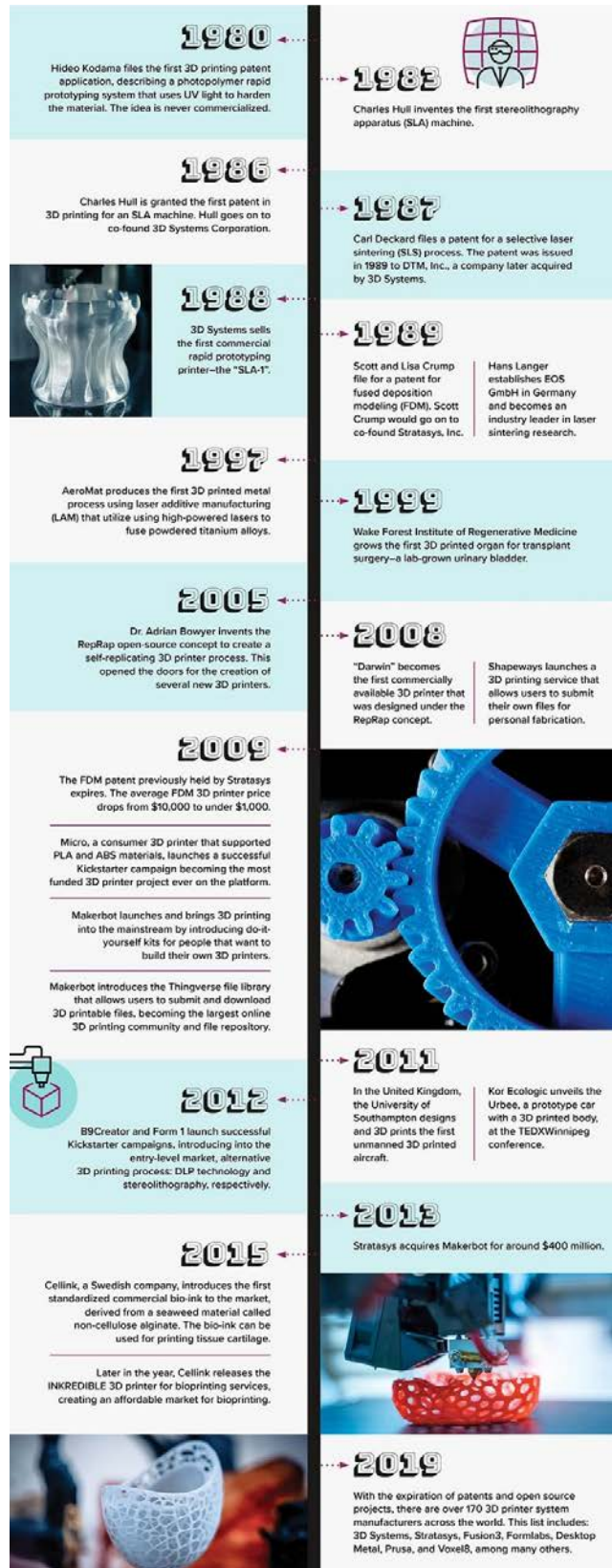
Η ΠΠ έχει αποκτήσει ήδη μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε πολλούς τομείς. Μερικές σημαντικές αναφορές είναι η αξία της ΠΠ στη βιομηχανία για τη δημιουργία λειτουργικών πρωτοτύπων (Rapid Prototyping), εργαλείων (Agile tooling), αλλά και εφαρμογές στον τομέα της ιατρικής όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή προσθετικών μελών, η ακόμη και για τη δημιουργία ιστού (Tissue Fabrication). Παρόλο που οι προοπτικές της ΠΠ είναι μεγάλες, η τεχνολογία δεν είναι ακόμη σε θέση να αντικαταστήσει τις παραδοσιακές μεθόδους. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για πολλές μεθόδους ΠΠ είναι ιδιαίτερα περίπλοκος και ακριβός, κάτι το οποίο καθιστά τη χρήση του αδύνατη σε πολλές περιπτώσεις. Επιπροσθέτως, οι συγκεκριμένες μέθοδοι δεν είναι κατάλληλες για μαζική παραγωγή, καθώς το μέγεθος παρτίδας είναι τυπικά μικρό συγκριτικά με μεθόδους όπως η χύτευση. Η διαστατική ακρίβεια των παραγόμενων αντικειμένων είναι συνήθως υποδεέστερη αυτής που επιτυγχάνεται με παραδοσιακές μεθόδους, και γι' αυτό πολλές φορές γίνεται ένας συνδυασμός ΠΠ με αφαιρετικές μεθόδους προκειμένου να φτάσουμε στο τελικό αποτέλεσμα.

Η ραγδαία ανάπτυξη της ΠΠ μέσα στα τελευταία χρόνια είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά το κόστος του εξοπλισμού, με μηχανήματα μεθόδων όπως η FDM και η SLA να αρχίζουν πλέον να είναι κοινά ακόμη και σε οικιακό περιβάλλον. Η μετάβαση αυτή από επίπεδο βιομηχανίας σε επίπεδο καταναλωτή οδήγησε σε σημαντική επιτάχυνση της ανάπτυξης των μεθόδων και είναι πολύ σημαντικό να συνεχιστεί. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να δώσει μια συνολική εικόνα για τις κατηγορίες ΠΠ, αναφέροντας τις δυνατότητες, τους περιορισμούς και τις εφαρμογές τους στη βιομηχανία, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα στον αναγνώστη, ακολουθούμενης από μια σειρά πειραμάτων τα οποία εμβαθύνουν πάνω στις μηχανικές ιδιότητες ορισμένων υλικών και μεθόδων. Με τον τρόπο αυτό θα δημιουργηθεί ένα εγχειρίδιο το οποίο θα μπορεί να αποτελέσει ένα σημείο εκκίνησης κατά την επιλογή εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής, βοηθώντας τον αναγνώστη να κατανοήσει πότε είναι δυνατή η χρήση των μεθόδων ΠΠ για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, αλλά και ποια είναι τα κριτήρια τα οποία οδηγούν στην επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ΠΠ για την εφαρμογή αυτή.

## 1.2 Βασική περιγραφή μεθόδου προσθετικής παραγωγής

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ακούστηκε πρώτη φορά σαν ιδέα την δεκαετία του 1950, από τον Raymond F. Jones στο δημοσίευμα του "Tools of the trade". Την δεκαετία του 1970 έγιναν οι πρώτες καταθέσεις διπλώματος ευρεσιτεχνίας. Περισσότερες καταθέσεις έγιναν κατά την δεκαετία του 1980, οπότε τελικά το 1984 ο Chuck Hall της 3D Systems corporation έκανε αίτηση για κατοχύρωση διπλώματος ευρεσιτεχνίας για την μέθοδο της Στερεολιθογραφίας (SLA), την οποία έλαβε το 1986 (5). Τότε η εταιρία του, 3D Systems corporation έφτιαξε τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή διαθέσιμο για αγορά, ο οποίος βασίστηκε πάνω σε αυτή την τεχνική εκτύπωσης και ονομάστηκε SLA-1. Ένα ακόμη πολύ σημαντικό επίτευγμα του Hall ήταν η δημιουργία του αρχείου .STL για αποθήκευση τρισδιάστατων μοντέλων, αλλά και τεχνικές μετάφρασης τρισδιάστατων μοντέλων σε κώδικα gcode που χρησιμοποιούνται στους slicers ακόμη και σήμερα. Μία σύντομη ανασκόπηση της ιστορίας της προσθετικής παραγωγής απεικονίζεται στην εικόνα 2 (6).

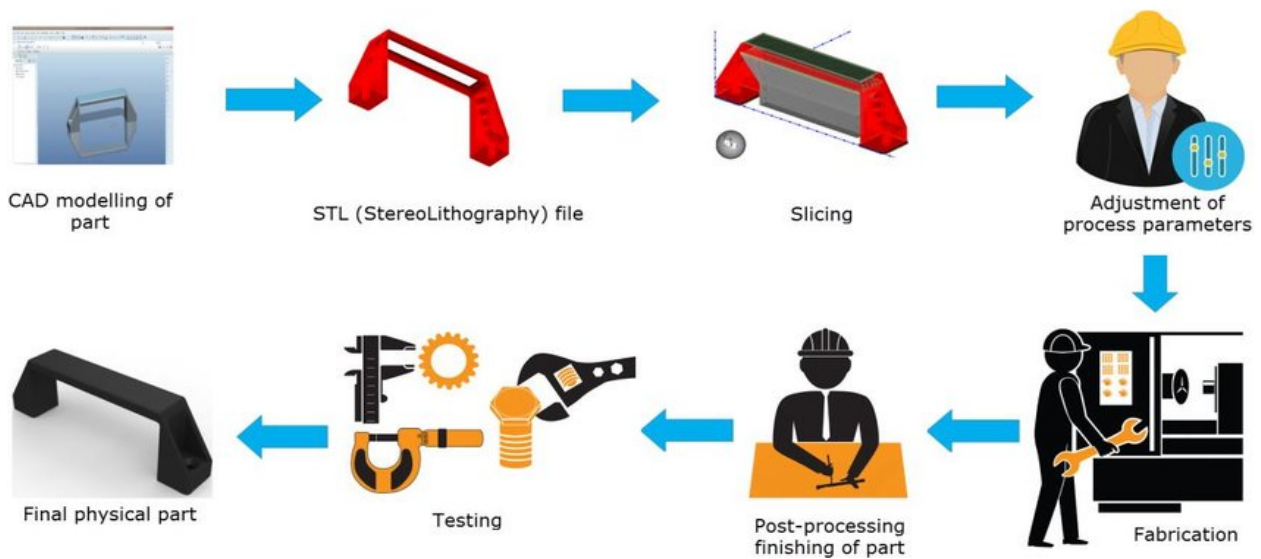
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναφέρονται 7 διαφορετικές κατηγορίες 3D-εκτυπωτών. Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους, ακολουθεί τις ίδιες βασικές αρχές για την παρασκευή αντικειμένων. Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία ένας εκτυπωτής παράγει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο σε στρώσεις με εναπόθεση, στερεοποίηση, ή ένωση υλικού, ακολουθώντας απλές εντολές οι οποίες προέρχονται από την μετάφραση ενός 3D-μοντέλου (slicing) σε κώδικα διαδρομής εργαλείων (gcode). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η παραγωγή τεμαχίων με εξαιρετικά περιπλοκή γεωμετρία ή και από πολλαπλά υλικά.



Εικόνα 3 - Ιστορία της προσθετικής παραγωγής – [6]



Σε πρώτο στάδιο αποκτάται ένα ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου. Το μοντέλο αυτό στη συνέχεια περνάει μέσα από ένα λογισμικό που ονομάζεται Slicer, μέσα στο οποίο επιλέγουμε τις επιθυμητές παραμέτρους εκτύπωσης, και μετατρέπεται σε κώδικα τον οποίο μπορεί ο εκτυπωτής να διαβάσει για να γνωρίζει τις κινήσεις που χρειάζεται να ακολουθήσει προκειμένου να παραχθεί το επιθυμητό αντικείμενο. Ο κωδικός αυτός (gcode) δίνεται στην συνέχεια στον εκτυπωτή, ο οποίος κατόπιν προετοιμασίας και αφότου φορτωθεί πάνω του η επιθυμητή πρώτη ύλη, ξεκινάει την διαδικασία της εκτύπωσης. Αφότου η διαδικασία ολοκληρωθεί, το τεμάχιο συνήθως χρειάζεται κάποια τελική επεξεργασία, κατά την οποία λειαίνεται και αφαιρούνται τυχόν στηρίγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την σταθεροποίηση του κατά την εκτύπωση. Στην περίπτωση που δεν έχουν επιτευχθεί οι απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες ή γεωμετρία από το τελικό προϊόν γίνεται χρήση διαφορετικής πρώτης ύλης, ή και αλλαγή ρυθμίσεων εκτύπωσης στο Slicer και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να φτάσουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα (7). Τα στάδια αυτά απεικονίζονται στην εικόνα 3.

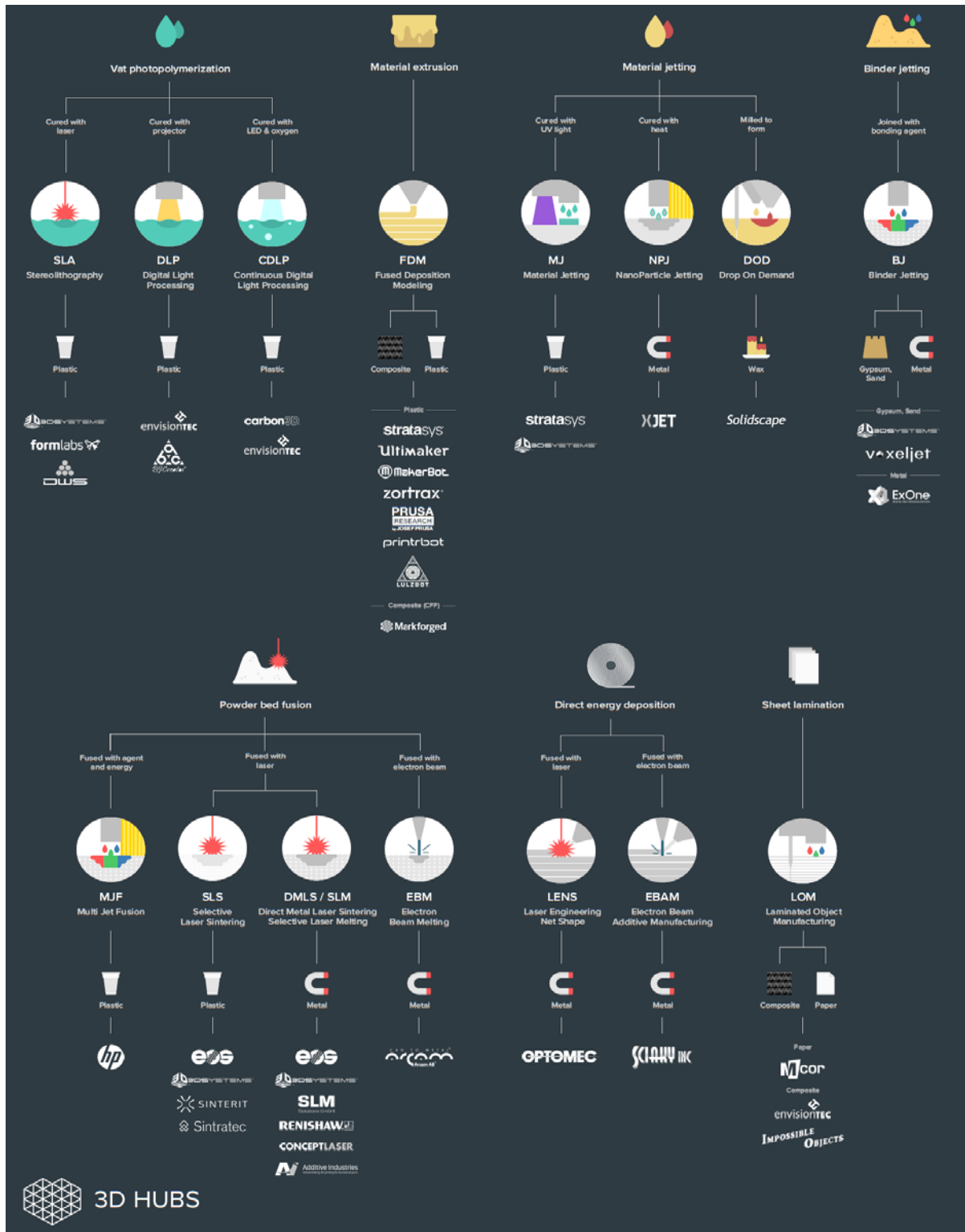


Εικόνα 4 - Βήματα προσθετικής παραγωγής - (7)

Οι κατηγορίες εκτυπωτών ορίζονται με βάση πολλαπλά κριτήρια που περιλαμβάνουν την χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη, τον μηχανισμό στερεοποίησης και την κινητική της εκτύπωσης. Το 2015 καθιερώθηκε το πρότυπο ISO/ASTM 52900, το οποίο τυποποιεί την ορολογία που σχετίζεται με την προσθετική παραγωγή αλλά και διαχωρίζει τους εκτυπωτές σε επτά βασικές οικογένειες μεθόδων. Αυτές αποτελούνται από τις παρακάτω:

- Φωτοπολυμερισμός (VAT Photopolymerization)
- Εξώθηση υλικού (Fused Deposition Modeling)
- Ψεκασμός υλικού (Material Jetting)
- Ψεκασμός υλικού με συνδετικό παράγοντα (Binder Jetting)
- Σύντηξη σκόνης (Powder Bed Fusion)
- Άμεση εναπόθεση ενέργειας (Direct Energy Deposition)
- Ελασματοποίηση φύλλων (Sheet Lamination)

Οι βασικές αυτές κατηγορίες διαχωρίζονται περαιτέρω σε υπομεθόδους με βασικό κριτήριο την πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν, καθώς και τον τρόπο στερεοποίησης/ενοποίησης της. Ο διαχωρισμός αυτός, καθώς και οι βασικοί κατασκευαστές εκτυπωτών της κάθε υπομεθόδου φαίνονται στην εικόνα 4.

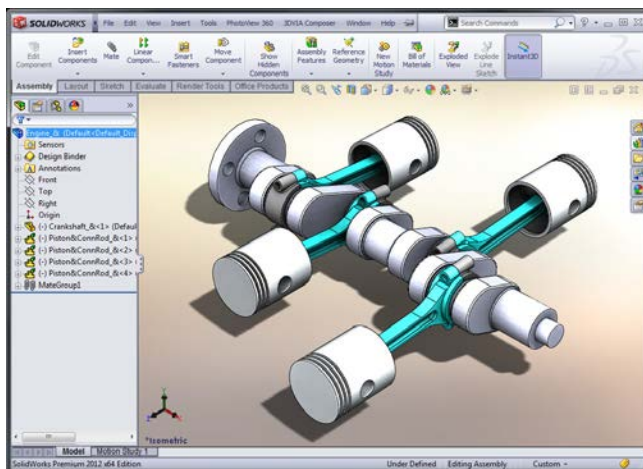


Εικόνα 5 - Τεχνολογίες προσθετικής παραγωγής - (8)

### 1.3 Παραγωγή 3D μοντέλου – Λογισμικό Slicer

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι απόκτησης 3D μοντέλων για χρήση στην εκτύπωση. Ο πιο εύκολος είναι η αναζήτηση του μοντέλου σε κάποια βιβλιοθήκη, και αποτελεί συνήθως το πρώτο βήμα καθώς απαιτεί τον λιγότερο χρόνο. Ο αριθμός των ιστοσελίδων που διαθέτουν τέτοια μοντέλα, καθώς και το υλικό τους αυξάνεται ραγδαία προσφέροντας στιδήποτε από μικρά διακοσμητικά αντικείμενα, μέχρι και σύνθετα εργαλεία. Τη μεγαλύτερη βιβλιοθήκη αυτή τη στιγμή αποτελεί η ιστοσελίδα Thingiverse, η οποία δημιουργήθηκε από τον Zach Smith για την Makerbot, ενώ το 2012 αγοράστηκε από την Stratasys.

Εάν το επιθυμητό σχέδιο αντικειμένου δεν μπορεί να βρεθεί έτοιμο σε κάποια βιβλιοθήκη τότε υπάρχουν δύο βασικές επιλογές δημιουργίας του, το 3D scanning και το 3D cad modelling. Η πρώτη εκ των δύο χρειάζεται ειδικό εξοπλισμό, και συνήθως δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές καθώς δεν είναι εύκολο να φτάσει ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα ακρίβειας. Αντιθέτως, το 3D modelling μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο με απόλυτη ακρίβεια, απαιτώντας όμως τη χρήση σύνθετου λογισμικού σχεδίασης που απαιτεί χρόνο και εμπειρία για την σωστή χρήση του. Στην εικόνα 6 απεικονίζεται το περιβάλλον του ευρέως χρησιμοποιούμενου λογισμικού σχεδίασης Solidworks της Dassault Systems.



Εικόνα 6 - 3D μοντέλο σε σχεδιαστικό περιβάλλον (Solidworks) - (9)

Όπως προαναφέρθηκε, το επόμενο στάδιο της διαδικασίας είναι η μετατροπή του τρισδιάστατου μοντέλου σε gcode. Κατά την διαδικασία αυτή το μοντέλο χωρίζεται σε οριζόντιες στρώσεις (slicing), οι οποίες ονομάζονται layers. Ανεξαρτήτως του είδους εκτυπωτή που χρησιμοποιείται, το προς εκτύπωση αντικείμενο σχηματίζεται σε στρώσεις καθώς τα layers που σχημάτισε ο Slicer δημιουργούνται το ένα πάνω από το άλλο. Η μέθοδος με την οποία το αντικείμενο θα χωριστεί σε στρώσεις μπορεί να βελτιστοποιηθεί αναλόγως των απαιτήσεων του χρήστη. Η επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης αποτελεί συνήθως ένα συμβιβασμό μεταξύ υψηλής ποιότητας εκτύπωσης και ταχύτητας, και μπορεί να επηρεάσει δραματικά τις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου.

Το περιβάλλον του slicer είναι διαφορετικό για κάθε οικογένεια εκτυπωτών, καθώς ο τρόπος με τον οποίο σχηματίζεται το αντικείμενο μπορεί να διαφέρει δραματικά μεταξύ τους. Οι εκτυπωτές εξώθησης υλικού (FDM) αλλά και φωτοπολυμερισμού (MSLA) διαθέτουν μεγάλη ποικιλία από διαθέσιμους slicers οι οποίοι δεν είναι κατασκευασμένοι απαραίτητα από την εταιρία του εκτυπωτή, κατάλληλους για χρήση σε προσωπικό αλλά και επαγγελματικό επίπεδο. Άλλες κατηγορίες εκτυπωτών χρειάζονται πιο



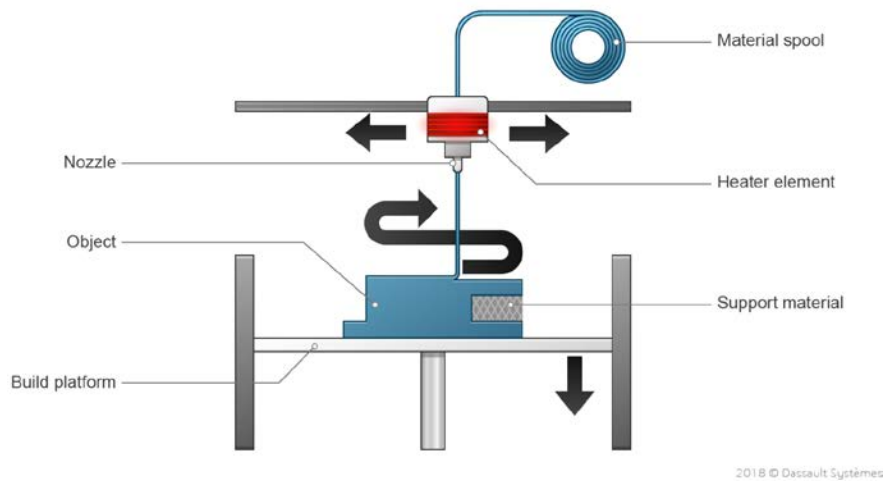
εξειδικευμένους slicers, καθώς χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικό επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή συχνά ο κατασκευαστής του μηχανήματος είναι υπεύθυνος για την προμήθεια του κατάλληλου λογισμικού. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι ορισμένα είδη εκτυπωτών δεν χρησιμοποιούν αρχεία gcode για την εκτύπωση. Ανάμεσα σε αυτά τα είδη βρίσκονται και οι εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού, οι slicers των οποίων παράγουν έναν εξειδικευμένο διαφορετικό τύπο αρχείου που διαβάζει ο εκτυπωτής για να παράγει το ζητούμενο αντικείμενο.

## Ενότητα 2 – Εξώθηση Υλικού (FDM)

### 2.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος FDM ή αλλιώς FFF (Fused Filament Fabrication) αναπτύχθηκε το 1988 από την αμερικανική εταιρία Stratasys. Η λήξη του διπλώματος ευρεσιτεχνίας για αυτή τη τεχνολογία το 2009 επέτρεψε και σε άλλες εταιρίες να εισέλθουν στον κλάδο, με αποτέλεσμα την ραγδαία πτώση του κόστους της συγκεκριμένης κατηγορίας εκτυπωτών, κάνοντας την προσβάσιμη για το ευρύ κοινό. Ωστόσο ο όρος Fused deposition modeling παραμένει ακόμη κατοχυρωμένος από την Stratasys. Σήμερα η FDM αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο 3D printing και εκτυπωτές που λειτουργούν με βάση αυτή βρίσκονται τόσο σε σπίτια όσο και σε επαγγελματικούς χώρους.

Η μέθοδος FDM χρησιμοποιεί σαν πρώτη ύλη θερμοπλαστικά σε μορφή νήματος που βρίσκεται αρχικά τυλιγμένο σε καρούλι, το οποίο στη συνέχεια προωθείται μέσα από ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο. Το ακροφύσιο (nozzle) βρίσκεται στην κεφαλή του εκτυπωτή (hot end) και έχει τη δυνατότητα κίνησης υπό ψηφιακή καθοδήγηση συνήθως σε δυο άξονες, ενώ το κρεβάτι του μηχανήματος (bed), κινείται στον τρίτο άξονα, δίνοντας έτσι την δυνατότητα της τρισδιάστατης μετακίνησης του nozzle σε σχέση με το αντικείμενο. Τα βασικά στοιχεία της λειτουργίας φαίνονται στην εικόνα 8.



Εικόνα 7 - Λειτουργία εκτυπωτή FDM - (9)

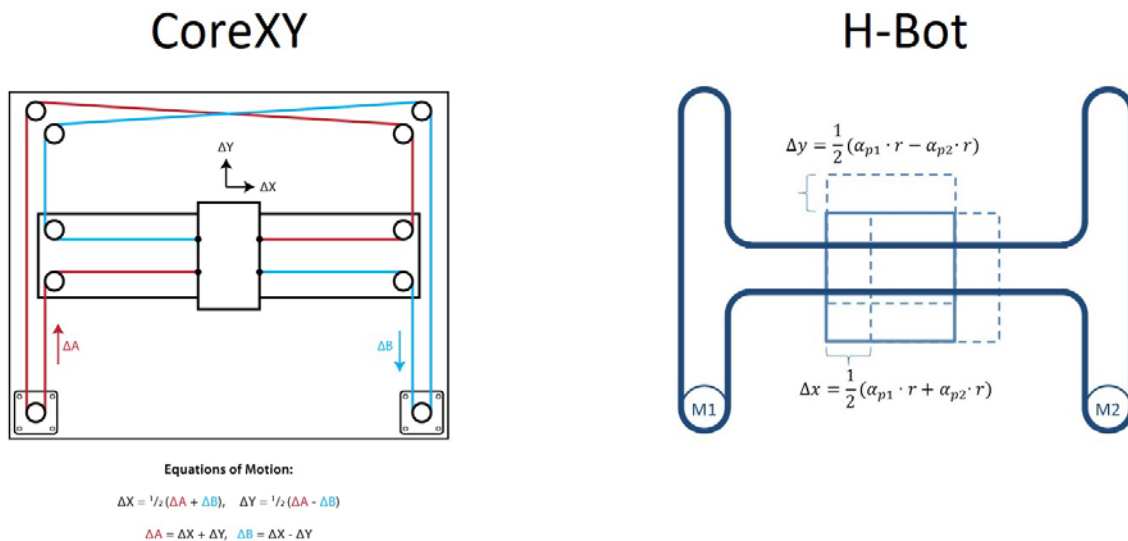
## 2.2 Υποκατηγορίες FDM εκτυπωτών

Οι FDM εκτυπωτές χωρίζονται σε 4 βασικές υποκατηγορίες με βάση τον τρόπο κίνησης τους:

- Καρτεσιανοί
- Δέλτα
- Πολικοί
- Με ρομποτικό βραχίονα

Οι καρτεσιανοί εκτυπωτές είναι με διαφορά οι πιο διαδεδομένοι και αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία μηχανημάτων, ακολουθούμενοι από τους δέλτα, ενώ οι πολικοί είναι πιο σπάνιοι και οι εκτυπωτές με ρομποτικό βραχίονα είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένοι και δεν διατίθενται για εμπορική χρήση.

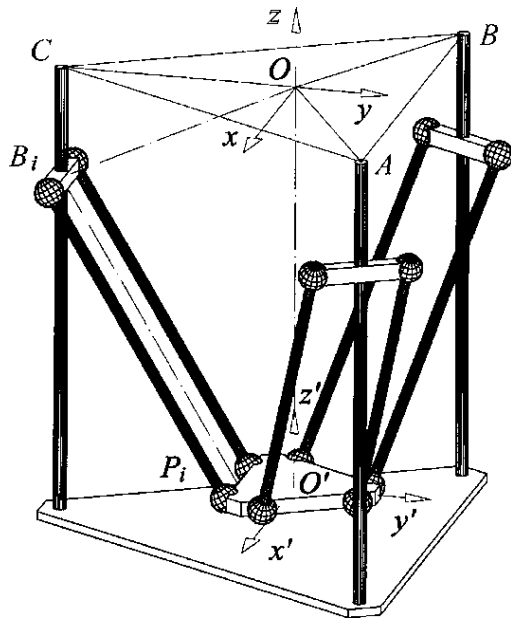
Στους καρτεσιανούς η κίνηση γίνεται είτε με το ακροφύσιο να κινείται σε 2 οριζόντιους άξονες που ορίζουν ένα επίπεδο και το τραπέζι στον κατακόρυφο άξονα Z, είτε με το ακροφύσιο να κινείται κατακόρυφα καθώς και σε ένα από τους 2 οριζόντιους άξονες, με το κρεβάτι να διατηρείται σταθερό στον Z και η κίνηση του να γίνεται «μπρος-πίσω» στον δεύτερο οριζόντιο άξονα. Χωρίζονται περεταίρω με βάση τον τρόπο μετάδοσης της κίνησης στην κεφαλή σε απλούς, core-XY και H-bot. Στους απλούς καρτεσιανούς, ο κάθε άξονας έχει το δικό του ανεξάρτητο μοτέρ και η ευθεία κίνηση σε οποιονδήποτε άξονα επιτυγχάνεται με την κίνηση μόνο ενός μοτέρ. Στους H-bot και τους core-XY, η κίνηση επιτυγχάνεται με ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών μοτέρ (10). Η κινηματική τους απεικονίζεται στην εικόνα 9.



Εικόνα 8 - Κινηματική διαφορετικών διατάξεων ιμάντα σε καρτεσιανούς εκτυπωτές - (11)

Στους δέλτα εκτυπωτές το κρεβάτι παραμένει σταθερό, ενώ το ακροφύσιο είναι στερεωμένο με τρία μπράτσα τα οποία σχηματίζουν ένα τριγωνικό σχήμα (από το οποίο πηγάζει και το όνομα τους) και μπορούν να γλιστρούν πάνω κάτω σε 3 κατακόρυφους άξονες (εικόνα 10), επιτρέποντας την κίνηση του ακροφυσίου και στις 3 διαστάσεις. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να επιτύχουν ιδιαίτερα μεγάλες

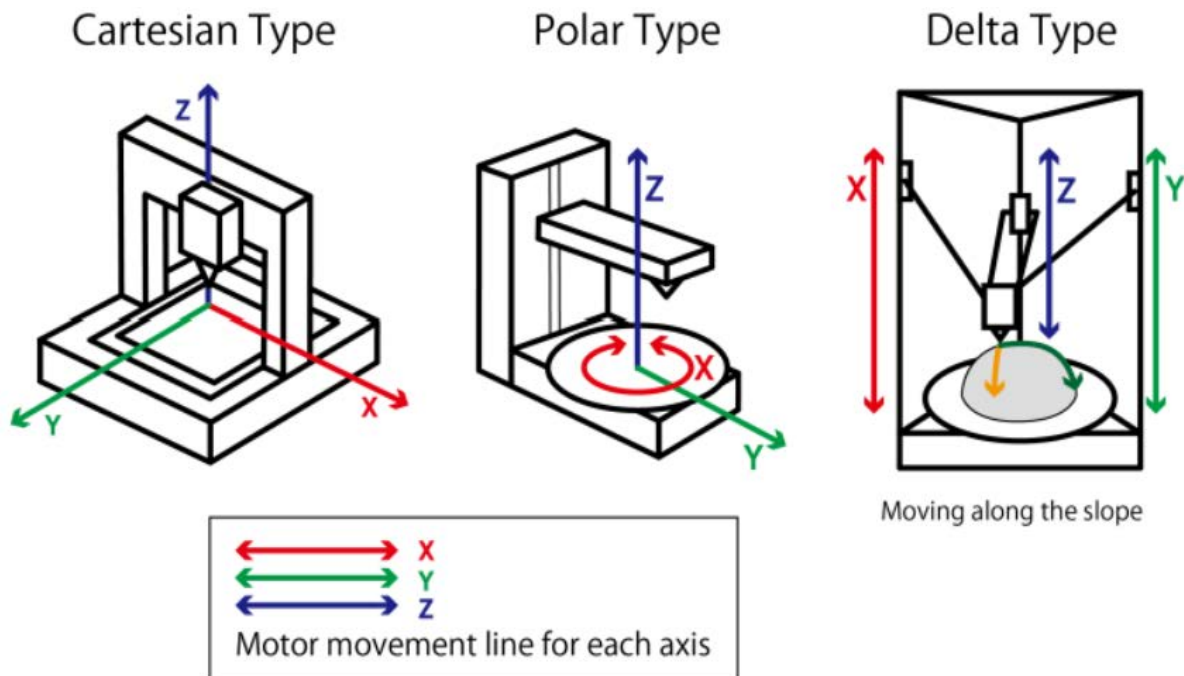
ταχύτητες κίνησης του ακροφυσίου, έχοντας ωστόσο μειωμένη ακρίβεια σε σχέση με τους καρτεσιανούς (11).



Εικόνα 9 - Κινηματική εκτυπωτών τύπου δέλτα - (11)

Οι πολικοί εκτυπωτές χρησιμοποιούν το αντίστοιχο (πολικό) σύστημα συντεταγμένων. Η τρισδιάστατη κίνηση επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη περιστροφή του κυκλικού κρεβατιού (άξονας  $\Theta$ ) και την κίνηση του ακροφυσίου σε 2 διαστάσεις, την κατακόρυφη (άξονας  $Z$ ) και την ακτινική (άξονας  $r$ ). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τρόπου κίνησης είναι η δυνατότητα παραγωγής μεγάλων αντικειμένων σε μικρότερο χώρο.

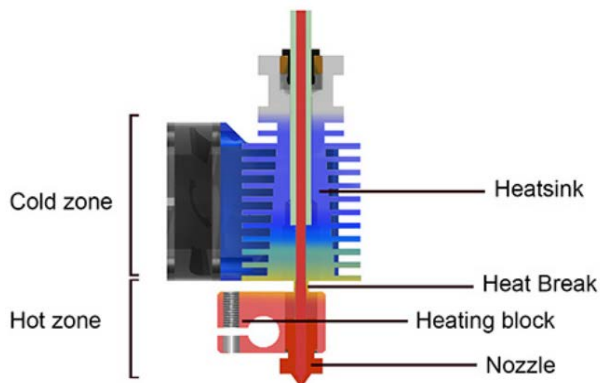
Οι εκτυπωτές με ρομποτικό βραχίονα, επίσης γνωστοί ως SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), αποτελούν ειδική περίπτωση, καθώς διαθέτουν πολλαπλές αρθρώσεις με τις οποίες μπορούν όχι απλά να κινήσουν το ακροφύσιο σε παραπάνω από 3 άξονες, έχοντας έτσι την δυνατότητα να παράγουν γεωμετρίες που δεν μπορούν να επιτευχθούν από εκτυπωτές των τριών προηγούμενων κατηγοριών. Τα μειονεκτήματα αυτής της κατηγορίας εκτυπωτών περιλαμβάνουν το εξαιρετικά υψηλό κόστος και πολυπλοκότητα, καθώς και την μειωμένη ακρίβεια συγκριτικά με παραδοσιακούς εκτυπωτές (12). Με τις κινήσεις αυτές το ακροφύσιο εναποθέτει το τηγμένο νήμα πάνω στο τραπέζι ακολουθώντας μια πορεία που έχει οριστεί από το slicer, σχηματίζοντας το αντικείμενο σε στρώσεις από κάτω προς τα πάνω και συνεχίζοντας έως ότου ολοκληρωθεί το παραγόμενο προϊόν. Οι 4 διαφορετικές διατάξεις των αξόνων απεικονίζονται παρακάτω στην εικόνα 11.



Εικόνα 10 - Διατάξεις αξόνων FDM εκτυπωτών - (12)

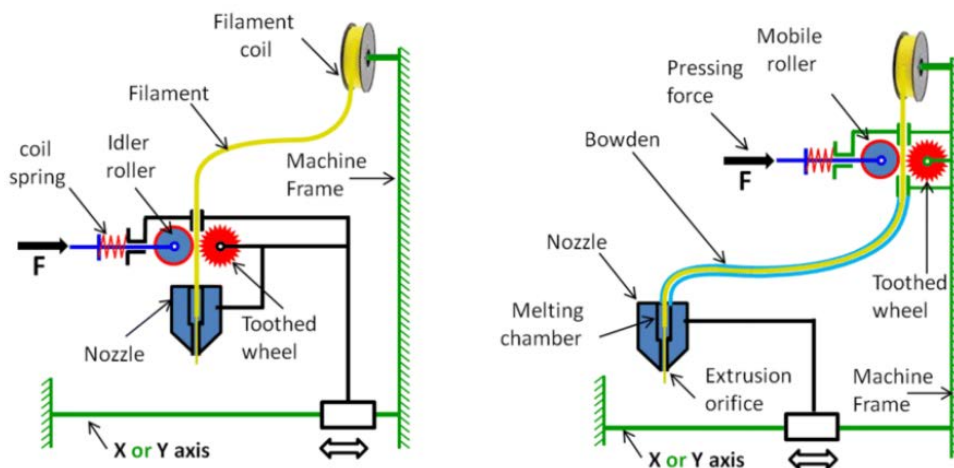
### 2.3 Μηχανικά μέρη

Το βασικό κινούμενο μέρος του εκτυπωτή, πάνω στο οποίο βρίσκεται το ακροφύσιο από το οποίο εξέρχεται το υλικό, ονομάζεται hotend και αποτελείται από 4 βασικά τμήματα (εικόνα 12). Το ακροφύσιο βρίσκεται στο κατώτερο σημείο και είναι συνδεδεμένο πάνω στον θερμαντήρα (heater block). Πάνω στο heater block συνδέεται και το heater cartridge, το οποίο ζεσταίνει τον θερμαντήρα και κατ' επέκταση το ακροφύσιο, τήκοντας το υλικό ενώ διέρχεται από μέσα του. Αναλόγως το υλικό που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση, η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται ο θερμαντήρας και το ακροφύσιο τυπικά κυμαίνεται από 190 έως 280 βαθμούς κελσίου. Από την άλλη μεριά του θερμαντήρα βρίσκεται το heat break, το οποίο πρόκειται για ένα πολύ λεπτό σωλήνα μέσα από τον οποίο περνάει το υλικό για να φτάσει στο ακροφύσιο, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από μέταλλο χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, όπως ανοξείδωτο ατσάλι ή τιτάνιο, έτσι ώστε να μην υπάρχει σημαντική αγωγή θερμότητας στις ανώτερες περιοχές του hot end, προκειμένου να αποφευχθεί η πρόωρη τήξη του υλικού, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε φραγή. Ενωμένο με το heat break είναι το λεγόμενο "cold end", το οποίο διαθέτει πτερύγια που ψύχονται ενεργά και τυπικά δεν ξεπερνά θερμοκρασίες 40-50 βαθμών κελσίου με στόχο να μην φτάνουν τα θερμοπλαστικά στην θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, χάνοντας την σκληρότητα τους, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε φραγμό της εισόδου του ακροφυσίου.



Εικόνα 11 - Μέρη ενός hotend - (13)

Το νήμα του πλαστικού περνάει μέσα από ένα πλαστικό σωληνάκι (Bowden tube) το οποίο το οδηγεί μέσα στο hot end. Το σωληνάκι αυτό είναι τυπικά φτιαγμένο από PTFE για να αντέχει τις υψηλές θερμοκρασίες του hot end και καλύπτει την απόσταση από τον εξωθητή (extruder), ο οποίος με 2 γρανάζια σπρώχνει το νήμα μέσα στο σωληνάκι και αναπτύσσει την απαραίτητη πίεση μέσα στο ακροφύσιο για την ροή του υλικού. Ο εξωθητής μπορεί είτε να είναι στερεωμένος άμεσα πάνω από το hot end έτσι ώστε το υλικό να διανύει μια πολύ μικρή διαδρομή (direct drive), είτε στην βάση του εκτυπωτή και το υλικό στην συνέχεια περνάει από μια μεγαλύτερη διαδρομή για να φτάσει στο hot end (bowden extruder). Τα 2 συστήματα (εικόνα 13) έχουν το καθένα τα πλεονεκτήματά του, με σημαντικότερες διαφορές ότι ο direct drive extruder μπορεί να προωθεί εύκαμπτα υλικά με ευκολία, ενώ ο bowden extruder κάνει πιο εύκολη τη συντήρηση του εκτυπωτή, είναι συνήθως φτηνότερος, αλλά και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους του hot end καθώς το βάρος του μοτέρ του extruder δεν βρίσκεται πάνω σε αυτό, μειώνοντας έτσι την αδράνεια του και επιτρέποντας του να κινείται με μεγαλύτερες ταχύτητες χωρίς να μειώνεται η ακρίβεια στο επίπεδο X-Y. Το είδος εξωθητή παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα εκτύπωσης καθώς επηρεάζει τη μέγιστη πίεση εξώθησης που αναπτύσσεται προκειμένου να μπορεί να περάσει το λιωμένο υλικό από την διατομή του nozzle, η οποία είναι πολύ μικρότερη από την αρχική διάμετρο του νήματος. Το πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η δύναμη αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης του hot end αλλά και από τη διάμετρο του nozzle (13).



Εικόνα 12 - Διαφορές direct και bowden extruder - (13)

## 2.3 Παράμετροι εκτύπωσης

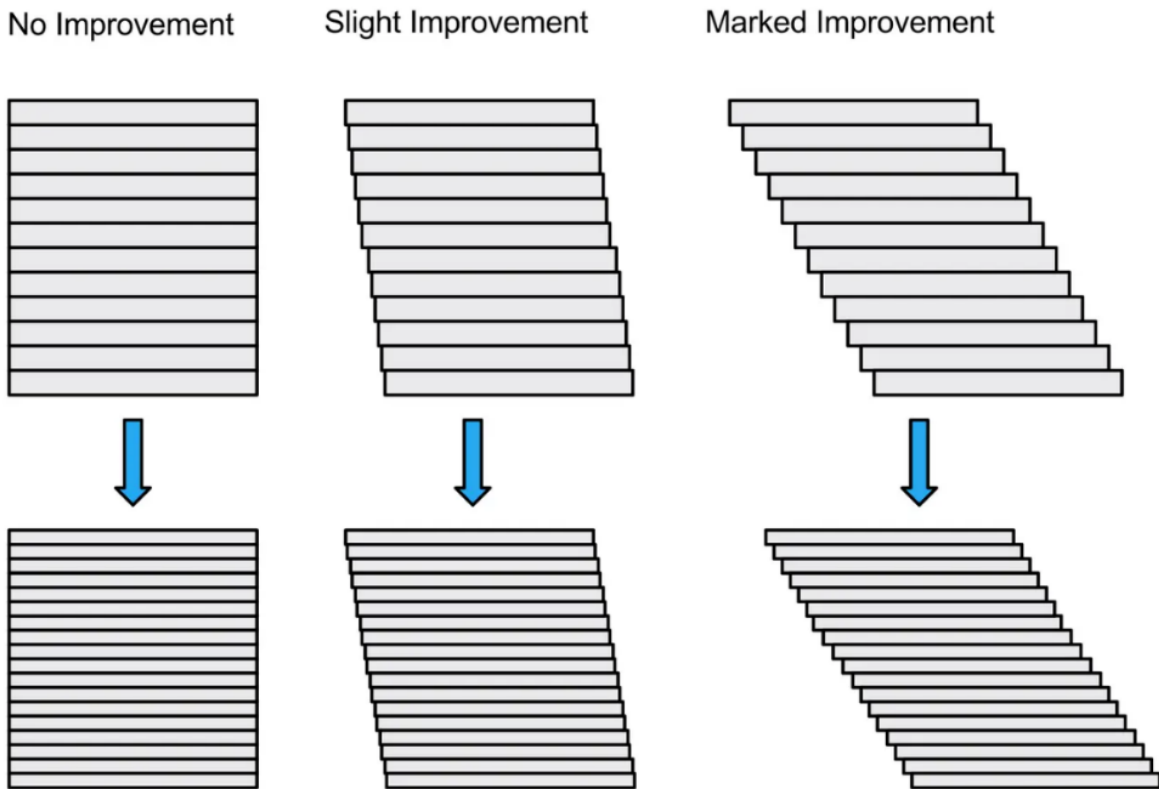
Η ταχύτητα της εκτύπωσης ενός FDM εκτυπωτή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν τον χρόνο παραγωγής ενός αντικειμένου. Μια από τις πιο σημαντικές αποτελεί ο ρυθμός με τον οποίο εναποτίθεται λιωμένο υλικό στην πλατφόρμα, ο οποίος μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση την ογκομετρική παροχή τηγμένου υλικού από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Πάχος στρώσης [mm]} \times \text{Πλάτος στρώσης [mm]} \times \text{Ταχύτητα κίνησης nozzle [mm/s]} = \text{Παροχή υλικού [mm}^3\text{/s]}$$

Το πλάτος και το πάχος στρώσης εξαρτώνται άμεσα από το μέγεθος του ανοίγματος του ακροφυσίου, με το πλάτος τυπικά να είναι ίσο ή ελαφρώς μεγαλύτερο από τη διάμετρο του ανοίγματος, ενώ το πάχος να κυμαίνεται από περίπου 60μm έως 700μm και δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2/3 της διαμέτρου του ακροφυσίου ως μέγιστο προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα κατά την εξώθηση.

Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στην μέγιστη ογκομετρική παροχή ενός FDM εκτυπωτή. Μεγαλύτερες θερμοκρασίες ακροφυσίου μειώνουν το ιξώδες του τηγμένου θερμοπλαστικού, επιτρέποντας την εξώθηση μεγαλύτερης ποσότητας υλικού για μια δεδομένη δύναμη εξώθησης. Η εκτύπωση ωστόσο σε υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσει στην ανεπαρκή ψύξη του υλικού μετά την εξώθηση του από το ακροφύσιο, καθυστερώντας την στερεοποίηση του και αλλοιώνοντας τις διαστάσεις και την ποιότητα των επιφανειών του παραγόμενου αντικειμένου.

Η ανάλυση εκτύπωσης ενός FDM εκτυπωτή εξαρτάται από δυο βασικούς παράγοντες. Ο ένας είναι η ανάλυση στο επίπεδο X-Y (μέγεθος μικρότερων χαρακτηριστικών), η οποία εξαρτάται από τη διάμετρο του nozzle. Μικρότερες διαμέτροι παρέχουν ψηλότερη ανάλυση αλλά και μειωμένη ταχύτητα, καθώς περιορίζουν και τη μέγιστη δυνατή παροχή υλικού. Ο δεύτερος είναι το πάχος των στρώσεων του υλικού, η ανάλυση δηλαδή στον άξονα Z. Το πάχος στρώσης επηρεάζει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο εκτύπωσης, με υψηλή ανάλυση (μικρό πάχος στρώσης) να οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους εκτύπωσης αλλά τυπικά καλύτερη ποιότητα. Η επίδραση στην ομαλότητα των επιφανειών μπορεί να είναι από αμελητέα έως σημαντική, αναλόγως με τη γεωμετρία του αντικειμένου. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν ένα μοντέλο έχει κάθετα τοιχώματα, οι στρώσεις κάθονται ακριβώς η μια πάνω από την άλλη και η διαφορά δεν είναι εύκολα διακριτή (14), ενώ όταν η κλίση τους είναι απότομη σχηματίζονται εμφανή σκαλοπάτια κατά την στόιβαξη των στρώσεων, φαινόμενο το οποίο είναι γνωστό ως *stairstepping* και παρουσιάζεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 13 - Επίδραση της ανάλυσης εκτύπωσης σε διαφορετικές γεωμετρίες - (14)

Όταν ωστόσο υπάρχει μια επιφάνεια υπό κλίση όπως βλέπουμε στο δεξί μέρος της παραπάνω εικόνας, το πάχος των στρώσεων παίζει δραματικό ρόλο στην ποιότητα του αντικειμένου, με μικρότερες στρώσεις να μειώνουν το μέγεθος των «σκαλοπατιών» από τα οποία αποτελείται η επιφάνεια, μειώνοντας και την τραχύτητα της. Επιπροσθέτως ένα μικρό πάχος στρώσης ελαχιστοποιεί το εμβαδόν της στρώσης που δεν διαθέτει στήριξη, αυξάνοντας την μέγιστη δυνατή κλίση στην οποία μπορεί να εκτυπωθεί ένα αντικείμενο χωρίς την απαίτηση στηρίξεων. Τυπικά μπορεί να επιτευχθεί εκτύπωση αντικειμένων με επιφάνειες υπό κλίση έως  $60^\circ$ , με μεγαλύτερες γωνίες να απαιτούν στηρίξεις.

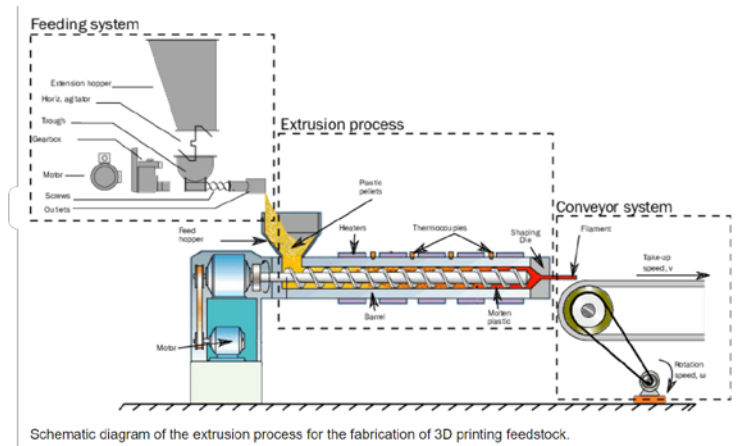
## 2.4 Πρώτες ύλες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι εκτυπωτές FDM χρησιμοποιούν πρώτη ύλη σε μορφή νήματος (filament) τυλιγμένο σε καρούλι. Η παραγωγή του νήματος γίνεται σε 5 βασικά στάδια (15):

1. Συγκεντρώνεται η κύρια πρώτη ύλη σε μορφή pellets (κόκκοι)
2. Αναμιγνύεται με τυχόν πρόσθετα όπως βαφές
3. Τροφοδοτείται σε ένα εξωθητή ο οποίος διαθέτει θερμαντήρες που λιώνουν τα pellets και τα προωθεί προς ένα ακροφύσιο μέσω μίας βίδας
4. Το υλικό βγαίνει σε μορφή νήματος από το ακροφύσιο και περνάει μέσα από νερό για να ψυχθεί
5. Βγαίνοντας από το δοχείο ψύξης, ευθυγραμμίζεται και τυλίγεται σε καρούλι

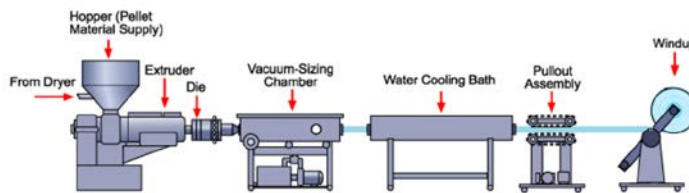


Τα στάδια της διαδικασίας παρουσιάζονται στις εικόνες 14α και 14β.



Εικόνα 14α - Στάδια παραγωγής νήματος - (15)

### 3D Printing Filament Production Process



Graphics obtained from Exlitem www.Exlitem.com

Εικόνα 14β - Συνολική διαδικασία παραγωγής - (15)

Λόγω του τρόπου λειτουργίας τους οι FDM εκτυπωτές μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος υλικών ως πρώτη ύλη. Αυτό, μαζί με το χαμηλό κόστος αγοράς και λειτουργίας, αποτελεί βασικό πλεονέκτημα έναντι άλλων κατηγοριών εκτυπωτών. Τα υλικά (filaments) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν έχουν αναπτυχθεί ραγδαία στα τελευταία χρόνια. Αρχικά οι εν λόγω εκτυπωτές χρησιμοποιούσαν ABS (Ακρυλονιτρίλιο βουταδιενίου στυρολίου), ενώ στη συνέχεια εμφανίστηκαν μεταξύ άλλων το PLA (Πολυγαλακτικό οξύ) και το PETG (Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο με προσθήκη Αιθυλενογλυκόλης), τα οποία άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως. Πλέον το πιο εκτενώς χρησιμοποιούμενο υλικό είναι το PLA, ή ελαφρώς τροποποιημένες μορφές του (PLA+) λόγω της ευκολίας του κατά την εκτύπωση αλλά και την υψηλή ποιότητα επιφάνειας που το χαρακτηρίζει. Οι ιδιότητες του PETG αποτελούν ένα συνδυασμό της ευκολίας του PLA και της μηχανικής και θερμικής αντοχής του ABS. Αξιοσημείωτα επίσης υλικά είναι το NYLON, το οποίο χρησιμοποιείται σε κατασκευές αντικειμένων που χρειάζονται καλές μηχανικές ιδιότητες, το TPU το οποίο δίνει ένα εύκαμπτο τελικό αποτέλεσμα και το ASA που παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με το ABS, ενώ διαθέτει υψηλή αντοχή στην ακτινοβολία



και είναι λιγότερο επιρρεπές σε παραμορφώσεις κατά την εκτύπωση. Τα πιο συνηθισμένα υλικά, καθώς και κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται ενδεικτικά στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 - Ιδιότητες κοινών πρώτων υλών από FDM εκτυπωτές - (16)

Material	Printing with enclosure	Dry box recommended	Hardened nozzle required	Nozzle temperature (+/-10 °C)	Bed temperature (+/-10 °C)	Printable on powder coated sheet	Printable on smooth PEI sheet	Printable on satin sheet	Soluble with common solvents	Heat deflection temperature (avg. °C)	Impact resistance Charpy (kJ/m <sup>2</sup> )	Tensile strength (MPa)	Price
> PLA	(15) No	No	No	210 - 215 °C	60 °C	✓	✓	✓	✗	100	10	50	Low
> PETG	(8) No	No	No	230 - 270 °C	90 °C	✓	with glue stick	✓	✗	150	10	50	Low
> PETG HT	(1) No	No	No	270 °C	110 °C	✓	with glue stick	✓	✗	150	10	50	Low
> ASA	(2) Yes recommended	No	No	260 - 265 °C	95 - 110 °C	with glue stick	✓	✓	✓	150	10	50	Low
> ABS	(5) Yes recommended	No	No	240 - 255 °C	110 °C	with glue stick	✓	✓	✓	150	10	50	Low
> PC (Polycarbonate)	(2) Yes recommended	No	No	270 - 275 °C	115 °C	with glue stick	with glue stick	✓	✗	150	10	50	High
> CPE	(1) No	Yes	No	275 °C	90 °C	✓	with glue stick	✓	✗	150	10	50	Low
> PVA / BVOH	(2) No	Yes	No	195 - 215 °C	60 °C	✓	✓	✓	✓	150	10	50	High
> HIPS	(1) No	No	No	220 °C	110 °C	✓	✓	✓	✓	150	10	50	Low
> PP (Polypropylene)	(1) Yes	No	No	220 °C	100 °C	✗ not recommended	with PP Tape	✓	✗	150	10	50	Low
> Flex	(5) No	Yes	No	230 - 260 °C	50 - 85 °C	✓	with glue stick	with glue stick	✗	150	10	50	Low
> nGen	(1) No	No	No	240 °C	90 °C	✓	with glue stick	✓	✗	150	10	50	Low
> Nylon	(3) Yes recommended	Yes	No	250 - 270 °C	75 - 90 °C	with glue stick	✗ not recommended	with glue stick	✗	150	10	50	High
> Composite materials	(7) -	-	Yes	240 - 285 °C	75 - 110 °C	-	-	-	✗	150	10	50	High
> Wood / metal filled	(7) No	No	-	190 - 220 °C	60 °C	✓	✓	✓	✗	150	10	50	High
> PVB	(1) No	No	No	215 °C	75 °C	✗ not recommended	✓	✓	✓	150	10	50	Low

## 2.6 Εφαρμογές της μεθόδου

Η FDM αποτελεί μια από τις νεότερες μεθόδους προσθετικής παραγωγής, λόγω των χαρακτηριστικών της έχει ωστόσο ήδη αποκτήσει βιομηχανικές εφαρμογές σε ένα μεγάλο εύρος τομέων. Λόγω του μικρού χρόνου προετοιμασίας που απαιτείται πριν από την εκτύπωση, καθώς και την περιορισμένη απαραίτητη επεξεργασία μετά την ολοκλήρωση της, η μέθοδος FDM αποτελεί ένα εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο στα χέρια ενός κατασκευαστή κατά τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού ενός προϊόντος. Σε αντίθεση με παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής, με τη χρήση FDM εκτυπωτών γίνεται πολύ εύκολη και γρήγορη η παραγωγή πολλών διαφορετικών εκδοχών ενός αντικειμένου, ακόμη και όταν η γεωμετρία του είναι εξαιρετικά περίπλοκη. Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται σημαντικά τη βελτιστοποίηση ενός σχεδίου, διαδικασία που έχει γίνει γνωστή ως rapid prototyping. Πέρα από τη άμεση δημιουργία πρωτοτύπων, δυνατή είναι επίσης η δημιουργία καλουπιών για χύτευση, εφαρμογή η οποία εντάσσεται στην κατηγορία rapid tooling. Σε περιπτώσεις που τα καλούπια δεν μπορούν να είναι κατασκευασμένα από θερμοπλαστικά υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί μια μήτρα παραγόμενη από εκτύπωση FDM ως ενδιάμεσο στάδιο κατασκευής μιας μεταλλικής μήτρας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή του καλουπιού. Αυτή η τεχνική αναφέρθηκε ως indirect tooling από τους Ingole et al. το 2009 (17).

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό παράδειγμα της εφαρμογής του rapid tooling είναι η χρήση της Ford, η οποία το 2018 κέρδισε το Automotive Innovation Award Competition της Automotive Division of the Society of Plastics Engineers (SPE) όταν κατασκεύασε με FDM εκτυπωτή ένα εξάρτημα υποβοήθησης ανύψωσης των κινητήρων (εικόνα 15α). Με τον τρόπο αυτό κατάφερε να μειώσει το βάρος κατά 50% σε σχέση με το συμβατικό εξάρτημα, ενώ ταυτόχρονα μπόρεσε να το παράγει πιο γρήγορα. Στο παρελθόν (18) η Ford έχει χρησιμοποιήσει ξανά την προσθετική παραγωγή, με χαρακτηριστικά παραδείγματα την δημιουργία εκτυπωμένου καλουπιού για αεραγωγό του Ford Ranger (εικόνα 15β) ο οποίος μπορούσε πλέον να παραχθεί σε ένα κομμάτι, καθώς και την χρήση εργαλείου ευθυγράμμισης παραθύρων (εικόνα 15γ). Το τελευταίο τυπώθηκε με σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (carbon fiber reinforced polyamide) σε FDM εκτυπωτή.



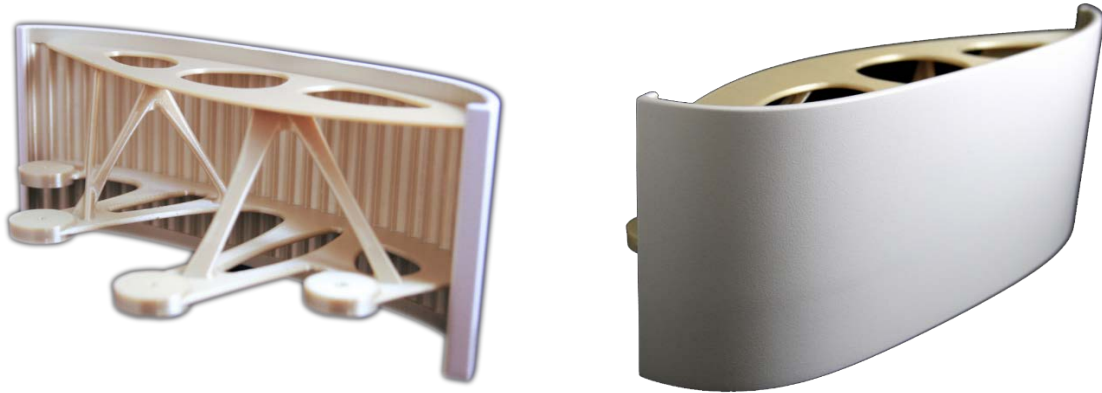
Εικόνα 15α - Εξάρτημα ανύψωσης κινητήρων – [19]



Εικόνα 16β - Εξάρτημα ευθυγράμμισης παραθύρων - [18]

Εικόνα 16γ – Αεραγωγός αυτοκινήτου Ford Ranger - (18)

Πέρα από την κατασκευή εργαλείων και πρωτοτύπων, οι FDM εκτυπωτές έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την παρασκευή τελικών προϊόντων. Λόγω της δυνατότητας τους να παράγουν εξαιρετικά περίπλοκες γεωμετρίες, ένα εξάρτημα μπορεί να βελτιστοποιηθεί εκτενώς ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης μάζας ενώ διατηρείται η ίδια μηχανική αντοχή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί σχεδιάζοντας εξαρτήματα με μεθόδους όπως το topology optimization και στη συνέχεια κατασκευάζοντας τα σε ένα κομμάτι, παράγοντας έτσι δυνατά και ελαφριά εξαρτήματα χωρίς την ανάγκη συναρμολόγησης. Η Airbus (19) κατασκεύασε με FDM το πρώτο τρισδιάστατα εκτυπωμένο εξάρτημα αεροπλάνου ορατό από τους επιβάτες σε αεροσκάφος που χρησιμοποιείται από την Finnair (εικόνα 16). Με τον τρόπο αυτό κατάφεραν να εξαλείψουν την ανάγκη κατασκευής εξειδικευμένων εργαλείων που χρειάζονται για την κατασκευή του συγκεκριμένου εξαρτήματος με injection molding, κάτι το οποίο μειώνει το κόστος κατασκευής σημαντικά δεδομένου ότι πρόκειται για ένα εξειδικευμένο εξάρτημα με μικρή ζήτηση.



Εικόνα 16 - Εκτυπωμένο κέλυφος αεροσκάφους σχεδιασμένο με βελτιστοποίηση τοπολογίας - (19)

Οι εκτυπωτές FDM έχουν αποκτήσει σημαντικές εφαρμογές και στον τομέα της ιατρικής. Η εταιρία Stratasys χρησιμοποιεί την FDM για την εύκολη και γρήγορη παραγωγή καλουπιών για προσθετικά μέλη βασιζόμενα σε 3d scans του μη τραυματισμένου μέλους. Συγκεκριμένα η εταιρία αναφέρει ότι η υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας κατάφερε να ρίξει τον χρόνο κατασκευής κατά 93%, έχοντας την δυνατότητα να παράγει καλούπια σε λίγες ώρες. Στο παρελθόν (20) τα καλούπια αυτά έπρεπε να κατασκευαστούν από κιμωλία, κάτι το οποίο οδηγούσε σε αυξημένα μεταφορικά έξοδα και υψηλό ρίσκο καταστροφής τους κατά την μετακίνηση, ενώ εναλλακτικές που χρησιμοποιούν ρομπότ επτά αξόνων για να φτιάξουν τα καλούπια από αφρό παρουσίαζαν διαφορετικούς περιορισμούς ταχύτητας και δυνατοτήτων.

Μια ακόμη σημαντική ιατρική εφαρμογή, αποτελεί η κατασκευή ικριωμάτων (scaffolds) για την καλλιέργεια κυττάρων (tissue engineering), (εικόνα 17). Ο σκοπός είναι να παραχθούν ικριώματα τα οποία τυπικά είναι βιοδιασπώμενα και φτιαγμένα από πολυκαπρολακτόνη (PCL), τα οποία θα μπορούν να βοηθήσουν στην αναγέννηση τραυματισμένου ιστού ο οποίος δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με συμβατικές μεθόδους. Η αμερικανική εταιρία Fossilabs έχει αναπτύξει εκτυπωτές FDM που μπορούν και παράγουν ικριώματα από PEEK (polyether ether ketone) της εταιρίας VESTAKEEP. Το συγκεκριμένο υλικό έχει εγκριθεί από το αμερικανικό FDA με το πρότυπο FDA 510(k), και μπορεί και είναι σταθερό μέσα στο ανθρώπινο σώμα για «πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους» όπως αναφέρθηκε από την εταιρία. Με την εισαγωγή αυτών των ικριωμάτων μπορεί να επιτευχθεί η επιτάχυνση της ανάρρωσης ασθενών (21) με μυοσκελετικά προβλήματα, επιταχύνοντας την αναγέννηση των κυττάρων.



Εικόνα 17 - Ικριώματα για αναγέννηση κυττάρων - (22)

## 2.7 Περιορισμοί της μεθόδου

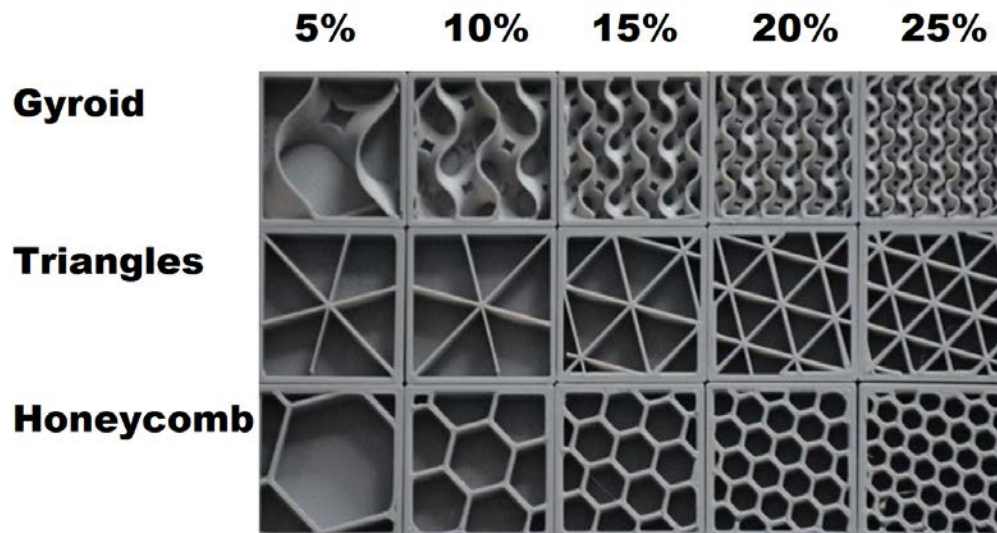
Βασικό μειονέκτημα της εκτύπωσης με εξώθηση υλικού αποτελεί ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της. Η ταχύτητα εκτύπωσης δεν μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλη καθώς περιορίζεται από την ικανότητα του εξωθητή να υπερνικήσει την πίεση που αναπτύσσεται στο ακροφύσιο κατά την εκτύπωση, καθώς και τον ρυθμό με τον οποίο μπορεί το hot end να λιώνει το υλικό, ο οποίος πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να μπορεί να υπάρχει σταθερή τροφοδοσία τηγμένου υλικού στο ακροφύσιο καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης. Σε μεγάλες ταχύτητες εκτύπωσης οι απώλειες θερμότητας λόγω εισόδου κρύου υλικού αυξάνονται, οδηγώντας σε μείωση της θερμοκρασίας του υλικού. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της αναπτυσσόμενης πίεσης στο ακροφύσιο, και συνεπώς ο εξωθητής χρειάζεται να ασκεί μεγαλύτερη δύναμη στο νήμα για να μπορέσει να την υπερνικήσει. Εάν οι δυνάμεις αυτές αυξηθούν πάνω από μια κρίσιμη τιμή, τα γρανάζια του εξωθητή μπορεί να ξεκινήσουν να γλιστράνε πάνω στο νήμα, ενώ πιθανό είναι επίσης να παρουσιαστεί λυγισμός του νήματος εφόσον κάποια κρίσιμη πίεση ξεπεραστεί. Η κρίσιμη τιμή πίεσης που οδηγεί σε buckling του νήματος μεταξύ των γραναζιών και της εισόδου στο hot end δίνεται από ανάλυση buckling κατά Euler από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E d_f^2}{16 L_f^2}$$

Όπου:

$E$ : μέτρο ελαστικότητας νήματος,  $d_f$ : διάμετρος νήματος,  $L_f$ : μήκος νήματος από τα γρανάζια του εξωθητή μέχρι την είσοδο στο hot end ή το bowden tube.

Ένας τρόπος να μειώσουμε το χρόνο εκτύπωσης χωρίς να αυξήσουμε την ταχύτητα είναι να μειώσουμε το υλικό που απαιτείται για το αντικείμενο, χρησιμοποιώντας μειωμένο ποσοστό υλικού στις εσωτερικές περιοχές. Η τεχνική αυτή μπορεί να επιτευχθεί εύκολα στο slicer, και συνοδευόμενη από ένα επαρκή αριθμό τοιχωμάτων, η μείωση της αντοχής του αντικειμένου σε μηχανικά φορτία μπορεί να είναι έως και αμελητέα. Τρία από τα διάφορα μοτίβα (23) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθεί μειωμένη χρήση υλικού σε διαφορετικά ποσοστά πλήρωσης απεικονίζονται στην εικόνα 18:



Εικόνα 18 - Είδη infill - (23)

Οι μεταβολές στην θερμοκρασία εξόδου του υλικού από το ακροφύσιο του εκτυπωτή μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ικανότητα του να ενωθεί με τις προηγούμενες στρώσεις. Υπερβολικά χαμηλή θερμοκρασία έχει ως αποτέλεσμα να μην γίνει σωστή ένωση των στρώσεων, επηρεάζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου. Αντιθέτως, υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν τις προηγούμενες εναποθετημένες στρώσεις να λιώσουν ξανά, μειώνοντας την διαστασιακή ακρίβεια του αντικειμένου. Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων εντός του ακροφυσίου, και κατ' επέκταση την πίεση που αναπτύσσεται είναι ότι τα θερμοπλαστικά τυπικά δεν εμφανίζουν Νευτώνεια συμπεριφορά (24), αλλά ψευδοπλαστική, με το ιξώδες τους να εξαρτάται από το ρυθμό διάτμησης, η αύξηση του οποίου οδηγεί σε μείωση του ιξώδους του τήγματος.

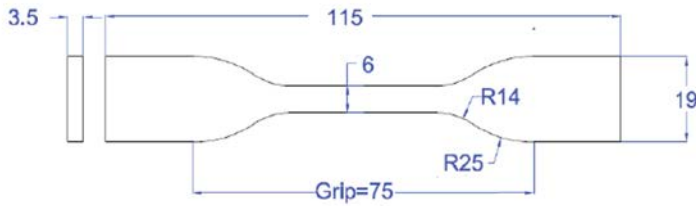
Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός της FDM είναι η χαμηλή ακρίβεια σχετικά με άλλες μεθόδους προσθετικής παραγωγής. Με το τυπικό ακροφύσιο να έχει κυκλική απόληξη διαμέτρου 0.4 χιλιοστών, η παραγωγή αιχμηρών γωνιών είναι αδύνατη. Χρήση μικρότερων διαμέτρων ακροφυσίου μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της εκτύπωσης στο επίπεδο X-Y, αυξάνοντας ωστόσο δραματικά τον χρόνο εκτύπωσης. Η χρήση πολλών κινούμενων μηχανικών μερών ρίχνει περαιτέρω την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα της μεθόδου, καθιστώντας την ακατάλληλη για πολλές εφαρμογές όπου οι ανοχές είναι εξαιρετικά στενές.

Όταν τα παραγόμενα αντικείμενα πρόκειται να υποβληθούν σε σημαντικά φορτία είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν η έντονη ανισοτροπία τους κατά το σχεδιασμό και την εκτύπωση. Ο προσανατολισμός του αντικειμένου κατά την εκτύπωση επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές του ιδιότητες. Συγκεκριμένα, σε δοκίμια από ABS (ASTM standard D638) (25) (εικόνα 19) εκτυπωμένα σε διάφορες γωνίες, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναγράφονται στον πίνακα 2, παρατηρήθηκαν οι παρακάτω διαφορές στην αντοχή τους σε εφελκυσμό. Η δοκιμή έγινε σε μηχανές Instron 8872 σε θερμοκρασία δωματίου με ταχύτητα δοκιμής ήταν 1mm/min.

Πίνακας 2 – Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμίου - (25)

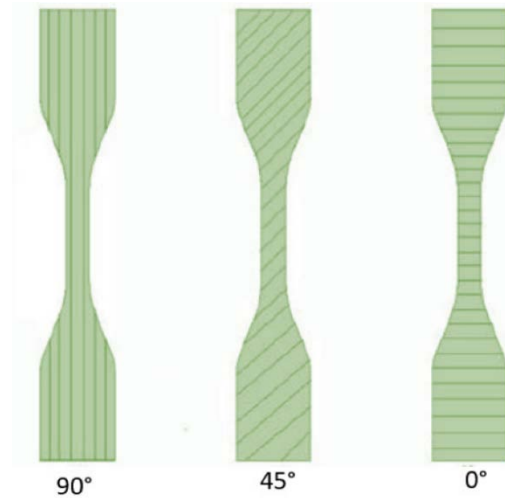
Παράμετρος	Τιμή
Διάμετρος ακροφυσίου [mm]	0.4
Πάχος τοιχώματος [mm]	0.8
Πάχος στρώσεων [mm]	0.2
Αριθμός τοιχωμάτων [mm]	3
Ποσοστό γεμίσματος (infill) [%]	30
Θερμοκρασία εκτύπωσης [°C]	200
Θερμοκρασία κρεβατιού [°C]	60
Ταχύτητα εκτύπωσης [mm/s]	60



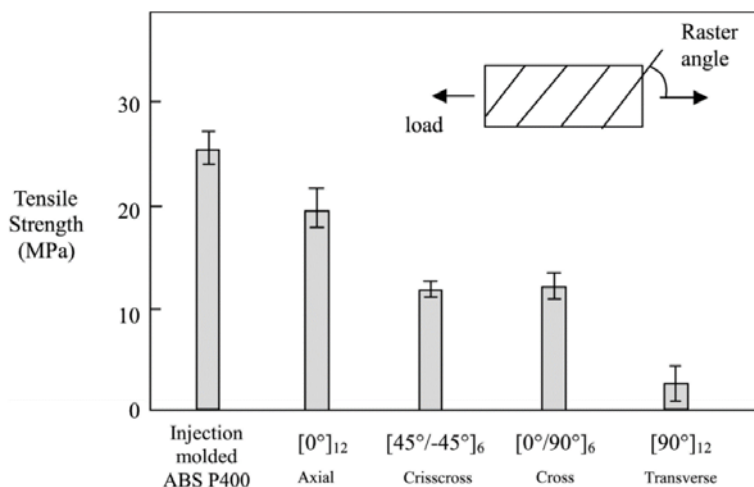


Εικόνα 19 - Γεωμετρία δοκιμίου ASTM D638 Type IV - (25)

Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι το οριζόντια τυπωμένο δοκίμιο με γωνία σάρωσης 0 μοιρών (γραμμές σάρωσης παράλληλες στη διεύθυνση του φορτίου) παρουσίασε την μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, δίνοντας τιμή 55.49MPa, ενώ το όρθιο δοκίμιο ήταν το πιο αδύναμο, με αντοχή σε εφελκυσμό μόλις 35,52MPa, δηλαδή μόλις 64% της τιμής στην οριζόντια διεύθυνση. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν το φορτίο είναι κάθετο στη διεύθυνση των στρώσεων, η αντοχή σε εφελκυσμό περιορίζεται από την δύναμη ένωσης των στρώσεων οι οποίες τείνουν να ξεκολλήσουν η μια από την άλλη. Αυτό δεν συμβαίνει όταν το φορτίο είναι παράλληλο στις στρώσεις, με την αντοχή του δοκιμίου να είναι πολύ πιο κοντά στην αντοχή του υλικού, και να μην επηρεάζεται αρνητικά (25) από την ανισοτροπία του. Τεστ εφελκυσμού κατά ASTM D638 (26) που έγινε σε δοκίμια με διαφορετικό προσανατολισμό κατά την εκτύπωση (εικόνα 20) έβγαλε τα παρακάτω αποτελέσματα που απεικονίζονται στο γράφημα 1:



Εικόνα 20 - Διεύθυνση στρώσεων δοκιμίων με διαφορετικό προσανατολισμό κατά την εκτύπωση – [25]

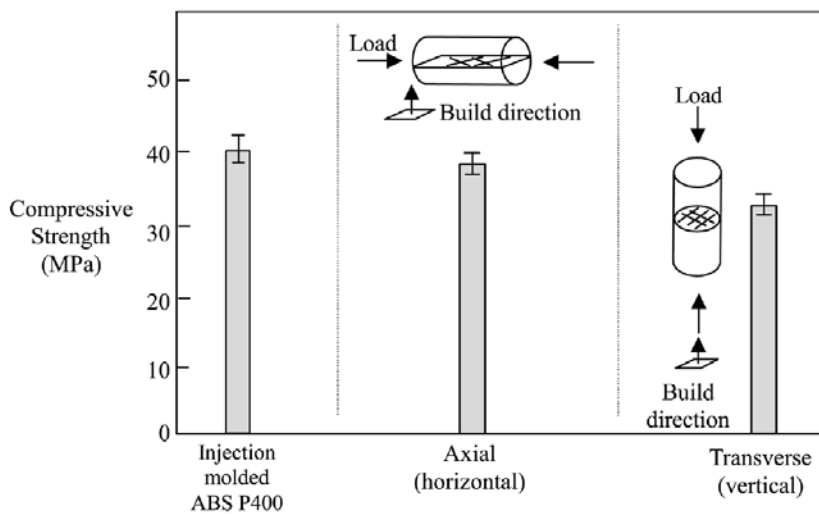


Γράφημα 1 - Επίδραση προσανατολισμού δοκιμίου κατά την εκτύπωση στην αντοχή σε εφελκυσμό - (26)

Βλέπουμε ότι η γωνία εκτύπωσης (σε αυτή την εικόνα αναφέρεται ως Raster angle, όρος ο οποίος χρησιμοποιείται για διαφορετική γωνία στη συνέχεια) επηρεάζει σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό, με το καλύτερο αποτέλεσμα που δίνεται από τις 0 μοίρες σε σχέση με τη διεύθυνση φόρτισης να είναι

κοντά στο πλήρως ισότροπο δοκίμιο κατασκευασμένο με injection molding, και το χειρότερο στις 90 να παρουσιάζει περίπου το ένα πέμπτο της αντοχής. Η αρνητική αυτή επίδραση της γωνίας σάρωσης τυπικά καταπολεμάται στην εκτύπωση με κατάλληλες ρυθμίσεις slicer, οι οποίες ορίζουν διαφορετική γωνία σάρωσης για κάθε στρώση, οδηγώντας σε ένα σχεδόν ισότροπο υλικό όσον αφορά τις επίπεδες φορτίσεις. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι ακόμη και με επιλογή του βέλτιστου προσανατολισμού αντικειμένου κατά την εκτύπωση και της ιδανικής γωνίας σάρωσης, ένα δοκίμιο που έχει παραχθεί με εκτύπωση FDM δεν μπορεί να φτάσει την μηχανική αντοχή που θα είχε εάν είχε παραχθεί με κάποια μέθοδο όπως το injection molding, λόγω του πορώδους που αναγκαστικά δημιουργείται κατά την εναπόθεση του λιωμένου υλικού σε στρώσεις αποτελούμενες από κυλινδρικούς δρόμους.

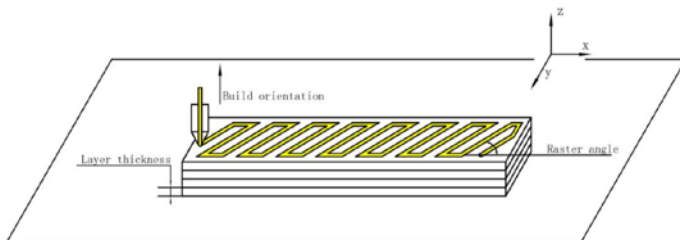
Αντίστοιχη δοκιμή αντοχής σε θλίψη (26) διαφορετικών προσανατολισμών εκτύπωσης έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα που απεικονίζονται στο γράφημα 2:



Γράφημα 2 - Επίδραση προσανατολισμού του δοκίμιου κατά την εκτύπωση σε αντοχή σε θλίψη

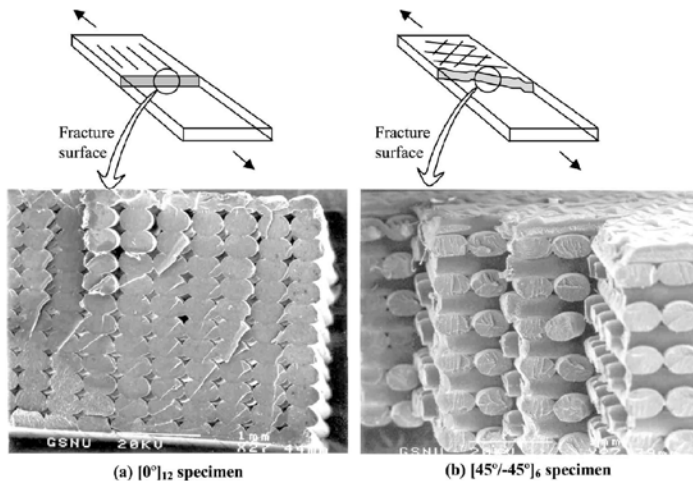
Βλέπουμε ότι τα εκτυπωμένα δοκίμια εμφανίζουν παρόμοια μέγιστη αντοχή σε θλίψη, ενώ βρίσκονται κοντά και στην αντοχή του πλήρως ισότροπου δοκίμιου από injection molding. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά, καθώς σε αντίθεση με την αντοχή σε εφελκυσμό η αντοχή σε θλίψη δεν εξαρτάται από την δύναμη ένωσης των στρώσεων.

Σε μικρότερο βαθμό έχει επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες και η γωνία σάρωσης (raster angle) (27). Αυτή η γωνία απεικονίζεται στην εικόνα 21 και είναι διαφορετική από αυτή που αναφέρθηκε στο γράφημα 2 και πρόκειται για τη γωνία με την οποία η κεφαλή σαρώνει την επιφάνεια της κάθε στρώσης κατά το σχηματισμό της.



Εικόνα 21 - Γωνία σάρωσης - (25)

Η μικροδομή ενός εκτυπωμένου με FDM δοκιμίου στην επιφάνεια θραύσης σε δοκίμια με δύο διαφορετικές γωνίες σάρωσης φαίνεται στην εικόνα 22.



Εικόνα 22 - Επιφάνεια θραύσης δοκιμίων με διαφορετικές γωνίες σάρωσης - (28)

Στο αριστερό σχήμα βλέπουμε την επιφάνεια θραύσης δοκιμίου κατασκευασμένου από 12 στρώσεις υλικού όλες προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση, ενώ στο δεξί με εναλλαγή μεταξύ  $-45^\circ$  και  $+45^\circ$  μοίρες γωνία σάρωσης σε κάθε στρώση, δίνοντας δηλαδή 6 στρώσεις από κάθε προσανατολισμό. Και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρείται ένα ποσοστό πορώδους μέσα στο υλικό. Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να καταπολεμηθεί σε μεγάλο βαθμό με θερμική επεξεργασία (ανόπτηση, annealing) του δοκιμίου, κατά την οποία οι στρώσεις λιώνουν ξανά, αυξάνοντας σημαντικά την αντοχή της ένωσης των στρώσεων και βελτιώνοντας την ισοτροπία του υλικού. Κατά τη συγκεκριμένη διεργασία ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι υπάρχουν παραμορφώσεις στο δοκίμιο, οι οποίες μπορεί να το βγάλουν εκτός των διαστασιακών του προδιαγραφών.

## 2.8 Μελλοντική έρευνα

Στους εκτυπωτές FDM μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η εκτύπωση σε μη οριζόντιο επίπεδο (non planar printing, NPP). Με αυτή την τεχνική ένας FDM εκτυπωτής ο οποίος τυπικά χρησιμοποιεί δύο από τους τρεις άξονες του (με εξαίρεση τους δέλτα), και συνεπώς χαρακτηρίζεται ως μηχανή 2.5 αξόνων, μπορεί και κινεί και τους τρεις άξονες του ταυτόχρονα, επιτρέποντας την δημιουργία στρώσεων που καμπυλώνουν γύρω από την γεωμετρία του αντικειμένου. Αυτή η τεχνική μπορεί να εξελιχθεί ακόμη περισσότερο με την προσθήκη επιπλέον αξόνων στους εκτυπωτές, δίνοντας την δυνατότητα περιστροφής της μύτης του εκτυπωτή, και «ξεκλειδώνοντας» έτσι γεωμετρίες που προηγουμένως ήταν αδύνατον να παραχθούν χωρίς εκτενή χρήση στηρίξεων. Η δυσκολία με αυτή την προσέγγιση βρίσκεται στην υποστήριξη του λογισμικού. Αυτή τη στιγμή τα λογισμικά τμής (slicers) υποστηρίζουν μόνο παραδοσιακή επίπεδη εκτύπωση (planar printing), και συνεπώς ακόμη και εάν κάποιος διαθέτει ένα μηχάνημα FDM πολλών αξόνων, ή ακόμη και αν θέλει να εκτελέσει NPP, θα αντιμετωπίσει σημαντικές δυσκολίες κατά το στάδιο της τμής του αντικειμένου. Θα ήταν συνεπώς πολύ σημαντικό να γίνει περισσότερη έρευνα πάνω στα λογισμικά που επιτρέπουν τέτοιου είδους εκτυπώσεις, επιταχύνοντας την πορεία προς την πραγματική τρισδιάστατη εκτύπωση.



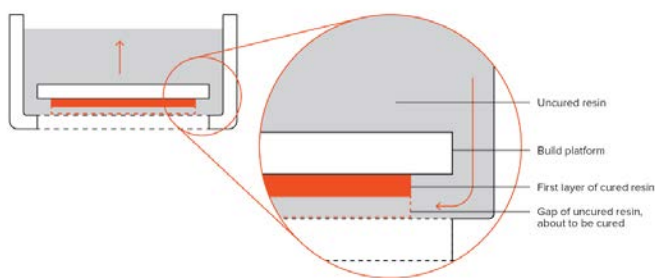
## Ενότητα 3 – Φωτοπολυμερισμός

### 3.1 Περιγραφή μεθόδου

Η διαδικασία του φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη ρητίνες, ή αλλιώς φωτοπολυμερή υλικά, σε υγρή μορφή που μπορούν να στερεοποιηθούν με έκθεση σε ακτινοβολία. Τυπικά, για τη στερεοποίηση χρησιμοποιείται υπεριώδης (UV) ακτινοβολία, υπάρχουν ωστόσο και συστήματα που χρησιμοποιούν ορατό φως. Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο FDM, τα φωτοπολυμερή είναι θερμοσκληρυνόμενα (thermoset), τα οποία δεν μπορούν να λιώσουν και να αναδιαμορφωθούν μετά την αρχική τους διαμόρφωση. Η διαδικασία στερεοποίησης ονομάζεται φωτοπολυμερισμός και θα συζητηθεί περαιτέρω στη συνέχεια. Τα φωτοπολυμερή αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960, όποτε μεταξύ άλλων βρήκαν εφαρμογή σε επιστρώσεις και εκτύπωση δυο διαστάσεων, όπου χρησιμοποιήθηκαν για να δώσουν γυαλιστερή όψη και υφή σε χαρτιά.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 αναπτύχθηκε η μέθοδος της στερεολιθογραφίας SLA από τον Chuck Hall, φέρνοντας την πρώτη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιούσε αυτή την τεχνολογία. Ο Hall πειραματίστηκε με την έκθεση φωτοπολυμερών σε ακτινοβολία μέσω σάρωσης με lasers και παρατήρησε ότι σαρώνοντας το πολυμερές σε στρώσεις μπορούσε να παραχθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Το 1984 ο Chuck Hall έκανε την πρώτη επιτυχημένη κατοχύρωση ευρεσιτεχνίας (29), και ίδρυσε την 3D Systems corporation, η οποία δημιούργησε και τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή, με όνομα SLA 1.

Οι εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού διαθέτουν ένα δοχείο το οποίο κατά την εκτύπωση είναι γεμάτο με ρητίνη σε υγρή μορφή (εικόνα 23). Μέσα στο δοχείο κατεβαίνει το κρεβάτι πάνω στο οποίο θα εκτυπωθεί το αντικείμενο και αρχικά τοποθετείται σε απόσταση μίας στρώσης από τον πάτο της δεξαμενής. Στην αρχή της εκτύπωσης, η πρώτη αυτή στρώση ανάμεσα στο κρεβάτι και τον πάτο της δεξαμενής στερεοποιείται με τη βοήθεια υπεριώδους ακτινοβολίας και κολλάει πάνω στο κρεβάτι. Στη συνέχεια το κρεβάτι μετακινείται κατά μία στρώση προς τα πάνω, ενώ η υγρή ρητίνη γεμίζει το κενό που δημιουργείται μεταξύ της στερεοποιημένης στρώσης και του πάτου του δοχείου. Ακτινοβολία εκπέμπεται ξανά, στερεοποιώντας την επόμενη στρώση, η οποία προσκολλάται στην αμέσως προηγούμενη της. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να συμπληρωθεί όλο το ύψος του αντικειμένου, δίνοντας το τελικό τρισδιάστατο αντικείμενο (30).



Schematic of a bottom-up SLA printer

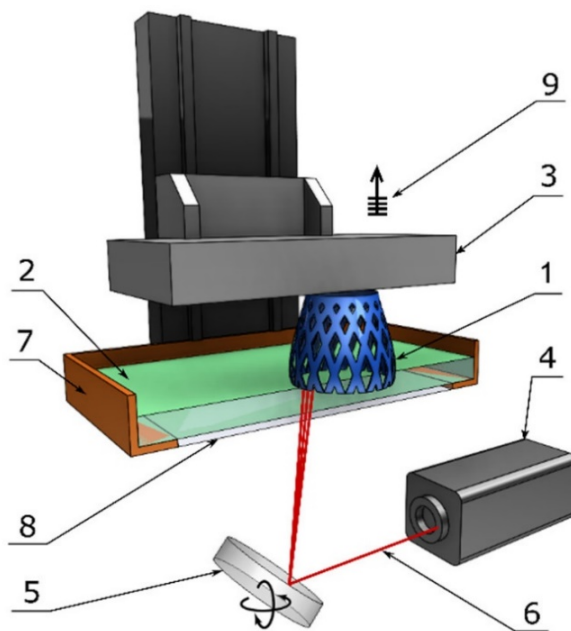
Ο τρόπος με τον οποίο εκπέμπεται η υπεριώδης ακτινοβολία καθώς και η κατεύθυνση κατά την οποία κινείται το κρεβάτι είναι οι βασικοί παράγοντες που διαφοροποιούν μεταξύ τους τις υπομεθόδους της οικογένειας του φωτοπολυμερισμού. Οι τρεις βασικές κατηγορίες (31) είναι:

- SLA οι οποίοι χρησιμοποιούν ακτίνα λέιζερ για να στερεοποιήσουν την κάθε στρώση
- DLP/MSLA που χρησιμοποιούν ορατό φως από προτζέκτορα ή οθόνη lcd αντίστοιχα για την στερεοποίηση των στρώσεων
- CDLP (CLIP) που χρησιμοποιούν ακτίνα λέιζερ και οξυγόνο για να επιτύχουν συνεχόμενη εκτύπωση χωρίς διακριτές στρώσεις

### 3.2 Διαφορές των μεθόδων φωτοπολυμερισμού

#### 3.2.1 Στερεολιθογραφία SLA

Η παλιότερη τεχνολογία εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού είναι η στερεολιθογραφία, πάνω στην οποία είχε βασιστεί και ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής στον κόσμο, ο SLA-1 της 3DSystems corp. Η ταχύτητα τους είναι χαμηλότερη από τις υπόλοιπες μεθόδους, καθώς το αποτύπωμα της κάθε στρώσης του αντικειμένου πρέπει να σαρωθεί από την κινούμενη δέσμη λέιζερ με διάμετρο τυπικά μεταξύ 50 και 150μm, προκειμένου να στερεοποιηθεί. Λόγω της εξαιρετικά μικρής διαμέτρου της δέσμης λέιζερ που χρησιμοποιούν, οι SLA μπορούν να πετύχουν την μεγαλύτερη ανάλυση εκτύπωσης από όλες τις κατηγορίες εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού (32).



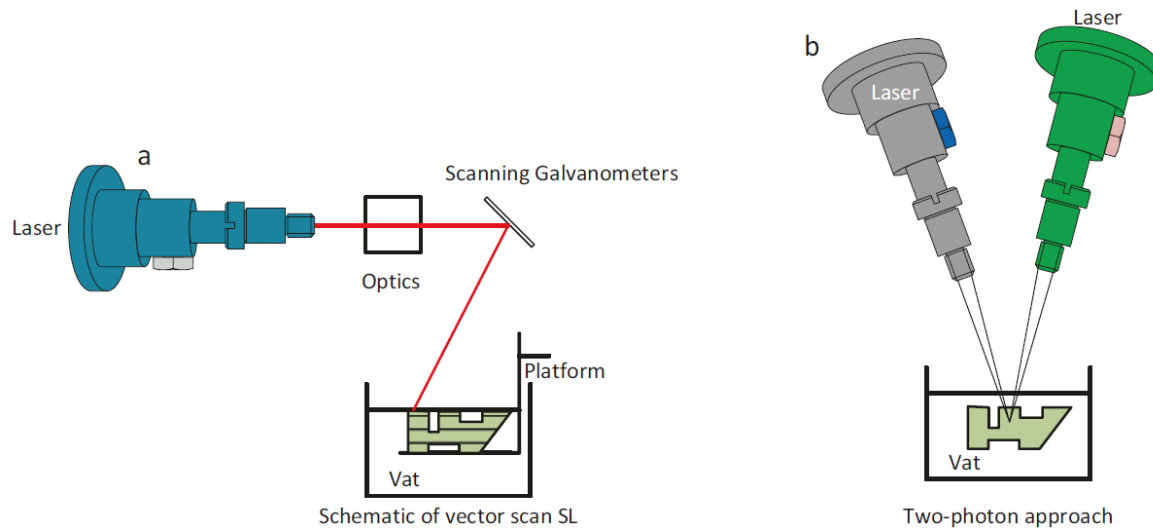
Τα μέρη ενός SLA εκτυπωτή παρουσιάζονται στην εικόνα 24 και αποτελούνται από:

1. Εκτυπωμένο εξάρτημα
2. Υγρή ρητίνη
3. Πλατφόρμα εκτύπωσης (κρεβάτι)
4. Πηγή υπεριώδους λέιζερ
5. Καθρέφτης καθοδήγησης της ακτίνας
6. Ακτίνα λέιζερ
7. Δεξαμενή ρητίνης
8. Διάφανο πάτωμα της δεξαμενής ρητίνης
9. Ανύψωση του αντικειμένου σε στρώσεις

Εικόνα 24 - Μέρη ενός SLA εκτυπωτή – [32]

Ταυτόχρονα δεν παρουσιάζουν προβλήματα παραποίησης (aliasing), κάτι το οποίο συμβαίνει στις μεθόδους που χρησιμοποιούν ορατό φως και θα εξηγηθεί περαιτέρω στη συνέχεια. Η ανάλυση εξαρτάται επίσης από τις προσαυξήσεις  $\Delta x$  και  $\Delta y$  με τις οποίες μετακινείται η δέσμη στο επίπεδο. Το μέγεθος αυτών των προσαυξήσεων παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο με το μέγεθος της δέσμης, καθώς μικρές τιμές είναι απαραίτητες για να εξασφαλίσουν ακρίβεια σε σχήματα κοντά στο μέγεθος της δέσμης. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των SLA είναι ότι η ανάλυση είναι ανεξάρτητη του μεγέθους εκτύπωσης, δίνοντας τους την δυνατότητα να παράγουν αντικείμενα υψηλής ακριβείας ακόμη και σε μεγάλες διαστάσεις. Ένας μοντέρνος SLA εκτυπωτής όπως ο Form 3 της Formlabs μπορεί να πετύχει ακριβή εκτύπωση σε αντικείμενα με χαρακτηριστικά το ελάχιστο 80 $\mu\text{m}$ , το οποίο είναι το μέγεθος ακτίνας της δέσμης του λέιζερ.

Ορισμένοι εκτυπωτές SLA μπορούν να πετύχουν ακόμη υψηλότερες αναλύσεις και ταχύτητες εκτύπωσης χρησιμοποιώντας δυο δέσμες λέιζερ ταυτοχρόνως, τεχνική γνωστή ως προσέγγιση δυο φωτονίων (33) (two photon approach) και απεικονίζεται στην εικόνα 25.



Εικόνα 25 - Διαφορά απλής SLA με TPP SLA - (33)

Σε αυτή την περίπτωση η στερεοποίηση της ρητίνης γίνεται στο σημείο που συναντώνται οι δυο ακτίνες, κάτι το οποίο δίνει την δυνατότητα να επιτευχθούν εξαιρετικά υψηλές αναλύσεις εκτύπωσης. Η ταχύτητα εκτύπωσης αυξάνεται επίσης, καθώς δεν είναι απαραίτητη η μετακίνηση του κρεβατιού κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης προκειμένου να μπαίνει να ρητίνη μετά από κάθε στρώση. Αντιθέτως, το αντικείμενο παραμένει κάτω από τη στάθμη της υγρής ρητίνης καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης. Αυτό είναι δυνατό καθώς οι ακτίνες μπορούν και περνούν μέσα από τη ρητίνη χωρίς να τη στερεοποιούν σε οποιοδήποτε σημείο πέραν αυτού της διασταύρωσης τους. Στο σημείο αυτό ξεπερνιέται η απαραίτητη ενέργεια για τον φωτοπολυμερισμό της ρητίνης. Η ακτίνα μπορεί να θεωρηθεί Γκαουσιανή, με την ένταση της να δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w_0^2)$$

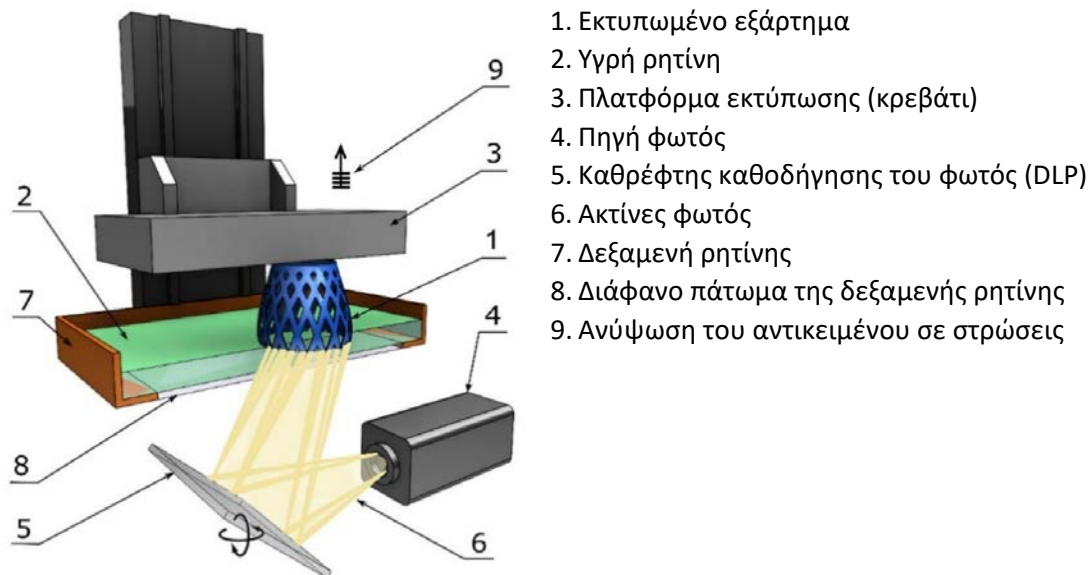
όπου στο σημείο στένωσης της ακτίνας (beam waist) ισχύει  $w_0 = 1$ , στο σημείο εστίασης η ένταση του φωτός  $I_0 = 1$  (αδιάστατη) και  $r$  είναι η απόσταση από το κέντρο της ακτίνας. Η κατανομή της έντασης απεικονίζεται στο γράφημα 3 (34).

Στις περιοχές που η ενέργεια ξεπερνά το όριο πολυμερισμού γίνεται η στερεοποίηση του πολυμερούς. Στην περίπτωση των εκτυπωτών δύο φωτονίων η απαιτούμενη ενέργεια πολυμερισμού είναι υψηλότερη από τους αντίστοιχους του φωτοπολυμερισμού ενός φωτονίου. Επιθυμητό είναι να παραμένουμε όσο πιο κοντά γίνεται σε αυτό το όριο, καθώς έτσι μειώνεται η ακτίνα της περιοχής στερεοποίησης, αυξάνοντας την μέγιστη δυνατή ανάλυση εκτύπωσης. Με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι δυνατόν να επιτευχθούν εκτυπώσεις αντικειμένων μεγέθους μόλις μερικών  $\mu\text{m}$ , με ακριβή αναπαράσταση χαρακτηριστικών της τάξης του  $1\mu\text{m}$ .

### 3.2.2 Στερεοποίηση με ορατό φως

Υπάρχουν δυο κατηγορίες εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού με ορατό φως, οι DLP και οι MSLA. Η διαφορά τους είναι ότι οι DLP χρησιμοποιούν ένα σύστημα προτζέκτορα και φακών για να στερεοποιήσουν το αντικείμενο. Οι MSLA διαθέτουν μια οθόνη LCD η οποία λειτουργεί σαν μάσκα που αφήνει το φως από μια συστοιχία LED που βρίσκεται από πίσω της να πέσει μόνο στις περιοχές της στρώσης που πρέπει να στερεοποιηθούν. (32)

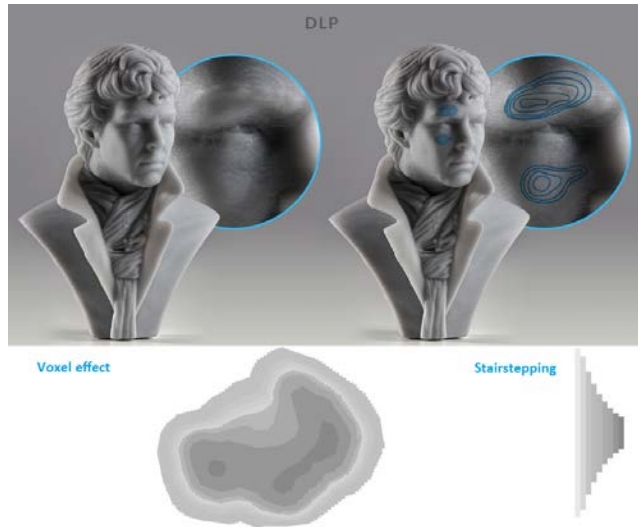
Τα μέρη ενός DLP εκτυπωτή απεικονίζονται στην εικόνα 26:



Εικόνα 26 - Μέρη ενός εκτυπωτή DLP – [32]

Οι εκτυπωτές ορατού φωτός εκθέτουν ολόκληρη την κάθε στρώση του αντικείμενου, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο εκτύπωσης σε σχέση με τους SLA εκτυπωτές. Ως αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητάς τους, η ταχύτητα εκτύπωσης μετράται μόνο στον κατακόρυφο άξονα και ο χρόνος εκτύπωσης εξαρτάται από το πάχος στρώσης και το ύψος του αντικείμενου.

Επειδή η UV ακτινοβολία παράγεται από προτζέκτορα, η ανάλυση X-Y στο επίπεδο εξαρτάται από το μέγεθος των pixels που διαθέτει. Το σχήμα των pixels είναι τετράγωνο, κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει αλλοιώσεις της σχηματιζόμενης επιφάνειας γνωστές ως aliasing, καθώς μια καμπύλη δεν μπορεί να είναι λεία επειδή σχηματίζεται από μύτες διαδοχικών pixels στοιχισμένων σε σειρά στο επίπεδο X-Y. Στο τρισδιάστατο αντικείμενο οι διαδοχικές στρώσεις της εκτύπωσης με τη σειρά τους σχηματίζουν τις καμπύλες επιφάνειες σαν σκαλοπάτια (stair stepping). Αυτά τα δυο φαινόμενα σε συνδυασμό σχηματίζουν το λεγόμενο εφέ Voxel το οποίο κάνει τις καμπύλες επιφάνειες να εμφανίζουν "σκαλοπάτια", όμοια με το πώς απεικονίζονται οι υψομετρικές διαφορές σε ένα τοπογραφικό χάρτη. Η επίπτωση του voxel effect στην ομαλότητα των επιφανειών φαίνεται στην εικόνα 27.



Εικόνα 27 - Εφέ θόξελ και Stairstepping - [35]

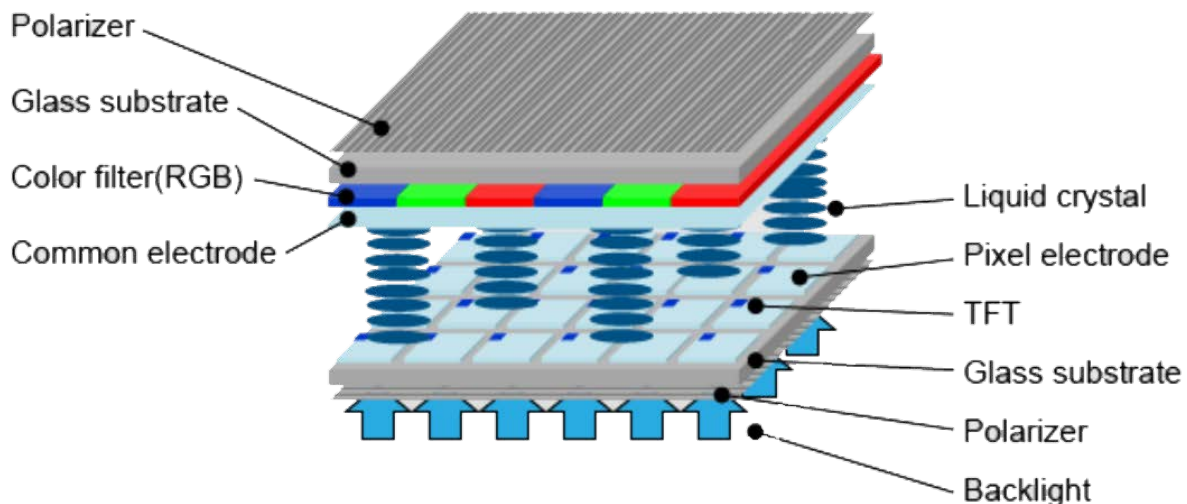
Σε έναν εκτυπωτή DLP η ανάλυση και το μέγεθος εκτύπωσης δεν είναι ανεξάρτητα. Όπως σε έναν κανονικό προτζέκτορα, το μέγεθος των προβαλλόμενων pixels είναι ανάλογο της απόστασης μεταξύ αυτού και της επιφάνειας πάνω στην οποία προβάλλονται. Επειδή στους DLP εκτυπωτές έχουμε μια σταθερή μέγιστη επιφάνεια εκτύπωσης, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις μεταξύ της ανάλυσης και του εμβαδού:

Μήκος άξονα X / Αριθμός pixel του προτζέκτορα στην διεύθυνση X = Εγγενές μέγεθος pixel  
 Μήκος άξονα Y / Αριθμός pixel του προτζέκτορα στην διεύθυνση Y = Εγγενές μέγεθος pixel

Για παράδειγμα έστω ένας DLP εκτυπωτής με προτζέκτορα ανάλυσης 1920 x 1085, προβάλλει δηλαδή συνολικά 2,304 εκατομμύρια pixels, και διαστάσεις επιφάνειας εκτύπωσης 115 x 65 x 155mm. Τότε αν διαιρέσουμε το μήκος X της επιφάνειας = 115mm με την ανάλυση στον X = 1920, θα πάρουμε αποτέλεσμα = 0,0599mm = 59,9μm = Εγγενές μήκος pixel. Ο ίδιος προτζέκτορας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγαλύτερο κρεβάτι, επιτρέποντας μεγαλύτερες εκτυπώσεις αλλά αυξάνοντας το μέγεθος των pixels, περιορίζοντας το πόσο μικρά χαρακτηριστικά μπορούν να παραχθούν με ακρίβεια. Ένας ακόμη τρόπος να αυξηθεί το μέγεθος εκτύπωσης χωρίς να χαθεί ποιότητα είναι να γίνει χρήση προτζέκτορα υψηλότερης ανάλυσης, αυτό ωστόσο αυξάνει το κόστος του μηχανήματος. Για το λόγο αυτό οι DLP εκτυπωτές κατασκευάζονται για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή, με τον κατασκευαστή να κάνει την επιλογή μεταξύ μεγέθους και ποιότητας, ενώ μηχανήματα με μεγάλο μέγεθος εκτύπωσης και υψηλή ανάλυση κοστίζουν σημαντικά περισσότερο. (35)

Οι MSLA εκτυπωτές μοιάζουν πάρα πολύ με τους DLP, με την μοναδική διαφορά να βρίσκεται στον τρόπο εκπομπής ακτινοβολίας. Αντί για στοχευμένη έκθεση με προτζέκτορα, υπεύθυνη για τη στερεοποίηση της ρητίνης είναι μια συστοιχία από led. Το φως που παράγεται στη συνέχεια μπορεί να περάσει μόνο από τα ενεργά pixels μιας LCD οθόνης (εικόνα 28) που λειτουργεί σαν ασπίδα για να καθοδηγήσει το φως στις επιθυμητές περιοχές της κάθε στρώσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κατασκευής καθώς τα lcd panels είναι σημαντικά φθηνότερα από τους DLP προτζέκτορες. Λόγω της απώλειας φακού και καθρέφτη, το μέγεθος των pixels εξαρτάται άμεσα από αυτό της LCD οθόνης, η οποία είναι τοποθετημένη ακριβώς κάτω από δοχείο συγκράτησης της υγρής ρητίνης. Μια οθόνη μπορεί να διαθέτει τον ίδιο αριθμό pixels με μια άλλη αλλά σε μεγαλύτερη επιφάνεια, μεγαλώνοντας τις διαστάσεις του κρεβατιού και ταυτοχρόνως μικραίνοντας την ευκρίνεια της εκτύπωσης.

Η χρήση οθόνης αντί για προτζέκτορα οδηγεί σε μείωση του κόστους του μηχανήματος, έχει ωστόσο μικρότερη διάρκεια ζωής σαν εξάρτημα και θεωρείται αναλώσιμο. Η οθόνη αυτή μπορεί να είναι είτε έγχρωμη, είτε μονοχρωματική. Οι μονοχρωματικές οθόνες δεν διαθέτουν φίλτρο χρώματος, κάτι το οποίο τις επιτρέπει να πετύχουν μεγαλύτερο λόγο επιφάνειας του κάθε pixel που μπορεί να παράγει φως ως προς το συνολικό του εμβαδόν, κάτι αντίστοιχο του λόγου διαφράγματος από ένα φακό κάμερας. Υψηλές τιμές αυτού του λόγου οδηγούν σε μεγάλη φωτεινότητα της οθόνης, κάτι το οποίο στους MSLA εκτυπωτές οδηγεί σε μικρότερους απαιτούμενους χρόνους στερεοποίησης για κάθε στρώση, επιταχύνοντας έτσι την εκτύπωση.



Εικόνα 28 - Μέρη μιας LCD οθόνης MSLA εκτυπωτή - (36)

Η απόδοση μιας οθόνης τυπικά χαρακτηρίζεται από τρεις παράγοντες: την διαπερατότητα, την πόλωση και την ακρίβεια απόχρωσης. Υψηλές τιμές και στα τρία αυτά μεγέθη είναι δύσκολο να επιτευχθούν, στους μονοχρωματικούς εκτυπωτές ωστόσο δεν υφίσταται η απόχρωση, κάτι το οποίο δίνει στους κατασκευαστές την δυνατότητα να βελτιστοποιήσουν τις οθόνες ως προς τα άλλα δυο μεγέθη, αυξάνοντας τις τιμές διαπερατότητας και πόλωσης. Συγκεκριμένα, ένας τυπικός εκτυπωτής με έγχρωμη οθόνη εμφανίζει διαπερατότητα υπεριώδους ακτινοβολίας της τάξης του 1%, ενώ ένας μονοχρωματικός μπορεί να φτάσει έως και περίπου 6%, μειώνοντας έτσι τους χρόνους έκθεσης των στρώσεων κατά

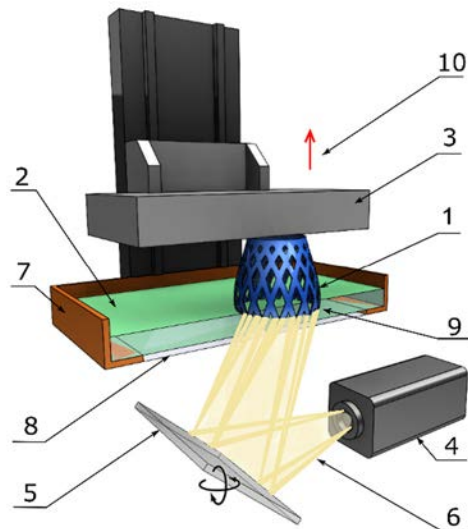


περίπου 4 φορές. Έτσι, ένας εκτυπωτής με μονοχρωματική οθόνη μπορεί να πετύχει χρόνους έκθεσης της τάξης των 2 δευτερολέπτων. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι ο χρόνος έκθεσης εξαρτάται άμεσα από το πάχος στρώσης της εκτύπωσης με πιο χαμηλές αναλύσεις, δηλαδή μεγαλύτερα πάχη στρώσεων, να απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης.

### 3.2.3 Συνεχόμενη εκτύπωση CDLP/CLIP

Στις μεθόδους εκτύπωσης που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής, στο κεφάλαιο της εναπόθεσης υλικού αλλά και στο κεφάλαιο του φωτοπολυμερισμού, κατά την εκτύπωση έχουμε ταυτόχρονη εναπόθεση ή στερεοποίηση υλικού σε δυο άξονες και μόνο μετά την ολοκλήρωση μιας στρώσης γίνεται η κίνηση στον τρίτο άξονα, κάνοντας τους εκτυπωτές που χρησιμοποιούν τις μεθόδους αυτές μηχανήματα 2.5 αξόνων. Εκτυπωτές που πετυχαίνουν συνεχόμενη εκτύπωση χωρίς στρώσεις θεωρούνται μηχανήματα 3 αξόνων.

Η συνεχόμενη εκτύπωση φωτοπολυμερισμού γενικώς ονομάζεται CDLP, επίσης γνωστή ως CLIP (Continuous Liquid Interface Production), ονομασία κατοχυρωμένη από την εταιρία Carbon. Κατά την μέθοδο αυτή, το αντικείμενο δεν παράγεται σε στρώσεις, αλλά κινείται διαρκώς κατά τον κατακόρυφο άξονα, με την στερεοποίηση να γίνεται συνεχόμενα σε μια περιοχή του αντικειμένου κοντά στην πηγή ακτινοβολίας. Για να μπορεί αυτό να είναι δυνατό, το αντικείμενο δεν πρέπει να στερεοποιείται άμεσα πάνω στο διάφανο παράθυρο στον πάτο της δεξαμενής, καθώς θα κολλούσε σε αυτό, κάνοντας την ομαλή συνεχόμενη κίνηση του αδύνατη.



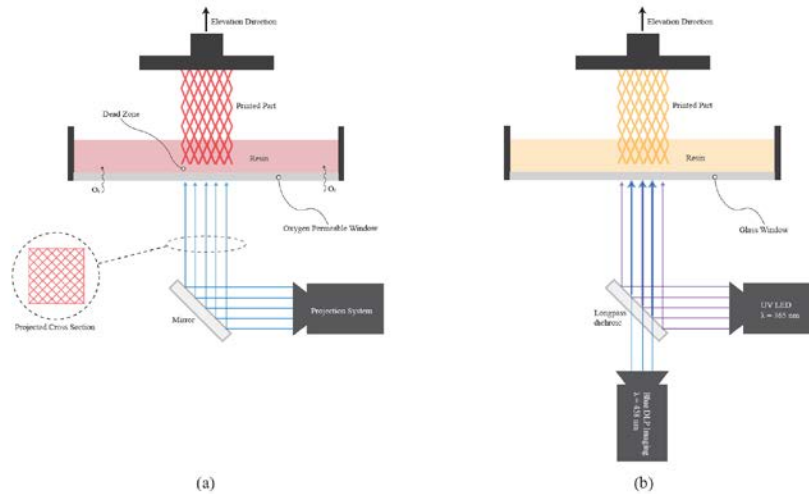
Τα μηχανικά μέρη ενός εκτυπωτή CDLP/CLIP παρουσιάζονται στην εικόνα 29:

1. Εκτυπωμένο εξάρτημα
2. Υγρή ρητίνη
3. Επιφάνεια εκτύπωσης
4. Πηγή φωτός
5. Καθρέφτης καθοδήγησης του φωτός
6. Ακτίνα φωτός
7. Δεξαμενή ρητίνης
8. Πάτωμα της δεξαμενής (διαπερατό από οξυγόνο στην περίπτωση της CLIP)
9. Νεκρή ζώνη
10. Συνεχόμενη ανύψωση του αντικειμένου

Εικόνα 29 - Μέρη ενός CDLP εκτυπωτή – [32]

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί δυο τεχνικές (εικόνα 30) με τις οποίες μπορεί να αποτραπεί η στερεοποίηση του υλικού στον πάτο του δοχείου. Η πρώτη, που εφαρμόστηκε από ερευνητές του πανεπιστημίου του Michigan, χρησιμοποιεί δυο πηγές ακτινοβολίας με διαφορετικό μήκος κύματος, μια η οποία ενεργοποιεί και μια που καταστέλλει τον φωτοπολυμερισμό, πετυχαίνοντας έτσι στοχευμένη

στερεοποίηση του υλικού σε συγκεκριμένο βάθος. Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιείται από την Carbon στους εκτυπωτές CLIP. Στην περίπτωση αυτή ο πάτος του δοχείου είναι φτιαγμένος έτσι ώστε να είναι διαπερατός από οξυγόνο. Κατά την εκτύπωση συνεχόμενη παροχή οξυγόνου εξασφαλίζει την δημιουργία μιας «νεκρής ζώνης», η οποία εξασφαλίζει την απαραίτητη απόσταση από τον πάτο του δοχείου για να αποφευχθεί η προσκόλληση του αντικειμένου (37,38).



Εικόνα 30 - Σύγκριση συνεχόμενης εκτύπωσης με (α) οξυγόνο και (β) ακτινοβολία καταστολής - (38)

### 3.3 Φωτοπολυμερή υλικά

Οι πρώτες ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν στους εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού έγιναν διαθέσιμες το 1989 και ήταν κατασκευασμένες από ακρυλικά. Παρουσίαζαν έντονη αντιδραστικότητα, αλλά παρήγαγαν συνήθως αδύναμα αντικείμενα λόγω προβλημάτων συρρίκνωσης και παραμορφώσεων κατά τη στερεοποίηση. Τα συγκεκριμένα υλικά δεν μπορούσαν να στερεοποιηθούν πάνω από 46% με ένα πέρασμα της δέσμης λέιζερ. Το δεύτερο πέρασμα επηρέαζε και τις ήδη στερεοποιημένες περιοχές, αλλά σε μικρότερο βαθμό από τις υπόλοιπες, δημιουργώντας έτσι τάσεις μέσα στην στρώση και προκαλώντας παραμορφώσεις. Την ίδια περίοδο άρχισαν να εμφανίζονται και οι πρώτες πατέντες για εποξικές ρητίνες, οι οποίες σε αντίθεση με τις ακρυλικές οι οποίες κατά τη στερεοποίηση εμφάνιζαν συρρίκνωση της τάξης του 5-20%, παραμορφωνόντουσαν μόνο κατά 1-2% λόγω του ανοίγματος των αλυσίδων τους κατά τον πολυμερισμό. Πλέον οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται αποτελούν μίξη των δυο ειδών. Είναι κυρίως εποξικές, ενώ έχουν κάποια ακρυλική περιεκτικότητα προκειμένου να μπορούν να έχουν καλή σταθερότητα κατά την εκτύπωση, αλλά και να μειώσουν την ψαθυρότητα των εποξικών ρητινών. (39)

Τα συστατικά των φωτοπολυμερών περιλαμβάνουν φωτοενεργοποιητές, αντιδραστικούς διαλύτες, σταθεροποιητές, και υγρά μονομερή. Κατά των φωτοπολυμερισμό οι φωτοενεργοποιητές υφίστανται μια χημική μεταβολή, γίνονται ενεργοί και συνδέονται με τα μονομερή για να δημιουργήσουν μια αλυσίδα πολυμερών, προκαλώντας τη στερεοποίηση του υλικού. Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες φωτοπολυμερών ως προς την χημική τους σύσταση:

- Ακρυλικά - φωτοπολυμερισμού ελεύθερων ριζών
- Εποξικά και βινυλαιθέρες – κατιονικού πολυμερισμού



Οι κατασκευαστές τυπικά δημιουργούν μίξεις έτοιμες για χρήση σε εκτυπωτές, οι οποίες περιέχουν ολιγομερή, μονομερή, φωτοενεργοποιητές καθώς και διάφορες προσμίξεις οι οποίες τροποποιούν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να πετύχουμε ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων στις ρητίνες, τόσο όσον αφορά τις μηχανικές, όσο και τις θερμικές και χημικές ιδιότητες τους. Μέσα στις διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνονται ρητίνες που παρουσιάζουν ιδιότητες όμοιες με αυτές που βρίσκονται στα υλικά των FDM εκτυπωτών. Συγκεκριμένα μπορούμε να έχουμε:

- Απλή ρητίνη
- Διάφανη ρητίνη
- Σκληρή ρητίνη (ομοιότητες με ABS)
- Ανθεκτική ρητίνη (ομοιότητες με PP)
- Ρητίνη αντοχής υψηλών θερμοκρασιών
- Ελαστική ρητίνη (ομοιότητες με TPU)
- Ενισχυμένη με σωματίδια ρητίνη (π.χ. GFRP/CFRP)
- Βιοσυμβατή ρητίνη ιατρικής χρήσης
- Ρητίνη για καλούπια

Οι μηχανικές ιδιότητες (32) της απλής ρητίνης γενικής χρήσης καθώς και ρητίνης πρωτοτύπων παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Στην ενότητα 9 γίνεται επαλήθευση των μηχανικών ιδιοτήτων της απλής ρητίνης μέσω δοκιμών εφελκυσμού σε δοκίμια κατά ASTM D638.

Πίνακας 3 - Μηχανικές ιδιότητες απλής ρητίνης - (32)

Properties	Standard				
	Standard (Grayscale, Clear, Colors)		Draft Resin		
	Green <sup>1</sup>	Postcured <sup>2</sup>	Green <sup>3</sup>	Postcured at Room Temperature <sup>4</sup>	Postcured at 60 °C <sup>5</sup>
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	23 MPa	28 MPa	36 MPa
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	0.9 GPa	1.3 GPa	1.6 GPa
Elongation at Failure	12%	6.2%	17%	10%	7%
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	0.6 GPa	0.9 GPa	1.5 GPa
Flexural Stress at Break	-	-	-	-	-
Impact Properties					
Notched Izod	16 J/m	25 J/m	35 J/m	35 J/m	21 J/m
Temperature Properties					
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C	43.3 °C	44.3 °C	50.1 °C
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C	50.6 °C	50.7 °C	63.4 °C

<sup>1</sup> Data was obtained from green parts, printed using a Form 2, 100 μm, clear settings, without additional treatments. <sup>2</sup> Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 μm, clear settings, and postcured with 1.25 mW/cm<sup>2</sup> of 405 nm LED light for 60 min at 60 °C. <sup>3</sup> Data was obtained from green parts, printed using a Form 2, 300 μm, draft resin settings, washed for 5 min in Form Wash, and air-dried without a postcure. <sup>4</sup> Data was obtained from parts printed using a Form 2, 300 μm, draft resin settings, and postcured with Form Cure at room temperature for 5 min. <sup>5</sup> Data was obtained from parts printed using a Form 2, 300 μm, draft resin settings, and postcured with Form Cure at 60 °C for 5 min.

Ως “green”, αναφέρονται τα δοκίμια που δεν έχουν υποστεί κανένα είδος επεξεργασίας μετά την εκτύπωση, ενώ ως “postcured” αναφέρονται τα δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί την διαδικασία σκλήρυνσης για ενίσχυση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Τα δοκίμια διατήρησαν την μηχανική τους

αντοχή στα 264psi μέχρι τους 43 βαθμούς κελσίου πριν και 58 βαθμούς κελσίου μετά την διαδικασία σκλήρυνσης. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό της απλής ρητίνης είναι αρχικά σχετικά μικρή με τιμή 38Mpa, αυξάνεται ωστόσο σημαντικά με την διαδικασία σκλήρυνσης, καταλήγοντας στα 65Mpa, τιμή η οποία είναι εξίσου μεγάλη με αυτή που παρουσιάζουν κάποια από τα πιο ανθεκτικά σε εφελκυσμό θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται στους FDM εκτυπωτές. Η αντοχή σε κρούση είναι ωστόσο αρκετά χαμηλή με τιμές 16J/m και 25J/m πριν και μετά την διαδικασία σκλήρυνσης της απλής ρητίνης. Συγκριτικά, ένα από τα πιο ψαθυρά υλικά που χρησιμοποιούνται στους FDM εκτυπωτές, το καθαρό PLA, παρουσιάζει επίσης αντοχή σε εφελκυσμό γύρω στα 65Mpa και αντοχή του σε κρούση είναι γύρω στα 15J/m όταν το δοκίμιο είναι κατασκευασμένο από διαμόρφωση με έγχυση και συνεπώς πλήρως ισότροπο. (40)

Οι διάφορες τεχνικές ρητίνες που είναι διαθέσιμες στην αγορά προσφέρουν μηχανικές ιδιότητες διαφορετικές σε μεγάλο βαθμό από μια απλή ρητίνη. Συγκεκριμένα, μια ρητίνη με υψηλή αντοχή σε κρούση (ανθεκτική ρητίνη) μπορεί να κυμανθεί κοντά στα 130J/m στο τεστ κρούσης IZOD με εγκοπή. Μια σκληρή ρητίνη υψηλής αντοχής μπορεί να φτάσει τα 75Mpa στην δοκιμή εφελκυσμού μετά την διαδικασία σκλήρυνσης, ενώ μια ρητίνη υψηλών θερμοκρασιών μπορεί τυπικά να διατηρεί την μηχανική της αντοχή μέχρι τους 150 βαθμούς κελσίου, ενώ μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες άνω των 220 βαθμών κελσίου εφόσον έχει υποστεί θερμική επεξεργασία ανόπτησης.

### 3.4 Εφαρμογές της μεθόδου φωτοπολυμερισμού

Όλες οι παραπάνω κατηγορίες εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού μπορούν να παράγουν αντικείμενα με εξαιρετικά υψηλή ποιότητα επιφανειών και διαστασιακή ακρίβεια. Συγκριτικά με έναν FDM εκτυπωτή ο οποίος τυπικά έχει ευδιάκριτες στρώσεις πάχους 0.1-0.3mm, ένας εκτυπωτής φωτοπολυμερισμού τυπικά χρησιμοποιεί πάχος στρώσης 0.025-0.1mm, κάτι το οποίο οδηγεί στην δημιουργία αντικειμένων με εξαιρετικά λείες επιφάνειες. Η υψηλή αυτή διαστασιακή ακρίβεια σε συνδυασμό με χαμηλές παραμορφώσεις κατά την εκτύπωση και μεγάλες ταχύτητες κάνει τους εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού κατάλληλους για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Χαρακτηριστική εφαρμογή του φωτοπολυμερισμού αποτελεί η χρήση του στην οδοντιατρική. Η εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια σε συνδυασμό με την ταχύτητα και την πληθώρα βιοσυμβατών υλικών που προσφέρουν οι εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού έχει οδηγήσει στην ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας στον τομέα. Βασικό εργαλείο για την θεραπεία στην οδοντιατρική αποτελεί η κατασκευή διαγνωστικών εκμαγείων, τα οποία είναι αποτυπώματα του εσωτερικού του στόματος του ασθενούς. Παραδοσιακά η κατασκευή τους είναι χρονοβόρα, και απαιτεί την χρήση αποτυπωτικών υλικών όπως σιλικόνες. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά με τη χρήση 3D-Scanning του στόματος του ασθενή. Στη συνέχεια το εκμαγείο μπορεί να παραχθεί σε εκτυπωτή φωτοπολυμερισμού με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα.

Πάνω στα εκμαγεία μπορούν επίσης να υπάρχουν οδηγοί χειρουργείου, εμφυτευμάτων και στεφάνων. Πέρα από την έμμεση χρήση της τεχνολογίας για εκμαγεία, η εκτύπωση φωτοπολυμερισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή γεφυρών, επένθετων εμφράξεων και θηκών. Μία ακόμη άμεση εφαρμογή εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού είναι η παραγωγή εξατομικευμένων οδοντοστοιχιών, ναρθήκων λεύκανσης και βρουξισμού, καθώς και προστατευτικών ναρθήκων (εικόνα 31) για αθλητές οι

οποίοι έχουν υψηλές πιθανότητες να δεχτούν κάποιο χτύπημα στην οδοντοστοιχία στο αγωνιστικό τους περιβάλλον. (41)



Εικόνα 31 - Προστατευτικοί νάρθηκες (αριστερά), Οδηγοί χειρουργείου (δεξιά) - (41)

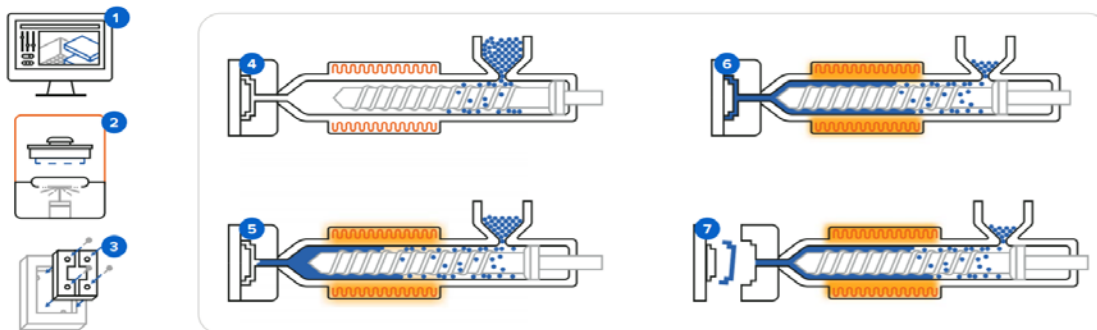
Η δυνατότητα της μεθόδου του φωτοπολυμερισμού να παράγει εξαιρετικά περίπλοκες γεωμετρίες με ακρίβεια και ταχύτητα έχει δώσει στους κατασκευαστές την δυνατότητα να παράγουν εξατομικευμένα προϊόντα τα οποία δεν ήταν εφικτά με παραδοσιακές μεθόδους. Στον τομέα του αθλητισμού εταιρίες έχουν ξεκινήσει να προσφέρουν εξατομικευμένο εξοπλισμό υψηλών επιδόσεων. Η εταιρία αθλητικών ειδών New Balance, σε συνεργασία με την Formlabs σχεδίασε και παρήγαγε ένα ζευγάρι αθλητικών παπουτσιών με την μέθοδο LFS (Low force Stereolithography), η οποία είναι μια τεχνική SLA εκτύπωσης με ονομασία κατοχυρωμένη από την Formlabs. Με τον τρόπο αυτό κατάφερε να επιτευχθεί η βέλτιστη κατανομή πίεσης κατά μήκος της σόλας του παπουτσιού, κρατώντας ταυτόχρονα το παπούτσι ελαφρύ. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε έχει την δυνατότητα να επιστρέφει μεγάλο ποσοστό της ενέργειας που ξοδεύεται κατά τη συμπίεση του, και αντέχει να παραμορφωθεί 330% προτού αστοχήσει. Η χρήση τρισδιάστατης εκτύπωσης επίσης έδωσε την δυνατότητα να γίνει η παραγωγή των παπουτσιών εξ' ολοκλήρου στις ΗΠΑ, μειώνοντας σημαντικά το κόστος παραγωγής. Η εταιρία Adidas έχει πλέον παρουσιάσει δυο ζευγάρια τρισδιάστατα εκτυπωμένων παπουτσιών, τα Futurecraft 4D και τα 4DFWD, τα οποία έχουν κατασκευαστεί σε συνεργασία με την εταιρία Carbon, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία CLIP. Και τα δυο προϊόντα προσφέρουν εξατομικευμένες σόλες με σύνθετη πλεγματική γεωμετρία που προσφέρει μεγάλο ποσοστό επαναφοράς ενέργειας, ενώ τα 4DFWD σύμφωνα με τον κατασκευαστή μπορούν και μετακινούν το πέλμα του αθλητή προς τα μπροστά με κάθε βήμα λόγω της κλίσης του πλέγματος που διαθέτουν, δίνοντας ένα έτσι ένα υπολογίσιμο ανταγωνιστικό προβάδισμα. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των παπουτσιών είναι το EPU 41 της Carbon, το οποίο εμφανίζει εντυπωσιακές μηχανικές ιδιότητες σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών με τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του να βρίσκεται στους -10 βαθμούς κελσίου. Το υλικό αυτό ενώ είναι ελαστικό με σκληρότητα 73A και αντοχή σε απόσχιση 20kN/m, ενώ μπορεί να παραμορφωθεί 250% προτού αστοχήσει και επαναφέρει το 30% της ενέργειας μετά την παραμόρφωση, βελτιώνοντας τις αθλητικές επιδόσεις.

Στη βιομηχανία αρχίζει να εμφανίζεται και η χρήση της μεθόδου του φωτοπολυμερισμού για την κατασκευή καλουπιών (εικόνα 32). Οι παραδοσιακές μέθοδοι παραγωγής καλουπιών από μέταλλο είναι χρονοβόρες, απαιτούν εξειδικευμένους τεχνίτες, και έχουν πολύ υψηλό κόστος. Ως αποτέλεσμα,

συνοδεύονται από ρίσκο μη απόσβεσης της αρχικής επένδυσης εάν το προϊόν δεν έχει τελικά την αναμενόμενη ζήτηση καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους πρέπει να πληρωθεί στα πρώτα στάδια της παραγωγής για την δημιουργία του καλούπιού. Με τις μεθόδους του φωτοπολυμερισμού, ο κατασκευαστής έχει την δυνατότητα να παράγει τα καλούπια απευθείας στον εκτυπωτή. Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται σημαντικά η διαδικασία της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, καθώς τυχών λάθη ή διαφορές που παρουσιάζονται στο χυτό αντικείμενο συγκριτικά με το αρχικό σχέδιο μπορούν εύκολα να γίνουν αντιληπτές και να διορθωθούν γρήγορα. Επίσης δίνεται η δυνατότητα να γίνουν πολλές περισσότερες δοκιμές από σχέδια που δεν είναι προφανές εάν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σωστά μέχρι να παραχθεί το τεμάχιο, καθώς το κόστος παραγωγής πολλαπλών πρωτοτύπων παύει να είναι απαγορευτικό. Βλέπουμε δηλαδή ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι μπορούν να προβούν εξαιρετικά χρήσιμες τόσο για rapid tooling όσο και για rapid prototyping.

### PROCESS WORKFLOW

#### INJECTION MOLDING PROCESS WITH 3D PRINTED MOLDS



- 1 Mold design 2 Mold 3D printing 3 Mold assembly 4 Mold clamping 5 Injection 6 Cooling 7 Demolding

Εικόνα 32 - Διαδικασία injection molding με εκτυπωμένα καλούπια - (42)

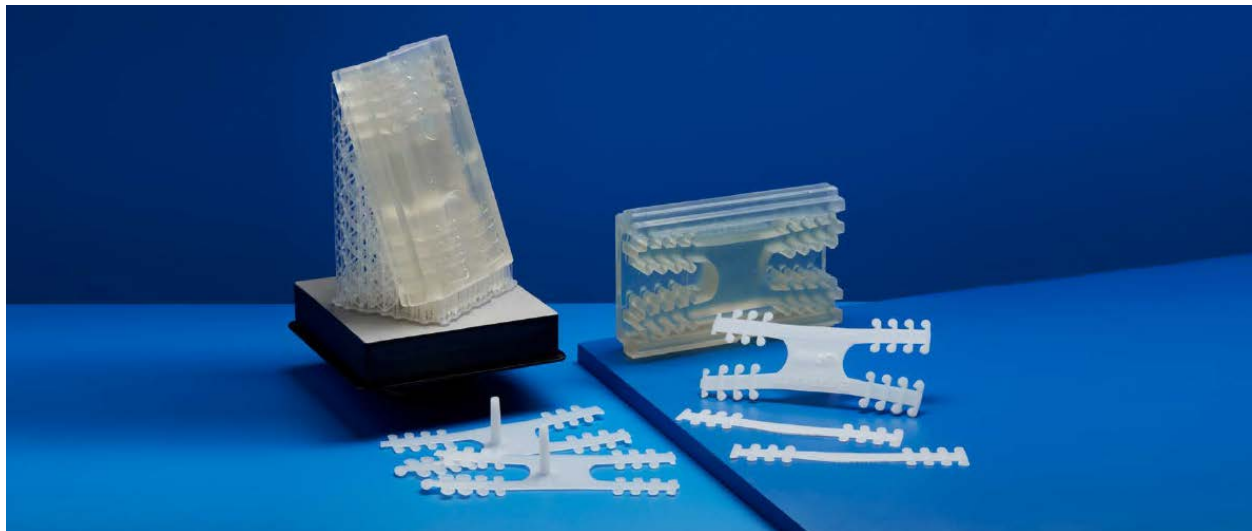
Η εισαγωγή πολλών ρητινών υψηλών θερμοκρασιών στην αγορά, καθώς και η ολοένα αυξανόμενη διαθεσιμότητα εκτυπωτών με μεγάλο όγκο εκτύπωσης έχουν κάνει πλέον δυνατή τη χρήση εκτυπωμένων καλούπιων και για παραγωγή μικρών παρτίδων τελικών προϊόντων. Η Formlabs έχει αναπτύξει την δική της ρητίνη υψηλών θερμοκρασιών, με θερμοκρασία εκτροπής θερμότητας τους  $238^{\circ}\text{C}$  @  $0.45\text{ MPa}$ . Μπορεί δηλαδή και διατηρεί με ευκολία την μηχανική της αντοχή μέσα στο εύρος θερμοκρασιών που κυμαίνεται ένα καλούπι κατά την διαμόρφωση με έγχυση, το οποίο τυπικά δεν ξεπερνά τους  $100^{\circ}\text{C}$  για την διαμόρφωση πολυαιθυλενίου, το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή θερμοπλαστικά για χύτευση.

Η εταιρία Braskem παρήγαγε χιλιάδες πλαστικά λουριά για μάσκες μέσα σε μια εβδομάδα χρησιμοποιώντας καλούπια (εικόνα 33) εκτυπωμένα από ρητίνη υψηλών θερμοκρασιών. Η ευελιξία της παραγωγής καλούπιων με φωτοπολυμερισμό έκανε δυνατή την γρήγορη και φθηνή βελτιστοποίηση του σχεδίου, ανεβάζοντας την αντοχή του από τους 500 στους 2500 κύκλους μέσα σε τρεις επαναλήψεις (πίνακας 4), (43)

Πίνακας 4 - Βήματα κατά το σχεδιασμό εκτυπωμένων καλουπιών – (43)

Έκδοση καλουπιού	1	2	3
<b>Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού</b>	Αύξηση κλίσης κάθετων τοιχωμάτων	Αύξηση κλίσης κάθετων τοιχωμάτων Μεγέθυνση πύλης	Προσθήκη γωνιών Μεγέθυνση πύλης Προσθήκη μεγάλων αεραγωγών Μείωση διατομής
<b>Αποτελέσματα</b>	500 κύκλοι	1500 κύκλοι	2500 κύκλοι Εξάλειψη αλλοιώσεων στο χώρισμα του καλουπιού 28% εξοικονόμηση υλικού

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αριθμοί θα ήταν μειωμένοι για κάποιο καλούπι με πιο περίπλοκη γεωμετρία, παραμένουν ωστόσο ξεκάθαρη ένδειξη των δυνατοτήτων της προσθετικής παραγωγής ως μέθοδο παρασκευής καλουπιών χαμηλού κόστους.



Εικόνα 33 - Καλούπι εκτυπωμένο από ρητίνη υψηλών θερμοκρασιών και λουριά από πολυαιθυλένιο - (43)

Συνολικά, η εταιρία δήλωσε ότι κατάφερε να παράγει 4 λουριά το λεπτό χρησιμοποιώντας δυο καλούπια ταυτοχρόνως, επιτυγχάνοντας έτσι 90-94% εξοικονόμηση χρόνου και 80-97% χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με εναλλακτικές μεθόδους. Το συνολικό εγχείρημα κατάφερε να φτάσει από τη σύλληψη στην παραγωγή σε μόλις μια εβδομάδα.

Πίνακας 5 - Σύγκριση χρόνου και κόστους διαφορετικών μεθόδων παραγωγής – (43)

	Άμεση 3D εκτύπωση	Χύτευση με έγχυση με αγορασμένα μεταλλικά καλούπια	Χύτευση με έγχυση με εκτυπωμένα πλαστικά καλούπια
<b>Εξοπλισμός</b>	Εκτυπωτής FDM	Μηχανή χύτευσης με έγχυση Πολυπροπυλένιο	Εκτυπωτής Form 3 Ρητίνη υψηλών θερμοκρασιών Μηχανή χύτευσης με έγχυση Πολυπροπυλένιο
<b>Χρόνος παραγωγής καλουπιού</b>	Μηδέν	30 Μέρες	1 Μέρα
<b>Κόστος παραγωγής καλουπιού</b>	Μηδέν	\$10.000-15.000	\$200
<b>Συνολικός χρόνος παραγωγής</b>	72 ημέρες (13 λεπτά / λουρί)	32 ημέρες	3 ημέρες
<b>Συνολικό κόστος παραγωγής (κατασκευή καλουπιού και παραγωγή 8000 λουριών)</b>	\$2080	\$10.160-15.160	\$360

Στον πίνακα 5 βλέπουμε ότι τα συγκεκριμένα αντικείμενα θα μπορούσαν να παραχθούν και άμεσα από έναν FDM εκτυπωτή με σχετικά χαμηλό κόστος, ο χρόνος ωστόσο που θα χρειαζόταν για την ολοκλήρωση της παραγωγής 8000 τεμαχίων είναι απαγορευτικός, με την ταχύτητα στα 13 λεπτά ανά λουρί να απαιτεί 72 ημέρες. Η παραγωγή των τεμαχίων με διαμόρφωση με έγχυση θα χρειαζόταν 30 ημέρες για την παραγωγή του καλουπιού, ενώ η παραγωγή των τεμαχίων μπορεί να ολοκληρωθεί σε μόλις 2 ημέρες, δίνοντας ένα συνολικό χρόνο παραγωγής 32 ημερών. Το κόστος απόκτησης του καλουπιού σε μέταλλο από εξωτερική ανάθεση είναι εξαιρετικά υψηλό, με την τιμή του να κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15 χιλιάδων δολαρίων. Τέλος, ο συνδυασμός προσθετικής παραγωγής με διαμόρφωση με έγχυση κάνοντας χρήση εκτυπωμένων καλουπιών ρητίνης είναι με διαφορά ο βέλτιστος, με την διάρκεια της παραγωγής συμπεριλαμβάνοντας τον χρόνο κατασκευής του καλουπιού να είναι μόλις τρεις μέρες, ενώ το συνολικό κόστος είναι επίσης με διαφορά το ελάχιστο στα 360 δολάρια.

Πέρα από αυτές που αναφέρθηκαν, οι βιομηχανικές εφαρμογές του φωτοπολυμερισμού είναι πολυάριθμες και δεν θα μπορούσαν να αναφερθούν όλες σε βάθος στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Στον πίνακα 6 απεικονίζονται μερικά ακόμη χαρακτηριστικά παραδείγματα. (32)



Πίνακας 6 - Εφαρμογές φωτοπολυμερισμού - (32)

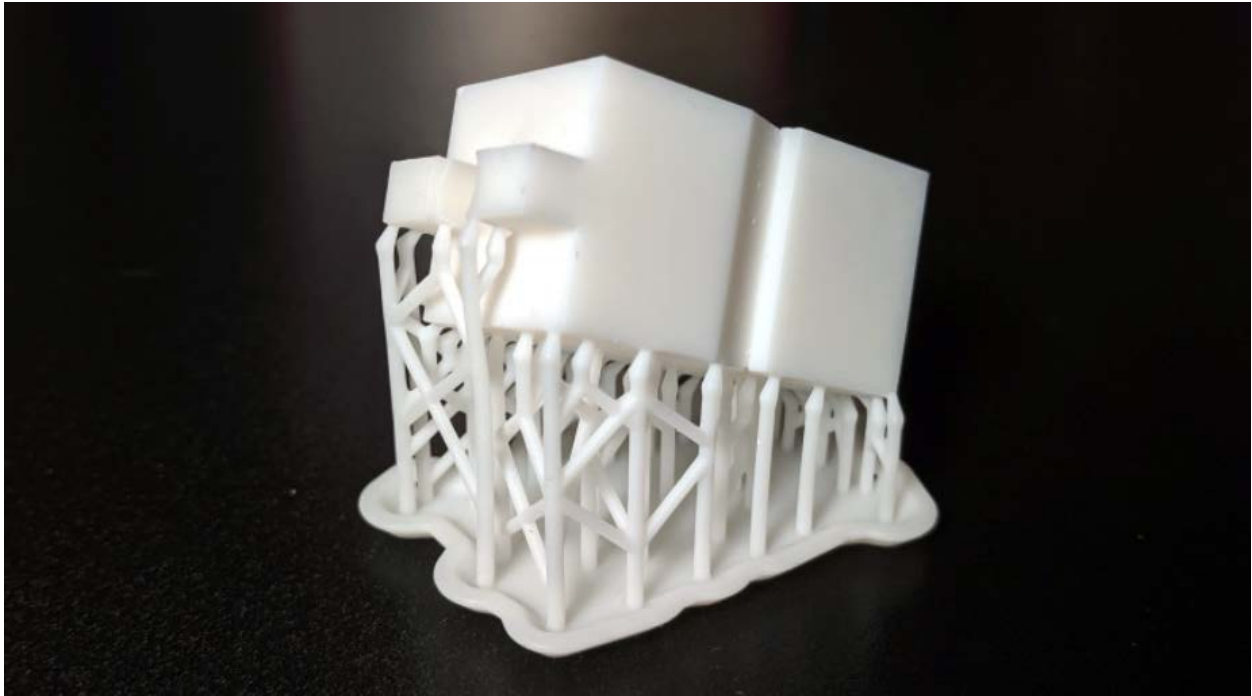
Scale	Application	Material	Machine	Technology	Note
cm	Football helmet liner	Polyurethane elastomer (EPU40)	Carbon M2	CDLP	Helmet liner constructed with 140,000 interconnected struts for impact attenuating purpose.
cm	Shoe soles (orthotics/aesthetics)	Polyurethane elastomer (EPU40)	Carbon M2	-/Digital Light Synthesis (DLS)	Customized shoe soles for orthotics/shoe soles from lattice structures for optimal usage and aesthetics.
mm	Artificial ears	-	Roland ARM-10	Stereolithography	Ear reconstruction based on 3D scans from patients.
mm	Hearing aids	Light-cured acrylic resin	-	-	Customized hearing aid shells from 3D scanned ear canals.
mm	Sampling swabs	Surgical Guide Resin	FormLabs Form 3/Carbon M2	CDLP	Sampling swabs with plastic heads for collecting efficiency and comfort.
mm	Jewelry	Castable wax resin	Form 3, Form 3L	Low force stereolithography (LFS)	Detailed jewelry designs are 3D-printed for investment casting.
mm	Scaffolds for cells	Accura SI10	Scanlabs	2PL	Scaffolds work as living cell encapsulators.
μm	Microneedles	Photopolymer	Nanoscribe GT	2PL	Mosquito-like microneedles.
μm	Probes for atomic force microscopy	Resist (IP-Dip)	Photonic Professional GT	2PL	Printing tips can be carbonized by utilizing a pyrolysis process.
mm/μm	Flexible electronics	Silicon elastomers with nanosilica/ Conductive and dielectric elastomeric materials	-	-	Soft sensors, actuators, and robots to improve human-machine interactions. Strain sensors embedded into a glove shape.
mm/μm	Smart composites	Viscoelastic inks	-	-	Porous, elastomeric architectures with a programmable Poisson ratio and mechanical properties utilizing the ordered arrangement of sub-millimeter struts.
mm/μm	Superhydrophobic objects	Inks	-	DLP	Objects with special surface structures that are utilized for self-cleaning, drag reduction, increased buoyancy, and air-conditioning applications.
mm/μm	Living tissue structures	Bioinks	-	-	Small-scale, simplified liver, kidney, or lung tissue, mimicking their natural counterparts.
mm/μm	4D-printed actuators	Liquid crystalline polymers (LCPs)	-	-	Stimuli-responsive liquid crystalline elastomeric structures. The printing process prescribes a reversible shape-morphing behavior, offering a new paradigm for active polymer system preparation.
μm	Tomographic 3D printing (fabrication of advanced and functional constructs)	Photopolymer	-	DLP	Object is simultaneously solidified by irradiating a liquid photopolymer volume from multiple angles with dynamic light patterns.
nm	3D nanoprinting	Photopolymer	-	Electron/X-ray lithography	Multiphoton polymer cross-linking evolves as the core process behind high-resolution additive microfabrication with soft materials for implantable/wearable electronics, tissue engineering, microrobotics, biosensing, drug delivery, etc.

### 3.5 Περιορισμοί της μεθόδου φωτοπολυμερισμού

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου του φωτοπολυμερισμού αποτελεί η αναγκαστική χρήση φωτοπολυμερών, υλικά τα οποία περιορίζονται κυρίως σε ακρυλικά και εποξικά. Τα υλικά αυτά δεν μπορούν να φτάσουν την αντοχή των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στην χύτευση με έγχυση, με βασικό περιορισμό την ψαθυρότητα που παρουσιάζουν. Βασικό πρόβλημα επίσης αποτελεί το γεγονός ότι τα φωτοπολυμερή γερνάνε με το χρόνο, οδηγώντας σε εκφυλισμένες μηχανικές ιδιότητες. Ο βασικός λόγος είναι ότι τα φωτοπολυμερή συνεχίζουν και επηρεάζονται από την υπεριώδη ακτινοβολία ακόμη και μετά την διαδικασία στερεοποίησης τους, καθιστώντας αναγκαία την βαφή οποιουδήποτε αντικειμένου πρόκειται να εκτίθεται συχνά στην ακτινοβολία του ηλίου.

Τυπικά επίσης χρειάζεται μεγάλος αριθμός στηρίξεων (44) (εικόνα 34), τόσο για περίπλοκες όσο και για απλές γεωμετρίες. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αντίθεση με τους εκτυπωτές FDM, στους εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού ακόμη και ένα αντικείμενο με μια μεγάλη επίπεδη βάση δεν ενδείκνυται να τοποθετηθεί πατώντας άμεσα στο κρεβάτι καθώς οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά την στερεοποίηση

ενδέχεται να προκαλέσουν ζημιά στο μηχάνημα. Ως αποτέλεσμα αυξάνεται και η χρήση υλικού, κάτι το οποίο αυξάνει και το κόστος παραγωγής.



Εικόνα 34 - Απλή γεωμετρία τυπώνεται κεκλιμένη και με στηρίξεις σε έναν εκτυπωτή φωτοπολυμερισμού - (44)

Η ανάγκη αυτή διάταξης των αντικειμένων υπό γωνία και η χρήση στηρίξεων περιορίζουν επίσης τον διαθέσιμο χώρο εκτύπωσης. Αυτό μπορεί να αποτελέσει γρήγορα πρόβλημα σε περίπτωση που χρειάζεται να τυπωθούν πολλά τεμάχια ταυτοχρόνως, καθώς οι περισσότεροι εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού προσφέρουν μικρό όγκο εκτύπωσης συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Μεγάλοι εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού αρχίζουν και εμφανίζονται σε μεγαλύτερους αριθμούς στην αγορά, αλλά το κόστος τους παραμένει υψηλό. Το κόστος των ρητινών είναι επίσης τυπικά υψηλότερο συγκριτικά με πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε άλλες μεθόδους προσθετικής παραγωγής όπως η FDM.

Η διαδικασία παραγωγής αντικειμένων με έναν εκτυπωτή φωτοπολυμερισμού απαιτεί εκτεταμένη χρήση αναλώσιμων, καθώς και χρονοβόρα διαδικασία καθαρισμού μετά την ολοκλήρωση της, συνοδευόμενη από την διαδικασία σκλήρυνσης. Το τυπωμένο αντικείμενο πρέπει να πλυθεί προκειμένου να απομακρυνθούν τα υπολείμματα μη στερεοποιημένης ρητίνης που έχουν μείνει πάνω του, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά εγκαύματα σε περίπτωση επαφής με το δέρμα. Η διαδικασία πλυσίματος ανάλογα με τη ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να γίνει με νερό, ή να απαιτεί χρήση χημικών όπως η ισοπροπυλική αλκοόλη. Επιπροσθέτως, πρέπει να αφαιρεθεί η εναπομένουσα ρητίνη από το δοχείο του εκτυπωτή προκειμένου να μην έρθει σε επαφή με ακτινοβολία και αρχίσει να στερεοποιείται. Προσοχή επίσης πρέπει να ληφθεί καθ' όλη τη διάρκεια της μετεπεξεργασίας του αντικειμένου προκειμένου να μην εισπνέονται τυχόν αναθυμιάσεις ρητίνης ή διαλυτικών χημικών. Λόγω της αναγκαιότητας όλων αυτών των επιπρόσθετων βημάτων, η διαδικασία παραγωγής ενός αντικειμένου επιβραδύνεται σημαντικά, καθιστώντας μη πρακτική την πραγματοποίηση μικρών εκτυπώσεων που δεν αξιοποιούν σε μεγάλο βαθμό τον διαθέσιμο όγκο εκτύπωσης.

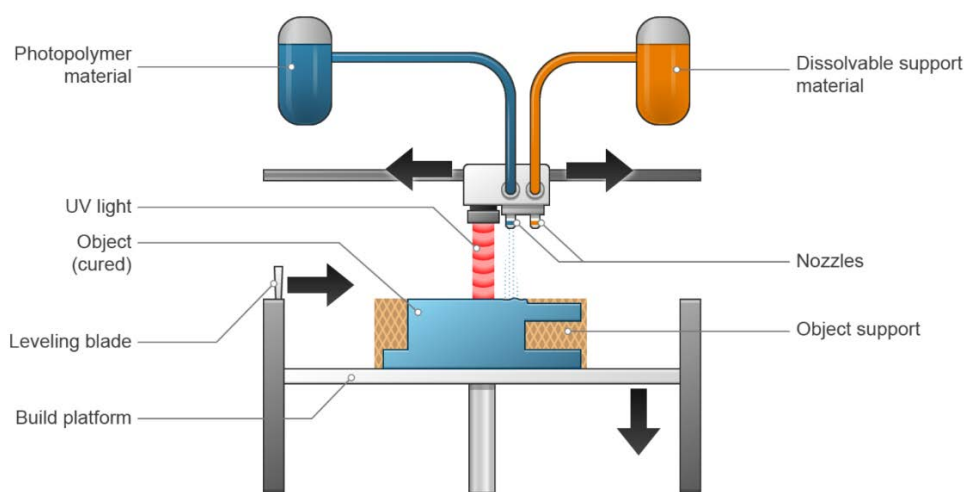
### 3.5 Μελλοντική έρευνα

Στην περίπτωση των εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι η διαχείριση αποβλήτων και η μείωση του χρόνου προετοιμασίας και μετεπεξεργασίας. Σε αντίθεση με τα στερεά θερμοπλαστικά τα οποία μπορούν να συλλεχθούν και να ανακυκλωθούν (ή να βιοδιασπαστούν στην περίπτωση του PLA), τα φωτοπολυμερή βρίσκονται σε υγρή μορφή, και κατά την διαδικασία της μετεπεξεργασίας καταλήγουν να ξεπλένονται με νερό και να καταλήγουν στη θάλασσα. Η μόνη τρέχουσα εναλλακτική είναι η συλλογή του υγρού διαλύματος ρητίνης που συλλέγεται μετά την εκτύπωση και η έκθεση του σε υπεριώδη ακτινοβολία με σκοπό τη στερεοποίηση της, ακολουθούμενη από φιλτράρισμα των στερεών κόκκων οι οποίοι στη συνέχεια πετιούνται. Θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικό οι κατασκευαστές να εστιάσουν στην ανάπτυξη μηχανισμών αυτόματου πλυσίματος και ανακύκλωσης του χρησιμοποιημένου φωτοπολυμερούς εντός των μηχανημάτων, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεθόδου.

## Ενότητα 4 – Material Jetting (Ψεκασμός Υλικού)

### 4.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η εκτύπωση δυο διαστάσεων με ψεκασμό υλικού (inkjet printing) υπάρχει από την δεκαετία του 1960 και χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Την δεκαετία του 1980 εμφανίστηκαν οι πρώτες καταχωρήσεις ευρεσιτεχνίας για την χρήση ψεκασμού υλικού ως μέθοδος εκτύπωσης αντικειμένων τριών διαστάσεων. Η τεχνολογία αναφέρθηκε ως «Ballistic Additive Manufacturing», με την πρώτη επιτυχημένη εμπορική της εφαρμογή να είναι το μηχάνημα ModelMaker της εταιρίας Prototype. Ανταγωνιστικά μηχανήματα εμφανίστηκαν μέσα στα επόμενα 5 χρόνια, τα οποία επίσης χρησιμοποιούσαν την ίδια τεχνική ψεκασμού ζεσταμένου θερμοπλαστικού κεριού σε υγρή μορφή, γεγονός το οποίο τα έθετε ακατάλληλα για οποιαδήποτε εφαρμογή πέραν από εκτύπωση πρωτοτύπων και καλουπιών για χύτευση. Στις αρχές του 2000 εμφανίστηκαν τα πρώτα μηχανήματα που χρησιμοποιούσαν φωτοπολυμερή ως πρώτη ύλη, στα οποία σταγόνες από μονομερή σε υγρή μορφή ψεκάζονται και στη συνέχεια εκτίθενται σε υπεριώδη ακτινοβολία προκειμένου να πολυμεριστούν και να έρθουν σε στερεή μορφή. Το πρώτο μηχάνημα που χρησιμοποιούσε αυτή την τεχνική ήταν ο Quadra της Objet Geometries το 2000, ο οποίος κατά την εκτύπωση ψέκαζε φωτοπολυμερή υλικά από κεφαλές εκτύπωσης που περιείχαν παραπάνω από 1500 ακροφύσια. Την δεκαετία του 2010 εμφανίστηκαν πολλαπλές τεχνολογίες που επιτρέπουν την εκτύπωση με ψεκασμό πολυμερών ενισχυμένων με νανοσωματίδια μεταλλικών ή κεραμικών υλικών. Η εταιρία XJet έχει αναπτύξει μηχανήματα που χρησιμοποιούν διαλύματα για την εναπόθεση νανοσωματιδίων, με κατοχυρωμένο όνομα NPJ, nanoparticle jetting (45). Στα μηχανήματα αυτά η εκτύπωση λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες κρεβατιού (περίπου 250°C). Κατά την πρόσκρουση του στο κρεβάτι, το υγρό διάλυμα εξατμίζεται και παραμένει μόνο μια μικρή ποσότητα η οποία κρατάει στη θέση τους τα νανοσωματίδια, η οποία στερεοποιείται με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας. Τα εξαρτήματα στη συνέχεια πρέπει να περάσουν από τη διαδικασία της σύντηξης (sintering) για να αποκτήσουν την μηχανική τους αντοχή.



2018 © Dassault Systèmes

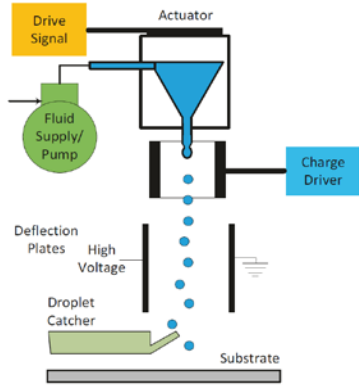
Εικόνα 35 - Λειτουργία ενός εκτυπωτή MJ - (9)

Οι περισσότεροι σύγχρονοι εκτυπωτές Material Jetting (MJ) χρησιμοποιούν ένα σύστημα πολλαπλών κεφαλών ψεκασμού και εναποθέτουν στρώσεις υλικού σε υγρή μορφή με μεγάλη ακρίβεια, οι οποίες στη συνέχεια στερεοποιούνται με χρήση UV ακτινοβολίας. Τα μέρη ενός τυπικού MJ εκτυπωτή απεικονίζονται στην εικόνα 35. Η ύπαρξη πολλαπλών κεφαλών ψεκασμού, καθώς και ο μεγάλος αριθμός ακροφυσίων της κάθε κεφαλής κάνει δυνατή την εξαιρετικά γρήγορη κάλυψη μιας στρώσης υλικού, καθώς και την εκτύπωση με πολλαπλά υλικά. Η μηχανική διάταξη των εκτυπωτών ψεκασμού υλικού παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή των εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού, έχοντας ωστόσο κάποιες βασικές διαφορές. Στην περίπτωση των εκτυπωτών φωτοπολυμερισμού, το αντικείμενο είναι βυθισμένο μέσα σε κάποιο φωτοπολυμερές και γίνεται στοχευμένη έκθεση σε ακτινοβολία. Στο MJ το υλικό εναποτίθεται μόνο εκεί που χρειάζεται, και στερεοποιείται με ακτινοβολία επιτόπου. Τυχών σπινθήρες τυπώνονται ταυτοχρόνως με το αντικείμενο, και συνήθως κατασκευάζονται από υδατοδιαλυτό υλικό, εξασφαλίζοντας έτσι την εύκολη αφαίρεση του μετά το τέλος της εκτύπωσης. Το υλικό ψεκάζεται πάνω στο κρεβάτι, το οποίο μετά την στερεοποίηση της τρέχουσας στρώσης κατεβαίνει κατά απόσταση ίση με την επιθυμητή κατακόρυφη ανάλυση εκτύπωσης. Στη συνέχεια η επιφάνεια του αντικειμένου ισιώνεται με μια λεπίδα προτού γίνει η εναπόθεσή της επόμενης στρώσης, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η παραγωγή του αντικειμένου. Ο ψεκασμός του υλικού μπορεί να γίνεται είτε συνεχόμενα, Continuous modes (CS), είτε διακοπτόμενα, διαδικασία γνωστή ως Drop on Demand (DOD). Πέρα από τις δυο υποκατηγορίες ψεκασμού CS και DOD υπάρχει και μια ακόμη υπομέθοδος που εντάσσεται στην κατηγορία του MJ, η προσθετική παραγωγή με κρύο ψεκασμό. Η συγκεκριμένη τεχνική θα αναφέρεται ως CSAM (cold spray additive manufacturing). Σε αυτή την μέθοδο δεν υφίσταται σχηματισμός σταγόνων, θεωρείται ωστόσο υπομέθοδος MJ γιατί τα υλικά συμπιέζονται και ψεκάζονται με υψηλή ταχύτητα πάνω στο κρεβάτι για να γίνει ο σχηματισμός του αντικειμένου.

## 4.2 Τρόποι ψεκασμού

### 4.2.1 Material Jetting συνεχόμενου ψεκασμού

Στην περίπτωση του συνεχόμενου ψεκασμού υπάρχει μια σταθερή εφαρμογή πίεσης στο δοχείο του υλικού, προκαλώντας την συνεχόμενη έξοδο του από το ακροφύσιο. Μετά την έξοδο του το υλικό σπάει σε σταγόνες λόγω της αστάθειας Rayleigh, ενώ σε μερικά συστήματα ο διαχωρισμός διευκολύνεται μέσω δονήσεων ή μετατονισμού του ψεκασμού σε κάποια σταθερή συχνότητα κοντά σε αυτή του φυσικού διαχωρισμού των σταγόνων. Επειδή η παραγωγή των σταγόνων είναι συνεχόμενη, ο έλεγχος της εναπόθεσης τους πρέπει να γίνει αφότου έχουν βγει από τα ακροφύσια. Για να επιτευχθεί αυτό περνούν πρώτα μέσα από ένα πεδίο φόρτισης και αποκτούν ηλεκτροστατικό φορτίο. Στη συνέχεια περνούν μέσα από ένα πεδίο εκτροπής, το οποίο είτε τις στέλνει σε ένα δοχείο ανακύκλωσης είτε σε κάποια τοποθεσία πάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης (46). Ο μηχανισμός ψεκασμού ενός συστήματος CS φαίνεται στην εικόνα 36.

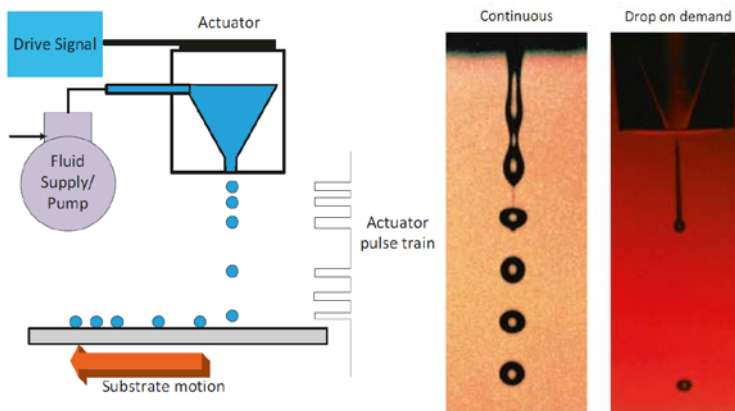


Εικόνα 36 - MJ συνεχόμενου ψεκασμού - (46)

Τα συστήματα συνεχόμενου ψεκασμού που είναι διαθέσιμα στην αγορά τυπικά σχηματίζουν σταγόνες διαμέτρου περίπου 150μm σε συχνότητα 80-100kHz, υπάρχουν ωστόσο αναφορές συστημάτων με διάμετρο σταγόνων από 6μm έως 1mm και συχνότητες μέχρι και 1Mhz.

#### 4.2.2 Material Jetting διακοπτόμενου ψεκασμού

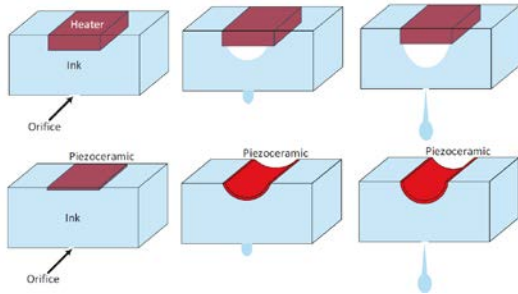
Στην περίπτωση της εκτύπωσης με διακοπτόμενο ψεκασμό (DOD), μεμονωμένες σταγόνες παράγονται μόνο σε συγκεκριμένες στιγμές που εφαρμόζονται παλμοί πίεσης (εικόνα 37). Οι παλμοί αυτοί μπορεί να προκαλούνται από θερμικούς, ηλεκτροστατικούς, πιεζοηλεκτρικούς, ακουστικούς, ή και άλλα είδη ενεργοποιητών. Ο τρόπος λειτουργίας των θερμικών και πιεζοηλεκτρικών απεικονίζεται στην εικόνα 38.



Εικόνα 37 - MJ διακοπτόμενου ψεκασμού (αριστερά), σχηματισμός σταγόνων κατά το συνεχόμενο και διακοπτόμενο ψεκασμό αντίστοιχα (δεξιά) - (46)

Οι θερμικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούν έναν αντιστάτη για να θερμάνουν το υγρό υλικό μέσα στο δοχείο, προκαλώντας το σχηματισμό φυσαλίδων. Η διόγκωση αυτών των φυσαλίδων προκαλεί αύξηση της πίεσης και ωθεί το υγρό να εξέλθει από το ακροφύσιο. Οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές προκαλούν την παραμόρφωση ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, μειώνοντας τον όγκο του δοχείου και αυξάνοντας την πίεση. Ο έλεγχος των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, χρησιμοποιώντας από απλά θετικά τετράγωνα κύματα, μέχρι σύνθετα θετικά-αρνητικά κύματα με μεταβαλλόμενο πλάτος και συχνότητα, παράμετροι οι οποίες μπορούν να ρυθμίζονται διαρκώς προκειμένου να παραχθούν οι σταγόνες με τον βέλτιστο τρόπο (33).

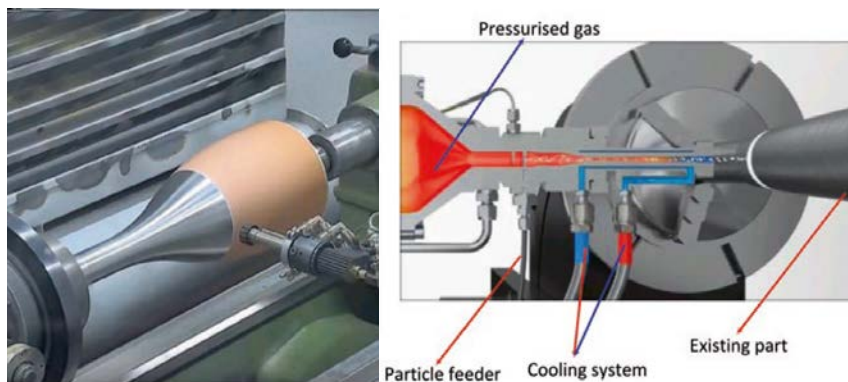




Εικόνα 38 - Θερμικοί (πάνω) και πιεζοηλεκτρικοί (κάτω) ενεργοποιητές - (33)

#### 4.2.3 Material Jetting κρούς ψεκασμού CSAM

Στην εκτύπωση CSAM όπως προαναφέρθηκε το υλικό εκτοξεύεται με ταχύτητα πάνω στο κρεβάτι χωρίς τον σχηματισμό σταγόνων. Το υλικό αποτελείται από μικρά σωματίδια σε μορφή σκόνης, και επιταχύνεται από κάποιο συμπιεσμένο αέριο. Το αέριο αυτό, που συνήθως είναι ήλιο ή άζωτο και βρίσκεται σε πίεση 70bar και θερμοκρασία 1100°C, αναπτύσσει υψηλές ταχύτητες κατά την έξοδο και εκτοξεύει τα σωματίδια. Ο μηχανισμός εκτόξευσης των σωματιδίων παρουσιάζεται στην εικόνα 39. Κατά την εκτύπωση η πρώτη ύλη δεν λιώνει, αλλά ενώνεται καθαρά λόγω έντονης πλαστικής παραμόρφωσης. Τα σωματίδια παραμορφώνονται από την σύγκρουση και ενώνονται με την επιφάνεια, καθώς και μεταξύ τους, σχηματίζοντας μια στρώση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την εφαρμογή πολλών στρώσεων μέχρι να σχηματιστεί το επιθυμητό πάχος εναπόθεσης του υλικού (47).



Εικόνα 39 - Λειτουργία CSAM - (47)

Το ελάχιστο μέγεθος του σημείου εναπόθεσης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό στις μεθόδους σύντηξης σκόνης (Powder Bed Fusion), αλλά είναι ωστόσο κοντά σε αυτό μερικών διεργασιών άμεσης εναπόθεσης ενέργειας (Direct Energy Deposition), και δεν δημιουργεί θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη κατά την εκτύπωση, ελαχιστοποιώντας τις παραμένουσες τάσεις στο αντικείμενο και εξαλείφοντας την ανάγκη για προστατευτική ατμόσφαιρα. Η εταιρία SPEED3D χρησιμοποιεί την τεχνολογία CSAM για να παράγει μεταλλικά εξαρτήματα σε εξαιρετικά μικρούς χρόνους εκτύπωσης και χαμηλό κόστος. Τα μηχανήματα της εταιρίας εκτοξεύουν μεταλλικά σωματίδια με ταχύτητα σχεδόν τριπλάσια της ταχύτητας του ήχου στον αέρα (1000m/s). Στην εικόνα 40 βλέπουμε ένα τελικό προϊόν που έχει κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου με CSAM και πρόκειται για ένα εναλλάκτη θερμότητας πολλαπλών υλικών, με βάση από χαλκό και πτερύγια από αλουμίνιο. Με τον τρόπο αυτό η εταιρία καταφέρει να βελτιστοποιήσει τις επιδόσεις και το κόστος ταυτοχρόνως.

Πέρα από την κατασκευή εξαρτημάτων, η μέθοδος CSAM συχνά χρησιμοποιείται και για την εναπόθεση υλικού πάνω σε ήδη υπάρχοντα αντικείμενα, είτε για τροποποίηση της γεωμετρίας τους είτε για εφαρμογή κάποιας προστατευτικής επίστρωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής προστατευτικής επίστρωσης αποτελεί η εναπόθεση ενός φιλμ από κεραμικό υλικό πάνω σε εξαρτήματα που πρέπει να λειτουργήσουν υπό πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όπως τα πτερύγια μιας τουρμπίνας.

### 4.3 Υλικά που χρησιμοποιούνται στο Material Jetting

Οι βασικές κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται στο MJ είναι:

- Πολυμερή
- Μέταλλα
- Κεραμικά

#### 4.3.1 Πολυμερή

Στο MJ έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοπλαστικά (thermoplastics), όπως κερί αλλά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή (thermosets), όπως φωτοπολυμερή σε υγρή μορφή. Τα συστήματα εκτύπωσης ψεκασμού θερμοπλαστικών χρησιμοποιούν θερμότητα για να λιώσουν το υλικό, αυξάνοντας την θερμοκρασία του μέχρι να φτάσει σε επίπεδο τέτοιο ώστε να μπορεί επιτυχώς να ψεκαστεί μέσα από ένα ακροφύσιο και να σχηματίσει σταγονίδια. Ομάδες ερευνητών όπως οι Reis et al. και Feng et al. πειραματίστηκαν με διεργασίες ψεκασμού κεριών διαφόρων ειδών (48).

Από τις έρευνες αυτές προσδιορίστηκε ότι παράμετροι όπως η ταχύτητα της κεφαλής εκτύπωσης, η ταχύτητα ψεκασμού και η συχνότητα εναπόθεσης σταγονιδίων επηρεάζουν την ποιότητα εναπόθεσης. Οι κατασκευαστές εμπορικών μηχανημάτων MJ θερμοπλαστικών χρησιμοποιούν ειδικά μίγματα κεριών και πολυμερών ώστε να πετύχουν τις κατάλληλες ιδιότητες κατά τις συνθήκες εκτύπωσης. Αντιστοίχως, έχουν κατασκευαστεί θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή τα οποία αποτελούν αναμίξεις μονομερών, διαλυτών και φωτοενεργοποιητών (49). Ένα παράδειγμα αντικειμένου παρασκευασμένου με MJ πολυμερών απεικονίζεται στην εικόνα 40.



Εικόνα 40 - Γρανάζι από κερί - (48)

#### 4.3.2 Κεραμικά

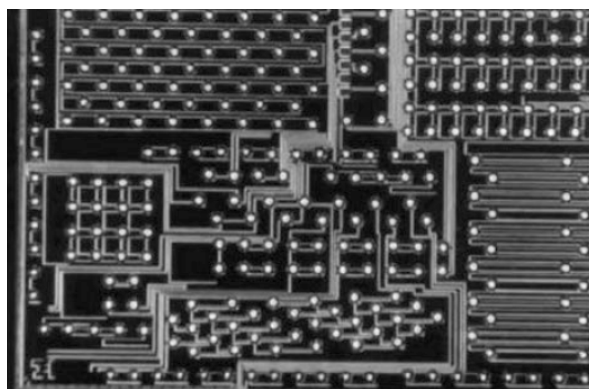
Πολύ σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία του MJ αποτέλεσε η ενσωμάτωση κεραμικών σωματιδίων, όπως αλουμίνα και ζirkόνια μέσα σε πολυμερή, επιτρέποντας έτσι τον ψεκασμό τους. Μελέτες έχουν δείξει ότι η εναπόθεση πολυμερών με έως και 40% περιεκτικότητα σε στερεά είναι δυνατή σε ιξώδη 2.9-38cP, σε θερμοκρασία 100°C, με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις να οδηγούν σε απαγορευτικά υψηλά ιξώδη. Η συγκεκριμένη μέθοδος εναπόθεσης οδηγεί σε ένα τελικό προϊόν το οποίο είναι μερικώς κεραμικό και συνεπώς απαιτείται να γίνει μετεπεξεργασία πυροσυσσωμάτωσης. Οι C. AINSLEY et al. με αυτή τη τεχνική εκτύπωσαν μια κεραμική προπέλα από αλουμίνα (Οξείδιο του αργιλίου). Το τελικό προϊόν (εικόνα 41) ήταν 80% συμπαγές, και παρουσίασε συρρίκνωση 18% (50).



Εικόνα 41 - Προπέλα από αλουμίνα - (50)

#### 4.3.3 Μέταλλα

Πολλαπλά μέταλλα έχουν καταφέρει να τυπωθούν με MJ, συμπεριλαμβάνοντας χαλκό, αλουμίνιο, κασσίτερο, υδράργυρο και μέταλλα συγκόλλησης. Πολλά από τα παραπάνω μέταλλα έχουν θερμοκρασίες τήξης υπερβολικά υψηλή, πράγμα που καθιστά την εκτύπωση τους χωρίς την πρόκληση μόνιμης ζημιάς στον εκτυπωτή ιδιαίτερα δύσκολη. Αυτή η δυσκολία είναι περιορισμένη κατά την εκτύπωση με μέταλλο συγκόλλησης (solder), λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του. Οι Liu & Orme παρουσίασαν εφαρμογές της εκτύπωσης μετάλλων στην βιομηχανία ηλεκτρονικών, στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχηματισμό των ιχνών σε πλακέτες (εικόνα 42), (51).



Εικόνα 42 - Εκτυπωμένη πλακέτα - (51)

Οι Orme et al. εφάρμοσαν μια μέθοδο εκτύπωσης MJ χρησιμοποιώντας Rose's metal, το οποίο είναι ένα κράμα μόλυβδου, κασσίτερου και βισμούθιου, και κατάφεραν να επιτύχουν βαθμό πορώδους μόλις 0.03% χωρίς καθόλου μετεπεξεργασία (52).

Έρευνα επίσης έχει γίνει πάνω στην εναπόθεση αλουμινίου. Σε μία περίπτωση ερευνητές χρησιμοποίησαν παλμούς πίεσης αέριου αργού για να εκτοξεύσουν σταγονίδια λιωμένου αλουμινίου 750°C με ένα ρυθμό 1-5 σταγόνων το δευτερόλεπτο, πάνω σε μια επιφάνεια 300°C. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε χρήση ακροφυσίου 0.3mm, το οποίο οδήγησε σε εναπόθεση γραμμής πλάτους 1mm και πάχους 0.17mm και ένα τελικό προϊόν με πυκνότητα που άγγιζε το 92% (53).

Στην περίπτωση του CSAM, ο περιορισμός των υλικών είναι ότι πρέπει να μπορούν να βρίσκονται σε μορφή σκόνης οι κόκκοι της οποίας να μπορούν να ενωθούν κατόπιν πλαστικών παραμορφώσεων. Ως αποτέλεσμα οι πρώτες ύλες αυτού του είδους MJ εκτυπωτών ποικίλλουν σημαντικά και περιλαμβάνουν μέταλλα όπως μπρούτζο, χαλκό και αλουμίνιο, πολυμερή η και σύνθετα υλικά.

Βλέπουμε ότι όπως και στην ενότητα του φωτοπολυμερισμού, έτσι και στο MJ, οι πρώτες ύλες δεν μπορούν να χαρακτηριστούν λεπτομερώς όπως έγινε στην ενότητα FDM, καθώς αποτελούν ειδικές μίξεις πολλών συστατικών και συνήθως δεν έχουν καθιερωμένες ονομασίες.

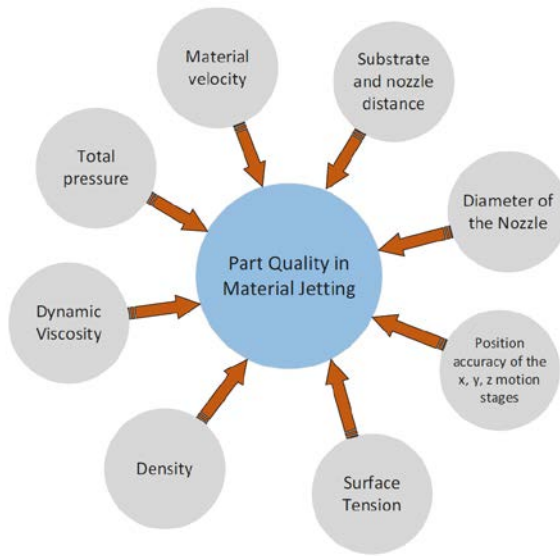
#### 4.4 Εφαρμογές της μεθόδου

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο των υλικών, το MJ στην πιο απλή μορφή του μπορεί να χρησιμοποιήσει θερμοπλαστικά κεριά ή φωτοπολυμερή ως πρώτη ύλη. Η εκτύπωση με χρήση κεριών γίνεται με την τεχνική DOD και εφαρμόζεται κυρίως για την παραγωγή πρωτοτύπων και καλουπιών υψηλής διαστατικής ακρίβειας. Τα καλούπια αυτά στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορα είδη έγχυσης, η ακόμη και να επικαλυφθούν με κάποιο άλλο υλικό το οποίο τους δίνει τις επιθυμητές ιδιότητες ώστε να λειτουργήσουν σαν τελικό εξάρτημα. Χαρακτηριστική εφαρμογή αυτής της τεχνικής αποτελεί η βιομηχανία κοσμημάτων, όπου η εξαιρετική ακρίβεια του MJ είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παραγωγή εξαιρετικά λεπτομερών καλουπιών.

Η χρήση των φωτοπολυμερών στο MJ είναι αντίστοιχη με αυτή που έχουν στους εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού με δοχείο ρητίνης. Οι πολλαπλές κεφαλές ψεκασμού επιτρέπουν την χρήση πολλαπλών υλικών κατά την εκτύπωση, δίνοντας την δυνατότητα παραγωγής σύνθετων αντικειμένων με ιδιαίτερα υψηλή ταχύτητα και εξαιρετική ακρίβεια. Επιπροσθέτως, όπως αναφέρθηκε στην παρουσίαση της μεθόδου, είναι δυνατή η χρήση υδατοδιαλυτών φωτοπολυμερών ως υλικό στήριξης κατά την εκτύπωση. Η χρήση τέτοιων υλικών για στηρίξεις επιτρέπει την τοποθέτηση τους σε σημεία από τα οποία δεν θα μπορούσαν να αφαιρεθούν με μετεπεξεργασία οι παραδοσιακές στηρίξεις και συνεπώς δίνει την δυνατότητα παραγωγής εξαιρετικά περίπλοκων γεωμετριών χωρίς καμία δυσκολία. Όπως και στους εκτυπωτές φωτοπολυμερισμού, έτσι και για το MJ υπάρχουν διαθέσιμα προηγμένα φωτοπολυμερή υψηλών αντοχών σε φορτία, κρούση, θερμοκρασίες κτλ., χωρίς ωστόσο να μπορούν να συναγωνιστούν την αντοχή ενός μεταλλικού ή κεραμικού εξαρτήματος. Συνεπώς, με τα φωτοπολυμερή υλικά χωρίς προσθήκες στερεών σωματιδίων μπορούμε να παράγουμε οποιοδήποτε τελικό προϊόν δεν χρειάζεται να παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές μηχανικές ή θερμικές αντοχές. Η δυνατότητα του MJ να τυπώνει με πολλαπλά υλικά ή πολλά χρώματα ταυτοχρόνως την έχει ξεχωρίσει από τον απλό φωτοπολυμερισμό και έχει δημιουργήσει εφαρμογές στον τομέα της ιατρικής, όπου μπορούν να παράγονται λεπτομερή μοντέλα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

## 4.5 Περιορισμοί της μεθόδου

Η εξασφάλιση της επιτυχημένης εκτύπωσης με υψηλή ποιότητα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (εικόνα 43) οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και οδηγούν σε σημαντικές διαφορές ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει το δυναμικό ιξώδες του ρευστού, καθώς από αυτό εξαρτάται άμεσα η δυνατότητα του υλικού να δημιουργήσει σταγόνες κατά τον ψεκασμό.



Εικόνα 43 - Παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα εκτύπωσης στο MJ - (33)

Για να μπορέσει ένα υλικό να σχηματίσει σταγόνες ώστε να μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία της εκτύπωσης είναι απαραίτητο η ενέργεια που δίνεται στο υλικό από το σύστημα ψεκασμού να είναι αρκετή να εξισορροπήσει την κινητική ενέργεια, την ενέργεια επιφάνειας, καθώς και τις απώλειες ροής. Οι απώλειες ροής οφείλονται στην μετατροπή κινητικής ενέργειας σε θερμική λόγω του ιξώδους του υγρού. Στην πορεία του υγρού από την δεξαμενή μέχρι το ακροφύσιο, η κίνηση του μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστα νευτώνεια ρευστά. Υποθέτοντας ότι η ροή είναι σταθερή, ασυμπίεστη, στρωτή, πλήρως ανεπτυγμένη, και γίνεται μέσω ενός ίσιου κυλινδρικού σωλήνα σταθερής διατομής, οι πτώσεις πίεσης λόγω των κύριων απωλειών δίνονται από τον νόμο Hagen-Poiseuille:

$$\Delta P = \frac{8Q\mu l}{\pi r^4}$$

όπου:

Q είναι η παροχή του υλικού, r η ακτίνα του σωλήνα και μ το ιξώδες του υλικού στην θερμοκρασία ψεκασμού.

Πολλές έρευνες έχουν γίνει πάνω στις συνθήκες που χρειάζεται να πληρούνται για την επιτυχημένη εκτύπωση ενός ρευστού. Πολλαπλοί ερευνητές έχουν προσδιορίσει ότι ένας συνδυασμός των

αδιάστατων αριθμών Weber και Reynolds μπορεί να δώσει μια πολύ καλή ένδειξη για την δυνατότητα ενός ρευστού να εκτυπωθεί με ψεκασμό. Οι αριθμοί Re και We ορίζονται ως:

$$Re = \frac{\rho v r}{\mu} \quad \text{και} \quad We = \frac{\rho v^2 r}{\gamma}$$

Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι εάν ο λόγος του αριθμού Re ως προς την τετραγωνική ρίζα του We έχει τιμή μεταξύ 1 και 10, τότε υπάρχει υψηλή πιθανότητα ο ψεκασμός του υλικού να είναι επιτυχής. Ο λόγος αυτός έχει αναφερθεί ως “printing indicator” (33), δηλαδή δείκτης εκτυπωσιμότητας σε ελεύθερη μετάφραση. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι ο εν λόγω δείκτης έχει καθοδηγητικό ρόλο, και δεν αποτελεί νόμο.

Printing Indicator: 
$$1 \leq \frac{Re}{We^{\frac{1}{2}}} = \frac{\sqrt{\rho r \gamma}}{\mu} \leq 10$$

Η αποτελεσματική χρήση σύνθετων υλικών στο MJ βλέπουμε ότι παρουσιάζει δυσκολίες, και έτσι η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για εκτύπωση απλών φωτοπολυμερών. Οι μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων τεμαχίων από φωτοπολυμερή δεν είναι ιδιαίτερα καλές, καθώς οι ρητίνες είναι συνήθως ψαθυρές, και έτσι αντικείμενα κατασκευασμένα με MJ εκτυπωτές με συμβατικά φωτοπολυμερή χωρίς προθήκες συνήθως δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν λειτουργία υπό μεγάλες ή απότομες φορτίσεις. Αυτός ο περιορισμός δεν έχει επιτρέψει στην μέθοδο να υιοθετηθεί ευρέως για μηχανολογικές εφαρμογές, χωρίς αυτό όμως να σημαίνει ότι δεν έχει και πάλι μεγάλο πλήθος εφαρμογών στη βιομηχανία.

#### 4.6 Μελλοντική έρευνα

Οι εκτυπωτές ψεκασμού υλικού μοιάζουν αρκετά στους εκτυπωτές SLA καθώς χρησιμοποιούν επίσης φωτοπολυμερή ως κύρια πρώτη ύλη. Τα τελευταία χρόνια η δυνατότητα τους να χρησιμοποιούν πολλαπλά υλικά ή υλικά με περιεκτικότητα σε σωματίδια ενίσχυσης, έχει ανοίξει το δρόμο για την παραγωγή αντικειμένων με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και υψηλή ακρίβεια. Πολλοί ερευνητές, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μελετούν την δημιουργία σύνθετων πρώτων υλών μέσω της προσθήκης σωματιδίων, αλλά και τον άμεσο ψεκασμό μη φωτοπολυμερών υλικών, όπως μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξης. Η εύρεση περισσότερων πρωτοπόρων τρόπων και υλικών ψεκασμού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την συγκεκριμένη κατηγορία ΠΠ, και έχει την δυνατότητα να διευρύνει σημαντικά τις δυνατότητες της ΠΠ.



## Ενότητα 5 – Binder Jetting (Ψεκασμός Συνδετικού Μέσου)

### 5.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η τεχνολογία Binder Jetting (BJ) αποτελεί μέθοδο προσθετικής παραγωγής στην οποία η πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης συγκολλάται με τη χρήση υγρού πολυμερούς συνδετικού μέσου. Η μέθοδος αυτή κατεργάζεται μεταλλικές σκόνες και φυσική ή τεχνητή άμμο (slicer and). Η μέθοδος BJ χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεταλλικών εξαρτημάτων, καλουπιών χύτευσης και πολύχρωμων οπτικών μοντέλων.

Η BJ αναπτύχθηκε το 1993 στο MIT και δύο χρόνια αργότερα η Z Corporation απέκτησε δικαιώματα στη τεχνολογία. Σήμερα οι πιο επιτυχείς εταιρίες στον τομέα είναι οι ExOne, ZCorp και Voxeljet αλλά καθώς τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας λήγουν νέες εταιρίες εισέρχονται στον κλάδο όπως οι Desktop Metal και HP.

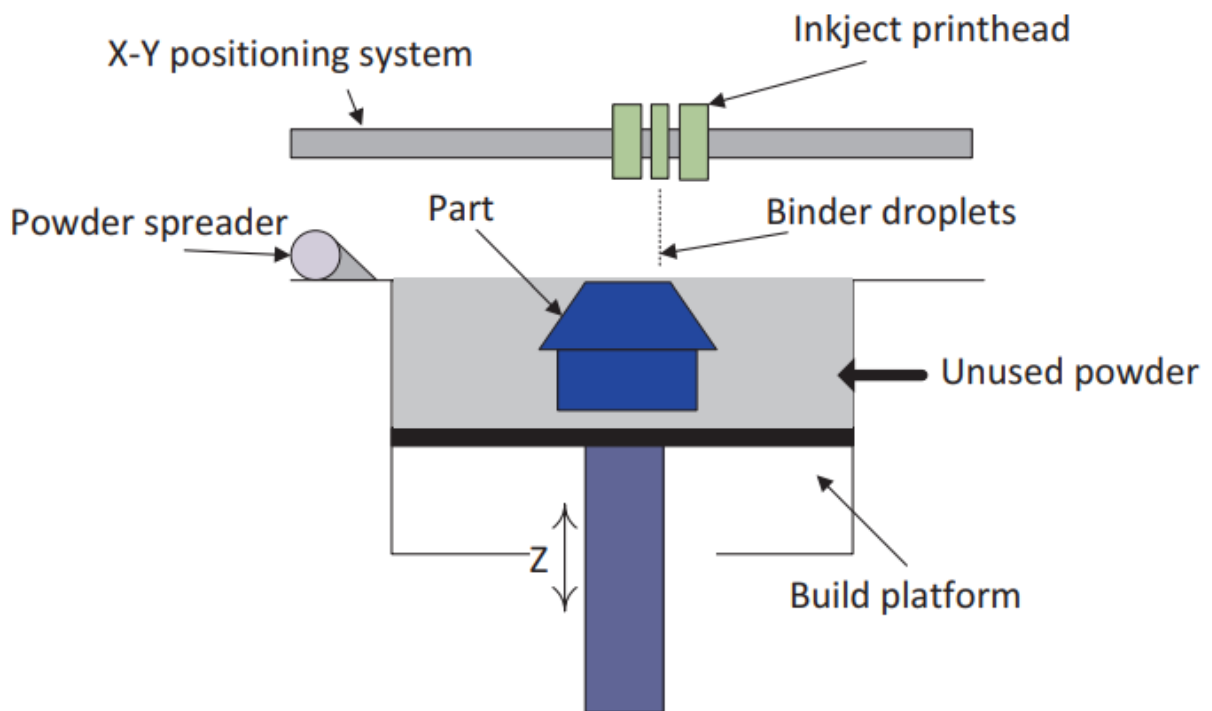
### 5.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Τα κύρια εξαρτήματα ενός εκτυπωτή BJ είναι το δοχείο σκόνης, η κεφαλή του εκτυπωτή που συγκρατεί τους εγχυτήρες συνδετικού υλικού, η δεξαμενή συνδετικού υλικού, η τράπεζα και ο κύλινδρος που απλώνει τη σκόνη. Η εκτύπωση ενός αντικειμένου ξεκινά απλώνοντας ένα ομοιόμορφο στρώμα σκόνης στην πλάκα εκτύπωσης. Η κεφαλή του εκτυπωτή κινούμενη σύμφωνα με την επιθυμητή γεωμετρία εναποθέτει σταγονίδια συνδετικού υλικού μέσω πολλαπλών ακροφυσίων σε κατάλληλα σημεία στο στρώμα της σκόνης. Οι κόκκοι της σκόνης συγκολλούνται μεταξύ τους και διαμορφώνουν την πρώτη στρώση του παραγόμενου τεμαχίου. Κάποια συστήματα BJ χρησιμοποιούν θερμαντήρες για τον έλεγχο της υγρασίας και την στερεοποίηση του συνδετικού υλικού αλλά δεν αποτελεί απαραίτητο βήμα της διαδικασίας. Στη συνέχεια η τράπεζα υποχωρεί και ένα νέο στρώμα σκόνης απλώνεται στην επιφάνεια της. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του παραγόμενου τεμαχίου.

Μετά το πέρας της εκτύπωσης το τεμάχιο βρίσκεται βυθισμένο στη σκόνη και συνήθως παραμένει εκεί για μερικές ώρες ώστε να σκληρύνει και να αυξηθεί η αντοχή του. Η σκόνη δρα ως υποστήριξη κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Σε αυτό το στάδιο (green state) το τεμάχιο δεν είναι ακόμα έτοιμο για χρήση λόγω υψηλού πορώδους. Ανάλογα με το υλικό τα προϊόντα BJ υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία για την βελτίωση της μηχανικής αντοχής και την μείωση του πορώδους. Οι τεχνικές αυτές περιγράφονται στη συνέχεια. Όταν το τεμάχιο αφαιρεθεί καθαρίζεται από υπολείμματα σκόνης με πεπιεσμένο αέρα και περνά στα επόμενα στάδια επεξεργασίας (54). Στην εικόνα 44 φαίνεται ένα τυπικό μηχάνημα Binder Jetting και στην εικόνα 45 τα βασικά μηχανικά του μέρη.



Εικόνα 44 - Μηχάνημα Binder Jetting της ExOne - (55)



Εικόνα 45 - Βασικά μηχανικά μέρη ενός συστήματος BJ - (56)

### 5.3 Χαρακτηριστικά

Η ΒJ προσφέρει αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους προσθετικής παραγωγής. Έχει μεγάλη γκάμα διαθέσιμων υλικών και σχετικά υψηλό ρυθμό παραγωγής καθώς εναποθέτει μόνο το συνδετικό υλικό το οποίο αποτελεί μικρό ποσοστό του συνολικού όγκου του τεμαχίου.

Το συνδετικό υλικό δεσμεύει τα σωματίδια σκόνης σε θερμοκρασία δωματίου συνήθως χωρίς προσθήκη θερμότητας και έτσι δεν υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων λόγω θερμικών κύκλων του υλικού. Επιπλέον στην κατεργασία μεταλλικών σκονών δεν υπάρχει κίνδυνος αλλαγής φάσεων του υλικού και δεν απαιτείται περιβάλλον αδρανούς αερίου για αποφυγή της οξειδωσης. Για τους παραπάνω λόγους τα μηχανήματα ΒJ μπορούν να έχουν μεγάλο διαθέσιμο χώρο για εκτύπωση και είναι δυνατή η πλήρωση ολόκληρου του τρισδιάστατου χώρου με πολλαπλά τεμάχια. Για κατεργασία μεταλλικών σκονών υπάρχουν συστήματα με χώρο εκτύπωσης 780 mm x 400 mm x 400 mm και για καλούπια χύτευσης υπάρχουν συστήματα με δυνατότητα συνεχούς παραγωγής τεμαχίων με διαθέσιμο χώρο 850 mm x 500 mm χωρίς περιορισμό στο μήκος. Η εναπομείνουσα σκόνη παραμένει αναλλοίωτη μετά την παραγωγή του τεμαχίου και είναι ανακυκλώσιμη σε μεγάλο βαθμό.

Το κύριο πλεονέκτημα της ΒJ είναι η οικονομική παραγωγή προϊόντων από συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Τα μηχανήματα ΒJ δεν απαιτούν υψηλή ισχύ, δεν χρησιμοποιούν λέιζερ ή τοξικές ουσίες κατά την λειτουργία τους και η συνολική κατεργασία είναι σχετικά φθηνή και γρήγορη. Τυπικά ένα ακροφύσιο μπορεί να εναποθέσει περίπου 1 cm<sup>3</sup>/min συνδετικού υλικού και ένα τυπικό μηχάνημα ΒJ μπορεί να διαθέτει πάνω από 30.000 ακροφύσια. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την ΒJ ιδανική για παραγωγή παρτίδων μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους και χρησιμοποιείται σταδιακά ολοένα και περισσότερο ως μέθοδος παραγωγής στη βιομηχανία.(54)

### 5.4 Παράμετροι της κατεργασίας

Η ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των εναποτιθέμενων σταγονιδίων και του στρώματος της σκόνης. Η πυκνότητα, το μέγεθος, το σχήμα και οι ιδιότητες ύφανσης της σκόνης είναι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την φύση αυτής της αλληλεπίδρασης. Οι βέλτιστες παράμετροι εκτύπωσης για ένα συγκεκριμένο υλικό προσδιορίζονται συνήθως πειραματικά καθώς η προσομοίωση της διαδικασίας αποτελεί δύσκολο υπολογιστικό πρόβλημα. Επιπλέον οι βέλτιστες συνθήκες εκτύπωσης είναι συχνά διαφορετικές για κάθε μηχάνημα.

Οι μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου τεμαχίου επηρεάζονται από την ποσότητα συνδετικού υλικού που εναποτίθεται. Μικρές ποσότητες συνδετικού υλικού πιθανόν να μην είναι αρκετές για την δέσμευση των κόκκων της σκόνης ενώ μεγάλες ποσότητες συνήθως αυξάνουν την μηχανική αντοχή αλλά επιδρούν αρνητικά στην ανάλυση και την διαστατική ακρίβεια του τεμαχίου. Ο βαθμός κορεσμού της σκόνης είναι η παράμετρος που προσδιορίζει την ποσότητα συνδετικού υλικού που εναποτίθεται και ορίζεται ως το ποσοστό των διακένων μεταξύ των κόκκων της σκόνης που πληρώνεται με συνδετικό υλικό. Τυπικά ο βαθμός κορεσμού επιλέγεται σε τιμές κοντά στο 60%. (57)

Το πάχος στρώματος είναι από τους κυρίαρχους παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της εκτύπωσης. Λεπτά στρώματα βελτιώνουν την ανάλυση και συνήθως την μηχανική αντοχή του τεμαχίου

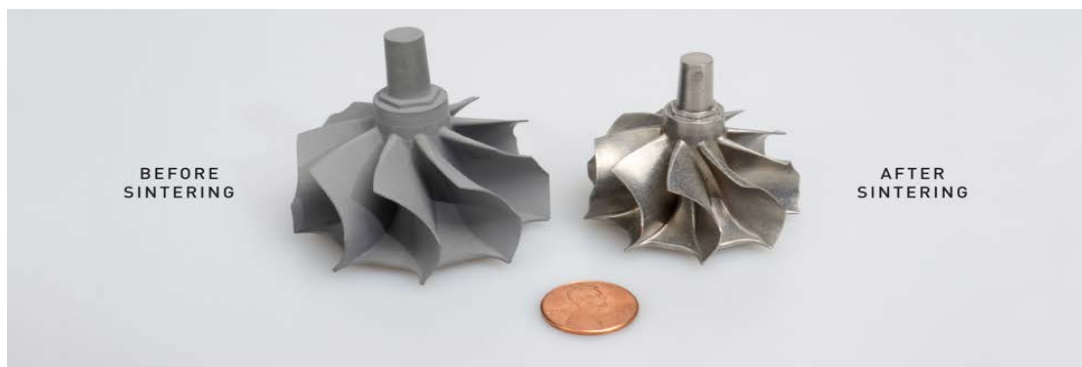
αλλά αυξάνουν τον χρόνο παραγωγής. Τυπικά η ανάλυση είναι 0.05 mm για μεταλλικά υλικά, 0.1 mm για καλούπια χύτευσης από αμμώδη υλικά και 0.2-0.4 mm για οπτικά μοντέλα. Η μέθοδος δεν απαιτεί την χρήση υποστηρικτικού υλικού σε αντίθεση με άλλες μεθόδους προσθετικής παραγωγής καθώς το τεμάχιο υποστηρίζεται από την περιβάλλουσα σκόνη. (58)

Για την διαμόρφωση ενός στρώματος υπάρχουν τρεις κύριες στρατηγικές κίνησης της κεφαλής του μηχανήματος. Αυτές είναι οι vector, raster και vector with raster infill. Κατά την κίνηση vector η κεφαλή του εκτυπωτή σαρώνει την περίμετρο του τεμαχίου και πλησιάζει σταδιακά το κέντρο του στρώματος διαμορφώνοντας ολοένα και μικρότερες περιμέτρους. Η μέθοδος αυτή προσφέρει την καλύτερη ανάλυση στο οριζόντιο επίπεδο αλλά επιβραδύνει σημαντικά την παραγωγή καθώς χρησιμοποιείται μόνο ένα ακροφύσιο της κεφαλής. Στην κίνηση raster η κεφαλή του μηχανήματος κινείται σε διαδοχικές παράλληλες γραμμές για την διαμόρφωση του στρώματος χρησιμοποιώντας όλα τα ακροφύσια. Η εκτύπωση πραγματοποιείται πολύ ταχύτερα αλλά με μικρότερη ανάλυση στο οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως στην πράξη χρησιμοποιείται η κίνηση vector with raster infill καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο άλλων τεχνικών. Στην κίνηση αυτή η περίμετρος του τεμαχίου σαρώνεται με τη χρήση ενός ακροφυσίου και στη συνέχεια το εσωτερικό πληρώνεται με διαδοχικές παράλληλες γραμμές χρησιμοποιώντας όλα τα ακροφύσια. Η μέθοδος αυτή προσφέρει υψηλή ανάλυση και ποιότητα επιφανείας στο οριζόντιο επίπεδο και μικρότερο χρόνο παραγωγής. (57)

### 5.5 Binder Jetting με μεταλλικά υλικά

Η μέθοδος BJ κατεργάζεται συνήθως ανοξείδωτους χάλυβες και κράματα τύπου Inconel και έχει τη δυνατότητα να παράγει μεταλλικά αντικείμενα σύνθετης γεωμετρίας όπως η μέθοδος SLM. Η τεχνολογία BJ πολλές φορές προτιμάται έναντι της SLM λόγω πολύ χαμηλότερου κόστους αλλά τα τελικά προϊόντα έχουν χαμηλότερη αντοχή. Για το λόγο αυτό τα προϊόντα εκτύπωσης BJ υπόκεινται σε διάφορα στάδια μετεπεξεργασίας. Οι κύριες χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι η πυροσυσσωμάτωση (Sintering) και η διείσδυση (Infiltration).

Η πυροσυσσωμάτωση είναι διαδικασία στην οποία το τεμάχιο τοποθετείται στον κλίβανο σε υψηλή θερμοκρασία για την αφαίρεση του συνδετικού υλικού. Παράλληλα οι κόκκοι της σκόνης τήκονται και ενώνονται καλύπτοντας τους πόρους που προκαλεί η αφαίρεση του συνδετικού υλικού. Ωστόσο η διαδικασία αυτή οδηγεί σε σημαντική συρρίκνωση και στρέβλωση του τεμαχίου που είναι δύσκολο να προβλεφθεί κατά τον σχεδιασμό. Στην εικόνα 46 φαίνεται εξάρτημα BJ πριν και μετά την πυροσυσσωμάτωση.



Εικόνα 46 - Πτερωτή αντλίας πριν και μετά την πυροσυσσωμάτωση - (59)

Στην τεχνική της διείσδυσης το τεμάχιο τοποθετείται στον κλίβανο σε υψηλή θερμοκρασία (συνήθως άνω των 1000 °C) με κάποιο μέταλλο χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξης, συνήθως μπρούτζο. Ο λιωμένος μπρούτζος εισχωρεί στη δομή του τεμαχίου και καλύπτει τους πόρους που σχηματίστηκαν κατά την παραγωγή του. Οι δύο παραπάνω τεχνικές μειώνουν σημαντικά το πορώδες του τεμαχίου αυξάνοντας έτσι τη μηχανική του αντοχή. Μετά την διείσδυση ή την πυροσυσσώματωση ένα τεμάχιο μπορεί να κατεργασθεί και με συμβατικές μεθόδους αφαίρεσης υλικού ώστε να πληροί τις επιθυμητές διαστατικές ανοχές. (58)

## 5.6 Binder Jetting με αμμώδη υλικά

Η τεχνολογία Sand Binder Jetting χρησιμοποιείται για την παραγωγή έγχρωμων μοντέλων και γεωμετρικά πολύπλοκων καλουπιών σε χαμηλό κόστος.

Η εκτύπωση οπτικών μοντέλων γίνεται με σκόνες sandstone ή PMMA. Τα αντίστοιχα μηχανήματα διαθέτουν μια επιπλέον κεφαλή που συγκρατεί τους εγχυτήρες μελανιού. Αρχικά η κεφαλή συνδετικού υλικού ενώνει τους κόκκους της σκόνης και στη συνέχεια τους χρωματίζει η κεφαλή μελανιού. Μελάνια διαφορετικού χρώματος αναμειγνύονται όπως και στους συμβατικούς 2D εκτυπωτές για να καλυφθεί όλο το φάσμα χρωμάτων. Μετά την εκτύπωση το μοντέλο καλύπτεται με διεισδυτική κυανοακρλική επίστρωση για την αύξηση της μηχανικής αντοχής και της έντασης των χρωμάτων. Συχνά τα μοντέλα επικαλύπτονται και δεύτερη φορά. Παρ' όλα αυτά παραμένουν ψαθυρά και δεν έχουν μηχανολογική εφαρμογή. Στην εικόνα 47 φαίνεται ένα οπτικό μοντέλο ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης.



Εικόνα 47 - Μοντέλο ανθρώπινης σπονδυλικής στήλης που πάσχει από σκολίωση - (59)

Η παραγωγή καλουπιών άμμου είναι μια από τις πιο συχνές εφαρμογές της μεθόδου BJ. Η BJ επιτρέπει την ταχεία παραγωγή καλουπιών για χύτευση μετάλλων σε χαμηλό κόστος και με γεωμετρίες που θα ήταν δύσκολο να παραχθούν με συμβατικές μεθόδους. Τα καλούπια συνήθως δεν χρειάζονται μετεπεξεργασία και είναι έτοιμα για χρήση αμέσως μετά την εκτύπωση. Ωστόσο είναι μίας χρήσης καθώς καταστρέφονται κατά την αφαίρεση του χυτού αντικειμένου (58). Καλούπια χύτευσης BJ φαίνονται στην εικόνα 48.



Εικόνα 48 - Καλούπι για πτερωτή αντλίας και το τελικό χυτό εξάρτημα - (59)

## 5.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

- + Παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων, καλουπιών και οπτικών μοντέλων σε χαμηλό κόστος.
- + Δυνατότητα παραγωγής διαστατικά μεγάλων τεμαχίων χωρίς τον κίνδυνο παραμορφώσεων.
- + Υψηλός ρυθμός παραγωγής.
- + Δεν υπάρχει ανάγκη υποστηρίξεων.
- + Μεγάλη γκάμα διαθέσιμων υλικών.
  
- Χειρωνακτικός καθαρισμός των προϊόντων.
- Χαμηλή αντοχή χωρίς μετεπεξεργασία.
- Σημαντικές παραμορφώσεις κατά τη μετεπεξεργασία.
- Σχετικά χαμηλή ανάλυση.

## 5.8 Μελλοντική έρευνα

Στον τομέα της μεθόδου binder jetting (BJ), η μελλοντική έρευνα είναι πιθανότερο να εστιάζει στα κύρια της μειονεκτήματα. Αρχικά η BJ είναι μέθοδος που περιλαμβάνει πολλαπλά βήματα μέχρι την παραγωγή του τελικού προϊόντος καθώς αυτά διαθέτουν υψηλό πορώδες αμέσως μετά την παραγωγή (green state). Η ανάγκη για μετεπεξεργασία των προϊόντων μειώνει την παραγωγικότητα της συνολικής διαδικασίας και ταυτόχρονα αυξάνει το κόστος της. Επομένως είναι απαραίτητη η έρευνα σε τρόπους μείωσης του αναπτυσσόμενου πορώδους κατά την κατεργασία. Επιπλέον οι τεχνικές της διεύθυνσης και της πυροσυσσωμάτωσης συχνά προκαλούν έντονες παραμορφώσεις στο τεμάχιο οι οποίες δεν είναι εύκολο να προβλεφθούν. Για αυτό το λόγο υπάρχει η ανάγκη βελτίωσης των δύο τεχνικών εξάλειψης του πορώδους και παράλληλα η ανάπτυξη ισχυρότερων υπολογιστικών μοντέλων που θα προβλέπουν την πιθανή παραμόρφωση των τεμαχίων και θα διευκολύνουν την αντιστάθμιση της κατά τον σχεδιασμό του προϊόντος.



## Ενότητα 6 – Powder Bed Fusion (Σύντηξη Σκόνης)

### 6.1 Τεχνολογίες Powder Bed Fusion

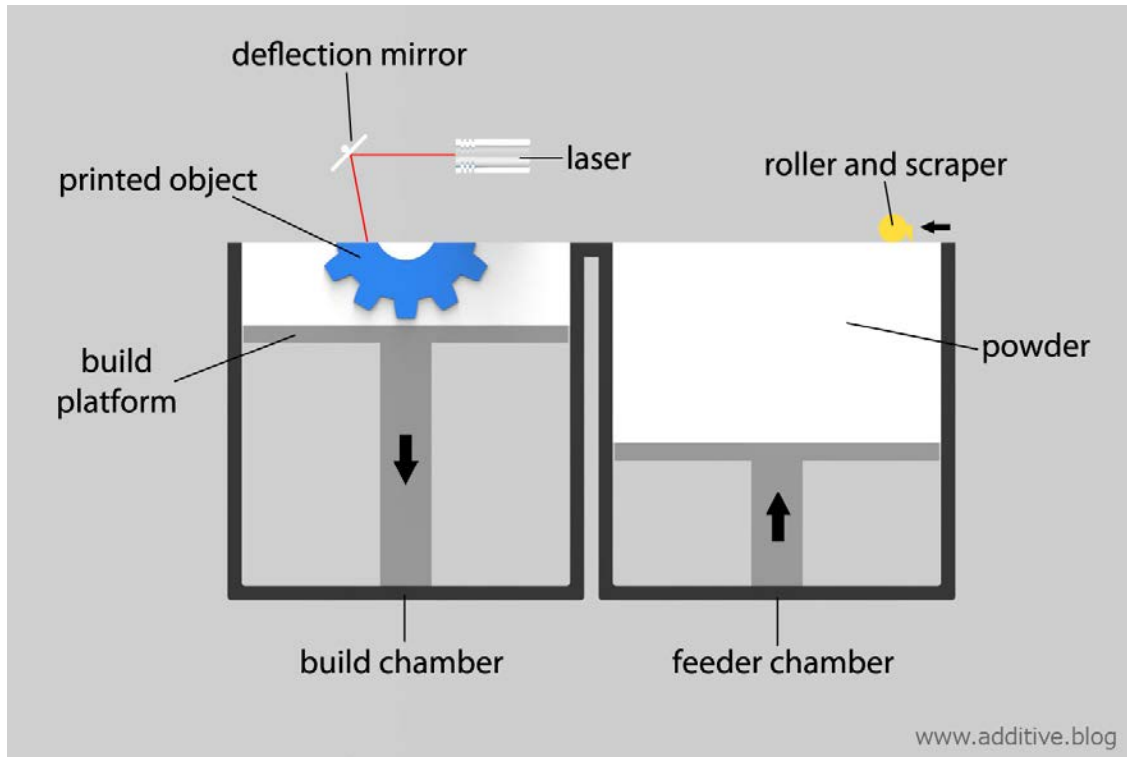
Οι μέθοδοι Powder Bed Fusion (PBF) αποτελούν μια από τις πρωτοεμφανιζόμενες και πιο ευέλικτες οικογένειες μεθόδων προσθετικής παραγωγής. Οι περισσότερες τεχνολογίες PBF κατεργάζονται κυρίως μεταλλικά και πολυμερή υλικά αλλά υπάρχει η δυνατότητα κατεργασίας κεραμικών και σύνθετων υλικών. Οι διαφορετικές τεχνολογίες PBF κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται για την τήξη της σκόνης που αποτελεί την πρώτη ύλη της κατεργασίας. Όλα τα είδη PBF μοιράζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά. Αυτά περιλαμβάνουν μία πηγή θερμότητας που χρησιμοποιείται για την τήξη και συγκόλληση στρωμάτων σκόνης, ένας τρόπος κατεύθυνσης της θερμότητας στις επιθυμητές περιοχές και μηχανισμούς για τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου στρώματος σκόνης. Τα πρώτα μηχανήματα PBF κατεργάζονταν σκόνης πολυμερών για την παραγωγή πρωτοτύπων. Σήμερα οι μέθοδοι PBF έχουν επεκταθεί σε πολλά περισσότερα υλικά και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή προϊόντων τελικής χρήσης από υλικά σημαντικά για την βιομηχανία. Στην ενότητα αυτή θα εστιάσουμε στις μεθόδους PBF που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη βιομηχανία και την έρευνα. Αρχικά θα ασχοληθούμε με τις μεθόδους Selective Laser Sintering και High Speed Sintering οι οποίες είναι οι σημαντικότερες τεχνολογίες PBF για την κατεργασία πολυμερών υλικών και στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τις Selective Laser Melting και Electron Beam Melting οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατεργασία μεταλλικών υλικών.

### 6.2 Selective Laser Sintering (Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λέιζερ)

#### 6.2.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η Selective Laser Sintering (SLS) είναι μέθοδος προσθετικής παραγωγής πολυμερών υλικών που ανήκει στην οικογένεια Powder Bed Fusion. Χρησιμοποιεί layers για την επιλεκτική τήξη και συγκόλληση στρωμάτων σκόνης και τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικειμένου. Η SLS χρησιμοποιείται για παραγωγή πρωτοτύπων αλλά και τελικών προϊόντων σε μικρές παρτίδες καθώς προσφέρει ελευθερία σχεδιασμού, ακρίβεια και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Σε αντίθεση με τις FDM και SLA, οι μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων SLS δεν εμφανίζουν μεγάλη διασπορά στην αντοχή εφελκυσμού και κόπωσης.

Η τεχνολογία αναπτύχθηκε αρχικά από τους καθηγητές Carl Deckard και Joe Beaman το 1984 στο πανεπιστήμιο του Austin στο Texas. Τα πρώτα μηχανήματα χρησιμοποιούσαν layers Nd-YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) με ισχύ 100 W για την κατεργασία σκόνης του θερμοπλαστικού ABS. Τα σύγχρονα μηχανήματα SLS χρησιμοποιούν layers διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub> Lasers) που αποδίδουν υψηλότερη ισχύ σε χαμηλότερο κόστος και επιτρέπουν την κατεργασία περισσότερων πολυμερών υλικών (60). Στην εικόνα 49 φαίνονται τα βασικά μηχανικά μέρη ενός εκτυπωτή SLS.



Εικόνα 49 - Μηχανικά μέρη ενός εκτυπωτή SLS - (61)

### 6.2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Τα κύρια εξαρτήματα ενός συστήματος SLS είναι η επιφάνεια εκτύπωσης, το layers, το κάτοπτρο που κατευθύνει τη δέση, η δεξαμενή σκόνης και ο βραχίονας που απλώνει τη σκόνη. Η διαδικασία της εκτύπωσης ξεκινά με τη προθέρμανση του θαλάμου του μηχανήματος και της επιφάνειας εκτύπωσης. Η σκόνη απλώνεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια εκτύπωσης και δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα. Στη συνέχεια το layers σαρώνει την τομή του παραγόμενου αντικειμένου και τήκει την σκόνη σε κατάλληλα σημεία ώστε να δημιουργήσει την επιθυμητή γεωμετρία. Ύστερα, η επιφάνεια εκτύπωσης υποχωρεί κατά ένα πάχος στρώματος και ο βραχίονας εναποθέτει το νέο στρώμα σκόνης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του παραγόμενου τεμαχίου. Μετά την εκτύπωση το τεμάχιο βρίσκεται βυθισμένο στην σκόνη και δεν αφαιρείται μέχρι να ψυχθεί ομοιόμορφα μέσα στο θάλαμο του μηχανήματος. Η διαδικασία ψύξης μπορεί να διαρκέσει έως και 12 ώρες ώστε να αποφευχθούν παραμορφώσεις και ρηγματώσεις λόγω παραμεινουσών τάσεων. Αφού το τεμάχιο αφαιρεθεί από το μηχάνημα καθαρίζεται από υπολείμματα σκόνης συνήθως με πεπιεσμένο αέρα. Ανάλογα με την εφαρμογή το εκτυπωμένο εξάρτημα μπορεί να επεξεργασθεί περεταίρω για την ικανοποίηση διαστατικών ανοχών ή να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν. (62)

### 6.2.3 Υλικά - Δυνατότητες

Η μέθοδος SLS χρησιμοποιεί layers σχετικά χαμηλής ισχύος και για αυτό κατεργάζεται σκόνη πολυμερών υλικών. Θεωρητικά η SLS μπορεί να διαχειριστεί οποιοδήποτε πολυμερές σε μορφή σκόνης εάν τα σωματίδια της σκόνης τείνουν να συγκολληθούν με την προσθήκη θερμότητας. Με άμορφα πολυμερή όπως τα πολυανθρακικά (PC), παράγονται τεμάχια υψηλής διαστατικής ακρίβειας και ανάλυσης με χαμηλή επιφανειακή τραχύτητα, ανάλογα με το μέγεθος κόκκου της σκόνης που χρησιμοποιείται. Ωστόσο τα άμορφα πολυμερή παρουσιάζουν έντονο πορώδες όταν κατεργάζονται με την SLS και για αυτό είναι χρήσιμα μόνο σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή μηχανική αντοχή όπως για παράδειγμα την παραγωγή καλουπιών χύτευσης.

Αντίθετα, με ημικρυσταλλικά πολυμερή όπως τα πολυαμίδια (PA), παράγονται τεμάχια με πυκνότητα που προσεγγίζει αυτήν του αρχικού υλικού και αντοχή εφελκυσμού περίπου ισοδύναμη με αυτήν των προϊόντων χύτευσης. Οι ιδιότητες αυτές επιτρέπουν την παραγωγή λειτουργικών πρωτοτύπων αλλά και προϊόντων τελικής χρήσης. Τα ημικρυσταλλικά πολυμερή όμως, εμφανίζουν συρρίκνωση κατά την στερεοποίηση από την υγρή κατάσταση γεγονός που δυσκολεύει την παραγωγή τεμαχίων με υψηλή διαστατική ακρίβεια.

Προς το παρόν τα υλικά που μπορούν να κατεργασθούν με επιτυχία από τη μέθοδο SLS είναι περιορισμένα. Το 95% περίπου όλων των εφαρμογών αφορούν το πολυαμίδιο PA12. Άλλα υλικά συμβατά με την μέθοδο SLS είναι τα PA6, PA11, PEEK, PCL κ.α. χωρίς όμως να επιτυγχάνεται το ίδιο επίπεδο ποιότητας. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα εκτύπωσης πολυμερών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα, γυαλιού και αλουμινίου. (63)

### 6.2.4 Παράμετροι της κατεργασίας

Οι τιμές των κυρίων παραμέτρων της κατεργασίας επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της εκτύπωσης SLS και επιλέγονται ανάλογα με το κατεργαζόμενο υλικό.

Η ενέργεια που απαιτείται για την τήξη της σκόνης μειώνεται όταν η σκόνη προθερμαίνεται. Επιπλέον διατηρώντας υψηλή θερμοκρασία στο θάλαμο κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης εμποδίζονται οι παραμορφώσεις και η ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων στο τεμάχιο. Η θερμοκρασία προθέρμανσης της σκόνης επιλέγεται ανάλογα με το είδος του πολυμερούς. Για τα άμορφα πολυμερή η θερμοκρασία του θαλάμου ρυθμίζεται στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Το ιξώδες του πολυμερούς στη θερμοκρασία αυτή διευκολύνει την ενοποίηση των κόκκων. Στην περίπτωση των ημικρυσταλλικών πολυμερών η θερμοκρασία ρυθμίζεται λίγους βαθμούς χαμηλότερα από την θερμοκρασία τήξης.

Η σκόνη από ημικρυσταλλικά πολυμερή στην SLS δεν μπορεί να ανακυκλώνεται για απροσδιόριστο χρόνο χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα της. Η επαναλαμβανόμενη έκθεση σε θερμότητα για μεγάλα χρονικά διαστήματα προκαλεί αύξηση του μέσου μήκους πολυμερικής αλυσίδας που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας τήξης του υλικού. Επιπλέον οι μακρύτερες πολυμερικές αλυσίδες αυξάνουν το ιξώδες του υλικού στην υγρή κατάσταση, γεγονός που εμποδίζει την κάλυψη κενών και οδηγεί στην εμφάνιση πορώδους στο τελικό προϊόν. Οι συνθήκες αυτές υποβαθμίζουν την ποιότητα εκτύπωσης προκαλώντας τραχύτερες επιφάνειες και σημαντική πτώση στη μηχανική αντοχή.

Το φαινόμενο αυτό αντισταθμίζεται μερικώς αυξάνοντας την ισχύ εισόδου και επομένως την θερμοκρασία στην οποία το layers θερμαίνει το υλικό. Ωστόσο είναι προτιμότερη η χρήση μίγματος νέας

σκόνης και ανακυκλωμένης σκόνης. Τυπικά η αναλογία που χρησιμοποιείται είναι 70% νέα σκόνη και 30% ανακυκλωμένη σκόνη.

Η ταχύτητα με την οποία η δέσμη layers σαρώνει τη σκόνη συνδέεται άμεσα με την ισχύ που απορροφάται από αυτήν. Η πυκνότητα ενέργειας ορίζεται ως

$E = \frac{P}{Dv}$  όπου P η ισχύς της δέσμης layers, D η διάμετρος της δέσμης και v η ταχύτητα σάρωσης. Εάν η ταχύτητα σάρωσης είναι χαμηλή τότε ο χρόνος επαφής της δέσμης με το στρώμα της σκόνης αυξάνεται με αποτέλεσμα την απορρόφηση περισσότερης ενέργειας. Με χαμηλή ταχύτητα σάρωσης παράγονται προϊόντα με χαμηλότερο πορώδες και συνεπώς υψηλότερη μηχανική αντοχή αλλά σε περισσότερο χρόνο.

Η απόσταση μεταξύ των παράλληλων διαδρομών της δέσμης (hatch spacing) επιλέγεται ανάλογα με τη διάμετρο και την ισχύ της δέσμης. Αν η απόσταση αυτή είναι πολύ μεγάλη τότε η προστιθέμενη θερμότητα δεν αρκεί για την σύνδεση των γραμμών. Από την άλλη εάν η απόσταση αυτή είναι πολύ μικρή, η υπερβολική προσθήκη θερμότητας μπορεί να προκαλέσει παραμορφώσεις στο τεμάχιο.

Το πάχος στρώματος ελέγχεται ρυθμίζοντας την κάθετη μετατόπιση της τράπεζας πριν το άπλωμα της σκόνης. Το πάχος στρώματος εξαρτάται από τον συγκεκριμένο εκτυπωτή και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0.07 έως 0.5 mm. Όπως σε όλες τις μεθόδους προσθετικής παραγωγής μικρά πάχη στρώματος βελτιώνουν την ανάλυση αλλά αυξάνουν το χρόνο παραγωγής. Κατά κανόνα για την διατήρηση της διαστατικής ακρίβειας του τεμαχίου το πάχος στρώματος δεν πρέπει να είναι χαμηλότερο από τη μέση διάμετρο των κόκκων της σκόνης. Επιπλέον είναι σημαντικό να υπάρχει επαρκής χρόνος αναμονής για την ψύξη ενός στρώματος μέχρι την έναρξη του επομένου. Τυπικά οι μεγαλύτεροι χρόνοι αναμονής βελτιώνουν τη γεωμετρική ακρίβεια του τεμαχίου.

Κατά την εκτύπωση είναι σημαντικό ο χρήστης να εκμεταλλεύεται πλήρως το διαθέσιμο χώρο εκτύπωσης διότι ο χρόνος παραγωγής δεν αυξάνεται σημαντικά για πολλά τεμάχια. Αυτό συμβαίνει επειδή για δεδομένο ύψος δοχείου, η δημιουργία του στρώματος σκόνης διαρκεί περισσότερο από τη σάρωση της επιφάνειας με το layers. (64)

#### 6.2.5 Εφαρμογές

Η μέθοδος SLS προσφέρει μεγάλη ελευθερία σχεδιασμού καθώς η σκόνη που περιβάλλει το τεμάχιο προσφέρει την απαραίτητη υποστήριξη για την εκτύπωση περίπλοκων γεωμετριών. Η SLS μπορεί να παράξει ανθεκτικά πλαστικά εξαρτήματα για χρήση ως πρωτότυπα αλλά και ως τελικά προϊόντα. Στην εικόνα 50 φαίνονται διάφορα χρηστικά και διακοσμητικά προϊόντα SLS. Υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής εξαρτημάτων με εσωτερικές κοιλότητες για μείωση του βάρους και εξοικονόμηση υλικού και χρόνου. Για τους λόγους αυτούς η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως στην κατασκευή πλαστικών εξαρτημάτων τα οποία θα ήταν αδύνατο ή ακριβό να κατασκευασθούν με συμβατικές μεθόδους και για την αντιγραφή δυσέυρετων ανταλλακτικών. (62)



Εικόνα 50 - Προϊόντα SLS - (65)

#### 6.2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

- + Υψηλή και σχεδόν ισότροπη μηχανική αντοχή.
- + Κατασκευή περίπλοκων γεωμετριών.
- + Ιδανική για μικρές και μεσαίου μεγέθους παρτίδες παραγωγής
- + Δεν υπάρχει ανάγκη υποστηρίξεων.
  
- Δεν είναι οικονομικά προσιτή μέθοδος σε σχέση με τις FDM και SLA
- Υψηλή επιφανειακή τραχύτητα
- Ακατάλληλη για τεμάχια με μεγάλες επίπεδες επιφάνειες

#### 6.2.7 Μελλοντική έρευνα

Ένας βασικός περιορισμός της SLS είναι ότι προς το παρόν τα υλικά που μπορούν να κατεργασθούν επιτυχώς από την συγκεκριμένη μέθοδο είναι πολύ περιορισμένα σε σχέση με αυτά που είναι διαθέσιμα για χύτευση με έγχυση. Επιπλέον παρόλο που κάποια υλικά όπως τα πολυαμίδια προσφέρουν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες, δεν μπορούν να φτάσουν στα υψηλότερα επίπεδα αντοχής και παραμόρφωσης πριν την αστοχία των προϊόντων χύτευσης. Ο κατάλληλος σχεδιασμός ενός προϊόντος SLS, η σωστή επιλογή παραμέτρων κατεργασίας και υλικού έχουν μεγάλη σημασία για την παραγωγή ενός ποιοτικού εξαρτήματος. Συνεπώς η έρευνα στο μέλλον αναμένεται να εστιάσει στην ανάπτυξη νέων υλικών με χαρακτηριστικά που τα καθιστούν πιο συμβατά με τη μέθοδο SLS και στη καλύτερη κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ παραμέτρων κατεργασίας και μηχανικών ιδιοτήτων.

## 6.3 High Speed Sintering (Ταχεία Πυροσυσσωμάτωση)

### 6.3.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος High Speed Sintering (HSS) είναι τεχνολογία που ανήκει στην οικογένεια Powder Bed Fusion η οποία χρησιμοποιεί λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας και υγρό συνδετικό μέσο για την τήξη και συγκόλληση στρώσεων πολυμερούς σκόνης. Η τεχνολογία πήρε το όνομα της από την υψηλή ταχύτητα παραγωγής καθώς η χρήση λαμπτήρα επιτρέπει την ταυτόχρονη τήξη μιας μεγάλης περιοχής υλικού. Η τεχνολογία HSS προτάθηκε από τον καθηγητή Neil Hopkinson του πανεπιστημίου Loughborough ο οποίος κατοχύρωσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 2003. Το 2013 ο πρώτος εκτυπωτής HSS εγκαταστάθηκε στο πανεπιστήμιο του Sheffield. Η HSS αποτελεί νέα τεχνολογία και για αυτό είναι λίγες οι εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο με κυρίαρχες τις Voxeljet και HP (Hewlett-Packard). Η μέθοδος HSS έχει τη δυνατότητα να παράγει ανθεκτικά πλαστικά εξαρτήματα με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από άλλες μεθόδους προσθετικής παραγωγής γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για μαζική παραγωγή. (60)

### 6.3.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Η διαδικασία εκτύπωσης HSS ξεκινά προθερμαίνοντας και απλώνοντας τη σκόνη (συνήθως PA ή TPU) επάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης. Το ακροφύσιο του μηχανήματος εναποθέτει συνδετικό μέσο με υψηλή απορροφητικότητα υπέρυθρης ακτινοβολίας (binding agent) σε περιοχές όπου απαιτείται τήξη της σκόνης. Η στρώση της σκόνης θερμαίνεται με λαμπτήρες που εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία. Στις περιοχές όπου υπάρχει συνδετικό μέσο απορροφάται μεγάλο ποσοστό της ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την τήξη της σκόνης και την δημιουργία της πρώτης στρώσης του τεμαχίου. Στη συνέχεια η επιφάνεια εκτύπωσης υποχωρεί κατά το επιθυμητό πάχος στρώσης, τοποθετείται νέα σκόνη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν η εκτύπωση ολοκληρωθεί η δεξαμενή της σκόνης που περιέχει τα παραγόμενα τεμάχια μεταφέρεται στο σταθμό καθαρισμού. Εκεί τα τεμάχια καθαρίζονται από υπολείμματα σκόνης με πεπιεσμένο αέρα και η εναπομείνουσα σκόνη συλλέγεται προκειμένου να ανακυκλωθεί.

Το 2016 η εταιρία HP εισήγαγε την τεχνολογία Multi Jet Fusion. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί ουσιαστικά εξέλιξη της HSS καθώς χρησιμοποιεί επίσης ψυκτικό μέσο (detailing agent) το οποίο εναποτίθεται στην περίμετρο του τεμαχίου και οριοθετεί την τήξη της σκόνης. Κατά αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η ανάλυση και η ποιότητα επιφανείας του τελικού προϊόντος. Επιπλέον τα μηχανήματα MJF της HP διαθέτουν πολλαπλά ακροφύσια για τον ψεκασμό του συνδετικού και του ψυκτικού μέσου γεγονός που αυξάνει περαιτέρω την ταχύτητα παραγωγής. (66)

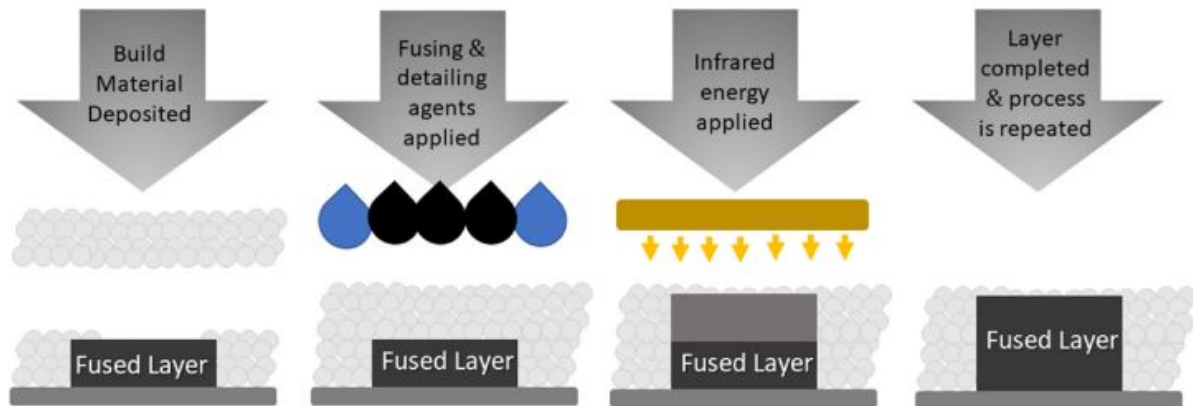
### 6.3.3 Χαρακτηριστικά

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους Powder Bed Fusion στις HSS και MJF κάθε στρώση εναποτίθεται πριν την πλήρη στερεοποίηση της προηγούμενης στρώσης βελτιώνοντας την πρόσφυσή τους και συνεπώς την αντοχή του τεμαχίου. Παραδόξως η αντοχή εφελκυσμού ενός εκτυπωμένου εξαρτήματος είναι υψηλότερη στον κατακόρυφο άξονα σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους προσθετικής παραγωγής. (67)

Με τις μεθόδους HSS/MJF είναι δυνατή η παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών χωρίς την προσθήκη υποστηρίξεων καθώς το τεμάχιο υποστηρίζεται από τη σκόνη που το περιβάλλει. Η εναπομείνουσα



σκόνη είναι ανακυκλώσιμη σε μεγάλο βαθμό και η διαδικασία δεν απαιτεί την πλήρωση του θαλάμου με αδρανές αέριο. Η MJF που συνδυάζει τη χρήση πολλαπλών ακροφυσίων και λαμπτήρα υπέρυθρης ακτινοβολίας αντί για layers, μπορεί να επιτύχει ταχύτητα παραγωγής δεκαπλάσια της SLS σε κόστος συγκρίσιμο με αυτό της χύτευσης πλαστικών. Μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας MJF φαίνεται στην εικόνα 51.



Εικόνα 51 - Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Multi Jet Fusion - (67)

#### 6.3.4 Υλικά

Το υλικό που χρησιμοποιείται συχνότερα στις HSS και MJF είναι το PA12 που είναι και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στις τεχνολογίες Powder Bed Fusion για πολυμερή υλικά. Το υλικό αυτό εμφανίζει μεγάλη διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας τήξης (κατά την θέρμανση) και της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης (κατά την ψύξη). Το μεγάλο αυτό εύρος μειώνει το ποσοστό κρυστάλλωσης του υλικού σε εκτυπωμένα εξαρτήματα το οποίο με τη σειρά του μειώνει τον κίνδυνο εμφάνισης σημαντικών παραμενουσών τάσεων. Το PA12 συχνά ενισχύεται με ίνες γυαλιού, αλουμινίου ή άνθρακα για την παραγωγή τεμαχίων με αυξημένη δυσκαμψία και αντοχή. Πολλοί ερευνητές προσπαθούν να διευρύνουν τη γκάμα συμβατών υλικών και έχουν αποδείξει ότι η HSS μπορεί να διαχειριστεί σκόνες που προορίζονται για χρήση στη μέθοδο SLS. (60)

Το 2018 η Voxeljet κυκλοφόρησε δύο νέα υλικά PP και TPU για τη μέθοδο HSS τα οποία δοκιμάζονται στη βιομηχανία. Η ανάπτυξη νέων υλικών κατάλληλων για κατεργασία με την HSS θα αποτελέσει πιθανότατα το επίκεντρο της έρευνας στο μέλλον. Παράλληλα είναι ανάγκη η ανάπτυξη νέων συνδεδετικών μέσων για το κάθε υλικό καθώς αυτά καθορίζουν την ποιότητα και την διαστατική ακρίβεια των προϊόντων και την ταχύτητα εκτύπωσης.

#### 6.3.5 Παράμετροι της κατεργασίας

Η HSS δεν αποτελεί ακόμη ώριμη τεχνολογία και για αυτό το λόγο η έρευνα σχετικά με τις παραμέτρους της κατεργασίας είναι σχετικά περιορισμένη. Οι κύριες παράμετροι περιλαμβάνουν την θερμοκρασία προθέρμανσης της σκόνης, την ποσότητα συνδεδετικού μέσου που εναποτίθεται και την ισχύ του

λαμπτήρα. Υψηλή θερμοκρασία προθέρμανσης και υψηλή ισχύ λαμπτήρα οδηγούν σε αύξηση της σκληρότητας και της μηχανικής αντοχής του τεμαχίου αλλά προκαλούν δυσκολίες στην μετεπεξεργασία. Με την προσθήκη περισσότερου συνδετικού μέσου επίσης αυξάνεται η μηχανική αντοχή αλλά τα προϊόντα γίνονται περισσότερο ψαθυρά. Είναι αναγκαία περαιτέρω έρευνα για την βελτιστοποίηση της κατεργασίας HSS.

### 6.3.6 Εφαρμογές

Η μέθοδος MJF αποτελεί ευέλικτη τεχνολογία και έχει εφαρμογές ήδη σε αρκετούς τομείς. Στην βιομηχανία αυτοκινήτων η MJF χρησιμοποιείται για την ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων, την υποβοήθηση της παραγωγικής διαδικασίας με την κατασκευή ιδιοσυσκευών αλλά και για την παραγωγή προϊόντων τελικής χρήσεως. Παράλληλα στον τομέα της υγείας η MJF χρησιμοποιείται για την ταχεία παραγωγή καλουπιών για τεχνητές οδοντοστοιχίες και προσθετικά μέλη κατά παραγγελία. Επιπλέον η παραγωγή πολλών ειδών καταναλωτικών αγαθών συχνά απαιτεί μικρούς όγκους πλαστικών εξαρτημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία. Η MJF δύναται να καλύψει την ανάγκη αυτή παράγοντας εξειδικευμένα κομμάτια με υψηλή αντοχή σε μικρό χρόνο. Στην εικόνα 52 φαίνονται παραδείγματα εφαρμογών της μεθόδου MJF



Εικόνα 52 - Προϊόντα Multi Jet Fusion - (68)

### 6.3.7 Σύγκριση των μεθόδων SLS και MJF

Οι SLS και MJF είναι οι σημαντικότερες μέθοδοι προσθετικής παραγωγής που κατεργάζονται πολυμερή υλικά. Από τις τεχνολογίες αυτές η MJF έχει την υψηλότερη ποιότητα επιφανείας λόγω χρήσης του ψυκτικού μέσου στην περίμετρο του τεμαχίου και την υψηλότερη ταχύτητα παραγωγής λόγω της μεγάλης περιοχής που θερμαίνει ο λαμπτήρας υπέρυθρων. Η σχετικά χαμηλή παραγωγικότητα της SLS μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση πολλαπλών λέιζερ χωρίς όμως να πλησιάζει την παραγωγικότητα της MJF. Ωστόσο η χαμηλότερη ισχύς του λαμπτήρα σε σχέση με τη δέσμη λέιζερ της SLS έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερου πορώδους στα παραγόμενα προϊόντα της MJF τα οποία επομένως έχουν και χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Οι μέθοδοι προσθετικής παραγωγής χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας για την κατασκευή πλαστικών εξαρτημάτων. Σε αυτό το κλίμα είναι σημαντική η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την μείωση του χρόνου παραγωγής και την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας στα παραγόμενα προϊόντα. Η SLS ως πιο ώριμη τεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί στους τομείς της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της υγείας για μικρές παρτίδες προϊόντων χάρη στην καλή μηχανική συμπεριφορά των προϊόντων. Η MJF που συνδυάζει υψηλή παραγωγικότητα και ικανοποιητική μηχανική αντοχή είναι ιδανική για την παραγωγή σύνθετων προϊόντων τελικής χρήσης σε μεγάλες παρτίδες. (60,69)

### 6.3.8 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

- + Υψηλή ταχύτητα παραγωγής
- + Υψηλή ανάλυση
- + Χαμηλό κόστος ανά τεμάχιο
- + Δεν υπάρχει ανάγκη για υποστηρίξεις
- + Χαμηλή στρέβλωση – συρρίκνωση
- + Δυνατότητα ανακύκλωσης της πρώτης ύλης (σκόνη)
- + Υψηλή μηχανική και χημική αντοχή
- + Δυνατότητα παραγωγής σε όλα τα χρώματα
  
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού
- Αδυναμία παραγωγής κάποιων καμπύλων εσωτερικών κοιλοτήτων
- Λεπτομερή στοιχεία μπορεί να χαθούν κατά την μετεπεξεργασία

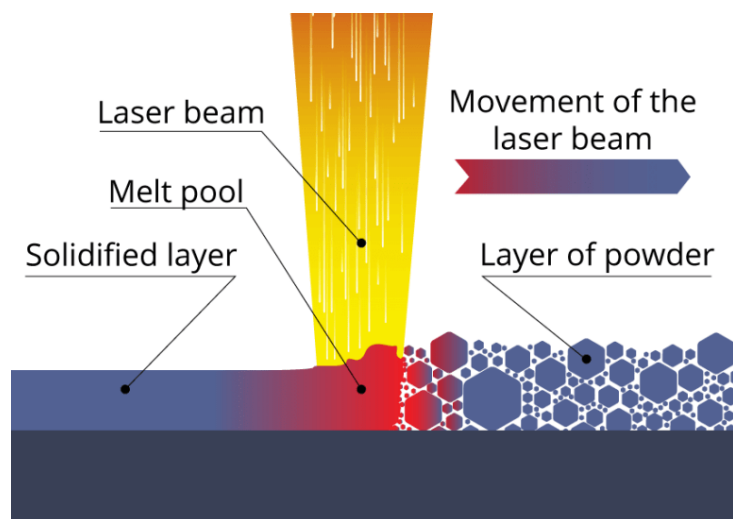
## 6.4 Selective Laser Melting (Επιλεκτική Τήξη με Λέιζερ)

### 6.4.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η SLM είναι μέθοδος προσθετικής παραγωγής μεταλλικών υλικών οι οποία μοιράζεται πολλά κοινά χαρακτηριστικά με την μέθοδο SLS που χρησιμοποιείται για τα πολυμερή καθώς έχει τις ίδιες βασικές αρχές λειτουργίας. Ανήκει στην οικογένεια Powder Bed Fusion και συχνά αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως Direct Metal Laser Sintering, Direct Selective Laser Sintering ή LaserCusing. Η SLM κατεργάζεται μεταλλικές σκόνης και αποτελεί ουσιαστικά εξέλιξη στην επιστήμη της κonioμεταλλουργίας. Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από τους καθηγητές M. Fockele και D. Schwarze στην εταιρία F & S Stereolithographietechnik GmbH και τους καθηγητές W. Meiners, K. Wissenbach και G. Andres του Fraunhofer Institute for Laser Technology. Αυτή τη στιγμή η γερμανική εταιρία EOS ηγείται στην ανάπτυξη και παραγωγή συστημάτων SLM έχοντας εγκαταστήσει περισσότερα από 900 μηχανήματα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις παγκοσμίως. (70)

### 6.4.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Κατά την εκτύπωση SLM το δοχείο του μηχανήματος πληρώνεται με σκόνη που αποτελεί την πρώτη ύλη της κατεργασίας και ο θάλαμος προθερμαίνεται σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο τήξης της σκόνης. Ο βραχίονας του μηχανήματος απλώνει τη σκόνη στην επιφάνεια εκτύπωσης και στη συνέχεια αυτή τήκεται επιλεκτικά από τη δέσμη layers σύμφωνα με τη γεωμετρία του παραγόμενου τεμαχίου. Η τράπεζα του μηχανήματος υποχωρεί κατά ένα πάχος στρώματος όταν η επεξεργασία ενός στρώματος ολοκληρωθεί. Η παραγωγή του τεμαχίου λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον αδρανούς αερίου (αργό ή άζωτο) για την αποφυγή της οξείδωσης του τηγμένου μετάλλου. Μια σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας φαίνεται στην εικόνα 53. Μετά την εκτύπωση και την ψύξη του μηχανήματος το τεμάχιο αφαιρείται και καθαρίζεται από υπολείμματα σκόνης. Η περισσευούμενη σκόνη που δεν σαρώθηκε από το layers είναι ανακυκλώσιμη σε μεγάλο βαθμό. Λόγω της υψηλής τραχύτητας των προϊόντων συγκριτικά με τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού είναι συχνά απαραίτητη περαιτέρω επεξεργασία για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα επιφανείας ή οι τελικές διαστάσεις. (71)



Εικόνα 53 - Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας SLM - (72)



Εικόνα 54 - Μηχανήματα SLM της εταιρίας EOS στο κέντρο προσθετικής παραγωγής της Audi - (73)

#### 6.4.3 Χαρακτηριστικά

Τα κύρια υλικά που κατεργάζεται η μέθοδος SLM είναι χάλυβες, κράματα τιτανίου και κράματα νικελίου αλλά έχουν ερευνηθεί οι δυνατότητες της μεθόδου και στην κατεργασία αλουμινίου, χαλκού βολφραμίου, κράματα κοβαλτίου-χρωμίου και κεραμικά υλικά.

Η μέθοδος SLM χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή πρωτοτύπων ή εξειδικευμένων τεμαχίων σε μικρές παρτίδες. Τα περισσότερα συστήματα SLM περιορίζονται σε ταχύτητες παραγωγής 5-20 cm<sup>3</sup> υλικού ανά ώρα και σε χώρο εκτύπωσης περίπου 250 x 250 x 325 mm<sup>3</sup>, γεγονός που αυξάνει το κόστος ανά τεμάχιο και δεν επιτρέπει την παραγωγή μεγάλων εξαρτημάτων. Στην εικόνα 54 φαίνονται μηχανήματα SLM σε χώρο παραγωγής. Τα τελικά προϊόντα έχουν μηχανική αντοχή περίπου ισοδύναμη με αυτήν των προϊόντων χύτευσης. Σε σχέση με τις συμβατικές κατεργασίες ο χρόνος εκπλήρωσης παραγγελιών είναι μειωμένος καθώς δεν απαιτείται αναπροσαρμογή του εξοπλισμού ή παραγωγή ιδιοσυσκευών για την εκπλήρωση διαφορετικών παραγγελιών και το τεμάχιο παράγεται σε λιγότερα στάδια.

Σημαντική διαφορά της μεθόδου με την SLS που κατεργάζεται πολυμερή, είναι η χρήση υποστηρίξεων κατά την εκτύπωση. Το αυξημένο βάρος της μεταλλικής σκόνης απαιτεί τη προσθήκη υποστηρίξεων για την κατασκευή κάποιων γεωμετριών οι οποίες συχνά είναι χρονοβόρο να αφαιρεθούν.

#### 6.4.4 Παραμένουσες τάσεις

Η SLM μπορεί να παράξει μεταλλικά τεμάχια με χαμηλό πορώδες (έως 99.6 % συμπαγή) ακόμα και από υλικά που είναι δύσκολο να κατεργασθούν με συμβατικές μεθόδους. Ωστόσο, η ευρεία εφαρμογή της μεθόδου στην βιομηχανία εμποδίζεται από την ανάπτυξη ισχυρών παραμενουσών τάσεων στα παραγόμενα προϊόντα και την μειωμένη αντοχή τους σε κόπωση. Στην SLM οι παραμένουσες τάσεις οφείλονται στους πολλαπλούς θερμικούς κύκλους στους οποίους εκτίθενται τα τεμάχια κατά την παραγωγή τους καθώς στρώματα στερεοποιημένου υλικού επανυγροποιούνται και ψύχονται με διαφορετικό ρυθμό. Όταν εξετάζουμε το προφίλ των παραμενουσών τάσεων σε μία στρώση του τεμαχίου οι δύο σημαντικότερες περιοχές είναι η άνω πλευρά που είναι εκτεθειμένη στο layers και η

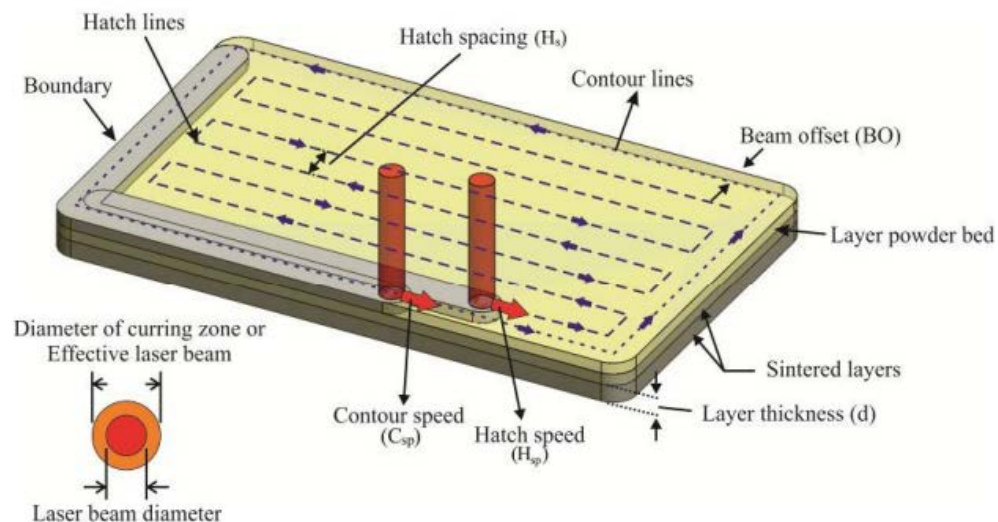
κάτω πλευρά που εφάπτεται στο προηγούμενο στρώμα. Το πρόβλημα εκδηλώνεται όταν η θερμική διαστολή της άνω πλευράς εμποδίζεται από την πρόσφυση της κάτω ψυχρότερης πλευράς στο προηγούμενο στρώμα.

Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να προκαλέσουν ρωγμές, παραμορφώσεις και αποκόλληση στρωμάτων ακόμα και πριν την ολοκλήρωση του παραγόμενου τεμαχίου. Τα προβλήματα αυτά είναι ακόμη περισσότερο εμφανή όταν το παραγόμενο τεμάχιο διαθέτει λεπτές προεξοχές και απότομες γωνίες στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για τους λόγους αυτούς είναι σημαντική η σωστή επιλογή των παραμέτρων της κατεργασίας από το χρήστη του εξοπλισμού. (70)

#### 6.4.5 Παράμετροι της κατεργασίας

Το πάχος στρώσης στην εκτύπωση SLM συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 20 – 100 μm. Στις τιμές αυτές παρατηρείται καλή ισορροπία μεταξύ ανάλυσης και ευκολία στη δημιουργία ενός ομοιόμορφου στρώματος σκόνης. Τα περισσότερα μηχανήματα SLM χρησιμοποιούν σκόνες με μέγεθος κόκκου 20-50 μm. Σκόνες με μεγάλο μέγεθος κόκκου οδηγούν σε χειρότερη ανάλυση και διαστατική ακρίβεια ενώ σκόνες με πολύ μικρό μέγεθος κόκκου έχουν την τάση να συσπειρώνονται παρεμποδίζοντας τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου στρώματος.

Στο σχήμα βλέπουμε τη δέσμη layers που σαρώνει το στρώμα σκόνης σύμφωνα με τη διατομή του παραγόμενου αντικειμένου. Αρχικά δημιουργείται η περίμετρος (contouring) η οποία σαρώνεται με προκαθορισμένη ταχύτητα και ισχύ δέσμης. Η διάμετρος της ζώνης τηγμένου υλικού είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της δέσμης οπότε είναι απαραίτητη η μετατόπιση της δέσμης κατά απόσταση συνήθως ίση με το μισό της τηγμένης ζώνης ώστε το παραγόμενο τεμάχιο να είναι διαστατικά ακριβές. Η απόσταση αυτή ονομάζεται Beam Offset. Για την δημιουργία του εσωτερικού (hatching) η δέσμη κινείται σε διαδοχικές παράλληλες γραμμές. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών ονομάζεται hatch spacing (Hs) και επιλέγεται ώστε να υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των ζωνών τήξης περίπου ίση με τη μισή ακτίνα τους. Οι παράμετροι αυτές φαίνονται στην εικόνα 55. (74)



Εικόνα 55 - Παράμετροι της κατεργασίας SLM - (74)



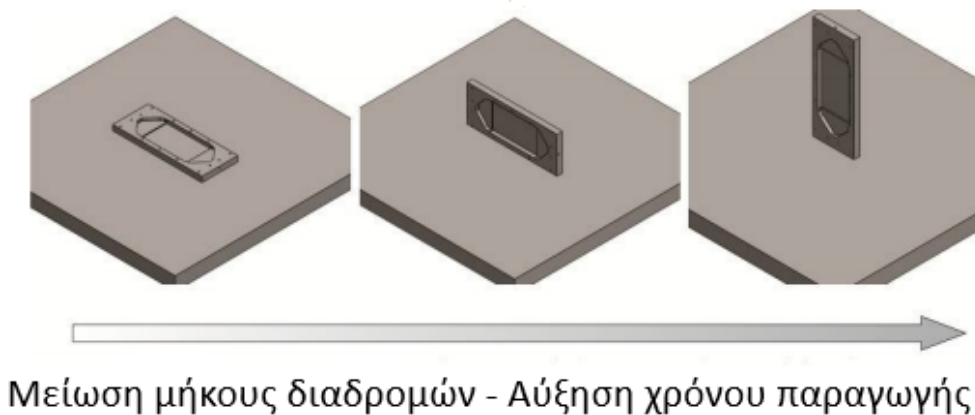
Οι παραπάνω παράμετροι είναι οι σημαντικότερες που επιδρούν στην ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου. Με ανεπαρκής ενέργεια εισόδου, δηλαδή με χαμηλή ισχύς λέιζερ, γρήγορη σάρωση και μεγάλο πάχος στρώματος παρατηρείται υψηλό πορώδες στο παραγόμενο τεμάχιο και συνεπώς μη επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Συχνά στις συνθήκες αυτές η επιφανειακή τάση του υγρού μετάλλου προκαλεί την εμφάνιση μικρών σφαιριδίων εξαιτίας της κακής πρόσφυσης με το προηγούμενο στρώμα υλικού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται balling και εμποδίζει τη δημιουργία συνεχόμενων γραμμών υλικού. Στις χειρότερες περιπτώσεις το φαινόμενο αυτό μπορεί να ενταθεί στα επόμενα στρώματα δημιουργώντας προεξοχές υλικού που συγκρούονται με τον βραχίονα που απλώνει τη σκόνη με αποτέλεσμα την διακοπή της κατεργασίας. (70)

Αντίθετα, με υπερβολική ενέργεια εισόδου, δηλαδή υψηλή ισχύ layers, χαμηλή ταχύτητα σάρωσης και μικρό πάχος στρώματος επιτυγχάνεται χαμηλό πορώδες στο τελικό προϊόν αλλά μπορεί να οδηγήσει σε εξάτμιση πτητικών στοιχείων στην τηγμένη ζώνη και παράλληλα αυξάνεται ο κίνδυνος παραμορφώσεων λόγω παραμενουσών τάσεων.

#### 6.4.6 Απαλοιφή των παραμενουσών τάσεων

Η πιο συχνή μέθοδος απαλοιφής παραμενουσών τάσεων σε προϊόντα SLM είναι η τοποθέτηση τους σε κλίβανο για ανόπτηση. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί προϋπάρχουσες τεχνολογίες και δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις ή τροποποίηση της κατεργασίας. Ωστόσο το προστιθέμενο αυτό στάδιο επεξεργασίας αυξάνει το κόστος και τον χρόνο παραγωγής και δεν προσφέρει πλήρης απαλοιφή των τάσεων. Η θέρμανση της πλάκας εκτύπωσης ή του θαλάμου του μηχανήματος κατά την παραγωγή επιβραδύνει την ψύξη του τεμαχίου και συνεπώς περιορίζει την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων. Κατά τον ίδιο τρόπο βοηθά η σάρωση κάθε στρώματος για δεύτερη φορά με τη δέσμη layers πριν την έναρξη του επόμενου στρώματος.

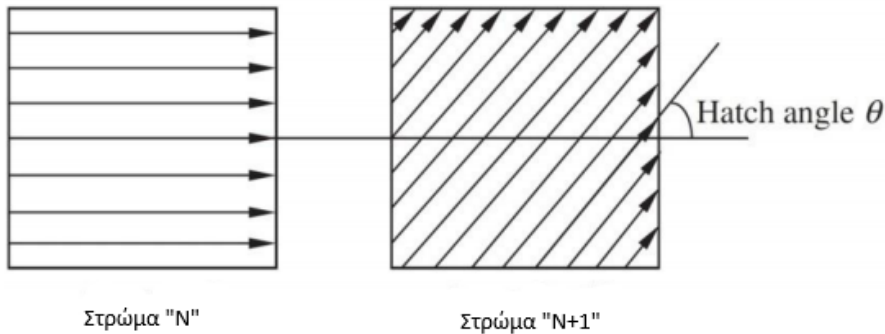
Ο προσανατολισμός του τεμαχίου είναι επίσης παράγοντας που επηρεάζει την εμφάνιση παραμενουσών τάσεων. Τεμάχια που κατασκευάζονται με μεγάλες οριζόντιες διαδρομές του layers είναι περισσότερο επιρρεπή σε παραμορφώσεις καθώς οι παραμένουσες τάσεις δρουν σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Με κατάλληλο προσανατολισμό του τεμαχίου το μήκος των διαδρομών μειώνεται όμως αυξάνεται ο χρόνος παραγωγής καθώς το ίδιο τεμάχιο κατασκευάζεται από περισσότερα στρώματα υλικού όπως φαίνεται στην εικόνα 56. (74)



Εικόνα 56 - Επίδραση του προσανατολισμού του τεμαχίου στο χρόνο παραγωγής - (74)

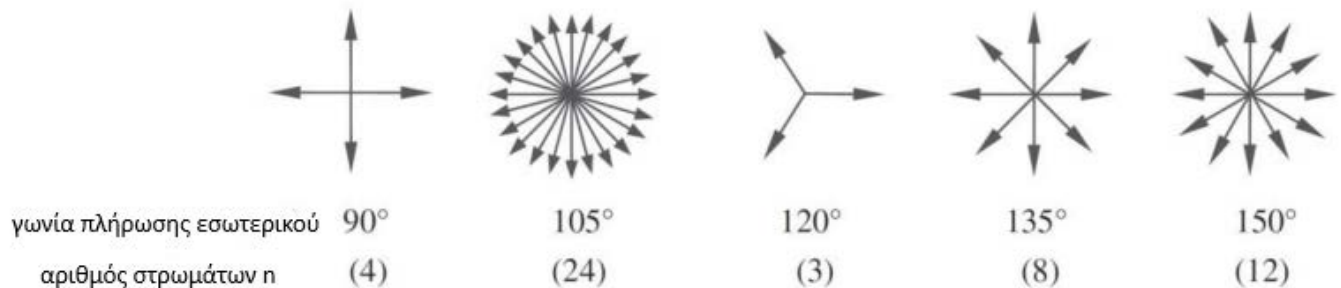
### 6.4.7 Ανισοτροπία

Όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους προσθετικής παραγωγής τα τελικά προϊόντα της SLM είναι εν γένει ανισότροπα. Σημαντική επίδραση στην ανισοτροπία στο οριζόντιο επίπεδο έχει η γωνία πλήρωσης εσωτερικού (hatch angle). Η γωνία αυτή ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στις διαδρομές του λέιζερ σε δύο διαδοχικά στρώματα όπως φαίνεται στην εικόνα 57.



Εικόνα 57 - Σχηματική αναπαράσταση του της γωνίας πλήρωσης εσωτερικού - (75)

Η γωνία πλήρωσης εσωτερικού καθορίζει τον αριθμό των στρωμάτων  $n$  μετά από τα οποία οι διαδρομές του λέιζερ αποκτούν ξανά τον αρχικό τους προσανατολισμό. Με αύξηση του αριθμού  $n$  οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώνονται και η ανισοτροπία στο οριζόντιο επίπεδο μειώνεται. Η τιμή  $105^\circ$  για την γωνία πλήρωσης εσωτερικού προσδίδει τις πιο ικανοποιητικές ιδιότητες στο παραγόμενο τεμάχιο για στρατηγική πλήρωσης παράλληλων γραμμών. Η εικόνα 58 απεικονίζει την σχέση μεταξύ γωνίας πλήρωσης και αριθμού στρωμάτων  $n$ . (75)



Εικόνα 58 - (75)

#### 6.4.8 Υλικά και εφαρμογές

Η περισσότερη έρευνα στα υλικά που μπορεί να κατεργασθεί η SLM αφορά τους χάλυβες, το τιτάνιο και τα κράματα νικελίου. Κάθε κατηγορία υλικών έχει διαφορετικές εφαρμογές ανάλογα με τις ιδιότητες της όπως η μηχανική αντοχή, η ολκιμότητα, η βιοσυμβατότητα κ.α. Καθώς η μέθοδος SLM έχει ακόμη υψηλό κόστος σε σχέση με τις συμβατικές κατεργασίες οι προτεινόμενες εφαρμογές των δύο μεθόδων είναι σε βιομηχανίες υψηλής προστιθέμενης αξίας.

Στον τομέα της υγείας η SLM έχει βρει εφαρμογή στην κατασκευή βιοσυμβατών εμφυτευμάτων. Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου στον τομέα αυτό είναι η απευθείας παραγωγή των εμφυτευμάτων χωρίς επιπλέον στάδια παραγωγής και η δυνατότητα εξατομίκευσης των εμφυτευμάτων με μικρό επιπλέον κόστος. Είναι επίσης δυνατή η κατασκευή εμφυτευμάτων με περιοχές χαμηλού πορώδους για την παραλαβή φορτίων και περιοχές υψηλού πορώδους ή κοιλότητες μέσα στις οποίες μπορούν να αναπτυχθούν ιστοί και οστά. Τα υλικά που είναι καταλληλότερα για την χρήση αυτή είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας 316L, καθώς και κράματα τιτανίου όπως το Ti-6Al-4V.

Όπως και οι περισσότερες μέθοδοι προσθετικής παραγωγής η SLM χαρίζει μεγάλη ελευθερία σχεδιασμού στο χρήστη και επιτρέπει την παραγωγή τεμαχίων με περίπλοκες εσωτερικές κοιλότητες. Για παράδειγμα στην χύτευση πλαστικών και μετάλλων καλούπια κατασκευασμένα με τη μέθοδο SLM που διαθέτουν εσωτερικές κοιλότητες ψύξης διασφαλίζουν την ομοιόμορφη ψύξη του χυτευμένου προϊόντος και περιορίζουν την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων.

Η ικανότητα της SLM να παράγει σύνθετα δικτυώματα έχει οδηγήσει την έρευνα στην κατασκευή κυψελιδωτών ελαφριών κατασκευών (lattices). Κατασκευές αυτού του είδους αποτελούνται από τρισδιάστατα κελιά που επαναλαμβάνονται στο χώρο και επιτρέπουν τον μηχανικό να μεταβάλλουν την πυκνότητα και την αντοχή του δικτυώματος ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Οι κατασκευές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως πυρήνας για σύνθετα υλικά που συνδυάζουν χαμηλό βάρος και υψηλή αντοχή.

Τα τελευταία χρόνια το παγκόσμιο ενδιαφέρον για την απευθείας παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων έχει αυξηθεί δραματικά. Η SLM προσφέρει τη δυνατότητα απευθείας παραγωγής περίπλοκων γεωμετριών χωρίς την ανάγκη ιδιοσυσκευών. Χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους παραγωγής, η κατασκευή ενός περίπλοκου εξαρτήματος συχνά απαιτεί την ένωση ή συναρμολόγηση πολλών απλούστερων εξαρτημάτων. Ο σχεδιασμός τέτοιων εξαρτημάτων συνήθως εστιάζει στη διευκόλυνση της παραγωγικής διαδικασίας και όχι στη βελτιστοποίηση της μορφής του εξαρτήματος για τη χρήση για την οποία προορίζεται. Η ελευθερία σχεδιασμού που χαρίζει η μέθοδος SLM επιτρέπει την παραγωγή σχημάτων ιδανικών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή σε λιγότερο χρόνο και με μικρότερη σπατάλη πρώτης ύλης. (70)

#### 6.4.9 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

- + Μεγάλη γκάμα διαθέσιμων υλικών
- + Απευθείας παραγωγή περίπλοκων σχημάτων
- + Μικρότερος χρόνος παράδοσης παραγγελιών σε σχέση με συμβατικές κατεργασίες
- + Ταυτόχρονη παραγωγή πολλών εξαρτημάτων
- Υψηλό κόστος εάν τα εξαρτήματα δεν είναι σχεδιασμένα για παραγωγή με SLM
- Απαιτούνται ειδικές γνώσεις για τη χρήση του εξοπλισμού και το σχεδιασμό εξαρτημάτων
- Μικρός διαθέσιμος χώρος κτισίματος
- Υψηλή επιφανειακή τραχύτητα
- Ανάγκη μετεπεξεργασίας των προϊόντων

#### 6.4.10 Μελλοντική έρευνα

Προς το παρόν υπάρχουν αρκετές δυσκολίες σχετικά με το κόστος των συστημάτων SLM, τις μηχανικές ιδιότητες και τις μέγιστες διαστάσεις των προϊόντων για να θεωρηθεί η SLM ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία. Το κόστος των συστημάτων SLM αναμένεται να μειωθεί στο μέλλον μόλις τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας λήξουν, τα μηχανήματα αρχίσουν να παράγονται σε μεγαλύτερες ποσότητες και νέες εταιρίες εισέρθουν στον κλάδο. Παράλληλα η συνεχής έρευνα σε υλικά πιο συμβατά με την κατεργασία και στην βελτιστοποίηση της κατεργασίας αναμένεται να βελτιώσει σε σημαντικό βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων SLM. Η SLM αποτελεί μία από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες προσθετικής παραγωγής και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει θα δημιουργήσουν νέες εφαρμογές οι οποίες απαιτούν απευθείας παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων.

### 6.5 Electron Beam Melting (Τήξη με Δέσμη Ηλεκτρονίων)

#### 6.5.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος EBM δημιουργεί μεταλλικά τεμάχια με την επιλεκτική τήξη μεταλλικής σκόνης χρησιμοποιώντας δέσμη ηλεκτρονίων. Η EBM μοιράζεται πολλά κοινά με τις μεθόδους SLS και SLM με κύριες διαφορές το μέσο τήξης της σκόνης και τα υλικά που μπορεί να κατεργαστεί. Η μέθοδος εμπορευματοποιήθηκε από την σουηδική εταιρία ARCAM το 1997. Προς το παρόν η ARCAM είναι η μοναδική εταιρία στον κόσμο που κατασκευάζει συστήματα EBM.

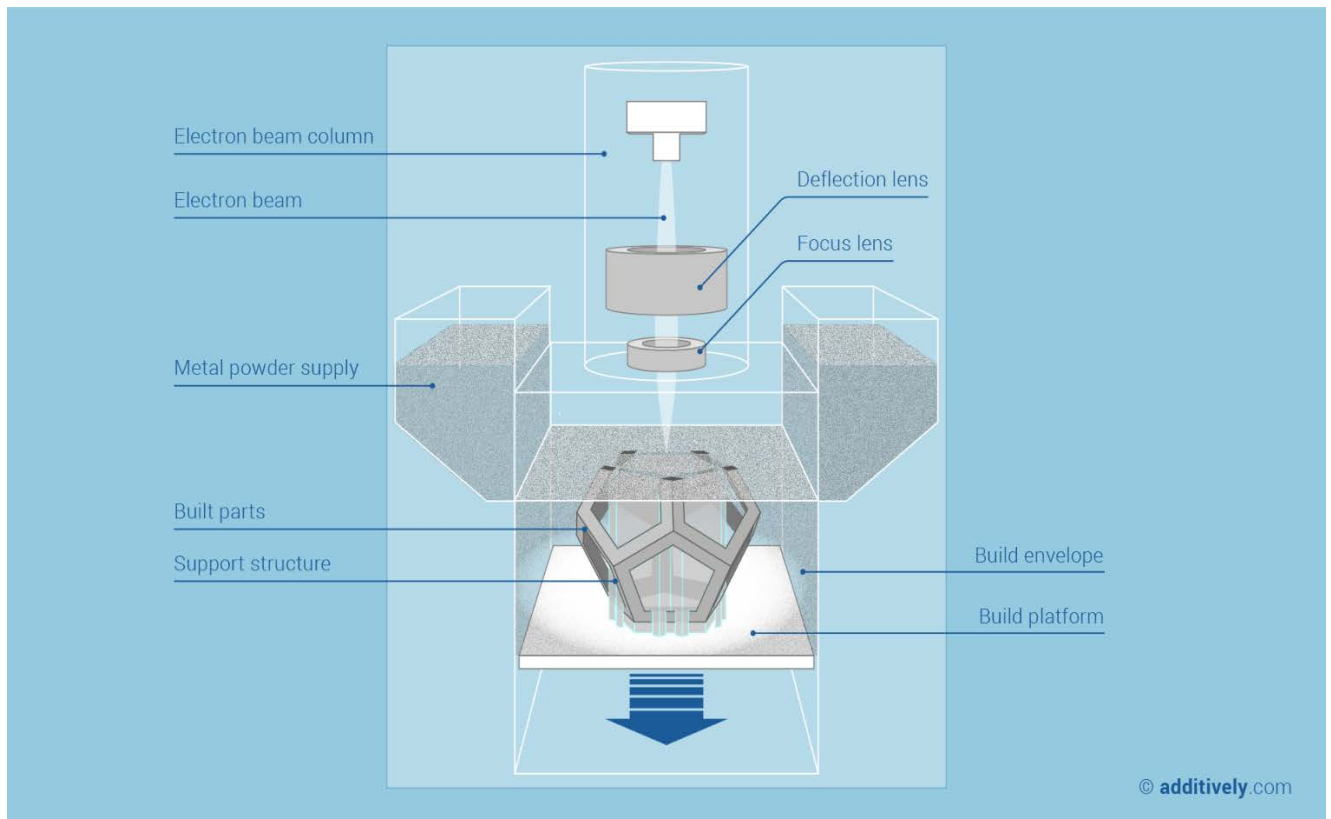
#### 6.5.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Πριν την έναρξη της κατεργασίας το δοχείο του μηχανήματος πληρώνεται με μεταλλική σκόνη και ο ατμοσφαιρικός αέρας αφαιρείται από το θάλαμο με την πίεση να προσεγγίζει τιμές κοντά στα  $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  mbar. Οι συνθήκες κενού είναι απαραίτητες για την λειτουργία της δέσμης ηλεκτρονίων καθώς αυτή αντιδρά με τα μόρια του αέρα. Μικρή ποσότητα ηλίου εισάγεται στο θάλαμο σε πίεση περίπου  $10^{-3}$  mbar

ώστε η σκόνη να μην αναπηδά από την επιφάνεια εκτύπωσης λόγω ηλεκτροστατικής φόρτισης (smoking effect).

Η κατεργασία ξεκινά απλώνοντας τη σκόνη στην επιφάνεια του τραπεζιού του μηχανήματος. Στην EBM ηλεκτρόνια εκπέμπονται σε υψηλές ταχύτητες από νήμα βολφραμίου και κατευθύνονται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικών φακών στην επιφάνεια της μεταλλικής σκόνης. Οι ηλεκτρομαγνητικοί φακοί επιτρέπουν τη δέσμη να κινείται χωρίς αδρανειακές δυνάμεις και να αναπτύσσει ταχύτητα σάρωσης έως  $10^5$  m/s. Η ισχύς της δέσμης ηλεκτρονίων είναι τυπικά κοντά στα 3 kW. Όταν τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τους κόκκους της σκόνης η κινητική τους ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική με αποτέλεσμα την θέρμανση της σκόνης. Κάθε στρώμα σκόνης σαρώνεται σε δύο στάδια. Αρχικά δέσμη υψηλής έντασης με υψηλή ταχύτητα σάρωσης χρησιμοποιείται για την προθέρμανση της σκόνης. Έπειτα δέσμη χαμηλότερης έντασης και χαμηλότερης ταχύτητας σάρωσης χρησιμοποιείται για την τήξη της σκόνης. Οι κόκκοι της σκόνης συγκολλούνται μεταξύ τους σχηματίζοντας την στρώση του παραγόμενου τεμαχίου. Στη συνέχεια η τράπεζα υποχωρεί και απλώνεται ένα νέο στρώμα σκόνης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του τεμαχίου. Τα βασικά μηχανικά μέρη ενός μηχανήματος EBM φαίνονται στην εικόνα 59.

Μετά το πέρας της κατεργασίας όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους PBF το τεμάχιο βρίσκεται πλήρως βυθισμένο στη σκόνη και δεν μπορεί να αφαιρεθεί μέχρι την ψύξη του μηχανήματος. Μετά την αφαίρεση του το τεμάχιο καθαρίζεται από υπολείμματα σκόνης και μπορεί να κατεργαστεί περαιτέρω με συμβατικές μεθόδους. (76,77)



Εικόνα 59 - Σχηματική αναπαράσταση της κατεργασίας EBM - (78)

### 6.5.3 Χαρακτηριστικά

Η μέθοδος EBM δεν έχει ανάγκη προσθήκης υλικού για υποστήριξη του παραγόμενου τεμαχίου καθώς αυτό υποστηρίζεται από τη σκόνη που το περιβάλλει. Ωστόσο τις περισσότερες φορές προστίθεται υλικό σε συγκεκριμένες θέσεις που εξαρτώνται από τη γεωμετρία του τεμαχίου, ώστε να διευκολυνθεί η απαγωγή θερμότητας από το τεμάχιο προς την περιβάλλουσα σκόνη. Αυτό συμβαίνει επειδή υψηλές θερμοκρασίες τεμαχίου μπορούν να προκαλέσουν τη στρέβλωση του ενώ υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος υλικού δρουν ως παράγοντας απαλοιφής των παραμενουσών τάσεων. Το προστιθέμενο υλικό αφαιρείται κατά την μετεπεξεργασία του τεμαχίου.

Στην EBM χρησιμοποιούνται κυρίως σκόνες τιτανίου ή κράματα χρωμίου-κοβαλτίου και δεν υπάρχει η δυνατότητα κατεργασίας πολυμερών ή κεραμικών σκονών λόγω της χρήσης της δέσμης ηλεκτρονίων που είναι αποτελεσματική μόνο σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά.

### 6.5.4 Παράμετροι της κατεργασίας

Η παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων με διαστατική ακρίβεια και τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες απαιτεί την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων της κατεργασίας. Κάποιες παράμετροι όπως η διάμετρος της δέσμης ηλεκτρονίων εξαρτώνται από το συγκεκριμένο μηχάνημα EBM και δεν μπορούν να ελεγχθούν από το χειριστή. Άλλες παράμετροι όπως η θερμοκρασία τήξης της σκόνης εξαρτώνται από το χρησιμοποιούμενο υλικό και καθορίζουν άλλες παραμέτρους όπως την θερμοκρασία προθέρμανσης.

Οι σημαντικότερες παράμετροι του μηχανήματος που μπορεί να ελέγξει ο χειριστής είναι η ταχύτητα σάρωσης, η ισχύς της δέσμης, το μοτίβο των διαδρομών για την πλήρωση του εσωτερικού, η απόσταση των διαδρομών και το πάχος στρώματος. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν το μέγεθος και το βάθος της τηγμένης περιοχής, την κατανομή θερμοκρασιών, το ρυθμό ψύξης και τον αριθμό των θερμικών κύκλων του τεμαχίου που με τη σειρά τους καθορίζουν το μηχανισμό στερεοποίησης και τη μικροδομή του τεμαχίου.

Οι παραπάνω παράμετροι συνοψίζονται ορίζοντας την πυκνότητα ενέργειας εισόδου :

$$E = \frac{P}{v t s} \text{ [J/mm}^3\text{]}$$

Όπου P η ισχύς της δέσμης ηλεκτρονίων, v η ταχύτητα σάρωσης, t το πάχος στρώματος και s η απόσταση διαδρομών. Η πυκνότητα ενέργειας εισόδου έχει καθοριστική επίδραση στη ποιότητα και την αντοχή του τελικού προϊόντος. Η δημιουργία μεγάλης περιοχής τηγμένης σκόνης είναι απαραίτητη για την μείωση του πορώδους του τεμαχίου και αυτό προϋποθέτει τη σωστή ρύθμιση της πυκνότητας ενέργειας εισόδου. (79)

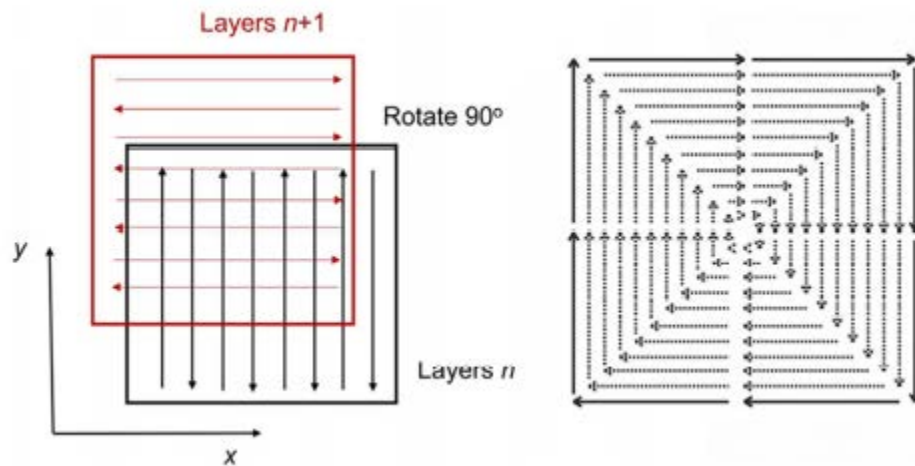
Η εμφάνιση πορώδους στη μικροδομή του παραγόμενου τεμαχίου αποτελεί πρόβλημα σε όλες τις μεθόδους προσθετικής παραγωγής μεταλλικών υλικών. Στην EBM το πορώδες προκαλείται συνήθως από παγιδευμένα αέρια ή λόγω ανεπαρκούς τήξης του υλικού. Στην περίπτωση των παγιδευμένων αερίων οι πόροι έχουν σφαιρικό σχήμα και προέρχονται είτε από σφάλματα στην διαδικασία παραγωγής της μεταλλικής σκόνης ή από λανθασμένη διαχείριση της. Μη σφαιρικοί πόροι τυχαίου σχήματος οφείλονται σε ασταθείς συνθήκες κατά το σχηματισμό της ζώνης τήξης και ανεπαρκής ισχύς εισόδου για την τήξη του υλικού. Ωστόσο, πορώδες μπορεί να εμφανιστεί και ως αποτέλεσμα υπερβολικής ισχύος καθώς οι συνθήκες κενού ευνοούν την εξάτμιση πτητικών κραματικών στοιχείων σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυξάνοντας την ισχύ εισόδου η απώλεια πτητικών στοιχείων αυξάνεται εκθετικά με άμεσες συνέπειες στη μικροδομή και την μηχανική συμπεριφορά του τεμαχίου.



Η σκόνη που χρησιμοποιείται στην EBM επηρεάζει άμεσα την ποιότητα εκτύπωσης. Το πάχος στρώματος μπορεί να είναι πολύ λεπτό έως 0.01 mm. Η δημιουργία ενός ομαλού στρώματος σκόνης είναι απαραίτητη για την ομοιογενή τήξη της σκόνης και την παραγωγή ενός προϊόντος με χαμηλό πορώδες. Ιδιότητες της σκόνης όπως η μορφολογία, η κατανομή του μεγέθους σωματιδίων και τα χαρακτηριστικά ροής πρέπει να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων για την παραγωγή προϊόντων με επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Για την πλήρωση του εσωτερικού υπάρχουν δύο κύρια χρησιμοποιούμενα μοτίβα. Αυτά είναι το μοτίβο των παράλληλων γραμμών και το περιμετρικό μοτίβο. Στην πράξη συνήθως χρησιμοποιείται ο συνδυασμός τους δηλαδή η δημιουργία μερικών εξωτερικών περιμέτρων και στη συνέχεια η πλήρωση του εσωτερικού με παράλληλες γραμμές. Αυτό γίνεται διότι η περιμετρική κίνηση στην εξωτερική επιφάνεια του τεμαχίου οδηγεί σε καλύτερη ανάλυση στο οριζόντιο επίπεδο και οι παράλληλες γραμμές με εναλλασσόμενη διεύθυνση σε κάθε στρώμα βοηθούν στην μείωση της ανισοτροπίας. Οι στρατηγικές πλήρωσης φαίνονται στην εικόνα 60.

Με επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων κατεργασίας οι μηχανικές ιδιότητες ενός προϊόντος EBM μπορούν να είναι ισοδύναμες με αυτές των προϊόντων συμβατικών κατεργασιών. Επιπλέον είναι δυνατή η τοπική προσαρμογή των ιδιοτήτων αυτών μεταβάλλοντας τοπικά τις παραμέτρους της κατεργασίας.(79)



Εικόνα 60 - Μοτίβο πλήρωσης παράλληλων γραμμών (αριστερά) και περιμετρικό μοτίβο (δεξιά) - (79)

### 6.5.5 Σύγκριση των EBM και SLM

Σε σχέση με την SLM, η EBM έχει ταχύτερο ρυθμό παραγωγής (έως 80 cm<sup>3</sup> υλικού ανά ώρα) λόγω της υψηλότερης ισχύος της δέσμης ηλεκτρονίων και της υψηλότερης ταχύτητας σάρωσης. Το κόστος του συστήματος της δέσμης ηλεκτρονίων είναι χαμηλότερο από το σύστημα λέιζερ της SLM και επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της ισχύος και της διαμέτρου της δέσμης. Επιπλέον η χρήση δέσμης ηλεκτρονίων επιτρέπει την ευκολότερη κατεργασία ανακλαστικών υλικών όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο. Τα παραγόμενα προϊόντα στην EBM υποφέρουν λιγότερο από την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων σε σχέση με την SLM λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας του θαλάμου παραγωγής (700-900°C). Συνεπώς στην EBM δεν είναι απαραίτητη η τοποθέτηση του τεμαχίου στον κλίβανο για ανόπτηση μετά την

παραγωγή. Ωστόσο η μικροδομή των προϊόντων EBM είναι πιο χονδρόκοκκη λόγω της πιο αργής ψύξης. Η EBM παράγει προϊόντα με πιο σύνθετη γεωμετρία καθώς δεν υπάρχει ανάγκη προσθήκης υποστηρίξεων. Επειδή η κατεργασία EBM λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον κενού τα παραγόμενα προϊόντα έχουν λιγότερες εσωτερικές ατέλειες σε σχέση με την SLM και μπορούν να κατασκευαστούν έως και κατά 99.9% συμπαγή με τις βέλτιστες παραμέτρους κατεργασίας. Τα παραπάνω καθιστούν την EBM ιδανική για παραγωγή προϊόντων από υλικά υψηλών επιδόσεων που είναι δύσκολο να κατεργασθούν με συμβατικές μεθόδους. Το κύριο μειονέκτημα της EBM έναντι της μεθόδου SLM είναι η τραχύτερη ποιότητα επιφανείας και η χαμηλότερη διαστατική ακρίβεια των προϊόντων. (77)

#### 6.5.6 Εφαρμογές

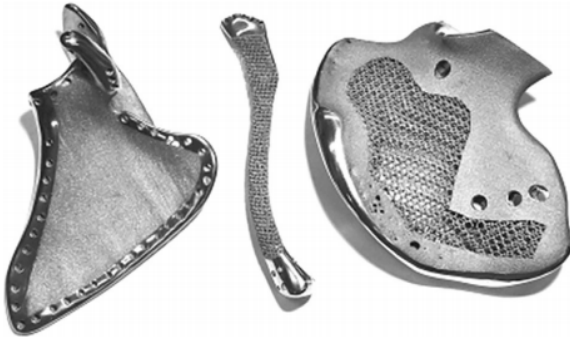
Η ικανότητα της δέσμης ηλεκτρονίων να επεξεργάζεται μεγάλους όγκους χάλυβα ανά ώρα ήταν το αρχικό κίνητρο για τη χρήση της ως πηγή ισχύος. Αρχικά η διαφημιστική στρατηγική της Arcam για την προώθηση της EBM βασιζόταν σε αυτό το πλεονέκτημα. Η μέθοδος προοριζόταν να έχει ως κύριες εφαρμογές την κατασκευή καλουπιών για χύτευση με έγχυση και εξαρτημάτων από εργαλειοχάλυβα και ανοξείδωτο χάλυβα.

Την τελευταία δεκαετία το κυριότερο μέρος της έρευνας έχει στραφεί στην επεξεργασία κραμάτων τιτανίου ενώ οι χάλυβες έχουν μείνει στο περιθώριο. Το υλικό με το περισσότερο ερευνητικό ενδιαφέρον είναι πλέον το Ti-6Al-4V. Τα κράματα τιτανίου έχουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα σε σχέση με ανοξείδωτους χάλυβες σαν τον 316L όπως υψηλότερη μηχανική και διαβρωτική αντοχή και χαμηλότερο βάρος.

Η παρούσα τεχνολογία EBM έχει τη δυνατότητα να παράγει προϊόντα υψηλής ποιότητας με περίπλοκη γεωμετρία, χαμηλό πορώδες και εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες από κράματα τιτανίου με δεδομένη τη χρήση των απαραίτητων παραμέτρων κατεργασίας. Τα κράματα τιτανίου χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή βιοσυμβατών εμφυτευμάτων και εξαρτημάτων για αεροσκάφη.

Στον τομέα της αεροδιαστημικής το χαμηλό βάρος των κραμάτων αυτών σε συνδυασμό με την σχεδιαστική ελευθερία που χαρίζει η μέθοδος EBM επιτρέπουν την παραγωγή ελαφριών εξαρτημάτων με βελτιστοποιημένη εσωτερική δομή (structure optimization) που βοηθούν στην εξοικονόμηση καυσίμου.

Στον τομέα της υγείας η τεχνική της βελτιστοποίησης δομής επιτρέπει την παραγωγή πλήρως βιοσυμβατών εμφυτευμάτων από κράματα τιτανίου με μέτρο ελαστικότητας πλησιέστερο σε αυτό των οστών όπως αυτά της εικόνας 61. Αυτό βοηθά στην ομοιόμορφη κατανομή φορτίου μεταξύ εμφυτεύματος και οστών και στην αποφυγή της οστεοπενίας που συχνά παρατηρείται σε ασθενείς με εμφυτεύματα (stress shielding effect). Επιπλέον είναι δυνατή η παραγωγή περίπλοκων εσωτερικών κοιλοτήτων που προσφέρουν χώρο για την ανάπτυξη των οστών στο εσωτερικό των εμφυτευμάτων και επιταχύνουν την ανάρρωση του ασθενή. (77,79)



Εικόνα 61 - Εμφυτεύματα γονάτου και ισχίου κατασκευασμένα με τη μέθοδο Electron Beam Melting - (79)

Τα κράματα νικελίου παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αντοχή στον ερπυσμό και στη διάβρωση. Λόγω των ιδιοτήτων αυτών τα κράματα νικελίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε κινητήρες αεροσκαφών και τουρμπίνες σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κράματα αυτά χωρίζονται σε συγκολλησιμα και μη συγκολλησιμα με τα τελευταία να είναι ιδιαίτερα δύσκολο να κατεργασθούν με μεθόδους προσθετικής παραγωγής όπως η SLM καθώς αυτή αποτελεί ουσιαστικά μια κατεργασία συγκόλλησης. Ωστόσο η υψηλή θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η EBM (έως 1100 °C) επιτρέπει την κατεργασία των μη συγκολλησιμων κραμάτων νικελίου με χαμηλό κίνδυνο εμφάνισης ρωγμών.

Τα κράματα χαλκού χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για συστήματα απαγωγής θερμότητας. Η ιδιότητα αυτή σε συνδυασμό με την σχεδιαστική ελευθερία που προσφέρουν οι τεχνολογίες προσθετικής παραγωγής επιτρέπουν την παραγωγή εναλλακτών θερμότητας με σύνθετες γεωμετρίες που δεν θα ήταν δυνατό να κατασκευασθούν με συμβατικές μεθόδους. Η κατεργασία κραμάτων χαλκού με τις περισσότερες μεθόδους προσθετικής παραγωγής είναι συνήθως δύσκολη καθώς η υψηλή θερμική αγωγιμότητα των κραμάτων αυτών προκαλεί πολύ γρήγορη ψύξη της τηγμένης ζώνης λόγω μεταφοράς της θερμότητας σε γειτονικές περιοχές του υλικού. Κατά συνέπεια η ισχύς εισόδου είναι συχνά ανεπαρκής για τη διατήρηση μιας συνεχόμενης γραμμής τηγμένου υλικού. Επιπλέον πολλά κράματα χαλκού ανακλούν μεγάλο ποσοστό των ακτινών που εκπέμπει το layers της SLM και έτσι η μέθοδος περιορίζεται στη κατεργασία μόνο ορισμένων κραμάτων χαλκού με χαμηλή ανακλαστικότητα. Αντιθέτως στην EBM επειδή ο μηχανισμός ανάκλασης και απορρόφησης των ηλεκτρονίων είναι πολύ διαφορετικός από αυτόν των φωτονίων, η ισχύς εισόδου επαρκεί για την κατεργασία ακόμη και αγνού χαλκού με πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα. (77,80,81)

### 6.5.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

- + Χαμηλό πορώδες λόγω πλήρους τήξης της σκόνης
- + Υψηλή Ταχύτητα παραγωγής
- + Δυνατότητα ανακύκλωσης της σκόνης
- + Μικρότερη ανάγκη υποστηρίξεων
- Μικρός όγκος εκτύπωσης
- Μικρή γκάμα διαθέσιμων υλικών
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού και υλικών

### 6.5.8 Μελλοντική έρευνα

Προς το παρόν είναι αδύνατο ένα προϊόν προσθετικής παραγωγής να κατασκευαστεί ως ακριβές αντίγραφο του ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου. Έτσι και τα προϊόντα EBM παράγονται με ατέλειες λόγω σφαλμάτων στην κατεργασία, δεν είναι πλήρως συμπαγή και εμφανίζουν τραχύτητα στην επιφάνειά τους. Παρόλο που τα προϊόντα EBM έχουν χαμηλό πορώδες σε σχέση με αυτά άλλων μεθόδων προσθετικής παραγωγής η παρουσία πορώδους έχει μεγάλο αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες ιδίως στην αντοχή κόπωσης. Έρευνες στη συμπεριφορά δοκιμών EBM σε δυναμική καταπόνηση στη πολυκυκλική περιοχή φανερώνουν ότι οι ατέλειες συμπεριφέρονται ως σημεία έναρξης ρωγμών και παρουσιάζεται μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα. Είναι επομένως, απαραίτητη η καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των παραμέτρων της κατεργασίας στην εμφάνιση ατελειών στο τελικό προϊόν. Καθώς η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει το στρώμα σκόνης η ενέργεια που απορροφάται μεταφέρεται και στις γειτονικές περιοχές. Στις περιοχές αυτές η σκόνη δεν τήκεται πλήρως και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σκόνη να προσκολλάται στην επιφάνεια του τεμαχίου. Το φαινόμενο αυτό αυξάνει την επιφανειακή τραχύτητα των προϊόντων και δημιουργεί επιφανειακές ατέλειες που μπορούν να γίνουν σημεία έναρξης ρωγμών.

Η μέθοδος EBM δεν αποτελεί ακόμη ώριμη τεχνολογία και οι δυνατότητες της δέσμης ηλεκτρονίων δεν έχουν ερευνηθεί πλήρως. Με την παρούσα τεχνολογία η διάμετρος της δέσμης δεν είναι σταθερή αλλά αυξάνεται ανάλογα με τη ρύθμιση της ισχύος. Αυτό προκαλεί προβλήματα στην ακρίβεια της κατεργασίας σε λειτουργία υψηλής ισχύος. Η έρευνα στο μέλλον πιθανότατα θα εστιάσει στον καλύτερο έλεγχο της κατεργασίας, τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της κατεργασίας και την ανάπτυξη υλικών με χαρακτηριστικά πιο συμβατά με τη μέθοδο EBM.

## Ενότητα 7 - Direct Energy Deposition (Εναπόθεση Ενέργειας)

### 7.1 Περιγραφή της μεθόδου

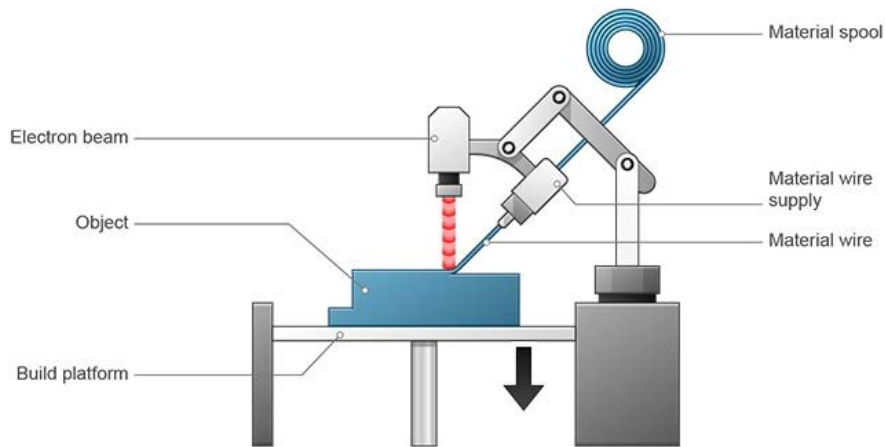
Ο όρος DED αναφέρεται σε ομάδα μεθόδων προσθετικής παραγωγής που χρησιμοποιούν κυρίως μεταλλική πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης ή σύρματος η οποία τήκεται συνήθως με τη χρήση δέσμης layers ή δέσμης ηλεκτρονίων. Το υλικό εξέρχεται από ακροφύσιο στερεωμένο σε ρομποτικό βραχίονα ή κεφαλή και εναποτίθεται στη λίμνη τηγμένου υλικού που δημιουργείται επάνω στο κατεργαζόμενο τεμάχιο από την προσθήκη θερμότητας. Μετά την εναπόθεση ενός στρώματος υλικού η τράπεζα υποχωρεί ώστε να ξεκινήσει η εναπόθεση του επόμενου στρώματος. Η διαδικασία είναι παρόμοια με τη μέθοδο FDM αλλά στη DED η κεφαλή του μηχανήματος έχει δυνατότητες κίνησης σε πολλαπλούς άξονες και η τράπεζα μπορεί να μετατοπίζεται ή να περιστρέφεται καθιστώντας τα μηχανήματα DED τετραξονικά ή πενταξονικά. Η κατασκευή ενός εξαρτήματος λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό ελεγχόμενου θαλάμου ο οποίος πληρώνεται με αδρανές αέριο ή επικρατούν συνθήκες κενού.

Η τεχνολογία DED συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως Laser Engineered Net Shaping (LENS), Direct Metal Deposition (DMD), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) κ.α. ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή ή μέθοδο. Οι μέθοδοι DED αποτελούν την δεύτερη πιο διαδεδομένη τεχνολογία προσθετικής παραγωγής μεταλλικών υλικών, μετά την τεχνολογία PBF. (82)

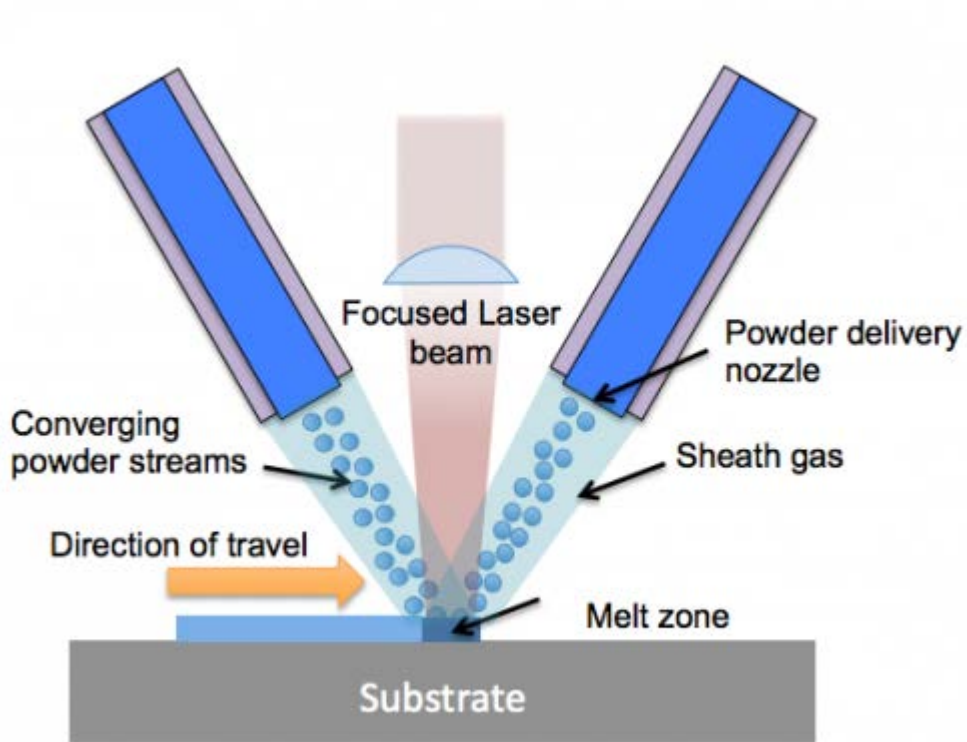
### 7.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Το επίκεντρο ενός συστήματος DED είναι το ακροφύσιο τροφοδοσίας υλικού και η πηγή της δέσμης που συγκροτούνται σε κεφαλή με ψηφιακή καθοδήγηση ή σε ρομποτικό βραχίονα. Η δέσμη δημιουργεί λίμνη τηγμένου υλικού επάνω στο παραγόμενο τεμάχιο και ταυτόχρονα το ακροφύσιο τροφοδοτεί την περιοχή αυτή με υλικό σε μορφή σπρέι. Το εναποτιθέμενο υλικό στερεοποιείται και συγκολλάται στην επιφάνεια του παραγόμενου τεμαχίου. Η συνδυασμένη κίνηση ακροφυσίου, δέσμης και τράπεζας διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

Τα μηχανήματα DED μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την μορφή του τροφοδοτούμενου υλικού (σκόνη ή σύρμα) και τον τρόπο με τον οποίο αυτό τήκεται (δέσμη λέιζερ, δέσμη ηλεκτρονίων, ηλεκτρικό τόξο). Κάθε κατηγορία συστήματος DED έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στις εικόνες 62 και 63 φαίνονται τα βασικά μηχανικά μέρη των συστημάτων σύρματος και σκόνης. Τα συστήματα λέιζερ έχουν μικρότερη διάμετρο δέσμης και προσφέρουν ανώτερη ποιότητα επιφάνειας καθώς εναποθέτουν λεπτότερα στρώματα υλικού με μικρότερη οριζόντια απόσταση μεταξύ των ινών. Τα συστήματα που λειτουργούν με δέσμη ηλεκτρονίων προσφέρουν υψηλότερο ρυθμό εναπόθεσης υλικού και χαμηλότερες παραμένουσες τάσεις στα παραγόμενα τεμάχια. (83)

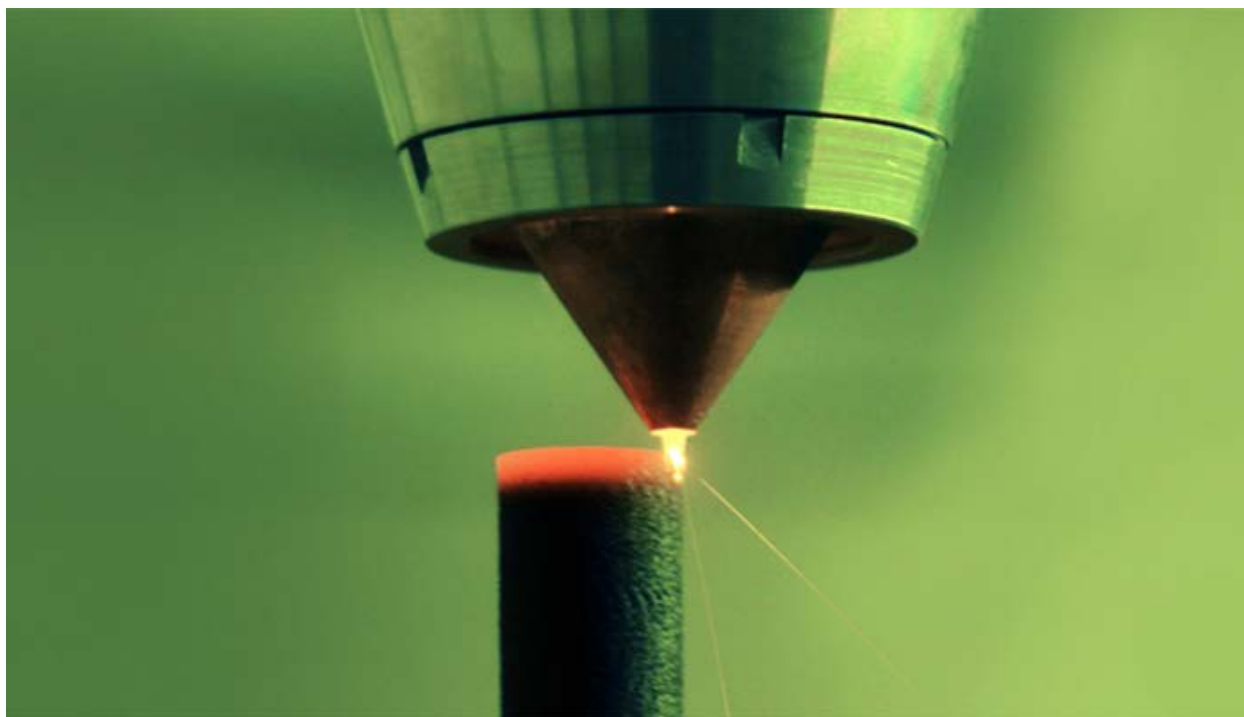


Εικόνα 62 - Κατεργασία Direct Energy Deposition με δέσμη ηλεκτρονίων και πρώτη ύλη σε μορφή σύρματος – (82)



Εικόνα 63 - Κατεργασία Direct Energy Deposition με λέιζερ και πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης - (82)





Εικόνα 64 - Κατεργασία DED - (82)

Η λίμνη τηγμένου μετάλλου που δημιουργείται κατά την κατεργασία DED όπως φαίνεται στην εικόνα 64, ευνοεί την οξείδωση και για αυτό το λόγο πραγματοποιείται σε ελεγχόμενο θάλαμο ή με τοπική προστασία αδρανούς αερίου. Ο θάλαμος πληρώνεται με αδρανές αέριο για την περίπτωση των μηχανημάτων με δέσμη λέιζερ και ηλεκτρικού τόξου. Για την χρήση δέσμης ηλεκτρονίων επικρατούν συνθήκες κενού. Η πλήρωση του θαλάμου με αδρανές αέριο (συνήθως Αργό) δημιουργεί περιβάλλον υψηλής ποιότητας και είναι η συνηθέστερη επιλογή. Την υψηλότερη ποιότητα συνθηκών προσφέρει ο θάλαμος κενού αλλά με το υψηλότερο κόστος. Επιπλέον η χαμηλή πίεση στο θάλαμο μπορεί να προκαλέσει την ανεπιθύμητη εξάτμιση στοιχείων από τη λίμνη τηγμένου υλικού. Τοπική προστασία με ροή αδρανούς αερίου απευθείας στην περιοχή εναπόθεσης υλικού επιλέγεται για τεμάχια μεγάλων διαστάσεων που θα απαιτούσαν θάλαμο υψηλού κόστους.

Ο σχηματισμός της λίμνης και η επιτυχής συγκόλληση του υλικού απαιτούν μεγάλη παροχή θερμότητας με αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης κοντά στην περιοχή όπου προστίθεται υλικό. Οι μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στο εσωτερικό της ζώνης αυτής δημιουργούν εσωτερικές τάσεις που μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις ή αποκόλληση στρωμάτων στο τελικό προϊόν. Για αυτό το λόγο είναι συχνά απαραίτητη η θερμική κατεργασία των προϊόντων μετά την παραγωγή. Κατά το σχεδιασμό εξαρτημάτων που πρόκειται να κατασκευαστούν με μεθόδους DED δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη βελτιστοποίηση των διαδρομών της κεφαλής μέσω του λογισμικού ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι εσωτερικές τάσεις.

Ο σχηματισμός της λίμνης κατά την DED δεν επιτρέπει τη δημιουργία επιφανειών με μεγάλη αρνητική γωνία κλίσης ούτε περίπλοκων εσωτερικών γεωμετριών και για αυτό το λόγο πολλά συστήματα DED διαθέτουν τράπεζες με δυνατότητα περιστροφής σε έναν ή δύο άξονες. Η προσέγγιση αυτή απαιτεί δαπανηρό εξοπλισμό και λογισμικό χωρίς ανάλογη αύξηση στις δυνατότητες παραγωγής πολύπλοκων σχημάτων.

Ο διαθέσιμος όγκος για εκτύπωση DED κυμαίνεται από περίπου 200 mm έως μερικά μέτρα σε κάθε διάσταση. Συστήματα με μεγάλο διαθέσιμο όγκο παράγουν κομμάτια απλής γεωμετρίας, χαμηλής ανάλυσης και πιο επιρρεπή στην εμφάνιση σημαντικών εσωτερικών τάσεων. (82)

### 7.3 Παράμετροι της Κατεργασίας

Η ποιότητα ενός εξαρτήματος κατασκευασμένο με τη μέθοδο DED εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους της κατεργασίας. Η ισχύς και η διάμετρος της δέσμης, η ταχύτητα σάρωσης και ο ρυθμός τροφοδοσίας της πρώτης ύλης είναι οι κύριες παράμετροι της κατεργασίας και μπορούν να μεταβληθούν από τον χειριστή του μηχανήματος. (83)

Η ισχύς εναπόθεσης επηρεάζει το ύψος και το πλάτος της εναποτιθέμενης ίνας υλικού. Με αύξηση της ισχύος αυξάνεται το ύψος και το πλάτος της ίνας και βελτιώνεται η ποιότητα επιφανείας του τεμαχίου λόγω της πλήρους τήξης του τροφοδοτούμενου υλικού.

Η ταχύτητα σάρωσης ρυθμίζεται ώστε να προστίθεται θερμότητα με τον επιθυμητό ρυθμό. Χαμηλή ταχύτητα σάρωσης μπορεί να προκαλέσει υπερβολική προσθήκη θερμότητας ενώ πολύ υψηλή ταχύτητα σάρωσης προκαλεί την μη επαρκή τήξη του υλικού. Η ταχύτητα επηρεάζει και το σχήμα της λίμνης τηγμένου υλικού. Χαμηλές ταχύτητες σάρωσης δημιουργούν λίμνη με κυκλικό σχήμα ενώ υψηλές ταχύτητες δημιουργούν σχήμα σταγόνας. Λίμνη με σχήμα σταγόνας μπορεί να δημιουργήσει ανεπιθύμητη μικροδομή και εμφάνιση ρωγμών.

Ο ρυθμός τροφοδοσίας καθορίζει την ποσότητα υλικού που εισάγεται στην τηγμένη λίμνη. Αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας προκαλεί αύξηση στο ύψος και το πλάτος της εναποτιθέμενης ίνας καθώς και στην τραχύτητα επιφανείας.

Δύο μεγέθη που συνοψίζουν τις πιο σημαντικές παραμέτρους της κατεργασίας DED είναι η πυκνότητα ενέργειας και η πυκνότητα τροφοδοσίας. Η πυκνότητα ενέργειας ορίζεται ως

$$E = \frac{P}{vD} \text{ [J/mm}^2\text{]}$$

όπου P είναι η ισχύς εναπόθεσης, v η ταχύτητα σάρωσης και D η διάμετρος της δέσμης. Η πυκνότητα ενέργειας εκφράζει την ενέργεια εισόδου ανά μονάδα επιφανείας που είναι υπεύθυνη για την τήξη του υλικού τροφοδοσίας και το σχηματισμό της λίμνης στο παραγόμενο τεμάχιο. Η πυκνότητα τροφοδοσίας ορίζεται ως

$$F = \frac{G}{vD} \text{ [g/mm}^2\text{]}$$

όπου G είναι η παροχή μάζας της πρώτης ύλης. Χρησιμοποιώντας την πυκνότητα ενέργειας και τροφοδοσίας είναι δυνατόν να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά της εναποτιθέμενης ίνας και το σχήμα της τηγμένης λίμνης.

Όταν η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης είναι υπερβολικά υψηλή ή όταν η τηγμένη λίμνη αποκτά σχήμα με μεγάλο λόγο εμβαδού προς όγκο συχνά παρατηρείται εξάτμιση κραματικών στοιχείων. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται συνήθως σε συστήματα με δέσμη ηλεκτρονίων καθώς η κατεργασία λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον κενού που ευνοεί την εξάτμιση στοιχείων με υψηλή τάση ατμών όπως το μαγνήσιο, το μαγγάνιο, το χρώμιο κ.α. Η απώλεια ορισμένων στοιχείων οδηγεί σε διαφορετική μικροδομή του τελικού προϊόντος η οποία μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες στις μηχανικές του ιδιότητες. (84)

Η επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων για το υλικό κατεργασίας είναι απαραίτητη για την παραγωγή ενός ποιοτικού εξαρτήματος και καθορίζουν τα υλικά που είναι περισσότερο συμβατά με την μέθοδο DED.

Τα προϊόντα DED εμφανίζουν πορώδες στη μικροδομή τους το οποίο μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως ασταθές μέγεθος της τηγμένης λίμνης, σωματίδια σκόνης που δεν έλιωσαν επαρκώς, διάκενα μεταξύ των εναποτιθέμενων ιών υλικού και αέρια που παγιδεύτηκαν στο υλικό είτε κατά την παραγωγή του τεμαχίου είτε κατά την παραγωγή της μεταλλικής σκόνης.

Οι πόροι που οφείλονται σε αέρια έχουν σφαιρικό σχήμα και σχετικά μικρό μέγεθος που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10  $\mu\text{m}$  – 200  $\mu\text{m}$ . Τα αέρια συνήθως προέρχονται από το ακροφύσιο του συστήματος όταν χρησιμοποιείται τοπική προστασία αδρανούς αερίου σε συνδυασμό με υψηλή πυκνότητα ενέργειας εισόδου. (85)

## 7.4 Υλικά

Η μέθοδος DED μπορεί να διαχειριστεί τα περισσότερα συγκολλησιμα μέταλλα σε μορφή σύρματος ή σκόνης. Τα περισσότερα συστήματα τροφοδοτούνται με σύρματα που χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις ή σκόνες κονιομεταλλουργίας. Η χρήση σύρματος έχει το πλεονέκτημα της πλήρους αξιοποίησης του τροφοδοτούμενου υλικού αλλά παράγει επιφάνειες με μεγαλύτερη τραχύτητα και υπάρχει δυσκολία τροφοδοσίας του σύρματος σε περίπλοκες γεωμετρίες. Για το λόγο αυτό η χρήση σκόνης είναι η συνηθέστερη επιλογή. Οι τυπικές διαστάσεις για τα σύρματα είναι 1-3 mm σε διάμετρο και για τις σκόνες 50-150  $\mu\text{m}$  μέση διάμετρο κόκκου, μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από αυτό των σκονών για κατεργασίες PBF που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 15  $\mu\text{m}$  – 15  $\mu\text{m}$  . Μία αξιόπιστη και σταθερή παροχή σκόνης απαιτεί υψηλή σφαιρικότητα των κόκκων με μικρό αριθμό δορυφόρων. Ωστόσο οι μέθοδοι DED έχουν μεγαλύτερη ανοχή στις ανομοιόμορφες σκόνες σε σχέση με τις τεχνολογίες PBF.

Η ανακύκλωση της σκόνης είναι σημαντική για την μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας ενός συστήματος DED. Ανάλογα με την διάμετρο της δέσμης το ποσοστό του υλικού που εξέρχεται από το ακροφύσιο και τελικά εναποτίθεται στο τεμάχιο κυμαίνεται μεταξύ 50 – 90 %. Μετά την κατεργασία η περισσευούμενη σκόνη συλλέγεται από το θάλαμο του μηχανήματος και περνά από ειδικά κόσκινα ώστε να απομακρυνθούν ξένα σώματα ή κόκκοι με ακατάλληλο μέγεθος.

Τα υλικά που είναι καταλληλότερα για την DED είναι αυτά που έχουν καλή πρόσφυση μεταξύ υγρής και στερεάς φάσης στην περιοχή της τηγμένης λίμνης και δημιουργούν ισχυρή ένωση που δεν είναι ευαίσθητη στην οξείδωση. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες και τα κράματα νικελίου είναι τα πιο συμβατά υλικά με την μέθοδο DED καθώς επιτρέπουν καλό έλεγχο της τηγμένης λίμνης και δεν είναι ευαίσθητα στη

ρηγμάτωση. Μέταλλα με υψηλή θερμική αγωγιμότητα όπως ο χαλκός και κάποια κράματα αλουμινίου είναι δυσκολότερα στην κατεργασία. (83)

## 7.5 Μετεπεξεργασία

Το πρώτο βήμα μετά την παραγωγή ενός εξαρτήματος είναι ο καθαρισμός από υπολείμματα σκόνης με πεπιεσμένο αέρα ή αμμοβολή. Μετά τον καθαρισμό το εξάρτημα αποδεσμεύεται από την πλάκα χτισίματος και αφαιρούνται οι υποστηρίξεις εάν αυτές χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή. Ανάλογα με τη γεωμετρία, αυτό γίνεται με πριόνισμα ή φρεζάρισμα σε κέντρο κατεργασίας CNC.

Τυπικά η παραγωγή ενός εξαρτήματος με DED περιλαμβάνει και θερμική κατεργασία του υλικού. Στην περίπτωση της DED με layers στο προϊόν συνήθως αναπτύσσονται ισχυρές παραμένουσες τάσεις λόγω της απότομης ψύξης οι οποίες χρειάζεται να απαλειφθούν. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας το τεμάχιο σε κλίβανο ή με θερμή κατεργασία ισοστατικής πίεσης. Με αυτό το τρόπο η μικροδομή του υλικού γίνεται πιο λεπτόκοκκη και ταυτόχρονα πληρώνονται κενά και επουλώνονται ρωγμές.

Η ποιότητα επιφανείας και η διαστατική ακρίβεια του προϊόντος εξαρτάται από το είδος της τεχνολογίας DED που χρησιμοποιείται. Η DED με layers οδηγεί σε ανώτερη ποιότητα επιφανείας και υψηλότερη ακρίβεια σε σχέση με τη δέσμη ηλεκτρονίων ή το ηλεκτρικό τόξο. Ωστόσο σχεδόν όλα τα προϊόντα DED χρειάζονται μηχανουργική κατεργασία σε κάποιες από τις επιφάνειες τους ιδίως όταν αυτές εφάπτονται με άλλα εξαρτήματα. (83)

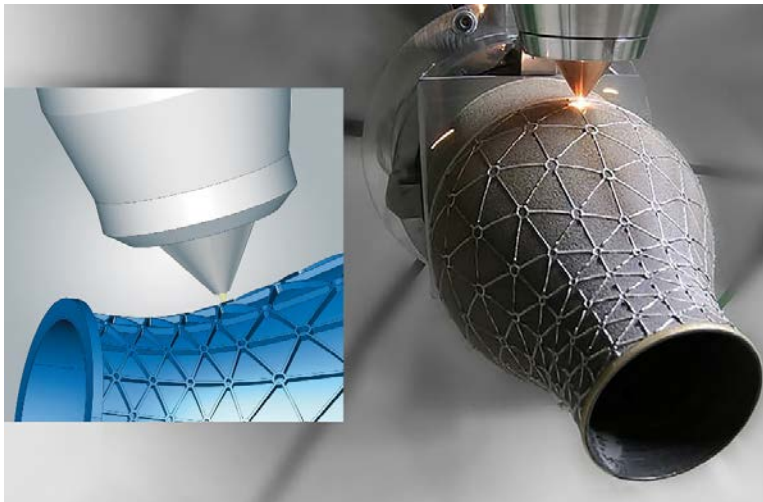
## 7.6 Εφαρμογές

Η DED έχει χαμηλή ανάλυση και παράγει προϊόντα απλούστερης γεωμετρίας σε σχέση με άλλες μεθόδους προσθετικής παραγωγής. Οι δυνατότητες της μεθόδου είναι παρόμοιες με αυτές των συμβατικών κατεργασιών. Για το λόγο αυτό η DED επιλέγεται όταν η παραγωγή ενός προϊόντος με αφαίρεση υλικού απαιτεί πολύ χρόνο, σπαταλά πολύ υλικό, έχει υψηλό κόστος ή όταν το υλικό είναι δύσκολο στην κατεργασία. Η DED μπορεί επίσης να προτιμηθεί έναντι της χύτευσης ή της σφυρηλάτησης όταν η κατασκευή περιορισμένου αριθμού κομματιών είναι αντισυμβατική. Οι βιομηχανίες αεροδιαστημικής, άμυνας και ενέργειας είναι οι κύριοι τομείς στους οποίους η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή για την κατασκευή εξειδικευμένων τεμαχίων σε μικρές παρτίδες. Τυπικά εξαρτήματα DED φαίνονται στην εικόνα 65.



Εικόνα 65 - Εξαρτήματα κατασκευασμένα με τη μέθοδο DED - (86)

Πολύ σημαντική είναι η δυνατότητα της DED να προσθέτει υλικό σε επιφάνειες εξαρτημάτων και χρησιμοποιείται για την προσθήκη επιπλέον γεωμετρικών στοιχείων και επιστρώσεων με αντοχή στη φθορά ή στη διάβρωση. Η δυνατότητα αυτή χρησιμοποιείται και για την κατασκευή τεμαχίων που αποτελούνται από δύο ή παραπάνω μέταλλα αλλάζοντας το τροφοδοτούμενο υλικό κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Η διαδικασία προσθήκης στοιχείων φαίνεται στην εικόνα 66.



Εικόνα 66 - Προσθήκη γεωμετρικών στοιχείων - (87)

Η DED χρησιμοποιείται επίσης για την επισκευή εξαρτημάτων με προσθήκη υλικού όπως φαίνεται στην εικόνα 67. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος επισκευής σήμερα είναι η χειρωνακτική επισκευή με συγκόλληση. Η επισκευή με DED προσφέρει πλεονεκτήματα όπως η δημιουργία μικρότερης θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης, μικρότερες παραμορφώσεις στο επισκευαζόμενο τεμάχιο, υψηλότερη ακρίβεια καθώς και τη δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας. (84)



Εικόνα 67 - Επισκευή τμήματος οδόντωσης - (88)

## 7.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

- + Επισκευή εξαρτημάτων
- + Κατασκευή μεγάλων εξαρτημάτων
- + Υψηλή ταχύτητα παραγωγής
- + Μικρότερη σπατάλη υλικού σε σχέση με τις τεχνολογίες PBF
- Χαμηλή ανάλυση
- Υψηλή επιφανειακή τραχύτητα
- Κατασκευή σχετικά απλών γεωμετριών
- Υψηλό κόστος εξοπλισμού

## 7.8 Μελλοντική έρευνα

Η τεχνολογία DED αποτελεί σημαντική κατηγορία μεθόδων προσθετικής παραγωγής καθώς διαθέτει πλεονεκτήματα όπως υψηλή παραγωγικότητα, μικρή σπατάλη υλικού, δυνατότητα επισκευής εξαρτημάτων και προσθήκη επιπλέον στοιχείων και επιστρώσεων σε εξαρτήματα. Τα χαρακτηριστικά αυτά ωφελούν άμεσα πολλούς κλάδους της βιομηχανίας εξοικονομώντας πρώτες ύλες, χρόνο και χρήματα όταν επιλέγεται εφαρμογή κατάλληλη για την DED. Ωστόσο η DED δεν αποτελεί ακόμη ώριμη τεχνολογία και το επίπεδο αξιοπιστίας και επαναληψιμότητας της μεθόδου δεν μπορεί πάντοτε να ανταποκριθεί στις υψηλές απαιτήσεις κάποιων τομέων. Τα προβλήματα αυτά αναμένεται να ερευνηθούν και να επιλυθούν στο μέλλον με την ανάπτυξη νέων συστημάτων και την καλύτερη κατανόηση της σύνδεσης μεταξύ των παραμέτρων της κατεργασίας και των μηχανικών ιδιοτήτων των προϊόντων.



## Ενότητα 8 – Sheet Lamination

### 8.1 Τεχνολογίες Sheet Lamination

Οι μέθοδοι προσθετικής παραγωγής της οικογένειας Sheet Lamination (SL) χρησιμοποιούν πρώτη ύλη σε μορφή λεπτής ταινίας για την παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων. Οι ταινίες υλικού στοιβάζονται, συγκολλούνται και κόβονται στο κατάλληλο σχήμα ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή γεωμετρία.

Οι μέθοδοι SL κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το υλικό που κατεργάζονται που μπορεί να είναι χαρτί, πλαστικό, μέταλλο ή σύνθετο υλικό και την μέθοδο με την οποία οι ταινίες συγκολλούνται όπως με ειδικές κόλλες, θερμική συγκόλληση ή υπερηχητική συγκόλληση. Κατηγοριοποιούνται περαιτέρω με βάση την μέθοδο κοπής των ταινιών όπως με υδροκοπή, κοπή με layers ή CNC αφαίρεση υλικού και με βάση το αν η κοπή της ταινίας υλικού πραγματοποιείται πριν ή μετά την συγκόλληση. Οι μέθοδοι SL χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πρωτοτύπων, οπτικών μοντέλων αλλά και προϊόντων τελικής χρήσης. Από όλες τις μεθόδους SL το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) ή οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξειδικευμένων μεταλλικών εξαρτημάτων με περίπλοκη γεωμετρία. Η UAM είναι η τεχνολογία προσθετικής παραγωγής στην οποία θα εστιάσουμε στο παρόν κεφάλαιο.

### 8.2 Ultrasonic Additive Manufacturing (Προσθετική Παραγωγή με Υπέρηχους)

#### 8.2.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η UAM είναι μέθοδος προσθετικής παραγωγής στην οποία λεπτά στρώματα μετάλλου σε μορφή ταινίας συγκολλούνται μεταξύ τους με υπέρηχους για την δημιουργία ενός τρισδιάστατου τεμαχίου. Για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας κάθε στρώση του παραγόμενου τεμαχίου επιδέχεται CNC κατεργασία αφαίρεσης υλικού. Ο συνδυασμός στοιχείων προσθετικής παραγωγής και αφαίρεσης υλικού επιτρέπει την παραγωγή τεμαχίων υψηλής διαστατικής ακρίβειας, χαμηλής επιφανειακής τραχύτητας και με πολύπλοκες εσωτερικές κοιλότητες.

Η τεχνολογία Ultrasonic Additive Manufacturing ή Ultrasonic Consolidation επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε αρχικά από τον Dawn White. Το 1999 ο White ίδρυσε την εταιρία Solidica Inc. για την ανάπτυξη και πώληση μηχανημάτων UAM. Το 2007 η Solidica και το Edison Welding Institute συνεργάστηκαν για να βελτιώσουν την ποιότητα συγκόλλησης της κατεργασίας και για να μεγαλώσουν το εύρος συμβατών υλικών. Το 2011 η εταιρία Fabrisonic LLC δημιουργήθηκε για την εμπορευματοποίηση των βελτιωμένων συστημάτων UAM SonicLayer. Το ίδιο έτος το σύστημα SonicLayer 4000 που φαίνεται στην εικόνα εγκαταστάθηκε στο Ohio State University. (89)



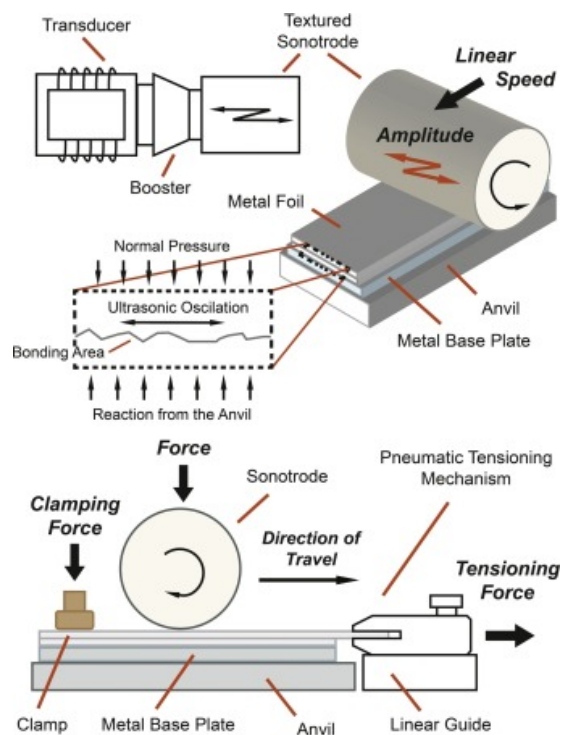
*Εικόνα 68 - Μηχάνημα SonicLayer 4000 της εταιρίας Fabrisonic - (90)*

### 8.2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας

Κατά την έναρξη της κατεργασίας η πλάκα εκτύπωσης τοποθετείται στην τράπεζα του μηχανήματος και συγκρατείται επάνω σε αυτήν. Μεταλλική ταινία τροφοδοτείται στο ειδικό ηλεκτρόδιο υπερήχων (sonotrode) το οποίο πιέζει και συγκολλά το πρώτο κομμάτι μεταλλικής ταινίας στην πλάκα εκτύπωσης με υπερηχητικές δονήσεις. Στη συνέχεια μια ψηφιακά καθοδηγούμενη κεφαλή φρεζαρίσματος αφαιρεί υλικό από την περίμετρο της ταινίας ώστε να αποκτήσει την απαραίτητη γεωμετρία. Η διαδικασία συγκόλλησης και αφαίρεσης υλικού επαναλαμβάνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος συνήθως 3-6mm και στη συνέχεια μια κεφαλή φινιρίσματος αφαιρεί υλικό ώστε το τμήμα του παραγόμενου τεμαχίου να πληροί τις επιθυμητές ανοχές. Ο κύκλος συγκόλλησης, φρεζαρίσματος και φινιρίσματος επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του παραγόμενου τεμαχίου. Σε αυτό το σημείο η πλάκα αποδεσμεύεται από την τράπεζα και το τεμάχιο αφαιρείται από την πλάκα. Τα βασικά μηχανικά μέρη ενός συστήματος UAM φαίνονται στην εικόνα.

Η ανάλυση της εκτύπωσης UAM καθορίζεται από το πάχος της τροφοδοτούμενης μεταλλικής ταινίας και δεν μπορεί να μεταβληθεί μέσω του λογισμικού όπως σε άλλες μεθόδους προσθετικής παραγωγής. Το υλικό των μεταλλικών ταινιών είναι συνήθως αλουμίνιο ή άλλο όλκιμο μέταλλο με τυπικό πάχος περίπου 0.15 mm.

Η συγκόλληση υπερήχων πραγματοποιείται σε θερμοκρασία της τάξης των 150 °C και επιτρέπει την τοποθέτηση ευαίσθητου εξοπλισμού όπως παραμορφωσιόμετρα, αισθητήρες θερμοκρασίας, οπτικές ίνες και ίνες ενίσχυσης σε κοιλότητες του τεμαχίου κατά την διάρκεια της παραγωγής. Το τροφοδοτούμενο υλικό αλλάζει μικροδομή μόνο σε μια περιοχή περίπου 15 μm εκατέρωθεν της διεπιφάνειας συγκόλλησης. Στην περιοχή αυτή εμφανίζονται ισοαξονικοί κόκκοι με μικρό μέγεθος ενώ το υπόλοιπο υλικό διατηρεί την αρχική του μικροδομή. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα συγκόλλησης ανόμοιων μετάλλων και συνεπώς η παραγωγή τεμαχίων αποτελούμενων από πολλαπλά υλικά και με εξειδικευμένες μηχανικές ιδιότητες. (91)



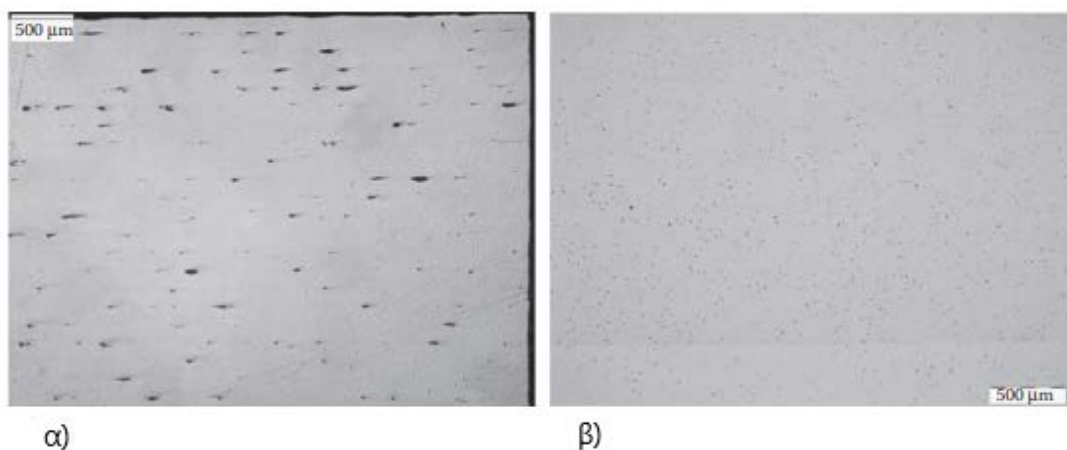
Εικόνα 69 - Μηχανικά μέρη και βασικές αρχές λειτουργίας της κατεργασίας UAM - (94)

### 8.2.3 Παράμετροι της κατεργασίας

Η έρευνα στον τομέα της UAM επικεντρώνεται στην κατανόηση του μηχανισμού της συγκόλλησης με υπερήχους και στην ανάπτυξη μοντέλων που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων της κατεργασίας και των ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων. Οι σημαντικότερες παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα των προϊόντων είναι η ταχύτητα μετακίνησης του ηλεκτροδίου, το μέτρο της κάθετης δύναμης και η ισχύς εισόδου στην διεπιφάνεια.

Η ισχύς εισόδου επηρεάζει άμεσα την ελαστοπλαστική παραμόρφωση που δέχονται οι συγκολλούμενες επιφάνειες. Το πλάτος ταλάντωσης και η συχνότητα ταλάντωσης του ηλεκτροδίου καθορίζουν το ποσό ενέργειας που είναι διαθέσιμο για τη δημιουργία της ένωσης. Στα εμπορικά συστήματα UAM η ισχύς εισόδου ρυθμίζεται μεταβάλλοντας το πλάτος ταλάντωσης του ηλεκτροδίου. Η συχνότητα ταλάντωσης δεν μπορεί να ρυθμιστεί από το χρήστη καθώς αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο του μηχανήματος. Αύξηση του πλάτους ταλάντωσης και κατά συνέπεια της ισχύος οδηγεί σε περισσότερη παραμόρφωση στη διεπιφάνεια και γενικά σε υψηλότερη ποιότητα συγκόλλησης. Είναι απαραίτητο ένα ελάχιστο επίπεδο ισχύος ώστε να πληρωθούν τα κενά μεταξύ των ταινιών λόγω επιφανειακής τραχύτητας. Ωστόσο υπάρχει μια βέλτιστη τιμή της ισχύος που εξαρτάται από το πάχος των μεταλλικών ταινιών, την γεωμετρία του τεμαχίου και τον συνδυασμό χρησιμοποιούμενων υλικών που οδηγεί στη βέλτιστη ποιότητα ένωσης. Αν αυτή η ισχύς ξεπεραστεί τότε η ποιότητα της ένωσης φθίνει καθώς η υπερβολική ενέργεια εισόδου μπορεί να φθείρει τις ενώσεις προηγούμενων στρωμάτων λόγω κόπωσης.

Τα πιο προηγμένα συστήματα UAM αποδίδουν ισχύ 9 kW στην διεπιφάνεια συγκόλλησης και παράγουν προϊόντα υψηλότερης ποιότητας. Παρακάτω συγκρίνονται δύο δοκίμια συγκόλλησης αλουμινίου Al 3003 με ισχύ 1 kW στην εικόνα 70 -α) και 9 kW στην εικόνα 70-β). Τα μαύρα στίγματα στις δύο εικόνες οφείλονται σε κενά μεταξύ των μεταλλικών ταινιών που δεν πληρώθηκαν κατά την ένωση των επιφανειών τους. Είναι φανερό πως στην εικόνα β) όπου η ισχύς εισόδου είναι μεγαλύτερη, εμφανίζονται λιγότερες ατέλειες στη δομή του τελικού προϊόντος. (56,91)



Εικόνα 70 - Ποιότητα συγκόλλησης της κατεργασίας Ultrasonic Additive Manufacturing με α) χαμηλή και β) υψηλή ισχύς εισόδου - (91)

Για την αξιολόγηση της ποιότητας της συγκόλλησης χρησιμοποιείται η έννοια της γραμμικής πυκνότητας συγκόλλησης (linear welding density – LWD). Η LWD ορίζεται ως ο λόγος της επιτυχώς συγκολλημένης διεπιφάνειας προς το συνολικό μήκος της διεπιφάνειας και εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Η κάθετη δύναμη είναι το φορτίο που ασκεί το ηλεκτρόδιο ώστε να συμπιέσει τις μεταλλικές ταινίες. Η δύναμη αυτή είναι απαραίτητη για την μεταφορά ενέργειας στη διεπιφάνεια και την δημιουργία μεταλλουργικής ένωσης. Η παράμετρος αυτή έχει μια βέλτιστη τιμή στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη LWD. Όταν η κάθετη δύναμη υπερβεί την τιμή αυτή η συνθήκες στην διεπιφάνεια είναι όμοιες με αυτές στην περίπτωση της υπερβολικής ισχύος και παρατηρείται φθορά σε ήδη συγκολλημένες επιφάνειες προηγούμενων στρωμάτων.

Η ταχύτητα μετακίνησης του ηλεκτροδίου επηρεάζει την ενέργεια που δέχεται μια δεδομένη επιφάνεια υλικού στη μονάδα του χρόνου. Επομένως η ταχύτητα του ηλεκτροδίου ρυθμίζεται ανάλογα με την ισχύ που αποδίδει το ηλεκτρόδιο ώστε η ενέργεια που εισάγεται στη διεπιφάνεια να αντιστοιχεί στις βέλτιστες συνθήκες για δημιουργία μεταλλουργικής ένωσης. (56)

#### 8.2.4 Μηχανικές ιδιότητες

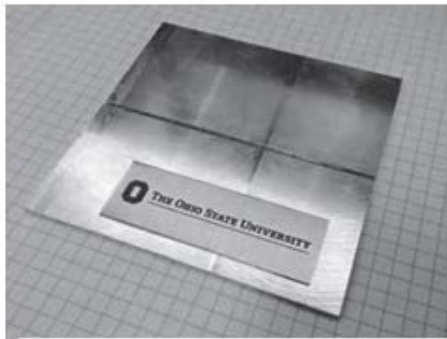
Τα προϊόντα της κατεργασίας UAM συνήθως παρουσιάζουν έντονη ανισοτροπία στην αντοχή εφελκυσμού τους εξαιτίας της ανισοτροπίας των μεταλλικών ταινιών. Οι μεταλλικές ταινίες που χρησιμοποιούνται στη UAM παράγονται με έλαση και οι κόκκοι του υλικού είναι συνήθως επιμηκυμένοι κατά τη διεύθυνση της έλασης. Ως αποτέλεσμα οι ταινίες έχουν τυπικά μεγαλύτερη αντοχή στη διεύθυνση της έλασης και τα προϊόντα UAM έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην διεύθυνση κίνησης του ηλεκτροδίου. Στην διεύθυνση αυτή η αντοχή είναι τυπικά υψηλότερη της ονομαστικής τιμής του υλικού ενώ στην οριζόντια διεύθυνση που είναι κάθετη στη κίνηση του ηλεκτροδίου η αντοχή είναι τυπικά 85% της ονομαστικής τιμής του υλικού. Στην κατακόρυφη διεύθυνση η αντοχή είναι πολύ χαμηλότερη από αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο με τυπικές τιμές κοντά στο 50% της ονομαστικής ακόμη και με πολύ υψηλή ποιότητα συγκόλλησης (100% LWD). Επιπλέον η πλαστική παραμόρφωση των ταινιών λόγω της κάθετης δύναμης που ασκεί το ηλεκτρόδιο προκαλεί εργοσκήρυνση στο υλικό και μείωση της ολκιμότητας στην κατακόρυφη διεύθυνση. Επομένως κατά το σχεδιασμό ενός εξαρτήματος που πρόκειται να κατασκευαστεί με τη μέθοδο UAM είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψιν η ανισοτροπία και η μείωση της ολκιμότητας του υλικού. (56)

#### 8.2.5 Εφαρμογές

Οι δυνατότητες της μεθόδου UAM αξιοποιούνται κυρίως στην παραγωγή εξειδικευμένων εξαρτημάτων σε μικρές παρτίδες παραγωγής. Για παράδειγμα είναι δυνατή η προσθήκη «έξυπνων» υλικών (smart materials) όπως το κράμα μνήμης Ni-Ti (Nitinol) σε μήτρα αλουμινίου. Το κράμα μνήμης Ni-Ti παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις υπό θερμικό φορτίο και μέσω μετασχηματισμού στερεής κατάστασης μπορεί να μεταβαίνει ανάμεσα σε δύο «απομνημονευμένα» σχήματα. Το υλικό μπορεί επίσης να υποστεί μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις και να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτές οι ιδιότητες του Nitinol έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή αρθρώσεων στερεής κατάστασης (solid state hinges) και σύνθετα υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής. Στο σχήμα 71 φαίνεται δοκός κατασκευασμένη από σύνθεση αλουμινίου και Nitinol. Όταν θερμαίνεται, η μήτρα αλουμινίου διαστέλλεται αλλά οι ίνες Nitinol συστέλλονται με αποτέλεσμα την μείωση της θερμικής διαστολής της συνολικής κατασκευής. Στην εικόνα 72 φαίνεται άρθρωση στερεάς κατάστασης.

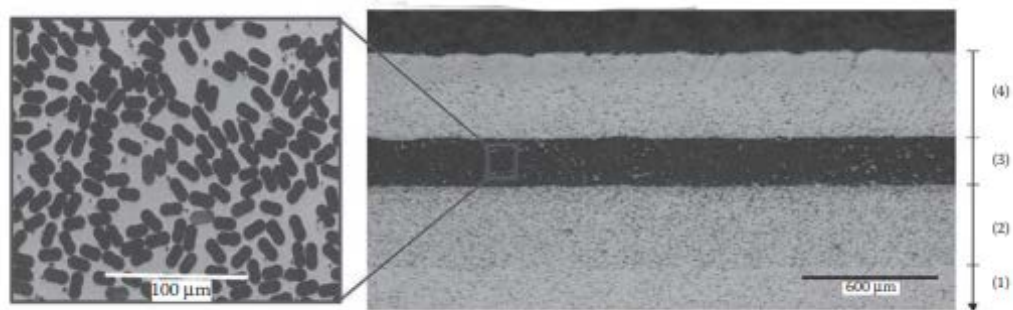


Εικόνα 71 - Δοκός αλουμινίου-Nitinol κατασκευασμένη με τη μέθοδο Ultrasonic Additive Manufacturing - (92)



Εικόνα 72 - Άρθρωση στερεάς κατάστασης - (92)

Εκτός από τα «έξυπνα» υλικά είναι δυνατή κατά αντίστοιχο τρόπο η προσθήκη ενισχύσεων σε μεταλλικές μήτρες. Η προσθήκη ενισχύσεων μπορεί να γίνει τοπικά σε περιοχές υψηλής τάσης ενώ περιοχές χαμηλής τάσης μπορούν να παραμείνουν λεπτότερες με σκοπό την μείωση του βάρους της κατασκευής. Ένα παράδειγμα υλικού που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές τοπικής ενίσχυσης είναι το MetPreg (μήτρα αλουμινίου ενισχυμένη με ίνες οξειδίου του αλουμινίου). Το υλικό αυτό μπορεί να συγκολληθεί με την μέθοδο UAM όπως φαίνεται στην εικόνα 73.

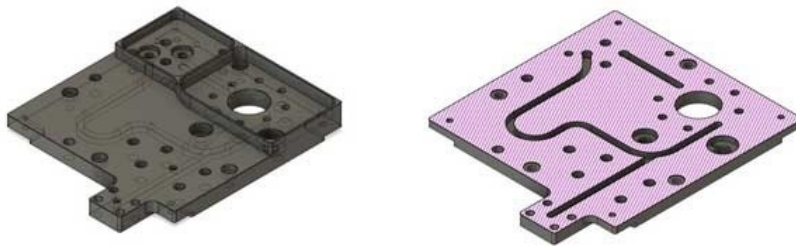


Εικόνα 73 - Τομή αλουμινένιου τεμαχίου ενισχυμένο με στρώσεις MetPreg. (1) Υλικό βάσης, (2) 4 στρώσεις ταινίας Al 6061, (3) 1 στρώση MetPreg, (4) στρώσεις ταινίας Al 6061 - (92)



Η ικανότητα προσθήκης και αφαίρεσης υλικού της μεθόδου UAM επιτρέπει την παραγωγή τεμαχίων με περίπλοκες εσωτερικές κοιλότητες και εσοχές. Η Fabrisonic ανέλαβε την παραγωγή εναλλακτών θερμότητας για δορυφόρους από αλουμίνιο 6061 για το Utah State University. Το μοντέλο CAD των εναλλακτών φαίνεται στην εικόνα 74. Η Fabrisonic έχει μεγάλη εμπειρία στην κατασκευή εναλλακτών θερμότητας καθώς με τη μέθοδο UAM καθώς παράγει εναλλάκτες που πληρούν τις προδιαγραφές του NASA Jet Propulsion Lab.

Η κατασκευή των εσωτερικών κοιλότητων για τη ροή του ψυκτικού υγρού πραγματοποιήθηκε στην φάση αφαίρεσης υλικού της UAM. Η Fabrisonic χρησιμοποιεί επίσης ένα πατενταρισμένο υποστηρικτικό υλικό για να εξασφαλίσει ότι η άνω πλευρά των καναλιών κατασκευάζεται λεία, καθώς η κεφαλή φρεζαρίσματος δεν έχει πρόσβαση σε αυτές τις επιφάνειες. Η εσωτερική αυτή γεωμετρία θα ήταν δύσκολο έως αδύνατο να κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους. (93)



Εικόνα 74 - Μοντέλο CAD του εναλλάκτη θερμότητας - (93)

### 8.2.6 Μελλοντική έρευνα

Κράματα μαλακών μετάλλων όπως χαλκού και αλουμινίου αντιδρούν ευνοϊκά στη συγκόλληση υπερήχων και είναι συμβατά με την κατεργασία UAM. Ωστόσο, προς το παρόν υπάρχει δυσκολία στην κατεργασία σκληρότερων κραμάτων καθώς αυτά δεν παραμορφώνονται εύκολα, απαιτούν μεγαλύτερο κάθετο φορτίο και υψηλότερη ισχύ υπερήχων. Οι συνθήκες αυτές συχνά οδηγούν στην συγκόλληση των ταινιών στο ηλεκτρόδιο και όχι μεταξύ τους. Η δυσκολία αυτή στη χρήση σκληρών κραμάτων περιορίζει σημαντικά τις εφαρμογές που μπορούν να έχουν στη βιομηχανία τα προϊόντα που έχουν παραχθεί με την UAM.

Η μέθοδος προσθετικής παραγωγής UAM δεν είναι ακόμη σε θέση να αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους σε εφαρμογές μαζικής παραγωγής. Ο υπάρχον εξοπλισμός είναι σχεδιασμένος για την παραγωγή εξειδικευμένων τεμαχίων σε μικρές παρτίδες. Υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα η UAM να ενσωματωθεί στη βιομηχανία ως βοηθητική μέθοδος παραγωγής χωρίς την ανάγκη ριζικής αλλαγής της παραγωγικής διαδικασίας (tooling).

Προς το παρόν, ο μηχανισμός συγκόλλησης στην UAM και η επίδραση των παραμέτρων της κατεργασίας στις ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων δεν είναι πλήρως κατανοητή. Το γεγονός αυτό περιορίζει τους συνδυασμούς ανόμοιων υλικών που μπορούν να συγκολληθούν καθώς και το μέγεθος και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Είναι ανάγκη η περαιτέρω ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων της διαδικασίας προκειμένου αυτά να είναι σε θέση να περιγράφουν με ακρίβεια την σχέση μεταξύ παραμέτρων της κατεργασίας και ιδιοτήτων των προϊόντων.

## Ενότητα 9 – Πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού και συμπεράσματα

### 9.1 Περιγραφή πειραματικής μεθόδου

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια κατασκευασμένα με τις μεθόδους FDM και MSLA κάνοντας χρήση τριών διαφορετικών θερμοπλαστικών υλικών και μιας ρητίνης. Στόχος της εργασίας στην Ενότητα 9 είναι η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της ανισότροπης μηχανικής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα προϊόντα εκτύπωσης και κατά πόσο αυτή είναι διαφορετική για κάθε εξεταζόμενο υλικό. Για την πειραματική μελέτη εκτυπώθηκαν εκτυπώθηκαν τέσσερα δοκίμια από κάθε υλικό. Τα 2 εκτυπώθηκαν με στρώσεις παράλληλες στη διεύθυνση φόρτισης (οριζόντια), ενώ τα επόμενα 2 με στρώσεις κάθετες στη διεύθυνση φόρτισης (κατακόρυφα). Τα κατακόρυφα δοκίμια αναμένεται να παρουσιάσουν μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό λόγω περιορισμών στην αντοχή της ένωσης μεταξύ διαδοχικών στρώσεων (layer adhesion).

Για την κατασκευή των δοκιμών FDM χρησιμοποιήθηκαν δύο καρτεσιανοί εκτυπωτές Creality Ender 3 Pro με διάμετρο ακροφυσίου 0.4 mm. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάστηκαν τα δοκίμια ήταν τα ASA 275 της Spectrum Filaments, PETG της FilamentPM και PLA της Polymaker. Κάθε δοκίμιο εκτυπώθηκε με τις ίδιες παραμέτρους πλήρωσης και ταχύτητας έτσι ώστε οι διαφορές στην αντοχή των διαφορετικών δοκιμών να οφείλονται μόνο στα χαρακτηριστικά των υλικών και όχι στις παραμέτρους εκτύπωσης. Οι μόνες παράμετροι που ήταν διαφορετικές για κάθε υλικό ήταν η θερμοκρασία ακροφυσίου και η θερμοκρασία κρεβατιού, οι οποίες ρυθμίστηκαν στις θερμοκρασίες που προτείνει ο κατασκευαστής του κάθε υλικού. Επιπλέον τα δοκίμια ASA και PETG κατασκευάστηκαν σε εκτυπωτή με κλειστό θάλαμο για την αποφυγή στρέβλωσης των δοκιμών κατά την εκτύπωση λόγω απότομης ψύξης. Οι θερμοκρασίες που επιλέχθηκαν ήταν αντιπροσωπευτικές για την χρήση του κάθε υλικού για μηχανολογικές εφαρμογές. Οι κοινές παράμετροι εκτύπωσης φαίνονται στον πίνακα 7, ενώ οι παράμετροι που διαφέρουν ανά υλικό παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 7 – Κοινές παράμετροι εκτύπωσης δοκιμών FDM

Πάχος στρώσης	0.32mm
Αριθμός τοιχωμάτων	5
Διάμετρος ακροφυσίου	0.4
Ταχύτητα εκτύπωσης	60mm/s
Ποσοστό πλήρωσης (infill)	100%
Γωνία σάρωσης (infill raster angle)	+45/-45

Πίνακας 8 - Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμών FDM που διαφέρουν ανά υλικό

Υλικό	ASA	PLA	PETG
Θερμοκρασία ακροφυσίου	255	200	235
Θερμοκρασία κρεβατιού	80	60	90
Κλειστός θάλαμος εκτύπωσης	NAI	OXI	NAI

Τα δοκίμια φωτοπολυμερισμού κατασκευάστηκαν από ρητίνη γενικής χρήσης της Elegoo, στον εκτυπωτή Elegoo Saturn, ένα MSLA εκτυπωτή με μονοχρωματική LCD οθόνη ανάλυσης 3840\*2400 (4K).

Η εκτύπωση έγινε σε θερμοκρασία δωματίου 20°C. Λόγω περιορισμών του χώρου εκτύπωσης, οι διευθύνσεις εκτύπωσης των δοκιμών φωτοπολυμερισμού ήταν 0° και 45°, αντί για 0° και 90° όπως στην περίπτωση των δοκιμών FDM. Αυτό ωστόσο δεν αναμένεται να επηρεάσει τα αποτελέσματα, καθώς τα δοκίμια φωτοπολυμερισμού αναμένεται να είναι ισότροπα. Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτύπωση αναγράφονται στον πίνακα 9.

Πίνακας 9 - Παράμετροι εκτύπωσης δοκιμών MSLA

Χρόνος έκθεσης στρώσεων (sec)	3
Πάχος στρώσης (mm)	0.1
Απόσταση ανύψωσης (mm)	7
Ταχύτητα ανύψωσης (mm/min)	70
Ταχύτητα ανάσυρσης (mm/min)	210
Χρόνος σκλήρυνσης μετά την εκτύπωση (sec)	300

Αρχικά αναζητήθηκε το κατάλληλο πρότυπο που θα εφαρμοζόταν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυσμού. Το ASTM D638 θεωρήθηκε κατάλληλο καθώς χρησιμοποιείται για εφελκυσμό σε πλαστικά υλικά. Αρχικά επιλέχθηκαν δοκίμια D638 Type IV, καθώς είχαν χρησιμοποιηθεί από τους ERYILDIZ M. Et. Al. (25) για δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια από PLA. Μετά από υπολογισμούς ωστόσο διαπιστώθηκε ότι με το αναμενόμενο όριο διαρροής των εξεταζόμενων υλικών (30MPa), τα δοκίμια D638 Type IV θα αστοχούσαν με φόρτιση μικρότερη του 1% του μέγιστου δυνατού φορτίου του μηχανήματος, κάτι το οποίο θα οδηγούσε σε μειωμένη ακρίβεια των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση δοκιμών D638 Type I, τα οποία έχουν περισσότερο από 2 φορές μεγαλύτερη επιφάνεια διατομής, διπλασιάζοντας το απαιτούμενο φορτίο για να αστοχήσουν, και φτάνοντας έτσι πάνω από το όριο ακρίβειας της μηχανής εφελκυσμού, η οποία είναι η MTS 810. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια D638 τύπου I έχουν ορθογωνική διατομή με διαστάσεις 13mm x 3.2mm στην στενή τους περιοχή όπου και αναμένεται να αστοχήσουν, δίνοντας τους έτσι ένα εμβαδόν διατομής 41.6mm<sup>2</sup>.

Πριν τις δοκιμές εφελκυσμού κάθε δοκίμιο μετρήθηκε με παχύμετρο έτσι ώστε να εντοπιστούν μικροδιαφορές στις διαστάσεις της διατομής κάθε δοκιμίου. Οι μετρήσεις αυτές στη συνέχεια ελέγχθηκαν με βάση τις ανοχές του προτύπου, το οποίο δίνει μέγιστη απόκλιση από το επιθυμητό πάχος των 3.2mm ίση με 0.4mm, συνθήκη την οποία τα εκτυπωμένα δοκίμια ικανοποιούσαν. Με βάση τις διαστάσεις αυτές υπολογίστηκε το εμβαδόν διατομής του κάθε δοκιμίου το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τον υπολογισμό της τάσης από το εφελκυστικό φορτίο με βάση την σχέση:

$$\sigma = P/A$$

, όπου P είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο και A το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου.

Πριν την τοποθέτηση των δοκιμών στο μηχάνημα χαράχθηκαν γραμμές-οδηγοί πάνω στα δοκίμια ώστε να εξασφαλισθεί η σωστή τοποθέτηση των δοκιμών στις αρπάγες, αλλά και του επιμηκυνσιομέτρου πάνω στα δοκίμια. Στην εικόνα 75 φαίνεται ένα δοκίμιο D638 Type I από κάθε υλικό που εξετάστηκε, καθώς και οι βοηθητικές γραμμές που σημειώθηκαν πάνω τους. Η αντιστοιχία υλικών-χρώματος είναι η παρακάτω:

- Ρητίνη γενικής χρήσης - γκρι
- PETG – μαύρο
- PLA – λαχανί
- ASA – πορτοκαλί



Εικόνα 75 - Δοκίμια D638 Type I

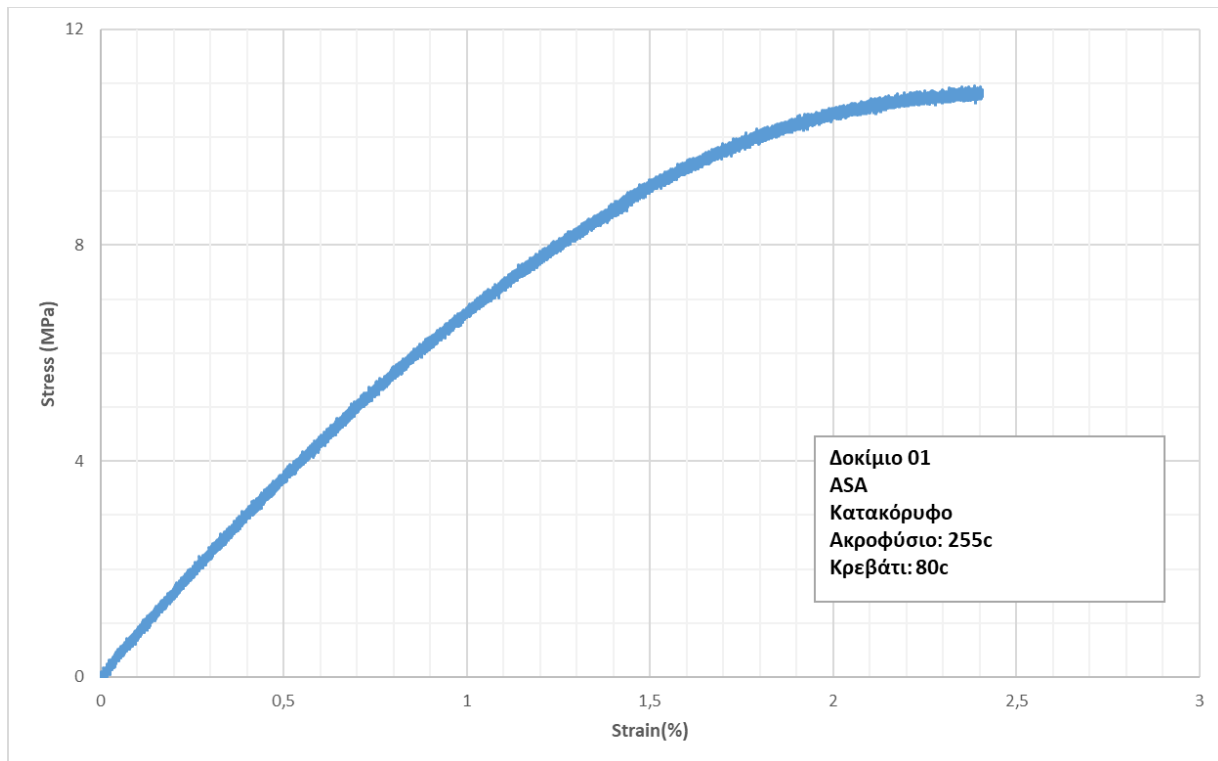
Η επιμήκυνση των δοκιμίων μετρήθηκε με επιμηκυνσιόμετρο 50mm και η πίεση στις αρπάγες ρυθμίστηκε στα 200 psi ώστε να μη δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις στα άκρα των δοκιμίων. Η δοκιμή έγινε με ταχύτητα μετατόπισης εμβόλου 1mm/min. Σημειώνεται πως μερικά από τα δοκίμια αστόχησαν εκτός του διαστήματος του επιμηκυνσιομέτρου αλλά πριν τη ραδίωση. Στην περίπτωση αυτή σύμφωνα με το ASTM D638 το πείραμα θεωρείται έγκυρο.

## 9.2 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

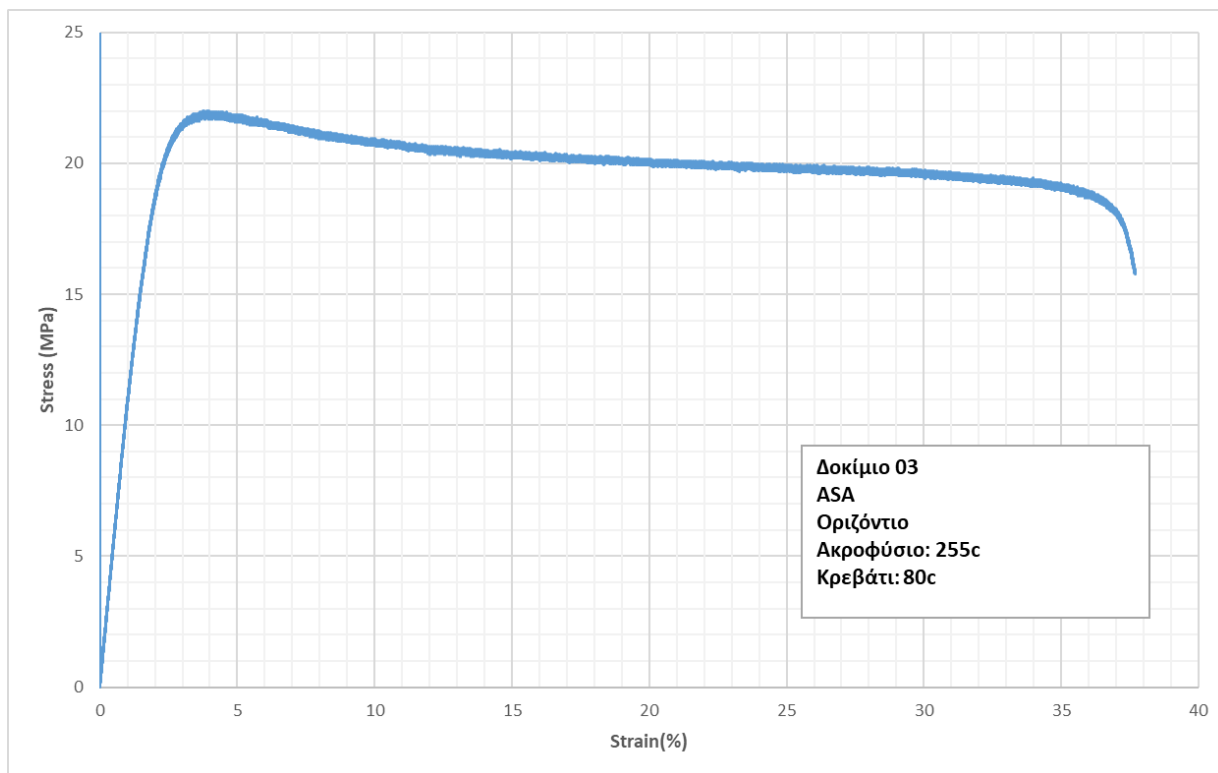
Δυο δοκίμια από κάθε προσανατολισμό χρησιμοποιήθηκαν για να επιβεβαιωθεί η επαναληψιμότητα του πειράματος. Οι αποκλίσεις μεταξύ όμοιων δοκιμίων ήταν αμελητέες, και συνεπώς παρουσιάζεται ένα γράφημα για κάθε συνδυασμό υλικού-προσανατολισμού εκτύπωσης. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές αξονικής δύναμης (N), αξονικής παραμόρφωσης (%) και τάσης (MPa). Αρχικά εξετάστηκαν δοκίμια από υλικό ASA, τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στον πίνακα 10 και τα γραφήματα 3 & 4.

Πίνακας 10 - Αποτελέσματα δοκιμών ASA

Διεύθυνση εκτύπωσης	Αξονική Δύναμη (N)	Αξονική παραμόρφωση (%)	Τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)
Κατακόρυφη	551.1	2.41	10.95	723.7
Οριζόντια	1104.3	37.69	22	1097.7



Γράφημα 3 - σ-ε Δοκιμίου ASA με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης

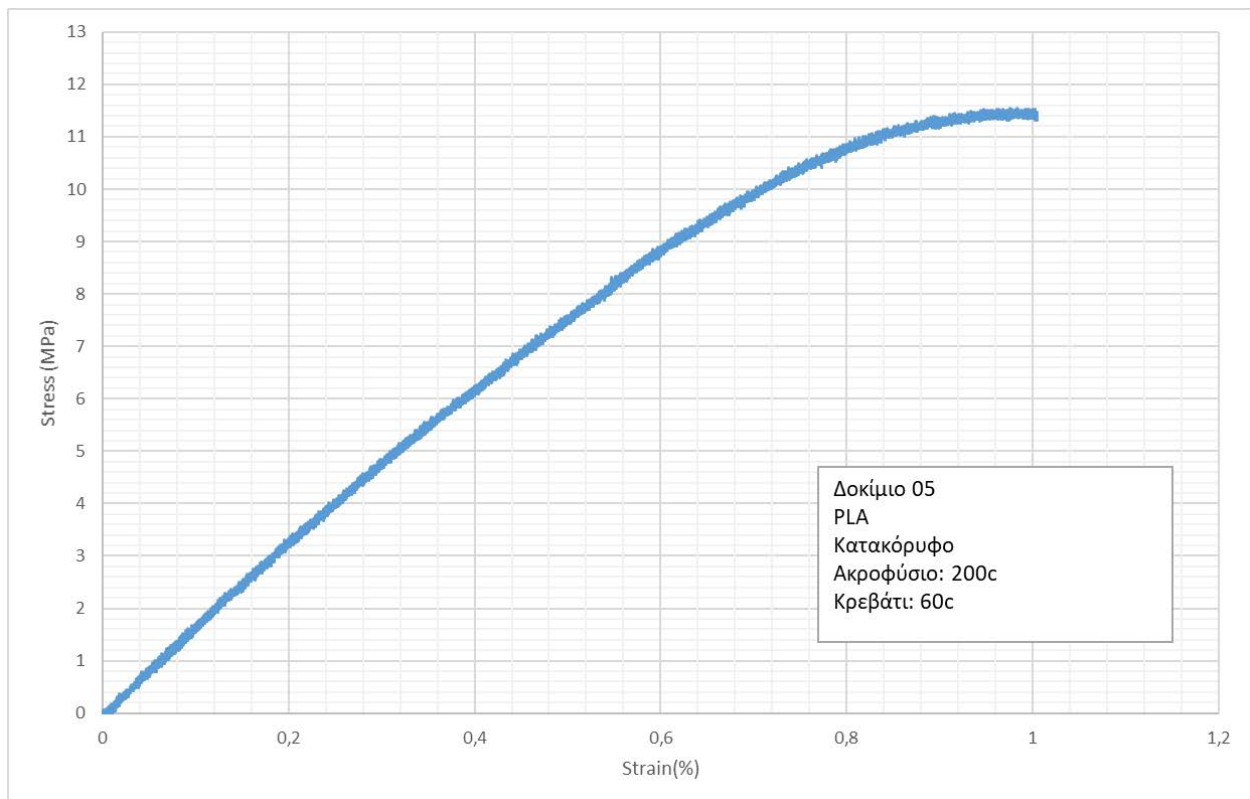


Γράφημα 4 - σ-ε Δοκιμίου ASA με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης

Στη συνέχεια το ίδιο πείραμα επαναλήφθηκε σε δοκίμια από PLA, τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στον πίνακα 11 και τα γραφήματα 4 & 5.

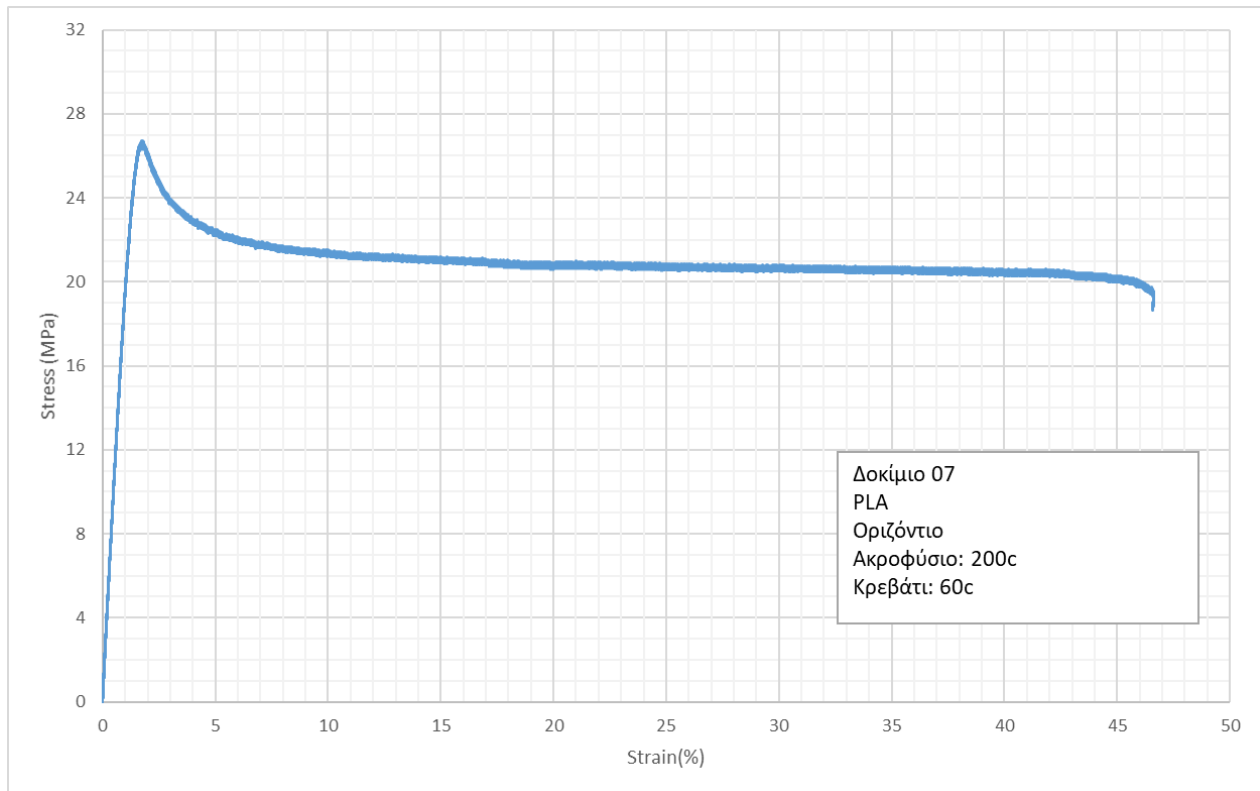
Πίνακας 11 - Αποτελέσματα δοκιμών PLA

Διεύθυνση εκτύπωσης	Αξονική Δύναμη (N)	Αξονική παραμόρφωση (%)	Τάση (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
Κατακόρυφη	608.2	1.01	11.54	1458.6
Οριζόντια	1104.3	37.69	22	2028.3



Γράφημα 5 - σ-ε Δοκιμίου PLA με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης



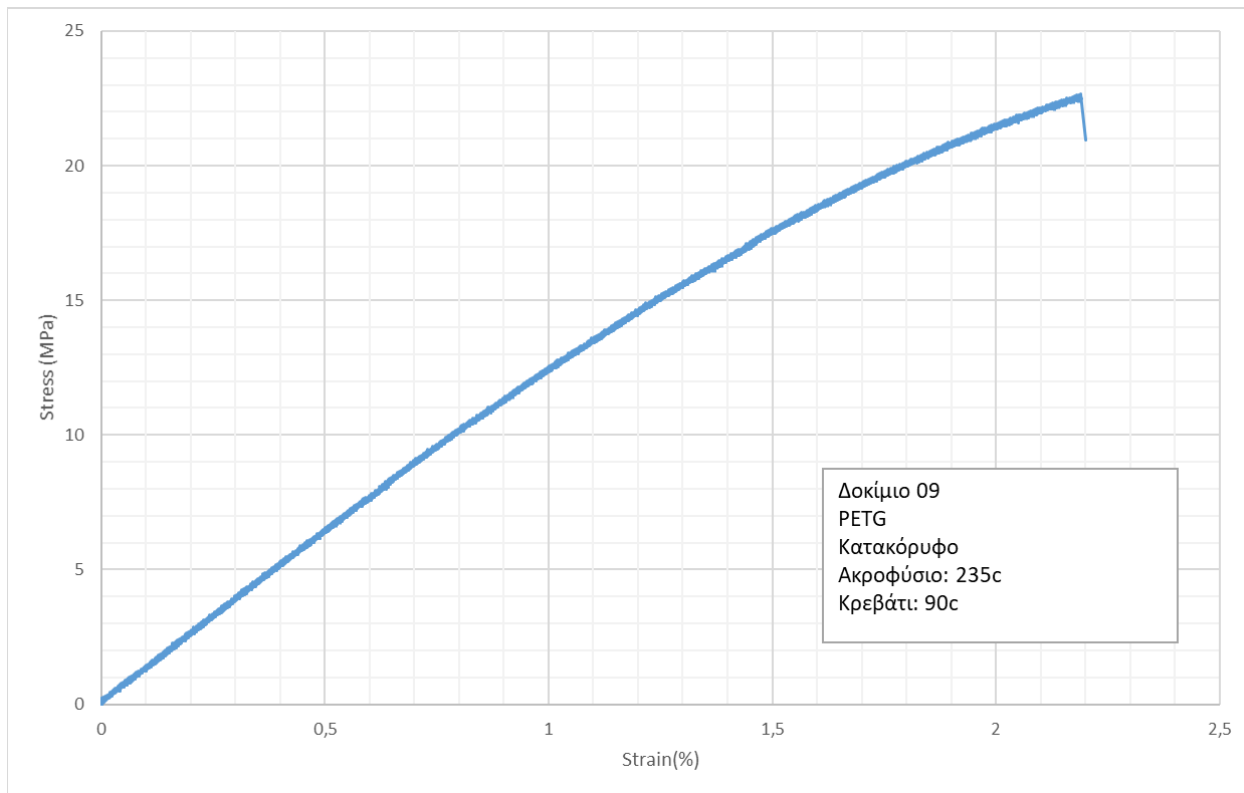


Γράφημα 6 -  $\sigma$ - $\epsilon$  Δοκίμιου PLA με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης

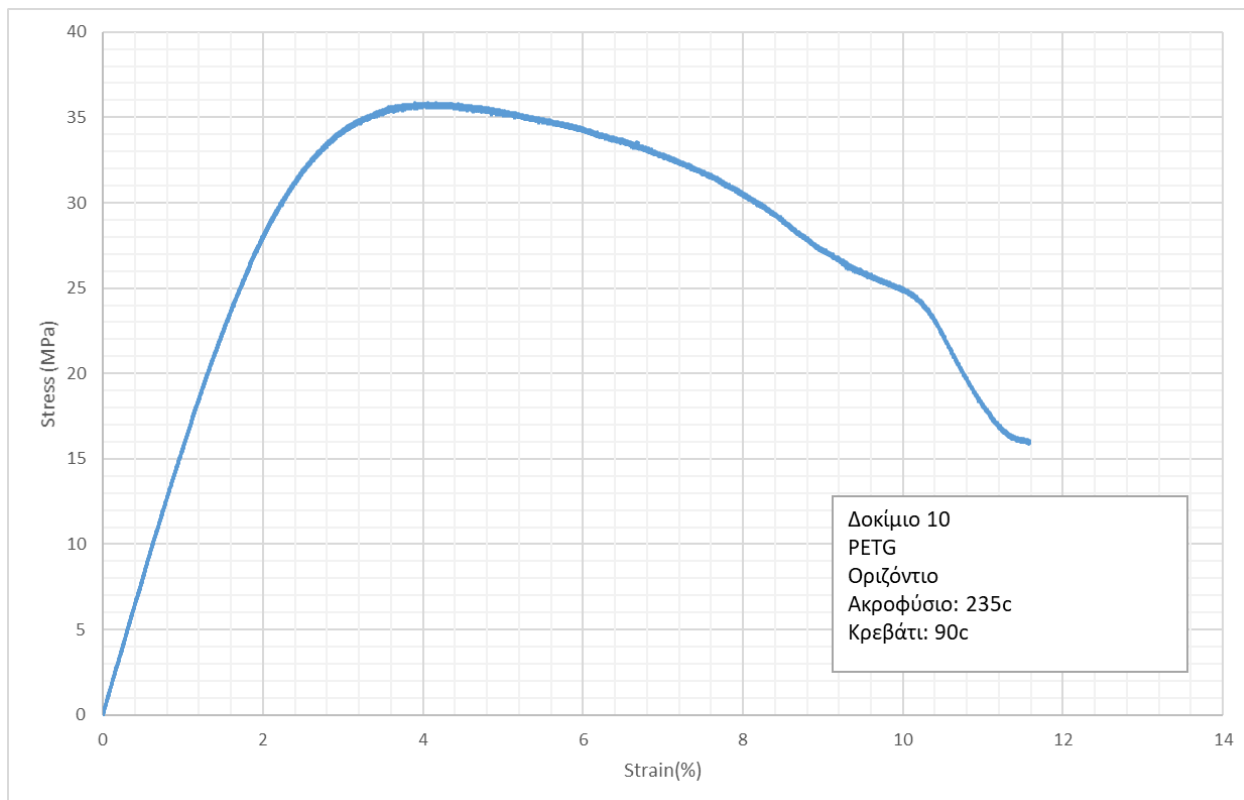
Το επόμενο πείραμα έγινε σε δοκίμια PETG, ομοίως, τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 12 και τα γραφήματα 7 & 8.

Πίνακας 12 - Αποτελέσματα δοκίμων PETG

Διεύθυνση εκτύπωσης	Αξονική Δύναμη (N)	Αξονική παραμόρφωση (%)	Τάση (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
Κατακόρυφη	1127.76	2.2	22.65	1266.6
Οριζόντια	1732.74	11.58	35.85	1598.5



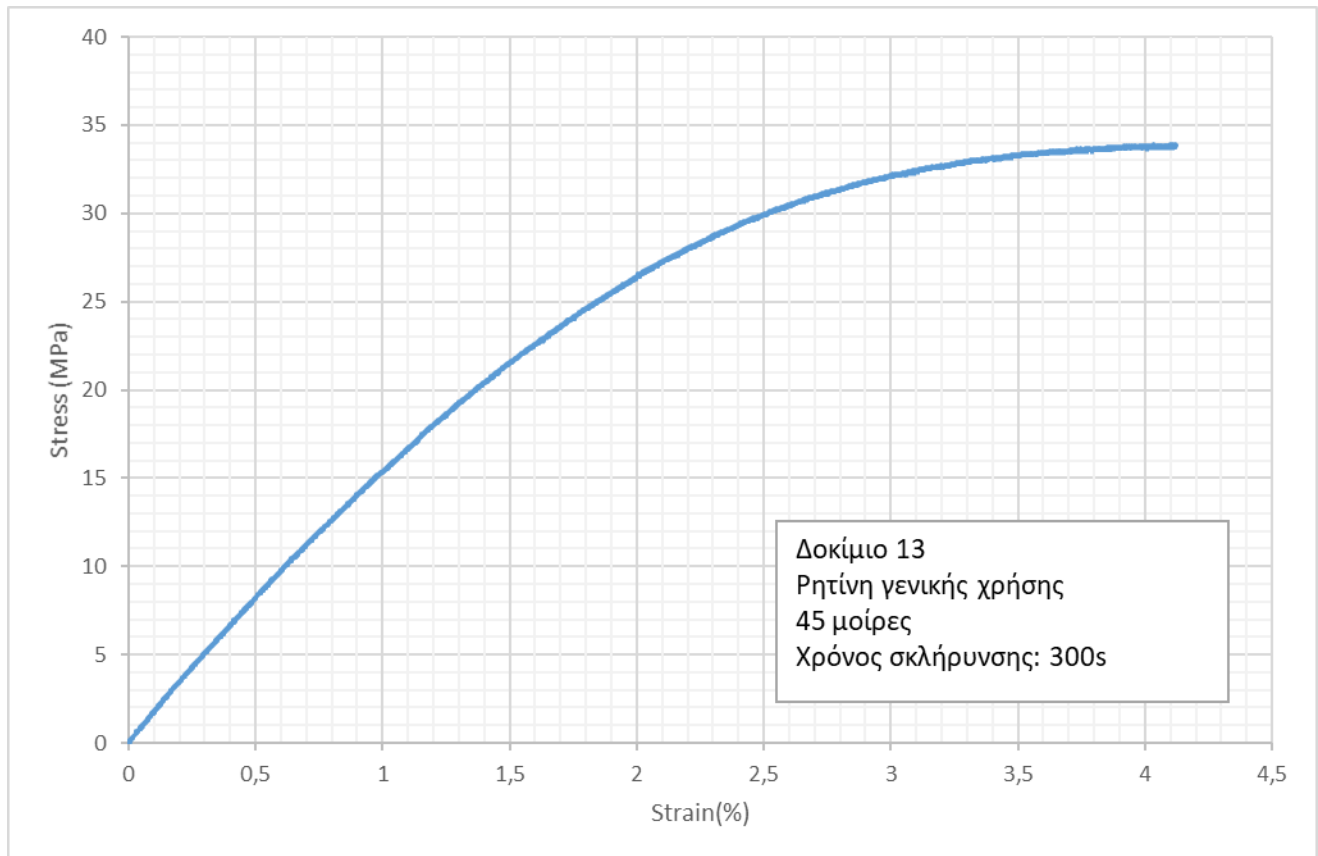
Γράφημα 7 -  $\sigma$ - $\epsilon$  Δοκιμίου PETG με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης



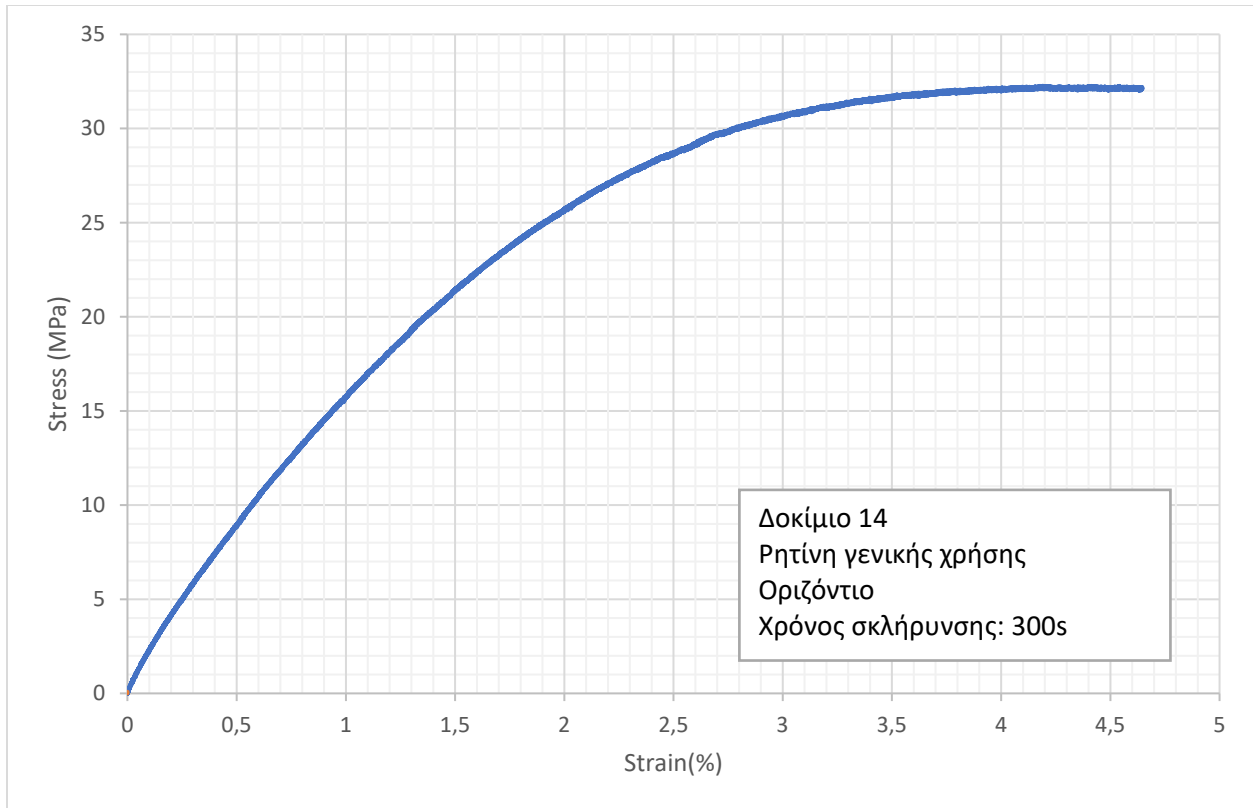
Γράφημα 8 -  $\sigma$ - $\epsilon$  Δοκιμίου PETG με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης

Τέλος, το ίδιο πείραμα επαναλήφθηκε σε δοκίμια φωτοπολυμερισμού από ρητίνη γενικής χρήσης, τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στον πίνακα 13 και τα γραφήματα 9 & 10.

Διεύθυνση εκτύπωσης	Αξονική Δύναμη (N)	Αξονική παραμόρφωση (%)	Τάση (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
45 Μοίρες	1540	4.12	33.93	1603
Οριζόντια	1421	4.65	32.31	1712

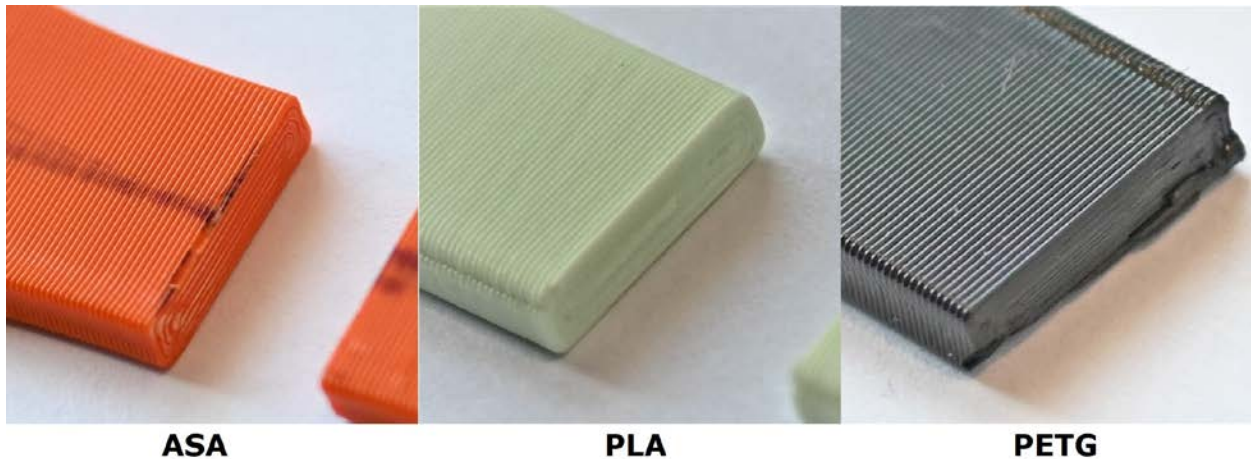


Γράφημα 9 - σ-ε Δοκιμίου ρητίνης με διεύθυνση εκτύπωσης 45 μοιρών



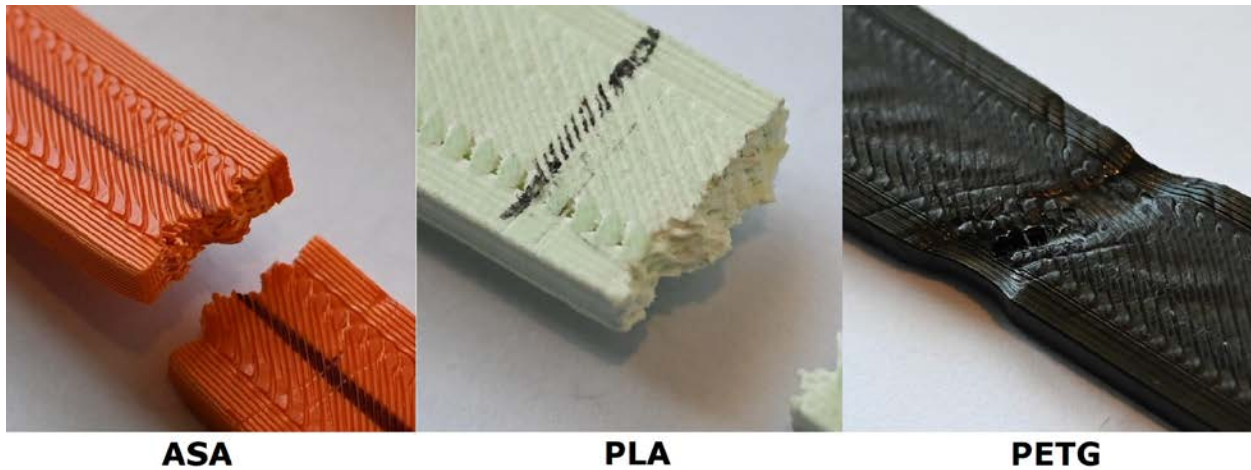
### 9.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όλα τα δοκίμια από θερμοπλαστικά αστόχησαν σε τάση μικρότερη από αυτή που δηλώνεται από τους κατασκευαστές των υλικών από τα οποία είχαν παραχθεί. Στα κατακόρυφα δοκίμια η διαφορά αυτή ήταν πολύ μεγαλύτερη, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι το φορτίο ασκείται κάθετα στην διεπιφάνεια μεταξύ στρώσεων, οδηγώντας σε ψαθυρή αστοχία λόγω αποκόλλησης δυο διαδοχικών στρώσεων. Η απαιτούμενη τάση για τον διαχωρισμό των στρώσεων είναι σημαντικά μικρότερη από την  $\sigma_{UTS}$  των επιμέρους υλικών, γεγονός το οποίο εξηγεί τις χαμηλές μέγιστες τιμές τάσης που καταγράφηκαν στα κατακόρυφα δοκίμια, καθώς και την ψαθυρή συμπεριφορά. Η επιφάνεια θραύσης των κατακόρυφων δοκιμίων FDM φαίνεται στην εικόνα 76.



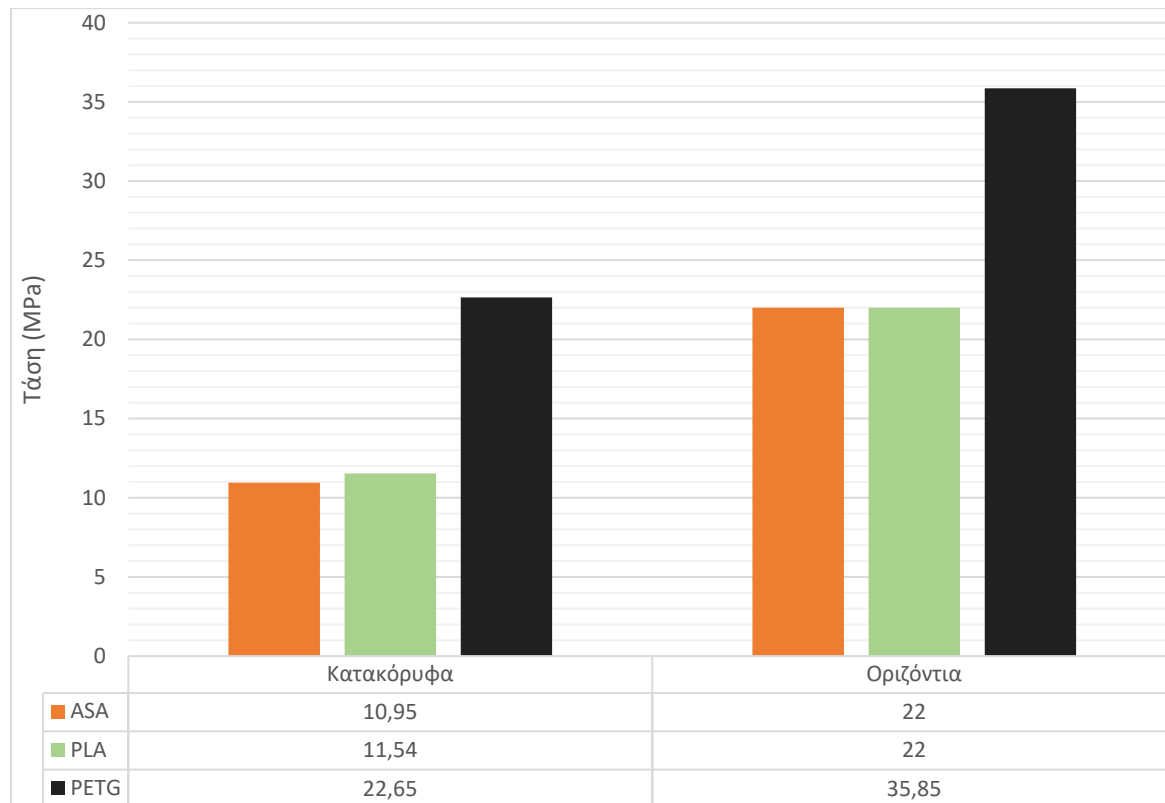
Εικόνα 76 – Επιφάνεια θραύσης δοκιμίων FDM με κατακόρυφη διεύθυνση εκτύπωσης

Στην περίπτωση των οριζόντιων δοκιμίων FDM οι μέγιστες τιμές τάσης ήταν σημαντικά υψηλότερες, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την έντονη ανισοτροπία των αντικειμένων που έχουν παραχθεί με εκτύπωση FDM. Οι τιμές που καταγράφηκαν ωστόσο παραμένουν χαμηλότερες από αυτές που δηλώνονται από τους κατασκευαστές. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς τα οριζόντια δοκίμια δεν αποτελούνταν μόνο από οριζόντια τοιχώματα αλλά και από γραμμές πλήρωσης προσανατολισμένες κατά  $\mp 45^\circ$  σε σχέση με την διεύθυνση φόρτισης. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων εκτύπωσης για τα δοκίμια έγινε με σκοπό να δοθεί μια πιο ρεαλιστική εικόνα για την μηχανική συμπεριφορά πραγματικών αντικειμένων που έχουν παραχθεί με εκτύπωση FDM. Κατά την παραγωγή συμπαγών αντικειμένων με τη συγκεκριμένη μέθοδο οι στρώσεις (layers) συνήθως σχηματίζονται με το συνδυασμό 2-5 εξωτερικών περιμέτρων (walls) και γραμμών πλήρωσης των οποίων ο προσανατολισμός αλλάζει σε κάθε στρώση, τυπικά εναλλάσσοντας μεταξύ  $\mp 45^\circ$  προκειμένου να μειωθεί η ανισοτροπία των αντικειμένων στο επίπεδο των στρώσεων. Σε μεγαλύτερα αντικείμενα που έχουν παραχθεί με εκτύπωση FDM η αναλογία βάρους-αντοχής μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω με τη χρήση σύνθετων γεωμετριών μερικής πλήρωσης (infill), αυτή η περίπτωση ωστόσο δεν εξετάζεται στην παρούσα μελέτη. Όλα τα οριζόντια δοκίμια FDM υπέστησαν σημαντική πλαστική παραμόρφωση πριν αστοχήσουν, σχηματίζοντας μια τραχιά επιφάνεια θραύσης, με εξαίρεση την περίπτωση του PETG το οποίο σχημάτισε λαιμό. Οι επιφάνειες θραύσης των οριζόντιων δοκιμίων FDM φαίνονται στην εικόνα 77.



Εικόνα 77 - Επιφάνεια θραύσης δοκιμών FDM με οριζόντια διεύθυνση εκτύπωσης

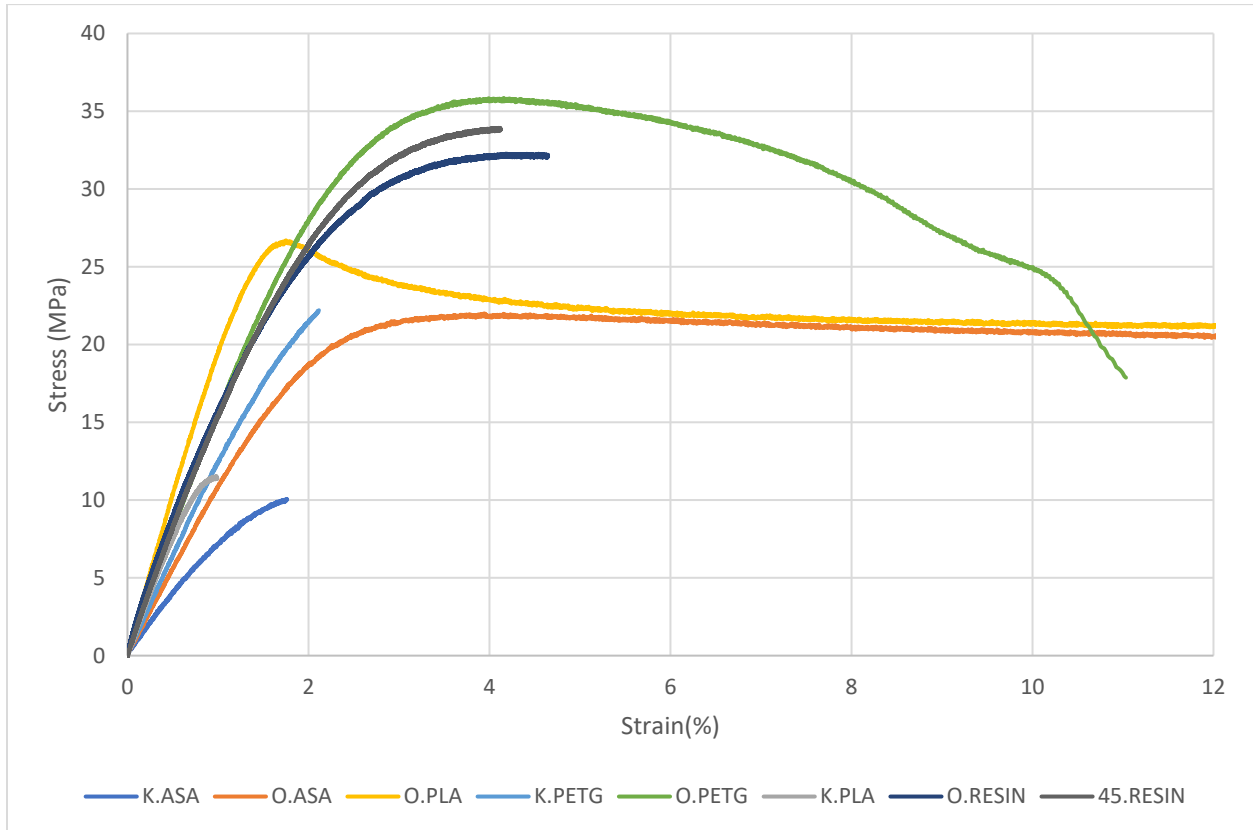
Τα κατακόρυφα δοκίμια PETG εμφάνισαν περίπου διπλάσια αντοχή σε εφελκυσμό συγκριτικά με τα κατακόρυφα δοκίμια ASA και PLA, γεγονός που φανερώνει ότι το PETG έχει πολύ ανώτερη πρόσφυση μεταξύ των στρώσεων σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά. Οι τιμές  $\sigma_{UTS}$  των τριών υλικών στους δυο προσανατολισμούς εκτύπωσης απεικονίζονται στο γράφημα 9.



Γράφημα 10 –  $\sigma_{UTS}$  των τριών υλικών στους δύο προσανατολισμούς εκτύπωσης

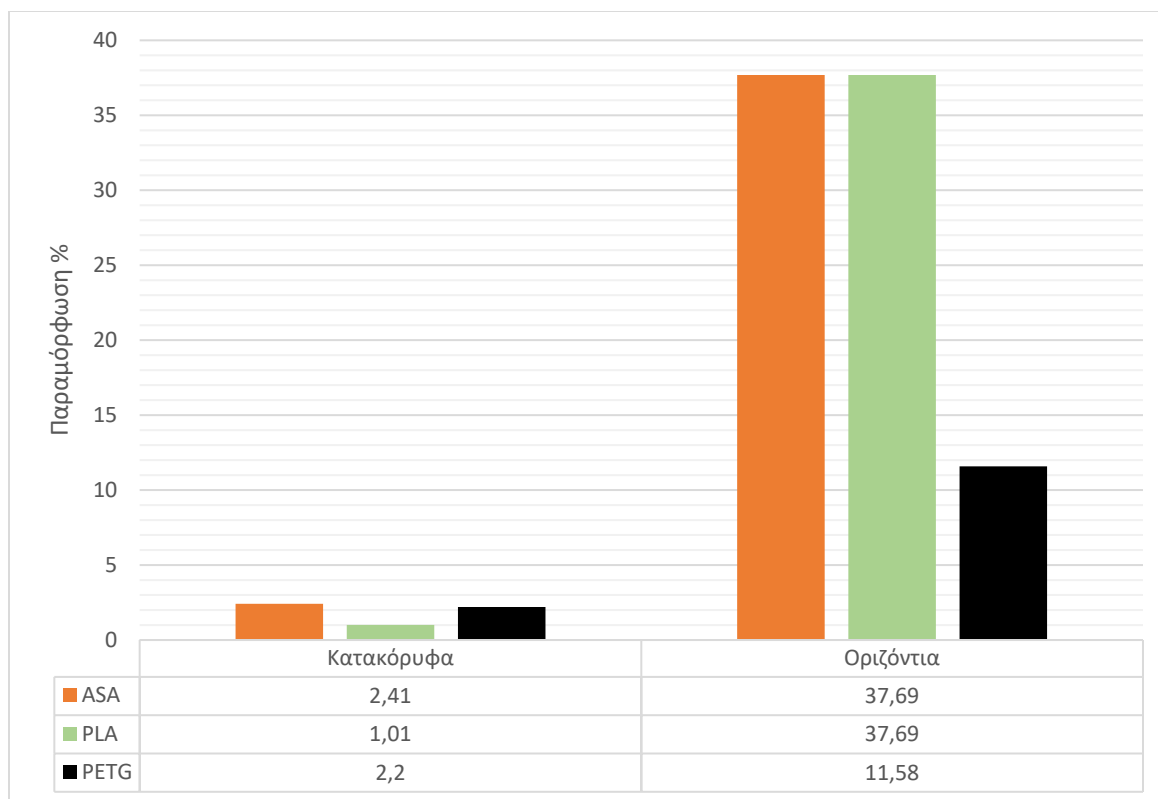


Κατά τη σύγκριση των τιμών μέγιστης τάσης μεταξύ κατακόρυφων και οριζόντιων δοκιμών, φαίνεται ότι το κατακόρυφα εκτυπωμένο PETG αστόχησε σε 37% μικρότερη τάση από το οριζόντιο, ενώ η σύγκριση των κατακόρυφων ASA και PLA με τα οριζόντια δείχνει ότι αστόχησαν σε 50% και 47.5% μειωμένη τάση αντίστοιχα. Η πορεία των γραφημάτων στην πλαστική περιοχή παρουσίασε επίσης διαφορές, στο γράφημα 10 φαίνονται τα δεδομένα σ-ε από όλες τις δοκιμές σε κοινό διάγραμμα. Στη λεζάντα αναγράφονται με «Κ» τα κατακόρυφα εκτυπωμένα δοκίμια και με «Ο» τα οριζόντια. Στην περίπτωση των δοκιμών ρητίνης, αντί για κατακόρυφα εκτυπώθηκαν δοκίμια με κλίση 45 μοιρών κατά την εκτύπωση, αυτά αναγράφονται με «45» στο γράφημα. Να σημειωθεί ότι τα οριζόντια ASA και PLA ξεπερνούν το 40% παραμόρφωση πριν αστοχήσουν, και έχουν κοπεί σε αυτό το γράφημα χάριν σύγκρισης.



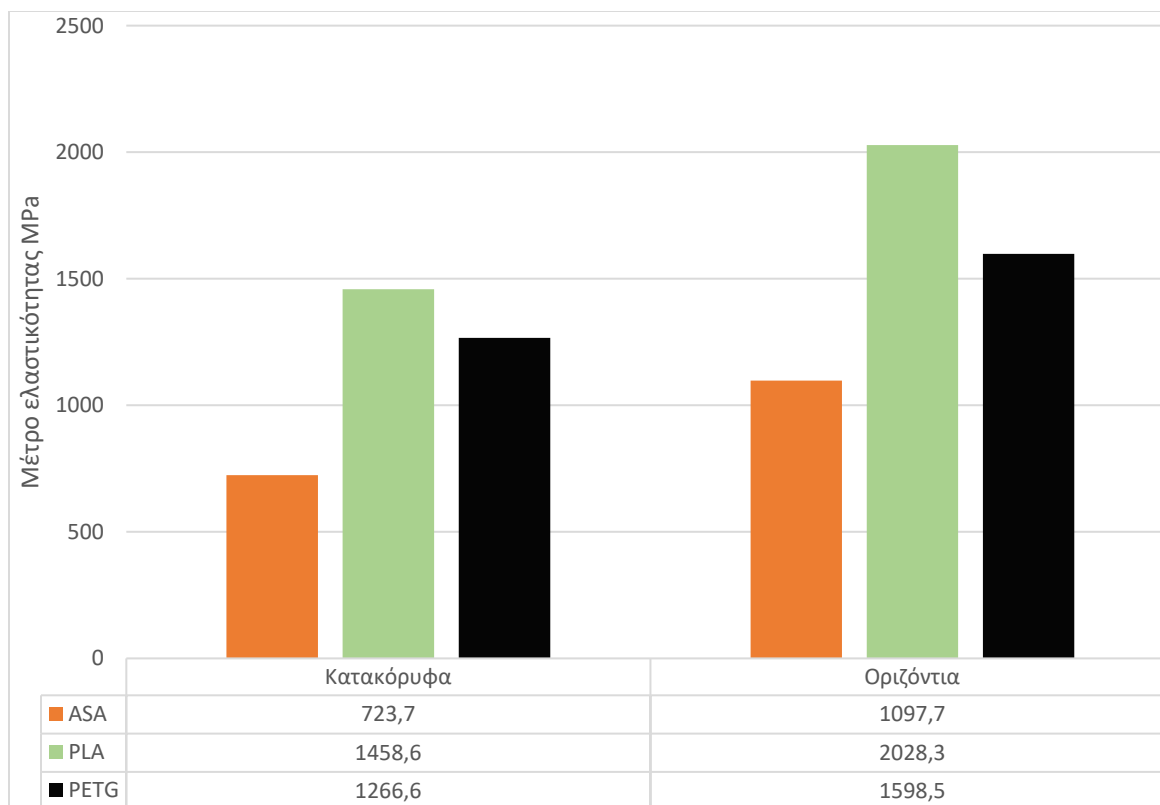
Γράφημα 11 - σ-ε Όλων των δοκιμών και στις 2 διευθύνσεις εκτύπωσης

Μεγάλες διαφορές μεταξύ των δυο προσανατολισμών παρατηρήθηκαν επίσης στην μέγιστη παραμόρφωση πριν τη θραύση, όπου το PETG εμφάνισε 81% μικρότερη μέγιστη παραμόρφωση όταν τυπώθηκε στην κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ τα κατακόρυφα εκτυπωμένα ASA και PLA εμφάνισαν 93% και 97% μειωμένη μέγιστη παραμόρφωση αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων που παρατηρήθηκαν σε κάθε δοκίμιο συγκρίνονται στο γράφημα 11.



Γράφημα 12 - Μέγιστη παραμόρφωση των τριών θερμοπλαστικών υλικών στους δύο προσανατολισμούς εκτύπωσης

Τέλος, έγινε σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ υλικών και προσανατολισμών εκτύπωσης. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται σημαντικά μικρότερες διαφορές μεταξύ των δυο προσανατολισμών εκτύπωσης για κάθε υλικό, ωστόσο, και πάλι τα κατακόρυφα εκτυπωμένα δοκίμια εμφάνισαν μικρότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας συγκριτικά με τα οριζόντια. Συγκεκριμένα, το κατακόρυφα εκτυπωμένο PETG είχε 20.7% μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, ενώ τα κατακόρυφα εκτυπωμένα ASA και PLA εμφάνισαν 34% και 28% μικρότερο μέτρο ελαστικότητας αντίστοιχα. Οι μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας μεταξύ υλικών και προσανατολισμών εκτύπωσης απεικονίζονται στο γράφημα 12.

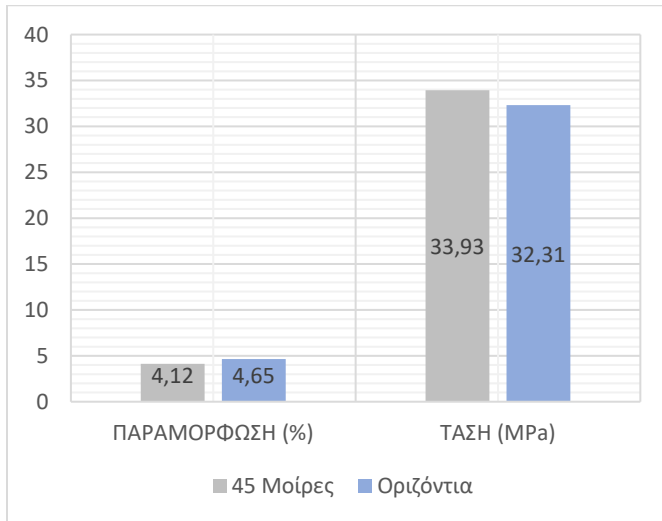


Γράφημα 13 - Μέτρο ελαστικότητας των τριών θερμοπλαστικών υλικών στους δύο προσανατολισμούς εκτύπωσης

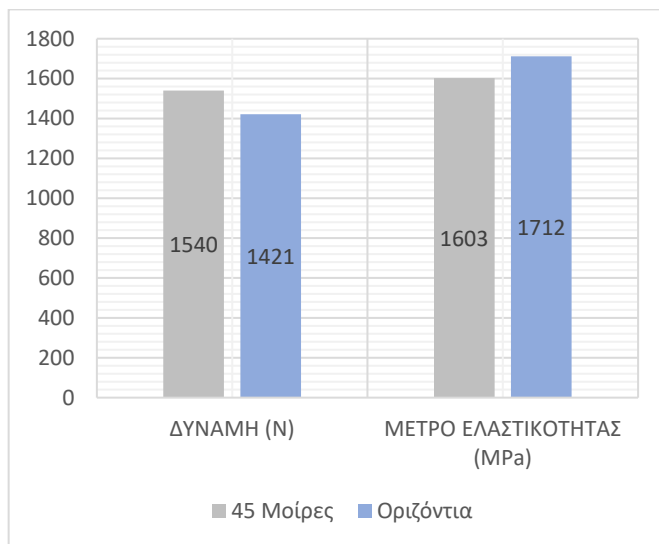
Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στην αντοχή της ένωσης μεταξύ στρώσεων για τα τρία υλικά. Μια ακόμη ένδειξη της ποιότητας της ένωσης μεταξύ στρώσεων στο PETG φαίνεται στην [εικόνα 76](#), όπου η επιφάνεια θραύσης του είναι η μόνη που δεν έχει σχηματιστεί καθαρά μεταξύ στρώσεων, αλλά έχει τριγωνικό σχήμα. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η τάση αποκόλλησης των στρώσεων είναι κοντά στην  $\sigma_{UTS}$  του υλικού.

Παρόλο που από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν τα ASA και PETG έχουν ονομαστική τιμή αντοχής κοντά στα 40MPa και το PLA κοντά στα 45MPa, τα οριζόντια δοκίμια PETG εμφάνισαν τελικά με διαφορά την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό. Συγκεκριμένα, τα οριζόντια δοκίμια PETG εμφάνισαν αντοχή περίπου 60% υψηλότερη από τα οριζόντια δοκίμια PLA και ASA, τα οποία αστόχησαν σε σχεδόν ίδια μέγιστη τιμή τάσης. Η διαφορά αυτή στα αποτελέσματα σε σχέση με τις προσδοκώμενες τιμές ενδεχομένως οφείλεται στην καλύτερη ένωση μεταξύ στρώσεων του PETG, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες των οριζόντιων δοκιμών λόγω του τρόπου με τον οποίο σχηματίστηκαν, ο οποίος όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι ανάλογος με αυτόν που θα χρησιμοποιούταν κατά την παρασκευή ενός πραγματικού εξαρτήματος, με τα δοκίμια να αποτελούνται κυρίως από γραμμές πλήρωσης με γωνία  $\mp 45^\circ$  σχετικά με τη διεύθυνση φόρτισης. Στην περίπτωση του PETG, ο λαιμός έχει σχηματιστεί υπό γωνία  $45^\circ$ , δείχνοντας την επίδραση της γωνίας πλήρωσης (raster angle) στην επιφάνεια θραύσης του αντικείμενου, αποτέλεσμα το οποίο είναι σύμφωνο και με τα ευρήματα των Hoon Ahn S. Et. Al. (28) που σχολιάζονται στην [Ενότητα 2.7](#) της εργασίας.

Τα δοκίμια φωτοπολυμερισμού όπως ήταν αναμενόμενο δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά στις μηχανικές τους ιδιότητες για διαφορετικούς προσανατολισμούς κατά την εκτύπωση. Οι διαφορές μεταξύ των δύο προσανατολισμών παρουσιάζονται στα γραφήματα 14 & 15.



Γράφημα 14 – Διαφορές μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης δοκιμών ρητίνης μεταξύ των δύο προσανατολισμών εκτύπωσης



Γράφημα 15 - Διαφορές μέγιστης δύναμης και μέτρου ελαστικότητας δοκιμών ρητίνης μεταξύ των δύο προσανατολισμών εκτύπωσης

Βλέπουμε ότι τα δοκίμια εμφανίζουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες μεταξύ των δύο προσανατολισμών εκτύπωσης, με το δοκίμιο εκτυπωμένο σε προσανατολισμό 45 μοιρών να εμφανίζει 5% μεγαλύτερη τάση και το οριζόντιο να εμφανίζει 6.7% μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Οι διαφορές αυτές κατά πάσα πιθανότητα οφείλονται σε ατέλειες της επιφάνειας των δοκιμών, οι οποίες βρίσκονται στα σημεία επαφής με τις στηρίξεις που σχηματίστηκαν κατά την εκτύπωση, και όχι σε ανισοτροπία. Αυτό συμβαίνει καθώς σε αντίθεση με τα δοκίμια FDM τα οποία παράγονται από πολλές «γραμμές» η γωνία των οποίων έχει άμεση επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες, στην περίπτωση του φωτοπολυμερισμού η κάθε στρώση σχηματίζεται ταυτοχρόνως, αλλά και η επόμενη στρώση ενώνεται πλήρως με την υπάρχουσα,

δημιουργώντας ισότροπα αντικείμενα χωρίς πορώδες, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί σε θερμοπλαστικά μόνο με μεθόδους όπως η χύτευση με έγχυση (injection molding). Η ομοιότητα των επιφανειών θραύσης των δύο δοκιμών φαίνεται στην εικόνα 78 και επιβεβαιώνει ότι τα δοκίμια είναι ισότροπα.



Εικόνα 78 - Επιφάνεια θραύσης δοκιμίου 45 μοιρών (πάνω) και οριζοντίου (κάτω)

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες των αντικειμένων από ρητίνη εξαρτώνται άμεσα από το χρόνο σκλήρυνσης (curing time) μετά την ολοκλήρωση της εκτύπωσης όπως αναφέρεται στην [Ενότητα 3](#) της εργασίας, με μεγαλύτερους χρόνους να οδηγούν σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και του  $\sigma_{UTS}$ , κάνοντας ωστόσο τα αντικείμενα πιο ψαθυρά. Υπερβολική έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντοχής της ρητίνης. Με τον χρόνο σκλήρυνσης 300s που επιλέχθηκε, τα δοκίμια της ρητίνης αστόχησαν σε τιμές μέγιστης τάσης κοντά σε αυτή του δοκιμίου PETG που τυπώθηκε στην οριζόντια διεύθυνση, έχουν ωστόσο ψαθυρή συμπεριφορά, με μέγιστη παραμόρφωση πριν τη θραύση 4.6%, σε αντίθεση με το οριζόντιο PETG, το οποίο εμφάνισε 11.5% παραμόρφωση πριν τη θραύση.

#### 9.4 Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας

Παρατηρήθηκε ότι μεταξύ των δοκιμών FDM και στις δύο διατάξεις το υλικό με την μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό ήταν το PETG. Επιπροσθέτως, το PETG παρουσίασε τις μικρότερες διαφορές σε  $\sigma_{UTS}$ , μέγιστη παραμόρφωση και μέτρο ελαστικότητας, μεταξύ των δύο προσανατολισμών εκτύπωσης. Πολύ κοντά ήταν και η αντοχή της ρητίνης γενικής χρήσης, η οποία ωστόσο αστόχησε ψαθυρά χωρίς προειδοποίηση. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η δυνατή πρόσφυση μεταξύ στρώσεων που παρουσιάζει το PETG είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες που μπορούν να χαρακτηρίσουν ένα υλικό ή μια μέθοδο ΠΠ, προκαλώντας σημαντικές διαφορές στην αντοχή του τελικού προϊόντος συγκριτικά με την ονομαστική αντοχή του υλικού. Η έντονη ανισοτροπία που παρουσιάζουν τα αντικείμενα που έχουν παραχθεί με την μέθοδο FDM πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό αλλά και την εκτύπωση εξαρτημάτων, προκειμένου να εξασφαλισθεί η σωστή λειτουργία τους. Οι μηχανικές ιδιότητες της πρώτης ύλης αποτελούν μια καλή πρώτη ένδειξη, χωρίς ωστόσο να καθορίζουν πλήρως την μηχανική συμπεριφορά ενός εκτυπωμένου εξαρτήματος σε

πραγματικές εφαρμογές. Η δυνατή ένωση των στρώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν ο σχεδιασμός του εξαρτήματος και η ρύθμιση της εκτύπωσης δεν μπορεί να εξασφαλίσει ότι τα φορτία που θα δεχθεί το εξάρτημα θα βρίσκονται στη διεύθυνση των ινών του υλικού.

Στην περίπτωση των δοκιμών φωτοπολυμερισμού, η ανισοτροπία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως δεν αποτελεί πρόβλημα, με τις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου να εξαρτώνται κυρίως από το υλικό και το χρόνο σκλήρυνσης. Οι απλές ρητίνες γενικής χρήσης όπως αυτή που επιλέχθηκε για την παρασκευή των δοκιμών έχουν σχετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας και  $\sigma_{UTS}$ , αστοχούν ωστόσο ψαθυρά σε πολύ χαμηλά ποσοστά παραμόρφωσης. Αυτή η ψαθυρή συμπεριφορά καθιστά τις απλές ρητίνες ακατάλληλες για τις περισσότερες μηχανολογικές εφαρμογές. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι στο εμπόριο υπάρχει διαθέσιμη μια μεγάλη ποικιλία από εξειδικευμένα φωτοπολυμερή με ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες, κατάλληλα για μηχανολογικές εφαρμογές διαφόρων απαιτήσεων.



## Ενότητα 10 - Επίλογος

Παρόλο που έχουν περάσει πάνω από 40 χρόνια από τη δημιουργία των πρώτων μηχανημάτων προσθετικής παραγωγής, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Η ΠΠ χάρη στα πολυάριθμα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει διαθέτει ήδη ένα σημαντικό πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών, χωρίς ωστόσο να έχει φτάσει στο σημείο να μπορεί να αντικαταστήσει τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Σε περίπτωση που κάποιος εξετάζει την χρήση κάποιας μεθόδου ΠΠ είναι σημαντικό τόσο να μπορεί να γνωρίζει αυτούς τους περιορισμούς, όσο και τις δυνατότητες της κάθε μεθόδου, προκειμένου να μπορεί να κάνει τη βέλτιστη επιλογή.

Ένα σημαντικό πρώτο βήμα κατά την επιλογή μεθόδου είναι να αποφασιστεί το είδος της πρώτης ύλης από την οποία θα κατασκευαστεί το αντικείμενο προς παραγωγή. Όπως αναφέρθηκε στις αντίστοιχες ενότητες της εργασίας, οι μέθοδοι μπορούν να διαχωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες, αυτές που χρησιμοποιούν κατά βάση πολυμερή (FDM, SLA, MSLA, MJ, SLS) και αυτές που χρησιμοποιούν κυρίως μέταλλα (BJ, SLM, DED, UAM) ως πρώτη ύλη. Εφόσον εξεταστούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής και γίνει η επιλογή χρήσης πολυμερούς ή μεταλλικού υλικού, πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα χαρακτηριστικά της κάθε μεθόδου που μπορεί να διαχειριστεί το επιθυμητό υλικό. Στον πίνακα 13 γίνεται μια συνοπτική σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών που χαρακτηρίζουν τις κυριότερες μεθόδους προσθετικής παραγωγής. Περεταίρω διαχωρισμοί μπορούν να γίνουν μεταξύ παρόμοιων υπομεθόδων (π.χ. MSLA με SLA ή SLM με EBM), ωστόσο χάριν απλότητας δεν θα συμπεριληφθούν σε αυτό το σημείο της εργασίας. Σε περίπτωση που κάποιος καταλήξει σε επιλογή μεθόδου που διαθέτει παραπλήσιες υπομεθόδους, μπορεί να αναφερθεί στην αντίστοιχη ενότητα της εργασίας όπου αναφέρονται λεπτομερώς οι διαφορές τους.

Πίνακας 13 - Σύγκριση μεθόδων ΠΠ

Μέθοδος	Βασικό Υλικό	Τυπική Ακρίβεια**	Ταχύτητα Παραγωγής	Μέγεθος Παρτίδας	Μετεπεξεργασία	Κόστος
FDM	Πολυμερή	100-400μm	Χαμηλή	Μικρό	-	Χαμηλό
MSLA	Πολυμερή	30-80μm	Υψηλή	Μικρό	Wash* / Cure*	Χαμηλό
MJ	Πολυμερή	30-80μm	Μέτρια	Μεσαίο	Cure*	Μέτριο
SLS	Πολυμερή	70-150μm	Μέτρια	Μεσαίο	-	Μέτριο
SLM/EBM	Μέταλλα	70-150μm	Μέτρια	Μεσαίο	Αποπεράτωση / Βαφή	Υψηλό
BJ	Μέταλλα	70-150μm	Υψηλή	Μεγάλο	Sintering* / Βαφή	Μέτριο
DED	Μέταλλα	~1000μm	Χαμηλή	Μικρό	Αποτακτική ανόπτηση	Υψηλό
UAM	Μέταλλα	10-30μm	Μέτρια	Μικρό	-	Υψηλό

\*απαραίτητη διεργασία

\*\*στο X-Y επίπεδο (minimum feature size)

Κατά την επιλογή μεθόδου προσθετικής παραγωγής πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλοι οι παραπάνω παράγοντες, καθώς και να γίνει σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. Κριτήρια όπως η γεωμετρία του επιθυμητού τεμαχίου παίζουν καταλυτικό ρόλο στην επιλογή μεθόδου ΠΠ, με παράγοντες όπως η ταχύτητα, ακρίβεια, επιφανειακή τραχύτητα και ταχύτητα/μέγεθος παρτίδας να επηρεάζουν την τελική επιλογή. Πιο λεπτομερής αναφορά στις δυνατότητες και περιορισμούς της κάθε

οικογένειας μεθόδων γίνεται στις ενότητες 2 – 8 της εργασίας, και ο αναγνώστης παροτρύνεται να ανατρέξει σε αυτές σε περίπτωση που εξετάζει την χρήση κάποιας μεθόδου ΠΠ.

Πέρα από την επιλογή μιας γενικής κατηγορίας υλικών και της επιθυμητής μεθόδου ΠΠ, η επιλογή του βέλτιστου υλικού παίζει επίσης εξαιρετικά σημαντικό ρόλο. Όπως παρατηρήθηκε στην πειραματική διαδικασία της [Ενότητας 9](#), μπορούν να παρουσιαστούν σημαντικές διαφορές στις ιδιότητες υλικών που ανήκουν στην ίδια κατηγορία, ενώ η συμπεριφορά του τελικού αντικειμένου επηρεάζεται περεταίρω από παράγοντες όπως την ανισοτροπία και την αντοχή της ένωσης διαδοχικών στρώσεων του υλικού. Από τις δοκιμές εφελκυσμού φάνηκε ότι το PETG αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή υλικού το οποίο προφέρει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά που δοκιμάστηκαν. Πολλοί ερευνητές έχουν διεξάγει παρόμοια πειράματα για τον προσδιορισμό των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων από υλικά που δεν καλύφθηκαν από την πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας.

## Πηγές

1. Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017 Sep 1;60(5):677–88.
2. Levesque JN, Shah A, Ekhtiari S, Yan JR, Thornley P, Williams DS. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: A scoping review. Vol. 5, *EFORT Open Reviews*. British Editorial Society of Bone and Joint Surgery; 2020. p. 430–41.
3. Paris H, Mokhtarian H, Coatanéa E, Museau M, Ituarte IF. Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2016;65(1):29–32.
4. Introduction to Topology Optimization [Internet]. 2020 [cited 2022 Jan 11]. Available from: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>
5. US Patent for Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography Patent (Patent # 4,575,330 issued March 11, 1986) - Justia Patents Search [Internet]. Patents.Justia.Com. 1984 [cited 2021 Feb 10]. Available from: <https://patents.justia.com/patent/4575330>
6. Price TR. Infographic: The History of 3D Printing > ENGINEERING.com [Internet]. Engineering.com. 2013 [cited 2021 Dec 13]. Available from: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6262/Infographic-The-History-of-3D-Printing.aspx>
7. Mohamed OA. Analytical Modeling and Experimental Investigation of Product Quality and Mechanical Properties in FDM Additive Manufacturing Analytical Modeling and Experimental Investigation of Product Quality and Mechanical Properties in FDM Additive Manufacturing By. 2017.
8. Quote R, Us A. Types of 3D Printing Technologies [Internet]. 2014 [cited 2021 Feb 28]. p. 9–11. Available from: <https://www.hubs.com/knowledge-base/types-of-3d-printing/>
9. Dassault Systemes [Internet]. [cited 2021 Mar 10]. Available from: <https://www.3ds.com/3dexperience>
10. Radionov AA, Kravchenko OA, Guzeev VI, Rozhdestvenskiy Editors Y V. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019.
11. Liu XJ, Wang J, Oh KK, Kim J. A new approach to the design of a DELTA robot with a desired workspace. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 2004 Feb;39(2):209–25.
12. Kakabadze G. Anisotropic Behaviour Analysis of 3D Printed Structures. 2020;(October).
13. Boulaala M, Elmessaoudi D, Buj-Corral I, El Mesbahi J, Ezbakhe O, Astito A, et al. Towards design of mechanical part and electronic control of multi-material/multicolor fused deposition modeling 3D printing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Sep 1;110(1–2):45–55.

14. Thornsberry C. What does resolution mean in 3D printing? 3Space.com. 2019;2–5.
15. Cruz Sanchez FA, Boudaoud H, Hoppe S, Camargo M. Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing*. 2017 Oct 1;17:87–105.
16. Prusa Knowledge Base [Internet]. *Materials*. [cited 2021 Jul 30]. Available from: <https://help.prusa3d.com/en/materials>
17. Ingole DS, Kuthe AM, Thakare SB, Talankar AS. Rapid prototyping - A technology transfer approach for development of rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*. 2009;15(4):280–90.
18. Jain P, Kuthe AM. Feasibility study of manufacturing using rapid prototyping: FDM approach. In: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd; 2013. p. 4–11.
19. Airbus. Bridging the gap with 3D printing [Internet]. 2018 [cited 2021 Aug 3]. Available from: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2018/04/bridging-the-gap-with-3d-printing.html>
20. Antenucci E. Shorter Turnaround Time [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 2]. Available from: <https://www.stratasys.com/explore/case-study/rtm-ortopedia-personalizzata>
21. Altuntaş E, Özkan B, Yener G. Porous scaffolds. In: *Nanobiomaterials Science, Development and Evaluation*. Elsevier Inc.; 2017. p. 27–59.
22. 3DNatives [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 4]. Available from: <https://www.3dnatives.com/en/>
23. Al Khawaja H, Mansour A, Alabdouli H, Ahmed W, Alqaydi H, Al Jassmi H. 2020 *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. 2020 *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. 2020.
24. Michaeli W. *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*. Extrusion Dies for Plastics and Rubber. 2003.
25. ERYILDIZ M. Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation. *European Mechanical Science*. 2021;5(3):116–20.
26. Ahn SH, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002;8(4):248–57.
27. Wu W, Ye W, Wu Z, Geng P, Wang Y, Zhao J. Influence of layer thickness, raster angle, deformation temperature and recovery temperature on the shape-memory effect of 3D-printed polylactic acid samples. *Materials*. 2017 Aug 19;10(8).
28. Hoon Ahn S, Baek C, Lee S, Shup Ahn I. ANISOTROPIC TENSILE FAILURE MODEL OF RAPID PROTOTYPING PARTS-FUSED DEPOSITION MODELING (FDM). Vol. 17, *International Journal of Modern Physics B*. 2003.
29. All3dp. Stereolithography simply explained [Internet]. 2019 [cited 2021 Dec 10]. Available from: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
30. Varotsis AB. What is SLA 3D Printing [Internet]. 2020 [cited 2021 Apr 12]. Available from: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>

31. MANUFACTUR3 [Internet]. 2018 [cited 2021 Mar 7]. Available from: <https://manufactur3dmag.com/3d-printing-technology-choice-fdm-v-s-sla-v-s-sl/>
32. Pagac M, Hajnys J, Ma QP, Jancar L, Jansa J, Stefek P, et al. A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing. Vol. 13, *Polymers*. MDPI AG; 2021. p. 1–20.
33. Diegel O, Nordin A, Motte D. Additive Manufacturing Technologies. In 2019. p. 19–39.
34. Otuka AJG, Tomazio NB, Paula KT, Mendonça CR. Two-photon polymerization: Functionalized microstructures, micro-resonators, and bio-scaffolds. *Polymers*. 2021 Jun 2;13(12).
35. Formlabs. SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers [Internet]. [cited 2021 Mar 8]. Available from: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>
36. Chitubox [Internet]. [cited 2021 Mar 8]. Available from: <https://www.chitusystems.com/>
37. Bagheri A, Jin J. Photopolymerization in 3D Printing. Vol. 1, *ACS Applied Polymer Materials*. American Chemical Society; 2019. p. 593–611.
38. De Beer MP, Van Der Laan HL, Cole MA, Whelan RJ, Burns MA, Scott TF. Rapid, continuous additive manufacturing by volumetric polymerization inhibition patterning. 2019.
39. F. Jacobs PhD. Stereolithography and Other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling. American Society of Mechanical Engineers. 1995;
40. Teymoorzadeh H, Rodrigue D. Biocomposites of wood flour and polylactic acid: Processing and properties. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2015 Apr 1;9(2):252–7.
41. Kajtaz M, Subic A, Brandt M, Leary M. Three-dimensional printing of sports equipment. In: *Materials in Sports Equipment*. Elsevier; 2019. p. 161–98.
42. Formlabs. How to Use 3D Printing for Injection Molding [Internet]. 2020 [cited 2021 Mar 7]. Available from: [formlabs.com](https://formlabs.com)
43. Formlabs. Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds [Internet]. 2020 [cited 2021 Aug 8]. Available from: <https://formlabs.com>
44. Sculpteo. What is important to know about 3D printing supports [Internet]. [cited 2021 Aug 16]. Available from: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/design-guidelines/understanding-3d-printing-supports/>
45. Wohlers T. The rapid prototyping patent museum: basic technology patents. *Wohlers Report*. 2013;3.
46. Technologies M. Background on ink-jet technology. *MicroFab Technote*. 1999;01(99).
47. Asbindustries. Cold Spray Coatings [Internet]. [cited 2021 Mar 3]. Available from: <https://www.asbindustries.com/cold-spray-coatings>
48. Wei F, Fuh JYH, Yoke SW. Development of a drop-on-demand micro dispensing system. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd; 2006. p. 25–30.

49. De Gans BJ, Kazancioglu E, Meyer W, Schubert US. Ink-jet Printing Polymers and Polymer Libraries Using Micropipettes. *Macromolecular Rapid Communications*. 2004 Jan 2;25(1):292–6.
50. Ainsley C, Reis N, Derby B. Freeform fabrication by controlled droplet deposition of powder filled melts. *Journal of Materials Science*. 2002;37(15):3155–61.
51. Liu Q, Orme M. High precision solder droplet printing technology and the state-of-the-art. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;115(3):271–83.
52. Orme M. A Novel Technique of Rapid Solidification Net-Form Materials Synthesis. Vol. 2, JMEPEG. 1993.
53. Cao W, Miyamoto Y. Freeform fabrication of aluminum parts by direct deposition of molten aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006 Apr 10;173(2):209–12.
54. Mirzababaei S, Pasebani S. A review on binder jet additive manufacturing of 316L stainless steel. Vol. 3, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2019.
55. A Guide to the Top 5 Industrial Binder Jetting Machines [Internet]. [cited 2021 Jan 20]. Available from: <https://amfg.ai/2018/04/27/top-5-binder-jetting-machines/>
56. Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies*.
57. Ziaee M, Crane NB. Binder jetting: A review of process, materials, and methods. Vol. 28, *Additive Manufacturing*. Elsevier B.V.; 2019. p. 781–801.
58. A. B. Varotsis. Introduction to binder jetting 3D printing [Internet]. [cited 2022 Jan 13]. Available from: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#what>
59. A Short Guide to 3D Printing with Binder Jetting [Internet]. [cited 2021 Jul 2]. Available from: <https://amfg.ai/2018/03/13/3d-printing-binder-jetting-short-guide/>
60. Cai C, Tey WS, Chen J, Zhu W, Liu X, Liu T, et al. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021 Feb 1;288.
61. Damanhuri AAM, Hariri A, Alkahari MR, Fauadi MHFM, Bakri SFZ. Indoor air concentration from selective laser sintering 3D printer using virgin polyamide nylon (PA12) powder: A pilot study. *International Journal of Integrated Engineering*. 2019;11(5 Special Issue):140–9.
62. A. B. Varotsis. What is SLS 3D printing? [Internet]. [cited 2021 May 15]. Available from: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
63. Kruth JP, Levy G, Schindel R, Craeghs T, Yasa E. Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering.
64. Awad A, Fina F, Goyanes A, Gaisford S, Basit AW. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *International Journal of Pharmaceutics*. 2020 Aug 30;586.



65. What 3D Printer Should I Buy in 2020? Your Ultimate Guide to 3D Printing [Internet]. [cited 2021 Apr 18]. Available from: <https://interestingengineering.com/what-3d-printer-should-i-buy-in-2020-your-ultimate-guide-to-3d-printing>
66. Kauppila I. Multi Jet Fusion (MJF) 3D Printing – Simply Explained [Internet]. 2021 [cited 2022 Jan 15]. Available from: <https://all3dp.com/1/multi-jet-fusion-mjf-3d-printing-simply-explained/>
67. O’Connor HJ, Dickson AN, Dowling DP. Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process. Additive Manufacturing. 2018 Aug 1;22:381–7.
68. HP MULTI JET FUSION IS REINVENTING 3D PRINTING [Internet]. [cited 2021 Apr 23]. Available from: <https://imagination.io/hp-multi-jet-fusion-is-reinventing-3d-printing/>
69. Xu Z, Wang Y, Wu D, Ananth KP, Bai J. The process and performance comparison of polyamide 12 manufactured by multi jet fusion and selective laser sintering. Journal of Manufacturing Processes. 2019 Nov 1;47:419–26.
70. Yap CY, Chua CK, Dong ZL, Liu ZH, Zhang DQ, Loh LE, et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. Vol. 2, Applied Physics Reviews. American Institute of Physics Inc.; 2015.
71. Murphy J. Selective Laser Melting (SLM) – 3D Printing Simply Explained [Internet]. 2019 [cited 2022 Jan 17]. Available from: <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
72. Everything You Need To Know About Metal 3D Printing [Internet]. [cited 2021 Feb 14]. Available from: <https://matmatch.com/resources/blog/metal-3d-printing/>
73. EOS and Audi expand Range of Applications for Metal 3D Printing [Internet]. [cited 2021 May 3]. Available from: <https://www.eos.info/en/presscenter/press-releases/cooperation-audi-tooling-2021>
74. Roberto Romão Bineli A, Paula Gimenez Peres A, Luiz Jardini A, Maciel Filho R. 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 6 th BRAZILIAN CONFERENCE ON MANUFACTURING ENGINEERING 11 a 15 de abril de 2011-Caxias do Sul-RS-Brasil April 11 th to 15 th , 2011-Caxias do Sul-RS-Brazil DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS): TECHNOLOGY FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF MICROREACTORS.
75. Hanzl P, Zetek M, Bakša T, Kroupa T. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. In: Procedia Engineering. Elsevier Ltd; 2015. p. 1405–13.
76. Gregurić L. Electron Beam Melting (EBM) – 3D Printing Simply Explained [Internet]. 2019 [cited 2022 Jan 18]. Available from: <https://all3dp.com/2/electron-beam-melting-ebm-3d-printing-simply-explained/>
77. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - A review. Vol. 61, International Materials Reviews. Taylor and Francis Ltd.; 2016. p. 361–77.

78. Electron Beam Melting (EBM) Printers [Internet]. [cited 2021 Jun 13]. Available from: <https://www.3dprintingtoday.com/3d-printing-technologies/3d-printers/electron-beam-melting-ebm-printers/>
79. Zhang LC, Liu Y, Li S, Hao Y. Additive Manufacturing of Titanium Alloys by Electron Beam Melting: A Review. Vol. 20, *Advanced Engineering Materials*. Wiley-VCH Verlag; 2018.
80. Negi S, Nambolan AA, Kapil S, Joshi PS, R M, Karunakaran KP, et al. Review on electron beam based additive manufacturing. Vol. 26, *Rapid Prototyping Journal*. Emerald Group Holdings Ltd.; 2020. p. 485–98.
81. Sing SL, An J, Yeong WY, Wiria FE. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. Vol. 34, *Journal of Orthopaedic Research*. John Wiley and Sons Inc.; 2016. p. 369–85.
82. Carlota V. The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing [Internet]. 2019 [cited 2022 Jan 18]. Available from: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
83. Dutta B. Directed Energy Deposition (DED) Technology. In: *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. Elsevier; 2021. p. 66–84.
84. Saboori A, Aversa A, Marchese G, Biamino S, Lombardi M, Fino P. Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. Vol. 9, *Applied Sciences (Switzerland)*. MDPI AG; 2019.
85. Oh WJ, Lee WJ, Kim MS, Jeon JB, Shim DS. Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition. *Optics and Laser Technology*. 2019 Sep 1;117:6–17.
86. What is Directed Energy Deposition? [Internet]. [cited 2021 Mar 15]. Available from: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-energy-deposition/>
87. OPEN MIND Technologies to highlight ADDITIVE Manufacturing Capability for hyperMILL CAM software at RAPID + TCT 2021 [Internet]. [cited 2021 Sep 22]. Available from: <https://www.makepartsfast.com/open-mind-technologies-to-highlight-additive-manufacturing-capability-for-hypermill-cam-software-at-rapid-tct-2021/>
88. 3D PRINTING CHAMPIONS SUSTAINABILITY IN OPTOMECH LENS MACHINE REPAIR AT RIT [Internet]. [cited 2022 Apr 12]. Available from: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-champions-sustainability-optomech-lens-machine-repair-rit-128769/>
89. Ultrasonic Consolidation [Internet]. [cited 2021 Jun 19]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic\\_consolidation](https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_consolidation)
90. Fabrisonic UAM machines [Internet]. [cited 2021 Jul 15]. Available from: <https://fabrisonic.com/>
91. Hehr A, Norfolk M. A comprehensive review of ultrasonic additive manufacturing. Vol. 26, *Rapid Prototyping Journal*. Emerald Group Holdings Ltd.; 2020. p. 445–58.
92. Badiru A. *Additive Manufacturing Handbook*.

93. Fabrisonic's ultrasonic Additive Manufacturing used to produce aluminium satellite heat exchangers [Internet]. 2021 [cited 2021 Mar 20]. Available from: <https://www.metal-am.com/fabrisonics-ultrasonic-additive-manufacturing-used-to-produce-aluminium-satellite-heat-exchangers/>
94. Bournias-Varotsis A, Friel RJ, Harris RA, Engstrøm DS. Ultrasonic Additive Manufacturing as a form-then-bond process for embedding electronic circuitry into a metal matrix. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018 Apr 1;32:664–75.