



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2016-17
ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ (SYSTEMS ENGINEERING)

(ΠΔ 96 /2015/ΦΕΚ 163Α'/20.08.2014)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Τρισδιάστατη εκτύπωση & στρατιωτικές εφαρμογές»

Αγγλικός Τίτλος: «3D Printing & military applications»

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την
απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό:

Αλέξανδρου ΚΑΛΤΣΗ

A.M.: 2014018007

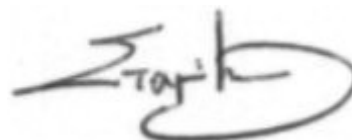
ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2017

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Αλέξανδρου ΚΑΛΤΣΗ εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

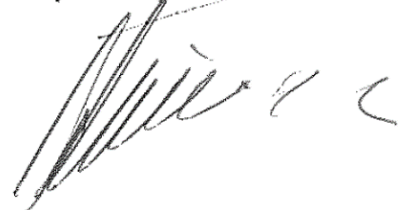
Καθηγητής (Επιβλέπων) Κωνσταντίνος ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ



1. Καθηγήτρια Ειρήνη ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΥ



2. Καθηγητής Γεώργιος ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ



ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό Αλέξανδρου ΚΑΛΤΣΗ

Έτος 2017

Στην σύζυγο μου Γωγώ
και στα παιδιά μου Γιώργο & Βασίλη,
που απαρτίζουν τη δική μου ευτυχία
και με εμπνέουν κάθε μέρα που περνάει...

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου Δρ. Κωνσταντίνο ΣΤΑΜΟΥΛΗ για την πολύτιμη καθοδήγηση του και τον χρόνο που μου αφιέρωσε, τόσο για την επιλογή του θέματος όσο και για την πραγματοποίηση αυτής της Μεταπτυχιακής Διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης το διδακτικό και διοικητικό προσωπικό του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Ειδίκευσης Σχεδίαση & Επεξεργασία Συστημάτων για την άρτια επιστημονική και επαγγελματική εκπαίδευση, καθώς και τις γνώσεις που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να αναγνωρίσω τη συμβολή και την αμέριστη υποστήριξη της συζύγου μου, όλον αυτό τον καιρό και να την ευχαριστήσω που στέκεται αρωγός σε κάθε βήμα και στόχο που θέτω.

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.	3
1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.	3
1.2. ΓΕΝΙΚΑ – ΟΡΙΣΜΟΣ.	7
1.3. ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ.	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.	13
ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΚΤΥΠΩΣΗ.	13
2.1. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ CAD ΜΟΝΤΕΛΟΥ.	13
2.1.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ (COMPUTER AIDED DESIGN, CAD).	14
2.1.2. ΑΠΟΘΕΤΗΡΙΑ 3D ΜΟΝΤΕΛΩΝ (3D MODEL REPOSITORIES).	14
2.1.3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΑΡΩΣΗ (3D SCANNING)-ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ.	15
2.2. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ CAD ΣΕ ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΑΓΩΓΗΣ.	17
2.2.1. ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΑΓΩΓΗΣ STL.	17
2.2.2. ΆΛΛΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΡΧΕΙΩΝ.	20
2.3. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟΝ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ.	20
2.4. ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ.	22
2.5. ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΟ ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ.	22
2.6. ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (SERVICE BUREAUS).	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.	24
ΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΟΥ ΕΜΠΛΕΚΟΝΤΑΙ ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.	24
3.1. ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ (CAD/CAE/CAM).	24
3.2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ (COMPUTER AIDED DESIGN-CAD).	25
3.3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ (COMPUTER AIDED ENGINEERING-CAE).	28
3.4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ COMPUTER AIDED MANUFACTURING-CAM).	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	31
ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	31
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	31
4.2. ΣΥΝΔΕΤΙΚΗ ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ (BINDER JETTING- BJ)	32
4.3. ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (DIRECTED ENERGY DEPOSITION)	34
4.3.1. ΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΛΕΙΖΕΡ (LASER-BASED METAL DEPOSITION - LBMD)	36
4.3.2. ΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (ELECTRON BEAM BASED METAL DEPOSITION)	37
4.4. ΕΞΩΘΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ (MATERIAL EXTRUSION)	39
4.4.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ ΤΗΓΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ (FUSED DEPOSITION MODELING - FDM), ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΓΜΕΝΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ (FUSED FILAMENT FABRICATION - FFF) ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ (COMPOSITE FILAMENT FABRICATION - CFF)	40
4.4.2. ROBOCASTING Η ΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΗ ΓΡΑΦΗ ΜΕΛΑΝΙΟΥ (DIRECT INK WRITING - DIW), ΒΙΟΕΞΩΘΗΣΗ (BIOEXTRUSION)	42
4.5. ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ (MATERIAL JETTING)	43
4.5.1. ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΜΕ ΠΙΕΣΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ (NANOPARTICLE JETTING - NPJ)	44
4.6. ΣΥΝΤΗΞΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΚΟΝΗΣ (POWDER BED FUSION)	45
4.6.1. ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΞΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ ΛΕΙΖΕΡ (SELECTIVE LASER SINTERING – SLS)	46
4.6.2. ΛΙΩΣΙΜΟ ΜΕ ΔΕΣΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ (ELECTRON BEAM MELTING – EBM)	48
4.7. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΦΥΛΛΩΝ (SHEET LAMINATION)	49
4.7.1. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ Η ΚΟΛΛΗΣΗ (GLUING OR ADHESIVE BONDING)	50
4.7.1.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ (LAMINATED OBJECT MANUFACTURING – LOM)	50
4.7.1.2. ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (SELECTIVE DEPOSITION LAMINATION – SDL)	52
4.7.2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ (THERMAL BONDING)	53
4.7.3. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ (ULTRASONIC WELDING)	53

4.8. ΦΩΤΟΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ (VAT PHOTOPOLYMERISATION).....	54
4.8.1. ΣΤΕΡΕΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ (STEREOLITHOGRAPHY).....	55
4.8.2. ΣΥΝΕΧΕΣ ΥΓΡΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (CONTINUOUS LIQUID INTERFACE PRODUCTION – CLIP).....	57
4.8.3. ΨΗΦΙΑΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΦΩΤΟΣ (DIGITAL LIGHT PROCESSING- DLP)	58
4.8.4. ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΣΤΕΡΕΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ (SOLID GROUND CURING- SGC).....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	62
ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	62
5.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	62
5.2. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ.....	64
5.3. ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ.....	69
5.4. ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	70
5.5. ΡΗΤΙΝΕΣ.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	74
Η ΘΕΤΙΚΗ ΚΑΙ Η ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΛΕΥΡΑ.....	74
6.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	74
6.1.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ.....	77
6.2. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	84
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	84
7.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	84
7.2. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ & GIS.....	84
7.3. ΔΙΑΣΤΗΜΑ.....	86
7.4. ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ.....	86
7.5. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ-ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	87
7.6. ΙΑΤΡΙΚΗ-ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ-ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΗ-ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΗ.....	88
7.7. ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ.....	90
7.8. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΙΚΩΝ ΑΓΑΘΩΝ- ΨΥΧΑΓΩΓΙΑ.....	90

7.9. ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ- ΤΕΧΝΗ – ΚΙΝΗΜΑΤΟΓΡΑΦΟΣ– ΚΟΣΜΗΜΑΤΑ.....	91
7.10. ΜΟΔΑ- ΡΟΥΧΑ ΚΑΙ ΥΠΟΔΗΣΗ.	92
7.11. ΜΑΓΕΙΡΙΚΗ-ΖΑΧΑΡΟΠΛΑΣΤΙΚΗ.	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.	95
ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.	95
8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.	95
8.2. ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ (PROTOTYPING).	96
8.3. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ.	97
8.4. ΕΚΤΥΠΩΜΕΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	98
8.5. Όπλα-ΠΥΡΟΜΑΧΙΚΑ.....	102
8.6. ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ-ΡΟΜΠΟΤ.	104
8.7. ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΣΗ.....	108
8.8. ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ – ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.	110
8.9. ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ – ΠΕΔΙΟΥ.	112
8.10. ΙΑΤΡΙΚΗ-ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ-ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΗ-ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΗ.	115
8.11. ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ.....	118
8.12. Η 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΤΡΟΦΙΜΩΝ.	119
8.13. ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ.....	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.	122
ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.	130
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.	132
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.	133

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	139
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'	140
ΑΠΟΘΕΤΗΡΙΑ 3D ΜΟΝΤΕΛΩΝ (3D MODEL REPOSITORIES)	140
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'	142
ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (SERVICE BUREAUS)	142
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ'	144
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ 3D ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ (3D DESIGN/CAD SOFTWARE)	144
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ'	146
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΑΡΧΕΙΩΝ .STL (STL FILE VIEWER)	146
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε'	147
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΡΧΕΙΩΝ .STL (STL FILE EDITOR)	147
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ'	147
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΑΡΧΕΙΩΝ .STL (STL REPAIR TOOLS)	147
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ'	148
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΣΤΡΩΜΜΑΤΩΣΗΣ (SLICING)	148
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η'	148
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΤΥΠΩΤΗ (PRINTER CONTROL)	148
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ'	149
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ	149

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Ο Charles Hull.....	3
Εικόνα 2. Ο Carl Deckard.....	3
Εικόνα 3. Η εταιρεία του Scott Crump.....	4
Εικόνα 4. Εκτύπωση οργάνων και ιστών στο Wake Forest Institute.....	4
Εικόνα 5. Ο εκτυπωτής RepRap, έκδοση 1.0 (Darwin).....	5
Εικόνα 6. Ο εκτυπωτής Maker Bot.....	6
Εικόνα 7. Εκτυπωμένο αεροπλανάκι.....	6
Εικόνα 8. Τυπωμένη κάτω σιαγόνα	6
Εικόνα 9. Τρισδιάσταση εκτυπωμένη καρδιά	7
Εικόνα 10. Η αφαιρετική μέθοδος παραγωγής.....	8
Εικόνα 11. Η προσθετική μέθοδος παραγωγής.....	8
Εικόνα 12. Αναπαράσταση ενός 3 τρισδιάστατου σχήματος σύμφωνα με θεώρημα Fubini.....	11
Εικόνα 13. Διάγραμμα ροής αντίστροφης σχεδίασης.....	15
Εικόνα 14. Αναπαράσταση STL αρχείου	17
Εικόνα 15. Αναπαράσταση σφαίρας σε αρχείο STL με διαφορετικές παραμέτρους.....	18
Εικόνα 16. Διαδικασία τεμαχισμού (slicing).....	21
Εικόνα 17. 3D εκτυπωτές.....	22
Εικόνα 18. Βασικές εντολές λογισμικού CAD.....	25
Εικόνα 19. Πρόσθετες Βασικές εντολές λογισμικού CAD.....	26
Εικόνα 20. Παράδειγμα εντολών λογισμικού διαστρωμάτωσης.....	30
Εικόνα 21. Μέθοδος Binder Jetting	33
Εικόνα 22. Μέθοδος Directed Energy Deposition, τεχνολογία «Laser-Based Metal Deposition – LBMD».....	36
Εικόνα 23. Μέθοδος Directed Energy Deposition, τεχνολογία «Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM™)»	38
Εικόνα 24. Μέθοδος Material Extrusion, τεχνολογία «Fused Deposition Modeling - FDM», «Fused Filament Fabrication - FFF», «Composite Filament Fabrication – CFF».....	40
Εικόνα 25. Μέθοδος Material Jetting.....	44
Εικόνα 26. Μέθοδος Material Jetting, τεχνολογία «NanoParticle Jetting – NPJ».....	45
Εικόνα 27. Μέθοδος Powder Bed Fusion, τεχνολογία «Selective Laser Sintering – SLS».....	47
Εικόνα 28. Μέθοδος Powder Bed Fusion, τεχνολογία «Electron Beam Melting – EBM».....	49
Εικόνα 29. Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία «Laminated Object Manufacturing – LOM»	51
Εικόνα 30. Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία «Selective Deposition Lamination – SDL»	52
Εικόνα 31. Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία «Ultrasonic Welding».....	54
Εικόνα 32. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία «Stereolithography»	56
Εικόνα 33. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία «Continuous Liquid Interface Production – CLIP».....	57

Εικόνα 34. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία «Digital Light Processing- DLP».....	59
Εικόνα 35. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία « Solid Ground Curing- SGC».....	61
Εικόνα 36. Υλικά τεχνολογίας FDM ΚΑΙ POLYJET	62
Εικόνα 37. Υλικό Κατασκευής ABS	64
Εικόνα 38. Υλικό Κατασκευής PET	66
Εικόνα 39. Υλικό Κατασκευής TPE	66
Εικόνα 40. Υλικό Κατασκευής LayWood	67
Εικόνα 41. Υλικό Κατασκευής Laybrick	68
Εικόνα 42. Υλικό Κατασκευής Full color sandstone	70
Εικόνα 43. Θετικά & αρνητικά.....	74
Εικόνα 44. 3D εκτυπωμένα όπλα	81
Εικόνα 45. 3D εκτυπωμένος χάρτης.....	85
Εικόνα 46. 3D εκτυπωμένα γραφεία στο Ντουμπάι	85
Εικόνα 47. Σχεδιασμός προτεινόμενης 3D εκτυπωμένης βάσης στο φεγγάρι.....	86
Εικόνα 48. 3D εκτυπωμένο ακροφύσιο ψεκασμού καυσίμου	87
Εικόνα 49. 3D εκτυπωμένο αυτ/το.....	87
Εικόνα 50. 3D εκτυπωμένα εκμαγεία.....	89
Εικόνα 51. Μαθηματικά, υπερβολικό παραβολοειδές 3D εκτυπωμένο.....	90
Εικόνα 52. 3D εκτυπωμένο αντίγραφο άγαλμα του «Κούρου	91
Εικόνα 53. 3D εκτυπωμένο δακτυλίδι	92
Εικόνα 54. 3D εκτυπωμένο αθλητικό υπόδημα.....	92
Εικόνα 55. 3D εκτυπωμένα ζυμαρικά Barilla.....	93
Εικόνα 56. 3D εκτυπωμένα ζαχαρωτά.....	93
Εικόνα 57. 3D τοπογραφικός χάρτης.....	97
Εικόνα 58. 3D εκτυπωμένο ανταλλακτικό για το V-22 Osprey	98
Εικόνα 59. 3D εκτυπωμένα μπουλόνια και παξιμάδια	99
Εικόνα 60. 3D εκτυπωμένα μέρη κράνους.....	99
Εικόνα 61. 3D εκτυπωμένη βάση στήριξης.....	100
Εικόνα 62. 3D εκτυπωμένο εξωτερικό κάλυμμα βαλβίδας	100
Εικόνα 63. 3D εκτυπωμένα καλύμματα σκόνης για ασυρμάτους	101
Εικόνα 64. 3D εκτυπωμένη βάση στήριξης φακών.....	101
Εικόνα 65. 3D εκτυπωμένες αεροτομές κινητήρα	101
Εικόνα 66. 3D εκτυπωμένα κλιπ κάρτας κυκλώματος	102
Εικόνα 67. 3D εκτυπωμένος σταθεροποιητής σκοποβολής.....	102
Εικόνα 68. 3D εκτυπωμένο όπλο - Solid Concepts 1911	102
Εικόνα 69. 3D εκτυπωμένο όπλο – AR-15.....	103

Εικόνα 70. 3D εκτυπωμένος πύραυλος.....	103
Εικόνα 71. 3D εκτυπωμένο UAV	104
Εικόνα 72. 3D εκτυπωμένο micro UAV	105
Εικόνα 73. 3D εκτυπωμένο UAV από την Stratasys και την Aurora Flight Sciences	105
Εικόνα 74. 3D εκτυπωμένα UAVs- το AMRC αριστερά και το razor δεξιά.....	106
Εικόνα 75. Το Chempur.....	106
Εικόνα 76. Explosively Formed Penetrators (EFPs)	107
Εικόνα 77. 3D εκτυπωμένο ρομποτικό όχημα.....	107
Εικόνα 78. Το Άλφα της Boston Dynamics.....	108
Εικόνα 79. Το MeRLIn.....	108
Εικόνα 80. 3D σαρωτής ποδιών	109
Εικόνα 81. 3D τυπωμένα κυκλώματα και κεραία	109
Εικόνα 82. 3D εκτυπωμένο κάλυμμα δεξαμενής πετρελαίου.....	113
Εικόνα 83. Το Rapid Equipping Force- REF	114
Εικόνα 84. Το Mobile Parts Hospital -MPH.....	114
Εικόνα 85. 3D εκτυπωμένη σφήνα	116
Εικόνα 86. 3D εκτυπωμένο μοντέλο κρανίου	116
Εικόνα 87. 3D εκτυπωμένο προσθετικό μέλος.....	117
Εικόνα 88. 3D εκτυπωμένο κρανίο και πλάκα εμφύτευσης.....	118
Εικόνα 89. 3D εκτυπωμένος οδηγός εμφυτευμάτων	118
Εικόνα 90. 3D εκτυπωμένη εκπαιδευτική νάρκη	119
Εικόνα 91. 3D εκτυπωμένη πίτσα	120
Εικόνα 92. 3D εκτυπωμένα μέρη δορυφόρου	121
Εικόνα 93. Χάρτης διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σε τομείς ενδιαφέροντος.....	122
Εικόνα 94. Χρήση της 3D εκτύπωσης.....	122

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή περιγράφει, την ακολουθία της τρισδιάστατης εκτύπωσης από τη σύλληψη της ιδέας και την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου μέχρι την παραγωγή του πρωτότυπου μοντέλου. Γίνεται περιγραφή στα λογισμικά που εμπλέκονται στην διαδικασία καθώς και στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των μοντέλων. Τέλος εξετάζει εν συντομία την εξέλιξη στις τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης και το πεδίο εφαρμογών με έμφαση στις στρατιωτικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα:

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μία εισαγωγική αναφορά, παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης και δίνεται ένας γενικός ορισμός.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται τα επιμέρους στάδια μετάβασης από τη σχεδίαση στην εκτύπωση.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται περιγραφή των λογισμικών που χρησιμοποιούνται σε όλη την διαδικασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες και οι μέθοδοι της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται περιγραφή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι θετικές και αρνητικές επιπτώσεις από τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στο έβδομο, κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφαρμογές στους διάφορους τομείς,

Στο όγδοο, κεφάλαιο δίνεται έμφαση στις στρατιωτικές εφαρμογές.

Τέλος στο ένατο κεφάλαιο, παρατίθενται σχόλια, συμπεράσματα.

ABSTRACT

This Master Thesis describes the sequence of three-dimensional printing: from the conception and the creation of a digital model to production of the prototype. This software involved in the process and the materials used to create the model are examined. Also, developments in the three-dimensional printing technologies with emphasis in military applications are discussed. More specifically:

The first chapter begins with an introduction, continuous with the historical development of three-dimensional printing and provides a general definition of the process.

The second chapter describes the various stages from design to printing.

The third chapter, examines this software used throughout the process.

The fourth chapter, examines the technologies and methods of three-dimensional printing.

The fifth chapter, provides the materials used to fabricate.

The sixth chapter discusses the positive and negative effects from the use of three-dimensional printing.

The seventh chapter reports the applications in various fields, while the eighth chapter emphasizes in military applications.

Finally, the ninth chapter, summarizes the thesis conclusions.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

Εισαγωγή.

1.1. Ιστορική αναδρομή.

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

Ο Charles Hull το 1986, συνιδρυτής της εταιρείας 3D Systems, εφηύρε τη Στερεολιθογραφία (stereolithography) - μια διαδικασία που επιτρέπει στους σχεδιαστές τη δημιουργία 3D μοντέλων χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα τα οποία κατόπιν μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν για να δημιουργήσουν ένα συγκεκριμένο αντικείμενο (Matias & Rao, 2015). Δημοσίευσε ένα αριθμό διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σχετικά με την έννοια της 3D εκτύπωσης, πολλά από τα οποία χρησιμοποιούνται και σήμερα από την “3d Systems”.



Εικόνα 1. Ο Charles Hull



Εικόνα 2.Ο Carl Deckard

Ο Carl Deckard το 1987, ο οποίος εργαζόταν στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, δημοσίευσε μία πατέντα ευρεσιτεχνίας μεθόδου 3D εκτύπωσης, την επιλεκτική σύντηξη με την χρήση ακτίνων λέιζερ (Selective Laser

Sintering, SLS), η οποία εκδόθηκε το 1989.

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



Εικόνα 3. Η εταιρεία του Scott Crump

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

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

Κατά τη δεκαετία 1990 εμφανίζονται και άλλες τεχνολογίες 3D εκτύπωσης και διαδικασίες όπως η βαλλιστική κατασκευή σωματιδίων (BPM) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον William Masters, η συγκόλληση λεπτών φύλλων (LOM) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Michael Feygin, η ωρίμανση στερεού εδάφους (SGC) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Itzhak Pomerantz et al και «τρισδιάστατης εκτύπωσης» (3DP) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Emanuel Sachs et al.

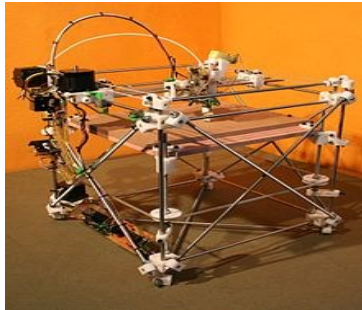
Το 1999 δημιουργείται το πρώτο όργανο που είναι καλλιεργημένο σε εργαστήριο. Ασθενείς νέοι σε ηλικία, υποβάλλονται σε αύξηση της ουροδόχου κύστης με χρήση ενός ικτριώματος που έχει εκτυπωθεί τρισδιάστατα και έχει επικαλυφθεί από δικά τους κύτταρα. Η τεχνολογία αυτή



Εικόνα 4. Εκτύπωση οργάνων και ιστών στο Wake Forest Institute

αναπτύχθηκε από επιστήμονες στο Ινστιτούτο Wake Forest για την αναγεννητική ιατρική και άνοιξε δρόμους για την ανάπτυξη άλλων στρατηγικών για την τρισδιάστατη εκτύπωση οργάνων. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται τα κύτταρα του ασθενή, ο κίνδυνος της απόρριψης από τον οργανισμό, είναι ελάχιστος έως μηδενικός.

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



Εικόνα 5. Ο εκτυπωτής RepRap, έκδοση 1.0 (Darwin)

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

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

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

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



Εικόνα 6. Ο εκτυπωτής Maker Bot

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



Εικόνα 7. Εκτυπωμένο αεροπλάνκι

Urbee



Εικόνα 8. Το αυτ/το Urbee



Εικόνα 9. Εκτύπωση κοσμήματος από την i.materialise

απόδοσης.

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



Εικόνα 8. Τυπωμένη κάτω σιαγόνα

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

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



Εικόνα 9.
Τρισδιάσταση εκτυπωμένη
καρδιά

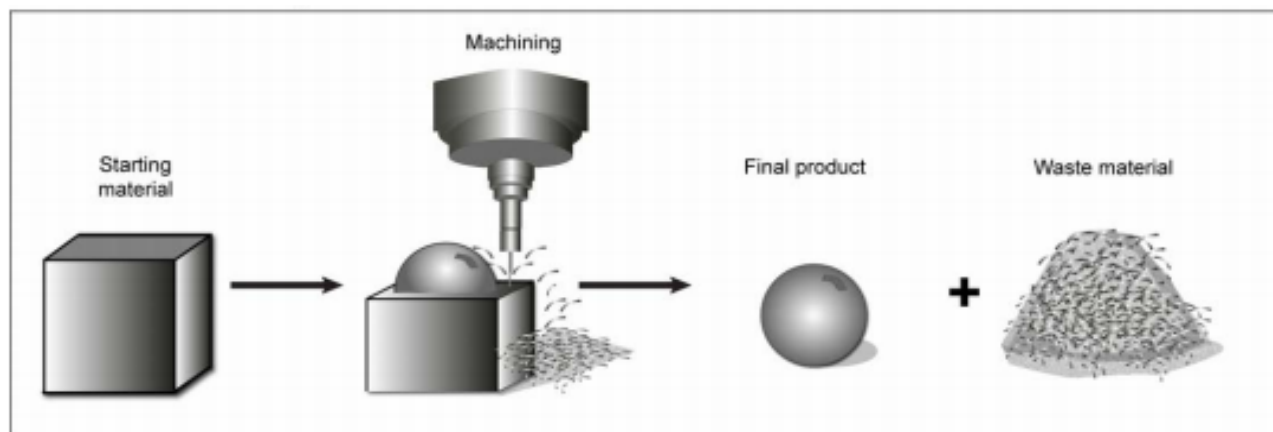
Το 2015 η Google επενδύει 100 εκατομμύρια δολάρια στην εταιρεία Carbon3D.

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

1.2. Γενικά – Ορισμός.

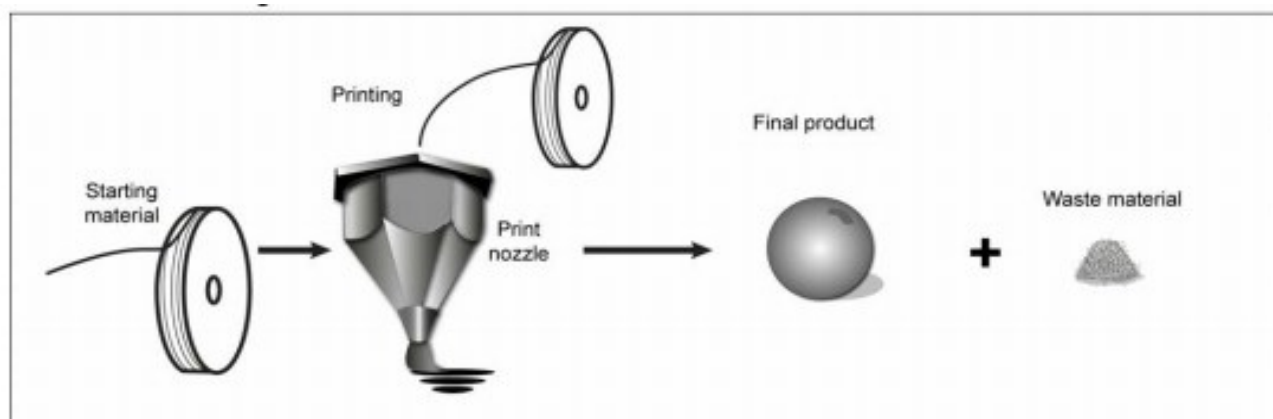
Η μετατροπή μιας ιδέας σε σχέδιο και κατόπιν σε αντικείμενο, είναι μια σύνθετη διαδικασία με λιγότερα ή περισσότερα ενδιάμεσα στάδια που αποτελούσε και αποτελεί αυτό που ονομάζουμε γενικά παραγωγή. Για την μετάβαση από τον ιδεατό κόσμο του σχεδίου στον φυσικό κόσμο των αντικειμένων, απαιτείτο (παλιότερα)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

Η αφαιρετική μέθοδος παραγωγής (Subtractive manufacturing) ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία ένα ακατέργαστο υλικό κόβεται σε ένα επιθυμητό τελικό σχήμα & μέγεθος μέσα από μια διαδικασία αφαίρεσης υλικού. Περιλαμβάνει κοπή, διάτρηση κάποιου υλικού.



Εικόνα 10. Η αφαιρετική μέθοδος παραγωγής

Αντιθέτως η προσθετική μέθοδος παραγωγής (Additive Manufacturing) ή αλλιώς τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing), όπως συχνά χρησιμοποιείται, είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται τρισδιάστατα αντικείμενα μέσω της διαδοχικής εναπόθεσης και ένωσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Είναι μια διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων στερεών αντικειμένων από ένα ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Κοινό στοιχείο των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η χρήση υπολογιστή, λογισμικού 3D modeling (Computer Aided Design ή CAD), ένας κατάλληλος εκτυπωτής και το υλικό κατασκευής. Μόλις ένα σκίτσο CAD παραχθεί, ο εκτυπωτής διαβάζει τα δεδομένα από το αρχείο CAD και προσθέτει διαδοχικά στρώματα υγρού, σκόνης, φύλλο υλικού ή άλλο, για την κατασκευή ενός αντικειμένου 3D.



Εικόνα 11. Η προσθετική μέθοδος παραγωγής

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

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

Εδώ και τρεις δεκαετίες περίπου σε πολλούς τομείς της παραγωγής, αναλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο αυτοματοποιημένα συστήματα που βασίζονται στη ρομποτική. Σήμερα, η ανάπτυξη νέων μηχανών και τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης ανοίγει τον δρόμο στο επόμενο στάδιο εξέλιξης της αυτοματοποίησης, το οποίο περιγράφεται ως άμεση ή ταχεία παραγωγή (Rapid Manufacturing) και συνίσταται στην απευθείας μετάβαση από τον κόσμο του ψηφιακού πλέον σχεδίου ή μοντέλου, στον κόσμο των φυσικών αντικειμένων. Οι μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης χρησιμοποιούν τα δεδομένα ψηφιακών αρχείων τα οποία έχουν δημιουργηθεί/σχεδιαστεί είτε από κάποιον μηχανικό είτε έχουν προκύψει από την σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου, για να κατασκευάσουν, τυπώνοντας σε τρεις διαστάσεις, το φυσικό αντικείμενο.

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

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

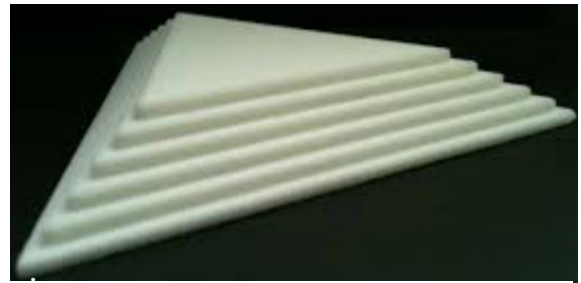
Χωρίς κανέναν περιορισμό στη μορφή και στη γεωμετρία τους, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής, τα αντικείμενα μπορούν να «εκτυπωθούν» και να είναι έτοιμα για χρήση, με σημαντική μείωση του χρόνου απόκτησης της πρώτης έκδοσης ενός προϊόντος. Καθίσταται έτσι δυνατό να τυπωθούν σύνθετες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

Η κατασκευή ενός μοντέλου με σύγχρονες μεθόδους μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες έως και αρκετές ημέρες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να παράγουν μοντέλα συνήθως μέσα σε λίγες ώρες αν και ο χρόνος μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος που χρησιμοποιείται, την ταχύτητα και την ακρίβεια εκτύπωσης το μέγεθος και τον αριθμό των μοντέλων που παράγονται ταυτόχρονα.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται στο επίκεντρο των μέσων τα τελευταία χρόνια. Έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά επαγγελματικά περιβάλλοντα για σχεδόν 35 έτη αλλά μέχρι τώρα δεν ήταν προσβάσιμη στο ευρύ κοινό. Για πολύ καιρό η τεχνολογία αυτή ήταν περιορισμένη μόνο στους επαγγελματίες και στη βιομηχανία, αλλά τώρα το άνοιγμα αυτής της τεχνολογίας και η πτώση των τιμών των εκτυπωτών επιτρέπει την εκτύπωση μερών ή τελικών προϊόντων και έχει γίνει προσιτή στο ευρύ κοινό.

1.3. Τα βασικά μαθηματικά.

Πίσω από την 3d εκτύπωση κρύβεται η μαγική μαθηματική φόρμουλα που εξηγεί το γιατί είναι δυνατή η 3D εκτύπωση οποιουδήποτε φυσικού αντικειμένου. Η απάντηση είναι το θεώρημα Fubini, που πήρε το όνομά του από τον ιταλό μαθηματικό Guido Fubini. Το θεώρημα αυτό αναφέρει ότι ένα αντικείμενο n διαστάσεων μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα φάσμα από στρώματα σχημάτων των $n-1$ διαστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι ένα τρισδιάστατο σχήμα (οποιασδήποτε μορφής στον πραγματικό κόσμο) μπορεί να είναι αναπαρασταθεί ως στρώματα σχημάτων 2 διαστάσεων (Anastasiou, Tsirmpas, Rompas, Giokas & Koutsouris 2013).



Εικόνα 12. Αναπαράσταση ενός 3 τρισδιάστατου σχήματος σύμφωνα με θεώρημα Fubini

Γίνεται υπόθεση ότι A και B είναι πλήρως μετρήσιμοι χώροι και ότι $f(x, y)$ είναι $A \times B$ μετρήσιμο. Αν

$$\int_{A \times B} |f(x, y)| d(x, y) < \infty,$$

όπου το ολοκλήρωμα λαμβάνεται σε σχέση με ένα μέτρο γινομένου από το χώρο $A \times B$, τότε

$$\int_A \left(\int_B f(x, y) dy \right) dx = \int_B \left(\int_A f(x, y) dx \right) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y),$$

Τα δύο πρώτα ολοκληρώματα είναι επαναλαμβανόμενα ολοκληρώματα σε σχέση με τα δύο μέτρα, αντίστοιχα, και το τρίτο είναι ένα ολοκλήρωμα σε σχέση με ένα γινόμενο από αυτά τα δύο μέτρα.

Εάν η απόλυτη τιμή του παραπάνω ολοκληρώματος δεν είναι πεπερασμένη, τότε τα δύο επαναλαμβανόμενα ολοκληρώματα μπορεί στην πραγματικότητα να έχουν διαφορετικές

τιμές. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτής της δυνατότητας.

Αν $f(x, y) = g(x)h(y)$ για κάποιες συναρτήσεις g και h , τότε

$$\int_A g(x) dx \int_B h(y) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y),$$

Εναλλακτική διασαφήνιση θεωρήματος

Μια άλλη εκδοχή του θεωρήματος Fubini δηλώνει ότι αν A και B έχουν πεπερασμένο μέτρο χώρου, όχι απαραίτητα πλήρεις, και εάν είτε

$$\int_A \left(\int_B |f(x, y)| dy \right) dx < \infty \quad \text{είτε} \quad \int_B \left(\int_A |f(x, y)| dx \right) dy < \infty$$

τότε

$$\int_{A \times B} |f(x, y)| d(x, y) < \infty$$

και

$$\int_A \left(\int_B f(x, y) dy \right) dx = \int_B \left(\int_A f(x, y) dx \right) dy = \int_{A \times B} f(x, y) d(x, y).$$

Σε αυτή την εκδοχή είναι απαραίτητη η προϋπόθεση ότι τα μέτρα αυτά είναι πεπερασμένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

Μετάβαση από τη σχεδίαση στην εκτύπωση.

Κατά τα τελευταία 35 χρόνια, αρκετές τεχνολογίες και μέθοδοι ταχείας προτυποποίησης (RP) έχουν εμφανιστεί, όλες με βάση την ιδέα κατασκευής πρόσθετης ύλης. Οι τεχνικές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, την επεξεργασία των υλικών, το μέγεθος των εκτυπωτών, την ακρίβεια, τον χρόνο κατασκευής, το φινιρίσμα επιφάνειας, το κόστος και άλλα και χρησιμοποιούνται με βάση τις ανάγκες των εφαρμογών που απευθύνονται. Όλες οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης ακολουθούν μια σειρά βασικών βημάτων είτε σε κάποιο βαθμό, είτε με ενδιάμεσα πρόσθετα στάδια, τα οποία οδηγούν την εικονική ψηφιακή περιγραφή ενός μοντέλου στο φυσικό τελικό εκτυπωμένο αντικείμενο (Canessa, Fonda & Zennaro, 2013), (Bell, 2015). Αυτά τα βήματα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα :

2.1. Δημιουργία του ψηφιακού CAD μοντέλου.

Το πρώτο στάδιο, το οποίο είναι η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου, πραγματοποιείται με λογισμικό σχεδίασης στερεών μοντέλων καθώς μπορούν να αναπαριστούν τα τρισδιάστατα αντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια. Ο σχεδιαστής μπορεί, είτε να χρησιμοποιήσει ένα υπάρχον αρχείο CAD ως είναι ή να το επεξεργαστεί, είτε να δημιουργήσει ένα νέο μοντέλο. Εξοπλισμός αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering equipment) όπως η τρισδιάστατη σάρωση (3D Scanning) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ψηφιακή σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου και τη δημιουργία 3D μοντέλου CAD.

2.1.1. Υπολογιστικά προγράμματα (Computer Aided Design, CAD).

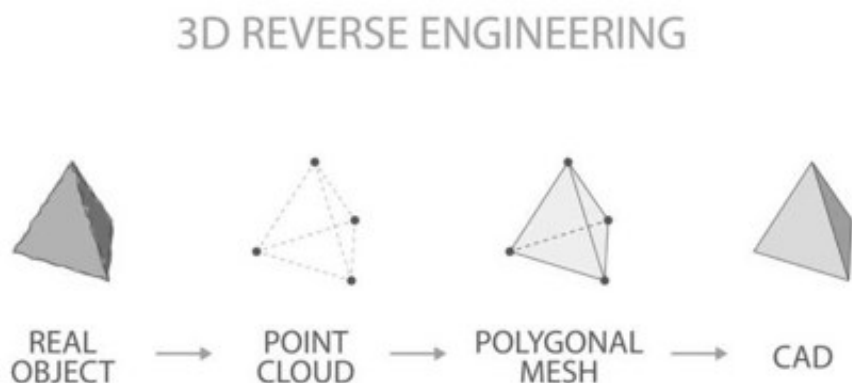
Η σχεδίαση με βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Design, CAD) είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιεί ψηφιακό περιβάλλον για τη δημιουργία, τροποποίηση, ανάλυση, και βελτιστοποίηση ενός 3D μοντέλου. Οποιοδήποτε ψηφιακό πρόγραμμα που ενσωματώνει γραφικά υπολογιστή και πρόγραμμα εφαρμογής που διευκολύνει τις λειτουργίες σχεδίασης, είναι ταξινομημένο ως λογισμικό σχεδίασης με βοήθεια υπολογιστή (CAD). Ένα τέτοιο λογισμικό βασικά καθορίζει τη γεωμετρία του σχεδίου, δεδομένου ότι αυτή είναι ο ουσιαστικός παράγοντας στη παραγωγή των προϊόντων.

2.1.2. Αποθετήρια 3D μοντέλων (3D Model Repositories).

Η γεωμετρική αναπαράσταση, που δημιουργείται μέσω αυτών των προγραμμάτων, μπορεί να αρχειοθετηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως βάση για άλλες λειτουργίες και επιπρόσθετα μειώνονται τα λάθη που προκαλούνται σε διαφορετική περίπτωση με τον απαραίτητο επαναπροσδιορισμό εξαρχής της γεωμετρίας του σχεδίου κάθε φορά που απαιτείται. Με αυτόν τον τρόπο πέραν της ατομικής αρχειοθέτησης, έχουν δημιουργηθεί στο διαδίκτυο ηλεκτρονικά αποθετήρια 3D μοντέλων (3D Model Repositories) με συλλογές από χιλιάδες σχέδια (O'Neill & Williams, 2013). Κάθε σχεδιαστής που δημιουργεί ένα μοντέλο έχει τη δυνατότητα να το ανεβάσει σε αποθετήριο και να είναι προσβάσιμο από όλους είτε δωρεάν, είτε έναντι αμοιβής (Παράρτημα Α). Έτσι κάθε σχεδιαστής μπορεί να παίρνει έμπνευση από υπάρχον σχέδια, να τα χρησιμοποιεί ως έχουν ή να τα επεξεργάζεται και δε χρειάζεται να δημιουργεί ένα νέο μοντέλο, όταν κάποιος άλλος το έχει ήδη δημιουργήσει.

2.1.3. Τρισδιάστατη σάρωση (3D Scanning)-μέτρηση συντεταγμένων.

Με την τρισδιάστατη σάρωση δίνεται η δυνατότητα τόσο κατασκευής εξαρτημάτων για τα οποία δεν υπάρχει υποστήριξη ή δεν είναι διαθέσιμα κατασκευαστικά σχέδια, όσο και επανασχεδίασης και βελτιστοποίησης κατασκευών με τη χρήση μηχανικής με βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Engineering, CAE). Μπορεί να επιτευχθεί ανάλυση των



Εικόνα 13. Διάγραμμα ροής αντίστροφης σχεδίασης

εξαρτημάτων, ο υπολογισμός της τάσης με δεδομένες φορτίσεις, δηλ. να γίνει μελέτη αντοχής και τροποποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Για τη ψηφιακή σάρωση ενός φυσικού αντικείμενου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές τρισδιάστατης σάρωσης (3D Scanning).

1. Φωτογραμμετρία (photogrammetry). Με τη χρήση της φωτογραφίας πραγματοποιούνται μετρήσεις, για την αποτύπωση και χαρτογράφηση των αντικειμένων. Με φωτογραφική μηχανή πραγματοποιείται η λήψη φωτογραφιών του αντικείμενου μετακινώντας αργά τη φωτογραφική μηχανή σε κυκλική τροχιά. Το πρόγραμμα επεξεργάζεται τα δεδομένα και εξάγει ένα 3d πλέγμα και έναν χάρτη UV που εμπεριέχει την πληροφορία χρώματος. Η τεχνική ενδείνεται για ανθρώπους και αγάλματα, αλλά θα πρέπει να αποφεύγεται η χρήση σε γυαλιστερά και διαφανή αντικείμενα.

2. Περιστροφική πλάκα σάρωσης (Turn table scanning). Απαρτίζεται από την κάμερα, τη δέσμη λέιζερ και την περιστροφική πλάκα. Η δέσμη λέιζερ προβάλλει μία γραμμή στο υπό εξέταση αντικείμενο και η κάμερα καταγράφει την απεικόνιση της γραμμής λέιζερ καθώς αυτό περιστρέφεται. Το πρόγραμμα μετατρέπει την πληροφορία σε ένα νέφος σημείων και δημιουργείται ένα 3d πλέγμα μέσω βελτιστοποίησης και ένωσης των σημείων.

3. Για σάρωση μεγάλων αντικειμένων υπάρχουν συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούν υπέρυθρο φωτισμό και κάμερα για να καταγράψουν πληροφορία βάθους. Η συσκευή, που λειτουργεί σαν τη κάμερα, μετακινείται από τον χειριστή αργά γύρω από το υπό εξέταση αντικείμενο, συλλέγει δεδομένα πλέγματος και χρώματος και εν συνεχεία τα φιλτράρει-καθαρίζει.

Οι 3d σαρώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν, στο στάδιο της σχεδίασης ενός 3D αντικειμένου ως σημείο αναφοράς για περαιτέρω επεξεργασία. Με την εξέλιξη βέβαια της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί βιομηχανικοί 3d σαρωτές υψηλής ανάλυσης, τόσο για μικρά όσο και για μεγάλα αντικείμενα, που τείνουν να εξαλείφουν την ανάγκη ατομικής επεξεργασίας-φιλτραρίσματος της σάρωσης.

Πέραν από τους σαρωτές, υπάρχουν και μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines-CMM), που μετρούν τα φυσικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου. Αυτό το μηχάνημα μπορεί να ελέγχεται από το χέρι του χειριστή ή μπορεί να είναι ελεγχόμενο από υπολογιστή. Με αισθητήρα αφής ή ακίδα, το μηχάνημα διαβάσει τις X, Y, Z συντεταγμένες από τα σημεία επαφής, που έρχεται σε επαφή με το υπό εξέταση αντικείμενο, καθορίζοντας τη θέση τους. Το σύνολο σημείων δημιουργούν ένα νέφος σημείων και δημιουργείται ένα 3d πλέγμα.

Βασικό μειονέκτημα των ανωτέρω είναι ότι σαρώνουν μόνο τις εξωτερικές επιφάνειες, χωρίς να υπάρχει αποτύπωση των εσωτερικών διαμορφώσεων που πιθανόν να έχουν τα υπό σάρωση αντικείμενα. Σαφώς υπάρχει ανάπτυξη και σε αυτόν τον τομέα με την δημιουργία

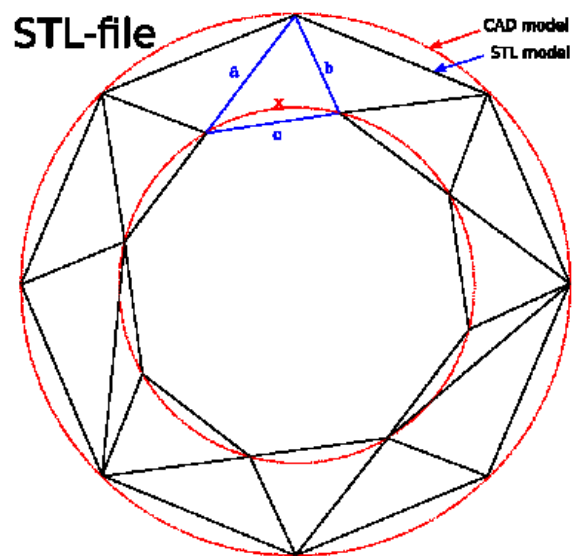
καινοτόμων λύσεων για τη βιομηχανία με χρήση x-ray και υπολογιστικών τομογραφιών (computed tomography).

2.2. Μετατροπή του μοντέλου CAD σε αρχείο εξαγωγής.

Η μετατροπή του μοντέλου CAD σε κατάλληλο αρχείο εξαγωγής, αποτελεί το δεύτερο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης και είναι το μεταβατικό στάδιο του ψηφιακού μοντέλου σε αρχείο κατάλληλο και αναγνωρίσιμο για το λογισμικό του 3D εκτυπωτή. Κάθε εκτυπωτής δέχεται τουλάχιστον το αρχείο εξαγωγής μορφής STL. (STereoLithography), το οποίο έχει καθιερωθεί ως στάνταρ και σχεδόν όλα τα CAD συστήματα μπορούν να εξάγουν τέτοιο αρχείο.

2.2.1. Αρχείο εξαγωγής STL.

Στο αρχείο STL κωδικοποιείται πλήρως η γεωμετρική περιγραφή του αντικειμένου ως πλέγμα αλληλοσυνδεμένων τριγωνικών εδρών. Αναπαριστούν γεωμετρικά στο χώρο ολόκληρο το κλειστό σύνολο επιφανειών που απαρτίζουν. Ένα τρισδιάστατο στερεό μοντέλο, διαχωρίζοντας τις επιφάνειες σε προσανατολισμένες στο χώρο τριγωνικές έδρες που θυμίζουν την πολυεδρική όψη, της επιφάνειας ενός κατεργασμένου διαμαντιού. Οι έδρες αυτές διασυνδέονται μεταξύ τους με προκαθορισμένο

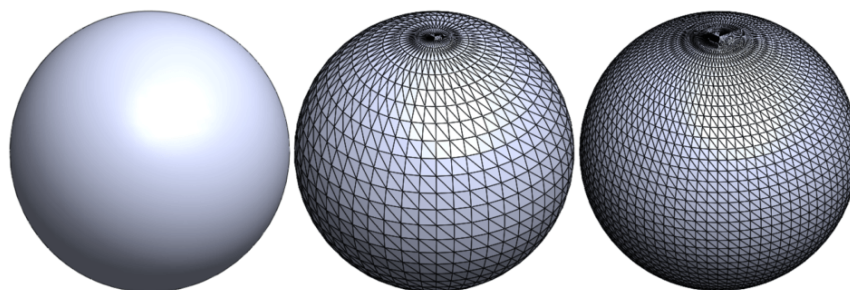


Εικόνα 14. Αναπαράσταση STL αρχείου

τρόπο, έτσι ώστε η κάθε μια να μοιράζεται υποχρεωτικά μία κοινή πλευρά και δύο κοινές κορυφές με κάποια γειτονική της.

Υπάρχουν επτά παράμετροι, που καθορίζουν το πως θα φαίνεται το αντικείμενο όταν παραχθεί (1.Angle, Deviation, and Chord Height, 2. Surfaces, 3. Wall Thickness, 4. Inversed Normals, 5. Multiple Shells or Nested Parts, 6. Edges, 7. Tabbed Areas). Αλλάζοντας παραμέτρους του αρχείου μπορούμε να αλλάξουμε την ανάλυση (resolution) του αρχείου STL. Όσο μεγαλύτερης χωρητικότητας είναι το αρχείο STL, τόσο μεγαλύτερος είναι ο τριγωνισμός του μοντέλου. Τυπικά ένα σύνθετο CAD μοντέλο που εξάγεται σε STL format έχει χωρητικότητα μεταξύ 1-1.5 MB.

Επειδή τα αρχεία STL χρησιμοποιούν στοιχειώδη επίπεδα, δεν μπορούν να αναπαραστήσουν καμπύλες επιφάνειες, παρά μόνο κατά προσέγγιση. Η αύξηση του αριθμού των στοιχειωδών τριγώνων επιτρέπει καλύτερη προσέγγιση, αλλά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του αρχείου. Μεγάλα και πολύπλοκα αρχεία σημαίνουν μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας και κατασκευής. Συνεπώς, οι σχεδιαστές πρέπει να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις ακρίβειας με τις ανάγκες ευχρηστίας ώστε να κατασκευάσουν ένα χρήσιμο αρχείο STL.



Εικόνα 15. Αναπαράσταση σφαίρας σε αρχείο STL με διαφορετικές παραμέτρους

Τα αρχεία STL αποτελούνται από τριάδες συντεταγμένων του χώρου X,Y,Z, που αποτελούν κορυφές τριγώνων. Για τη συγκρότηση του αρχείου χρησιμοποιείται η ακόλουθη ομάδα εντολών:

solid		Είναι προαιρετικό και δίνει το όνομα του στερεού.
facet normal	$n_i \ n_j \ n_k$	Δίνει την κατεύθυνση του κανονικού διανύσματος τριγωνικής έδρας.
outer loop		Ξεκινά την αλληλουχία κορυφών της τριγωνικής έδρας.
vertex	$v1_x \ v1_y \ v1_z$	Θέτει τις κορυφές.
vertex	$v2_x \ v2_y \ v2_z$	-//-
vertex	$v3_x \ v3_y \ v3_z$	-//-
endloop:		Τελειώνει την αλληλουχία κορυφών της έδρας.
endfacet:		Τελειώνει την περιγραφή της τριγωνικής έδρας.
end solid		Τελειώνει την περιγραφή του στερεού.

Τα αρχεία STL χαρακτηρίζονται από την απλότητά, την ευχρηστία τους, στο διαδίκτυο υπάρχουν τα περισσότερα μοντέλα σε αυτή τη μορφή, έχουν καθιερωθεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από σχεδόν όλους τους εκτυπωτές και προγράμματα CAD και γενικώς όλη η βιομηχανία έχει αναπτυχθεί γύρω από το χειρισμό και την επιδιόρθωση τους. Παρόλα αυτά περιορίζονται στην περιγραφή μόνο της γεωμετρίας της επιφάνειας του τρισδιάστατου αντικειμένου. Δεν υπάρχει αναπαράσταση του χρώματος (αν και έχουν αναπτυχθεί προγράμματα όπως το VisCAM, SolidView και Materialise Magics που ενσωματώνουν την πληροφορία χρώματος), της υφής, του υλικού, ή άλλων χαρακτηριστικών που υπάρχουν σε άλλες μορφές CAD μοντέλων. Η βελτίωση της ανάλυσης στις τεχνολογίες εκτύπωσης σε κλίμακα micron, μπορεί να οδηγήσει σε υπερμεγέθη αρχεία, λόγω του αυξημένου αριθμού τριγώνων που απαιτείται για την περιγραφή ομαλής καμπύλης επιφάνειας. Άλλα πράγματα που λείπουν από τη μορφή αρχείου STL είναι η ενσωμάτωση μεταδεδομένων

(όπως κτήση και πληροφορίες πνευματικών δικαιωμάτων), ελάχιστη ή καμία ασφάλεια αρχείων, και η αδυναμία να εντοπίσει ή να διορθώσει τα λάθη στο πλέγμα επιφάνειας.

2.2.2. Άλλες μορφές αρχείων.

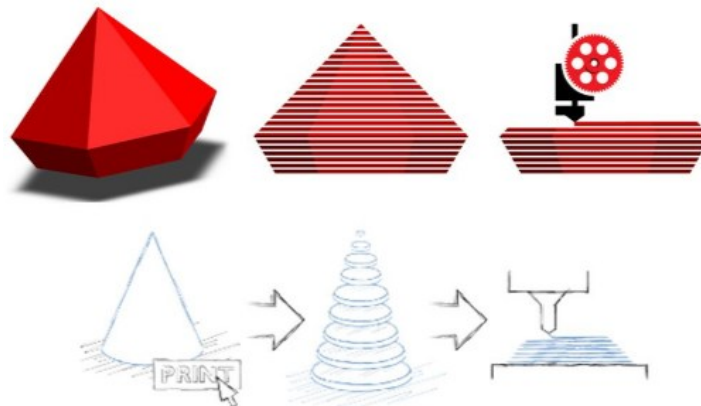
Κάθε σχεδιαστής χρησιμοποιεί διαφορετικό σχεδιαστικό πρόγραμμα και κάθε πρόγραμμα συνοδεύεται από τα δικά του αρχεία εξαγωγής. Υπάρχει ένα μεγάλο φάσμα αρχείων όπως: .obj, 3MF, .amf, .ply, vrmf, wrl, .3ds, .igs, .model, .mxp, wrl, .3dm, .fbx, .matpart, .zip, .rar, .7s, .skp, .dae, .magics, .mgx, .x3dv, .matAMX, .ndo, .asc, .cli, .slc, .mtt, .mdck, .cls, .f&s, .ssl, .sli, .jt, .prj, .sat, .CATPart, .CATProduct, .dxf, .zcp, .prt, .asm, .gts, .x3d8, Compressed Mesh, Wave front OB, .zpr, Slice, XYZ format (.3w).

Από τα ανωτέρω πιο σημαντικά είναι τα αρχεία 3MF, .amf, τα οποία ενσωματώνουν πληροφορίες για τη θέση του μοντέλου σε σχέση με τον επιλεγμένο 3D εκτυπωτή, τον προσανατολισμό, το χρώμα, τα υλικά κατασκευής. Επίσης το αρχείο .obj, μπορεί να αποθηκεύσει χρώμα και κείμενο. Άλλη επιλογή είναι το αρχείο .ply, το οποίο αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση των 3d σκαναρισμένων αντικειμένων. Για μία διεργασία πλήρους χρώματος επίσης χρησιμοποιούνται τα αρχεία vrmf, wrl.

2.3. Μεταφορά και χειρισμός του αρχείου εξαγωγής στον 3D εκτυπωτή.

Το τρίτο στάδιο της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνίσταται στη λειτουργία ενός προγράμματος το οποίο προετοιμάζει την κατασκευή του αντικειμένου που αναπαριστά το αρχείο STL. Το λογισμικό του προγράμματος αυτού διαιρεί ("τεμαχίζει") το ψηφιακό μοντέλο σε έναν αριθμό λεπτών εγγάρσιων διατομών (με πάχος ανάλογα την τεχνική

εκτύπωσης και τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή), ενώ μπορεί να δημιουργήσει και μια βοηθητική δομή, που θα χρησιμοποιείται για τη στήριξη του πρωτοτύπου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του (σε περίπτωση που υπάρχουν εσωτερικές κοιλότητες, πρόβολοι, ή λεπτά τοιχώματα).

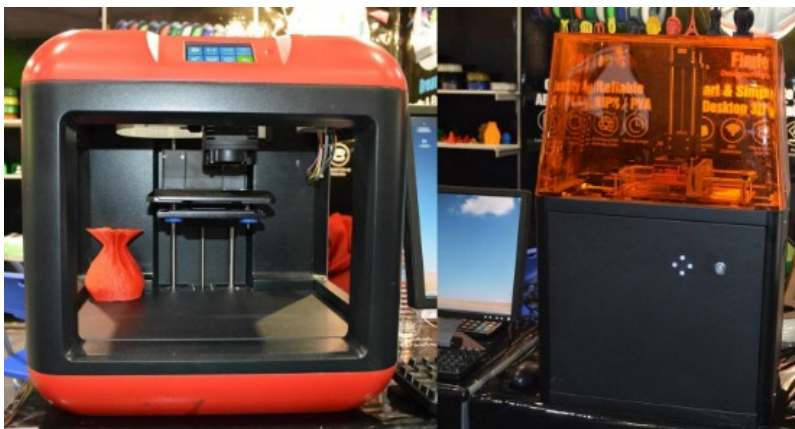


Εικόνα 16. Διαδικασία τεμαχισμού (slicing)

Στην αγορά προσφέρονται σήμερα διάφορα τέτοια προγράμματα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, τα περισσότερα από τα οποία επιτρέπουν στον χρήστη να ρυθμίσει το μέγεθος, τη θέση και τον προσανατολισμό του ψηφιακού μοντέλου. Ο προσανατολισμός του μοντέλου καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αυτό θα κατασκευαστεί, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι ιδιότητες των αντικειμένων που κατασκευάζονται με τις τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης δεν είναι όμοιες και στις τρεις συντεταγμένες x , y , z . Για παράδειγμα στη συντεταγμένη z (κατακόρυφη) τα αντικείμενα τείνουν να είναι λιγότερο ακριβή και όχι τόσο στιβαρά, απ' ότι στο επίπεδο x , y . Επιπλέον, ο προσανατολισμός του μοντέλου καθορίζει κατά ένα μέρος τον χρόνο που θα απαιτηθεί για την κατασκευή του πρωτοτύπου, εφόσον οι σχεδιαστές προτιμούν να επιλέγουν τη συντεταγμένη z για τη μικρότερη διάσταση του αντικειμένου, έτσι ώστε να μειώσουν τον αριθμό των διαδοχικών λεπτών διατομών που θα εναποτεθούν η μία πάνω στην άλλη, μειώνοντας έτσι τον συνολικό χρόνο κατασκευής.

2.4. Ρύθμιση του 3D εκτυπωτή και κατασκευή του αντικειμένου.

Το τέταρτο στάδιο είναι η κατασκευή του φυσικού αντικειμένου με τη χρήση κάποιας τεχνολογίας, από μηχανές οι οποίες κατασκευάζουν μία-μία τις διατομές στις οποίες διαιρέθηκε το ψηφιακό μοντέλο, χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά (ρητίνες, πλαστικά, χαρτί, κεραμικά ή μέταλλα σε σκόνη κλπ.). Οι περισσότερες μηχανές είναι αυτόματες και απαιτούν μικρή ανθρώπινη παρέμβαση.



Εικόνα 17. 3D εκτυπωτές

2.5. Καθαρισμός και τελικό φινιρίσμα του αντικειμένου.

Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αντικειμένου από τη μηχανή, την απόσπασή του από τυχόν στηρίγματα και τον καθαρισμό του από υπολείμματα υλικού. Το υλικό υποστήριξης αφαιρείται με χρήση αέρα (πίεση ή απορρόφηση) ή με θερμότητα ή διαλύεται με ένα διαλύτη ή νερό, ή με το χέρι. Μερικά πρωτότυπα κατασκευασμένα από φωτοευαίσθητα υλικά ακολουθούν την φάση της ωρίμανσης όπου υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία σκλήρυνσης πριν παραδοθούν για χρήση. Το τελικό φινιρίσμα ολοκληρώνεται με λείανση ή/και στίλβωση.

2.6. Υπηρεσίες εκτύπωσης (Service Bureaus).

Πέραν των ανωτέρω, οι εταιρείες και οι ιδιώτες έχουν τη δυνατότητα να αναθέσουν κάποια βήματα ή και όλη τη διαδικασία σε εξειδικευμένες εταιρείες για την παραγωγή του αντικειμένου. Επειδή ο σχεδιασμός είναι ψηφιακός, οι εταιρείες μπορούν να παραγγείλουν τα τελικά προϊόντα από οποιονδήποτε διαθέσιμο εκτυπωτή 3D. Έτσι δημιουργήθηκαν εταιρείες-υπηρεσίες που εκτυπώνουν αρχεία για πελάτες στέλνοντας το εκτυπωμένο αντίγραφο μέσα σε λίγες εβδομάδες (Παράρτημα Β). Μέσα από μία μεγάλη συλλογή τεχνολογιών και υλικών δεν απαιτείται αρχική επένδυση για εξοπλισμό.

Οι εταιρείες-υπηρεσίες εκτύπωσης έχουν αναλύσει το κόστος για την παραγωγή ενός μεμονωμένου αντικειμένου. Η μελέτη εξετάζει τυχόν αναγκαίες επενδύσεις, το κόστος των αναλώσιμων και το κόστος του εργατικού δυναμικού, και στη συνέχεια διαιρεί το ποσό αυτό με τον αριθμό των αντικειμένων που θα τυπώνονται σε μια περίοδο τριών ετών. Περιλαμβάνει την τρέχουσα τιμή ενός εκτυπωτή συν κόστους εγκατάστασης, συντήρησης και ανταλλακτικών για την περίοδο, τις τιμές των αναλωσίμων, και την επιβάρυνση λόγω του ότι έχει έναν υπεύθυνο για τη διαδικασία εκτύπωσης για επαγγελματικές χρήσεις. Έτσι οι εταιρείες και οι ιδιώτες ζυγίζοντας τα ανωτέρω και προσθέτοντας τα μεταφορικά κόστη μπορούν να απευθύνονται εφόσον τους συμφέρει σε αυτές τις υπηρεσίες εκτύπωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

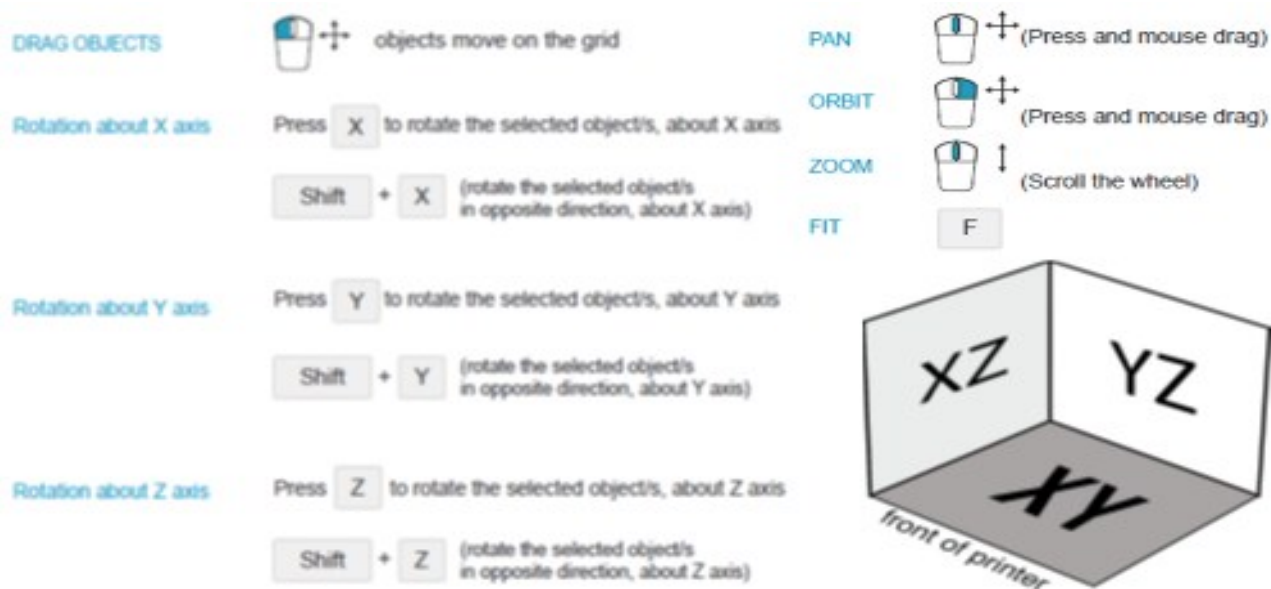
Τα λογισμικά που εμπλέκονται στη διαδικασία.

3.1. Σχεδιαστικά και υπολογιστικά προγράμματα (CAD/CAE/CAM).

Η ανάμειξη των υπολογιστών και της ανθρώπινης ικανότητας στη λήψη αποφάσεων οδηγούν στο βέλτιστο σύστημα, του οποίου οι πρωταρχικές λειτουργίες είναι ο σχεδιασμός, η ανάλυση και η κατασκευή. Επικρατεί η αντίληψη πως τα λογισμικά αποτελούν σχεδιαστική πλατφόρμα, οι δυνατότητες τους όμως εκτείνονται από το σχεδιασμό αντικειμένων. Στη μηχανολογία μπορούν να εξαχθούν από τα συστήματα αυτά πληροφορίες χρήσιμες για την ανάλυση μηχανισμών με πεπερασμένα στοιχεία, μετάδοση θερμότητας, ανάλυση τάσεων, δυναμική εξομοίωση μηχανισμών και διαδικασιών, ρευστοδυναμική ανάλυση κλπ. και με το αντίστοιχο λογισμικό να οδηγήσουν στην κατασκευή.

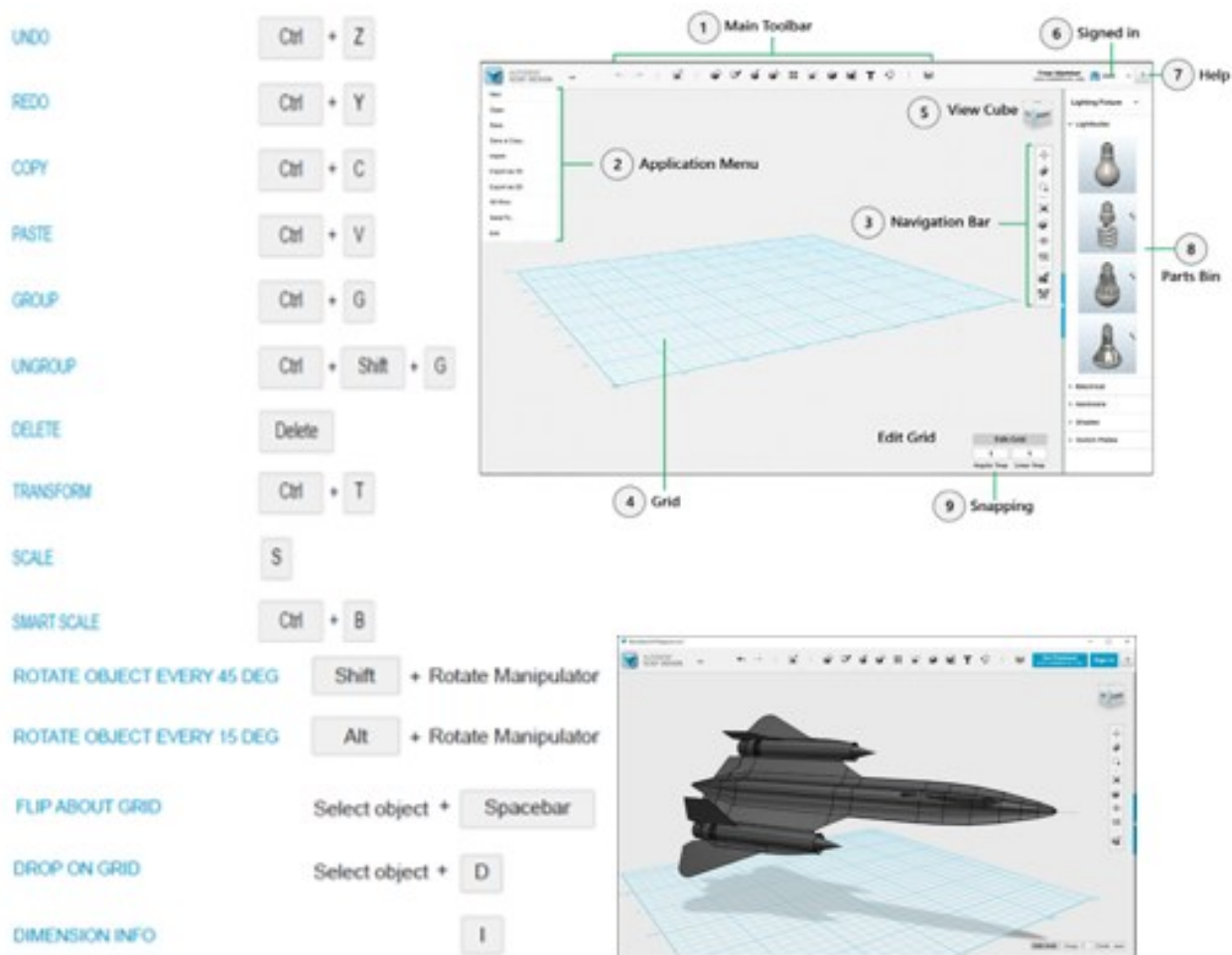
3.2. Σχεδίαση με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Design-CAD).

Η κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή (computer aided design, CAD), αποτελείται από, το υλικό μέρος (υπολογιστές κλπ), το λογισμικό και το χρήστη. Τα λογισμικά αυτά παρέχουν ένα περιβάλλον εργασίας, στο οποίο υπάρχουν εντολές, κουμπιά και μενού για το χειρισμό του χώρου σχεδίασης και τη δημιουργία των σχεδίων.



Εικόνα 18. Βασικές εντολές λογισμικού CAD

Για την εκτέλεση αυτών των λειτουργιών χρησιμοποιούνται από τα λογισμικά μαθηματικά μοντέλα. Για την παραγωγή και την οπτικοποίηση των σχεδίων λοιπόν ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία : 1) Οι χειρισμοί του χρήστη μετατρέπονται σε μαθηματικά μοντέλα πινάκων, 2) γίνεται επεξεργασία των μαθηματικών μοντέλων με την εκτέλεση των απαιτούμενων κάθε φορά πράξεων και 3) το αποτέλεσμα μεταφράζεται γραφικά στην θέση του υπολογιστή.



Εικόνα 19. Πρόσθετες Βασικές εντολές λογισμικού CAD

Η δημιουργία γεωμετρικών μοντέλων είναι μια διαδικασία στην οποία ο σχεδιαστής προσπαθεί είτε να μεταφράσει τις σκέψεις του σε σχήματα στο λογισμικό, είτε να προσδιορίσει και να διαστασιολογήσει ένα υπάρχον αντικείμενο, για να το μεταφέρει στο λογισμικό CAD. Οι κύριες μορφές γεωμετρικής μοντελοποίησης είναι :

Στερεά γεωμετρική μοντελοποίηση (Solid design): Τα μοντέλα θεωρούνται από το λογισμικό συμπαγή με ιδιότητες μάζας, όγκου, αδράνειας, κλπ. Υπάρχει η δυνατότητα πράξεων boole με στερεά (δηλαδή πρόσθεση, αφαίρεση, τομή γεωμετρικών μοντέλων) πάνω σε αρχέτυπα στερεά (κώνος, κύβος, κύλινδρος, σφαίρα), είτε προεκτείνοντας ένα δισδιάστατο

σχήμα στο χώρο είτε περιστρέφοντάς το γύρω από ένα νοητό άξονα. Επίσης γίνονται οι απαιτούμενες γεωμετρικές πράξεις για το συνδυασμό των στερεών, την τομή του στερεού με επιφάνειες ή επίπεδα. Οι γεωμετρικές πράξεις εφαρμόζονται, μέχρις να ολοκληρωθεί η διαδικασία με την κωδικοποίηση των όρων κατασκευής και η νοητή υλοποίηση της μορφής.

Επιφανειακή γεωμετρική μοντελοποίηση (Surface design): Τα σχήματα δεν έχουν μάζα, όγκο, κλπ. Σχηματίζεται ένας φλοιός που είναι η παράπλευρη επιφάνεια του εκάστοτε αντικειμένου. Για παράδειγμα για το σχεδιασμό ενός κύβου πρέπει να σχεδιαστούν οι έξι έδρες του. Δεν υπάρχει η δυνατότητα πράξεων boole.

Υπάρχει μεγάλος αριθμός λογισμικών CAD 3D σχεδίασης και ανταποκρίνονται σε κοινό επίπεδο αρχάριος έως επαγγελματικό, είναι είτε δωρεάν, είτε έναντι αμοιβής και υποστηρίζουν διάφορα αρχεία εξαγωγής (Παράρτημα Γ).

Όταν δεν θέλουμε να σχεδιάσουμε, αλλά απλώς να δούμε και να εξετάσουμε το μοντέλο (π.χ. αν το αρχείο έχει κατέβει από κάποιο αποθετήριο), τότε δεν χρειάζεται ένα λογισμικό CAD καθότι υπάρχουν και εφαρμογές στο διαδίκτυο επισκόπησης αρχείων .STL (STL file Viewer) Προσφέρουν διάφορα εργαλεία όπως ζουμ, περιστροφή, κοπή και τομή (για επιθεώρηση του εσωτερικού) (Παράρτημα Δ).

Τα CAD προγράμματα δεν δημιουργήθηκαν αρχικά για σχεδίαση 3D εκτυπώσιμων αντικειμένων (π.χ. μία σφαίρα στο CAD αναπαρίσταται ως σύνολο πολυγώνων σε STL αρχείο). Υπάρχουν όμως εργαλεία επεξεργασίας του πλέγματος (STL file editor), που μεταχειρίζονται τα αντικείμενα ως κέλυφος χωρίς γέμισμα. Προσφέρουν διάφορες λειτουργίες όπως αφαίρεση τριγώνων, ένωση ή επιδιόρθωση του πλέγματος. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ένωση του πλέγματος από μία τρισδιάστατη σάρωση ή απλά για να δημιουργήσουν νέα μοντέλα συγχωνεύοντάς τα (Παράρτημα Ε). Πέραν της επεξεργασίας μπορούν να έχουν και δυνατότητα επιδιόρθωσης. Τα προγράμματα της επιδιόρθωσης αρχείων .STL (STL Repair Tools) (Παράρτημα ΣΤ) χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και

επιδιόρθωση λαθών. Ένα συνηθισμένο λάθος που μπορούν να επιδιορθωθούν είναι οι τρύπες (κενά) που μπορούν να παρουσιαστούν στο πλέγμα, καθώς και η ανίχνευση μη πολλαπλής γεωμετρίας που παρουσιάζει πανομοιότυπα άκρα ακριβώς πάνω από άλλα. Μπορεί να ξεφορτωθούν από πλεονάζουσες επιφάνειες που δημιουργούνται κατά την 3D σάρωση, και να μεταβάλλει το πάχος του τοιχώματος της συνολικής κατασκευής ώστε να κάνουμε οικονομία υλικού αλλά και να είναι ανθεκτική η κατασκευή.

3.3. Μηχανική με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Engineering-CAE).

Η γεωμετρική αναπαράσταση που δημιουργείται μέσω των συστημάτων CAD μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για άλλες λειτουργίες. Η μηχανική με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer aided engineering - CAE) είναι μία τεχνολογία που αφορά τη χρήση ψηφιακών περιβαλλόντων, για να καταστεί εφικτή η ανάλυση ενός υπό μελέτη προϊόντος μέσω της γεωμετρικής του αναπαράστασης από ένα περιβάλλον CAD, με σκοπό να προσδιορίσει την αντοχή των προϊόντων συμπεριλαμβανομένης της αντοχής εφελκυσμού, της απόδοσης, της κύριας και της διατμητικής αντοχής. Ένα τέτοιο περιβάλλον επιτρέπει στο σχεδιαστή να εξομοιώσει και να μελετήσει τη συμπεριφορά ενός προϊόντος έτσι, ώστε το σχέδιο να μπορεί να ανακαθοριστεί και να βελτιστοποιηθεί. Ειδικότερα τα εργαλεία των περιβαλλόντων CAE είναι διαθέσιμα για ένα ευρύ φάσμα αναλύσεων.

- Ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEA (Finite Element Analysis), για κατασκευαστική και θερμική ανάλυση μεμονωμένων εξαρτημάτων και συναρμολογούμενων συνόλων.
- Υπολογιστική μηχανική ρευστών CFD (Computational Fluid Dynamics), για θερμική ανάλυση ρευστών.

- Κινηματική ανάλυση (Kinematics), για καθορισμό τροχιών κίνησης και εύρεσης ταχυτήτων συνδέσμων μηχανισμών.
- Λογισμικά ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων (Large Displacement Analysis), για την εύρεση φορτίων και μετατοπίσεων σε σύνθετα συναρμολογούμενα σύνολα , π.χ. οχήματα, αεροσκάφη κλπ.
- Προγραμματιστικά εργαλεία αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης και σχεδίασης.
- Εργαλεία παραγωγικής και κατασκευαστικής ανάλυσης (manufacturing tools), για προσομοίωση διαφόρων κατεργασιών (π.χ. χύτευση, molding, die press forming).

3.4. Κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή Computer Aided Manufacturing-CAM).

Η κατασκευή με βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Manufacturing – CAM) είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιεί ψηφιακό περιβάλλον για τον προγραμματισμό, τη διαχείριση, και έλεγχο των διαδικασιών κατασκευής μέσω είτε της άμεσης είτε της έμμεσης διεπαφής του ψηφιακού περιβάλλοντος με τους πόρους παραγωγής των εγκαταστάσεων.

Υπάρχουν πολλές πτυχές των εργαλείων CAM, αλλά μία διαδικασία που απαιτείται για την 3D εκτύπωση είναι η δυνατότητα να μετατρέψει το αρχείο εξαγωγής από το λογισμικό CAD (π.χ. .stl αρχείο) σε ένα αρχείο .gcode. Το g-code είναι στενογραφία σημειογραφία για το σύνολο των λειτουργιών του μηχανήματος που διέπουν την κυκλοφορία των διαφόρων τμημάτων του μηχανήματος. Οι κώδικες δεν περιορίζονται στους 3D εκτυπωτές αλλά καλύπτουν ένα ευρύτερο φάσμα μηχανών, συμπεριλαμβανομένων των μηχανών CNC.

Τα λογισμικά διαστρωμάτωσης (slicing) (Παράρτημα Ζ), τεμαχίζουν τα τρισδιάστατα μοντέλα CAD ως προς τον κατακόρυφο άξονα, δημιουργώντας μια διαδοχική σειρά από λεπτά στρώματα. Στο κάθε στρώμα δημιουργούνται οι διαδρομές καθοδήγησης, οι εντολές

```
; layer_height = 0.25
; perimeters = 3
; top_solid_layers = 3
; bottom_solid_layers = 3
; fill_density = 0.2
; perimeter_speed = 30
; infill_speed = 60
; travel_speed = 130
; nozzle_diameter = 0.4
; filament_diameter = 2.97
; extrusion_multiplier = 1
; perimeters extrusion width = 0.53mm
; infill extrusion width = 0.53mm
```

Εικόνα 20. Παράδειγμα εντολών λογισμικού διαστρωμάτωσης

συντεταγμένων, δίνοντας στον εκτυπωτή τις απαραίτητες οδηγίες για το πώς να κινηθεί για να εκτυπώσει το μοντέλο στρώμα με στρώμα. Οι διαδρομές είναι διαμορφώσιμες σύμφωνα με διάφορες επιλογές που επηρεάζουν το πάχος του τοιχώματος και την εσωτερική στερεότητα, που εκφράζεται σε έναν παράγοντα πυκνότητας (π.χ. πυκνότητα 40%, αφήνοντας έτσι το 60% του όγκου να καταλαμβάνεται από αέρα, δίνοντας πολύ καλή μηχανική αντοχή). Άλλες επιλογές είναι επίσης διαθέσιμες που επηρεάζουν την εσωτερική πλήρωση, την ταχύτητα, τα χαρακτηριστικά του υλικού υποστήριξης και τις θερμοκρασίες.

Με το μοντέλο διαδρομής να δημιουργείται από το λογισμικό διαστρωμάτωσης, δημιουργείται ένα αρχείο με κατάληξη .GCODE. Τα πρόγραμμα ελέγχου εκτυπωτή (printer control) (Παράρτημα Η) είναι εκείνα που αναλαμβάνουν τον χειρισμό της μηχανής καθώς και την πληροφόρηση του χρηστή με της απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις λειτουργίες της μηχανής, όπως θερμοκρασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

Μέθοδοι και τεχνολογίες

4.1. Εισαγωγή.

Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών τύπων τεχνολογιών 3D εκτύπωσης, τα οποία επεξεργάζονται διαφορετικά υλικά με διαφορετικούς τρόπους για τη δημιουργία του τελικού αντικειμένου και υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να πραγματοποιηθεί η κατάταξή τους. Ένας τρόπος που μπορεί επιτευχθεί είναι εξετάζοντας αν το υλικό κατασκευής, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των στρωμάτων, επεξεργάζεται ως σκόνη (Powder-Based Systems), ως λειωμένο υλικό (Molten Material Systems), ως στερεά φύλλα (Solid Sheets Systems) ή ως φωτοπολυμερές υγρό σε δεξαμενή, ή ink-jet εναπόθεση φωτοπολυμερούς (Photopolymer-Based Systems).

Άλλος τρόπος είναι η κατηγοριοποίηση δύο διαστάσεων. Στην πρώτη διάσταση γίνεται η διάκριση βάσης της μεθόδου που γίνεται η εκτύπωση σε κάθε στρώμα. Ενώ παλαιότερα υπήρχε ένα σημείο πηγής που οδηγούσε το υλικό στη βάση εκτύπωσης, έχουν πλέον εμφανιστεί τεχνολογίες είτε με διπλή πηγή, είτε με δυνατότητα εκτύπωσης γραμμής. Στη δεύτερη διάσταση γίνεται η διάκριση βάσης της επεξεργασίας υλικού, όπως και παραπάνω, δηλαδή σκόνη και συνδετικό υλικό (Discrete Particles), λειωμένο υλικό (Molten Material), στερεά φύλλα (Solid Sheets), υγρό πολυμερές (Liquid polymer).

Πέραν των ανωτέρω μπορεί να πραγματοποιηθεί η κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών σε επτά (7) μεθόδους - πρότυπα, που ανέπτυξε η Αμερικανική Κοινωνία Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials-ASTM), ομάδα "ASTM F42 – Additive Manufacturing". Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Συνδετική με πίεση ακροφυσίου (Binder Jetting),

- Κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργειας (Directed Energy Deposition),
- Εξώθηση υλικών (Material Extrusion),
- Υλικά με πίεση ακροφυσίου (Material Jetting),
- Σύντηξη στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion),
- Συγκόλληση φύλλων (Sheet Lamination) και
- Φωτοπολυμερισμό δεξαμενής (Vat Photopolymerisation) (Pandian & Belavek, 2016)

4.2. Συνδυαστική με Πίεση Ακροφυσίου (Binder Jetting-BJ).

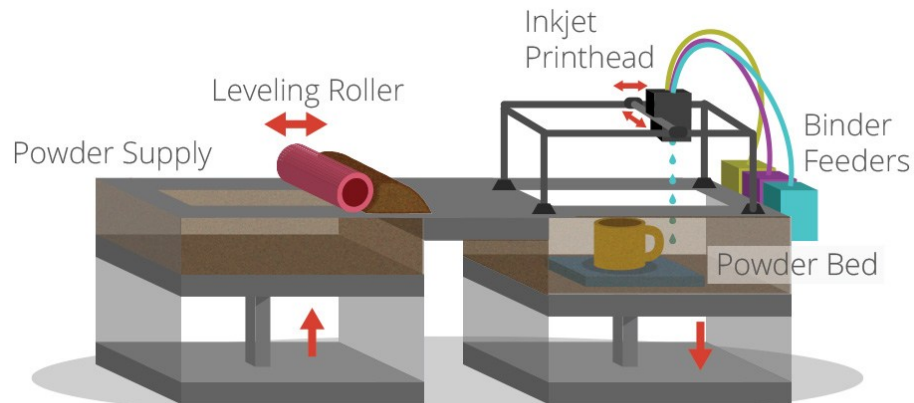
Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως “Three Dimensional Printing”, “3d Printing”, “3DP”, “Digital part materialization”, “ink-jet Printing”, “Powder bed and inkjet head 3D printing” και “drop-on powder”, “colorjet printing- CJP”.

Αναπτύχθηκε αρχικά στο Massachusetts Institute of Technology (MIT) το 1993 και το 1995 η Z Corporation κατοχύρωσε ένα δίπλωμα τεχνολογίας, με τον όρο “Three-Dimensional Printing”.

Μια συσκευή Binder Jetting διανέμει, χρησιμοποιώντας ρολό, ένα λεπτό στρώμα σκόνης υλικού επάνω σε μια πλατφόρμα κατασκευής. Τα ακροφύσια των κεφαλών εκτύπωσης εφαρμόζουν ένα συγκολλητικό υγρό, όπου απαιτείται, σύμφωνα με το μοντέλο. Η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει κατά ένα επίπεδο (όσο και το πάχος στρώματος (layer) του μοντέλου. Το επόμενο στρώμα της σκόνης τοποθετείται στην κορυφή και πραγματοποιείται συγκόλληση των σωματιδίων μεταξύ τους. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία τοποθέτησης σκόνης και συγκόλληση της, τα τμήματα δημιουργούνται μέσα σε πσίνα σκόνης υλικού. Το κομμάτι

χτίζεται στρώμα πάνω από το προηγούμενο στρώμα. Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με το παραδοσιακό χαρτί εκτύπωσης. Το συνδετικό υλικό λειτουργεί όπως το μελάνι που κινείται κατά μήκος του στρώματος σκόνης, που σαν το χαρτί, αποτελεί το τελικό προϊόν.

Η κατηγορία αυτή δεν απαιτεί οποιοσδήποτε δομές στήριξης, δεδομένου ότι η



Εικόνα 21. Μέθοδος Binder Jetting

εναπομένουσα σκόνη είναι το υλικό στήριξης. Η διαδικασία απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία με τεχνικές όπως χρήση ηλεκτρικής σκούπας για της απορρόφηση της περίσσειας σκόνης ή χρησιμοποιώντας συμπιεσμένο αέρα. Δεν χρησιμοποιεί θερμότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής.

Επίσης, μπορεί να παράγει λεπτομερείς 3D εκτυπώσεις με χρώμα (colorjet printing) και λειτουργεί με σχεδόν οποιοδήποτε υλικό που είναι διαθέσιμο σε μορφή σκόνης. Αρχής γινόμενης το 2014, εφευρέτες και κατασκευαστές έχουν αναπτύξει συστήματα για τη διαμόρφωση αντικειμένων από άμμο και ανθρακικό ασβέστιο (σχηματίζοντας έτσι ένα σύνθετο μάρμαρο), ακρυλικό σε σκόνη και κυανοακρυλικό, κεραμική σκόνη και συνδετικό υγρό, ζάχαρη και νερό (για τα γλυκά), κλπ.

Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου, συγκαταλέγεται το γεγονός ότι μπορεί να είναι ταχύτερη σε σχέση με την material Jetting μέθοδο, δεδομένου ότι μόνο ένα μικρό κλάσμα του συνολικού όγκου του υπό κατασκευή αντικειμένου πρέπει να διανέμεται μέσω των κεφαλών εκτύπωσης. Ωστόσο, η ανάγκη να διανέμεται η σκόνη υλικού προσθέτει ένα επιπλέον

βήμα, επιβραδύνοντας κάπως την διαδικασία. Επίσης, ο συνδυασμός των υλικών σε σκόνη και των συγκολλητικών υγρών επιτρέπει υλικό σύνθεσης που δεν είναι δυνατόν ή δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί, με τη χρήση άμεσων μεθόδων. Επιπρόσθετα, μπορεί να παραχθούν καλύτερης ποιότητας κεραμικά και μεταλλικά μέρη σε σύγκριση με την material Jetting μέθοδο δεδομένου ότι μπορούν να φορτωθούν υψηλότερης ποιότητας στερεά. Κατά γενικό κανόνα, ωστόσο, τα μέρη που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας διαδικασίες BJ τείνουν να μην έχουν ακρίβεια και λείες επιφάνειες.

4.3. Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition).

Η κατευθυνόμενη εναπόθεση ενέργεια (DED) είναι η διεργασία που επιτρέπει τη δημιουργία εξαρτημάτων από τήξη υλικού καθώς αυτό εναποτίθεται. Αν και δύναται να λειτουργήσει με πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά μεταλλικής βάσης, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για μεταλλικές σκόνες. Έτσι, αυτή η τεχνολογία συχνά αναφέρεται ως κατευθυνόμενη τεχνολογία απόθεσης μετάλλου (Direct metal deposition technology). Το υλικό τροφοδοσίας μπορεί να είναι σκόνη υλικού ή υλικό σε μορφή σύρματος.

Η DED διεργασία προωθεί άμεση ενέργεια σε μία στενή, εστιασμένη περιοχή για να θερμάνει το υπόστρωμα, να τήξει το υπόστρωμα και ταυτόχρονα να τήξει το υλικό που έχει εναποθετηθεί στο υπόστρωμα. Σε αντίθεση με τεχνικές σύντηξης στρώματος σκόνης (Powder Bed Fusion), οι DED διαδικασίες δεν χρησιμοποιούνται για να λιώσουν ένα υλικό που έχει απλωθεί ως λεπτό στρώμα σκόνης, αλλά χρησιμοποιούνται για την τήξη υλικών καθώς αυτά εναποθέτονται.

Οι DED διεργασίες χρησιμοποιούν μια εστιασμένη πηγή θερμότητας (συνήθως ένα λέιζερ ή δέσμη ηλεκτρονίων) για να λιώσει το υλικό τροφοδοσίας και να δημιουργήσει

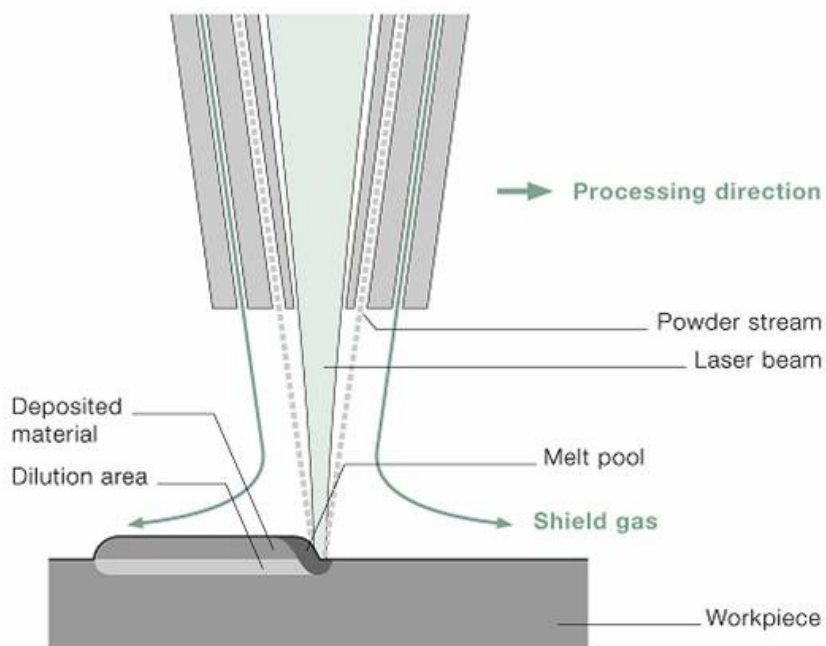
τρισδιάστατα αντικείμενα με τρόπο παρόμοιο με την εξώθηση υλικών (Material Extrusion) επεξεργασία. Κάθε πέρασμα της DED κεφαλής δημιουργεί παρακείμενες γραμμές του υλικού που συνθέτουν στρώματα. Η κατηγορία αυτή απαιτεί είτε υλική υποστήριξη ή πολυαξονική εναπόθεση.

Έχουν αναπτυχθεί DED μηχανήματα που χρησιμοποιούν λέιζερ και τροφοδότη σκόνης. Αυτές οι μηχανές έχουν αναφερθεί ως “Laser Engineered Net Shaping (LENS)”, “Directed Light Fabrication (DLF)”, “Direct Metal Deposition (DMD)”, “3D Laser Cladding”, “Laser Generation”, “Laser-Based Metal Deposition (LBMD)”, “Laser Freeform Fabrication (LFF)”, “Laser Direct Casting”, “LaserCast”, “Laser Consolidation”, “LasForm”, “Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3)”, και άλλα. Παρά το γεγονός ότι η γενική προσέγγιση είναι η ίδια, οι διαφορές μεταξύ αυτών των μηχανών περιλαμβάνουν συνήθως αλλαγές στην ισχύ των λέιζερ, στο μέγεθος σημείου συγκέντρωσης του λέιζερ, στον τύπο του λέιζερ, στη μέθοδο παράδοσης της σκόνης υλικού, στην μέθοδο παράδοσης του αδρανές αερίου, στο σύστημα ελέγχου ανάδρασης, και / ή στο είδος του ελέγχου κίνησης που χρησιμοποιείται.

Οι DED διεργασίες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο ποσοστό από ερευνητικούς οργανισμούς που ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη νέων κραμάτων υλικών και την εφαρμογή νέων ή προηγμένων υλικών σε νέες βιομηχανίες. Επίσης χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις που εστιάζουν στην επιδιόρθωση, γενική επισκευή και τον εκσυγχρονισμό των μεταλλικών κατασκευών. Τέλος είναι χρήσιμη για την προσθήκη χαρακτηριστικών ή / και υλικού σε υφιστάμενες δομές, για να βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά απόδοσης τους (όπως αντοχή σε διάβρωση).

4.3.1. Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Λείζερ (Laser-Based Metal Deposition - LBMD).

Είναι μία τεχνολογία βασισμένη στην εναπόθεση σκόνης υλικού με χρήση λέιζερ. Η κεφαλή εναποθέσεως είναι συνήθως μια ολοκληρωμένη συλλογή από οπτικά λέιζερ, ακροφύσιο/α σκόνης, σωληνώσεις αδρανούς αερίου, και σε ορισμένες περιπτώσεις αισθητήρες. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι είτε μια επίπεδη πλάκα πάνω στην οποία θα κατασκευαστεί το καινούργιο αντικείμενο ή ένα υπάρχον εξάρτημα πάνω στο οποίο θα προστεθεί επιπλέον γεωμετρία. Η εναπόθεση ελέγχεται από μία σχετική διαφορική κίνηση μεταξύ του υποστρώματος και της κεφαλής εναποθέσεως. Αυτή η διαφορική κίνηση επιτυγχάνεται είτε με τη μετακίνηση της κεφαλής εναποθέσεως, είτε μετακινώντας το υπόστρωμα, ή με συνδυασμό των δύο. Υπάρχουν τυπικά συστήματα 3 αξόνων, σύμφωνα με



Εικόνα 22. Μέθοδος Directed Energy Deposition, τεχνολογία «Laser-Based Metal Deposition – LBMD» τα οποία η εναπόθεση πραγματοποιείται κατακόρυφα. Ωστόσο υπάρχουν και συστήματα με 4 ή 5 άξονες που χρησιμοποιούν είτε περιστροφικές πλάκες ή ρομποτικούς βραχίονες.

Η Laser Engineered Net Shaping (LENS) αποτελεί μία από τις πρώτες DED διεργασίες, αναπτύχθηκε από τα εθνικά εργαστήρια “Sandia” στις ΗΠΑ, και στο εμπόριο ξεκίνησε το 1997 από την εταιρεία Optomec, με το μοντέλο “LENS 850” και με ικανότητα διπλής κεφαλής. Η επεξεργασία των υλικών πραγματοποιείται μέσα σε ένα κλειστό θάλαμο όπου αφαιρείται το οξυγόνο και ανατροφοδοτείται αδρανές αέριο (συνήθως αργόν).

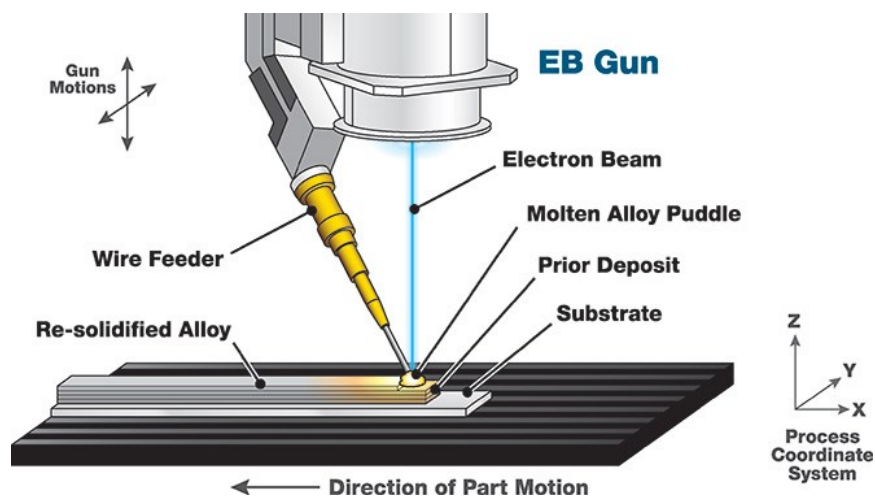
Η εταιρεία POM, είναι μία άλλη εταιρία κατασκευής LBMD μηχανημάτων, τη τεχνολογία της οποίας έχει αποκτήσει η εταιρεία DM3D Technology. Το σύστημα διαθέτει πέντε (5) άξονες, δυνατότητα ομοαξονικής τροφοδοσίας σκόνης για το χτίσιμο των μερών και χρησιμοποιεί την προσέγγιση θωράκισης με αέριο. Χρησιμοποιεί λέιζερ CO₂, το οποίο έχει το πλεονέκτημα να είναι μια οικονομική, υψηλής παραγόμενης πηγής θερμότητας. Όμως, η απορροφητικότητα των περισσότερων υλικών είναι πολύ μικρότερη σε μήκη κύματος λέιζερ CO₂, από ότι για Nd-YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet; Nd:Y₃Al₅O₁₂) ή λέιζερ ινών και έτσι σχεδόν όλα τα νέα DED συστήματα χρησιμοποιούν τώρα ίνες, διόδους, ή λέιζερ Nd-YAG. Για συστήματα που εξακολουθούν να χρησιμοποιούν λέιζερ CO₂, προκειμένου να αντισταθμίσουν την μικρή απορροφητικότητα, εφαρμόζεται μεγαλύτερο ποσό ενέργειας λέιζερ, με αποτέλεσμα μια μεγαλύτερη επηρεασμένη θερμική ζώνη και μία συνολική θερμότητα εισόδου.

4.3.2. Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Based Metal Deposition).

Είναι μία τεχνολογία βασισμένη στην εναπόθεση υλικού σε μορφή σύρματος με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων ως πηγή θερμότητας.

Η μέθοδος Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM™), η οποία είναι αποκλειστική της Sciaky, Inc. δημιουργεί εξαρτήματα μέσα σε ένα θάλαμο εν κενού (απουσία οξυγόνου). Ξεκινώντας με ένα 3D μοντέλο σε ένα πρόγραμμα CAD, το οποίο μετατρέπεται σε κώδικα CNC, η δέσμη ηλεκτρονίων εναποθέτει μέταλλο, μέσω της τροφοδότησης σύρματος, στρώμα πάνω σε στρώμα, έως ότου το τμήμα φθάσει σχεδόν στο τελικό σχήμα, οπότε και υποβάλλεται στο τελικό στάδιο θερμικής επεξεργασίας και κατεργασίας. Η ίδια η διαδικασία είναι επεκτάσιμη σε μέγεθος, για τα κατασκευαστικά αντικείμενα, από χιλιοστά σε πολλαπλά μέτρα, με μόνο περιορισμό το μέγεθος του θαλάμου εν κενού.

Η Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3) αναπτύχθηκε στο ερευνητικό κέντρο



Εικόνα 23. Μέθοδος Directed Energy Deposition, τεχνολογία «Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM™)»

Langley της NASA, ως ένας τρόπος για την κατασκευή ή / και επιδιόρθωση μεταλλικών μερών ή εργαλείων σε ένα αεροδιαστημικό σύστημα. Είναι μία διαδικασία που χρησιμοποιεί ένα εκτοξευτή δέσμης ηλεκτρονίων, έναν διπλό τροφοδότη σύρματος και έλεγχο από υπολογιστή. Χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων καθότι αφενός λειτουργεί αποτελεσματικά εν κενό, αλλά όχι με την παρουσία αδρανών αερίων και έτσι είναι κατάλληλοι για την διαστημικό περιβάλλον, αφετέρου είναι πολύ πιο αποτελεσματική στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τα περισσότερα ακτίνας λέιζερ, το οποίο εξοικονομεί τους σπάνιους

ηλεκτρικούς πόρους. Επιπρόσθετα προτιμάται η τροφοδοσία σύρματος επειδή οι σιόνες υλικού είναι δύσκολο να διαχειριστούν με ασφάλεια σε περιβάλλοντα χαμηλής βαρύτητας. Η EBF3 χρησιμοποιείται για την κατασκευή δοκών τιτανίου για τις κάθετες ουρές των F-35 Joint Strike Fighter. Λιγότερη σπατάλη τιτανίου και μείωση του χρόνου κατεργασίας οδηγεί σε εξοικονόμηση πόρων.

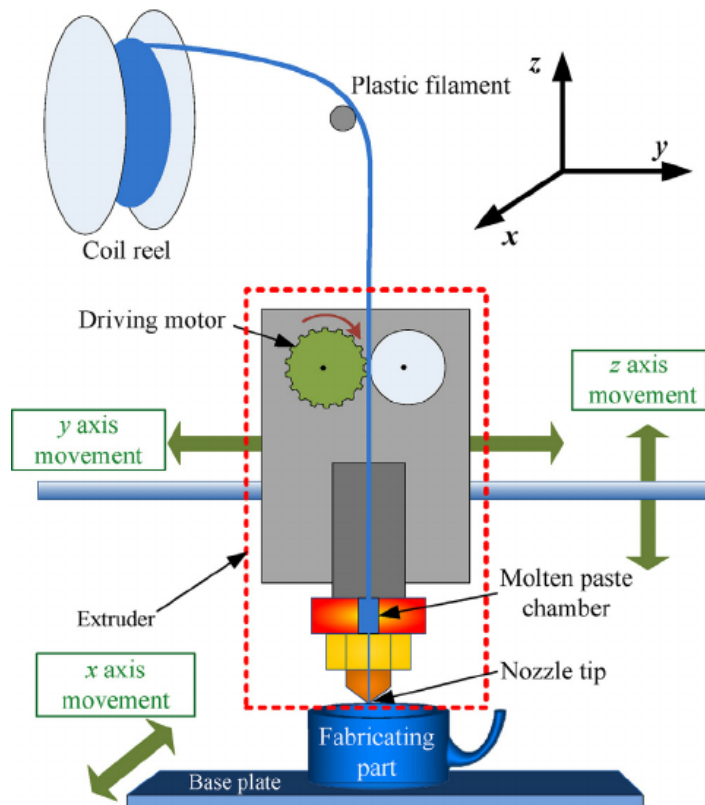
4.4. Εξώθηση Υλικών (Material Extrusion).

Η τεχνολογία αυτήν την περίοδο είναι η πιο δημοφιλής διαδικασία εκτύπωσης λόγω του αριθμού των εκτυπωτών που διατίθενται στην αγορά. Βασίζεται στην επιλεκτική εναπόθεση υλικού για τον σχηματισμό αλληπάλληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σχέση απόδοσης/τιμής συγκριτικά με άλλες μεθόδους ταχείας πρωτοτυποποίησης ή συμβατικής παραγωγής. Τα παραγόμενα αντικείμενα είναι ανθεκτικά και συνήθως έτοιμα προς χρήση χωρίς να απαιτείται κάποια πρόσθετη επεξεργασία.

Υπάρχει ένας αριθμός βασικών χαρακτηριστικών που είναι κοινά σε οποιοδήποτε σύστημα Εξώθησης υλικών: Είναι η φόρτωση του υλικού, η υγραποίησή του, η εφαρμογή πίεσης ώστε να κινηθεί το υλικό μέσω του ακροφυσίου της κεφαλής, η εξώθησή του, η χάραξη σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο μονοπάτι και με ελεγχόμενο τρόπο για την δημιουργία επιπέδων, η συγκόλληση του υλικού σε ίδια ή δευτερογενή υλικά κατασκευής για να σχηματίσουν μια συνεκτική σταθερή δομή και τέλος η ένταξη δομών υποστήριξης για την δημιουργία πολύπλοκων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

4.4.1. Μοντελοποίηση Εναπόθεσης Τηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM), Κατασκευή Τηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication - FFF) και Κατασκευή Σύνθετου Νήματος (Composite Filament Fabrication - CFF).

Έχει αναφερθεί μερικές φορές και ως πλαστική εκτύπωση με πίεση ακροφυσίου (Plastic Jet Printing - PJP). Μηχανήματα αυτής της τεχνολογίας μπορούν να κινούνται σε τρεις γραμμικές κατευθύνσεις (x), (y) και (z), γνωστές ως και καρτεσιανές συντεταγμένες. Αποτελούνται από μία ή περισσότερες κεφαλές εξώθησης, μία βάση και από βηματικούς κινητήρες ή κινητήρες σέρβο, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μετακινήσουν το νήμα, την/ις κεφαλή/ες και την βάση. Το υλικό σε νηματώδη μορφή ζεσταίνεται από ένα καρούλι



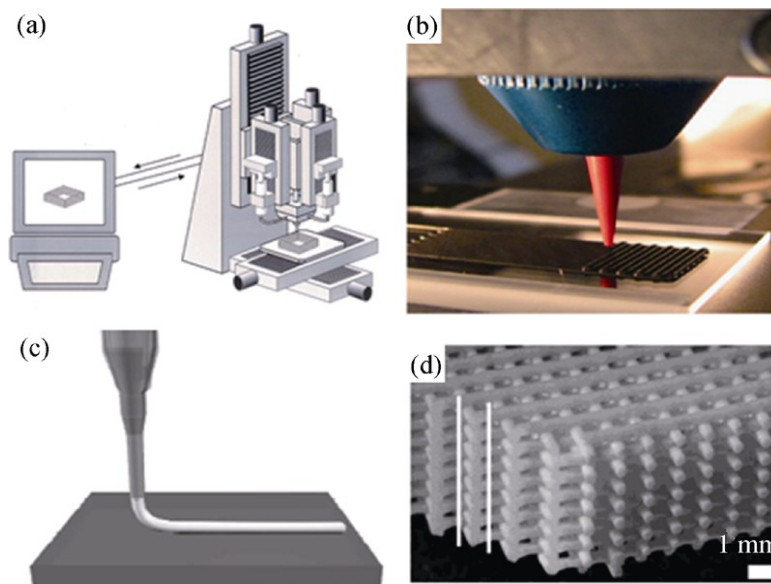
Εικόνα 24. Μέθοδος Material Extrusion, τεχνολογία «Fused Deposition Modeling - FDM», «Fused Filament Fabrication - FFF», «Composite Filament Fabrication – CFF»

και τροφοδοτεί συνεχώς τη μηχανή. Το νήμα σπρώχνεται μέσα στο ακροφύσιο της κεφαλής εξώθησεως, όπου θερμαίνεται. Καθώς το ακροφύσιο πετυχαίνει την επιθυμητή θερμοκρασία, ανάλογα με το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται, εναποθέτει πάνω στη βάση λεπτές στρώσεις του υλικού, το οποίο βρίσκεται σε ημίρρευστη κατάσταση. Η βάση είναι συνήθως από γυαλί ή αλουμίνιο και θερμαινόμενη για την αποφυγή στρέβλωσης ή ραγίσματος της κατασκευής. Το υλικό σκληραίνει αμέσως μετά από την εξώθησή του από το ακροφύσιο, αφενός διότι η βάση βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, αφετέρου ανεμιστήρας υπάρχει πλησίον της κεφαλής τροφοδοτώντας συνεχώς αέρα για την ψύξη του υλικού. Στο ακροφύσιο γίνεται ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της ροής και μετακινείται στο επίπεδο σε οριζόντιες (x) και κάθετες (y) κατευθύνσεις, σύμφωνα με ένα ελεγκτή αριθμητικού ελέγχου (N.C. Controller). Κατόπιν η βάση κατέρχεται στην κατεύθυνση (z) όσο και το πάχος της στρώσης και η κεφαλή εναποθέτει το δεύτερο στρώμα πάνω στο πρώτο.

Υπάρχουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές σχετικά με τους άξονες κίνησης αλλά η φιλοσοφία είναι ίδια. Μπορεί δηλαδή η βάση να κινείται στον (y) άξονα και η κεφαλή στον (x) και (z) άξονα. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου παίρνοντας τη τελική μορφή από τα διαδοχικά επίπεδα (layers). Για την υποστήριξη των ευαίσθητων θέσεων του αντικειμένου (με μεγάλη κλίση προεξοχής) κατασκευάζονται υποστηρίγματα από το ίδιο υλικό ή διαφορετικού υλικού από μια δεύτερη κεφαλή που αφαιρούνται εύκολα από το τελικό πρωτότυπο. Μπορεί να εκτυπώσει σε πολλά διαφορετικά χρώματα και με πληθώρα υλικών που βρίσκονται σε μορφή νήματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

4.4.2. Robocasting ή Κατευθυνόμενη Γραφή Μελανιού (Direct Ink Writing -DIW), Βιοεξώθηση (Bioextrusion).

Στην εξώθηση το υλικό πρέπει να είναι σε ρευστή μορφή που μπορεί γρήγορα να στερεοποιηθεί. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε, όπως στην προηγούμενη μέθοδο, με θερμική διεργασία λιωσίματος είτε χρησιμοποιώντας χημική διεργασία όπου ένα υλικό, που βρίσκεται σε μορφή τζέλ σκληραίνει ή ξεραίνεται (στεγνώνει από υγρασία). Συνήθως ένα ρευστό αναφερόμενο και ως μελάνη, όπως κεραμικός πολτός, διατηρεί το σχήμα του αμέσως μετά την εξώθηση. Είναι συνήθως πολύ εύθραυστο και μαλακό και γι' αυτό ξήρανση και σύντηξη ακολουθούν για να δώσουν τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες.



Εικόνα 1. Μέθοδος Material Extrusion, τεχνολογία «Robocasting» ή «Direct Ink Writing –DIW», «Bioextrusion»

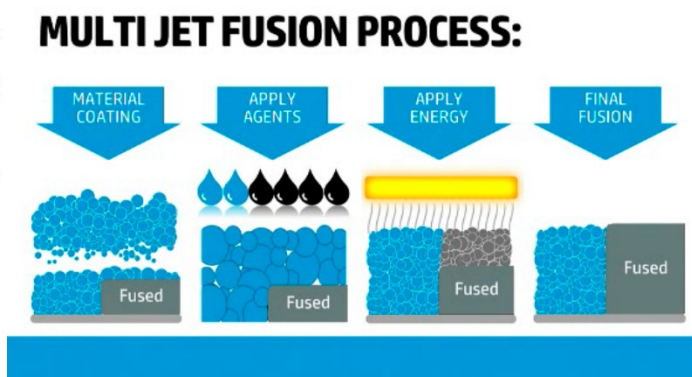
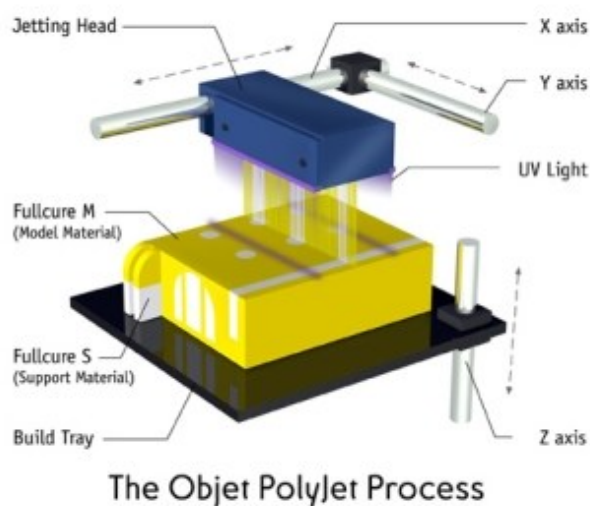
Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται και στην βιοεξώθηση (Bioextrusion) για την δημιουργία βιοσυμβατών και / ή βιοδιασπώμενων συστατικών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία πλαισίων, που φιλοξενούνται από ζωικά κύτταρα για τον σχηματισμό ιστών (μηχανική των ιστών). Χρησιμοποιούνται πολυμερικές ουσίες σε μορφή πάστας ή υδρογέλες (hydrogels),

που είναι πολυμερή αδιάλυτα στο νερό αλλά μπορούν να διασπαστούν στο νερό. Βασίζονται σε φυσικά ή συνθετικά πολυμερή, αλλά τα φυσικά πολυμερή είναι ίσως πιο βιοσυμβατά. Επιπρόσθετα λόγω των ασθενών δεσμών που αναπτύσσουν μεταξύ τους είναι χρήσιμα για την ανάπτυξη μαλακών ιστών.

4.5. Υλικά με Πίεση Ακροφυσίου (Material Jetting).

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι “Multi Jetting Model (MJM)”, “Polyjet” “Multi Jet Fusion (MJF)”. Είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα υλικά κατασκευής (ρητίνη ή κερί σε υγρή ή ρευστή κατάσταση) επιλεκτικά ψεκάζονται από πολλαπλά ακροφύσια. Σε αυτή τη διαδικασία, το υλικό εφαρμόζεται σε σταγονίδια μέσα από ακροφύσιο μικρής διαμέτρου, παρόμοια με τον τρόπο που ένας κοινός inkjet εκτυπωτής χαρτιού λειτουργεί, μόνο που εφαρμόζεται στρώμα με στρώμα. Με την ολοκλήρωση του στρώματος ακτίνες UV σκληραίνουν το υλικό. Αυτά τα στρώματα έχουν πολύ λεπτό πάχος στρώσης, που ανάλογα με το μηχάνημα κυμαίνεται μεταξύ 16μm και 28μm και δημιουργούνται προσθετικά για να δημιουργηθεί ένα 3D μοντέλο. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα χωρίς επιπλέον επεξεργασία. Μαζί με το επιλεγμένο υλικό κατασκευής, ψεκάζεται ένα υλικό υποστήριξης με μορφή τζελ διευκολύνοντας την επιτυχή εκτύπωση πολύπλοκων γεωμετριών. Το υλικό υποστήριξης μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα με πίεση νερού.

Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη εναπόθεση ποικιλία υλικών, πράγμα που σημαίνει ότι ένα εξάρτημα μπορεί να παραχθεί από διαφορετικά υλικά εκτύπωσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Έτσι είναι σε θέση να κατασκευάζει λειτουργικά συγκροτήματα, μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλά συναρμολογήματα.



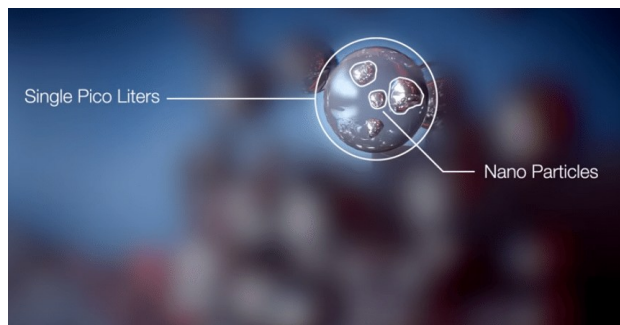
Εικόνα 25. Μέθοδος Material Jetting

Μπορούν να εκτυπώνονται μοντέλα με ιδιότητες πολύ κοντινές σε πλαστικές ύλες βιομηχανικών εφαρμογών και με αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες έως και 80°C. Παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα, πολύ καλή ακρίβεια και εξαιρετικά λείες επιφάνειες. Επιτρέπεται η περεταίρω επεξεργασία όπως βαφή, επιμετάλλωση, διάτρηση, χάραξη και μηχανοποίηση. Προσφέρει διάφορες ιδιότητες όπως παλέτα πλήρους χρώματος, ελαστικότητα, σκληρότητα, αγωγιμότητα, αντοχή στον εφελκυσμό, στην θλίψη και στην θερμική αντίδραση.

4.5.1. Νανοσωματίδια με Πίεση Ακροφυσίου (NanoParticle Jetting - NPJ).

Στη διαδικασία αυτή το υλικό κατασκευής είναι μεταλλικά ή κεραμικά νανοσωματίδια, που περιβάλλονται από ελαιώδες ρευστό και δημιουργούν σταγονίδια, τα οποία ψεκάζονται από τα πιεστικά και παράγουν ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα. Το υλικό υποστήριξης ψεκάζεται με τον ίδιο τρόπο. Στην πλατφόρμα εκτύπωσης και σε θερμοκρασία 300°C το ρευστό

εξάτμιζεται και τα σταγονίδια δένουν μεταξύ τους, όπως οι νιφάδες χιονιού μετατρέπονται σε νερό. Υπάρχει ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (σχεδόν ένα μικροδευτερόλεπτο) κατά το οποίο πριν από την εξάτμιση είναι ακόμα σε υγρή μορφή. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργείται ένα τέλειο πακέτο, χωρίς πορώδες επιφάνειες. Επιπλέον, το εκτυπωμένο αντικείμενο υποβάλλεται σε μια εύκολη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης σε κλίβανο ως ενιαία μονάδα, εξασφαλίζοντας ομοιομορφία προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα στηρίγματα στον κλίβανο μετατρέπονται σε σκόνη και απομακρύνονται απλά.



Εικόνα 26. Μέθοδος Material Jetting, τεχνολογία «NanoParticle Jetting – NPJ»

4.6. Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion).

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι “Selective Laser Sintering”, “ Selective Laser Melting”, “Direct Metal Laser Sintering”, “ Selective Heat Sintering” και “Electron Beam Melting”. Η “Selective Laser Sintering” ήταν μία από τις πρώτες εμπορεύσιμες διαδικασίες ενώ οι λοιπές τροποποίησαν την βασική προσέγγιση αυτής καθιστώντας ικανή την χρησιμοποίηση διαφορετικών υλικών και/ή την αποφυγή συγκεκριμένων πατενταρισμένων χαρακτηριστικών.

Όλες οι διαδικασίες μοιράζονται ένα βασικό σετ χαρακτηριστικών. Αυτά περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες θερμικές πηγές για την επαγωγή της σύντηξης μεταξύ των σωματιδίων σκόνης, μια μέθοδο για τον έλεγχο σύντηξης της σκόνης σε ορισμένη περιοχή του κάθε στρώματος και οι μηχανισμοί για την προσθήκη και την εξομάλυνση των στρωμάτων σκόνης.

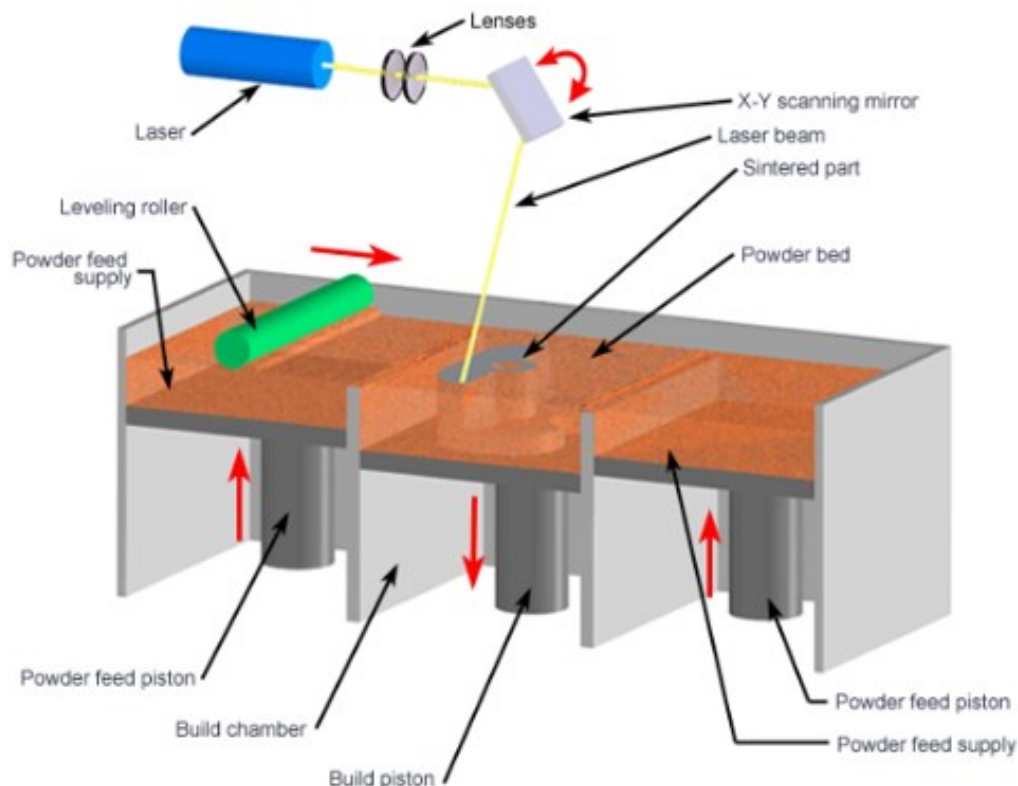
4.6.1. Επιλεκτική Σύντηξη με την Χρήση Ακτίνων Λέιζερ (Selective Laser Sintering – SLS).

Στην τεχνική αυτή μια ακτίνα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα CO₂ λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά (πλαστικά, κεραμικά ή μέταλλα) τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος "στρώνει" μια ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους (τυπικά 0,075 - 0,1mm) πάνω σε μια επιφάνεια και μια κεφαλή λέιζερ διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής με σάρωση σε εγχάρσιες τομές από ένα ψηφιακό 3D αρχείο, λιώνοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά την σκόνη. Κατόπιν η επιφάνεια κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής, τοποθετείται εκ νέου σκόνη την οποία στρώνει ο κύλινδρος και η κεφαλή λέιζερ διαγράφει την επόμενη διατομή στερεοποιώντας την πάνω στην πρώτη.

Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Η περίσσεια της σκόνης κάθε στρώματος λειτουργεί ως υποστήριγμα του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Επειδή, η πυκνότητα του τελικού εξαρτήματος, εξαρτάται από την μέγιστη ισχύ του λέιζερ και όχι από την διάρκεια της ακτινοβολίας, οι μηχανές S.L.S. χρησιμοποιούν συνήθως παλμικό λέιζερ. Η μηχανή προθερμαίνει το κονιοποιημένο υλικό λίγο κάτω από το σημείο τήξης του, ώστε να καταστεί ευκολότερο για το λέιζερ να αυξήσει την θερμοκρασία των επιλεγμένων περιοχών στο σημείο τήξης του.

Μερικά μηχανήματα S.L.S., χρησιμοποιούν σκόνη ενός συστατικού, (π.χ. άμεση συσσωμάτωση μετάλλου με λέιζερ), ωστόσο οι περισσότερες μηχανές χρησιμοποιούν σκόνη δύο συστατικών, συνήθως είτε επικαλυμμένης σκόνης είτε ένα μείγμα σκόνης. Σε αντίθεση με την SLS, η DMLS και η SLM χρησιμοποιούν ενός συστατικού σκόνης. Σε ενός συστατικού σκόνης, το λέιζερ λιώνει μόνο την εξωτερική επιφάνεια των σωματιδίων, (τήξη επιφανείας) ενώνοντας τους στερεούς μη λιωμένους πυρήνες μεταξύ τους και με το προηγούμενο στρώμα.

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους παραγωγής με πρόσθεση υλικού, οι μηχανές αυτές μπορούν να παράγουν εξαρτήματα από ένα ευρύ φάσμα εμπορικά διαθέσιμων υλικών σε σκόνη. Ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού, μπορούμε να πετύχουμε μηχανικές ιδιότητες, ανάλογες με αυτές από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Σε πολλές περιπτώσεις, μεγάλος αριθμός εξαρτημάτων μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στην σκόνη επιτρέποντας έτσι πολύ μεγάλη παραγωγικότητα. Αντίθετα με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν πριν, όπου υπάρχει μόνο μία μεταβατική φάση, στην διαδικασία SLS υπάρχουν δύο: από στερεό σε ρευστό και πίσω πάλι σε στερεό.



Εικόνα 27. Μέθοδος Powder Bed Fusion, τεχνολογία «Selective Laser Sintering – SLS»

Ο εξοπλισμός SLS περιλαμβάνει: τον υπολογιστή ελέγχου, τον έλεγχο ατμόσφαιράς και το θάλαμο κατασκευής. Ο υπολογιστής ελέγχου βασίζεται σε λειτουργικό σύστημα UNIX, στο οποίο δημιουργούνται τα αρχεία STL και τα αρχεία τεμαχισμού του μοντέλου. Ο υπολογιστής ελέγχου παρακολουθεί όλη τη διαδικασία κατασκευής. Η μονάδα ελέγχου

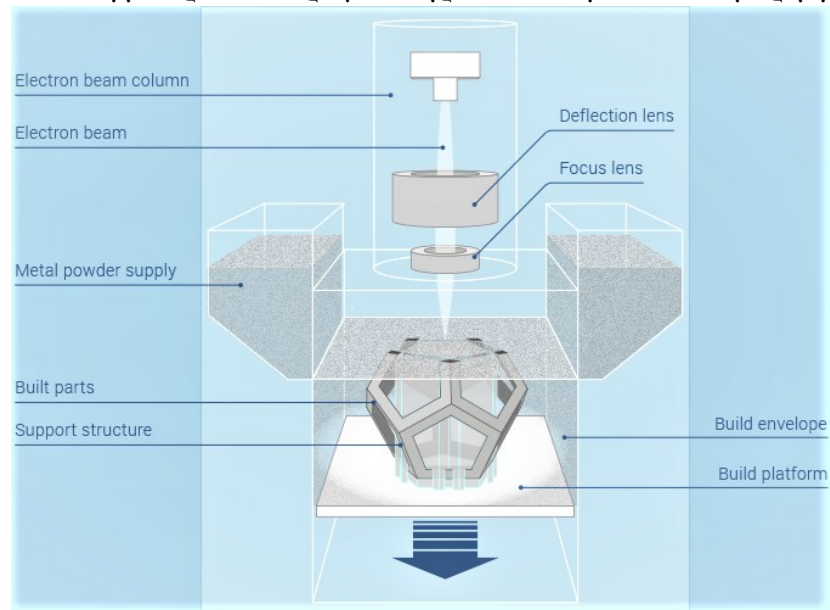
ατμόσφαιρας περιλαμβάνει τα όργανα φιλτραρίσματος και ανακύκλωσης των αερίων του θαλάμου κατασκευής. Διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θάλαμο και ρυθμίζουν την ποσότητα του αζώτου μέσα στη μονάδα. Ο θάλαμος κατασκευής περιλαμβάνει το laser και το σύστημα διαχείρισης της πούδρας. Το laser εστιάζεται με τα κατάλληλα οπτικά. Η σάρωση της επιφάνειας της πούδρας από την ακτίνα laser γίνεται με καθρέφτες. Στις δύο απέναντι πλευρές του κυλίνδρου υπάρχουν δύο αποθήκες υλικού: η μία τροφοδοτεί με νέο υλικό και η άλλη συλλέγει τα υπολείμματα από το στρώσιμο και την ευθυγράμμιση της επιφάνειας του υλικού. Το κτίσιμο των κομματιών ξεκινάει με την θέρμανση της ατμόσφαιρας του θαλάμου κατασκευής και γεμίζεται με άζωτο.

4.6.2. Λιώσιμο με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM).

Κατά τη διαδικασία, ένα θερμαινόμενο νήμα βολφραμίου εκπέμπει ηλεκτρόνια σε υψηλή ταχύτητα, τα οποία στη συνέχεια ελέγχονται από δύο μαγνητικά πεδία, ένα πηνίο εστίασης (focus coil) και ένα πηνίο εκτροπής (deflection coil). Το πηνίο εστίασης ενεργεί ως ένας μαγνητικός φακός και εστιάζει την δέσμη στην επιθυμητή διάμετρο, ενώ το πηνίο εκτροπής εκτρέπει την εστιασμένη δέσμη στο επιθυμητό σημείο σάρωσης του στρώματος σκόνης. Όταν τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια χτυπήσουν το στρώμα σκόνης, η κινητική τους ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια η οποία τήκει τη σκόνη. Κάθε στρώμα κρεβατιού σκόνη σαρώνεται σε δύο στάδια, το στάδιο της προθέρμανσης και το στάδιο της τήξης. Στην προθέρμανση, μία υψηλής ενέργειας δέσμης με μια υψηλή ταχύτητα σάρωσης χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του στρώματος σκόνης με πολλαπλά περάσματα. Στην τήξη, μια χαμηλής ενέργειας δέσμης με μία χαμηλή ταχύτητα σάρωσης χρησιμοποιείται για την τήξη της σκόνης. Όταν η σάρωση ένα στρώματος ολοκληρωθεί, η πλατφόρμα χτισίματος χαμηλώνει, μια νέα στρώση σκόνης υλικού απλώνεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

μέχρι τον σχηματισμό του εξαρτήματος.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να παράγει πλήρως πυκνά μεταλλικά μέρη, με καλές μηχανικές



Εικόνα 28. Μέθοδος Powder Bed Fusion, τεχνολογία «Electron Beam Melting – EBM»

ιδιότητες και να διατηρεί τα χαρακτηριστικά του υλικού. Θεωρείται μια πολύ αποδοτική διαδικασία με μικρότερο ενεργειακό κόστος. Χρειάζεται να λειτουργεί εν κενό στον θάλαμο κατασκευής, σε αντίθεση με τις ανωτέρω μεθόδους που χρησιμοποιούν αδρανές προστατευτικό αέριο (Gibson, Rosen & Stucker, 2015). Επιπρόσθετα η επιφάνεια φινιρίσματος και η ανάλυση είναι μέτρια σε σχέση με τις ανωτέρω μεθόδους όπου είναι άψογο.

4.7. Συγκόλληση Φύλλων (Sheet Lamination).

Βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με τη συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, είναι το χαμηλό κόστος, τα απλά υλικά κατεργασίας, τα μεγάλα εξαρτήματα που μπορούμε να κατασκευάσουμε και ότι η πολυπλοκότητα του κομματιού δεν μας περιορίζει. Η διαδικασία αυτή θεωρείται από τις πιο γρήγορες. Δεν χρειάζονται κάποια χημική επεξεργασία όπως σε άλλες μεθόδους. Ένα μειονέκτημα που έχει

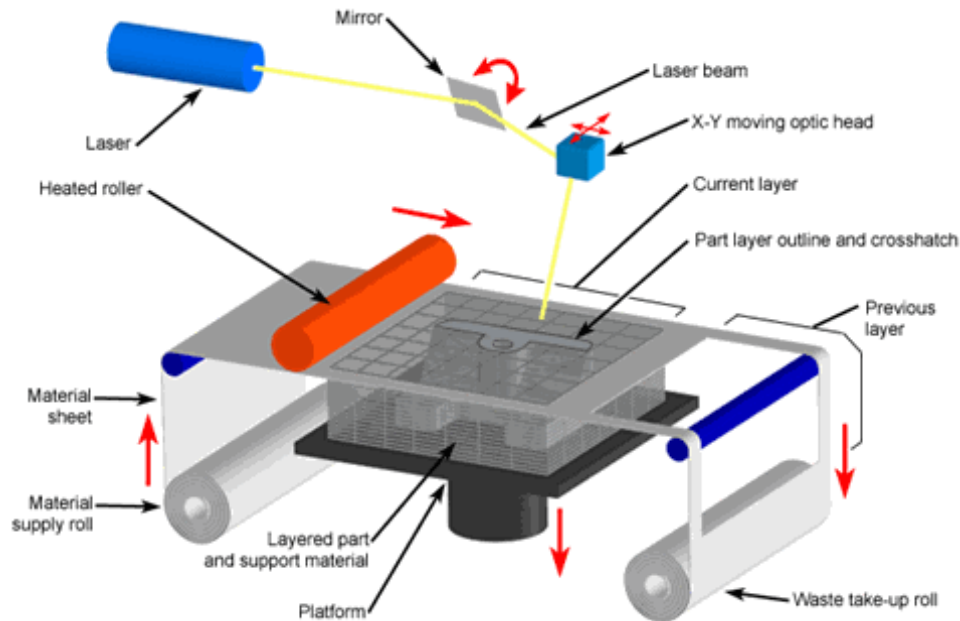
η μέθοδος αυτή, είναι ότι έχουμε μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με άλλες τεχνικές. Ένας αριθμός διεργασιών έχουν αναπτυχθεί με βάση τα υλικά κατασκευής και τις στρατηγικές κοπής. Λόγω της αρχής κατασκευής, μόνο τα εξωτερικά περιγράμματα των τμημάτων είναι κομμένα, και τα φύλλα μπορούν είτε να κόβονται και στη συνέχεια να στοιβάζονται (Form-Then-Bond) ή να στοιβάζονται και στη συνέχεια να κόβονται (Bond-Then-Form). Αυτές οι διαδικασίες μπορούν περαιτέρω να κατηγοριοποιηθούν με βάση το μηχανισμό που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η συγκόλληση μεταξύ των στρωμάτων: α) συγκόλληση ή κόλληση, β) θερμική σύνδεση, γ) σύσφιξη, και (δ) συγκόλληση με υπερήχους.

4.7.1. Συγκόλληση ή Κόλληση (Gluing or Adhesive Bonding).

4.7.1.1. Παραγωγή Αντικειμένων με Συγκόλληση (Laminated Object Manufacturing – LOM).

Μία από τις πρώτες τεχνικές που εμπορευματοποιήθηκε το 1991, βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με τη συγκόλληση λεπτών φύλλων (σε μορφή ρολών χαρτιού) υλικού. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο ρολά χαρτιού όπου το ένα απελευθερώνει υλικό (χαρτί) και το άλλο μαζεύει. Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το χαρτί, ενώ αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και άλλα υλικά (αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά αλλά και λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης). Οι συσκευές LOM λειτουργούν ως εξής: Μια διάταξη τροφοδοσίας τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού, που φέρει επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας (heat-activated glue), πάνω σε μια βάση και κατόπιν ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από αυτό πιέζοντάς το ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν. Στη συνέχεια μια κεφαλή λείζερ CO₂ "κόβει" το σχήμα της διατομής πάνω στο χαρτί και κατόπιν χαράζει μικρές εγκοπές στο υπόλοιπο τμήμα του ώστε να διευκολύνεται η απόσπαση

του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του. Αφού κοπεί το πρώτο στρώμα, η βάση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται από τη διάταξη τροφοδοσίας και κατόπιν η βάση ανέρχεται λίγο ώστε ο θερμαινόμενος κύλινδρος να πιέσει και να κολλήσει το δεύτερο φύλλο στο πρώτο. Ακολουθεί η κοπή της νέας διατομής από την κεφαλή λέιζερ και



Εικόνα 29. Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία «Laminated Object Manufacturing – LOM»

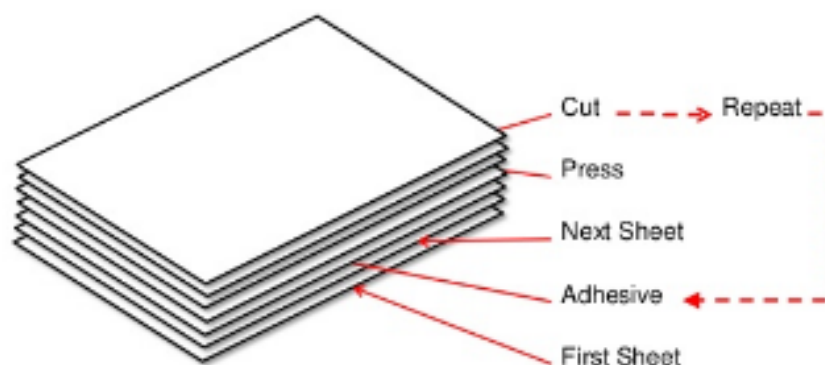
η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου.

Το πάχος του χαρτιού δεν είναι σταθερό. Συνεπώς, ένας αισθητήρας μετράει το πάχος του παρόντος χαρτιού και το μοντέλο κόβεται ανάλογα. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται η επικάλυψη του αντικειμένου με χρώμα ή βερνίκι ώστε να μη προσβάλλεται και παραμορφώνεται από την υγρασία. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου, μοιάζουν με αυτά του ξύλου. Όταν χρησιμοποιούνται ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης το αντικείμενο πρέπει να υποστεί μια διαδικασία "σύντηξης" (sintering) για την αύξηση της αντοχής του.

4.7.1.2. Επιλεκτική Συγκόλληση Εναπόθεσης (Selective Deposition Lamination – SDL).

Στην διαδικασία αυτή πραγματοποιείται επιλεκτική κατάθεση της κόλλας για να συνδέσει τα φύλλα χαρτιού. Μια πολύ υψηλότερης πυκνότητας σταγόνων κόλλας εναποτίθενται στην περιοχή που θα γίνει το τμήμα, και μία πολύ χαμηλότερης πυκνότητας εφαρμόζεται στη γύρω περιοχή που θα χρησιμεύσει ως το υπόστρωμα. Αυτό οδηγεί σε πολύ γρήγορη και εύκολη ανασιαφή του τμήματος από το χαρτί υποστήριξης όταν ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Στην παλιά διαδικασία LOM, όλα ήταν κολλημένα μαζί, συμπεριλαμβανομένου και του υλικού υποστήριξης γύρω από το μοντέλο με την ίδια ένταση. Η εκσιαφή του μοντέλου συχνά είχε αποτέλεσμα την εν μέρει θραύση. Επιπρόσθετα η κόλλα δεν προ εφαρμόζεται στο φύλλο, όπως στην LOM, αλλά εφαρμόζεται μετά την κοπή του προφίλ. Μπορεί να παράγει έγχρωμες 3D εκτυπώσεις. Δεδομένου ότι τα προϊόντα είναι ξύλινα, μπορούν περαιτέρω να επεξεργαστούν χρησιμοποιώντας κάποια τεχνική φινιρίσματος ξύλου.

How It Works Selective Deposition Lamination (SDL)



Εικόνα 30. Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία «Selective Deposition Lamination – SDL»

4.7.2. Θερμική Σύνδεση (Thermal Bonding).

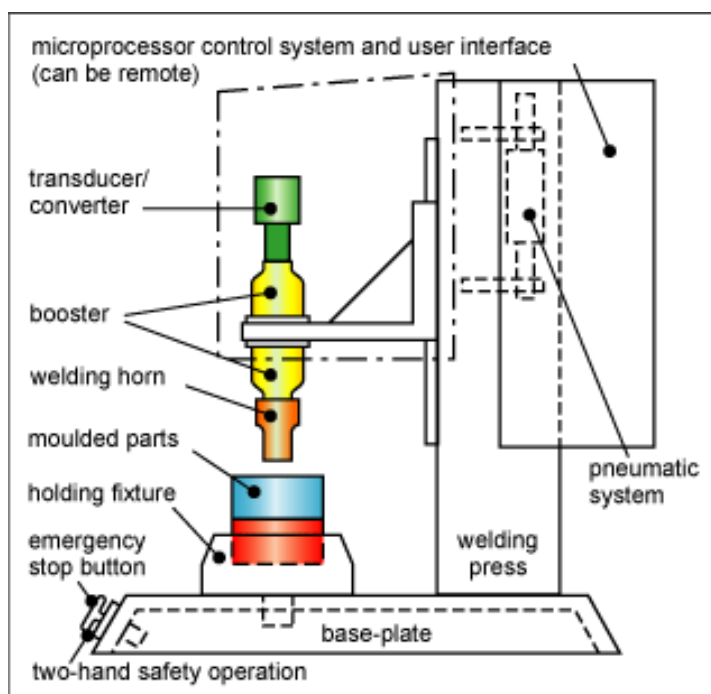
Η προσέγγιση αυτή εφαρμόζεται στη συγκόλληση μεταλλικών φύλλων αλλά δεν προτιμάται λόγω του ότι απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία για την αφαίρεση του υλικού υποστήριξης. Τα φύλλα που έχουν κοπεί με το λέιζερ συναρμολογούνται, συνδέονται μεταξύ τους με μηχανικούς συνδέσμους και εφαρμόζεται θέρμανση του συγκροτήματος ακριβώς πάνω από το σημείο τήξης του υλικού επικάλυψης. Άλλη πρακτική είναι τα φύλλα του χάλυβα να επικαλύπτονται στην πάνω και κάτω πλευρά τους από κράμα χαμηλού σημείου τήξης. Είναι μία αποτελεσματική μέθοδος για τον σχηματισμό σύνθετων μεταλλικών εξαρτημάτων και εργαλείων, ιδίως εκείνων που έχουν εσωτερικές κοιλότητες ή / και κανάλια ψύξης.

4.7.3. Συγκόλληση με Υπερήχους (Ultrasonic Welding).

Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως «Προσθετική μέθοδος παραγωγής με υπερήχους (Ultrasonic Additive Manufacturing – UAM)», «Ενοποίηση με υπερήχους (Ultrasonic Consolidation - UC), και Μεταλλική συγκόλληση με υπερήχους (Ultrasonic metal welding - UMW). Αποτελεί μία υβριδική διαδικασία συγκόλλησης λεπτών φύλλων υλικού συνδυάζοντας μεταλλική ραφή υπερήχων και εργαλειομηχανή κοπής CNC (Computer Numerical Control). Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε άκαμπτη θερμαινόμενη πλάκα και σε θερμοκρασιακό εύρος από θερμοκρασία δωματίου έως 200°C. Λεπτά μεταλλικά φύλλα ξετυλίγονται από ρολό, το οποίο ταλαντώνεται με σταθερή συχνότητα 20 kHz. Μετά την εναπόθεσή του, τοποθετείται δεύτερο δίπλα στο άλλο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως την ολοκλήρωση του στρώματος (layer). Ακολουθεί η εργαλειομηχανή CNC όπου διαμορφώνει το περίγραμμα του στρώματος. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως την ολοκλήρωση του αντικειμένου.

Η λεπτομέρεια στις διαστάσεις και στην επιφάνεια φινιρίσματος δεν εξαρτάται από το πάχος του φύλλου που χρησιμοποιείται, αλλά από την εργαλειομηχανή CNC. Στην

διαδικασία αυτή δεν απαιτείται μεγάλη διάχυση θερμοκρασίας ή τήξη μετάλλου. Η μέγιστη θερμοκρασία επεξεργασίας γενικά δεν είναι μεγαλύτερη από το 50% του σημείου τήξεως των ενωμένων μετάλλων και ως εκ τούτου, οι θερμικές παραμένουσες τάσεις και η θερμική επαγόμενη παραμόρφωση λόγω επαναστερεοποίησης των χυτών μετάλλων, τα οποία είναι σημαντικά ζητήματα στις θερμικές διαδικασίες συγκόλλησης, δεν είναι σημαντικός παράγοντας.



Εικόνα 31. Μέθοδος Sheet Lamination, τεχνολογία «Ultrasonic Welding»

4.8. Φωτοπολυμερισμού Δεξαμενής (Vat Photopolymerisation).

Οι διαδικασίες φωτοπολυμερισμού δεξαμενής κάνουν χρήση υγρής ρητίνης για την κατασκευή εξαρτημάτων. Τα υγρά αυτά είναι φωτοευαίσθητα πολυμερή, τα οποία κατά την ακτινοβολήση, υποβάλλονται σε μία χημική αντίδραση και στερεοποιούνται. Μια δεξαμενή

από υγρό πολυμερές εκτίθεται σε ελεγχόμενο φωτισμό και το εκτεθειμένο υγρό πολυμερές σκληραίνει. Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλογα με το αν σάρωση κατά την ακτινοβολήση γίνεται με τη φιλοσοφία σημείο προς σημείο (Vector scan ή point-wise) ή με τη φιλοσοφία της μάσκας προβολής (Mask projection ή layer-wise).

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία σε αυτήν τη κατηγορία είναι Στερεολιθογραφία (Stereolithography), ενώ άλλες μέθοδοι φωτοπολυμερισμού, είναι το «Συνεχές Υγρό Περιβάλλον Παραγωγής (Continuous Liquid Interface Production - CLIP)», η «Ψηφιακή επεξεργασία φωτός (Digital Light Processing)» και η Ωρίμανση Στερεού εδάφους (Solid Ground Curing - SGC).

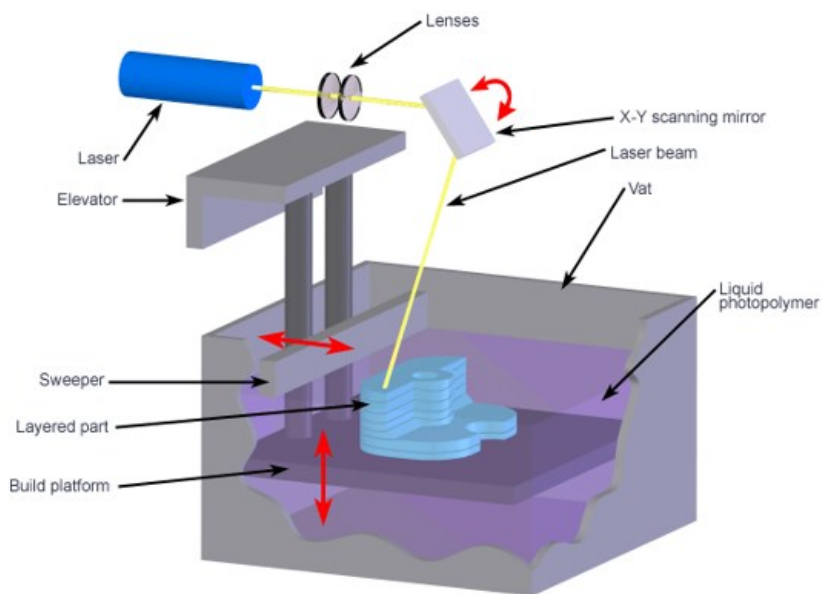
4.8.1. Στερεολιθογραφία (Stereolithography)

Με την τεχνική αυτή κατασκευάζονται τρισδιάστατα αντικείμενα από υγρά φωτοευαίσθητα πολυμερή, τα οποία στερεοποιούνται όταν εκτεθούν σε υπεριώδη ακτινοβολία. Το αντικείμενο κατασκευάζεται πάνω σε μια βάση, η οποία βυθίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει υγρή εποξική, ακρυλική ρητίνη ή ρητίνη βινυλαιθέρα, οι οποίες συνήθως αποτελούν μίγμα δύο συστατικών, των μονομερών και του καταλύτη έναρξης της αντίδρασης (photo initiator). Ο καταλύτης είναι αυτός που ουσιαστικά απορροφά την ενέργεια που αποδίδει η ακτίνα λέιζερ (σε μορφή φωτονίων και όχι θερμότητας), ξεκινώντας έτσι τη διαδικασία πολυμερισμού (σχηματισμός μεγαλύτερων μορίων με σύνδεση μονομερών). Αρχικά, η βάση τοποθετείται σε ελάχιστο βάθος μέσα στο υγρό (ίσο με το πάχος της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί). Κατόπιν μια κεφαλή λέιζερ υπεριωδών ακτινών χαμηλής ισχύος και συχνότητας κινούμενη στους άξονες x και y, διαγράφει το σχήμα της διατομής (όπως προβλέπεται από το ψηφιακό σχέδιο) φωτίζοντας και στερεοποιώντας τις αντίστοιχες περιοχές του στρώματος του πολυμερούς (τα υπόλοιπο τμήμα του οποίου παραμένει υγρό). Κατόπιν η βάση βυθίζεται μέσα στο υγρό πολυμερές κατά το πάχος της

επόμενης διατομής, ενώ ένας κύλινδρος "απλώνει" και οριζοντιώνει το υγρό πάνω στο στερεοποιημένο τμήμα και η κεφαλή λέιζερ χαράσσει τη νέα διατομή πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Στη συνέχεια το μοντέλο τοποθετείται μέσα σε ειδικό φούρνο, όπου αφαιρείται το παγιδευμένο στο εσωτερικό του μοντέλου ρευστό, αφαιρούνται τα τυχόν στηρίγματα του, πλένεται και κατόπιν τοποθετείται σε ένα "φούρνο" υπεριώδων ακτινών για τη τελική σκλήρυνση.

Τα βασικά μέρη της συσκευής στερεολιθογραφίας :

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

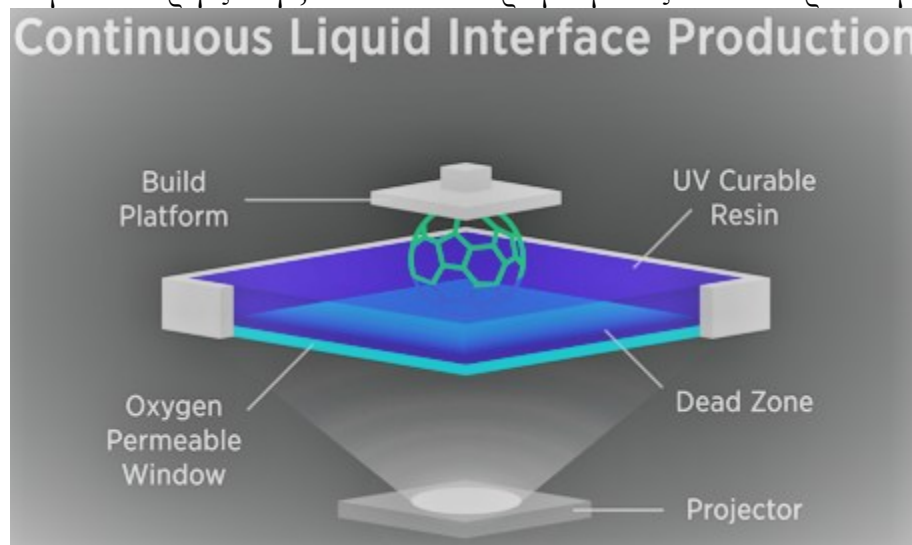


Εικόνα 32. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία «Stereolithography»

Η στερεολιθογραφία παράγει αντικείμενα εξαιρετικής ποιότητας, ακρίβειας και λεπτομέρειας σε τέτοιο βαθμό ώστε τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο να διακρίνουμε εάν το αντικείμενο είναι το τελικό προϊόν και όχι ένα εκτυπωμένο πρωτότυπο. Τα πρωτότυπα που παράγονται από την στερεολιθογραφία, έχουν αυξημένη μηχανική αντοχή και μπορούν να επεξεργασθούν από εργαλειομηχανές C.N.C. Τα εξαρτήματα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κύρια τμήματα καλουπιών με χύτευση και θερμομόρφωσης μετάλλων.

4.8.2. Συνεχές Υγρό Περιβάλλον Παραγωγής (Continuous Liquid Interface Production – CLIP)

Λειτουργεί προβάλλοντας το φως μέσω ενός διαπερατού παραθύρου, που περιέχει οξυγόνο, μέσα σε μία δεξαμενή που περιέχει το φωτοπολυμεριζόμενο υγρό. Η πλατφόρμα δημιουργίας ανέρχεται συνεχώς καθώς το αντικείμενο αναπτύσσεται. Το κλειδί για την διαδικασία είναι η δημιουργία του παραθύρου που είναι διαφανές στο φως και διεισδυτικό από οξυγόνο, σαν ένα φακό επαφής. Ελέγχοντας τη ροή οξυγόνου από το παράθυρο, δημιουργείται μια "νεκρή ζώνη", ένα λεπτό στρώμα μεταξύ του στερεού τμήματος και του



Εικόνα 33. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία «Continuous Liquid Interface Production – CLIP»

υγρού, όπου δεν μπορεί να συμβεί στερεοποίηση. Το υγρό στη συνέχεια ανανεώνεται από την ανοδική κίνηση του αναπτυσσόμενου στερεού μέρους. Αυτό καθιστά δυνατό να αναπτυχθεί χωρίς διακοπή.

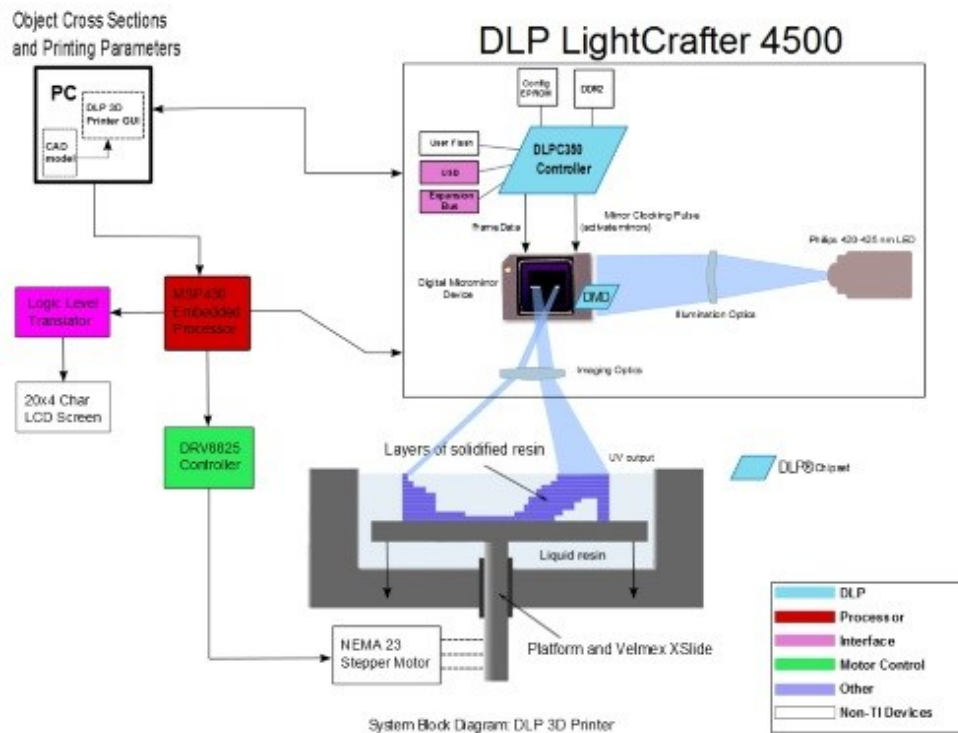
Η διαδικασία αυτή καθιστά δυνατό να εκμεταλλευτεί μια τεράστια γκάμα υλικών για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας. Παράγονται σταθερές και προβλέψιμες, μηχανικές ιδιότητες, δημιουργώντας τμήματα που είναι λεία εξωτερικά και στερεά στο εσωτερικό. Αυτή η προσέγγιση κατασκευάζει δεκάδες εκατοστά σε μέγεθος με ανάλυση κάτω των 100 μm . Επιπλέον, αν και η ταχύτητα παραγωγής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, η CLIP είναι 25 έως 100 φορές ταχύτερη από τα διαθέσιμα εμπορικά PolyJet ή SLA μηχανήματα.

4.8.3. Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (Digital Light Processing- DLP)

Σε αυτή τη διαδικασία, μια δεξαμενή υγρού πολυμερούς εκτίθεται σε φως από ένα προβολέα DLP υπό ασφαλείς συνθήκες φωτισμού. Ο προβολέας DLP εμφανίζει την εικόνα του μοντέλου 3D πάνω στο υγρό πολυμερές. Το εκτεθειμένο υγρό πολυμερές σκληραίνει και η πλάκα κατασκευής κινείται προς τα κάτω και το υγρό πολυμερές για μια ακόμη φορά εκτίθεται στο φως βάσης του ψηφιακού μοντέλου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το μοντέλο 3D είναι πλήρες και η δεξαμενή αποστραγγίζεται από το υγρό, αποκαλύπτοντας το στερεοποιημένο μοντέλο.

Ένα πλεονέκτημα της DLP έναντι της SLA είναι ότι απαιτείται ρηχή δεξαμενή με ρητίνη που διευκολύνει τη διαδικασία, η οποία οδηγεί γενικά σε λιγότερα απόβλητα και χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Η DLP 3D εκτύπωση είναι πολύ γρήγορη διαδικασία λόγω

της ενιαίας στρώσης που δημιουργείται με μία μοναδική ψηφιακή εικόνα και μπορεί να εκτυπώσει αντικείμενα με υψηλότερη ανάλυση.



Εικόνα 34. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία «Digital Light Processing- DLP»

Παρόμοια με την SLA, η DLP χρησιμοποιείται συνήθως για να δημιουργήσει εξαιρετικά λεπτομερή έργα τέχνης, μη λειτουργικά πρωτότυπα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία καλουπιών σε εφαρμογές χύτευσης. Envision Tec Ultra, MiiCraft και Lunavast XG2 είναι παραδείγματα εκτυπωτών DLP.

4.8.4. Σκλήρυνση Στερεού Εδάφους (Solid Ground Curing- SGC).

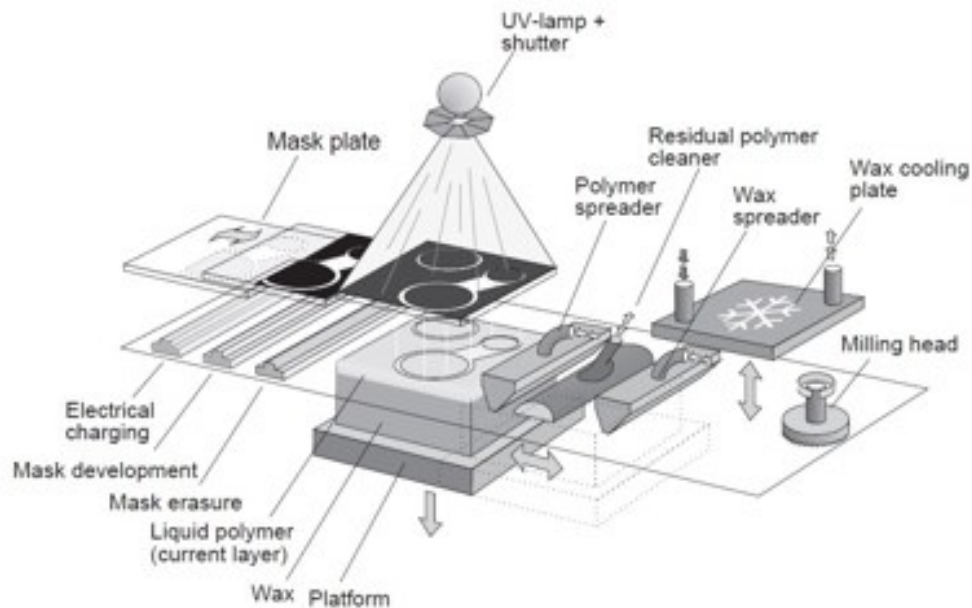
Σε αντίθεση με τη στερεολιθογραφία, στην τεχνική SGC χρησιμοποιείται λαμπτήρας υπεριώδους φωτός όπου οι ακτίνες φωτίζουν το θάλαμο και στερεοποιείται ολόκληρη η στρώση του υλικού και όχι το τμήμα που αντιστοιχεί στη διατομή του. Η διαδικασία ξεκινά

με τον ψεκασμό ενός στρώματος φωτοευαίσθητης ρητίνης πάνω σε μια βάση. Κατόπιν η μηχανή κατασκευάζει μια "φωτομάσκα" (δηλαδή ένα είδος στένσιλ) που διαγράφει τη διατομή του μοντέλου. Το στένσιλ αυτό τυπώνεται πάνω σε μια γυάλινη πλάκα (τοποθετημένη πάνω από τη βάση με τη ρητίνη), με τη χρήση μιας ηλεκτροστατικής διαδικασίας (φορτισμένα ιόντα και ηλεκτροστατικό μελάνι) παρόμοιας με αυτή των φωτοτυπικών μηχανημάτων. Κατόπιν το κλείστρο ανοίγει για 3 δευτερόλεπτα και το στένσιλ εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία η οποία διέρχεται μόνο από τα διαφανή τμήματά του σκληραίνοντας στις αντίστοιχες περιοχές, το στρώμα ρητίνης. Όλες οι περιοχές που εκτέθηκαν στην υπεριώδη ακτινοβολία στερεοποιούνται πλήρως. Μετά τη σκλήρυνση του στρώματος, η μηχανή απομακρύνει την περίσσεια υγρής ρητίνης και ψεκάζει κερί στη θέση της, το οποίο λειτουργεί ως στήριγμα του αντικειμένου κατά την διάρκεια της κατασκευής του. Μία ειδική πλάκα κρύνει και στερεοποιεί το κερί και μια φρεζοκεφαλή καθαρίζει το επιπλέον κερί, ενώ τα γρέζια συλλέγονται με ένα σύστημα κενού. Ακολουθεί λείανση της άνω επιφάνειας του στρώματος ώστε να γίνει επίπεδη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν τα κομμάτι ολοκληρωθεί είναι εγκλωβισμένο μέσα στο κερί, το οποίο απομακρύνεται είτε με τήξη σε φούρνο μικροκυμάτων είτε ξεπλένοντάς το, οπότε και αποκαλύπτεται το πρωτότυπο.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου έχουμε: α) την παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτου, β) τη μη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της ρητίνης, που συλλέγεται από τον απορροφητήρα και από το σύστημα κενού, γ) ότι η υγρή ρητίνη είναι ανθυγιεινή και δ) ότι το σύστημα κενού που καθαρίζει την επιφάνεια, δεν απομακρύνει εντελώς το φωτοπολυμερές υγρό, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται επιφανειακές ανωμαλίες και η κατασκευή να μην είναι ακριβής.

Οι μηχανές SGC, είναι ογκώδεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μεγάλων αντικειμένων. Η SGC αναπτύχθηκε και εμπορευματοποιήθηκε από την Ισραηλινή εταιρία Cubital Ltd., το 1986, υπό το όνομα Solider System. Το σύστημα αυτό της Cubital

μπορεί να πετύχει πάχος επιπέδου ίσο με 0.05-0.15 mm, και μπορεί να κατασκευάσει ένα επίπεδο σε 70 sec.



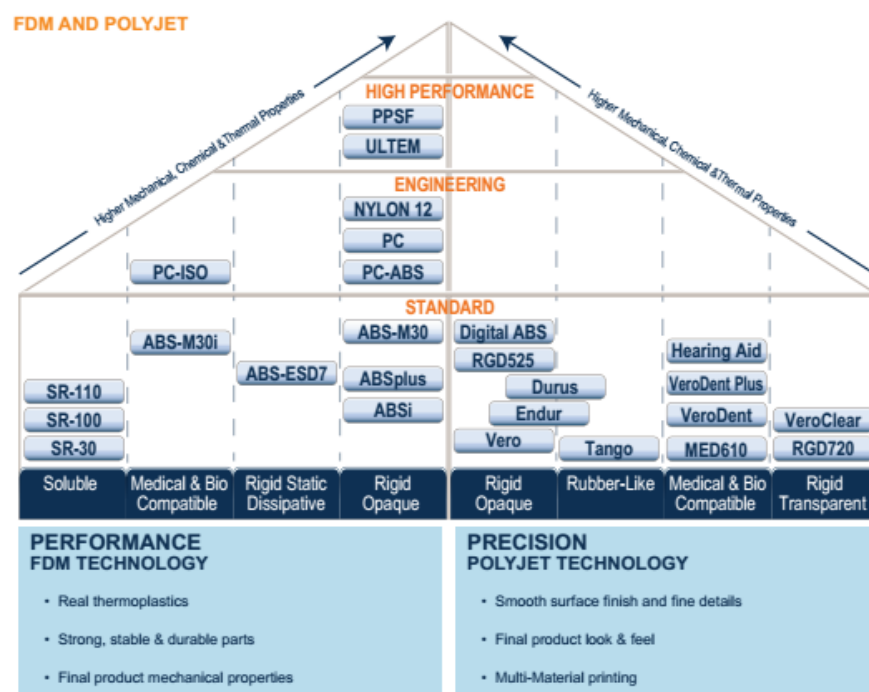
Εικόνα 35. Μέθοδος Vat Photopolymerisation, τεχνολογία « Solid Ground Curing- SGC»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

Τα υλικά κατασκευής.

5.1. Γενικά.

Υπάρχουν πολλά υλικά που χρησιμοποιούν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές για διάφορες εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Για τους κατασκευαστές και τους σχεδιαστές το κατάλληλο υλικό είναι το σημαντικότερο στοιχείο μιας κατασκευής. Ανάλογα τη χρήση για το οποίο προορίζεται το υπό κατασκευή αντικείμενο, επιλέγεται το υλικό με τις κατάλληλες μηχανικές, χημικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντολογικές πληροφορίες και θέματα ανισοτροπίας του κάθε υλικού. Συνήθως οι διάφορες μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνοδεύονται από συλλογή υλικών (Παράρτημα Θ), ενώ οι



Εικόνα 36. Υλικά τεχνολογίας FDM ΚΑΙ POLYJET

κατασκευάστριες εταιρείες, βιομηχανικών εκτυπωτών, συνοδεύουν με τους εκτυπωτές και τα δικά τους υλικά για βέλτιστη απόδοση.

Ανάλογα με τη τεχνολογία της 3D εκτύπωσης πραγματοποιείται η επεξεργασία διαφορετικών υλικών με διαφορετικούς τρόπους για τη δημιουργία του τελικού αντικειμένου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στους 3D εκτυπωτές μπορεί να είναι σε μορφή σκόνης, με τα συσσωματώματα είτε να συγκολλούνται μεταξύ τους με χρήση ειδικής κόλλας που ψεκάζει ο εκτυπωτής, είτε να λιώνουν και να στερεοποιούνται επιλεκτικά. Αλλά μπορούν να είναι σε μορφή φύλλου πριν την επεξεργασία τους. Σε πολλές περιπτώσεις το αναλώσιμο μπορεί να βρίσκεται ή να θερμαίνεται για να βρεθεί σε ημι-στέρεα ή υγρή μορφή, για να έχουν καλύτερη συνοχή μεταξύ τους οι στρώσεις κατά την εκτύπωση. Τέλος αλλά μπορούν να είναι σε υγρή μορφή φωτοευαίσθητα τα οποία στερεοποιούνται επιλεκτικά μετά από ακτινοβολήση.

Δηλαδή ανάλογα με τη τεχνολογία της 3D εκτύπωσης που χρησιμοποιείται, θα επιλεγεί και το υλικό στην κατάλληλη μορφή, η οποία θα είναι σκόνη (Powder), στερεά φύλλα (Solid Sheets), λειωμένο υλικό (Molten), φωτοπολυμερές υγρό (Photopolymer). Η σκόνη (Powder material) μπορεί να είναι από μέταλλο, από γύψο, κεραμικό, πλαστικό ή από συστατικά τροφίμων. Τα στερεά φύλλα (Solid Sheets) μπορεί να είναι από χαρτί, από μέταλλο, κεραμικό ή από πλαστικό και μπορεί να είναι ενιαία ή σκόνη πάνω σε φιλμ-ταινία. Ρευστό ή λειωμένο υλικό (Gel or Molten material) μπορεί να είναι από πλαστικό, ξύλο, μέταλλο, Βιο-συμβατό ή άλλο υλικό και είναι συνήθως σε μορφή νήματος. Το Φωτοπολυμερές υγρό (Photopolymer liquid) είναι από διάφορες ρητίνες με διαφορετικές ιδιότητες.

5.2. Πολυμερή υλικά.

Το Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρόλιο (Acrylonitrile Butadiene Styrene - **ABS**) και το Πολυγαλακτικό Οξύ (Polylactic Acid - **PLA**) είναι από τα πιο διαδεδομένα εμπορικά υλικά. Μπορούν να επεξεργαστούν με ακριβή μετά την εκτύπωση για να παρέχεται ένα γυαλιστερό φινιρίσμα. Κατά την αποθήκευση πρέπει να είναι στεγανός κλεισμένα,



Εικόνα 37. Υλικό Κατασκευής ABS

καθότι απορροφούν την υγρασία. Το **ABS** είναι παράγωγο πετρελαίου και εκλύονται μικρές αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση. Είναι λιγότερο εύθραυστο και πιο όλκιμο με μεγάλη θερμοκρασιακή αντίσταση Συνιστάται για πιο απαιτητικές εφαρμογές και προτυποποίηση μοντέλων. Για να «τυπωθεί» ένα αντικείμενο απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες (Θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ 220- 235 °C) από το PLA (Θερμοκρασία ακροφυσίου μεταξύ 185 - 210 °C). Σε αντίθεση με το ABS, το **PLA** είναι βιοδιασπώμενο, προέρχεται από την επεξεργασία φυτικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων καλαμπόκι, πατάτες ή ζαχαρότευτλα και θεωρείται υλικό πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Υποκατηγορίες του PLA, είναι τα **Soft PLA** ή το **Flex EcoPLA** τα οποία είναι πιο εύκαμπτα και ενεργούν σαν λάστιχο και το **PolyMax PLA** το οποίο είναι ανασχεδιασμένο με εξαιρετική μηχανική αντοχή.

Η Πολυβινυλική αλκοόλη (Polyvinyl Acetate – **PVA**), καθώς και το High Impact Polystyrene – (**HIPS**) είναι υδροδιαλυτά υλικά και χρησιμοποιούνται στις κατασκευές ως υλικό υποστήριξης, κατά την εκτύπωση, στα σημεία εκτύπωσης των αντικειμένων με μεγάλες κλίσεις. Το PVA είναι μη τοξικό και βιοδιασπώμενο μόλις διαλυθεί στο νερό. Συνήθως διαλύεται σε κρύο νερό αλλά η διαδικασία επιταχύνεται στο ζεστό νερό. Το HIPS το υλικό είναι διαδεδομένο στη βιομηχανία τροφίμων και τη συσκευασία, διαλύεται σε ένα άχρωμο υγρό υδρογονάνθρακα λιμονένιο (hydrocarbon Limonene)

Το νάιλον (**Nylon ή Polyamide- PA**) Είναι γνωστό για τη μεγάλη βιοσυμβατότητά του, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική βιομηχανία. Η πλειονότητα των αντικαταστάσεων χόνδρου και ενός αρκετά μεγάλου αριθμού των προσθετικών μερών, γίνονται με τη χρήση αυτού του υλικού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι νάιλον που χρησιμοποιούνται στην 3D εκτύπωση όπως το **Nylon 618**, το οποίο έχει φυσικό λευκό χρώμα, το **Nylon 645**, το οποίο είναι αρκετά διαυγές, αλλά δύσκολο στην μεταχείρισή του και το **Nylon PA6Polymer (Polyamide 6)** το οποίο είναι πολύ ανθεκτικό υλικό, με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, στιλπνότητα και ελαστικότητα και χρησιμοποιείται για την εκτύπωση εξαιρετικά στιβαρών εξαρτημάτων.

Το **NylonX** είναι και αυτό ένας τύπος του νάιλον που έχει προσθήκη μικρο ινών άνθρακα (carbon) για μεγαλύτερη ακαμψία. Άλλα ανθεκτικά υλικά στη κατηγορία αυτή είναι το **Carbon**, το **Kevlar** και το **Fiberglass**.

Το **Polyether ether ketone (Peek)** είναι ελαφρύ θερμοπλαστικό πολυμερές και ανήκει στην κατηγορία των βιομηχανικών υλικών με τη μεγαλύτερη χημική, θερμοκρασιακή αντίσταση, καθώς και αντίσταση κατά της υγρασίας.

Το **Alumide** κατασκευάζεται από ένα μείγμα πολυαμιδίου (ναίλον) και ένα πολύ χαμηλό ποσοστό γκρι σκόνης αλουμινίου. Το Alumide είναι ένα ισχυρό, κάπως άκαμπτο πλαστικό υλικό που μπορεί να αντέξει μικρές κρούσεις και να αντισταθεί σε κάποια πίεση ενώ είναι λυγισμένο. Η επιφάνεια έχει μια αμμώδη, κοκκώδη εμφάνιση και είναι ελαφρώς πορώδης.

Το Πολυαιθυλένιο (Polyethylene terephthalate - **PET**) (γνωστό από τη χρήση του στα πλαστικά μπουκάλια) είναι μια δημοφιλής εναλλακτική λύση 3D εκτύπωσης νήματος, λόγω του ότι συνδυάζει την ευκολία χρήσης του PLA με τη δύναμη και αντοχή του ABS. Είναι εγκεκριμένο από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) για δοχεία τροφίμων

και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατανάλωση τροφίμων. Σε αντίθεση με το ABS δε στρεβλώνει και δεν παράγει οσμές ή αναθυμιάσεις κατά την εκτύπωση. Δεν είναι βιοδιασπώμενο, αλλά είναι 100% ανακτήσιμο. Είναι επίσης εύκολα διαχειρίσιμο στην εκτύπωση προσφέροντας κάποια χαρακτηριστικά στην απόδοση εκτύπωσης παρόμοια με το PLA. Στην αρχική του κατάσταση



Εικόνα 38. Υλικό Κατασκευής PET

είναι ένα άχρωμο και πεντακάθαρο υλικό αλλά όταν θερμανθεί ή ψυχθεί το υλικό αλλάζει τη διαφάνειά του. Το υλικό έχει περισσότερο κρυσταλλική δομή όταν κρύνει αργά μετά την εκτύπωση. Το νήμα είναι αρκετά σκληρό και ανθεκτικό στα χτυπήματα, έτσι ώστε να το καθιστά ιδανικό για ελαφριά αντικείμενα. Το PET είναι η τέλεια επιλογή για θήκες τηλεφώνου ή μηχανικά μέρη που απαιτούν ελαστικότητα και αντίσταση κρούσης ή ανθεκτικότητα. Υποκατηγορίες του PET αποτελούν τα **PETT/ G / XT / N-Vent**.



Εικόνα 39. Υλικό Κατασκευής TPE

Το θερμοπλαστικό ελαστομερές (thermoplastic elastomer – **TPE**), η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (Thermoplastic Polyurethane - **TPU**) και το θερμοπλαστικό συμπολυεστέρα (Thermoplastic copolyester - **TPC**) είναι εύκαμπτα υλικά και δρουν σαν εύκαμπτο καουτσούκ (Zonder & Sella, 2013).

Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για πώματα, ζώνες, ελατήρια, θήκες τηλεφώνου, και πολλά άλλα. Μπορούν να δημιουργήσουν 3D εκτυπώσεις που θα έχουν τις ιδιότητες ενός μαλακού ελαστικού, γεγονός που τα καθιστά ακόμη πιο ελαστικά από το Soft PLA.

Το **NinjaFlex** και το **FilaFlex** είναι άλλα εύκαμπτα υλικά, έχουν θερμοκρασία

εκτύπωσης που κυμαίνεται από 220 έως 230 °C, είναι μη τοξικά και ανθεκτικά σε ακετόνη, καύσιμα και διαλυτικά. Το **PCTPE** (Plasticized Copolyamide TPE) είναι ένας συνδυασμός από νάυλον και TPE. Όταν εκτυπωθεί, είναι εύκαμπτο σαν κανονικό TPE, αλλά το προστιθέμενο Nylon προσφέρει μεγαλύτερη αντοχή. Μπορεί επίσης να βαφεί με οποιοδήποτε χρώμα βάσεως οξέως. Το **FPE** (Flexible PolyEster) είναι και αυτό εύκαμπτο υλικό μείγματος άκαμπτου και μαλακού πολυμερούς με θερμοκρασία εκτύπωσης που κυμαίνεται από 205 έως 250 °C.

Υποκατηγορίες του ABS, είναι το Polycarbonate - **PC/ABS**. Το Πολυκαρμπονικό (Polycarbonate – **PC**) είναι ένα εξαιρετικά ισχυρό, ανθεκτικό στα χτυπήματα θερμοπλαστικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, στην ιατρική βιομηχανικές εφαρμογές σε οικιακές συσκευές, όπως τηλεοράσεις, περιβλήματα υπολογιστή, ακόμη και σε παιδικά παιχνίδια. Έχει μεγάλες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή στη θερμότητα καθώς και τη δεύτερη υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους εξώθησης υλικών. Το υλικό είναι επίσης βιοσυμβατό και μπορεί να είναι αποστειρωμένο. Γι' αυτό είναι εξαιρετικά δημοφιλής για τις ανάγκες πρωτοτύπων, σε λειτουργικές δοκιμές, εργαλείων και σύνθετα έργα. Το υλικό πρέπει να εξωθηθεί σε θερμοκρασία πάνω από 300 °C.

Το ξύλινα υλικά όπως το **LayWood** (LAYWOOD3), το **Woodfill** και το **Timberfill** κατασκευάζονται από ένα μείγμα PLA και ανακυκλωμένο ξύλο, έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά εκτύπωσης με το PLA, αλλά εμφάνιση παρόμοια με το ξύλο. Μπορούν να κοπούν, να τριφτούν και να βαφτούν δημιουργώντας φυσικά αντικείμενα για τη διακόσμηση σπιτιού, και για άλλες εφαρμογές. Επιφανειακά διαθέτουν χαρακτηριστικά



Εικόνα 40. Υλικό Κατασκευής
LayWood

παρόμοια με κόκκους ξύλου και με την αυξομείωση της θερμοκρασίας εξώθησης δημιουργούνται οι αποχρώσεις του ξύλου.



Εικόνα 41. Υλικό Κατασκευής Laybrick

Το **Laybrick** αναπτύχθηκε για να μιμηθεί τον αμμόλιθο. Περιέχει ένα μείγμα υπερ-λεπτής αλεσμένης κιμωλίας και co-polyesters για να παράγει μια επιφάνεια αμμόλιθου, όπως συναντάται στα αρχιτεκτονικά μοντέλα, γλυπτά, ή τοπία. Δεν παρουσιάζει πλαστική αίσθηση και μπορούν να εκτυπωθούν με λεία ή πολύ τραχιά επιφανειακά χαρακτηριστικά, ανάλογα με τη ρύθμιση της

θερμοκρασίας εξώθησης. Μόλις ολοκληρωθεί η εκτύπωση, το αντικείμενο παραμένει για 2-4 ώρες για επιπλέον σκλήρυνση. Η επιφάνεια του μπορεί στη συνέχεια να χρωματιστεί ή να σφυρηλατηθεί ώστε να δημιουργηθούν μια σειρά από προϊόντα απομίμησης πέτρας.

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

Το Πολυπροπυλένιο (Polypropylene - **PP**) έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής. Ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών της καλής ευελιξίας, της καλής χημικής αντίστασης, και της ασφαλούς χρήσης για τρόφιμα κάνουν αυτό το υλικό μια εξαιρετική επιλογή για διάφορα δοχεία, συσκευασίες, καπάκια και άλλα πολλά.

Το πολυοξυμεθυλενίου (**POM, Acetal**), επίσης γνωστή ως ακετάλη (Acetal) ή πολυακετάλη (Polyacetal), είναι ένα πλαστικό για βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν τμήματα ακρίβειας. Το φερμουάρ είναι το πιο πιθανό να γίνεται από POM πλαστικό. Λόγω της ακαμψία του, το χαμηλό συντελεστή τριβής, την εξαιρετική ελαστικότητα και αντοχή στη

φθορά, είναι εξαιρετικό υλικό για εξαρτήματα με μηχανικές λειτουργίες, όπως γρανάζια και ρουλεμάν.

5.3. Διάφορα Υλικά.

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

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

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

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



Εικόνα 42. Υλικό Κατασκευής Full color

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

5.4. Μεταλλικά υλικά.

Το **καθαρό τιτάνιο (Ti64 ή TiAl4V)** είναι ένα από τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μέταλλα για 3D εκτύπωση και είναι σίγουρα ένα από τα πιο ευέλικτα, δεδομένου ότι είναι ισχυρό και ελαφρύ. Χρησιμοποιείται στον ιατρικό κλάδο (για εξατομικευμένα προσθετικά μέλη) και στην αεροδιαστημική/ αυτοκινητοβιομηχανία/ βιομηχανία εργαλείων (για ανταλλακτικά και πρωτότυπα). Το μόνο μειονέκτημα είναι ότι είναι πολύ δραστικό, που σημαίνει ότι μπορεί εύκολα να εκραγεί όταν είναι σε μορφή σκόνης. Γι' αυτό η 3D εκτύπωση πρέπει να πραγματοποιείται σε κενό ή σε ατμόσφαιρα αργού αερίου.

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

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

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

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

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

5.5. Ρητίνες.

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

Η **Ρητίνη Γενικού Σκοπού** προσομοιώνει τα βασικά πλαστικά στη διάφανη κατάσταση ή σε διάφορα χρώματα, αλλά είναι κάπως εύθραυστα. Η **Ανθεκτική Ρητίνη** είναι σχεδιασμένη για υψηλή αντοχή στη φθορά, με αποτέλεσμα τα μέρη να μπορούν να λυγίσουν χωρίς να σπάσουν. Η ακαμψία και η υψηλή αντοχή στην κρούση, είναι παρόμοια με αυτή του πολυπροπυλενίου (PP) και έχει ομαλό, γυαλιστερό φινιρίσμα, καθιστώντας το κατάλληλο για την προτυποποίηση ή τη συσκευασία. Η **Σκληρή Ρητίνη** είναι η προσομοίωση του πλαστικού ABS, με συγκρίσιμη αντοχή στον εφελκυσμό. Είναι ιδανική λύση για λειτουργικά πρωτότυπα και συναρμολογήσεις. Η **Υψηλής Θερμοκρασίας Ρητίνη** μπορεί να αντέξει υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές, όπως παραγωγή καλουπιών για χύτευση, για θερμικές δοκιμές όπως ροή στα κανάλια που έχουν σχεδιαστεί για ζεστό αέρα ή υγρά και δημιουργία εργαλείων για θερμοδιαμόρφωση. Η **χυτεύσιμη (Castable) Ρητίνη** καίγεται καθαρά χωρίς υπόλειμμα και αποτυπώνει ευκρινείς, ακριβείς λεπτομέρειες και λείες επιφάνειες. Τα κοσμηματοπωλεία και οι σχεδιαστές μπορούν να οδηγηθούν απ' ευθείας από μια 3D σχεδίαση σε ένα μοντέλο. Η **Εύκαμπτη Ρητίνη** είναι εξαιρετικό υλικό για προσομοίωση καουτσούκ με διαφορετικά επίπεδα σκληρότητας και αντίσταση στο σχίσιμο. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαρτημάτων που απαιτείται να συμπιεστούν και να λυγίσουν. Η **Βιοσυμβατή Ρητίνη** στοχεύει στην οδοντιατρική βιομηχανία αλλά και στην ιατρική. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή οδοντικών προϊόντων, χειρουργικών οδηγών για τις επεμβάσεις και για ακουστικά βαρηκοΐας. Η **Κεραμική Ρητίνη**

είναι ένα σύνθετο υλικό κεραμικού-φωτοπολυμερούς, κατά το οποίο το φωτοπολυμερές δεσμεύει τα κεραμικά σωματίδια. Μετά την εκτύπωση οδηγείται σε κλίβανο για να ολοκληρωθεί η κατασκευή. Υπάρχει τέλος η **Ρητίνη αντίδρασης στο Φως της Ημέρας**, η οποία δεν αντιδρά στο υπεριώδες φως, αλλά στο συνηθισμένο φως της ημέρας, περιορίζοντας έτσι την ανάγκη για στήριξη σε μια πηγή φωτός UV κατά την 3D εκτύπωση. Αντ' αυτού, μια οθόνη LCD μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μειώνοντας ενδεχομένως το κόστος της DLP 3D εκτύπωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

Η θετική και η αρνητική πλευρά.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση Αντιπροσωπεύει από την μία την όδευση της κοινωνίας προς το πλεονεκτήματα, αλλά παράλληλα πιθανές αρνητικές επιπτώσεις.



Εικόνα 43. Θετικά & αρνητικά

παρουσιάζει δύο πλευρές. μεταμόρφωση της τεχνολογίας και την καλύτερο με πολλά δεν μπορούν να αγνοηθούν και οι

6.1. Πλεονεκτήματα.

Εξατομίκευση: Η κατασκευή ενός προϊόντος με 3D εκτύπωση, δίνει την δυνατότητα του σχεδιασμού μοναδικών προϊόντων, με αισθητικά χαρακτηριστικά τα οποία έχουν επιλεγεί ώστε να ταιριάζουν απόλυτα στον πελάτη.

Σχεδιασμός χωρίς όρια. Μέχρι πρότινος μπορούσαν να σχεδιαστούν προς εκτύπωση πεπερασμένα σχήματα. Οι παραδοσιακές μηχανές κατεργασίας είναι λιγότερο ευέλικτες και έχουν περιορισμένες δυνατότητες. Η 3D εκτύπωση καταρρίπτει αυτά τα όρια, εκτυπώνοντας αντικείμενα με σύνθετες γεωμετρικές μορφές.

Βελτιστοποίηση σχεδίασης. Μπορεί κατά την σχεδίαση να υπολογισθεί η τάση με δεδομένες φορτίσεις, δηλ. να γίνει μελέτη αντοχής και τροποποιηθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Έτσι το τελικό προϊόν της 3D εκτύπωσης μπορεί να είναι μέχρι και 60% ελαφρύτερο από το προϊόν μια εργαλειομηχανής με τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες. Αυτό αυτομάτως το κάνει και πιο ανταγωνιστικό όταν η μείωση του βάρους είναι απαίτηση και οικονομικότερο λόγω μειωμένης χρήσης υλικού.

Απλοποίηση της πολυπλοκότητας. Ένας 3D εκτυπωτής χρειάζεται ένα αρχείο σχεδίου για να ξεκινήσει την διαδικασία. Απαιτεί λοιπόν λιγότερες ικανότητες χειρισμού από τις κοινές μεθόδους παραγωγής. Έτσι η παραγωγή χωρίς ιδιαίτερες δεξιότητες μπορεί να προσφέρει νέα μοντέλα και τρόπους παραγωγής για ανθρώπους σε απομακρυσμένα περιβάλλοντα και σε κρίσιμες συνθήκες (Lipson & Kurman, 2013).

Αποθέματα-Αποθήκευση-Μεταφορά. Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής μπορεί να εκτυπώσει απευθείας όταν και όπου χρειάζεται. Η δυνατότητα της επιτόπου παραγωγής μειώνει την ανάγκη των εταιρειών να διατηρούν αποθήκες και απόθεμα εμπορευμάτων. Οι 3D εκτυπωτές προσφέρουν στις εταιρείες την δυνατότητα να ανταποκρίνονται άμεσα στις ανάγκες των πελατών. Μειώνεται λοιπόν το κόστος διατήρησης αποθέματος, της αποθήκευσης και της μεταφοράς των αντικειμένων σε μεγάλες αποστάσεις, μειώνοντας ενδεχομένως και το χρόνο.

Φορητή παραγωγή με εύκολη πρόσβαση. Οι 3D εκτυπωτές μπορούν να κατασκευάσουν αντικείμενα σε τόσο μέγεθος όσο είναι η επιφάνεια εκτύπωσης τους (print bed). Αυτό καθιστά τους εκτυπωτές προσβάσιμους σχεδόν οπουδήποτε, όπως στο σπίτι, στο γραφείο, στις επιχειρήσεις, στα νοσοκομεία και στα σχολεία.

Αύξηση του ρυθμού της παραγωγής. Στην παραδοσιακή μέθοδο παραγωγής, όσο πιο πολύπλοκο ήταν ένα αντικείμενο, διαρκούσε και περισσότερο, π.χ. έως και δύο ή περισσότερες ημέρες έναντι των μερικών ωρών που απαιτεί η 3D εκτύπωση. Κατασκευάζοντας ένα σύνθετο σχήμα, δεν απαιτεί μεγαλύτερο κόστος από την εκτύπωση ενός απλού αντικειμένου.

Μηδενική απαίτηση συναρμολόγησης. Η μαζική παραγωγή στηρίζεται στην συναρμολόγηση. Όσο περισσότερα τμήματα περιέχει ένα προϊόν, τόσο πιο πολύ χρόνο θα διαρκέσει η διαδικασία του και θα είναι πολύ ακριβή η ολοκλήρωση του. Εκτυπώνοντας μοντέλα επίπεδο με επίπεδο, ένας 3D εκτυπωτής μπορεί να κατασκευάσει ένα αντικείμενο και

να συνδέσει τα συμπλεκόμενα τμήματα του στον ίδιο χρόνο χωρίς περαιτέρω συναρμολόγηση. Έτσι μειώνεται το κόστος και ο χρόνος της εργασίας και της μεταφοράς στις αλυσίδες εφοδιασμού.

Μείωση αποβλήτων - απώλειας υλικού ανά προϊόν. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές αποβάλλουν πολύ λιγότερα απόβλητα και σε ελεγχόμενο περιβάλλον σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές μηχανές, αφαιρετικής μεθόδου παραγωγής, όπου ένα μεγάλο ποσοστό ιδιαίτερα των μεταλλικών υλικών μολύνει το έδαφος και τον χώρο εργασίας π.χ. για ορισμένους κατασκευαστές αεροσκαφών το 90% του υλικού αποτελεί σπατάλη. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να επιτευχθούν μικρότερες επιβαρύνσεις στο περιβάλλον και για αυτό η 3D εκτύπωση αποτελεί την πιο φιλική προς το περιβάλλον μέθοδο παραγωγής.

Μείωση του κόστους παραγωγής. Πέραν των ανωτέρω που αναφέρθηκαν, σχετικά με τη μείωση του κόστους παραγωγής προστίθενται τα παρακάτω:

- Γίνεται πιο συμφέρον να διαθέτει κανείς δωρεάν στο διαδίκτυο το προϊόν της πνευματικής εργασίας του ή της εταιρείας του, ένα ηλεκτρονικό αρχείο, δηλαδή μερικά bytes, με αντάλλαγμα την ελεύθερη πρόσβαση στα ηλεκτρονικά αρχεία που παράγουν άλλες ομάδες, κοινότητες ή εταιρείες. Ηλεκτρονικά αρχεία τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε υλικά αντικείμενα πολύ απλά και πολύ φθηνά, με το πάτημα ενός κουμπιού χωρίς επιπλέον κόστος επανασχεδίασης.
- Εφόσον δεν χτίζεται η αφιερωμένη γραμμή παραγωγής η συμμετοχή εργατικού δυναμικού μικραίνει.
- Επιπλέον δεν υπάρχει καμία ανάγκη να γίνει προμήθεια επιπρόσθετου εξοπλισμού στις μηχανές σε περίπτωση αλλαγής αντικειμένου εκτύπωσης και επιπρόσθετα αφαιρείται και το κόστος που συνδέεται με την επανεκπαίδευση των μηχανικών που χειρίζονται τα μηχανήματα.

Συμπερασματικά βοηθά τις εταιρείες να αποταμιεύσουν έως και το 70 % του κόστους παραγωγής τους. Έτσι οι επιχειρήσεις γίνονται πιο προοδευτικές και κερδοφόρες.

Μεγάλη παλέτα υλικών. Η μίξη διαφορετικών υλικών για τη κατασκευή ενός προϊόντος αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση, μπορεί κανείς να αναμίξει δύο ή περισσότερα υλικά και να προσδώσει στο αντικείμενο νέες ιδιότητες και ποικίλες συμπεριφορές. Επίσης μπορεί να εξαλείψει τους περιορισμούς των υλικών λόγω του υψηλού κόστους που απαιτείται για τον συνδυασμό τους ως προς τις χημικές και φυσικές τους ιδιότητες στις μαζικές μεθόδους παραγωγής. Έτσι πολλές εταιρείες παρέχουν τώρα δεκάδες διαφορετικά υλικά με μοναδικά φινιρίσματα που δημιουργούν την αίσθηση και την εμφάνιση του γυαλιού, κεραμικών ή μεταλλικών υλικών με μια πληθώρα ιδιότητες.

Ακριβής αντιγραφή μοντέλων. Η δυνατότητα αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering), όπως σάρωσης (scanning) μαζί με την 3D εκτύπωση οδηγούν στη σύνδεση ανάμεσα στο φυσικό κόσμο και το ψηφιακό περιβάλλον. Δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο ακριβή αντίγραφα φυσικών μοντέλων και σχημάτων και επιπρόσθετα μπορούν να βελτιωθούν τα πρωτότυπα ή να γίνει εκτύπωση εκλιπόντων τμημάτων (Lipson, 2016).

6.1.1. Πλεονεκτήματα από τη χρήση πρωτοτύπων

Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει να καινοτομήσει και να μηχανοποιήσει γρηγορότερα. Τα πρωτότυπα προσφέρουν μια εντυπωσιακή παρουσίαση είτε είναι ένα νέο καταναλωτικό προϊόν είτε μια αρχιτεκτονική μακέτα. Ακόμα και η κατανόηση πολύπλοκων εννοιών γίνεται ταχύτερη και ευκολότερη. Είναι ένα πραγματικό εργαλείο για την προώθηση του σχεδίου στον πελάτη και την έρευνα του αντίκτυπου που έχει η παρουσίαση αυτού, σε ένα ευρύ κοινό.

Η δυνατότητα της 3D εκτύπωσης μιας ιδέας την ίδια ημέρα που έχει σχεδιαστεί

συντομεύει μια διαδικασία ανάπτυξης, η οποία θα μπορούσε να ήταν μήνες, σε μερικές ημέρες, βοηθώντας τις εταιρείες να είναι ένα βήμα μπροστά στον ανταγωνισμό. Οι σχεδιαστές μπορούν να βελτιώσουν άμεσα τα σχέδιά τους πριν την παραγωγή και να ελαχιστοποιήσουν τα σφάλματα, μειώνοντας τον κίνδυνο αποτυχίας. Οι προμηθευτές και οι εταίροι μπορούν να συμμετέχουν νωρίτερα στην διαδικασία ανάπτυξης του τελικού προϊόντος έχοντας σαφή εικόνα και αίσθηση του τελικού προϊόντος, που πρόκειται να παραδοθεί.

Επιπλέον μειώνεται αισθητά ο χρόνος του κύκλου σχεδιασμού και το τελικό προϊόν εισάγεται πιο γρήγορα στην αγορά. Αυξάνεται η αποδοτικότητα και η δημιουργικότητα καθώς υλοποιούνται περισσότερα σχέδια και πειράματα με νέα προϊόντα.

6.2. Μειονεκτήματα.

Ασύμφορη για μαζική παραγωγή. Δεδομένου ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση δημιουργεί αντίγραφα των τρισδιάστατων αρχείων ένα προς ένα, οι οικονομίες κλίμακας δεν μπορούν να γίνουν όταν παράγεται το ίδιο αρχείο για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα: αυτό είναι σαφώς διαφορετικό από τις μεθόδους γραμμής παραγωγής που στοχεύουν στην παραγωγή των εκατομμυρίων των μονάδων των ίδιων αντικειμένων.

Αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Κατά την τήξη του υλικού με θερμότητα ή λέιζερ, οι 3D εκτυπωτές καταναλώνουν περίπου 50 έως 100 φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από την χύτευση με έγχυση για να κάνει ένα στοιχείο του ίδιου βάρους, σύμφωνα με έρευνα από το Πανεπιστήμιο του Loughborough. Το 2009, η έρευνα, σε βιομηχανικό πρόγραμμα του MIT έδειξε ότι η τεχνολογία σύντηξης μεταλλικής σκόνης χρησιμοποιεί εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια από την παραδοσιακή χύτευση ή μεταλλοτεχνία. Εξαιτίας αυτού, οι 3D εκτυπωτές είναι καλύτεροι για μικρές σειρές παρτίδων. Οι βιομηχανικού μεγέθους 3D εκτυπωτές δεν μπορούν να είναι η απάντηση στην μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας με αυτή των μηχανών που λειτουργούν με καύση άνθρακα.

Κίνδυνοι και ανθυγιεινές εκπομπές αερίων. Οι 3D εκτυπωτές μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία όταν χρησιμοποιούνται στο σπίτι, σύμφωνα με τους ερευνητές στο Ινστιτούτου Τεχνολογίας του Illinois. Οι εκπομπές από τους επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές είναι παρόμοιες με το κάψιμο ενός τσιγάρου ή το μαγείρεμα με γκάζι. Η μελέτη του 2013 ήταν η πρώτη για να μετρήσει αυτές τις αέριες εκπομπές σωματιδίων από τους επιτραπέζιους εκτυπωτές 3D. Θερμαίνοντας το πλαστικό και εκτυπώνοντας μικρά μοντέλα, τα μηχανήματα που χρησιμοποιούν PLA νήμα εκπέμπουν 20 δισεκατομμύρια υπέρλεπτα λεπτά σωματίδια ανά λεπτό, ενώ όταν χρησιμοποιούν το ABS εκπέμπουν έως 200 δισεκατομμύρια σωματίδια ανά λεπτό. Η πραγματική επίδραση στην υγεία σύμφωνα με την μελέτη έχει ως αποτέλεσμα τα υπέρλεπτα σωματίδια (UFP) να τοποθετούνται πολύ εύκολα στους πνεύμονες ενώ μπορούν να καταλήξουν και στον εγκέφαλο μέσω του οσφρητικού νεύρου. Λόγω της μεγάλης επιφάνειας την οποία καταλαμβάνουν τα UFP, μπορούν να απορροφήσουν και άλλες βλαβερές ουσίες με αποτέλεσμα με τη μακροχρόνια χρήση 3D εκτυπωτών, να υπάρχει πιθανότητα παρουσίασης άσθματος, καρδιακής ανακοπής, εγκεφαλικού επεισοδίου ή ακόμα και το ενδεχόμενο θανάτου. Οι εκτυπωτές FDM τρέχουν κινδύνους ασφάλειας διότι μπορούν να φτάσουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες αλλά και οι εκτυπωτές που βασίζονται σε σκόνη είναι βρώμικοι και παράγουν απόβλητα. Η μελέτη καταλήγει ότι όποιος χρησιμοποιεί συνεχώς έναν 3D εκτυπωτή, θα πρέπει να φοράει την κατάλληλη ενδυμασία και να είναι σίγουρος ότι ο χώρος που βρίσκεται εξερίζεται αρκετά καλά.

Εξάρτηση από πλαστικές ύλες. Ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά κινήματα στην πρόσφατη ιστορία είναι να μειωθεί η εξάρτηση από τις πλαστικές ύλες όπως οι σακούλες των παντοπωλείων, τα μπουκάλια νερού, τα αντικείμενα του σπιτιού που μπορούν να γίνουν από ανακυκλώσιμα υλικά αντ' αυτών. Οι πιο δημοφιλείς και φθηνότεροι 3D εκτυπωτές χρησιμοποιούν πλαστικό νήμα. Επιπρόσθετα αν και η χρήση των πρώτων υλών είναι μειωμένη καθώς και η ποσότητα των αποβλήτων εν γένει, οι μηχανές εξακολουθούν να αφήνουν αχρησιμοποίητο - υπερβολικό πλαστικό στις επιφάνειες εκτύπωσης. Το PLA είναι

βιοαποικοδομήσιμο, αλλά το ABS εξακολουθεί να είναι το πιο συχνό χρησιμοποιούμενο είδος πλαστικού. Εάν η 3D εκτύπωση πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανίες, αυτό το προϊόν ή άλλο ανακυκλώσιμο πλαστικό πρέπει να ξαναχρησιμοποιηθεί.

Παραβίαση δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Με αυτή τη τεχνολογία μπορεί να γίνει κατάχρηση με αποτέλεσμα την άνοδο πολλών ηθικών ανησυχιών. Όπως κάθε επιθυμητό αντικείμενο μπορεί να εκτυπωθεί, ένας ιδιοκτήτης ενός 3D εκτυπωτή μπορεί να εκτυπώσει τα αντικείμενα που προστατεύονται από πνευματικά δικαιώματα. Κόβοντας τη διαθεσιμότητα του 3D σχεδίου του προστατευόμενου έργου μπορεί να βοηθήσει στην προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων. Ωστόσο, είναι σχεδόν αδύνατο να αφαιρεθεί η διαθεσιμότητα όλων των υπαρχόντων αρχείων σχεδιασμού στο διαδίκτυο. Επίσης με την αύξηση της ποσότητας των προϊόντων απομίμησης με την 3D εκτύπωση μπορεί να προκληθεί προσβολή της αυθεντικότητας των προϊόντων και της ζήτησης για πολλές μάρκες. Αυτή η δυνατότητα ψηφιακής πειρατείας μπορεί να συγκριθεί με τον τρόπο που το διαδίκτυο αμφισβήτησε τις βιομηχανίες ταινιών και μουσικής για τα πνευματικά δικαιώματα, εμπορικά σήματα, καθώς και παράνομες λήψεις.

Έλλειψη πιστοποίησης. Όταν οι απαιτήσεις για ποιοτικό εξάρτημα είναι αυξημένες, τότε έρχεται και η ανάγκη για πιστοποίηση. Το πρόβλημα αυτό το αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές αεροδιαστημικής όπου τα εκτυπωμένα εξαρτήματα θα πρέπει να πληρούν τα κριτήρια πιστοποίησης που ορίζουν οι κανονισμοί ασφάλειας αεροπλοΐας. Πρέπει να πιστοποιηθεί το υλικό, το εξάρτημα και η διαδικασία.

Κίνδυνοι εθνικής ασφάλειας. Υπάρχουν κίνδυνοι εθνικής ασφάλειας, όπως η πρόσβαση από τρομοκράτες στη νέα μέθοδο παραγωγής ή μια νέα πτυχή της κυβερνοεπίθεσης (cyber warfare), όπως ένα προγραμματισμένο ελαττώματα των προϊόντων ή στοχευμένες επιθέσεις των εχθρικών 3D εκτυπωτών. Με τη σάρωση και την εκτύπωση π.χ. κλειδιών αυτοκινήτου, καθώς και ένα πλήθος άλλων ιδιωτικών αντικειμένων μπορεί να

δημιουργηθεί παραβίαση της ιδιωτικής ιδιοκτησίας. Δεδομένου ότι θα υπάρξουν σημαντικές νομικές και οικονομικές επιπτώσεις στον επιχειρηματικό τομέα και ότι οι 3D εκτυπωτές προσφέρουν τη δυνατότητα να παράγουν ένα ευρύ φάσμα αντικειμένων που δεν μπορούν να ελεγχθούν ακόμη, η νομοθεσία αναφέρει ότι υπάρχουν σίγουρα κίνδυνοι εθνικής ασφάλειας που πρέπει να αναλυθούν στο άμεσο μέλλον.

Εκτυπωμένα όπλα. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι η δυνατότητα εκτύπωσης επικίνδυνων αντικειμένων, όπως πλαστικά ή μεταλλικά πιστόλια, κεραμικά μαχαίρια, ή οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως όπλο. Αυτή η



Εικόνα 44. 3D εκτυπωμένα όπλα

Εκτυπωμένα ναρκωτικά. Η σύνθεση χημικών ενώσεων σε μοριακό επίπεδο, χρησιμοποιώντας ένα 3D εκτυπωτή είναι δυνατή. Ένας ερευνητής στο Πανεπιστήμιο της Γλασκώβης δημιούργησε τον εκτυπωτή 3D "Chemputer" που εκτυπώνει φάρμακα. Η φιλοσοφία του εγχειρήματος είναι να επιτρέπεται στους ασθενείς να εκτυπώνουν το δικό τους φάρμακο με χημικό σχέδιο που θα παίρνουν από το φαρμακείο. Αν και μακρινό σχέδιο,

μπορεί να επιτρέψει στους χημικούς που χρησιμοποιούν DIY εκτυπωτές να δημιουργήσουν από κοινά απλά φάρμακα έως και ναρκωτικά και άλλες επικίνδυνες ουσίες.

Ασφάλεια τροφίμων. Μπορεί να εκτυπωθεί ένα πιρούνι, ένα κουτάλι ή άλλα μαγειρικά σκεύη, αλλά αν χρησιμοποιηθεί πλαστικό ABS, δεν είναι αρκετά ασφαλές για επαφή με το στόμα μας. Πολλοί 3D εκτυπωτές, έχουν χώρους όπου τα βακτήρια μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν αν δεν καθαρίζονται σωστά. Ωστόσο, έχουν δημιουργηθεί υλικά (όπως κεραμικά) που είναι ασφαλέστερα, αλλά δεν είναι ευρέως διαθέσιμα ακόμα. Για την μεγαλύτερη ασφάλεια των 3D τυπωμένων τροφίμων και μαγειρικών σκευών, πρέπει να υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος εκτυπωτής για αυτή τη διαδικασία.

Ευθύνες. Όπλα μπορούν να εκτυπωθούν καθώς και εξοπλισμός ασφαλείας, όπως κράνη, τροχοί για ποδήλατα, και παιχνίδια για τα μικρά παιδιά. Φυσικά, υπάρχει το ζήτημα της πνευματικής ιδιοκτησίας και των εμπορικών σημάτων, αλλά το μεγαλύτερο πρόβλημα αφορά την ευθύνη. Εάν ένα άτομο πυροβολήσει με ένα όπλο και βλάψει ή σκοτώσει κάποιον, μαχαιρώσει κάποιον με ένα 3D τυπωμένο μαχαίρι, ή σπάσει το λαιμό του, ενώ κάνει ποδήλατο με ένα 3D τυπωμένο κράνος, ποιος είναι ο υπόλογος; Ο ιδιοκτήτης του εκτυπωτή, ο κατασκευαστής του εκτυπωτή, ο σχεδιαστής του cad αρχείου ή το πρόσωπο που σκέφτηκε ότι ήταν μια καλή ιδέα να παράγει και να χρησιμοποιήσει ένα μη δοκιμασμένο προϊόν;

Ηθική στην βιοεκτύπωση και κανονισμοί. Συζητήσεις σχετικά με τα ηθικά, δεοντολογικά και νομικά ζητήματα που περιβάλλουν τη βιοεκτύπωση έχουν αρχίσει, και θα προκαλέσουν αναπόφευκτα πολύ μεγάλη διαμάχη, δεδομένου ότι γίνεται όλο και πιο σύνηθες φαινόμενο. Η Organovo εκτυπώνει τα ηπατικά κύτταρα καθώς και κύτταρα των ιστών των ματιών σε συνεργασία με το Εθνικό Ινστιτούτο Ματιών (National Eye Institute) και το Εθνικό Κέντρο Ανάπτυξης της Μεταγραφικών Επιστημών (National Center for Advancing Translational Sciences). Οι επιστήμονες έχουν προτείνει επίσης την ανάμιξη ανθρώπινων βλαστικών κυττάρων με μυϊκά κύτταρα σκυλιών για να δημιουργήσουν ενισχυμένο ιστό

οργάνου. Η εκτύπωση χόνδρου εξακολουθεί να είναι ο πιο ρεαλιστικός τύπος της βιοεκτύπωσης.

Αύξησης της ανεργίας. Δημιουργούνται νέου τύπου θέσεις εργασίες, αλλά εκτιμάται ότι θα υπάρξει αύξηση της ανεργίας. Αποτέλεσμα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι ο εκτοπισμός της χειρωνακτικής εργασίας από την παραγωγή. Συντελείται μια καθοριστική μετατόπιση προς το στάδιο της πνευματικής εργασίας για τη σύλληψη και το σχεδιασμό αγαθών παρά στο στάδιο κατασκευής των αγαθών, δηλαδή την υλοποίηση της ιδέας. Δηλαδή η συμμετοχή ανθρώπινης εργασίας στην παραγωγή αγαθών μικραίνει. Μάλιστα, εκτιμάται ότι οι χώρες με πολύ φθηνή εργατική δύναμη, όπως η Κίνα, θα χάσουν το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα. Επιπρόσθετα η εξοικονόμηση στις πρώτες ύλες σημαίνει μικρότερη απαίτηση εργασίας για την εξόρυξη πρώτων υλών. Τέλος ο κλάδος των μεταφορών θα πληγεί καθ' όσον το αγαθό θα παράγεται τοπικά εκεί που βρίσκεται ο εκτυπωτής του, ενώ κερδίζουν σε σημασία τα δίκτυα και κυρίως το διαδίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

Εφαρμογές.

7.1. Γενικά.

Η τεχνολογία των εκτυπώσεων 3D δεν έχει όρια. Είναι εξελισσόμενη και βρίσκει συνεχώς νέες εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς. Ενδεικτικά βρίσκει στην Αρχιτεκτονική, στο Διάστημα, στην Αεροναυπηγική, στη Μηχανολογία, στην Αυτοκινητοβιομηχανία, στην Ιατρική, στη Βιοϊατρική, στην Οδοντιατρική, στην Φαρμακευτική, στην Εκπαίδευση, στην παραγωγή καταναλωτικών υλικών, στη Ψυχαγωγία, στην Αρχαιολογία, στην Τέχνη, στα Κοσμήματα, στη Μόδα, στα Είδη Υπόδησης, στην Μαγειρική και στη Ζαχαροπλαστική. Για αυτό το λόγο η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια επαναστατική αλλαγή στην διαδικασία της βιομηχανικής αλυσίδας.

7.2. Αρχιτεκτονική & GIS.

Η μακέτα στην αρχιτεκτονική είναι το σημαντικότερο εργαλείο απεικόνισης. Με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης ο αρχιτέκτονας έχει την δυνατότητα να πειραματιστεί με ακρίβεια και λεπτομέρεια. Είναι ένα πραγματικό εργαλείο για την προώθηση του τελικού σχεδίου στον πελάτη. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επαναπροσδιορίζει την έννοια της μακέτας καθιστώντας την ένα αυτόνομο έργο και ένα διαχρονικό αντικείμενο.



**Εικόνα 46. 3D εκτυπωμένα γραφεία
στο Ντουμπάι**

ή καταλύματα μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν μετά από φυσικές καταστροφές. Επιπρόσθετα μπορούν να υλοποιηθούν κατασκευαστικά σχέδια, τα οποία δεν μπορούν να επιτευχθούν με συμβατικές μεθόδους. Μέχρι σήμερα έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή κάποιων κτιρίων ενώ αναμένεται να υπάρξει αύξηση τα επόμενα χρόνια.

Τέλος η χαρτογράφηση και τα τοπογραφικά σχέδια παίρνουν τρισδιάστατη μορφή. Μέσω του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) τα τοπογραφικά gis δεδομένα, μετατρέπονται σε πραγματικότητα. Κατοικίες, σχολεία, ακόμη και πόλεις μπορούν να εκτυπωθούν από 3D δεδομένα.

Τα επόμενο βήμα είναι η δημιουργία τεράστιων 3D εκτυπωτών για την κατασκευή ολόκληρων κτιρίων χρησιμοποιώντας το τσιμέντο ως υλικό κατασκευής. Η κατασκευή των κτιρίων αναμένεται να είναι φθηνή αφού μειώνονται τα λειτουργικά κόστη, λόγω του μειωμένου απαιτούμενου ανθρώπινου δυναμικού. Επειδή και ο χρόνος κατασκευής είναι μικρότερος, 3D σπίτια



Εικόνα 45. 3D εκτυπωμένος χάρτης

7.3. Διάστημα.



Εικόνα 47. Σχεδιασμός προτεινόμενης 3D εκτυπωμένης βάσης στο φεγγάρι

Η κατασκευή κτιρίων δεν περιορίζεται μόνο στη γη. Η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυπηγικής και Διαστήματος (NASA) και άλλες διαστημικές Υπηρεσίες σχεδιάζουν να εγκαταστήσουν 3D εκτυπωμένα κτίρια στο διάστημα. Η NASA προσανατολίζεται στην δημιουργία αποικιών στον Άρη, ενώ η Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA)

σχεδιάζει μία ερευνητική βάση στο φεγγάρι, η οποία θα εκτυπωθεί τρισδιάστατα χρησιμοποιώντας ως υλικό κατασκευής το σεληνιακό έδαφος.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές στο διάστημα δίνουν τη δυνατότητα στους αστροναύτες να κατασκευάζουν εργαλεία και εξαρτήματα σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας. Μείωση του εξοπλισμού, που ενδεχομένως θα απαιτηθεί, συνεπάγεται σημαντική μείωση του κόστους των αποστολών. Οι συσκευές πρέπει να αντέχουν τις δονήσεις της εκτόξευσης και να λειτουργούν με ασφάλεια.

Η NASA εξετάζει επίσης το ενδεχόμενο εκτύπωσης μικρών δορυφόρων, οι οποίοι θα εκτοξεύονται από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό και θα μεταφέρουν δεδομένα στη Γη.

7.4. Αεροναυπηγική.

Η 3D εκτύπωση είναι πολύ ελκυστική για τους κατασκευαστές αεροπλάνων. Με τις δυνατότητες που αυτή δίνει, σχεδιάζονται και βελτιστοποιούνται εξαρτήματα και κομμάτια του αεροπλάνου προσδίδοντας λιγότερο βάρος με τις ίδιες ή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Αυτό μεταφράζεται αυτομάτως σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και

μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ο σχεδιασμός εξαρτημάτων από τον υπολογιστή και η τύπωσή τους από τρισδιάστατους εκτυπωτές αποτελεί πλέον τετριμμένο φαινόμενο στην αεροπορική βιομηχανία. Μία δύσκολη εφαρμογή της 3D εκτύπωσης είναι η δημιουργία ενός πλήρους ακροφύσιου ψεκασμού καυσίμου για τουρμπίνες αεροπλάνων, που παράγεται σε μια ενιαία διαδικασία εκτύπωσης.



Εικόνα 48. 3D εκτυπωμένο ακροφύσιο ψεκασμού καυσίμου

7.5. Μηχανολογία-Αυτοκινητοβιομηχανία.

Στον κλάδο της μηχανολογίας συναντάται η κατασκευή καλουπιών, πλαστικών και ανταλλακτικών, καθώς και ανακατασκευές αυτών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα για την εφαρμογή αυτής της νέας τεχνολογίας για βιομηχανικές χρήσεις είναι ότι τα τυπωμένα αντικείμενα είναι πιο σταθερά και ελαφρύτερα από τα συμβατικά προϊόντα.

Η εκτύπωση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων είναι μία ακόμη εφαρμογή. Έχει αναπτυχθεί μελάνη (Nano Ink) που λειτουργεί ως ηλεκτρικός αγωγός και μπορεί να τυπωθεί απευθείας πάνω σε πλαστικό ή άλλα υλικά, καθιστώντας κατά αυτό τον τρόπο δυνατή την ενσωμάτωση απλών κυκλωμάτων σε τυπωμένα αντικείμενα.



Εικόνα 49. 3D εκτυπωμένο αυτ/το

Η έκρηξη της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αρχίσει να μεταλλάσσει τον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ολόκληρα αμαξώματα, πλήρως λειτουργικά ποδήλατα και ακόμα και μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση τέτοιων εκτυπωτών. Ανταλλακτικά και μηχανές θα μπορούν να κατασκευάζονται ταχύτερα και φθηνότερα από ποτέ. Κάθε αυτοκίνητο ή μέρος του θα μπορεί να προσαρμόζεται για να ταιριάζει σε κάθε αγοραστή ξεχωριστά.

Η αυτοκινητοβιομηχανίες, την χρησιμοποιούν επίσης για να παράγουν νέα πρωτότυπα μοντέλα αυτοκινήτου από συνθετική ρητίνη. Κατασκευαστές αυτοκινήτων της Formula 1, χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία και για βελτιστοποίηση αεροδυναμικής.

Ένας τομέας στον οποίο οι 3-D εκτυπωτές δείχνουν ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον, και χρησιμοποιούνται ήδη, είναι στην κατασκευή ανταλλακτικών. Δυσεύρετα εξαρτήματα για μοντέλα – αντίκες μπορούν να αντικατασταθούν είτε μέσω της αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering), είτε μέσω της επανασχεδίασης. Επιπρόσθετα οι κατασκευαστές έχουν ξεκινήσει τη δημιουργία αποθετηρίων 3D μοντέλων εξαρτημάτων, με σκοπό στο μέλλον την παραγωγή τους υστέρα από απαίτηση του πελάτη, ανεξαρτήτως παλαιότητας με λογικό κόστος και μείωση του κόστους παραγωγής αλλά και της διατήρησης μεγάλου αποθέματος σε αποθηκευτικούς χώρους.

7.6. Ιατρική-Βιοιατρική-Οδοντιατρική-Φαρμακευτική.

Ιατρικός εξοπλισμός, ακουστικά βαρηκοΐας εμφυτεύματα, και κατασκευή προσθετικών μελών, είναι μόνο μερικές ιατρικές εφαρμογές. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι τα νέα προσθετικά μέλη κατασκευάζονται εύκολα, με μικρότερο κόστος, προσαρμοσμένα στις ανάγκες κάθε ατόμου ξεχωριστά.

Επίσης με τη τρισδιάστατη εκτύπωση μπορεί να κατασκευαστεί τρισδιάστατο μοντέλο περιοχής με κύριο στόχο την επισκόπηση για επιλογή της κατάλληλης θεραπευτικής προσέγγισης (χειρουργικός εμβολισμός, χειρουργική επέμβαση, ακτινοχειρουργική), εκτίμηση ρίσκου σε χειρουργικές επεμβάσεις και εκπαίδευση του επεμβαίνοντος σε λεπτές κινήσεις στο τρισδιάστατο ρεαλιστικό μοντέλο της συγκεκριμένης περιοχής προχειρουργικά. Επίσης άλλες εφαρμογές είναι η δοκιμή ή προσαρμογή μεταλλικών ή άλλων προθέσεων σε τρισδιάστατο μοντέλο (π.χ. κρανίο) πριν την εφαρμογή τους στον ασθενή, εξοικονομώντας

πολύτιμο εγχειρητικό χρόνο, όπως επίσης και η 3D εκτύπωση εξατομικευμένου για κάθε ασθενή μοντέλου (καλούπι) για εμφύτευμα ισχίου με τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η συνακόλουθη κατασκευή εξατομικευμένου εμφυτεύματος ισχίου για το συγκεκριμένο ασθενή. Επιπλέον εφαρμόζεται για τρισδιάστατη εκτύπωση δομών (π.χ. γνάθων) για εκπαιδευτικούς λόγους (π.χ. τοποθέτηση εμφυτευμάτων) ή για λόγους επίδειξης/επεξήγησης σε ασθενείς/ φοιτητές.

Ένας άλλος κλάδος ιδιαίτερης βαρύτητας και σημαντικών απαιτήσεων είναι η βιοιατρική. Ο στόχος είναι η δυνατότητα να «εκτυπώνονται» τρισδιάστατα συμπληρωματικοί ιστοί, οι οποίοι με τη σειρά τους θα συμβάλλουν στην αναγέννηση των οργάνων, όπως είναι οι νευρώνες, τα τμήματα αρτηριών και οι χόνδροι για τις αρθρώσεις δημιουργούνται, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεταμοσχεύσεις. Μέχρι στιγμής, ήδη υπάρχουν εκτυπωμένα μέρη ιστών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δοκιμές νέων φαρμάκων.

Η παρασκευή οδοντιατρικών γεφυρών και η κατασκευή εκμαγείων, μπορεί να αναζητηθεί σε λύσεις 3D printing κατά τις οποίες η συσκευή χτίζει τη δομή σε στρώματα από ρητινώδες υλικό (Χρήστος Καλαντζής, 2016). Τα ρητινούχα αυτά μοντέλα μπορούν στη συνέχεια να χυτευτούν με την μέθοδο του χαμένου κεριού και να αντικατασταθούν από μέταλλο. Έτσι, επιπλέον μπορούν να εκτυπωθούν πρωτότυπα για χύτευση σκελετών μερικής οδοντοστοιχίας, συγκρατητικές συσκευές για ορθοδοντική χρήση, προχειρουργικοί νάρθηκες για τοποθέτηση εμφυτευμάτων. Η εκτύπωση ακολουθεί τη ψηφιακή απεικόνιση/σχεδιασμό των εκμαγείων/αποκαταστάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με ενδοστοματικές συσκευές καταγραφής, είτε ψηφιοποιώντας ένα συμβατικό αποτύπωμα.



Εικόνα 50. 3D εκτυπωμένα εκμαγεία

Οι ερευνητές των φαρμακευτικών πειραματίζονται επίσης με φάρμακα. Ένας

υπολογιστής παρέχει τον τύπο και ο εκτυπωτής συνθέτει το χάπι από μεμονωμένα συστατικά, σύμφωνα με τις ιδιαίτερες ανάγκες του ασθενούς.

7.7. Εκπαίδευση.

Με την απλή δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων δίνεται η δυνατότητα να γίνει το μάθημα πιο διαδραστικό και δημιουργικό. Ο ερευνητής ή ο ακαδημαϊκός μπορεί να πειραματιστεί σε πρωτότυπα, φτιαγμένα με ακρίβεια και ταχύτητα με βάση τις αποκλειστικές του ανάγκες διευκολύνοντας την εργαστηριακή έρευνα (Stroud, Morris, Carey, Williams, Randolph & Williams, 2013) ή να εργαστεί σε ρεαλιστικά αντίγραφα μέσω της χρήσης της τρισδιάστατης σάρωσης. Ο καθηγητής και ο μαθητής αποκτούν ένα νέο εργαλείο έρευνας και μάθησης. Η ευελιξία της τεχνολογίας 3D σημαίνει ότι ο τομέας της έρευνας και της μάθησης απλοποιείται και επεκτείνεται επιτρέποντας την ανάπτυξη της τεχνολογίας, της επιστήμης και της εκπαίδευσης. Η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει μια επαναστατική αναβάθμιση στην εκπαίδευση.



Εικόνα 51. Μαθηματικά, υπερβολικό παραβολοειδές 3D εκτυπωμένο

7.8. Παραγωγή καταναλωτικών αγαθών- Ψυχαγωγία.

Οι πιο αισιόδοξοι προβλέπουν ότι, μια μέρα στο μέλλον, κάθε νοικοκυριό θα έχει τον δικό του τρισδιάστατο εκτυπωτή, τον οποίο θα χρησιμοποιεί σε τακτική βάση για τις ανάγκες του σπιτιού. Παιχνίδια για τα παιδιά, εργαλεία, ανταλλακτικά, χρήσιμα αντικείμενα, διακοσμητικά είδη μπορούν να εκτυπωθούν. Ο κάθε καταναλωτής με την απλή χρήση στο γραφείο ή στο σπίτι του ενός μηχανήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης, μπορεί ο ίδιος να κατασκευάζει αντικείμενα, είτε έχοντας προμηθευτεί τα επιθυμητά ψηφιακά σχέδια είτε

έχοντας σαρώσει φυσικά αντικείμενα.

Με μία σάρωση και μία εκτύπωση, κρατάει κανείς τον εαυτό του στα χέρια του σε μικρογραφία. Μπορεί κάποιος να δημιουργήσει τα παιχνίδια του υπολογιστή του σε μικρές μινιατούρες, το μοντέλο animation που πάντα ήθελε, μία θήκη κινητού, κ.α. Η 3D εκτύπωση γίνεται παιχνίδι-διασκέδαση, ένα χόμπι όπως ο μοντελισμός.

7.9. Αρχαιολογία – Τέχνη – Κινηματογράφος – Κοσμήματα.



Εικόνα 52. 3D εκτυπωμένο αντίγραφο άγαλμα του «Κούρου»

Με τη χρήση των τεχνικών της ψηφιακής φωτογραμμετρίας και της τρισδιάστατης σάρωσης με laser, μπορούν να δημιουργηθούν τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα των αγαλμάτων, με σκοπό την 3D εκτύπωση πιστών αντιγράφων μαρμαρίνων αγαλμάτων με πρώτη ύλη τη μαρμαρόσκονη ή τη ρητίνη. Στην περίπτωση μαζικής παραγωγής αντιγράφων χρησιμοποιούνται 3D εκτυπωμένα καλούπια. Αλλά και στις περιπτώσεις αποκατάστασης αρχαίων ευρημάτων και στα μέρη που δεν έχουν βρεθεί ή είναι κατεστραμμένα, μπορούν να σαρωθούν ή να σχεδιαστούν, να εκτυπωθούν και να προστεθούν. Επιπρόσθετα και ο καλλιτέχνης μπορεί με τη χρήση του υπολογιστή να δημιουργήσει έργα τέχνης, εξατομικευμένα, μοναδικά ή σε πολλαπλά αντίγραφα.

Στον κινηματογράφο η απαίτηση για δημιουργία πρωτοτύπων μοντέλων για τις ανάγκες των ταινιών με απαιτητικά εφέ οδηγούν στην 3D εκτύπωση.

Πέραν των ανωτέρω 3D εκτύπωση έχει ιδιαίτερη άνθιση στον τομέα του κοσμήματος. Η διαδικασία παραγωγής κοσμημάτων διευκολύνεται καθώς ο κοσμηματοποιός έχει τη δυνατότητα να τυπώσει καλούπια πολύπλοκων σχεδίων, ή να σαρώσει ένα υπάρχον κόσμημα δημιουργώντας τρισδιάστατο αρχείο, να το επεξεργαστεί και να το επανεκτυπώσει. Τα πρωτότυπα μοντέλα που κατασκευάζονται κυρίως από ρητίνη, τα οποία μπορούν να χυτευτούν και να αντικατασταθούν από μέταλλο.



Εικόνα 53. 3D εκτυπωμένο δακτυλίδι

7.10. Μόδα- Ρούχα και Υπόδηση.



Εικόνα 54. 3D εκτυπωμένο αθλητικό υπόδημα

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εφαρμογή και στο χώρο της μόδας με εντυπωσιακά φορέματα, παπούτσια, αλλά και όλων των ειδών ρούχων, και αξεσουάρ προσαρμοσμένα ακριβώς για να εξυπηρετήσουν την προσωπική εικόνα του κάθε πελάτη, σε υλικά και χρώματα τα οποία επιθυμεί. Ιδιαίτερη έρευνα πραγματοποιούνται στα αθλητικά παπούτσια για βελτιστοποίηση των επιδόσεων. Ωστόσο, αυτού του είδους τα καταναλωτικά προϊόντα είναι πιθανό να παραμείνουν σε ένα μικρότερο στάδιο παραγωγής σε σχέση με τις βιομηχανικές εφαρμογές.

7.11.Μαγειρική-Ζαχαροπλαστική.

Η 3D εκτύπωση τροφίμων είναι μια τελευταία τάση στη βιομηχανία. Από τη χρηματοδότηση της NASA για την κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή που θα φτιάχνει φαγητό για αστροναύτες μέχρι σήμερα, η τιμή των 3D εκτυπωτών τροφίμων γίνεται ολοένα και φθηνότερη με περισσότερες επιλογές ως προς τα τρόφιμα που μπορεί να ετοιμάσει.

Ένας 3D εκτυπωτής τροφίμων, είναι ένας τροποποιημένος 3d εκτυπωτής που διαθέτει ειδική υπό πίεση δεξαμενή / δεξαμενές για να εξωθήσει την πρώτη ύλη τροφίμου που είναι υπό τη μορφή υγρού ή πάστας. Στην αγορά έχουν κάνει την εμφάνισή τους αρκετοί 3D εκτυπωτές



Εικόνα 55. 3D εκτυπωμένα ζυμαρικά Barilla

τροφίμων όπως ο TNO, ο οποίος μπορεί να εκτυπώσει 15-20 τεμάχια τροποποιημένα ζυμαρικά Barilla κάθε δύο λεπτά, ο «Foodini», ο xyz και ο «Beehex», με δυνατότητα να παρασκευάσουν μπισκότα, σοκολάτες, ζυμαρικά και πίτσα τουλάχιστον, με υλικά που επιλέγει και τοποθετεί στη συσκευή ο χρήστης. Άλλοι εκτυπωτές όπως ο «ChefJet» και ο «ChefJet Pro» (για έγχρωμες εκτυπώσεις) έχουν δυνατότητα εκτύπωσης ζάχαρης με προσθήκη σοκολάτας ή σιροπιών σε διάφορες γεύσεις ενώ ο «Choc Creator» θεωρείται ο πρώτος εκτυπωτής σοκολάτας.



Εικόνα 56. 3D εκτυπωμένα ζαχαρωτά

Οι εκτυπωτές αυτοί έχουν εισβάλει σε γαστρονομικούς χώρους για την δημιουργία ξεχωριστών πιάτων και γλυκών, καθώς και γαρνιτούρες για κοκτέιλ και διακοσμητικά γαμήλιας τούρτας, καθότι υπάρχουν σχέδια που κανείς chef ή pastry chef θα μπορούσε να δημιουργήσει. Από την άλλη μεριά άλλοι ειδικοί

πιστεύουν ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυσάρεστα αλλά άφθονα συστατικά, που δεν καταναλώνονται στην ακατέργαστη μορφή τους αλλά είναι πλούσια σε βιταμίνες, όπως έντομα, σκουλήκια και φύκια, για τη δημιουργία οκίων πιάτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (όπως π.χ. από την εκτροφή ζώων), αλλά και να προσφέρει μια ανανεώσιμη μορφή τροφής σε έναν αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.

Στρατιωτικές εφαρμογές.

8.1. Εισαγωγή.

Η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα των 3D εκτυπωτών έχουν οδηγήσει το στρατό να επενδύσει σε αυτή την τεχνολογία. Η εξάλειψη των πολλών ωρών και ημερών της επεξεργασίας και μεταστροφή σε λίγες ώρες διαβεβαιώνει ότι οι απαιτήσεις πάντα θα πληρούνται και είναι απολύτως αναγκαία για το στρατό. Η καλύτερη διασφάλιση είναι η ζήτηση πάντα να συναντά την προσφορά τη στιγμή που είναι αναγκαίο.

Γνωρίζοντας ότι οι 3D εκτυπωτές μπορούν να δημιουργήσουν σχεδόν τα πάντα, ο στρατός μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτή την ευκαιρία για τη δημιουργία νέων μηχανημάτων, εργαλείων και όπλων. Νέα σχέδια μπορούν να δημιουργηθούν, σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες και να δοκιμαστούν ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Αλλά και σε υπάρχον εξαρτήματα μέσω της επανασχεδίασης δίνεται η δυνατότητα βελτιστοποίησής τους, επιλογής υλικών με ποικιλία ιδιοτήτων και μειώνοντας το απαραίτητο υλικό κατασκευής τους. Χωρίς κανέναν περιορισμό ανοίγονται νέοι ορίζοντες, επεκτείνοντας τα όρια της συμβατικής παραγωγής.

Δίνει την ανεξαρτησία και τον πλήρη έλεγχο στα ανταλλακτικά, στα όπλα και στα αντικείμενα που κρίνονται απαραίτητα. Στο πεδίο της μάχης οι απαιτήσεις και οι ανάγκες είναι κρίσιμος παράγοντας, κυρίως στις βλάβες, στις καταστροφές και στην ανεπάρκεια των προμηθειών. Η διαθεσιμότητα των 3D εκτυπωτών στο πεδίο της μάχης θα εξασφαλίσει ότι ο στρατός θα τυπώνει τις δικές του ανάγκες.

Σημαντικός παράγοντας είναι και η εξοικονόμηση πόρων. Ο προγραμματισμός αναγκών και η προμήθεια τους, δημιουργεί απόθεμα που στις περιπτώσεις εξάλειψης της ανάγκης απαίτησής τους, θεωρείται σπατάλη χρημάτων. Οι δαπάνες και η γραφειοκρατία που γεννά η εφοδιαστική αλυσίδα μπορούν να μειωθούν στο σιέλος της προμήθειας-εγκατάστασης του εκτυπωτή, του υλικού κατασκευής και της συντήρησης του εκτυπωτή. Επιπρόσθετα η τροφοδοσία με προμήθειες και ανταλλακτικά στο πεδίο της μάχης δημιουργούν επιπρόσθετα κόστη από τη μεταφορά τους.

8.2. Προτυποποίηση (Prototyping).

Καθώς η διαδικασία της σχεδίασης εξελίσσεται, θα πρέπει να επιβεβαιώνεται η λειτουργικότητα του προϊόντος, όπως αυτό έχει προβλεφθεί. Η ύπαρξη ενός 3D εκτυπωτή θα επιτρέψει την έγκαιρη ανίχνευση λαθών και την αναθεώρησή τους. Οι εφαρμογές της προτυποποίησης μπορούν να αφορούν έλεγχο λειτουργικότητας (functional testing), συναρμολόγησης (assembly), συναρμογής κτλ.

Επιπρόσθετα η οπτικοποίηση των μοντέλων επιδρούν από τις αρχικές φάσεις του σχεδιασμού και έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα στάδια της σχεδίασης και της παραγωγής που ακολουθούν. Διαλέγοντας κανείς τον σωστό δρόμο, μεταξύ των εναλλακτικών στο σχεδιασμό, ελαχιστοποιεί δαπανηρές αλλαγές σε μεταγενέστερα στάδια, επιταχύνει τη διαδικασία ανάπτυξης αλλά και την έξοδο σε τελικό προϊόν στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Πέραν των ανωτέρω, όταν η διαδικασία της ανάπτυξης του προϊόντος ολοκληρωθεί, θα πρέπει να οργανωθεί το ξεκίνημα της παραγωγής. Στο στάδιο αυτό θα απαιτηθούν ιδιοκατασκευές και καλούπια. Η χρήση ενός 3d εκτυπωτή σε αυτό το στάδιο, θα μπορούσε να λειτουργήσει υποστηρικτικά όταν και αν αυτό χρειαστεί.

8.3. Τοπογραφικοί χάρτες.

Η επιτυχής ανάπτυξη ενός 3D τοπογραφικού χάρτη μπορεί να παρέχει μία ακριβή και αξιόπιστη βάση για τη στρατιωτική τοπογραφική ανάλυση, για τους διοικητές να λαμβάνουν αποφάσεις και για τις μονάδες στρατευμάτων για την εκτέλεση της αποστολής τους, ως εκ τούτου κατέχει υψηλή αξία στρατιωτικής εφαρμογής. Επιπλέον, η αποθήκευση χιλιάδων τόνων παρωχημένων χαρτών καθώς και το υψηλό κόστος κατασκευής μακέτας με συμβατικά επαγγελματικά και ακριβά υλικά ευνοούν την ανάπτυξη του 3D εκτυπωμένου τοπογραφικού χάρτη. Ο 3D τοπογραφικός χάρτη αποτυπώνει τα πλήρη στοιχεία και με μεγάλη ακρίβεια, για μετρήσεις και υπολογισμούς, έχει μικρό βάρος και είναι φορητό σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνητές.

Ο Κινεζικός Στρατός χρησιμοποιεί την τεχνολογία της 3D εκτύπωσης για τη δημιουργία 3D στρατιωτικών τοπογραφικών χαρτών. Ένα κέντρο μέτρησης και χαρτογράφησης πληροφοριών υπό τη διοίκηση Lanzhou της Στρατιωτικής περιοχής (MAC) του κινεζικού Λαϊκού Απελευθερωτικού Στρατού (PLA) ανέπτυξε με επιτυχία τον πρώτο 3D τοπογραφικό χάρτη της Κίνας, μία περιοχή της πόλης Lanzhou, στις 20 Νοεμβρίου του



Εικόνα 57. 3D τοπογραφικός χάρτης

2013. Μετά την επιτυχή ανάπτυξη του πρώτου 3D τοπογραφικού χάρτη, το τεχνικό προσωπικό αναβάθμισε και ανακίνησε τον τοπογραφικό χάρτη. Βελτιώθηκε η ακρίβεια του μεγέθους A4 3D τοπογραφικού χάρτη από τα προηγούμενα 1,0 χιλιοστά στα 0,1 χιλιοστά και συντομεύοντας το χρόνο εκτύπωσης από τις προηγούμενες 24 ώρες στις 8 ώρες.

8.4. Εκτυπωμένες εφαρμογές

Η βρετανική εταιρεία άμυνας και αεροδιαστημικής BAE Systems, πραγματοποίησε επιτυχημένη δοκιμαστική πτήση μαχητικού αεροσκάφους τύπου Tornado με μεταλλικά εξαρτήματα τυπωμένα σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Τα τμήματα του αεροπλάνου που παράχθηκαν σε 3D εκτυπωτή αντί να κατασκευαστούν με τον παραδοσιακό τρόπο, ήταν ένα προστατευτικό κάλυμμα του ραντάρ, ένα τμήμα του συστήματος εισαγωγής αέρα και ένα μέρος του συστήματος προσγείωσης, σύμφωνα με την ομάδα αεροναυπηγικής της εταιρείας. Η Lockheed Martin, σύμφωνα με πληροφορίες, έχει 900 τρισδιάστατα κατασκευασμένα μέρη στο μονοθέσιο, μονοκινητήριο, χαμηλής παρατηρησιμότητας μαχητικό αεροσκάφος πέμπτης γενιάς, F-35 Lightning II. Η Boeing χρησιμοποιεί στο F / A-18 Super Hornet περίπου 150 εκτυπωμένα μέρη που παράγονται με την τεχνολογία SLS. Επιπλέον η Aerojet Rocketdyne έχει δοκιμάσει με επιτυχία έναν κινητήρα χτισμένο εξ ολοκλήρου με τη χρήση της πρόσθετικής κατασκευής.



Εικόνα 58. 3D εκτυπωμένο ανταλλακτικό για το V-22 Osprey

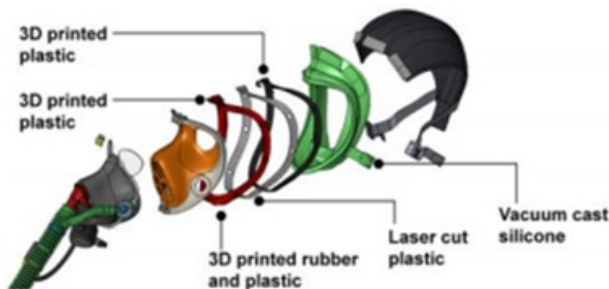
Κρίσιμα ανταλλακτικά εξαρτήματα έχουν αρχίσει να τοποθετούνται και στο V-22 Osprey, στρατιωτικό αεροσκάφος με κλίση ρότορα. Επίσης αναμένεται να τοποθετηθούν εκτυπωμένα ανταλλακτικά και στο ελικόπτερο με βαρύ φορτίο ανύψωσης, Sikorsky CH-53K King Stallion, το οποίο βρίσκεται ακόμα σε

πρώιμα στάδια παραγωγής και στο H-1 Marine Corps Light/Attack ελικόπτερο, συμπεριλαμβανομένου του AH-1Z Viper.

Στο Κέντρο Οπλισμό Έρευνας, Ανάπτυξης και Τεχνολογίας RDECOM στο Edgewood, του αμερικανικού στρατού από το 2015 κατασκευάζονται με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής, διάφορα μπουλόνια και παξιμάδια, ως ένα υλικό υψηλής ζήτησης (U.S. Government Accountability Office, 2015). Η λύση αυτή μειώνει το φόρτο διοικητικής μέριμνας σε μια μονάδα και βελτιώνει την ετοιμότητα της αποστολής, επιτρέποντας έτσι τη βελτιωμένη απόδοση. Μετά από αξιολόγηση που έγινε στο Αφγανιστάν διαπιστώθηκε ότι τα παξιμάδια και τα μπουλόνια ήταν υψηλής ζήτησης ανταλλακτικά. Η παραγωγή τους στο χώρο επιχειρήσεων προσφέρει μείωση του χρόνου να αποκοτούν ένα μέρος που είναι υψίστης σημασίας.



Εικόνα 59. 3D εκτυπωμένα μπουλόνια και παξιμάδια



Εικόνα 60. 3D εκτυπωμένα μέρη κράνους

Στο Χημικό και Βιολογικό Κέντρο RDECOM, του αμερικανικού στρατού κατασκεύασαν με τη μέθοδο της προσθετικής πρότυπες ειδοχές και μέρη κράνους (Joint Service Aircrew Mask-JSAM), που προστατεύει τους πιλότους από χημικούς και βιολογικούς παράγοντες, με σκοπό τις πιθανές επιχειρησιακές βελτιώσεις. Πιλότοι τα αξιολογήσαν βάση της άνεσης και του πεδίου θέασης. Μόλις κρίθηκαν αποδεκτά, τα μέρη παρήχθησαν χρησιμοποιώντας τη συμβατική κατασκευή. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε διήρκησε και κόστισε λιγότερο.

Επιπλέον στο ίδιο κέντρο επιτευχθεί ικανότητα βελτίωσης της μάχης με το σχεδιασμό βάσης στήριξης για να μεταφέρουν εξοπλισμό αισθητήρων στο πεδίο επιχειρήσεων. Το κέντρο μαζί με το εργαστήριο έρευνας του στρατού ανέπτυξαν βάση στήριξης για να μεταφέρει ενός βαρέως τύπου αισθητήρα ανίχνευσης αυτοσχέδιων εκρηκτικών μηχανισμών χειρός. Η απαίτηση ήταν να διανέμεται περισσότερο βάρος στην γιλέκο και στην πλάτη του στρατιώτη και όχι περιορίζοντάς το στον πήχη του χεριού του στρατιώτη. Δημιουργώντας πολλά πρωτότυπα βελτιστοποίησης, που δοκιμάστηκαν από τους στρατιώτες σε διάφορες θέσεις σε όλη τη χώρα, μέσα σε 1 έως 2 εβδομάδες επιτεύχθηκαν θετικά αποτελέσματα. Ο τελικός αριθμός προϊόντων 10000 βάσεων στήριξης παράχθηκε χρησιμοποιώντας συμβατικές διαδικασίες παραγωγής.



Εικόνα 61. 3D εκτυπωμένη βάση στήριξης

Η υπηρεσία « Ταχείς πολεμικός εξοπλισμός (Rapid Equipping Force- REF)», σχεδίασε και εκτύπωσε, στο πεδίο επιχειρήσεων, εξωτερικό κάλυμμα βαλβίδας για τα λάστιχα των στρατιωτικών οχημάτων. Κατά τη διάρκεια των αποστολών, τα ελαστικά ξεφούσκωναν όταν το στέλεχος της βαλβίδας είχε καταστραφεί από πέτρες ή σταθερά αντικείμενα. Εντός 2 εβδομάδες δημιουργήθηκαν διάφορες εκδόσεις πρωτοτύπων για να παραχθεί τελικά με συμβατικές διαδικασίες παραγωγής.



Εικόνα 62. 3D εκτυπωμένο εξωτερικό κάλυμμα βαλβίδας

Η υπηρεσία « Τάχεις πολεμικός εξοπλισμός (Rapid Equipping Force- REF)» σχεδίασε και εκτύπωσε στηρίγματα, στο πεδίο επιχειρήσεων. Οι στρατιώτες κατά τη χρήση των εξοπλισμού ανίχνευσης ναρκών, κατά τη διάρκεια χαμηλής ορατότητας συνθηκών, απαιτείται φωτισμός γύρω από την περιοχή σάρωσης του αισθητήρα, προκειμένου να αποφευχθεί σύγκρουση με αντικείμενα, με αποτέλεσμα τη ζημιά του αισθητήρα. Χρησιμοποιώντας την 3D εκτύπωση και μετά από διάφορες εκδόσεις τοποθετήθηκε βάση στήριξης φακών στους ανιχνευτές ναρκών με κόστος στο ένα τέταρτο του κανονικού κόστους.



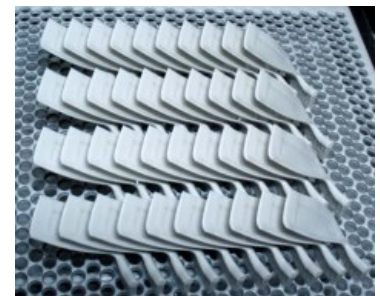
Εικόνα 64. 3D εκτυπωμένη βάση στήριξης φακών

Στην αποθήκη Tobyhanna του στρατού εκτυπώθηκαν καλύμματα σκόνης για ασυρμάτους. Η ανεπάρκεια του εν λόγω είδους είχε καθυστερήσει την παράδοση ασυρμάτων. Για έναν προμηθευτή θα χρειαζόντουσαν αρκετές εβδομάδες να τους τα προμηθεύσει, ενώ η αποθήκη εκτύπωσε καλύμματα σκόνης σε 16 ώρες. Η εξοικονόμηση πόρων είχε μικρότερη σημασία από το γεγονός ότι ήταν σε θέση να ανταποκριθούν στο πρόγραμμα.



Εικόνα 63. 3D εκτυπωμένα καλύμματα σκόνης για ασυρμάτους

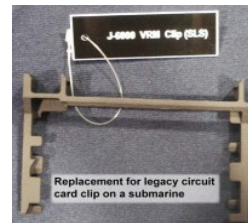
Προς την κατεύθυνση εξοικονόμηση πόρων η Defense Logistics Agency στράφηκε στην 3D εκτύπωση καλουπιών χύτευσης. Σε συνεργασία με τη βιομηχανία και αξιοποιώντας το έργο των στρατιωτικών ερευνητικών εργαστηρίων εκτυπώθηκαν καλούπια χύτευσης για αεροτομές κινητήρα (σταθερά και κινητά πτερύγια) που χρησιμοποιούνται στις τουρμπίνες των κινητήρων.



Εικόνα 65. 3D εκτυπωμένες αεροτομές κινητήρα

Αυτά τα καλούπια χύτευσης θα οδηγήσουν να μειωθεί το κόστος και ο χρόνος παραγωγής των αεροτομών των κινητήρων, ιδιαίτερα όταν τα καλούπια έχουν χαθεί, διαλυθεί ή όταν υπάρχουν μικρές ποσότητες παραγγελιών.

Το Πολεμικό Ναυτικό επικεντρώνεται στην κατασκευή ανταλλακτικών με τη χρήση της 3D εκτύπωσης για βελτίωση της απόδοσης. Για να διατηρεί το στόλο έτοιμο εκτύπωσε ένα κλιπ κάρτας κυκλώματος για διακομιστές που είναι εγκατεστημένοι σε υποβρύχια.



Εικόνα 66. 3D εκτυπωμένα κλιπ κάρτας κυκλώματος



Εικόνα 67. 3D εκτυπωμένος σταθεροποιητής σκοποβολής

Το FANG είναι ένας υψηλής ταχύτητας σταθεροποιητής σκοποβολής με μικρό προφίλ επιδιώκοντας τόσο την πρόσθετη σταθερότητα όσο και την ακρίβεια.

8.5. Όπλα-Πυρομαχικά.

Η κατασκευή λειτουργικών όπλων υπάρχει ήδη στο προσκήνιο. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται σε υπάρχοντα σχέδια. Αν και πολλά από αυτά έχουν ως υλικό κατασκευής το θερμοπλαστικό, η εκτύπωση μεταλλικών όπλων υφίσταται μολονότι είναι ακριβή διαδικασία (Appleton, 2014). Είναι όμως αρκετά ώριμη για να χρησιμοποιηθεί από τον στρατό, τόσο ως ενιαία κατασκευή όσο και σε επίπεδο ανταλλακτικών.



Εικόνα 68. 3D εκτυπωμένο όπλο - Solid Concepts 1911

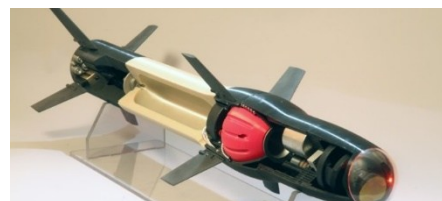


Εικόνα 69. 3D εκτυπωμένο όπλο – AR-15

Τα μεταλλικά κράρματα είναι πολύ πιο αξιόπιστα και ασφαλές για τα πυροβόλα όπλα. Η εταιρεία «Solid Concepts» έχει κατασκευάσει το 1911 μοντέλο όπλου, ενώ υπάρχουν και σχέδια για την

εκτύπωση του AR-15, που είναι η εμπορική πολιτική έκδοση του M-16.

Έρευνα έχει γίνει και στην κατασκευή κατευθυνόμενων πυραύλων. Η εταιρεία Raytheon προσπαθεί να εκτυπώσει τα ηλεκτρονικά και τη δομή και μετά να τα ενσωματώσει ως σύνολο, ενώ στο επόμενο βήμα προσβλέπει να εκτυπώνονται όλα μαζί ως ολοκληρωμένο σύστημα.



Εικόνα 70. 3D εκτυπωμένος πύραυλος

Το Αμερικάνικο Ναυτικό από τον Σεπτέμβριο του 2016 διενεργεί δοκιμές με τρισδιάστατα τυπωμένα πυρομαχικά. Τα πυρομαχικά αυτά αποδεικνύονται πιο θανατηφόρα σε σχέση με τα παραδοσιακά κατασκευασμένα. Μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, με το προσαρμόζονται ανάλογα την αποστολή, για να επιτυγχάνονται συγκεκριμένα αποτελέσματα για τους ιδιαίτερους στόχους, ύψη, παράπλευρη ζημιά, ή ακόμα και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις. Μερικά από αυτά μπορούν να γίνουν αυτήν την περίοδο με πολύ ακριβά, χειροποίητα πυρομαχικά, αλλά με την 3D εκτύπωση θα μπορούν να γίνονται καλύτερα, γρηγορότερα και πιθανώς φτηνότερα. Κατά την παρούσα χρονική στιγμή το κόστος είναι απαγορευτικό για την παραγωγή σημαντικών μερών, χρειάζονται περισσότερες δοκιμές και αξιολογήσεις προτού να μπορέσουν να ενσωματωθούν σε μία μεγαλύτερη αλυσίδα εφοδιασμού.

Ωστόσο και ο στρατός σχεδιάζει νέα σχήματα για τις κεφαλές πυραύλων ώστε η έκρηξη

να δημιουργεί αποτελέσματα που πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια, όπως τα θραύσματα της έκρηξης να διασκορπίζονται σε ειδικά μεγέθη και σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Η κατευθυνόμενη έκρηξη μπορεί να οδηγήσει σε επιθέσεις ακόμα μεγαλύτερης ακριβείας.

8.6. Μη επανδρωμένα οχήματα-ρομπότ.

Ο στρατός και ερευνητικά πανεπιστήμια έχουν ξεκινήσει την κατασκευή τόσο εξαρτημάτων για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) όσο και ολόκληρη διάταξη UAV. Κατηγορίες των UAVs, είναι τα small UAVs και τα micro UAVs (MAVs) που βρίσκουν έτοιμες εφαρμογές τόσο στο φάσμα των πολιτικών όσο και των στρατιωτικών αποστολών που σχετίζονται με την επιτήρηση, τη φωτογράφιση και την αναγνώριση (Udayagiri, Kulkarni, Esakki, Pakiriswamy & Yang, 2015). Στο ναυτικό μπορούν τα ηλεκτρονικά μέρη των UAVs, τα οποία είναι κοινά στα περισσότερα από αυτά, να διατηρούνται στα πλοία, επιτρέποντας διαφορετικούς τύπους UAVs να κατασκευάζονται όταν διαφορετικοί τύποι επιχειρήσεων το απαιτούν.

Επίσης τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές αιχμής από τους στρατιώτες στη μάχη. Το Εργαστήριο Ερευνών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Research Lab-ARL) δημιούργησε ένα 3D τυπωμένο UAV, ως προς το σασί του, και το οποίο θα μπορεί να κατασκευαστεί σε μόλις 24 ώρες και να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία, την παράδοση και την εναέρια επιτήρηση. Είναι ικανό να πετά με 88 χιλιόμετρα/ώρα αυτόνομα ή με τηλεχειρισμό.



Εικόνα 71. 3D εκτυπωμένο UAV

Πείραμα διενεργήθηκε από το Γραφείο Στρατηγικών Δυνατοτήτων του Πενταγώνου

**Εικόνα 72. 3D εκτυπωμένο micro UAV**

(Pentagon's Strategic Capabilities Office-SCO), με micro UAV, βάρους 0,5 κιλό περίπου, τα οποία διασκορπίζονται, σε σμήνος, από το σύστημα άφησης αναλωσίμων των μαχητικών αεροσκαφών. Με αλεξίπτωτο εντός μικρού μεγέθους δοχεία, ελευθερώνονται τελικά για να πετάξουν. Πιθανή τους χρήση είναι η σύγχυση των αντίπαλων δυνάμεων και διενέργεια πιο αποδοτικών αποστολών επιτήρησης. Τα ανωτέρω μπορούν να αναπτύσσονται και από τα χερσαία στρατεύματα.

Η Stratasys και η Aurora Flight Sciences κατασκεύασαν το 2015 το πρώτο 3D εκτυπωμένο UAV. Έχει άνοιγμα φτερών 2,74 μέτρα, βάρος 15 κιλά περίπου, είναι ικανό να αγγίζει ταχύτητα 240 χιλιομέτρα/ώρα και είναι κατασκευασμένο κατά 80% με 3D εκτύπωση.

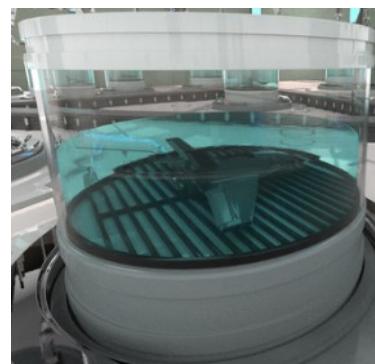
**Εικόνα 73. 3D εκτυπωμένο UAV από την Stratasys και την Aurora Flight Sciences**

Το Πανεπιστήμιο του Sheffield Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) μαζί με την Boeing σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα μικρό μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εναέρια έρευνα, φωτογράφιση και παρακολούθηση περιβάλλοντος. Το Πανεπιστήμιο της Virginia σχεδίασε και εκτύπωσε το razor, με 3D εκτυπωμένο τζετ κινητήρα, ταχύτητας 64 χιλιομέτρων την ώρα, που είναι και αυτό κατηγορίας UAV και μπορεί να μεταφέρει φορτίο, όπως μία κάμερα, 680 γραμμάρια.



Εικόνα 74. 3D εκτυπωμένα UAVs- το AMRC αριστερά και το razor δεξιά

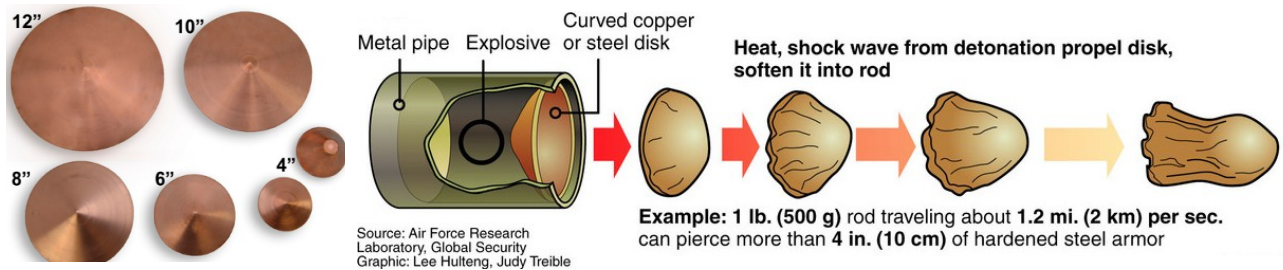
Ο Βρετανικός όμιλος άμυνας BAE Systems μαζί με επιστήμονες του Πανεπιστημίου της Γλασκώβης, οραματίζονται την εκτύπωση πλήρως λειτουργικών UAVs, όχι όμως με φυσικές διαδικασίες 3D εκτύπωσης, αλλά μέσω της χημικής αντίδρασης από εξατομικευμένα μόρια. Η ριζοσπαστική νέα μηχανή ονομάζεται Chemputer. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη θα μπορούν να παραχθούν σύμφωνα με τις μελλοντικές περιοχές χρήση τους. Τα πολύπλοκα σχήματα, η βασική δομή των μελλοντικών UAVs, αλλά και τα ηλεκτρονικά μέρη επί του σκάφους καθώς και τα κυκλώματα μεταγωγής ελπίζουν ότι θα μπορούν να παραχθούν στον αντιδραστήρα μέσα σε λίγες εβδομάδες αντί για χρόνια.



Εικόνα 75. Το Chemputer

Πέραν της επιτήρησης, τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως οπλικά συστήματα. Τα μικρά UAVs μπορούν να μεταφέρουν περιορισμένο ωφέλιμο φορτίο. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση κεφαλών πυραύλων Explosively Formed Penetrators (EFPs). Αυτές έχουν ειδικού σχήματος πλάκες χαλκού ή μετάλλου που παραμορφώνονται από την επίδραση της εκρηκτικής γόμωσης (LIU, GU, LU, XU & WU, 2014). Τα EFPs έχοντας χαμηλό βάρος, έχουν τη δυνατότητα διείσδυσης και καταστροφής ακόμα και θωρακισμένων οχημάτων. Ο πρωταρχικός περιορισμός στο πεδίο είναι η ανάγκη για υψηλής ποιότητας σχήματος πλακών χαλκού, που σχηματίζει το βλήμα όταν το φορτίο

εκτονώνεται. Μέχρι πρόσφατα, αυτή ήταν μια σημαντική πρόκληση που απαιτούσε έναν εξειδικευμένο μηχανικό με εργαλεία υψηλής ποιότητας. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια η 3D εκτύπωση έχει προχωρήσει σε σημείο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση ενός ευρύ φάσματος υλικών, συμπεριλαμβανομένου και του χαλκού.

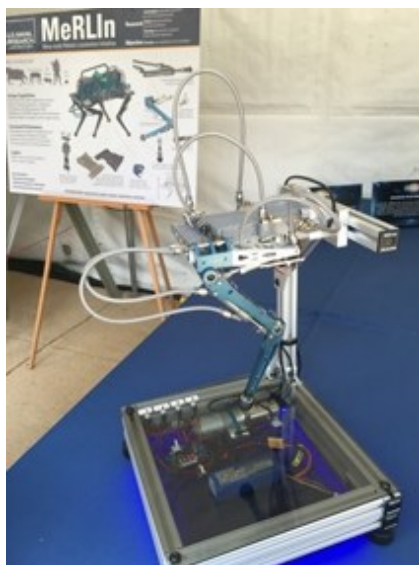


Εικόνα 76. Explosively Formed Penetrators (EFPs)

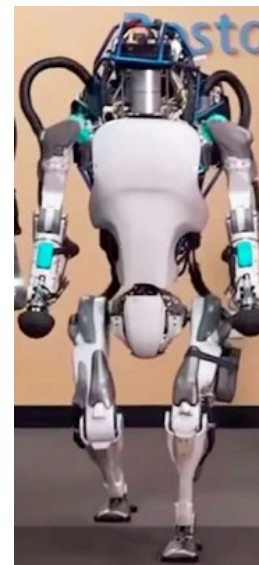


**Εικόνα 77. 3D εκτυπωμένο
ρομποτικό όχημα**

Η είσοδος των ρομποτικών εφαρμογών και στον στρατό, ενισχύει και τη χρήση της 3D εκτύπωσης. Τα εξαρτήματα που εκτυπώνονται, όταν χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή και τον σχεδιασμό, είναι πιο εύκολο να κατασκευαστούν και να τροποποιηθούν εάν μια αλλαγή σχεδίασης το απαιτεί. Ακόμη και οι αλλαγές στο σχεδιασμό παρέχουν μειωμένο κόστος και ταχύτερη παραγωγή πρωτοτύπων. Ακόμη σε κάποια σενάρια αν αποφασισθεί να σταλεί ρομπότ σε μια επιβλαβή περιοχή για τη συλλογή πληροφοριών / δεδομένων, χωρίς προοπτική επιστροφής, η απώλεια θα ελαχιστοποιηθεί αν είναι χαμηλότερης ποιότητας με φτηνά 3D εξαρτήματα (Γαρία, 2015). Επιπλέον, και στα πιο εξελιγμένα ρομπότ είναι απαραίτητα τα φθηνά πλαστικά μέρη να σχεδιαστούν έτσι ώστε να δοκιμαστεί και να ελεγχθεί ένα σχέδιο αν μπορεί να ολοκληρώσει το έργο του πριν από τη δέσμευση για την κατασκευή ενός ρομπότ από μέταλλο ή ανθρακονήματα. Αυτό βοηθά στην εξάλειψη απρόβλεπτων λαθών στο στάδιο του σχεδιασμού, θέτοντας το κόστος των λαθών στα πλαστικά μέρη έναντι των πιο ακριβών ομολόγων του.

**Εικόνα 79. Το MeRLIn**

Το Ναυτικό εργαστήριο έρευνας χρησιμοποιεί την 3D εκτύπωση για την κατασκευή του Meso-scale Robotic Locomotion Initiative (MeRLIn), ενός υδραυλικού ρομπότ που έχει ως στόχο να βελτιώσει το σχεδιασμό στα ογκώδη πόδια του συστήματος (Squad Support) ή ρομποτικό μουλάρι, το οποίο μπορεί να μεταφέρει μέχρι 400 κιλά εξοπλισμό για τα στρατεύματα.

**Εικόνα 78. Το Άλφα της Boston Dynamics**

Η Boston Dynamics αποκάλυψε το τελευταίο ρομπότ της, το Άλφα, που όχι μόνο έδειξε μια αξιοσημείωτη ικανότητα να περπατήσει, αλλά είναι ένας εμφανώς πιο κομψά και συμπαγής σχεδιασμός από τους προκατόχους του. Εν μέρει, αυτό συμβαίνει επειδή το Alpha κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας 3D εκτύπωση για να ενσωματώσει πολλά συστατικά κατευθείαν στη δομή του ρομπότ.

Η 3D εκτύπωση μπορεί επίσης να συνδυαστεί με τη ρομποτική για να σχηματίσουν ένα κομψό εξωσκελετό που να επιτρέπει τους στρατιώτες να μεταφέρουν τεράστια φορτία χωρίς να κουράζονται.

8.7. Εξατομίκευση.

Ακόμα, η τεχνολογία επιτρέπει την προσαρμογή, δηλαδή την εξατομίκευση μίας μεγάλης ποικιλίας συσκευών. Χαρακτηριστικά τα οποία έχουν επιλεγεί ώστε να ταιριάζουν απόλυτα στο χρήστη ή στο χώρο που θα λειτουργεί η συσκευή, μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτήν δημιουργώντας μοναδικά τεμάχια.

Στο πεδίο της μάχης, οι στρατιώτες πρέπει να επιδιώξουν την κάλυψη τους με προστατευτικό εξοπλισμό καμουφλάζ από τα πυρά του εχθρού, ανά πάσα στιγμή, για να προστατεύσουν τον εαυτό τους και να μπερδεύουν τον εχθρό. Όσο για το φράγμα κάλυψης, τους ψευδούς στόχους, τη βλάστηση, τα δίκτυα κάλυψης και καμουφλάζ και άλλο εξοπλισμός, η εμφάνιση, το μέγεθος και το χρώμα τους πρέπει να είναι συνεπής με τον περιβάλλοντα φόντο, το βάρος του θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο και να διαθέτει εύκολη διάταξη. Η 3D εκτύπωση μπορεί να προσαρμόσει τον προστατευτικό εξοπλισμό καμουφλάζ στο πεδίο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τα εξατομικευμένα χαρακτηριστικά, έτσι ώστε ο στόχος να κρύβεται καλύτερα.

Η κατασκευή των υποδημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί σαρώνοντας το πέλμα του στρατιώτη δημιουργώντας το τρισδιάστατο μοντέλο που θα εφαρμόζει απόλυτα στο χρήστη, με σχεδιασμό και κατασκευή συγκεκριμένων ειδικών χαρακτηριστικών κατά τη διαδικασία παραγωγής του. Ο ρόλος είναι πολλαπλός αφενός θα προσφέρει μεγαλύτερη άνεση,



Εικόνα 80. 3D σαρωτής ποδιών

μεγιστοποίηση της απόδοσης, προστασία από τραυματισμούς, αφετέρου θα μειώσει την εφοδιαστική αλυσίδα με ελαχιστοποίηση του αποθέματος που δημιουργείται από μεγέθη που παραγγέλνονται αλλά τελικώς παραμένουν αχρησιμοποίητα.

Ο στρατός μελετά τρόπους για να εκτυπώνει διηλεκτρικές κεραίες, ακόμη και από μη αγώγιμα υλικά, όπως κεραμικά ή πλαστικό, καθώς και ηλεκτρονικά κυκλώματα πολλαπλών υλικών.



Εικόνα 81. 3D τυπωμένα κυκλώματα και κεραία

Ερευνητές στο Picatinny Arsenal έχουν από καιρό οραματιστεί τη δυνατότητα ενσωμάτωσης κεραίας στο κράνος του στρατιώτη, ή 3D εκτυπωμένοι αισθητήρες που παρακολουθούν την κατάσταση απ' ευθείας πάνω σε ένα όπλο ή ένα ρούχο.

8.8. Εφοδιαστική αλυσίδα – Βιωσιμότητα – Βελτιστοποίηση.

Πολλά οπλικά συστήματα έχουν αποκτηθεί προ ετών και είναι δεδομένο ότι θα παραταθεί η διάρκεια ζωής για πολλά χρόνια ακόμα. Ενώ η βασική αποστολή πολλών τέτοιων συστημάτων δεν έχει αλλάξει από τις αρχικές επιχειρησιακές απαιτήσεις, και πολλά από τα υποσυστήματα έχουν υποστεί αναβαθμίσεις, το πέρασμα του χρόνου και η έκθεση στις καιρικές συνθήκες απαιτούν περιστασιακές αντικαταστάσεις ή επισκευή των δομικών μερών. Καθώς συμβαίνει αυτό, οι προμηθευτές μπορεί να μην υπάρχουν πλέον, οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται να είναι παρωχημένες, τα κράματα μετάλλων που είχαν αρχικά οριστεί μπορεί να μην είναι πλέον διαθέσιμα, τα εργαλεία να έχουν καταστραφεί, τα αποθέματα να έχουν εξαντληθεί από καιρό, αν υπήρχαν καθόλου, και τα αρχικά τεχνικά στοιχεία να υπάρχουν μόνο σε έντυπη μορφή, αν όχι καθόλου (Freitag, Wohlers & Philippi, 2003).

Όταν ένα στοιχείο δεν υπάρχει σε απόθεμα, η αλυσίδα εφοδιασμού καθυστερεί μήνες να ανταποκριθεί (γραφειοκρατεία, διαγωνιστικές διαδικασίες, χρόνος παραγωγής και αποστολής). Ενώ αν είναι δύσκολο να βρεθεί το εξάρτημα, συνήθως είναι αυτό που χρήζει άμεσης χορήγησης. Οι προμηθευτές συχνά απαιτούν έναν αριθμό ελάχιστων παραγγελιών, που υπερβαίνουν κατά πολύ το κόστος αγοράς μικρών παρτίδων. Έτσι η διαδικασία αυτή μετατρέπει ένα φθηνό εξάρτημα σε απαγορευτικού κόστους δαπάνη. Μερική απαξίωση δεν εμφανίζεται μόνο στα οπλικά συστήματα, αλλά σε πολλές περιπτώσεις και στην υποδομή που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση ή την κατασκευή οπλικών συστημάτων ή / στα μέσα που

χρησιμοποιούνται. Και όταν η εφοδιαστική αλυσίδα καθυστερεί μπορεί να αφήνει εκτός λειτουργίας ολόκληρο σύστημα ή μέσο.

Η συντήρηση των γερασμένων οπλικών συστημάτων και μέσων, καθώς και η κατασκευή πολύπλοκων εξαρτημάτων που έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την απαίτηση υψηλής διαθεσιμότητας και μείωσης του κόστους που συνδέεται με τη συντήρηση, είναι σαφώς η μεγαλύτερη μακράς διαρκείας ευκαιρία για την εφαρμογή της 3D εκτύπωσης. Οι 3D εκτυπωτές έχουν το μοναδικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να παράγουν ακριβώς τι είναι αναγκαίο όσο είναι επιλεγμένο το επιθυμητό αντικείμενο για εκτύπωση.

Η αυτοκινητοβιομηχανία που ήδη χρησιμοποιεί την 3D εκτύπωση και συγκεκριμένα η Mercedes-Benz, έχει αρχίσει στα φορτηγά που κατασκευάζει να ψηφιοποιεί τα ανταλλακτικά εξαρτήματα και να δημιουργεί ψηφιακούς καταλόγους για τους πελάτες. Οπότε στο προσεχές μέλλον η διάρκεια ζωής των κατεχόμενων μέσων-φορτηγών του στρατού, για τα οποία έχουν δημιουργηθεί ψηφιακοί κατάλογοι, θα παραταθεί ανεμπόδιστα καθώς τα ανταλλακτικά θα είναι πάντα διαθέσιμα και σε λογικό κόστος.

Δεν έχει έννοια, όλα τα ανταλλακτικά να κατασκευάζονται με 3D εκτύπωση. Ο όγκος ανταλλακτικών σε αριθμό είναι τεράστιος και επιπλέον σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι και ασύμφορη η εκτύπωσή τους. Συνεπώς πρέπει να καθορίζονται εκείνα που χρίζουν απαραίτητης κατασκευής μέσω 3D εκτύπωσης. Η κινητήρια δύναμη λήψης απόφασης είναι η ετοιμότητα και η ζήτησή τους (Morgan & Prentiss, 2014). Η ετοιμότητα εμπεριέχει προκαθορισμένα απαιτούμενα επίπεδα διαθεσιμότητας που προέρχονται από τις συμβάσεις, με βάση την κρισιμότητα της αποστολής και την πολιτική για την επιχειρησιακή διαθεσιμότητα. Η διαθεσιμότητα εκτιμάται από την έλλειψη άμεσα διαθέσιμων ανταλλακτικών για τα οπικά συστήματα και τα υποσυστήματα που επίσης ονομάζονται μη υποστηριζόμενα μέρη. Μια άλλη μορφή της διαθεσιμότητας είναι η ανησυχία αμεσότητας της διάθεσης. Η απαξίωση ή η απαρχαίωση του συστήματος, η εγκατάλειψη του

κατασκευαστή ή και η εξαφάνιση του πωλητή είναι όλοι συνηθισμένοι λόγοι για μη διαθεσιμότητα. Επιπλέον συνυπολογίζεται η κρισιμότητα με βάση του ποσοστού της υποβάθμισης που λαμβάνει χώρα όταν η απουσία ενός λειτουργικού εξαρτήματος συνεισφέρει στο επιχειρησιακό στόχο. Από την άλλη πλευρά η ζήτηση τους βασίζεται στους διαπιστωμένους ρυθμούς αντικατάστασης. Η συχνότητα αποτιμάται με βάση του αριθμού των ιδίων ανταλλακτικών που απαιτούνται για ένα χρονικό διάστημα και μπορεί να οφείλεται στα υψηλά ποσοστά αποτυχίας ή κατανάλωσης του.

8.9. Συντηρήσεις εγκαταστάσεων – πεδίου.

Στην Αμερική σε κεντρικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις συντήρησης και επισκευής, όπου ο χώρος, η ενέργεια και οι περιβαλλοντικές συνθήκες το επιτρέπουν, φιλοξενούνται και 3D εκτυπωτές. Επί του παρόντος χρησιμοποιούνται για ανταλλακτικά και επανασχεδιασμό, όπου οι δυνατότητες και η εμπειρία γενικά ανταλλάσσεται μέσω δικτύου χρηστών. Η επισκευή έχει εφαρμογή στην αντικατάσταση των λιγότερο κρίσιμων τμημάτων, όπως βραχίονες, ηλεκτρικές συνδέσεις, και εξαρτήματα. Στη σχεδίαση η βελτιστοποίηση είναι σημαντικός παράγοντας, που μπορεί να οδηγήσει σε ελαφρύτερο προϊόν, σε σχέση με ένα κατασκευασμένο με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, με τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες και οικονομικότερο λόγω μειωμένης χρήσης υλικού.

Η δημιουργία βάσης δεδομένων – ηλεκτρονικών καταλόγων, για κρίσιμα ανταλλακτικά είναι απαραίτητη. Αυτή πραγματοποιείται μέσω της αντίστροφης σχεδίασης (πχ 3D σάρωση) και της επανασχεδίασης επιτρέποντας τη δημιουργία 3D δεδομένα τεκμηρίωσης των φυσικών αντικειμένων διαφόρων μεγεθών, και τη μετέπειτα επεξεργασία των εν λόγω δεδομένων για την αναπαραγωγή, τη δοκιμή ή την αναβάθμιση ενός αντικειμένου. Συντηρήσεις και επισκευές δεν λαμβάνουν χώρο μόνο σε εγκαταστάσεις, αλλά πραγματοποιούνται και στο πεδίο. Στις

σιληρές συνθήκες μάχης, αν πρέπει να αντικατασταθούν κατεστραμμένα τμήματα όπλων, το τεχνικό προσωπικό υποστήριξης θα μπορεί γρήγορα μέσα από βάση δεδομένων, να εκτυπώσει, μέσω αρχείου που θα έχει στο πεδίο ή θα του αποστείλουν, τα απαραίτητα εξαρτήματα. Μετά την απλή συναρμολόγηση, τα κατεστραμμένα όπλα θα είναι σταθερά και έτοιμα να επιστρέψουν στο πεδίο της μάχης, το οποίο θα μειώσει σημαντικά την πίεση της υποστήριξης παραγωγής.

Τα πλοία διαθέτουν ένα μικρό μηχανουργείο και μικρό αποθηκευτικό χώρο για βασικά εξαρτήματα επισκευής. Οι απαιτητικές επισκευές πραγματοποιούνται από μεγάλα πλοία επισκευών. Στη θάλασσα το περιβάλλον είναι σκληρό για τους 3D εκτυπωτές (δονήσεις μηχανών, αναταράξεις θάλασσας, υγρασία), αλλά σε μεγάλα πλοία το πρόβλημα ελαχιστοποιείται. Στα επιθετικά αμφίβια πλοία USS Essex και USS Kearsarge καθώς στο αεροπλανοφόρο Harry Truman, έχει ήδη εγκατασταθεί 3D εκτυπωτής. Το πλήρωμα κατασκευάζει από ιατρικές προμήθειες (όπως πλαστικές σύριγγες) βίδες, γαλλικό κλειδί, καπάκια σιόνης, μέχρι και κάλυμμα που έχει σχεδιαστεί για μια δεξαμενή πετρελαίου, αλλά δεν αναμένεται σύντομα να εκτυπώνονται σύντομα ανταλλακτικά μέρη για τα αεροπλάνα.



**Εικόνα 82. 3D
εκτυπωμένο κάλυμμα
δεξαμενής πετρελαίου**

Ο αμερικανικός στρατός επίσης έχει αναπτύξει ικανότητα να παράγει επείγοντα ανταλλακτικά για τον χαλασμένο εξοπλισμό στο πεδίο ή κοντά στη ζώνη ενδιαφέροντος. Ανέπτυξε κινητά μίνι-εργοστάσια, μέσα σε κοντέινερ, τα οποία μεταφέρονται εύκολα τοποθετημένα σε φορτηγά ή εναέρια ή μπορεί να εγκατασταθούν σε ένα κατάλληλο πλοίο. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει την ταχεία επισκευή και επιστροφή του εξοπλισμού σε λειτουργία.

Ένα τέτοιο σύστημα είναι το «Νοσοκομείο κινητών εξαρτημάτων (Mobile Parts Hospital -MPH)» (Gino Balistreri, 2015). Κατά την πλήρη επέκτασή του καταλαμβάνει χώρο περίπου 6 μέτρα x 7,3 μέτρα. Περιλαμβάνει γεννήτρια, 3D εκτυπωτή, εργαλειομηχανή CNC (vertical machining center-VMC), δορυφορική επικοινωνία για ανάκτηση δεδομένων παραγωγής μέσω δορυφόρου από μία μεγάλη βάση δεδομένων και έναν 3D λέιζερ σαρωτή για την περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Ο 3D εκτυπωτής είναι τεχνολογίας «Επιλεκτικής Σύντηξης με την Χρήση Ακτίνων Λέιζερ (Selective Laser Sintering – SLS)» και μπορεί να παράγει εξαρτήματα χρησιμοποιώντας μεταλλικά, πλαστικά, ελαστικά ή κεραμικά υλικά.



Εικόνα 84. Το Mobile Parts Hospital -MPH

Η υπηρεσία «Ταχείς πολεμικός εξοπλισμός (Rapid Equipping Force- REF)» ανέπτυξε



Εικόνα 83. Το Rapid Equipping Force- REF

και υλοποίησε Επιστρατευτικά Εργαστήρια (Expeditionary Labs- Ex Lab) για το Αφγανιστάν και το Κουβέιτ (Mcardle, 2015). Κάθε Ex Lab είναι εξοπλισμένο με δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών, εργαλειομηχανή CNC, 3D εκτυπωτή, εργαλεία κατασκευής, οξυγονοκολλητή, κόπτη πλάσματος, μικροσκόπιο, επεξεργασία δεδομένων και αριθμητική προσομοίωση, διάφορα εργαλεία χειρός και εκ των προτέρων πρώτες ύλες.

8.10. Ιατρική-Βιοιατρική-Οδοντιατρική-Φαρμακευτική.

Η γενίκευση της αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering) και της 3D εκτύπωσης στην βιοϊατρική μπορεί να συμβάλλει στη μείωση του κόστους της σχεδίασης, της υλοποίησης και της εφαρμογής νέων θεραπευτικών προσεγγίσεων (καθώς επίσης και της βελτιστοποίησης των υπαρχόντων), να επιταχύνει την ανάπτυξη της εξατομικευμένης ιατρικής (θεραπεία προσαρμοσμένη στον ασθενή) και να βελτιώσει το ταίριασμα των ιατρικών προϊόντων (εργαλεία, ορθοπεδικό εξοπλισμό και φάρμακα) για τις ανάγκες της θεραπείας / ενός στρατιώτη. Η σωστή θεραπεία για το σωστό ασθενή στο σωστό χρόνο, θα γίνουν πιο προσιτές και θα μεταφραστεί όχι μόνο στην αύξηση της αποτελεσματικότητας της θεραπείας, αλλά συντομότερη νοσηλεία.

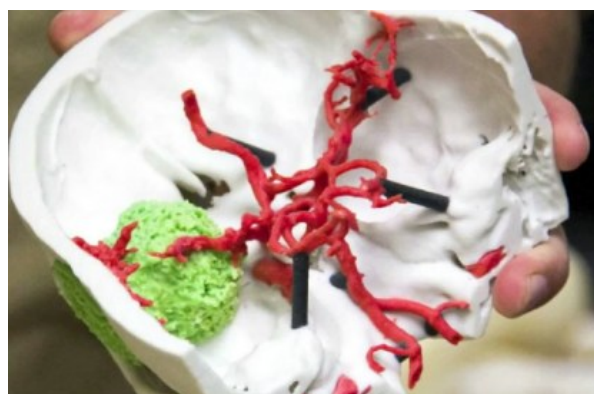
Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί επίσης στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην 3D εκτύπωση, καθιστώντας δυνατά ακόμη και τα αντικείμενα που είναι κατασκευασμένα από οργανική ύλη (McNulty, Arnas, & Campbell, 2012). Η δυνατότητα εκτύπωσης της 3D βιοεκτύπωσης του δέρματος και των άλλων οργάνων, μπορεί να επιφέρει πιο αποτελεσματικό σύστημα υγείας, με εξάλειψη των απορρίψεων λόγω των βλαστικών κύτταρων των στρατιωτών που χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση. Οι βιολόγοι έχουν επίσης τη δυνατότητα να εκτυπώσουν τις φλέβες και τη λειτουργία του καρδιακού ιστού. Η ανάπτυξη

των βιοεκτυπωτών (bioprinters) θα μπορούσε να παρέχει πιο άμεση θεραπεία στις πληγές των στρατιωτών στο πεδίο της μάχης, μειώνοντας έτσι τις απώλειες σε ανθρώπινες ζωές.

Στο πεδίο της μάχης μπορεί να γίνει παραγωγή ιατρικών εξαρτημάτων και εξοπλισμού διάσωσης. Μπορούν να εκτυπωθούν ιατρικές προμήθειες, όπως υποστηρικτικοί βραχίονες, σφήνες κλπ για τους ασθενείς που πάσχουν από κάταγμα. Επίσης, μπορούν να εκτυπωθούν ειδικά γυαλιά ή γυαλιά για ασθενείς με τραυματισμένα μάτια, ειδικά παπούτσια για τους ασθενείς που έχουν πληγωμένα πόδια, αρθρώσεις εκτύπωσης για τους τραυματίες που έχουν υποστεί βλάβη της άρθρωσης.



Εικόνα 85. 3D εκτυπωμένη σφήνα



**Εικόνα 86. 3D εκτυπωμένο μοντέλο
κρανίου**

Η 3D εκτύπωση διευκόλυνε εκ των προτέρων την χειρουργική προετοιμασία και την εξατομικευμένη φροντίδα του ασθενούς, επιτρέποντας την ανάπτυξη συγκεκριμένου σχεδίου θεραπείας για τον ασθενή μέσω της εκτύπωσης της ανατομίας του ασθενή (Drushal, 2014). Έχοντας ένα από παράδειγμα της ανατομίας του ασθενή που μπορεί να μελετηθεί

πριν από την εγχείρηση, χρησιμεύει για την καλύτερη προετοιμασία των ιατρών, από το να βασίζονται αποκλειστικά στις εικόνες 3D που έχουν αποκτηθεί από αξονική (CT) ή μαγνητικής τομογραφίας (MRI) σάρωση, που προβάλλονται σε μια επίπεδη οθόνη (Gross, Erkal, Lockwood, Chen, & Spence, 2014). Επιπλέον, έχοντας ένα ακριβές αντίγραφο της ανατομίας επιτρέπει για ιατρικές διαδικασίες προσομοίωσης εκ των προτέρων. Υπάρχουν ήδη πολλές περιπτώσεις όπου τα 3D εκτυπωμένα μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί για να αποκτηθεί

γνώση της ειδικής ανατομίας ενός ασθενούς πριν την εκτέλεση μιας ιατρικής διαδικασίας. Επιπλέον βοηθούν στην εκπαίδευση του επεμβαίνοντος σε λεπτές κινήσεις στο τρισδιάστατο ρεαλιστικό μοντέλο.

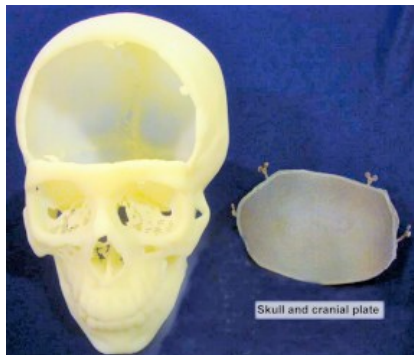
Με τη χρήση της αξονικής (CT) ή της μαγνητικής τομογραφίας (MRI) και λογισμικού, μέσω αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering), μπορούν να απεικονιστούν με ακρίβεια συγκεκριμένα φυσικά χαρακτηριστικά, να αναλυθούν και να διαμορφωθούν κατάλληλα. Επιπλέον, επιτρέπει και διευκολύνει το σχεδιασμό εξατομικευμένων, τέλειας τοποθέτησης εμφυτευμάτων και πλάκων απ' ευθείας επί των μοντέλων ασθενούς, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να εκτυπωθούν σε διάφορα υλικά, όπως τιτάνιο.

Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μεταξύ άλλων χρήσεων και για την κατασκευή οδηγών, προσαρμοσμένων εμφυτευμάτων, συσκευών αποκατάστασης (Mikolajewska, Macko, Mikolajewski, Ziarnicki, Stańczak & Kawalec, 2016). Ο αντίκτυπος που μπορεί να έχει η τρισδιάστατη εκτύπωση στην ιατρική είναι μεγάλος. Προς το παρόν, η τεχνολογία εφαρμόζεται περισσότερο στη δημιουργία προσθετικών μελών και εμφυτευμάτων. Οι ταχύτητες κατασκευής είναι πολύ μεγαλύτερες. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι τα νέα προσθετικά μέλη κατασκευάζονται εύκολα προσαρμοσμένα στις ανάγκες κάθε ατόμου ξεχωριστά. Αυτό είναι σημαντικό, αφού κάθε άνθρωπος είναι μοναδικός. Καθένας έχει τις δικές του αναλογίες ή και διαφορετικό περπάτημα.



**Εικόνα 87. 3D
εκτυπωμένο
προσθετικό μέλος**

Από το 2003 στο Εθνικό Στρατιωτικό Ιατρικό Κέντρο Walter Reed στο Μέριλαντ, έχουν εκτυπωθεί πάνω από 7.000 ιατρικά μοντέλα, περισσότερες από 300 κρανιακές πλάκες και περισσότερα από 50 προσαρμοσμένες συσκευές και εξαρτήματα πρόσθεσης και αποκατάστασης, τόσο ως μοντέλα προσομοίωσης όσο και κατάρτισης. Οι γιατροί, μπορούν να αποκαταστήσουν το πρόσωπο του ασθενούς, σχεδόν όπως ήταν πριν το τραυματισμό.



Εικόνα 88. 3D εκτυπωμένο κρανίο και πλάκα εμφύτευσης

Χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα λογισμικά ανατομίας, όπως είναι το Mimics Innovation Suite και το 3-matic, μπορούν να δημιουργήσουν την πλευρά του, που έχει υποστεί βλάβη, καθρεφτίζοντας την άλλη πλευρά, εφόσον δεν έχει αλλοιωθεί από το ατύχημα, και την ανοικοδομούν. Επιπλέον παράγονται ειδικά εξαρτήματα για τον ασθενή, όπως κρανιακά εμφυτεύματα, σε 1 έως 5 ημέρες, και τα μέρη αυτά χρησιμοποιούνται στους ασθενείς. Εκτυπωτές στο ίδιο Στρατιωτικό Νοσοκομείο χρησιμοποιούνται για οδοντιατρική χρήση όπως προχειρουργικοί νάρθηκες για τοποθέτηση εμφυτευμάτων.

Χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα λογισμικά ανατομίας, όπως είναι το Mimics Innovation Suite και το 3-matic, μπορούν να δημιουργήσουν την πλευρά του, που έχει υποστεί βλάβη, καθρεφτίζοντας την άλλη πλευρά, εφόσον δεν έχει αλλοιωθεί από το ατύχημα, και την ανοικοδομούν. Επιπλέον παράγονται ειδικά εξαρτήματα για τον

ασθενή, όπως κρανιακά εμφυτεύματα, σε 1 έως 5



Εικόνα 89. 3D εκτυπωμένος οδηγός εμφυτευμάτων

8.11. Εκπαίδευση

Στις στρατιωτικές ακαδημίες κατά την διδασκαλία απαιτούνται εκπαιδευτικά βοηθήματα για την πληρέστερη κατανόηση του μαθήματος. Στα πρακτικά μαθήματα γίνεται προσομοίωση και εξάσκηση με πραγματικά μηχανήματα, εργαλεία ή ανταλλακτικά, τα οποία έχουν αυξημένο κόστος λόγω προμήθειας, αλλά και λόγω φθοράς, ιδίως εκείνα στα οποία πραγματοποιείται συνεχής αποσυρναμολόγηση-συναρμολόγηση. Χρησιμοποιώντας την 3D εκτύπωση μπορούν να κατασκευαστούν τα ίδια μηχανήματα-ανταλλακτικά, με ποιότητα εφάμιλλη του γνησίου για την επίτευξη του σκοπού οικονομικότερα. Το τμήμα NSWCDahlgren του «Combat Direction Systems Activity», στην Βιρτζίνια κατασκεύασε εκπαιδευτική βαλβίδα ρύθμισης ροής (Global Valve). Το αρχικό κόστος ήταν 50.000 δολάρια, ενώ το εκτυπωμένο κόστισε 500 δολάρια.



**Εικόνα 90. 3D εκτυπωμένη εκπαιδευτική
νάρκη**

Για προφανείς λόγους, το στρατιωτικό προσωπικό δεν μπορεί να εκπαιδευτεί με πραγματικές νάρκες, οπότε χρησιμοποιούνται παρόμοιες εκπαιδευτικές συσκευές που κοστίζουν 600-700 δολάρια το τεμάχιο. Η EOD Life είναι μία μικρή εταιρεία που σχεδιάζει να πουλήσει εκπαιδευτικές συσκευές, καθώς και συλλογής εκρηκτικών μηχανισμών. Η νάρκη που προσφέρει

είναι 3D εκτυπωμένη και έχει κόστος 75 δολάρια το τεμάχιο.

8.12. Η 3D εκτύπωση τροφίμων.

Η υιοθέτηση της χρήσης της τεχνολογίας εκτύπωσης τροφίμων για χρήση από τα στρατεύματα είναι το επόμενο βήμα. Ερευνητικές ομάδες σε διάφορες εγκαταστάσεις του Στρατού, και κυρίως στο Κέντρο Στρατιώτη Natick Έρευνας, Ανάπτυξης και Μηχανολογίας (NSRDEC) στη Μασαχουσέτη, εργάζονται για την ανάπτυξη 3D εκτυπωτών τροφίμων, που θα είναι προσαρμοσμένοι για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των απομακρυσμένων περιοχών των στρατιωτικών επιχειρήσεων. Οι στρατιώτες σε όλο τον κόσμο θα μπορούν να προσβλέπουν στην άμεση δημιουργία μερίδας φαγητού επί τόπου. Σύμφωνα με τους ερευνητές του NSRDEC θεωρείται μια πολύ λιγότερο δαπανηρή εναλλακτική λύση, από το να έχουν τα τρόφιμα που παράγονται με συμβατικό τρόπο να αποστέλλονται στο εξωτερικό, οι οποίοι προσθέτουν ότι θα μπορούσε επίσης να προσφέρει στα στρατεύματα μια πολύ ευρύτερη ποικιλία γεύσεων από ό, τι θα ήταν ειδάλλως δυνατόν.

Η 3D εκτύπωση τροφίμων μπορεί να εφαρμοστεί στα γεύματα πρώτης ζήτησης ή και στην παραγωγή και μπορεί να συμβάλει στην καλή διατροφή. Οι εκτυπωτές μπορούν να βοηθήσουν στο να περιοπέι το ποσό των χημικών προσθέτων στα τρόφιμα και να μειώσουν

την υπεργατανάλωση. Οι εκτυπωτές φαγητού μπορούν να επιτρέψουν ακόμη και παραμετροποίηση των συστατικών, εξατομικεύοντας τις ποσότητες ασβεστίου, πρωτεΐνης, ωμέγα-3, και των υδατανθράκων στα γεύματα.



Εικόνα 91. 3D εκτυπωμένη πίτσα

Ο αμερικάνικος στρατός θέλει να προσαρμόσει τη διατροφή σύμφωνα με τις ανάγκες του κάθε στρατιώτη, μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Ένας μυώδης στρατιώτης, για παράδειγμα, κατά πάσα πιθανότητα έχει διαφορετικές απαιτήσεις θερμίδων από έναν αδύνατο. Οι στρατιώτες έχοντας αισθητήρες τοποθετημένους στο σώμα τους, πιθανόν μέσω της στολής τους, θα συλλέγουν δεδομένα μετρήσεων της φυσιολογικής ή διατροφικής τους κατάστασης. Μόλις τα δεδομένα φτάνουν πίσω σε μια κατασκήνωση βάσης ή κουζίνας, θα μπορούν να δείξουν αν ένας στρατιώτης χρειάζεται πρωτεΐνη ή ότι είναι ξύπνιος για μεγάλο διάστημα και χρειάζεται κάποια επιπλέον καφεΐνη.

8.13. Δορυφόροι.

Έρευνα έχει πραγματοποιηθεί και στην εκτύπωση 3D εκτυπωμένων μικρών δορυφόρων. Οι δορυφόροι τύπου κύβου (Cube Sat) έχουν πολύ μικρές διαστάσεις και βάρος και μειωμένο κόστος ανάπτυξης και εκτόξευσης. Είναι κατασκευασμένοι σε τυπικές διαστάσεις (μονάδες Units ή U) 10cm x 10cm x 11,35cm και μπορεί να είναι 1U, 2U, 3U ή 6U σε μέγεθος και τυπικό βάρος 1,33 κιλά ανά μονάδα U. Στόχος τους είναι να παρέχουν μισό μέτρο ανάλυση με επανεξέταση του σημείου ενδιαφέροντος αρκετές φορές την ημέρα. Ο στρατός χρησιμοποιώντας τέτοιους δορυφόρους θα μπορεί να επιτηρεί σε σχεδόν πραγματικό χρόνο σημεία ενδιαφέροντος και κρίσιμες υποδομές (Hammes, 2016).

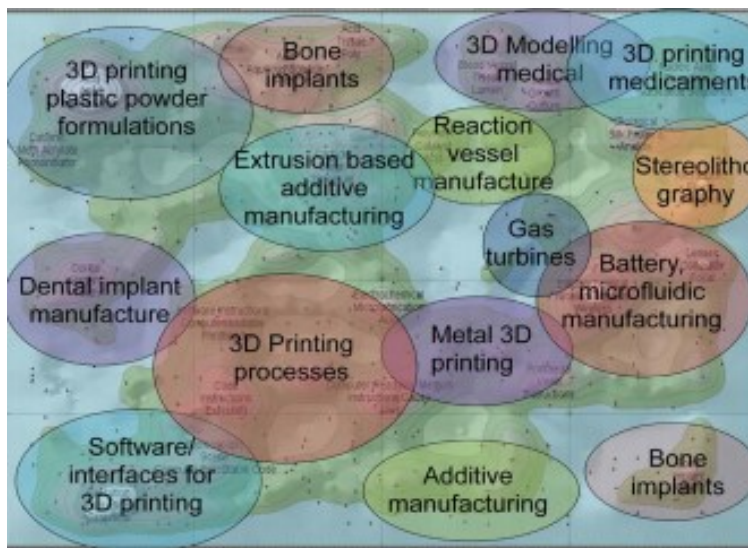


**Εικόνα 92. 3D εκτυπωμένα
μέρη δορυφόρου**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.

Επίλογος – συμπεράσματα- προτάσεις.

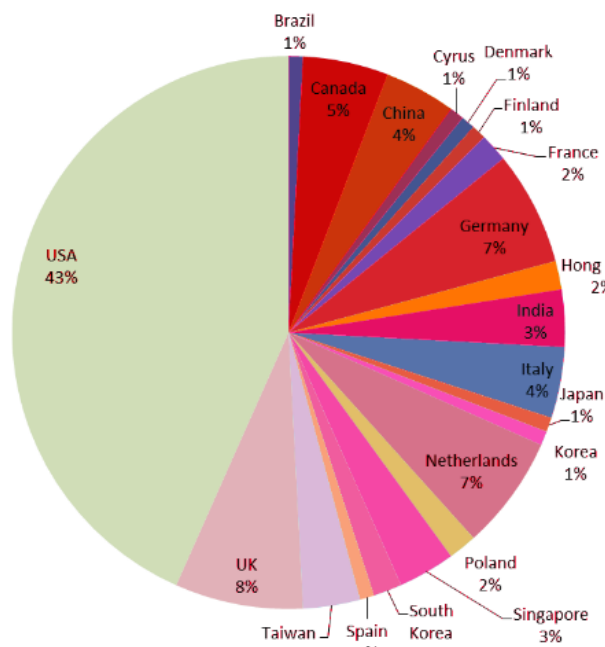
Η 3D εκτύπωση αποτελεί το μέλλον της παραγωγικής διαδικασίας. Στην εποχή μας, η έρευνα, ανάπτυξη και εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης συνεχίζεται με ταχύτατους ρυθμούς, σε πάρα πολλούς κλάδους με τεράστια περιθώρια εξέλιξης. Ολοένα και περισσότερες χώρες την χρησιμοποιούν, με μεγαλύτερο χρήστη την Αμερική. Οι τεράστιες



Εικόνα 93. Χάρτης διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σε τομείς ενδιαφέροντος

δυνατότητες της εισέρχονται ολοένα και περισσότερο στη ζωή των ανθρώπων, φέρνοντας την επανάσταση στον τομέα της κατασκευής.

Δίνει τη δυνατότητα για ταχύτερη και οικονομικότερη δημιουργία προτύπων, χωρίς όμως να αποκλείεται η επέκταση στη βιομηχανική παραγωγή μικρής κλίμακας. Μπορεί να επιτευχθεί ιδιαίτερα σημαντική εξοικονόμηση υλικού και χρόνου, καθώς και μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής σε πιο



Εικόνα 94. Χρήση της 3D εκτύπωσης

σύνθετα και πολύπλοκα εξαρτήματα, προσθέτοντας έτσι και το στρατηγικό πλεονέκτημα της ευελιξίας στο σχεδιασμό αντικειμένων. Ως εκ τούτου, είναι δυνατό να βελτιστοποιηθούν υπάρχοντα εξαρτήματα ή να κατασκευαστούν σύνθετα με σημαντικά μικρότερο αριθμό εξαρτημάτων, αυξάνοντας τη λειτουργικότητά τους και ελαχιστοποιώντας το χρόνο συναρμολόγησης και τη χρήση εργαλείων ή το κόστος της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε η διαδικασία, και πραγματοποιήθηκε έρευνα των λογισμικών, των υλικών, των μεθόδων και των τεχνολογιών. Με την ανάλυση τους, συμπεραίνεται ότι υπάρχει μια ποικιλία λογισμικών, τεχνολογιών και υλικών που προσφέρονται στην αγορά, και ανάλογα με την απαιτήσεως του σχεδιασμού και της χρηστικότητας του έργου, θα υπάρχει πάντα επιλογή που να ταιριάζει στις ανάγκες. Συμπερασματικά οι εφαρμογές σταματούν εκεί που σταματάει ο ανθρώπινος νους.

Στην Ελλάδα, παρά το φάσμα των εφαρμογών, δεν έχει γίνει ευρέως αποδεκτή η τρισδιάστατη εκτύπωση. Πραγματοποιούνται περιορισμένα βήματα κυρίως στην κατασκευή κοσμημάτων, στις οδοντιατρικές εφαρμογές, στη μηχανολογία με τη δημιουργία καλουπιών-φλαντζών και στην ψυχαγωγία με τη δημιουργία μινιατουρών. Η χρήση της δεν έχει βρει σημαντική ανταπόκριση ούτε από τις Ένοπλες Δυνάμεις.

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν πληθώρα στρατιωτικών εφαρμογών σε παγκόσμιο επίπεδο. Κάποιες από αυτές ενδείκνυται να χρησιμοποιηθούν και στις Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις, τόσο στον τομέα της προτυποποίησης, όσο και στον τομέα των ανταλλακτικών που είναι μείζονος σημασίας για την αποστολή των Ενόπλων Δυνάμεων. Αποθέματα ανταλλακτικών - εξαρτημάτων δεν χρειάζεται να διατηρούνται σε αποθήκες, τη στιγμή που μπορούν να αντικατασταθούν είτε μέσω της αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering), είτε μέσω της επανασχεδίασης με 3D μοντέλα και με την δυνατότητα να ανταποκρίνονται άμεσα στις ανάγκες, όταν αυτές το επιβάλλουν. Ο προγραμματισμός των αναγκών, οι δαπάνες και η γραφειοκρατία μπορούν να μειωθούν στο

σκέλος της προμήθειας-εγκατάστασης του εκτυπωτή, του υλικού κατασκευής και της συντήρησης του εκτυπωτή.

Αρχικά θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μελέτη σχετικά με τα ανταλλακτικά - εξαρτήματα κατηγοριοποιώντας τα κατά πόσο είναι μεγάλου κόστους απόκτησης, μεγάλης αναμονής παράδοσης, δυσεύρετα λόγω παλαιότητας, μείζονος σημασίας για άμεση χορήγηση. Επιπρόσθετα θα πρέπει να εγκατασταθεί κατάλληλος εκτυπωτής, βιομηχανικού τύπου σε Κεντρική Τεχνική Βάση, καθώς και να γίνει προμήθεια επαγγελματικού σαρωτή. Με βάση τα ανωτέρω δύναται να ξεκινήσει η δημιουργία βάσης δεδομένων - αποθετήριο 3D μοντέλων, για τα ανταλλακτικά που θα επιλεγούν, μέσω της αντίστροφης σχεδίασης (Reverse engineering), της επανασχεδίασης και της βελτιστοποίησης. Πέραν των ανωτέρω σε δεύτερο βαθμό η διαδικασία αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες εγκαταστάσεις, οι οποίες θα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός κοινού εσωτερικού δικτύου για διαμοιρασμό δεδομένων παραγωγής, από μία βάση δεδομένων και για ανταλλαγή της τεχνογνωσίας.

Εν κατακλείδι η υιοθέτηση της 3D εκτύπωσης από τις Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις είναι ιδιαίτερη σημαντική. Ωστόσο το υψηλό αρχικό κόστος προμήθειας και ο κίνδυνος που συνδέεται με τη χρήση τους (έλλειψη τεχνογνωσίας και πιστοποίησης ποιότητας των εκτυπωμένων εξαρτημάτων) εξακολουθούν να περιορίζουν τη διάδοσή τους. Η τεχνολογία της 3D εκτύπωσης είναι σε σχετικά πρώιμο στάδιο, και μπορεί να περάσουν χρόνια ή δεκαετίες πριν μπορέσει να επιτύχει επίπεδα εμπιστοσύνης συγκρίσιμα με εκείνα που διατίθενται από τις συμβατικές διαδικασίες κατασκευής.

Γενικότερα η τεχνολογία είναι εγγενώς μια βασική πτυχή του πολέμου, αλλά η τεχνολογική αλλαγή, από μόνη της, δεν αρκεί για να επιφέρει επιτυχημένη στρατιωτική καινοτομία. Ο στρατός θα αποκομίσει τα πλήρη οφέλη των αναφερομένων υπαρχουσών ή μελλοντικών τεχνολογικών λύσεων, μόνο εφόσον προβεί σε ουσιαστική οργάνωση και μεταρρύθμιση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κεφάλαιο 1.

- [1] Ed Forrest & Yong Cao, (2013), *Digital Additive Manufacturing: A Paradigm Shift in the Production Process and Its Socio-economic Impacts*, University of Alaska Anchorage, Anchorage
- [2] Elizabeth Matias, Bharat Rao. (2015). *3D Printing: On Its Historical Evolution and the Implications for Business*, New York University Polytechnic School of Engineering, New York
- [3] Terry Wohlers and Tim Gornet, (2012), *History of additive manufacturing*, Wohlers Associates, Inc.
- [4] Jim Kor, (2013), *New Energy Efficient Car Built With 3d Printing*, Stratasys 3D Printers Build Urbee, First Prototype Car to Have Entire Body Created with an Additive Process, Israel
- [5] Scott Crump, *Is Now The Time To Try Direct Digital Manufacturing? You can Reap Major Savings With This Growing Trend. Take Your First Small Step Today*, White Paper, Stratasys, Israel
- [6] Athanasios Anastasiou, Charalambos Tsirmpas, Alexandros Rompas, Kostas Giokas, Dimitris Koutsouris, (2013), *3D Printing: Basic concepts Mathematics and Technologies*, School of Electrical and Computer Engineering National Technical University of Athens, Athens

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [7] *A Brief History Of 3d Printing*, ανάκτηση από https://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf
- [8] Grynol Benjamin, *Disruptive manufacturing, The effects of 3D printing*, ανάκτηση από <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ca/Documents/insights-and-issues/ca-en-insights-issues-disruptive-manufacturing.pdf>
- [9] Dana Goldenberg, (Σεπ, 2014), *History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30)*, ανάκτηση από <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>

- [10] Daniel Price, (Μαρ, 2015), *The History Of 3D Printing - From Kidneys To Cars*, ανάκτηση από <http://cloudtweaks.com/2015/03/the-history-of-3d-printing-from-kidneys-to-cars/>
- [11] *The Free Beginner's Guide - History*, ανάκτηση από <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>
- [12] *The Magic Mathematical Formula that Explains Why We Can 3D Print Any Physical Object*, ανάκτηση από <http://www.shapeways.com/blog/archives/1228-the-magic-mathematical-formula-that-explains-why-we-can-3d-print-any-physical-object.html>
- [13] (Νοέμ, 2013), *#3DxMathematics – Fubini's Theorem and the Mathematics of 3D Printing* #3DThursday #3DPrinting, ανάκτηση από <https://blog.adafruit.com/2013/11/14/3dxmathematics-fubinis-theorem-and-the-mathematics-of-3d-printing-3dthursday-3dprinting/>

Κεφάλαιο 2.

- [1] Brian Evans, (2012), *Practical 3D Printers The Science and Art of 3D Printing*, Technology In Action
- [2] Charles Bell, (2015), *3D Printing with Delta Printers*, Technology In Action
- [3] Terence O'Neill and Josh Williams, (Ιούλ, 2013), *3D Printing*, 21st Century Skills Innovation Library, Cherry Lake Publishing, Michigan
- [4] J. Stanczy, (2016), *3D Printing Applications within Spectrophotometry*, Ohio's Polytechnic University
- [5] *Guide To Quality Stl Files*, GVL Polymers Inc., Litchfield
- [6] *STL File Guidelines*, Proto3000 Inc, Ontario

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [7] *Laser-Scanning*, ανάκτηση από http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Laser-Scanning
- [8] *Coordinate-Measuring-Machines*, ανάκτηση από http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Coordinate-Measuring-Machines
- [9] *X-ray-and-CT-Inspection*, ανάκτηση από http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/X-ray-and-CT-Inspection
- [10] *3d-scanners*, ανάκτηση από <https://www.laserdesign.com/products/category/3d-scanners/>
- [11] *3d-scanners*, ανάκτηση από <http://www.faro.com/home>
- [12] *Products*, ανάκτηση από <http://www.hexagonmi.com/products>

- [13] *Metrology-systems*, ανάκτηση από <http://www.gom.com/metrology-systems.html>
- [14] *3d-scanners*, ανάκτηση από http://en.shining3d.com/3d_digitizer.html
- [15] Franklin Houser, (Νοέμ, 2016), *19 Best-Selling 3D Scanners at Amazon in Winter 2016-2017*, ανάκτηση από https://all3dp.com/best-selling-3d-scanner-3d-printer-scanner-buy-amazon-price/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn
- [16] *3D Printing in 42 File Formats | 3D Printing Blog*, ανάκτηση από <https://i.materialise.com/blog/3d-printing-file-formats/>
- [17] *STL File Format: How to Prepare STL Files*, ανάκτηση από <https://www.stratasysdirect.com/resources/how-to-prepare-stl-files/>
- [18] (Νοέμ, 2016), *STL File (Format for 3D Printing) – Explained in Simple Terms*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- [19] *Specification – 3MF*, ανάκτηση από <http://3mf.io/specification/>
- [20] (Οκτ, 2016), *34 Best Sites for Free STL Files/ 3D Printer Models*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/best-sites-free-stl-files-3d-printing/>
- [21] *3D Model Repositories*, ανάκτηση από <http://3dprintingforbeginners.com/3d-model-repositories/>
- [22] *Repables-file repository*, ανάκτηση από <http://repables.com/>
- [23] (Δεκ, 2016), *32 Great Online 3D Printing Services (To Get It 3D Printed)*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/best-online-3d-printing-service/>
- [24] *Compare 3D Printing Services*, ανάκτηση από <http://3dprinting.com/3d-printing-service/>
- [25] [TE Halterman](#), (Ιούν, 2015), *Buy a 3D Printer or Use a Service Bureau? – Sculpteo Runs the Numbers*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/76629/sculpteo-report-buy-or-bureau/>

Κεφάλαιο 3.

- [1] Jeremy Zheng Li, (2015), *CAD, 3D Modeling, Engineering Analysis, and Prototype Experimentation Industrial and Research Applications*, Springer, New York
- [2] E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro, (Μάιο, 2013), *Low-Cost 3d Printing For Science, Education & Sustainable Development*, ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics
- [3] James Floyd Kelly, (Οκτ, 2013), *3d Printing Build Your Own 3d Printer And Print Your Own 3d Objects*, Indianapolis, Indiana
- [4] Make, (2014), *Ultimate Guide To 3d Printing*, maker media, magazine.com

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [5] (Οκτ, 2016), *20 Best Free STL Viewers (Online, Mac, PC & Apps)*, ανάκτηση από https://all3dp.com/best-free-stl-file-viewer-online-mac-pc-linux-download-android-ios-app/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn
- [6] Frederik Bedrich, (Ιάν, 2016), *5 Free STL Editors + How to Edit STL Files*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/free-stl-editor-open-edit-stl-file/>
- [7] (Ιάν, 2017), *10 Best 3D Modeling Software Tools*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/best-3d-modeling-software/>
- [8] (Σέπ, 2016), *12 Best STL Repair (Online) Software Tools (Some Are Free)*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/best-stl-file-repair-mesh/>
- [9] Anatol Locker, (Δεκ, 2016), *16 Best 3D Slicer Software Tools for 3D Printers (Most are Free)*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/best-3d-slicer-software-3d-printer/#what>

Κεφάλαιο 4.

- [1] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, (2015), *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Springer, New York
- [2] (2013), *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, Designation: F2792 – 12a, ASTM International
- [3] Annamalai Pandian & Cameron Belavek, (2016), *A review of recent trends and challenges in 3D printing*, Saginaw Valley State University
- [4] *3D Printing with Desktop Stereolithography An Introduction for Professional Users*, Formlabs White Paper
- [5] (2015), *3d Printing & Advanced Manufacturing, Getting The Most Out Of Metal 3d Printing: Understanding Design & Process Controls For Dmls*, Metal 3d Printing White Paper, Stratasys, Israel
- [6] (2005), *Z Corporation 3D Printing Technology Fast, Affordable and Uniquely Versatile*, Z Corporation
- [7] (2013), *3D Printing with DLP® Technology, DLP Offers Unparalleled Advantages for 3D Printing Applications*, Texas Instruments, Dallas
- [8] (Ιαν, 2012), *How 3D Printing works The Vision, Innovation and Technologies Behind Inkjet 3D Printing*, 3D Systems Corporation, Rock Hill
- [9] (2013), *How Paper-based 3D Printing Works, The Technology and Advantages*, Mcor Technologies Ltd

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [10] Η τεχνολογία SDL της Mcor Technologies, ανάκτηση από <http://www.color3dprinting.gr/tecnologia-tis-trisdiastatis-ektyposis/tecnologia-sdl-tis-mcor-technologies>
- [11] Γιώργος Τράντζας, (Απρίλ, 2016), *Τι είναι Τρισδιάστατη Εκτύπωση και Ποιες οι Εφαρμογές της*, ανάκτηση από <https://www.pcsteps.gr/100046-%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%B7-%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%8D%CF%80%CF%89%CF%83%CE%B7-3d-printing/>
- [12] (Οκτ, 2016), *Learn how 3d printing metal works*, ανάκτηση από <https://pinshape.com/blog/3d-printing-metal/>
- [13] Michael Molitch-Hou, (Ιούλ, 2016), *Impossible Objects Brings Impossible Speed and Flexibility to Carbon Fiber 3D Printing*, ανάκτηση από <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12763/Impossible-Objects-Brings-Impossible-Speed-and-Flexibility-to-Carbon-Fiber-3D-Printing.aspx>
- [14] Brian Krassenstein, (Ιούλ, 2015), *What is 3D Printing & How Do 3D Printers Work? — A Guide*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/82272/what-3d-printing-works/>
- [15] *What is Binder Jetting?*, ανάκτηση από <http://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting>
- [16] *Additive Manufacturing Research Group, Binder Jetting*, ανάκτηση από <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>
- [17] *How Do 3D Printers Work? Technologies and Techniques*, ανάκτηση από <https://www.sculpteo.com/en/3d-printing/3d-printing-technologies/>
- [18] *DMD Technology*, ανάκτηση από http://www.pomgroup.com/index.php?option=com_content&view=article&id=86&Itemid=552
- [19] Nasa, (Ιούν, 2011), *Electron Beam Freeform Fabrication*, ανάκτηση από <http://www.nasa.gov/topics/technology/features/ebf3.html>
- [20] *Laminated object manufacturing*, ανάκτηση από https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing
- [21] Julie Reece, (Απρίλ, 2013), *Selective Deposition Lamination (SDL) and Paper 3D Printing*, ανάκτηση από <http://mcortechologies.com/what-is-selective-deposition-lamination-sdl-and-what-does-it-have-to-do-with-paper-3d-printing-blog/>
- [22] Davide Sher, (Μάιο, 2016), *HP Reveals Multi Jet Fusion 3D Printer and New Era of Manufacturing*, ανάκτηση από

<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12146/HP-Reveals-Multi-Jet-Fusion-3D-Printer-and-New-Era-of-Manufacturing.aspx>

[23] *What is MJP (MultiJet Printing)?*, ανάκτηση από

<https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>

[24] *PolyJet*, ανάκτηση από <https://www.stratasysdirect.com/solutions/polyjet/>

[25] (Δέκ, 2016), *10 Essential Types of 3D Printers Explained (A Guide)*, ανάκτηση από

https://all3dp.com/types-of-3d-printer-technology-explained/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn

[26] Michael Molitch-Hou, (Νοέμ, 2016), *XJet's Metal 3D Printing Does Ceramic Too*, ανάκτηση από

<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13626/XJets-Metal-3D-Printing-Does-Ceramic-Too.aspx>

[27] Davide Sher, (Νοέμ, 2016), *A new 3D printing technology, interview with Xjet's Dror Danai*, ανάκτηση από

<http://www.3dprintingbusiness.directory/news/xjet-presents-first-ever-inkjet-3d-printing-ceramic-nanoparticles/>

[28] *Electron Beam Melting*, ανάκτηση από <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting>

[29] Texas Instruments, (2013), *DLP Technology*, ανάκτηση από

<http://www.ti.com/lit/ml/dlpb008a/dlpb008a.pdf>

[30] *DMD3D Technology*, ανάκτηση από <http://www.dm3dtech.com/>

[31] (Ιάν, 2015), *Composite Filament Fabrication*, ανάκτηση από <http://3dprinting-blog.com/tag/composite-filament-fabrication/>

[32] *3D Printing and Traditional Manufacturing Processes*, ανάκτηση από

<https://www.sculpteo.com/en/3d-printing/3d-printing-and-traditional-manufacturing-processes/>

Κεφάλαιο 5.

[1] (2014), *Polyjet Materials: A Range Of Possibilites*, White Paper, Stratasys, Israel

[2] (2014), *3d Printing Materials: Choosing The Right Material For Your Application*, White Paper, Stratasys, Israel

[3] Lior Zonder & Nadav Sella, (2013), *Precision Prototyping The Role Of 3d Printed Molds In The Injection Molding Industry*, White Paper, Stratasys, Israel

[4] (2012), *Blueprint for FDM & PolyJet Material Selection*, Redeye, Eden Prairie

[5] (2012), *The Power to Create*, Objet Geometries Ltd, Israel

[6] (Μάιο, 2016), *Carbon Resin PR25*, Technical Data Sheet

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [7] Franz Grieser, (Ιαν, 2016) *ABS/PLA: 3D Printer Filaments Explained & Compared*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared/>
- [8] *The Difference Between ABS and PLA for 3D Printing*, ανάκτηση από <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/>
- [9] (Ιαν, 2017), *30 Types of 3D Printer Filament – Guide & Comparison Chart*, ανάκτηση από https://all3dp.com/best-3d-printer-filament-types-pla-abs-pet-exotic-wood-metal/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn
- [10] (Νοέμ, 2015), *Exotic filaments to try out! : 3D Filament Guide Pt. 2*, ανάκτηση από <https://pinshape.com/blog/exotic-3d-printer-filament-to-try-out-3d-filament-guide-pt-2/>
- [11] (Σεπ, 2015), *3D Filament Guide: Popular 3D Printing Filaments*, ανάκτηση από <https://pinshape.com/blog/popular-3d-printing-filaments-3d-printer-filament-types/>
- [12] 3D printing, ανάκτηση από https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
- [13] (Δεκ, 2016), *The Essential Guide to Metal 3D Printing*, ανάκτηση από https://all3dp.com/metal-3d-printer-guide/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn
- [14] *3D Printer Filament Comparison*, ανάκτηση από <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>
- [15] *3D Printer Filament Types Overview*, ανάκτηση από <http://3dprintingfromscratch.com/common/3d-printer-filament-types-overview/#pc>
- [16] *High quality 3D printer filaments*, ανάκτηση από http://www.formfutura.com/?gclid=CjwKEAjjwrvq9BRD5gLyruFTgg0YSJACcuF81XoHN-Cq9HdsdNAlgL_J3Hler4bE1GZPjLYq1kpx9oRoCFFPw_wcB
- [17] *Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd*, ανάκτηση από <http://www.esun3d.net/Products/3D-Filament>
- [18] Michael Molitch-Hou, (Οκτ, 2016), *9 Desktop 3D Printing Resins You Should Know About*, ανάκτηση από <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13554/9-Desktop-3D-Printing-Resins-You-Should-Know-About.aspx>
- [19] Michael Molitch-Hou, (Οκτ, 2016), *Formlabs Releases a Range of Performance 3D Printing Resins*, ανάκτηση από <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13501/Formlabs-Releases-a-Range-of-Performance-3D-Printing-Resins.aspx>
- [20] *Online Alumide 3D Printing Service*, ανάκτηση από <https://i.materialise.com/3d-printing-materials/alumide>

- [21] *Engineering Materials*, ανάκτηση από <https://formlabs.com/materials/engineering/>
- [22] Mohanty S, Alm M, Hemmingsen M, Dolatshahi-Pirouz A, Trifol J, Thomsen P, Dufva M, Wolff A, Emnéus J, (Απρ, 2016), *3D Printed Silicone-Hydrogel Scaffold with Enhanced Physicochemical Properties*. – PubMed, ανάκτηση από <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26902925>

Κεφάλαιο 6.

- [1] Hod Lipson & Melba Kurman (2013), *Fabricated, The new world of 3D printing*, John Wiley & Sons, Inc, Indianapolis
- [2] Thomas Birtchnell, John Urry, Chloe Cook and Andrew Curry, *Freight Miles, The Impacts of 3D Printing on Transport and Society*, Thomas Birtchnell University of Wollongong, John Urry Lancaster University, Chloe Cook Futures Company, Andrew Curry Futures Company
- [3] *Top Five Reasons to Integrate PolyJet Technology into your Product Development Lifecycle*, White Paper, Stratasys, Israel.
- [4] Hod Lipson (2016), *3D Printing, Now and Beyond, Disruptive Principles And Development Episodes*, White Paper, Stratasys, Israel
- [5] (2014), *Revolutionizing Manufacturing with 3D Printing, An Introduction*, White Paper, Stratasys, Israel
- [6] Quality assurance and Quality control in metal AM: Applications, regulations and requirements

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [7] (Ιούλ, 2013), *3D printers shown to emit potentially harmful nanosized particles*, ανάκτηση από <http://phys.org/news/2013-07-3d-printers-shown-emit-potentially.html#jCp>
- [8] Lyndsey Gilpin, (Μάρ, 2014), *disadvantages_The dark side of 3D printing*, ανάκτηση από <http://www.techrepublic.com/article/the-dark-side-of-3d-printing-10-things-to-watch/>
- [9] Brent Stephens, Parham Azimia, Zeineb El Orch, Tiffanie Ramos, (Νοέμ, 2013), *Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers*, ανάκτηση από <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231013005086>
- [10] Anthony Dowsley and Monique Hore, (Δεκ, 2016), *Arrests made as police raid Noble Park North property in operation against organised crime syndicate, Leader*, ανάκτηση από <http://www.heraldsun.com.au/leader/south-east/arrests-made-as-police-raid-noble-park-north-property-in-operation-against-organised-crime-syndicate/news-story/95020bc3a61f90ce67a2157b832288f4>

Κεφάλαιο 7.

- [1] Adam B. Stroud, Matthew Morris, Kellen Carey, John C. Williams, Corey Randolph, Andrew B. Williams, (2013), *MU-L8: The Design Architecture and 3D Printing of a Teen-Sized Humanoid Soccer Robot*, Marquette University Humanoid Engineering & Intelligent Robotics Lab Milwaukee, Wisconsin USA
- [2] (2010), *adidas Races into the Future with Objet 3D Printing*, Objet Geometries Ltd, Israel
- [3] (2010), *Case Study, The power of two, Jaguar Land Rover*, Objet Geometries Ltd, Israel
- [4] *MakerBot Success Stories, Mishimoto Automotive*, Brooklyn NY
- [5] (2013), *Τεχνολογία & Καινοτομία, Τεχνολογίες Υλικών, Τάσεις & Αναδυόμενες Αγορές*, Στέγη της Ελληνικής Βιομηχανίας-ΣΕΒ, ενημερωτικό δελτίο
- [6] Χρήστος Καλαντζής (2016), *Φάκελος: 3D Printing*, και “Τεχνολογίες και Χαρακτηριστικά 3D Printing, Εργαλειομηχανές, Τεύχος 1 & 2, Αθήνα

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [7] Michael Molitch-Hou, (Νοέμ, 2016), *6 Industries Changed Forever by 3D Printing*, ανάκτηση από <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/13689/6-Industries-Changed-Forever-by-3D-Printing.aspx>
- [8] Hanna Watkin, (Σεπ, 2016), *Medical Breakthrough with 3D Printed Bone Implants*, ανάκτηση από https://all3dp.com/3d-printed-bone-implants/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn
- [9] Tyler Koslow, (Φεβ, 2017), *30 Fascinating 3D Printed Houses & Structures Around the World*, ανάκτηση από https://all3dp.com/best-3d-printed-house-building/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn
- [10] Henry Segerman, *Design of 3D printed mathematical art*, ανάκτηση από https://math.okstate.edu/people/segerman/talks/3d_printing_in_math.pdf
- [11] Hanna Watkin, (Ιαν, 2017), *Scientists 3D Print Human Stem Cells to Create New Ears*, ανάκτηση από https://all3dp.com/scientists-can-use-3d-printing-and-human-stem-cells-to-create-new-ears/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn
- [12] (2013), *Ink News - 3D Printing*, ανάκτηση από <http://www.inkpal.com/ink-news/cat/3d-printing/>

- [13] Geospatial (GIS), *3D Printed GIS Models*, ανάκτηση από <http://mcortechologies.com/industries/geospatial-gis/>
- [14] Marcel Rosenbach and Thomas Schulz, (Ιαν, 2013), *Printing Technology Poised for New Industrial Revolution*, ανάκτηση από <http://www.spiegel.de/international/business/3d-printing-technology-poised-for-new-industrial-revolution-a-874833.html>
- [15] Αντικλείδι, (Ιαν, 2013), *Η τεχνολογία ενδέχεται να φέρει νέα Βιομηχανική Επανάσταση*, ανάκτηση από <http://antikleidi.com/2013/01/13/technology-may-bring-new-industrial-revolution/>
- [16] (Μάιο, 2014), *Τι είναι οι 3D εκτυπωτές;; - Πώς καταφέρνουν να κατασκευάζουν ακόμα και ανθρώπινες καρδιές;; (Photos+Videos)*, ανάκτηση από <http://www.athensmagazine.gr/bestofathens/articles/100267?iframe=true&width=100%2525&height=100%2525>
- [17] (Σεπ, 2014), *'Lifelike' human hearts to help trainee surgeons*, ανάκτηση από <http://www4.ntu.ac.uk/apps/news/164092-5/Lifelike-human-hearts-to-help-trainee-surgeons.aspx>
- [18] Nick Hall, (Ιούν, 2016), *Top 10 3D printed automotive industry innovations available right now*, ανάκτηση από <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-automotive-industry-2-82838/>
- [19] Antu Nehuen, (Οκτ, 2015), *3D printing construction & architecture : building the home of the future*, ανάκτηση από <https://www.sculpteo.com/blog/2015/10/07/3d-printing-construction/>
- [20] Art Kalinski, (Ιαν, 2014), *3D Printing: The New Industrial Revolution*, ανάκτηση από <http://geospatial-solutions.com/3d-printing-the-new-industrial-revolution/>
- [21] *Nano Dimension | PCB 3D Printer and Nanoparticle Inks*, ανάκτηση από <http://www.nano-di.com/>
- [22] Michael Molitch-Hou, (Νοέμ, 2014), *11 Food 3D Printers from the Future*, ανάκτηση από <https://3dprintingindustry.com/news/11-food-3d-printers-36052/>
- [23] Kyle Wiggers, (Απρ, 2016), *3D Food Printers: How They Could Change What You Eat*, ανάκτηση από <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/3d-food-printers-how-they-could-change-what-you-eat/>
- [24] (Οκτ, 2002), *Κατασκευή Αγαλμάτων Με 3d Ψηφιακή Αντιγραφή Και Ταχεία Πρωτοτυποποίηση*, ανάκτηση από [Http://Www.Geoanalysis.Gr/Index.Jsp?Jsessionid=Dd61db07f897301bf22185b6c9cce397?Cmccode=1007&Cmrccode=144fsac0h](http://Www.Geoanalysis.Gr/Index.Jsp?Jsessionid=Dd61db07f897301bf22185b6c9cce397?Cmccode=1007&Cmrccode=144fsac0h)

Κεφάλαιο 8.

- [1] Emilia Mikołajewska, Marek Macko, Dariusz Mikołajewski, Łukasz Ziarniecki, Sonia Stańczak, Patryk Kawalec, (Ιαν, 2016), *Medical And Military Applications Of 3d Printing*

- [2] T.X. Hammes, (Μάιο, 2016), *Cheap Technology Will Challenge U.S. Tactical Dominance*
- [3] Colonel Jon R. Drushal, (Απρ, 2014), *Additive Manufacturing: Implications to the Army Organic Industrial Base in 2030*
- [4] U. S. Government Accountability Office, (Οκτ, 2015), *Defense Additive Manufacturing Dod Needs To Systematically Track Department-Wide 3d Printing Efforts*
- [5] Defense Acquisition University, (Ιούλ, 2014), *A Proposed 2025 Ground Systems 'Systems Engineering' Process*
- [6] Connor M. McNulty, Neyla Arnas, and Thomas A. Campbell, (Σεπ, 2012), *Toward the Printed World: Additive Manufacturing and Implications for National Security*
- [7] Jennifer Mcardle, (Φεβ, 2015), *Transforming Defense: The Potential Role Of 3d Printing, Defense Dossier*
- [8] Jian-qing LIU, Wen-bin GU, Ming LU, Hao-ming XU, Shuang-zhang WU, (Μάιο, 2014), *Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristic*, ScienceDirect
- [9] Bethany C. Gross, Jayda L. Erkal, Sarah Y. Lockwood, Chengpeng Chen, and Dana M. Spence, (Ιαν, 2014), *Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences*
- [10] Douglas Freitag, Terry Wohlers, and Therese Philippi, (Οκτ, 2003), *Rapid Prototyping: State of the Art Review*
- [11] Chandrasekhar Udayagiri, Milind Kulkarni, Balasubramanian Esakki, Sarasu Pakiriswamy and Lung-Jieh Yang, (Δεκ, 2015), *Experimental Studies on 3D Printed Parts for Rapid Prototyping of Micro Aerial Vehicles*
- [12] Jonathan E Tapia, (Μάιο, 2015), *3D-Printed Mobile Robot Platform with Multi variant task specific end-effector and Voice Control*
- [13] Gino Balistreri, (Ιούλ, 2015), *Potential Of Additive Manufacturing In The After-Sales Service Supply Chains Of Ground Based Military Systems*, University of Twente
- [14] Robert W. Appleton, (Ιούν, 2014), *Additive Manufacturing Overview For The United States Marine Corps*, RWAppleton & Company, Inc
- [15] Jason A. Morgan, Jacob M. Prentiss, (Δεκ, 2014), *An Analysis Of Item Identification For Additive Manufacturing (3-D Printing) Within The Naval Supply Chain*, Naval Postgraduate School

Ηλεκτρονικές πηγές (τελευταία επίσκεψη 5-2-2017):

- [16] Sydney j. Freedberg jr., (Απρίλ, 2014), *Navy Warship Is Taking 3D Printer To Sea; Don't Expect A Revolution*, ανάκτηση από <http://breakingdefense.com/2014/04/navy-carrier-is-taking-3d-printer-to-sea-dont-expect-a-revolution/>
- [17] MPH Overview, *Mobile Parts Hospital*, ανάκτηση από <http://www.mobilepartshospital.com/mph-overview/>
- [18] Matthew Cox, (Αύγ, 2012), *Mobile Labs Build On-the-Spot Combat Solutions*, ανάκτηση από <http://www.military.com/daily-news/2012/08/17/mobile-labs-build-on-the-spot-combat-solutions.html>
- [19] REF Rapid Equipping Force, ανάκτηση από <http://www.ref.army.mil/refforward/>
- [20] Royal Aeronautical Society, (Ιούν, 2015), *Aerospace_1506.Pdf*, ανάκτηση από https://www.aerosociety.com/Assets/Docs/Protected/Subscribers/AEROSPACE/AEROSPACE_1506.pdf
- [21] Clare Scott, (Νοέμ, 2015), *World's First Jet-Powered, 3D Printed Unmanned Aerial Vehicle Produced by Stratays and Aurora Flight Sciences*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/104602/jet-powered-3d-printed-uav/>
- [22] (Mar, 2014), *University of Sheffield AMRC with Boeing designs a 3D-printed UAV*, ανάκτηση από <http://www.3ders.org/articles/20140310-university-of-sheffield-amrc-with-boeing-designs-a-3d-printed-uav.html>
- [23] *The Razor: UVA's 3D-printed U.A.V.*, ανάκτηση από <http://linklab.virginia.edu/the-razor-uvas-3d-printed-u-a-v-2/>
- [24] Jordan Golson, (Σεπ, 2014), *A Military-Grade Drone That Can Be Printed Anywhere*, ανάκτηση από <http://www.wired.com/2014/09/military-grade-drone-can-printed-anywhere/>
- [25] Paul Szoldra, (Φεβ, 2016), *Army wants to 3d-print soldiers' food*, ανάκτηση από <http://www.businessinsider.com/army-3d-print-soldiers-food-2016-2>
- [26] Rick Docksai, (Ιούλ, 2014), *The Army Is Developing 3D Printers to Make Food*, ανάκτηση από <http://www.defenseone.com/ideas/2014/07/army-developing-3d-printers-make-food/90284/>
- [27] Jelmer Luimstra, (Ιούλ, 2014), *US Army Might Use Food Printers in the Future*, ανάκτηση από <http://3dprinting.com/food/us-army-might-use-food-printers-future/>
- [28] Hanna Watkin, (Ιαν, 2017), *Army Research Lab 3D Prints Mission-Specific Military Drones in 24 Hours*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/army-research-lab-3d-prints-and->

[assembles-mission-specific-uavs-in-24-hours/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn](#)

[29] Tyler Koslow, (Μαρ, 2016), *US Military Uses 3D Printing to Create Swarms of Mini-Drones*, ανάκτηση από <http://3dprintingindustry.com/news/us-military-uses-3d-printing-to-create-swarms-of-mini-drones-73559/>

[30] Dominik Stephan, (Φεβ, 2016), *War and Peace: “Chempuiter” Produces Tailor-Made Medicine – or Drones*, ανάκτηση από <http://www.process-worldwide.com/war-and-peace-chemputer-produces-tailor-made-medicine-or-drones-a-564415/>

[31] Kate Watcham, (Ιούλ, 2016), *Lifting the lid on future military aircraft technologies*, ανάκτηση από <http://www.baesystems.com/en/article/future-technologies-growing-uavs-through-chemistry>

[32] Valerie Insinna, (Νοεμ, 2014), *3D-Printing May Enable Troops to Make Drones on Demand*, ανάκτηση από <http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2014/November/Pages/3D-PrintingMayEnableTroopstoMakeDronesonDemand.aspx>

[33] (Φεβ, 2014) *Chinese Army uses 3-D printing technology to create 3D military topographic map*, ανάκτηση από http://armyrecognition.com/february_2014_global_defense_security_news_uk/chinese_army_uses_3-d_printing_technology_to_create_3d_military_topographic_map_2002145.html

[34] Scott J Grunewald, (Ιούλ, 2016), *3D Printing Will Help Mercedes-Benz Trucks Deliver Thousands of Replacement Parts On Demand*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/142207/mercedes-benz-trucks-parts/>

[35] Bridget Butler Millsaps, (Δεκ, 2015), *Experimental Fab Labs Set up on USS Harry Truman & USS Kearsarge Allow for Self-Sustainability at Sea*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/112962/fab-labs-uss-harry-truman/>

[36] (Οκτ, 2014), *Custom 3D Printer Application in the Military Field*, ανάκτηση από <http://3dsystemprinter.com/custom-3d-printer.html>

[37] Tyler Koslow, (Ιαν, 2017), *Do You Fear 3D Printed Guns? What You Really Need To Know!*, ανάκτηση από https://all3dp.com/3d-printed-gun-firearm-weapon-parts/?utm_source=wpn&utm_medium=wpn&utm_campaign=wpn

[38] (Νοεμ, 2013), *Philadelphia becomes first city to ban 3D gun printing*, ανάκτηση από <http://www.3ders.org/articles/20131124-philadelphia-becomes-first-city-to-ban-3d-gun-printing.html>

- [39] Marcus Weisgerber, (Σεπ, 2014), *The Defense Industry Is Expanding the Use of 3D Printing*, ανάκτηση από <http://www.defenseone.com/technology/2014/09/defense-industry-expanding-use-3d-printing/95396/>
- [40] John Joyce, (Μάιο, 2016), *Navy Officials: 3-D Printing To Impact Future Fleet with 'On Demand' Manufacturing Capability*, ανάκτηση από http://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=94769
- [41] Kyle Maxey, (Φεβ, 2014), *3D Printing Central to Future Military Strategy*, ανάκτηση από <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/7074/3D-Printing-Central-to-Future-Military-Strategy.aspx>
- [42] Tyler Koslow, (Μάιο, 2016), *On-Demand 3D Printing to Impact Navy Fleets in the Near Future*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/136356/ondemand-3d-printing-navy/>
- [43] Scott J Grunewald, (Απρ, 2016), *The Surprising Ways That 3D Printing May Completely Transform the US Military*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/128936/3d-printing-us-military/>
- [44] Whitney Hipolite, (Αυγ, 2014), *3D Printed Landmines are Built for Military Training*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/10939/3d-printed-landmines/>
- [45] Tamar Auber, (Ιουλ, 2015), *3D Printed Guided Missiles are Now a Reality*, ανάκτηση από <http://www.3dprinter.net/3d-printed-guided-missiles-are-now-a-reality>
- [46] Cameron Naramore, (Μάιο, 2013), *3D printing a Navy*, ανάκτηση από <http://www.3dprinter.net/3d-printing-a-navy>
- [47] Hope Hodge Seck, (Σεπ, 2016), *Marines Conducting Tests with 3-D Printed Munitions*, ανάκτηση από <http://www.military.com/daily-news/2016/09/29/marines-conducting-tests-with-3d-printed-munitions.html>
- [48] Sydney j. Freedberg jr., (Αυγ, 2016), *First Osprey Flight With Critical 3D Printed Part*, ανάκτηση από <http://breakingdefense.com/2016/08/osprey-takes-flight-with-3d-printed-part/>
- [49] Hope Hodge Seck, (Ιούν, 2016), *Navy Will 3-D Print Critical Parts for Marine Rotorcraft by 2017*, ανάκτηση από <http://www.dodbuzz.com/2016/06/20/navy-will-3-d-print-critical-parts-for-marine-rotocraft-by-2017/>
- [50] Victor Anusci, (Οκτ, 2015), *You're in the Army Now: 10 Future Applications for 3D Printing*, ανάκτηση από <https://all3dp.com/youre-in-the-army-now-10-future-applications-for-3d-printing/>
- [51] Tyler Koslow, (Μάιο, 2016), *US Army Scientists Showcase Multi-Material 3D Printing and Other Technological Advancements*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/145328/us-army->

[tech-demo/](#)

[52] David Szondy, (Μάιο, 2016), *3D printing goes to war*, ανάκτηση από <http://newatlas.com/3d-printing-military-feature/42384/>

[53] Cosimo Orban, (Μάιο, 2016), *3D Printed Warfare*, ανάκτηση από <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-warfare-78296/>

[54] Bridget Butler Millsaps, (Αυγ, 2016), *Florida Veteran Turns Injury into a Business Idea with 3D Printed FANG Shooting Stabilizer*, ανάκτηση από <https://3dprint.com/146522/vet-3d-printed-fang-stabilizer/>

[55] (Δεκ, 2012), *DIY 3D Printing: 3D printed satellites*, ανάκτηση από <http://diy3dprinting.blogspot.gr/2012/12/3d-printed-satellites.html>

[56] Liesbeth Kemel, (Ιούλ, 2014), *3D Printing Prosthetics for Wounded Veterans*, ανάκτηση από <http://www.materialise.com/blog/3d-printing-prosthetics/>

[57] Lee Ventola, (Οκτ, 2014), *Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses*, ανάκτηση από <http://www.popsoci.com/article/technology/us-army-contemplates-3d-printed-warheads>

[58] Kelsey D. Atherton, (Ιούλ, 2014) *U.S. Army Contemplates 3D-Printed Warhead*, ανάκτηση από <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4189697/>

Κεφάλαιο 9.

[1] (2016), *Selecting the Right Industrial 3D Printer, A guide to maximizing your investment*. Plural Additive Manufacturing, Lake Oswego

[2] (Νοέμ, 2013), *3D Printing, A Patent Overview*, Intellectual Property Office, United Kingdom

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'

Αποθετήρια 3D μοντέλων (3D Model Repositories)

Ονομασία	Διεύθυνση Ιστότοπου	Τύπος
Thingiverse	https://www.thingiverse.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
Grabcad	https://grabcad.com/library?utm_campaign=workbench&utm_content=library_button&utm_medium=cta&utm_source=index	Αποθετήριο - Δωρεάν
Sketchfab	https://sketchfab.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
Autodesk 123d	http://www.123dapp.com/Gallery/content/all	Αποθετήριο - Δωρεάν
CGTrader	https://www.cgtrader.com/3d-models	Δωρεάν και επί πληρωμής
My Mini Factory	https://www.myminifactory.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
Yeggi	http://www.yeggi.com/	Μηχανή αναζήτησης
Pinshape	https://pinshape.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
XYZprinting 3D Gallery	http://us.gallery.xyzprinting.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
Dremel Idea Builder	https://3dprinter.dremel.com/3d-printing-models	Αποθετήριο - Δωρεάν
YouMagine	https://www.youmagine.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
Yobi3D	https://www.yobi3d.com/#/	Μηχανή αναζήτησης
STL Finder	http://www.stlfinder.com/	Μηχανή αναζήτησης
3DExport	https://3dexport.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
Cults	https://cults3d.com/en	Δωρεάν και επί πληρωμής
Zortrax Library	http://library.zortrax.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
New Matter	https://store.newmatter.com/#/designs	Αποθετήριο - Δωρεάν
Rinkak	https://www.rinkak.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
3DShook	http://www.3dshook.com/	Συνδρομητική και Δωρεάν
Threeding	https://www.threeding.com/index.php	Δωρεάν και επί πληρωμής
Repables	http://repables.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
Libre3D	http://libre3d.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
3Dagogo	https://www.3dagogo.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
Shapetizer	https://www.shapetizer.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
The Forge	http://zheng3.com/forged/index.php?id=-4	Αποθετήριο - Δωρεάν
Redpah	https://www.redpah.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
Trinpy	https://www.trinpy.com/#firstPage	Συνδρομητική και Δωρεάν
Polar Cloud	http://cloud.polar3d.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
3D Warehouse	https://3dwarehouse.sketchup.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
STLHive	http://www.stlhive.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
NASA	https://nasa3d.arc.nasa.gov/models	Αποθετήριο - Δωρεάν
NIH 3D Print Exchange	https://3dprint.nih.gov/	Αποθετήριο - Δωρεάν

Instuctables	http://www.instructables.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν
TurboSquid	http://www.turbosquid.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
3D File Market	http://www.3dfilemarket.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
Gambody	http://www.gambody.com/	Δωρεάν και επί πληρωμής
MakerShop	https://www.makershop.co/	Δωρεάν και επί πληρωμής
Shapeking	http://www.shapeking.com/catalog/	Αποθετήριο - Δωρεάν
The Forge	http://forge.zheng3.com/	Αποθετήριο - Δωρεάν

Παράρτημα Β'

Υπηρεσίες εκτύπωσης (Service Bureaus)

Ονομασία	Διεύθυνση Ιστότοπου	Υλικά εκτύπωσης	Μέθοδος 3D εκτύπωσης
3D Hubs	https://www.3dhubs.com/	Μεταλλικό, Πολυπροπυλένιο, Χαρτί, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό, Κερί	FDM, Jetting, Μεταλλικό Sintering, Χαρτί, PolyJetting, SLA, SLS, CFF, Κερί Casting
i.Materialise	https://i.materialise.com/	Κεραμικό, Μεταλλικό, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό, Ξύλο	Casting, Κεραμικό Jet, Colorjet, DMLS, FDM, Indirect Μεταλλικό Printing, Polyjet, SLS, SLA
Sculpteo	https://www.sculpteo.com/en/	Κεραμικό, Πλήρες χρώμα, Μεταλλικό, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό, Κερί	Casting, CLIP, ColorJet, SLA, DMLS, FDM, SLS
Shapeways	http://www.shapeways.com	Κεραμικό, Μεταλλικό, Πλαστικό, Sandstone, Κερί	SLS, Binder Jet Steel, Κερί casting
Makexyz	https://www.makexyz.com/	Νάυλον Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	FDM, SLA
Ponoko	https://www.ponoko.com/	Μεταλλικό, Θερμοπλαστικό	ColorJet, FDM, SLS
Rapid3D	http://rapid3d.co.za/	Ρητίνη	SLA
Imaginarium	https://www.imaginarium.co.in/	Μη διαθέσιμο	Μη διαθέσιμο
Fathom	http://studiofathom.com/	Μεταλλικό, Θερμοπλαστικό, Ρητίνη, Σιλικόνη	FDM, PolyJet, SLA, SLS
iMakr	https://www.imakr.com/en/	Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	FDM, SLA
Materialise OnSite	http://www.materialise.com/en/manufacturing/materialise-onsite	Γυαλί, Μεταλλικό, Πολλαπλό χρώμα, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	Colorjet, DMLS, FDM, Polyjet, SLA, SLA
Protolabs	https://www.protolabs.co.uk/	Μεταλλικό, Νάυλον Θερμοπλαστικό	DMLS, SLA, SLS
Quickparts	http://www.3dsystems.com/quickparts	Μεταλλικό, Νάυλον Ρητίνη, Θερμοπλαστικό, Κερί	ColorJet, CNC, DMLS, MultiJet, SLA, SLS
StrataSys Direct	https://www.stratasysdirect.com/	Acrylic, Κεραμικό, Αφρός, Μεταλλικό, Θερμοπλαστικό, Κερί	CNC, DMLS, FDM, LS, PolyJet, SLS, Urethane Casting
Trinckle	http://www.trinckle.com/index.php	Μεταλλικό, Πολλαπλό χρώμα, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	ColorJet, FDM, SLA, SLS, Κερί casting
Voodoo Mnuufacturing	https://voodooomfg.com/	Θερμοπλαστικό	FDM
StarPrototype	https://www.starrapid.com/	Μεταλλικό, Θερμοπλαστικό	DMLM, SLA
3Diligent	http://www.3diligent.com/	Μεταλλικό, Νάυλον Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	DMLS, EBM, FDM, Polyjet, SLA, SLM, SLS

3D Print-Au	http://3dprint-au.com/	Νάυλον	SLS
Beta-Prototypes	https://www.beta-prototypes.com/rpuk/index.html	Μεταλλικό, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	FDM, SLA, SLS
HK3DPrint	http://www.hk3dprint.com.hk/en/	Πλήρες χρώμα, Νάυλον	SLS
Incept3D	http://www.incept3d.com/submit-files.html	Μεταλλικό, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	FDM, SLA, DMLS
Kraftwurx	http://www.kraftwurx.com/	Κεραμικό, Μεταλλικό, Χαρτί, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό, Κερί	Casting, DMLS, FDM, SLA, SLS
MeltWerk	https://www.meltwerk.com/en/index.php	Πλαστικό	SLS
Rapid 3DParts	http://rapid3dparts.co.za/	Θερμοπλαστικό	ColorJet, PolyJet, SHS, SLS
Rapid Crafting	http://rapidcrafting.com/en/	Κεραμικό, Πλήρες χρώμα, Μεταλλικό, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	Colorjet, DMLS, FDM, SLA, SLS
Shapetizer	https://www.shapetizer.com/	Ρητίνη, Polyamide, precious Μεταλλικό	Casting, SLA
WhiteClouds	https://www.whiteclouds.com/	Πλήρες χρώμα, Μεταλλικό, Πλαστικό	ColorJet, MJP, SLA, DMP, SLS
X3D Print	https://x3d-print.com/en/	Ρητίνη	SLA
3D Printing Ally	http://www.3dprintingally.com/	Κεραμικό, Πλήρες χρώμα, Νάυλον Polycarbonate, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό, Κερί	Color Jet Printing, FDM, Multijet Printing, SLA, SLS
Iannone 3D	http://www.iannone3d.com/	Νάυλον Θερμοπλαστικό, Κερί	FDM, Κερί printing
BuildParts	http://www.buildparts.com/	Μεταλλικό, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	CLIP, FDM, Polyjet, SLA, SLS, Urethane Casting
PartSnap	http://www.partsnap.com/	Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	FDM, FFF, PolyJet

Ελληνικές υπηρεσίες εκτύπωσης (Service Bureaus)

Ονομασία	Διεύθυνση Ιστότοπου	Υλικά εκτύπωσης	Μέθοδος 3D εκτύπωσης
3dhub	http://www.3dhub.gr/yphresies/	Πλαστικό, Πλήρες χρώμα, Νάυλον Polycarbonate, Ρητίνη, Θερμοπλαστικό	FDM, SLA
fts	http://fts.gr/el/kataskevhi-prototipon/	Ρητίνη, Κερί	SLA
3dsolidforms	http://www.3dsolidforms.com/	Μη διαθέσιμο	Μη διαθέσιμο
solid3dprint	http://www.solid3dprint.com/	Μη διαθέσιμο	Μη διαθέσιμο

Παράρτημα Γ'

Προγράμματα 3D σχεδίασης (3D Design/CAD Software)

Πρόγραμμα	Επίπεδο	Λειτουργικό	Τιμή	Φορμάτ
Autodesk 123D Design	Αρχάριος	Windows, Mac και iOS	Δωρεάν	123x, step, stl, x3d, vrml
3D Slash	Αρχάριος	Windows, Mac, Linux, Raspberry Pi ή Browser	Δωρεάν, 24€/χρόνο Premium	3dslash, obj, stl
Photoshop CC	Αρχάριος	Windows και Mac	142 €/ χρόνο	3ds, dae, kmz, obj, psd, stl, u3d
SculptGL	Αρχάριος	Browser	Δωρεάν	obj, ply, sgl, stl
TinkerCAD	Αρχάριος	Browser	Δωρεάν	123dx, 3ds, c4d, mb, obj, svg, stl
Meshmixer	Μέτριος	Windows, Mac και Linux	Δωρεάν	amf, mix, obj, off, stl
Moment of Inspiration (MoI)	Μέτριος	Windows και Mac	266 €	3ds, 3dm, dxf, fbx, igs, lwo, obj, skp, stl, stp and sat
OpenSCAD	Μέτριος	Windows, Mac και Linux	Δωρεάν	dxf, off, stl
Sculptris	Μέτριος	Windows και Mac	Δωρεάν	obj, goz
SketchUp	Μέτριος	Windows και Mac	Δωρεάν, 657€ η Pro	dwg, dxf, 3ds, dae, dem, def, ifc, kmz, stl
AutoCAD	Προχωρημένος	Windows και Mac	1400 €/ χρόνο	dwg, dxf, pdf
Blender	Προχωρημένος	Windows, Mac και Linux	Δωρεάν	3ds, dae, fbx, dxf, obj, x, lwo, svg, ply, stl, vrml, vrml97, x3d
Mudbox	Προχωρημένος	Windows και Mac	85 € / χρόνο	fbx, mud, obj
Rhino3D	Προχωρημένος	Windows και Mac	495€ Εκπαιδευτική άδεια, 1695 € Εμπορική άδεια,	3dm, 3ds, cd, dae, dgn, dwg, emf, fbx, gf, gdf, gts, igs, kmz, lwo, rws, obj, off, ply, pm, sat, scn, skp, slc, sldprt, stp, stl, x3dv, xaml, vda, vrml, x_t, x, xgl, zpr
Zbrush	Προχωρημένος	Windows και Mac	400€ Εκπαιδευτική άδεια, 720€ Ατομική άδεια χρήσης	dxf, goz, ma, obj, stl, vrml, x3d
CATIA	Βιομηχανικό	Windows και Mac	7.180 € Διαθέσιμες εκπαιδευτικές άδειες	3dxml, catpart, igs, pdf, stp, stl, vrml
Fusion 360	Βιομηχανικό	Windows και Mac	499.80 €/ χρόνο, Διαθέσιμες εκπαιδευτικές άδειες	catpart, dwg, dxf, f3d, igs, obj, pdf, sat, sldprt, stp
Inventor	Βιομηχανικό	Windows και Mac	€2,060/ χρόνο,	3dm, igs, ipt, nx, obj, prt, rvt, sldprt, stl, stp, x_b, xgl

Solidworks	Βιομηχανικό	Windows και Mac	9.950 €, Διαθέσιμες εκπαιδευτικές άδειες	3dxml, 3dm, 3ds, 3mf, amf, dwg, dxf, idf, ifc, obj, pdf, sldprt, stp, stl, vrml
3d Studio Max	Επαγγελματικό	Windows	2.141,70 € / χρόνο, Διαθέσιμες εκπαιδευτικές άδειες	stl, 3ds, ai, abc, ase, asm, catproduct, catpart, dem, dwg, dxf, dwf, flt, iges, ipt, jt, nx, obj, prj, prt, rvt, sat, skp, sldprt, sldasm, stp, vrml, w3d xml

Παράρτημα Δ'

Προγράμματα επισκόπησης αρχείων .STL (STL file Viewer)

Πρόγραμμα	Της εταιρείας	Λειτουργικό
ViewSTL	falldeaf	Online
3DViewerOnline	3DViewerOnline	Online
Autodesk A360 Viewer	Autodesk	Online
ShareCAD	CADSoftTools	Online
Openscad	OpenSCAD	Online
Dimension Alley	DimensionAlley	Online
STL Viewer for WordPress	christian.loelkes	WordPress
Gmsh	Christophe Geuzaine and Jean-François Remacle	Windows, Linux
GLC-Player	GLC-Player	Windows, Mac, Linux
Autodesk 123D Make	Autodesk	Windows, Mac, iOS
3D-Tool Free Viewer	3D-Tool	Windows
MiniMagics	Materialise	Windows
ADA 3D	ADA 3D	Windows
Open 3D Model Viewer	open3mod	Windows
EasyViewSTL	EasyViewSTL	Windows
STLView	ModuleWorks	Windows, Android
Mac OS X Preview	Apple	Mac
Pleasant3D	Pleasant Software	Mac
STL File Viewer (free)	ModuleWorks	Android
MeshLab for iOS	Visual Computing Lab	iOS

Παράρτημα Ε'

Προγράμματα επεξεργασίας αρχείων .STL (STL file Editor)

Πρόγραμμα	Διεύθυνση Ιστότοπου
FreeCAD	http://www.freecadweb.org/wiki/index.php?title=Download
SketchUp	http://www.sketchup.com/
Blender	https://www.blender.org/download/
MeshMixer	http://meshmixer.com/
MeshLab	http://www.meshlab.net/
Netfabb Studio Basic	https://www.netfabb.com/

Παράρτημα ΣΤ'

Προγράμματα επιδιόρθωσης αρχείων .STL (STL Repair Tools)

Πρόγραμμα	Διεύθυνση Ιστότοπου
FreeCAD	http://www.freecadweb.org/wiki/index.php?title=Download
Emendo STL File Validation and Repair Software	http://www.avante-technology.com/emendo-stl-validation-repair-software/
Materialise Cloud	https://cloud.materialise.com/tools
MeshFix	https://sourceforge.net/projects/meshfix/
MeshLab	http://www.meshlab.net/
Autodesk Netfabb Cloud Service	https://tools3d.azurewebsites.net/
Netfabb Studio Basic	https://www.netfabb.com/
3DprinterOS	https://cloud.3dprinter0s.com/
MakePrintable	https://makeprintable.com/

Παράρτημα Ζ'

Προγράμματα διαστρωμάτωσης (Slicing)

Πρόγραμμα	Της εταιρείας	Λειτουργικό	Τιμή
Skeinforge	Enrique Perez	Windows, Mac, Linux	Δωρεάν
Slic3r	Alessandro Ranellucci	Windows, Mac, Linux	Δωρεάν
Cura	David Braam / Ultimaker	Windows, Mac, Linux	Δωρεάν
KISSlicer	Jonathan Dummer	Windows, Mac, Linux	0-40 \$
MakerWare	MakerBot	Windows, Mac, Linux	Δωρεάν

Παράρτημα Η'

Προγράμματα ελέγχου εκτυπωτή (printer control)

Πρόγραμμα	Της εταιρείας	Τιμή
ReplicatorG	MakerBot	Δωρεάν
Pronterface	Kliment Yanev	Δωρεάν
Repetier	Hot World	Δωρεάν
Host	Media GmbH	Δωρεάν
Octoprint	Gina Häußge	Δωρεάν
Afinia 3D	Afinia	Δωρεάν

Παράρτημα Θ'

Τεχνολογίες και υλικά

Κατηγορία	Τεχνολογία	Υλικά
Συνδετική με Πίεση Ακροφυσίου (Binder Jetting- BJ)	Three Dimensional Printing”, “3d Printing”, “3DP”, “Digital part materialization”, “ink-jet Printing”, “Powder bed and inkjet head 3D printing”, “drop-on powder”, “color jet printing- CJP”	Σχεδόν όλα τα κράματα μετάλλου, πολυμερή και κεραμική σκόνη γύψος, βρώσιμα υλικά, βιοϋλικά
Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition)	Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Λέιζερ (Laser-Based Metal Deposition - LBMD)	Σχεδόν όλα τα κράματα μετάλλου
	Απόθεση Μετάλλου Βασισμένη σε Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Based Metal Deposition), “Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3)	Σχεδόν όλα τα κράματα μετάλλου
	Laser Engineered Net Shaping (LENS), Directed Light Fabrication (DLF), Direct Metal Deposition (DMD), 3D Laser Cladding, Laser Generation, Laser Freeform Fabrication (LFF), Laser Direct Casting, Laser Cast, Laser Consolidation, LasForm	Πολυμερή, κεραμικά και σύνθετα υλικά μεταλλικής βάσης
Εξώθηση Υλικών (Material Extrusion)	Μοντελοποίηση Εναπόθεσης Τηγμένου Υλικού (Fused Deposition Modeling - FDM), Κατασκευή Τηγμένου Νήματος (Fused Filament Fabrication - FFF)	Θερμοπλαστικά, εύηχτα μέταλλα, ξύλο, βρώσιμα υλικά, λάστιχα, πηλό πλαστελίνη, μεταλλικό πηλό
	Robocasting ή Κατευθυνόμενη Γραφή Μελανιού (Direct Ink Writing -DIW)	Κεραμικά, μεταλλικά κράματα, κεραμομέταλλο, σύνθετη μεταλλική μήτρα, σύνθετη κεραμική μήτρα
	Βιοεξώθηση (Bioextrusion)	Υδρογέλες (hydrogels)
	Κατασκευή Σύνθετου Νήματος (Composite Filament Fabrication - CFF)	Νάιλον ή νάιλον με κοντές ίνες άνθρακα, Kevlar, ίνες γυαλιού και ίνες γυαλιού για υψηλές θερμοκρασίες
Υλικά με Πίεση Ακροφυσίου (Material Jetting)	“Multi Jetting Model (MJM)”, “Polyjet”“Multi Jet Fusion (MJF)”	Ρητίνες, κερί
	Νανοσωματίδια με Πίεση Ακροφυσίου (NanoParticle Jetting - NPJ)	Μεταλλικά ή κεραμικά νανοσωματίδια
Σύντηξη Στρώματος Σκόνης (Powder Bed Fusion)	Επιλεκτική Σύντηξη με την Χρήση Ακτίνων Λέιζερ (Selective Laser Sintering – SLS)	Θερμοπλαστική σκόνη, σκόνες μετάλλων, σκόνες κεραμικών
	Selective laser melting (SLM)	Κράματα τιτανίου, κοβαλτίου-χρωμίου, ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο
	Selective heat sintering (SHS)	Θερμοπλαστική σκόνη
	Direct metal laser sintering (DMLS)	Σχεδόν όλα τα κράματα μετάλλου
	Λιώσιμο με Δέσμη Ηλεκτρονίων (Electron Beam Melting – EBM)	Σχεδόν όλα τα κράματα μετάλλου συμπεριλαμβανομένου των κραμάτων Τιτανίου

Συγκόλληση Φύλλων (Sheet Lamination)	Συγκόλληση ή Κόλληση (Gluing or Adhesive Bonding)	Χαρτί, φύλλο μετάλλου, πλαστικό φιλμ, κεραμική ταινία
	Παραγωγή Αντικειμένων με Συγκόλληση (Laminated Object Manufacturing – LOM)	Χαρτί, φύλλο μετάλλου, πλαστικό φιλμ, κεραμική ταινία
	Επιλεκτική Συγκόλληση Εναπόθεσης (Selective Deposition Lamination – SDL)	Χαρτί, φύλλο μετάλλου, πλαστικό φιλμ, κεραμική ταινία
	Θερμική Σύνδεση (Thermal Bonding)	Χάλυβας
	Συγκόλληση με Υπερήχους (ultrasonic welding)	Κράματα μετάλλων
Φωτοπολυμερισμού Δεξαμενής (Vat Photopolymerisation)	Στερεολιθογραφία (Stereolithography)	Φωτοπολυμερή, ρητίνες
	Συνεχές Υγρό Περιβάλλον Παραγωγής (Continuous Liquid Interface Production – CLIP)	Φωτοπολυμερή, ρητίνες
	Ψηφιακή Επεξεργασία Φωτός (Digital Light Processing - DLP)	Φωτοπολυμερή, ρητίνες
	Σκλήρυνση Στερεού Εδάφους (Solid Ground Curing - SGC)	Φωτοπολυμερή, ρητίνες