ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ
Σχεδιασμός και κατασκευή δομής πρωτότυπου τρισδιάστατου εκτυπωτή

Αναγνωστάκης Θεολόγος

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Χ. Βοσνιάκος

ΑΘΗΝΑ 2015

Περίληψη

Αντικείμενα της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή της δομής ενός πρωτότυπου τρισδιάστατου εκτυπωτή. Αρχικά παρουσιάζονται αναλυτικά οι σημερινές τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης, ο τρόπος λειτουργίας τους και οι τεχνικές τους. Η παρούσα εργασία αφορά την κατηγορία των εκτυπωτών χαμηλού κόστους, για αυτό το λόγο εκπονείται μια μελέτη που αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σημερινών τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους του εμπορίου. Αναλυτικότερα αναλύονται και συγκρίνονται οι γεωμετρικές διαστάσεις, ο τρόπος λειτουργίας, η μέθοδος μετάδοσης κίνησης, η διάταξη, τα υλικά κατασκευής, ο εξοπλισμός και τα υλικά εκτύπωσής τους. Στη συνέχεια ορίζονται οι προδιαγραφές και τα τεχνικά επιθυμητά χαρακτηριστικά του προς κατασκευή τρισδιάστατου εκτυπωτή. Έπειτα γίνεται, με τη βοήθεια του λογισμικού γεωμετρικής μοντελοποίησης ProEngineer, ο σχεδιασμός όλων των επιμέρους δομικών στοιχείων που απαρτίζουν τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Το κάθε στοιχείο μοντελοποιείται ξεχωριστά και ακολουθεί η 'ψηφιακή' συναρμολόγησή τους με αποτέλεσμα τη σύνθεση της τελικής δομής του εκτυπωτή. Το επόμενο βήμα της ανάλυσης περιλαμβάνει τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής με τη βοήθεια του λογισμικού ProMechanica και αφορά ενδεικτική δομή αποτελούμενη από το πλαίσιο στήριξης και την κεφαλή απόθεσης υλικού. Η συχνότητα διέγερσης που αναλύθηκε αφορά τα περιστρεφόμενα μέρη της διάταξης συμπεριλαμβανομένων των βηματικών κινητήρων. Δίνεται έτσι μεθοδολογία για την αποφυγή φαινομένων συντονισμού που έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην ποιότητα της εκτύπωσης. Στη συνέχεια ακολουθεί το κατασκευαστικό μέρος, στο οποίο αναλύεται στο βαθμό λεπτομέρειας που απαιτείται η φυσική κατασκευή όσων στοιχείων μοντελοποιήθηκαν στην ανάλυση. Με την βοήθεια των εργαλειομηχανών του εργαστηρίου του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών, έγινε η κατεργασία και η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων και δομικών στοιχείων, με αποτέλεσμα την τελική μορφή του πρωτότυπου τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Abstract

The purpose of this thesis is the study, design and manufacture of the structure of an original 3d printer. Initially, current technologies of 3d printing are detailed presented, explaining their operating methods and techniques. The present thesis deals with the category of desktop 3d printers. Therefore a study on the technical details of the current commercial 3d printers has been performed. In details, the geometric dimensions, operating mode, transmission method, structure and layout, printing materials, construction materials, and equipment are compared. As a next step, the requirements and specifications of the following 3d printer were determined. Following, using the parametric modeling design software Pro-Engineer, all individual assembly parts were designed and modeled. After modeling each element separately, a final assembly was performed in order to provide us a clear view of the final 3d printer structure. The computation part of the thesis includes also the analysis of the natural frequencies of the assembled design. Using the software Pro Mechanica, the eigenfrequencies of the base frame including the hot end, are calculated. Moreover the operational frequency for the rotating parts, specifically the step motors, is calculated. Considering the eigenfrequencies of the construction and the operational frequency of the printer, the phenomenon of the mechanical resonance could be avoided. Such a phenomenon is not only important for the maintenance of the construction but also for the quality of the printing. At the laboratory of manufacturing technology of NTUA, the designed parts were manufactured and assembled successfully. The manufacturing technologies employed are outlined at the required level of detail in this report. A prototype desktop 3D printer is now available for further development, as far as the control system and the programming of the axis motion are concerned.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, ιδιαιτέρως, τον επιβλέποντα για την εργασία καθηγητή Κ. Γεώργιο Χ Βοσνιάκο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας αλλά και για τις πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες τους εργαστηρίου του τομέα τεχνολογίας των *κατεργασιών, Ηλία Μάτσα, Αλέξανδρο Σιάσο, Γιώργο Παπαζέτη, καθώς και το τεχνικό προσωπικό, ιδιαίτερα τον κ. Νίκο Μελισσά, για την βοήθεια και καθοδήγησή τους καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, θερμές ευχαριστίες στους συμφοιτητές μου Κώστα Καρούζο, Νικόλαο Ζουρτσάνο, Νικόλαο Κοντογιάννη για την πολύτιμη συνεισφορά τους στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.*

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is to not stop questioning.”

Albert Einstein, *Relativity: The Special and the General Theory*

Περιεχόμενα

Περίληψη **3**

Abstract **5**

Περιεχόμενα **9**

Κατάλογος Εικόνων **13**

Κατάλογος Πινάκων **17**

1 Εισαγωγή **19**

1.1 Γενικά 19

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 20

1.3 Δομή Εργασίας 21

2 Τρισδιάστατη εκτύπωση και ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων **23**

2.1 Τεχνολογίες ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων 26

2.1.1 SLA 26

2.1.2 SGC 27

2.1.3 SLS 28

2.1.4 LOM 29

2.1.5 FDM 30

2.1.6 3D ink-jet printing 31

2.2 Χρήσεις και εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης 32

3 Ανάλυση **38**

3.1 Πλαίσιο στήριξης 38

3.2 Κίνηση στο επίπεδο 40

3.2.1 Τρόποι μετάδοσης κίνησης 41

3.2.1.1 Απευθείας μετάδοση κίνησης με ιμάντες χρονισμού 41

3.2.1.2 Μετάδοση κίνησης με μονό ιμάντα χρονισμού 42

3.2.1.3 Μετάδοση κίνησης με οδοντωτό δοκό και γρανάζι (κρεμαγιέρα) 42

3.2.1.4 Μετάδοση κίνησης με ατέρμονες κοχλίες με επανακυκλοφορούντα σφαιρίδια (ballscrews) 43

3.2.1.5 Οδήγηση με άξονες, γραμμικά ρουλεμάν και γραμμικούς οδηγούς 44

3.2.2 Κινηματικές δομές 44

3.2 Κεφαλή απόθεσης υλικού 49

3.2.1 Το ακροφύσιο 49

3.2.1.1Μεγάλη διάμετρος ακροφυσίου: 49

3.2.1.2 Μικρότερη διάμετρος ακροφυσίου: 50

3.2.2 Ο διάτρητος κοχλίας 51

3.2.3 Κύβος (μπλόκ) θέρμανσης (heatedblock) 51

3.3 Ο μηχανισμός προώθησης νήματος εκτύπωσης 52
3.4 Η πλάκα εκτύπωσης 53
3.5 Υλικά εκτύπωσης 53

4 Σχεδιασμός 58

4.1 Η σχεδιομελέτη 58
4.2 Προδιαγραφές εκτυπωτή 60
4.3 Γεωμετρική μοντελοποίηση μηχανολογικών στοιχείων 62
4.3.1 Το λογισμικό μοντελοποίησης 62
4.3.2 Τα στοιχεία που μοντελοποιήθηκαν 62
4.4 Ιδιοανυσματική ανάλυση και ανάλυση φάσεων (modal analysis) 73
4.4.1 Τι είναι η ιδιοανυσματική ανάλυση 73
4.4.2 Το μοντέλο μελέτης 75
4.4.3 Διαδικασία ανάλυσης 77
4.4.3.1 Σύγκλιση με H-method 80
4.4.3.2 Σύγκλιση με P-method 80
4.4 Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος. 88
4.4.1 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα. 88
4.4.2 Υπολογισμός συχνότητας λειτουργίας του βηματικού κινητήρα 89

5 91

5.1 Βασικές κατεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν 91
5.1.1 Συγκολλήσεις 91
5.1.2 Κοπές 92
5.2 Η κατασκευή του πλαισίου 93
5.3 Κατασκευή συστήματος κατακόρυφης κίνησης 94
5.4 Κατασκευή συστήματος οριζόντιας κίνησης 96
5.5 Κατασκευή υλικών σε τρισδιάστατο εκτυπωτή 101
5.5.1 Ο εκτυπωτής CubeX 101
5.5.2 Σχεδιασμός και κατασκευή 101
5.5.3 Τροποποίηση και κατεργασία τεμαχίων 103
5.6 Τελική μορφή 105

6 Συμπεράσματα 107

6.1 Παρατηρήσεις 107
6.2 Προτάσεις βελτίωσης 109

7 Βιβλιογραφία 111

8 Παράρτημα 116

8.1 Ενδεικτικά μηχανολογικά σχέδια των στοιχείων του εκτυπωτή 116
8.2 Συνεπτυγμένα αποτελέσματα ιδιοανυσματικής ανάλυσης (Hz) 119
8.3 Ενδεικτικό κοστολόγιο προμήθειας υλικών 120

8.4 Ηλεκτρονικό παράρτημα 120

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.Διακασίαστερεολιθογραφίας....27
Εικόνα2. ΔιαδικασίαSGC....28
Εικόνα3. ΔιαδικασίαSLS....29
Εικόνα 4. ΔιαδικασίαLOM....30
Εικόνα 5. Διαδικασία FDM....31
Εικόνα 6. Διαδικασία 3Dink-jetprinting....32
Εικόνα 7. Παράδειγμα πλαισίου 1: Κατασκευή από αλουμινένιους δοκούς σε σχήμα παραμετροποιημένου τετραγώνου....39
Εικόνα 8. Παράδειγμα πλαισίου 2: Ξύλινη κατασκευή βάσης σε τετραγωνικό σχήμα. 39
Εικόνα 9. Παράδειγμα πλαισίου 3: Κατασκευή από δοκούς αλουμινίου σε σχήμα ορθογώνιου παραλληλόγραμμου....39
Εικόνα 10. Παράδειγμα πλαισίου 4: Κατασκευή από σιδερένιες ράβδους σε τριγωνικό σχήμα....39
Εικόνα 11. Παράδειγμα πλαισίου 5: Κατασκευή από αλουμινένιους δοκούς σε σχήμα παραμετροποιημένου κύβου....39
Εικόνα 12. Παράδειγμα πλαισίου 6: Συνεργασία σιδερένιων ράβδων και πλάκας αλουμινίου για την κατασκευή του πλαισίου. 39
Εικόνα 13. Παράδειγμα πλαισίου 7: Κατασκευή από δοκούς αλουμινίου σε οριζόντια διάταξη....40
Εικόνα 14. Μετάδοση κίνησης με ιμάντα 41
Εικόνα 15. Ιμάντας - τροχαλία 41
Εικόνα 16. Μετάδοση κίνησης με μονό ιμάντα (γενική όψη)....42
Εικόνα 17. Μετάδοση κίνησης με μονό ιμάντα (λεπτομέρεια)....42
Εικόνα 18. Κρεμαγιέρα με γρανάζι 43
Εικόνα 19. Μηχανισμός κρεμαγιέρας 43
Εικόνα 20. Ball screw....43
Εικόνα 21. Μηχανισμός ball screw 43
Εικόνα 22. Γραμμικά ρουλεμάν 44
Εικόνα23. Στοιχεία γραμμικού ρουλεμάν 44
Εικόνα 24. Γραμμικοί οδηγοί....44
Εικόνα 25. Γραμμικός οδηγός....44
Εικόνα 26. Κινηματική δομή(1)....45
Εικόνα 27. Κινηματική δομή (2)....45
Εικόνα 28. Κινηματική δομή (3)....46
Εικόνα 29. Κινηματική δομή (4)....46
Εικόνα 30. Κινηματική δομή (5)....47
Εικόνα 31. Λειτουργία διάταξης 47
Εικόνα 32. Κινηματική δομή (6)....47
Εικόνα 33. Κινηματική δομή (7)....48
Εικόνα 34. Κινηματική δομή (8)....48
Εικόνα 35. Λειτουργία διάταξης 48
Εικόνα 36. Ακροφύσιο 49
Εικόνα 37. Σύγκριση της ταχύτητας εκτύπωσης διαφορετικών διαμέτρων ακροφυσίου ...51
Εικόνα 38 Σύγκριση της ποιότητας εκτύπωσης διαφορετικών διαμέτρων ακροφυσίου 51
Εικόνα 39. Διάτρητος κοχλίας....51
Εικόνα 40. Κύβος θέρμανσης....51
Εικόνα 41. Διάταξη μηχανισμού προώθησης νήματος 52

Εικόνα 42. Μηχανισμός προώθησης νήματος προσαρτημένος πάνω στην κεφαλή εκτύπωσης 52
Εικόνα 43. Μηχανισμός προώθησης νήματος τοποθετημένος σε ανεξάρτητο σημείο 52
Εικόνα 44. Πλάκα εκτύπωσης 53
Εικόνα 45. Θέρμανση πλάκας εκτύπωσης 53
Εικόνα 46. Nylon 56
Εικόνα 47. Laywood-d3 56
Εικόνα 48. LAYBRICK 56
Εικόνα 49. BENDLAY 57
Εικόνα 50. TPE 57
Εικόνα 51. Στάδια σχεδιομελέτης 60
Εικόνα 52. Τρισδιάστατο σχέδιο πλαισίου 62
Εικόνα 53. Σχέδιο πλαισίου 62
Εικόνα 54. Τρισδιάστατο σχέδιο συστήματος κίνησης 63
Εικόνα 55. Σχέδιο συστήματος κίνησης 63
Εικόνα 56. Τρισδιάστατο σχέδιο συστήματος κατακόρυφης κίνησης 66
Εικόνα 57. Κάτοψη συστήματος κατακόρυφης κίνησης 66
Εικόνα 58. Τρισδιάστατο μοντέλο κεφαλής απόθεσης υλικού 68
Εικόνα 59. Πλάγια όψη κεφαλής απόθεσης υλικού 68
Εικόνα 60. Τρισδιάστατο σχέδιο μηχανισμού προώθησης νήματος 70
Εικόνα 61. Σχέδιο μηχανισμού προώθησης νήματος 70
Εικόνα 62. Τρισδιάστατο σχέδιο μηχανισμού προώθησης νήματος 72
Εικόνα 63. Πειραματική πλάκα 73
Εικόνα 64. Κυματομορφή απόκρισης 74
Εικόνα 65. Φάσμα απόκρισης 74
Εικόνα 66. Περιβάλλουσα κυματομορφής 74
Εικόνα 67. Συσχετισμός παραμορφώσεων με συχνότητες 75
Εικόνα 68. Σχέδιο απλοποιημένης διάταξης 76
Εικόνα 69. Θέσης μελέτης κεφαλής εκτύπωσης 77
Εικόνα 70. Διαδικασία υπολογισμού που ακολουθεί το λογισμικό 78
Εικόνα 71. Ρυθμίσεις παραμέτρων 1 78
Εικόνα 72. Ρυθμίσεις παραμέτρων 2 79
Εικόνα 73. Εξαγωγή αποτελεσμάτων 81
Εικόνα 74. Επιλογές ανάλυσης 81
Εικόνα 75. Παραμορφώσεις δοκιμαστικού μοντέλου, 556.23Hz, θέση κεφαλής P.3 82
Εικόνα 76. Παραμόρφωση διάταξηςmode 3, θέση κεφαλής P.3 83
Εικόνα 77. Παραμόρφωση διάταξης mode 3, θέση κεφαλής P.1 83
Εικόνα 78. Παραμόρφωση διάταξης, mode 3, θέση κεφαλής P.5 84
Εικόνα 79. Παραμόρφωση διάταξης, mode 3, θέση κεφαλής P.2 84
Εικόνα 80.Παραμόρφωση διάταξης, mode 3, θέση κεφαλής P.4 84
Εικόνα 81. Περιοχές ενδιαφέροντος του πλαισίου 85
Εικόνα 82. Παραμόρφωση διάταξης, 712.79 Hz, θέση κεφαλής P.1 86
Εικόνα 83 Παραμόρφωση διάταξης, 1463.80 Hz, θέση κεφαλής P.5 86
Εικόνα 84. Παραμόρφωση διάταξης, 1627.79 Hz, θέση κεφαλής P.3 87
Εικόνα 85. Παραμόρφωση διάταξης, 2950.08 Hz, θέση κεφαλής P.2 87
Εικόνα 86. Σχέδιο βηματικού κινητήρα 88
Εικόνα 87. Λειτουργία βηματικού κινητήρα 89
Εικόνα 88. Συγκόλληση τόξου 91
Εικόνα 89. Κατασκευή πλαισίου 94
Εικόνα 90. Σύστημα κίνηση κάθετου άξονα 95

Εικόνα 91. Διάταξη κίνησης κάθετου άξονα 95
Εικόνα 92. Ρουλεμάν κάθετου κοχλία κίνησης.....96
Εικόνα 93. Διάταξη κίνησης στο κατακόρυφο επίπεδο 96
Εικόνα 94. Φωλιές με μορφή φλάντζας για τα γραμμικά ρουλεμάν της πλάκας κατακόρυφης κίνησης.....96
Εικόνα 95. Μηχανισμός ρύθμισης επιπεδότητας της πλάκας ωφέλιμης εκτύπωσης.....96
Εικόνα 96. Τελική διάταξη συστήματος κατακόρυφης κίνησης.....96
Εικόνα 97. Οπή στο πλαίσιο για την λειτουργικότητα του συστήματος.....97
Εικόνα 98. Τοποθέτηση βηματικού κινητήρα στο πλαίσιο.....97
Εικόνα 99. Φλατζωτή φωλιά ρουλεμάν κατασκευασμένη στον τόρνο.....98
Εικόνα 100. Έλεγχος γωνιακής απόκλισης σε κάθετη θέση 98
Εικόνα 101. Έλεγχος γωνιακής απόκλισης σε οριζόντια θέση 98
Εικόνα 102. Δημιουργία οπών για στήριξη του άξονα 99
Εικόνα 103. Τοποθέτηση άξονα στο πλαίσιο.....99
Εικόνα 104. Πλήρης διάταξη οριζόντιου άξονα κίνησης.....99
Εικόνα 105. Διάταξη μετά από την τοποθέτηση των τεσσάρων αξόνων κίνησης.....100
Εικόνα 106. Τελική μορφή μετά την τοποθέτηση όλων των αξόνων 100
Εικόνα 107. Συναρμογή αξόνων, τροχαλιών και ιμάντων μετάδοσης κίνησης. 100
Εικόνα 108. Εκτυπωτής CubeX 101
Εικόνα 109. Σκαρίφημα βάσης κεφαλής εκτύπωσης 102
Εικόνα 110. Σχεδιασμός στο λογισμικό 102
Εικόνα 111. Ρυθμίσεις γεμίσματος της δομής.....102
Εικόνα 112. Χαρακτηριστικά εκτύπωσης 102
Εικόνα 113. Τοποθέτηση αντικειμένου προς εκτύπωση 102
Εικόνα 114. Διαδικασία εκτύπωσης.....103
Εικόνα 115. Η βάση κεφαλής εκτύπωσης.....103
Εικόνα 116. Εξαρτήματα μηχανισμού προώθησης νήματος εκτύπωσης.....103
Εικόνα 117. Η κεφαλή εκτύπωσης.....103
Εικόνα 118. Κατεργασία φορέα κεφαλής εκτύπωσης.....104
Εικόνα 119. Το σύστημα οριζόντιας κίνησης με την κεφαλή απόθεσης υλικού 104
Εικόνα 120. Προσάρτηση του ακροφυσίου με τη βοήθεια του μεταλλικού ελάσματος...104
Εικόνα 121. Τελική μορφή κεφαλής εκτύπωσης 104
Εικόνα 122. Τελική συναρμολόγηση μηχανισμού προώθησης νήματος 105
Εικόνα 123. Μηχανισμός ρύθμισης απόστασης πινιόν δακτυλίου με συνεργαζόμενο ρουλεμάν.....105
Εικόνα 124. Κατασκευή πινιόν δακτυλίου και ροζέτας.....105
Εικόνα 125. Κάτοψη διάταξης οριζόντιας κίνησης.....106
Εικόνα 126. Προσαρμογή κεφαλής εκτύπωσης στο σύστημα οριζόντιας κίνησης 106
Εικόνα 127. Τελική μορφή τρισδιάστατου εκτυπωτή 106
Εικόνα 128. Λειτουργία μηχανισμού προώθησης νήματος εκτύπωσης.....106
Εικόνα 129. Σκαριφήματα ιδεών.....107
Εικόνα 130. Δοκιμαστικές διατάξεις τελικής μορφής.....108

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Προδιαγραφές εκτυπωτή.....61
Πίνακας 2. Σχέδια και περιγραφή στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα οριζόντιας κίνησης 64
Πίνακας 3. Στοιχεία που απαρτίζουν το κατακόρυφο σύστημα κίνησης.....67
Πίνακας 4. Στοιχεία που απαρτίζουν την κεφαλή απόθεσης υλικού 69
Πίνακας 5. Στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα προώθησης του νήματος 71
Πίνακας 6. Ονοματολογία σημείων κεφαλής εκτύπωσης 77
Πίνακας 7. Επιλογές μεθόδου σύγκλισης.....81
Πίνακας 8. Επεξήγηση θέσεων ενδιαφέροντος του πλαισίου 85
Πίνακας 9. Τεχνικά χαρακτηριστικά βηματικού κινητήρα 89
Πίνακας 10. Στοιχεία υπολογισμών συχνότητας λειτουργίας συστήματος.....90
Πίνακας 11. Τεχνικά χαρακτηριστικά εκτυπωτή CubeX 101

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η μετατροπή μιας ιδέας σε σχέδιο και κατόπιν σε αντικείμενο, είναι μια σύνθετη διαδικασία με λιγότερα ή περισσότερα ενδιάμεσα στάδια που αποτελεί αυτό που ονομάζουμε γενικά σε επίπεδο πρωτοτύπου “κατασκευή” ενώ για μεγαλύτερη ποσότητα “παραγωγή”. Για την μετάβαση από τον ιδεατό κόσμο του σχεδίου στον φυσικό κόσμο των αντικειμένων, απαιτείτο (παλαιότερα) η μεσολάβηση ενός αριθμού εργατών και τεχνιτών οι οποίοι χρησιμοποιώντας τη δύναμη, την πείρα, τις δεξιότητες και τα εργαλεία τους, έδιναν μορφή και υλική υπόσταση στο σχέδιο. Εδώ και τρείς δεκαετίες περίπου τη μεσολάβηση αυτή σε πολλούς τομείς της παραγωγής, αναλαμβάνουν ολοένα και περισσότερο αυτοματοποιημένα συστήματα που βασίζονται στη ρομποτική. Σήμερα η ανάπτυξη μηχανών και τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης ανοίγει το δρόμο στο επόμενο στάδιο εξέλιξης της αυτοματοποίησης, το οποίο περιγράφεται ως “άμεση ή ταχεία παραγωγή” (direct/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 κάποιο μηχανικό είτε έχουν προκύψει από τη σάρωση ενός φυσικού αντικειμένου, για να κατασκευάσουν, “τυπώνοντας” σε τρεις διαστάσεις, το φυσικό αντικείμενο. Η χρήση του όρου “τρισδιάστατη εκτύπωση” (3D Printing) για την περιγραφή των εν λόγω μηχανών και κατασκευαστικών μεθόδων, αντανακλά τις ιδιαίτερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται, οι οποίες θυμίζουν σε ικανό βαθμό τον τρόπο λειτουργίας των σημερινών εκτυπωτών λέιζερ ή ink-jet.

Οι τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τις μεθόδους κατασκευής (παραδοσιακές και μη) διαφόρων προϊόντων οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα και βασίζονται ουσιαστικά στην αφαίρεση υλικού από ακατέργαστα, χυτά, σφυρήλατα ή πρεσσαριστά τεμάχια, είτε με τη χρήση εργαλείων χειρός, είτε με τη χρήση εργαλειομηχανών (τόρνων, φρεζών, δραπάνων κλπ.) είτε με τη χρήση αυτοματοποιημένων μηχανών CNC ελεγχόμενων από υπολογιστή, μέχρις ότου το αντικείμενο λάβει την επιθυμητή μορφή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, από την άλλη πλευρά, αποτελεί μια διαδικασία πρόσθεσης υλικού κατά την οποία η κατασκευή ενός αντικειμένου πραγματοποιείται με την εναπόθεση, στερεοποίηση ή συγκόλληση διαδοχικών στρώσεων υλικού κατάλληλα διαμορφωμένων με τη χρήση τεχνικών παρόμοιων με τις τεχνικές τις δισδιάστατης εκτύπωσης, σύμφωνα με το αποθηκευμένο στον υπολογιστή σχέδιο ή εικόνα.

Ως τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης λοιπόν, μπορεί να περιγραφεί ένα σύνολο τεχνικών οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός αντικειμένου με τη διαδικασία της επίθεσης διαδοχικών και κατάλληλα διαμορφωμένων λεπτών στρώσεων υλικών.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η παρούσα εργασία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη, το σχεδιασμό και την κατασκευή της δομής ενός πρωτότυπου τρισδιάστατου εκτυπωτή ο οποίος θα πληρούσε τις ζητούμενες προδιαγραφές. Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη βιβλιογραφία που να αναφέρεται επακριβώς σε αυτό το αντικείμενο, είναι πλούσιο το επιστημονικό υλικό για τους επιμέρους τομείς που συνθέτουν τη σχετική προσπάθεια. Η τρισδιάστατη εκτύπωση και κατ' επέκταση οι τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης αποτελούν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον και κατά συνέπεια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εργασίες σε αυτόν τον τομέα. Εκτός από τις τεχνολογίες παραγωγής και μεθόδων κατασκευής, η επιστημονική κοινότητα έχει ασχοληθεί πολύ με το στάδιο της ανάλυσης και του σχεδιασμού και πιο συγκεκριμένα με την μελέτη ιδιοσυχνοτήτων και την παραμετρική μοντελοποίηση. Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάζονται εν συντομία κάποια από τα άρθρα που σχετίζονται με το θέμα της παρούσας εργασίας.

Οι G.C. Anzalone , Chenlong Zhang, B. Wijnen, P.G. Sanders, J. M. Pearce [10] παρουσιάζουν την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή μετάλλου, με κόστος μικρότερο από 2000$. Η δομή του βασίζεται στον Deltabot της Reprap και χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό έλεγχο ανοιχτού λογισμικού. Παραθέτουν τα μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά τους σχέδια καθώς επίσης γίνεται και μια συζήτηση για τις δυσκολίες της χρήσης αυτής της τεχνολογίας στο επίπεδο των οικιακών τρισδιάστατων εκτυπωτών.

Οι A. Budding, T.H.J. Vaneker, A.J.A. Winnubst [1] στην εργασία τους σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα μηχάνημα τρισδιάστατης εκτύπωσης με λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Μελέτησαν τη δυνατότητα δημιουργίας κεραμικών μεμβράνων με τεχνολογία 3D ink-jet printing. Προσπάθησαν να βελτιώσουν τις ιδιότητες των παραγόμενων στοιχείων του εκτυπωτή, επεμβαίνοντας στην χύδην πυκνότητα. Όλα τα σχέδια μηχανολογικά, ηλεκτρολογικά έχουν δημοσιευτεί για κοινή ελεύθερη χρήση.

Οι Jim Jose και Dr. Rajakannu Amuthakkannan [17] στην εργασία τους επικεντρώνονται στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός οικιακού τρισδιάστατου εκτυπωτή με φθηνά και εύκολα διαθέσιμα εξαρτήματα. Ο εκτυπωτής τους χρησιμοποιεί τεχνολογία FDM καθότι επιτρέπει μικρό μέγεθος κατασκευής. Μετέπειτα της διαδικασία σχεδιασμού

και κατασκευής, πραγματοποιούνται δοκιμαστικές εκτυπώσεις και παρουσιάζονται προβληματισμοί και προτάσεις βελτίωσης.

Οι XueYan, PGu [20] εξετάζουν τις κύριες τεχνολογίες και τις εφαρμογές της ταχείας πρωτοτυποποίησης και κατασκευής. Οι αρχές και τα χαρακτηριστικά των εν λόγω τεχνολογιών παρουσιάζονται εκτενώς, καθώς επίσης αναφέρονται και τα υπάρχοντα προβλήματα. Οι ίδιοι έχουν ασχοληθεί αρκετά και με την γεωμετρική μοντελοποίηση σε παρόμοιες δημοσιεύσεις τους.

ΟιJ.-P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa [6] στην συγκεκριμένη δημοσίευση προσπαθούν να συνοψίσουν μια δεκαετία ερευνών και εξελίξεων πάνω στην ταχεία προτυποποίηση. Το πρώτο μέρος της εργασίας αφορά περισσότερο ορισμένες γενικές οικονομικές και τεχνολογικές τάσεις. Το δεύτερο μέρος παρέχει περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις διαδικασίες και τις μεθόδους.

Οι Μπιλάλης Ν., Μαραβελάκης Ε [30], μέσα από το βιβλίο τους αναλύουν τον τρόπο γεωμετρικής μοντελοποίησης και σχεδιασμού με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Παρομοίως, ο K-H Chang [8], αναλύει την τρισδιάστατη μοντελοποίηση και παρουσιάζει αρκετά παραδείγματα εφαρμογής μέσα από γνωστά σχεδιαστικά προγράμματα όπως είναι το Pro/Engineerκαι το Solidworks. Επιπλέον οι Budynas και Nisbett [19] θέτουν στον αναγνώστη βασικούς πυλώνες για τον ορθό μηχανολογικό σχεδιασμό με έμφαση στις πιο συνήθης μηχανικές διατάξεις.

Οι Lengvarský και Bocko [16] παρουσιάζουν το θεωρητικό υπόβαθρο της ιδιοανυσματικής ανάλυσης. Επεξηγείται με σαφήνεια η πειραματική διαδικασία της ανάλυσης κραδασμών και πραγματοποιείται η ανάλυση σε μια πειραματική διάταξη ενός βαθμού ελευθερίας. Οι Z.Fu, J. He [25], στο βιβλίο τους παρέχουν πληροφορίες για τη θεωρία της ιδιοανυσματικής ανάλυσης και τις εφαρμογές της. Κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει ένα σημαντικό τεχνολογικό εργαλείο στην αναζήτηση και τον προσδιορισμό, τη βελτίωση και τη βελτιστοποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών των μηχανολογικών διατάξεων.

OR.K. Rajput [25] περιγράφει εκτενώς τις μεθόδους και τις διαδικασίες παραγωγής και κατασκευής. Παρέχει σημαντικές λεπτομέρειες και κατατοπίζει τον αναγνώστη σχετικά με τις σημερινές τεχνολογίες, τα συστήματα παραγωγής και τις βασικές αρχές που διέπουν την εκάστοτε τεχνική.

1.3 Δομή Εργασίας

Στο 1^{ο} κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για την ραγδαία πλέον ανάπτυξη των τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους καθώς και μια γενική ανασκόπηση της τεχνολογίας αυτής. Επιπλέον παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η δομή της εργασίας.

Στο 2^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικότερα η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και κατ' επέκταση της ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων. Επιπλέον περιγράφονται οι επικρατέστερες μέθοδοι αυτής της τεχνολογίας.

Στο 3^{ο} κεφάλαιο παρατίθενται τα στοιχεία της μελέτης γύρω από τους σημερινούς τρισδιάστατους εκτυπωτές. Μελετώνται πληροφορίες γύρω από το πλαίσιο, τη μετάδοση κίνησης, την κεφαλή απόθεσης υλικού, την πλάκα εκτύπωσης, το μηχανισμό προώθησης υλικού και τα υλικά εκτύπωσης.

Στο 4^{ο} κεφάλαιο πραγματοποιείται η γεωμετρική μοντελοποίηση όλων των επιμέρους στοιχείων που τον απαρτίζουν στο λογισμικό σχεδίασης. Επιπλέον παρατίθενται τα αποτελέσματα μελέτης ιδιοσυχνοτήτων μαζί με σχόλια από την μελέτη τους. Δίνονται στοιχεία για τους βηματικούς κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης πραγματοποιείται ο υπολογισμός της συχνότητας λειτουργίας τους.

Στο 5^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια στοιχεία για τις κατεργασίες και το σχετικό εξοπλισμό που απαιτήθηκε για την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων του πρωτότυπου εκτυπωτή. Επιπλέον παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης του φυσικού μοντέλου.

Στο 6^{ο} κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα, οι παρατηρήσεις, οι προβληματισμοί και προτάσεις βελτίωσης που προκύπτουν από την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

2 Τρισδιάστατη εκτύπωση και ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων

Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης η οποία έχει ιστορία δύο περίπου δεκαετιών, ξεκίνησε με την ανάπτυξη των τεχνικών ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων (Rapid Prototyping, RP) κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι οποίες αποσκοπούσαν στην απάλειψη των ατελειών και στη δραστική μείωση του χρόνου κατασκευής των πρωτοτύπων διαφόρων προϊόντων.

Η κατασκευή πρωτοτύπων αποτελούσε πάντα μέρος της διαδικασίας σχεδίασης και ανάπτυξης ενός προϊόντος, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της λειτουργικότητάς του και στην ενσωμάτωση σε αυτό διαφόρων επιθυμητών χαρακτηριστικών. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές που αναπτύσσουν τμήματα μηχανισμών, ή αντικείμενα πολύπλοκης μορφής, μπορούν να αποκτήσουν, να μεταφέρουν ή να εξηγήσουν σε άλλους πολύ περισσότερα στοιχεία και πληροφορίες διαθέτοντας ένα χειροπιαστό, ακριβές, τρισδιάστατο μοντέλο, αντί ενός σχεδίου ή μιας απεικόνισης του αντικειμένου στην οθόνη ενός υπολογιστή. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός ακριβούς πρωτοτύπου του εξαρτήματος κάποιου κινητήρα, επιτρέπει στους μηχανικούς να διαπιστώσουν με ευχέρεια αν το συγκεκριμένο τμήμα ταιριάζει από την άποψη των διαστάσεων και της μορφής του με το υπόλοιπο λειτουργικό σύνολο. Κατ' ανάλογο τρόπο, οι υπεύθυνοι της προώθησης στην αγορά ενός καταναλωτικού προϊόντος μπορούν, έχοντας στα χέρια τους ένα ακριβές πρωτότυπο του αντικειμένου που προτείνει το σχεδιαστικό τμήμα, να διαπιστώσουν εύκολα και έγκαιρα εάν αυτό έχει τις επιθυμητές αναλογίες, το σχήμα ή τα άλλα χαρακτηριστικά που απαιτεί το κοινό στο οποίο απευθύνεται.

Παλαιότερα, η διαδικασία της κατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων και προτύπων συνίστατο στη χρονοβόρα και υψηλού κόστους κατασκευή από έμπειρους και επιδέξιους τεχνίτες με τη χρήση εργαλείων χειρός και μικρών εργαλειομηχανών ακριβείας. Εκτός από τον χρόνο και το κόστος, η διαδικασία ήταν παραδοσιακής προτυποποίησης, ενείχε πάντα ένα στοιχείο ασάφειας, καθώς μεταξύ του αρχικού σχεδίου και του μοντέλου μεσολαβούσε πάντα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό το χέρι και η αντίληψη του κατασκευαστή μοντέλων. Η κατάσταση αυτή άρχισε να αλλάζει με τη χρησιμοποίηση εργαλειομηχανών ελεγχόμενων από υπολογιστή, καθώς οι παράμετροι του κατασκευαζόμενου πρωτοτύπου μπορούσαν να ελεγχθούν εξαρχής ώστε να ανταποκρίνονται με ακρίβεια στο βασικό σχέδιο. Και πάλι όμως η διαδικασία ήταν χρονοβόρα και ακριβή, ιδίως στην περίπτωση που τυχόν μικρότερες ή μεγαλύτερες τροποποιήσεις επέβαλλαν την εκ νέου κατασκευή του μοντέλου.

Η ανάπτυξη των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης, αποτέλεσε το καθοριστικό σημείο τομής με το παρελθόν. Οι νέες μηχανές, επέτρεψαν την κατασκευή πρωτοτύπων ή αντιγράφων ακριβείας, απευθείας από ψηφιακά μοντέλα των αντικειμένων δημιουργημένα με τη χρήση λογισμικού CAD (Computer Aided Design), με μικρότερο κόστος και μέσα σε διάστημα ωρών αντί των εβδομάδων ή των μηνών που απαιτούσαν οι παλαιότερες διαδικασίες.

Η δραστική μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής των πρωτοτύπων, βελτιστοποιεί τη διαδικασία της ανάπτυξης ενός προϊόντος, παρέχοντας στους κατασκευαστές τη χρονική άνεση να τελειοποιήσουν τα προϊόντα τους στο πιο κρίσιμο στάδιο της ανάπτυξής τους, αυτό της βασικής σχεδίασης, με αποτέλεσμα να φθάνουν στην αγορά ολοκληρωμένα, ταχύτερα και με μικρότερο κόστος. Ήδη από το 1994 οι τεχνικοί της εταιρίας αεροπορικών κινητήρων Pratt&Whitney δήλωναν ότι η εισαγωγή τεχνικών ταχείας πρωτοτυποποίησης για την κατασκευή χυτών ακριβείας, επέτρεψε μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής της τάξης του 70 έως 90%. Ας επισημάνουμε στο σημείο αυτό πως "ταχεία" πρωτοτυποποίηση δεν σημαίνει "στιγμιαία": στην πράξη, όλα σχεδόν τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με τις μεθόδους αυτές απαιτούν, ενδεικτικά, τρείς έως 72 ώρες, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους. Επιπλέον, η τρισδιάστατη εκτύπωση συνοδεύεται ακόμη από αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά το μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν (όχι μεγαλύτερα των 0,125 κυβικών μέτρων) και τα χρησιμοποιούμενα υλικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι η κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων είναι σχετικά δύσκολη.

Οι τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης που είναι διαθέσιμες στην αγορά σήμερα, περιλαμβάνουν έξι βασικές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης, κάθε μία από τις οποίες έχει τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματά της: τη στερεολιθογραφία (stereolithography, STL), την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με τη χρήση ακτίνων λέιζερ (selective laser sintering, SLS), την παραγωγή αντικειμένων μέσω της συγκόλλησης λεπτών φύλων (Laminated Object Manufacturing, LOM), την κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης/τήξης διαδοχικών στρώσεων (Fused Deposition Modeling), την τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet (3Dink-jet Printing) και μία παραλλαγή της στερεολιθογραφίας γνωστή ως Solid Ground Curing, SGC. Όλες οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης ακολουθούν μια κοινή διαδικασία πέντε σταδίων:

1. Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD του σχεδίου ή του σκαναρισμένου αντικειμένου.
2. Μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL.
3. "Τεμαχισμό" με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, του αρχείου STL σε λεπτές "διατομές" ελάχιστου πάχους.

4. Κατασκευή του αντικειμένου με τη διαδοχική απόθεση των διατομών.
5. Καθαρισμό και τελικό φινίρισμα του μοντέλου.

Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου εκτελείται κατά κανόνα με λογισμικό δημιουργίας στερεών μοντέλων. Ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα υπάρχον αρχείο CAD ή να δημιουργήσει ένα νέο, ειδικά για τις ανάγκες της πρωτοτυποποίησης. Η διαδικασία αυτή είναι κοινή για όλες τις τεχνικές ταχείας πρωτοτυποποίησης.

Η μετατροπή του μοντέλου CAD σε STL (STereoLithography), αποτελεί το δεύτερο στάδιο της τρισδιάστατης εκτύπωσης, έχοντας καθιερωθεί ως πρότυπο εξαρχής από τη βιομηχανία πρωτοτυποποίησης καθώς ήταν η πρώτη σχετική τεχνική που αναπτύχθηκε. Οι διάφορες εκδόσεις του λογισμικού CAD, χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγορίθμους για την αναπαράσταση στερεών (τρισδιάστατων) αντικειμένων. Η μορφή STL αναπαριστά μια τρισδιάστατη επιφάνεια ως ένα σύνολο στοιχειωδών επίπεδων τριγώνων. Επειδή τα αρχεία STL χρησιμοποιούν επίπεδες επιφάνειες, δεν μπορούν να αναπαραστήσουν με ακρίβεια 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 καταλήξουν σε ένα χρήσιμο αρχείο STL. Και αυτή η διαδικασία είναι κοινή για όλες τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Το τρίτο βήμα της διαδικασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης, συνίσταται στην εκτέλεση 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 εγκάρσιων διατομών (πάχους 0,01 έως 0,7 mm, ανάλογα με την τεχνική εκτύπωσης), 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). Σήμερα είναι εμπορικά διαθέσιμα διάφορα τέτοια προγράμματα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, τα περισσότερα από τα οποία επιτρέπουν στο 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 στους τρείς άξονεςX,Y,Z. Για παράδειγμα κατά τον άξοναZ (κατακόρυφο) 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 το χρόνο που θα απαιτηθεί για

την κατασκευή του πρωτοτύπου, εφόσον οι σχεδιαστές προτιμούν να επιλέγουν τη μικρότερη διάσταση του αντικειμένου παράλληλη στον άξονα Z , έτσι ώστε να μειώσουν τον αριθμό των διαδοχικών λεπτών διατομών που θα αποτεθούν η μία πάνω στην άλλη, μειώνοντας έτσι τον συνολικό χρόνο κατασκευής.

Το τέταρτο στάδιο είναι η κατασκευή του φυσικού αντικειμένου με τη χρήση των έξι τεχνικών που προαναφέρθηκαν, 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.

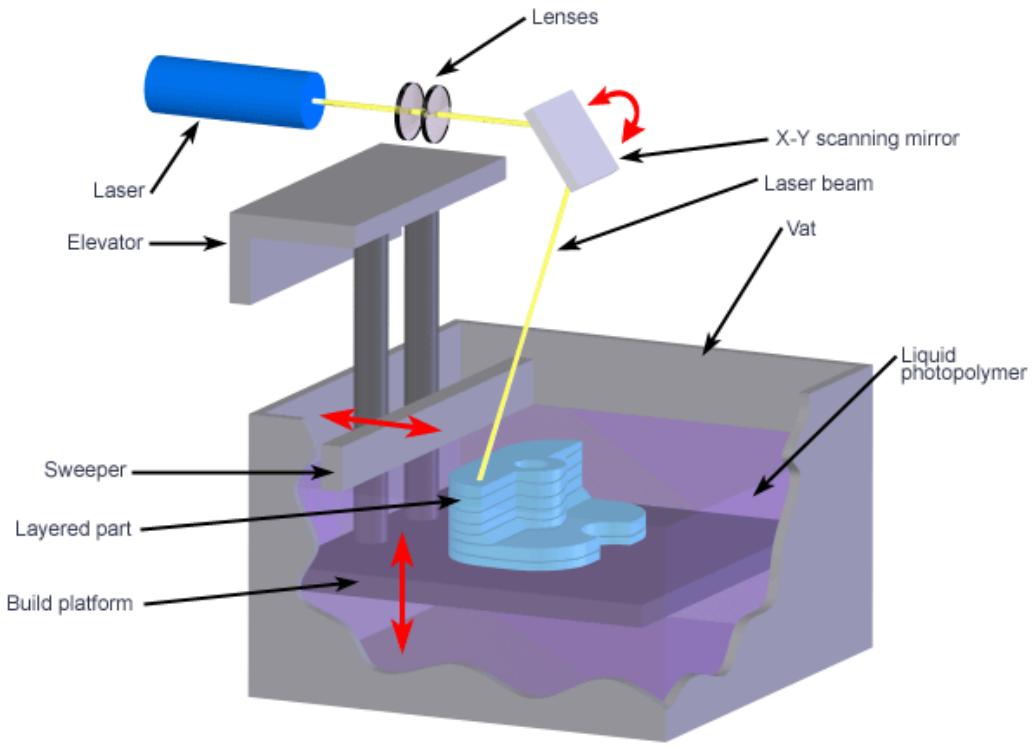
Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αντικειμένου από τη μηχανή και την απόσπασή του από τυχόν στηρίγματα. Μερικά πρωτότυπα κατασκευασμένα από φωτοευαίσθητα υλικά υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία σκλήρυνσης πριν παραδοθούν για χρήση. Μπορεί επίσης να απαιτηθεί ο καθαρισμός και το φινίρισμα της επιφάνειας του πρωτοτύπου ή άλλες επεμβάσεις που σχετίζονται με την εμφάνιση ή την αντοχή του

2.1 Τεχνολογίες ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων

2.1.1 SLA

Η στερεολιθογραφία (stereolithography-SLA) είναι η παλαιότερη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης. Την εφηύρε ο Charles Hall το 1984 και κατοχυρώθηκε το 1986. 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 ή ακρυλική ρητίνη. 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 ακτίνων χαμηλής ισχύος 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 σαρώνει τη νέα διατομή πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του αντικειμένου. Στη συνέχεια το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο, πλένεται, αφαιρούνται τα τυχόν στηρίγματά του και κατόπιν τοποθετείται σε ένα "φούρνο" υπεριωδών ακτίνων για τη τελική σκλήρυνση. Ας αναφέρουμε ότι κατά τα πρώτα χρόνια της στερεολιθογραφίας, τα κατασκευαζόμενα αντικείμενα ήταν σχετικά εύθραυστα, ενώ εμφάνιζαν διάφορες στρεβλώσεις και παραμορφώσεις κατά τη φάση της σκλήρυνσης, αλλά τα προβλήματα αυτά διορθώθηκαν

αργότερα. Οι πρώτες μηχανές στερεολιθογραφίας κατασκευάστηκαν από την εταιρία 3D Systems (ΗΠΑ) το 1988 και η οποία κατέχει έως σήμερα σημαντική θέση στην αγορά των μηχανών ταχείας πρωτοτυποποίησης.

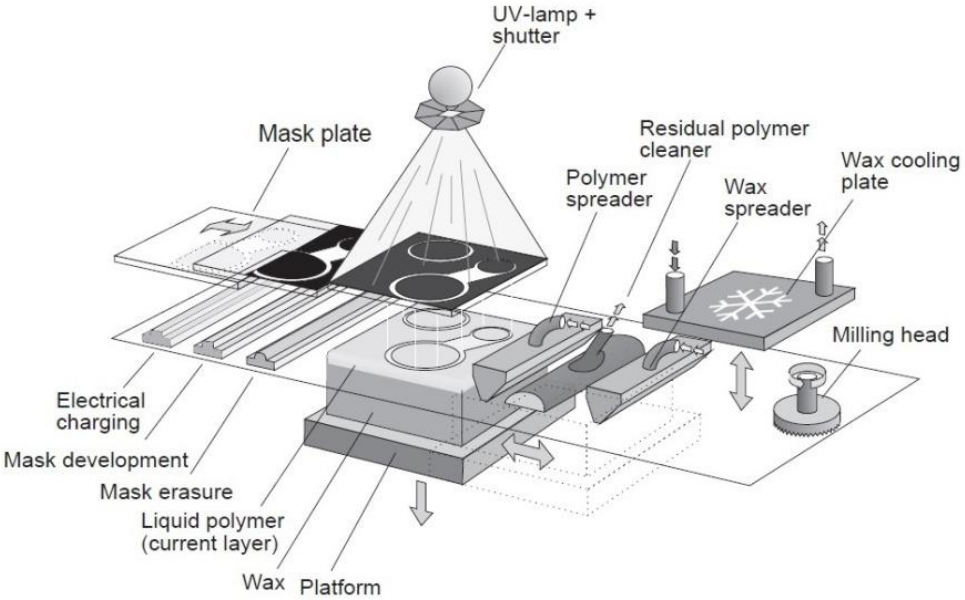


Εικόνα 1.Διακασίαστερεολιθογραφίας

2.1.2 SGC

Η τεχνική αυτή η οποία αναπτύχθηκε από την αμερικανική εταιρία Cubital America, θεωρείται παραλλαγή της στερεολιθογραφίας, καθώς χρησιμοποιεί και αυτή υπεριώδεις ακτίνες για τη σκλήρυνση φωτοευαίσθητων πολυμερών. Σε αντίθεση με τη στερεολιθογραφία, στην τεχνική SGC οι υπεριώδεις ακτίνες φωτίζουν και σκληραίνουν ολόκληρο το στρώμα 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 6άση με τη ρητίνη), με τη χρήση μιας ηλεκτροστατικής διαδικασίας παρόμοιας με αυτή των φωτοτυπικών μηχανημάτων. Κατόπιν το στένσιλ εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία η οποία διέρχεται μόνο από τα διαφανή τμήματά του σκληραίνοντας στις αντίστοιχες περιοχές το στρώμα ρητίνης. 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. Ακολουθεί λείανση της άνω επιφάνειας του στρώματος

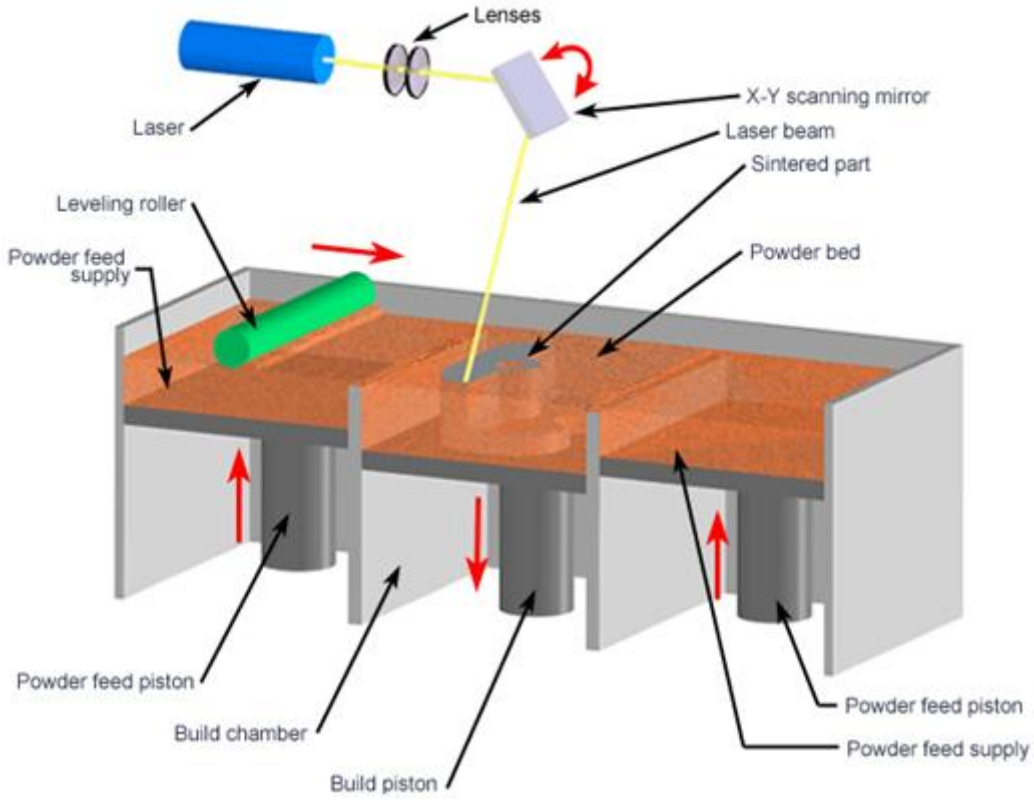
ώστε να γίνει επίπεδη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Οι μηχανές SGC, είναι ογκώδεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μεγάλων αντικειμένων.



Εικόνα2. ΔιαδικασίαSGC

2.1.3 SLS

Η τεχνική SLS αναπτύχθηκε από τον Carl Deckard στο Πανεπιστήμιο του Texas και κατοχυρώθηκε το 1989. Στην τεχνική αυτή μια ακτίνα λέιζερ λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά (νάϋλον, ελαστομερή ή μέταλλα) τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος "στρώνει" μια ποσότητα σκόνης κατάλληλου πάχους πάνω σε μια επιφάνεια και μια κεφαλή λέιζερ διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής 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.

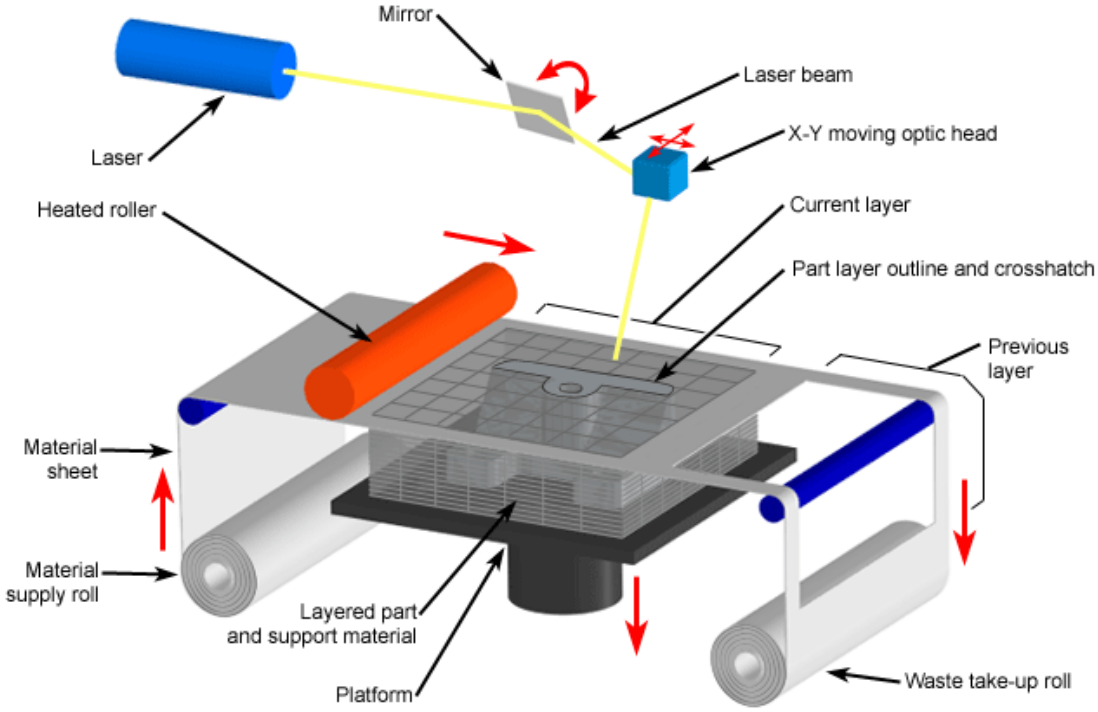


Εικόνα3. ΔιαδικασίαSLS

2.1.4 LOM

Η τεχνική Laminated Object Manufacturing (LOM), η οποία αναπτύχθηκε από την αμερικανική εταιρία Helisys, βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με τη συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού που φέρουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας (heat-activated glue). Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χαρτί, ενώ αργότερα η εταιρία ανέπτυξε και χρησιμοποίησε 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 πάνω σε μια 6άση και κατόπιν ένας θερμαινόμενος κύλινδρος περνά πάνω από αυτό πιέζοντάς το ώστε να κολλήσει πάνω σε αυτήν. Στη συνέχεια μια κεφαλή λέιζερ "κόβει" το σχήμα της διατομής πάνω στο χαρτί και κατόπιν χαράζει μικρά τετράγωνα στο υπόλοιπο τμήμα του ώστε να διευκολύνεται η απόσπαση του αντικειμένου όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του. Αφού κοπεί το πρώτο στρώμα, η 6άση κατέρχεται, ένα νέο φύλλο προωθείται από τη διάταξη τροφοδοσίας και κατόπιν η 6άση 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 η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου, το οποίο στην περίπτωση που χρησιμοποιείται χαρτί θα έχει την υφή ξύλου. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η επικάλυψη του αντικειμένου με χρώμα ή βερνίκι ώστε να μη προσβάλλεται και

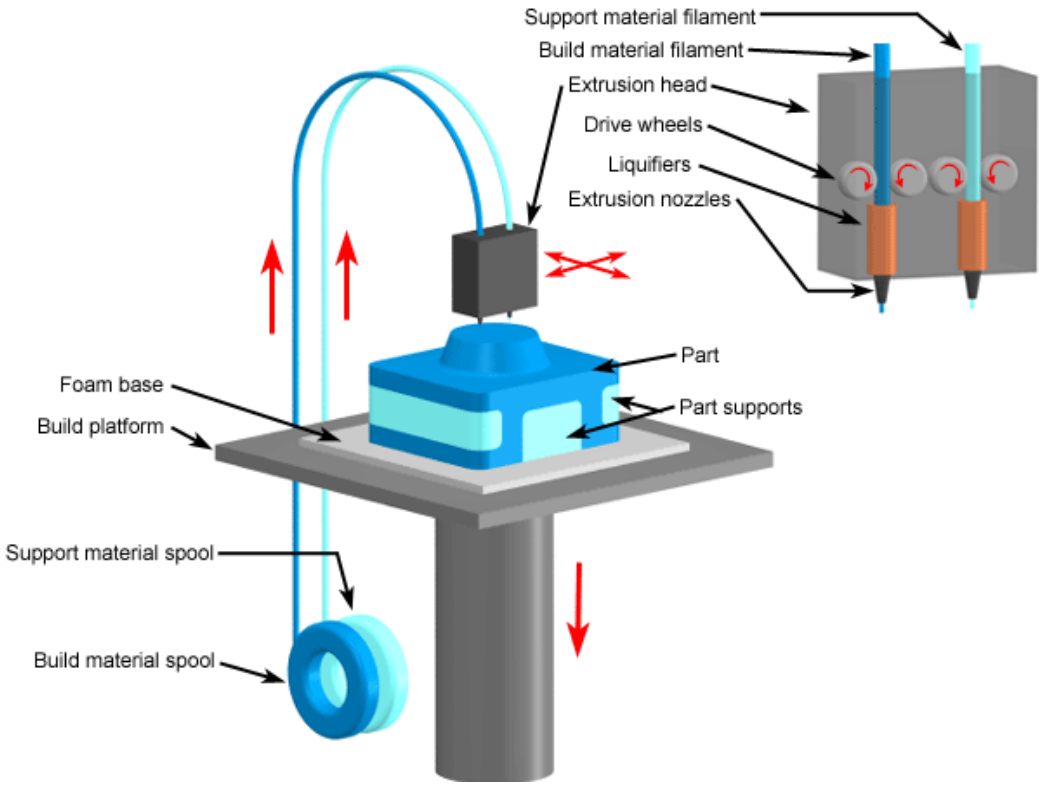
παραμορφώνεται από την υγρασία. Όταν χρησιμοποιούνται ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης το αντικείμενο πρέπει να υποστεί μια διαδικασία "πυροσυσσωμάτωσης" (sintering) για την αύξηση της αντοχής του. Ας σημειωθεί ότι από το 2001 η εταιρία Helisys δεν δραστηριοποιείται πλέον .



Εικόνα 4. ΔιαδικασίαLOM

2.1.5 FDM

Στην τεχνική Fused deposition modeling (FDM) ίνες θερμού πλαστικού υλικού εξέρχονται από μια κεφαλή η οποία κινείται στο επίπεδο X-Y. Η κεφαλή εναποθέτει λεπτές στρώσεις του πλαστικού πάνω σε μια βάση κατά τρόπο παρόμοιο με την εναπόθεση κρέμας πάνω σε ένα κέικ από έναν ζαχαροπλάστη, διαγράφοντας την πρώτη διατομή. Επειδή η βάση βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, το υλικό στερεοποιείται γρήγορα. Κατόπιν η βάση κατέρχεται και η κεφαλή εναποθέτει το δεύτερο στρώμα πάνω στο πρώτο. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου. Μηχανές FDM κατασκευάζονται από την αμερικανική εταιρία Statasys σε δύο εκδόσεις: μία για την ταχεία κατασκευή μοντέλων που αποδίδουν τη γενική ιδέα ενός σχεδίου και μία βραδείας εκτύπωσης που επιτρέπει την κατασκευή πρωτοτύπων ακριβείας. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν ABS, διάφορα ελαστομερή, πολυκαρβονικά υλικά, πολυφαινολσουλφονάλη κλπ.



Εικόνα 5. Διαδικασία FDM

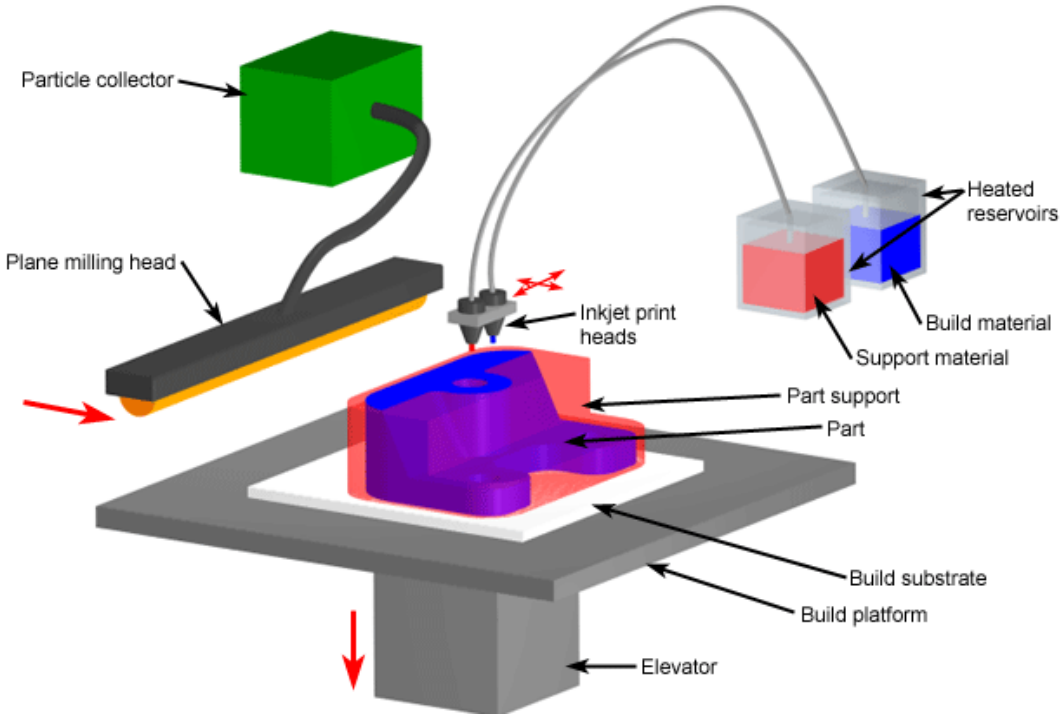
2.1.6 3D ink-jet printing

Η τεχνική αναφέρεται σε μια κατηγορία μηχανών που χρησιμοποιούν τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης ink-jet. Η πρώτη από τις μηχανές αυτές (γνωστή ως 3D Printing, 3DP) αναπτύχθηκε από το MIT το οποίο χορήγησε δικαιώματα κατασκευής σε έναν αριθμό εταιριών (Soligen Corporation, Extrude Hone, Z Corporation και άλλες). Ο εκτυπωτής ZCorp 3D της Z Corporation αποτελεί τυπικό παράδειγμα της κλάσης: Τα αντικείμενα κατασκευάζονται πάνω σε μια βάση η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο που περιέχει το υλικό υπό μορφή σκόνης. Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας, η βάση κατέρχεται κατά το πάχος μιας διατομής και μια διάταξη τροφοδοσίας απλώνει επάνω της μια κατάλληλη ποσότητα σκόνης. Κατόπιν μια κεφαλή ink-jet που κινείται κατά τους άξονες X, Y ψεκάζει επιλεκτικά ένα συγκολλητικό υγρό το οποίο στερεοποιεί τη σκόνη διαγράφοντας το επιθυμητό σχήμα της διατομής. Η περίσσεια σκόνης που απομένει χρησιμεύει για τη στήριξη του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Στη συνέχεια η βάση κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής. Προστίθεται και πάλι η ανάλογη ποσότητα σκόνης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή, το αντικείμενο απομακρύνεται από το δοχείο και με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα καθαρίζεται από την περίσσεια σκόνης. Τα ολοκληρωμένα τεμάχια μπορούν να ψεκαστούν με κερί, κυανοακρυλική κόλλα ή με άλλες ουσίες για να βελτιωθεί η αντοχή τους και το φινίρισμα της επιφάνειάς τους. Το τυπικό πάχος κάθε διατομής είναι 0,1mm. Η τεχνική είναι υψηλής

ταχύτητας, ενώ παράγει αντικείμενα με σχετικά αδρό φινίρισμα. Η Z corp χρησιμοποιεί δύο διαφορετικά υλικά, μια σκόνη με βάση αμύλου (η οποία δεν παράγει στιβαρά αντικείμενα, αλλά μπορεί να καεί και συνεπώς να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μοντέλων για χυτά ακριβείας) και μία κεραμική σκόνη. Προσφέρει επίσης τη δυνατότητα εισαγωγής χρωμάτων στην κατασκευή.

Οι μηχανές 3Dink-jet Printing της εταιρίας 3D Systems (γνωστές και ως Thermo ή Multi-jet Printers) χρησιμοποιούν μια γραμμική διάταξη κεφαλών ink-jet για την ταχεία κατασκευή μοντέλων από θερμοπλαστικό υλικό. Εάν το αντικείμενο έχει μικρό πλάτος, είναι δυνατή η κατασκευή κάθε διατομής με μία μόνο διέλευση της κεφαλής, αλλιώς εκτελούνται περισσότερες διελεύσεις μέχρι να κατασκευαστεί η διατομή.

Οι μηχανές της σειράς Model Maker της εταιρίας Sanders Prototype χρησιμοποιούν μια διαφορετική τεχνική ink-jet: Οι μηχανές διαθέτουν δύο κεφαλές ink-jet, από τις οποίες η μία εναποθέτει θερμοπλαστικό υλικό χαμηλού σημείου τήξης και η άλλη κερί για τη στήριξη του κατασκευαζόμενου αντικειμένου. Μετά την εκτύπωση κάθε διατομής, μια κεφαλή με κοπτικό εργαλείο φρεζάρει τη διατομή ώστε να αποκτήσει ομοιόμορφο πάχος. Η διαδικασία αυτή αποδίδει πρωτότυπα εξαιρετικής ακριβείας και για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιείται στην κατασκευή μοντέλων για χύτευση κοσμημάτων.



Εικόνα 6. Διαδικασία 3Dink-jetprinting

2.2 Χρήσεις και εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης

Οι εφαρμογές και τα οφέλη από τη χρήση των τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων είναι πολλαπλά. Πρώτον, τα πρωτότυπα

διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ όλων των συντελεστών της παραγωγής, διότι η κατανόηση των τρισδιάστατων αντικειμένων είναι ευκολότερη από την ανάγνωση δισδιάστατων σχεδίων. Σήμερα, η επικοινωνία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς πολλά επιμέρους τμήματα της παραγωγικής διαδικασίας εκτελούνται ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, η ταχεία κατασκευή και ανταλλαγή πρωτοτύπων στο στάδιο της σχεδίασης, επιτρέπει στο τμήμα παραγωγής μιας κατασκευάστριας εταιρίας να ετοιμάσει τα κατάλληλα εργαλεία και να αρχίσει να εγκαθιστά τις γραμμές παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα το καλλιτεχνικό τμήμα μπορεί να αρχίσει τη σχεδίαση της συσκευασίας πριν ακόμη οριστικοποιηθεί το σχέδιο του προϊόντος.

Δεύτερον, η κατασκευή πρωτοτύπων η οποία ήταν ανέκαθεν αναγκαία για τη διεξαγωγή μετρήσεων και δοκιμών στο στάδιο της σχεδίασης ενός προϊόντος, ώστε να διαπιστωθούν έγκαιρα τυχόν προβλήματα λειτουργικότητας, αντοχής κ.ά. επιταχύνεται και διευρύνεται με τη χρήση μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες καθιστούν εύκολη πλέον την ταχεία κατασκευή ενός πρωτοτύπου ώστε να μελετηθούν και να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες και κατόπιν την επανασχεδίαση του και την κατασκευή νέου πρωτοτύπου κ.ο.κ., διαδικασία ιδιαίτερα χρονοβόρα με τις παλαιότερες μεθόδους κατασκευής πρωτοτύπων.

Τρίτον, εκτός από το πλεονέκτημα της ταχύτητας, η τρισδιάστατη εκτύπωση προσφέρει δυνατότητες που δεν προσφέρουν τα παλαιότερα, μεταλλικά συνήθως, πρωτότυπα. Για παράδειγμα οι τεχνικοί της Porsche χρησιμοποίησαν πρωτότυπα από διαφανές πλαστικό του καλύμματος του συστήματος μετάδοσης των μοντέλων της σειράς 911, κατασκευασμένο με την τεχνική της στερεολιθογραφίας, για να μελετήσουν παραστατικά την κυκλοφορία της 6αλ6ολίνης, ενώ η γαλλική SNECMA που κατασκευάζει στροβιλοκινητήρες χρησιμοποίησε το πρωτότυπο ενός στροβίλου το οποίο κατασκευάστηκε επίσης με τη μέθοδο της στερεολιθογραφίας, για να μελετήσει την καταπόνηση των πτερυγίων του με τη βοήθεια φωτοελαστικών μεθόδων ανάλυσης.

Αλλά τα σημαντικότερα οφέλη αναμένονται από τη μεταφορά των τεχνικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης από τον χώρο της ταχείας προτυποποίησης, στην ταχεία κατασκευή εργαλείων (Rapid Tooling) και κυρίως στην ταχεία παραγωγή έτοιμων προς διάθεση προϊόντων (Rapid Manufacturing).

Η ταχεία κατασκευή εργαλείων αποτελεί μια από τις πλέον επιθυμητές εφαρμογές των τεχνικών της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Είναι γνωστό ότι η κατασκευή εργαλείων (tooling) αποτελεί ένα από τα πιο χρονοβόρα και ακριβά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, λόγω της υψηλής ποιότητας που απαιτείται. Τα εν λόγω εργαλεία (κυρίως καλούπια, μήτρες, αλλά και εργαλεία κατεργασίας μετάλλου) έχουν συχνά πολύπλοκη γεωμετρία, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να είναι σκληρά, να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, να διαθέτουν εξαιρετικά λείες επιφάνειες και να χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια

διαστάσεων (της τάξης του 0,01 mm). Σήμερα τα εργαλεία αυτά κατασκευάζονται είτε σε ειδικά μηχανήματα CNC, είτε με τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης, είτε στο χέρι. Οι μέθοδοι αυτές είναι ακριβές και χρονοβόρες και είναι προφανές ότι οι βιομηχανίες θα χαιρέτιζαν οποιαδήποτε τεχνική μείωνε τον χρόνο και το κόστος κατασκευής. Η ταχεία κατασκευή εργαλείων με τη χρήση τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης, εκτιμάται ότι θα μειώσει το κόστος και τον χρόνο κατασκευής τους έως και 75%.

Τα βήματα που έχουν γίνει μέχρι στιγμής στον τομέα αυτόν αφορούν κυρίως την έμμεση κατασκευή εργαλείων (indirecttooling), η οποία συνίσταται στην κατασκευή προτύπων με 6άση τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν καλούπια και μήτρες.

Η Ταχεία Παραγωγή (RapidManufacturing) όπως έχει γίνει γνωστή η αυτοματοποιημένη παραγωγή έτοιμων προς πώληση προϊόντων, κατευθείαν από ψηφιακά δεδομένα CAD, αποτελεί την πλέον εντυπωσιακή και υποσχόμενη εξέλιξη της Ταχείας Προτυποποίησης. Τα πλεονεκτήματα της ταχείας παραγωγής δεν περιορίζονται μόνο στην αύξηση της ταχύτητας, στην ορθολογικοποίηση της παραγωγής και στη συνακόλουθη μείωση χρόνου και κόστους, αλλά επεκτείνονται και στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες (μηχανικές και άλλες) των κατασκευαζόμενων με τις τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης προϊόντων. Για παράδειγμα, ο έλεγχος σε μικροσκοπικό επίπεδο της δομής των προϊόντων μέσω της προσεκτικής επιλογής του υλικού, του πάχους και της μορφής των διαδοχικών διατομών, μπορεί να επιτρέψει την κατασκευή στιβαρότερων τεμαχίων από τα αντίστοιχα που κατασκευάζονται με συμβατικές τεχνικές χύτευσης ή σφυρηλάτησης. Επίσης, είναι δυνατή η εξοικονόμηση βάρους, καθώς η διαδικασία επιτρέπει την ενίσχυση με υλικό ακριβώς εκείνων των περιοχών όπου αυτό είναι αναγκαίο. Ακόμη, διευκολύνεται η κατασκευή πολύπλοκων μορφών, οι οποίες αν και βέλτιστες από σχεδιαστική άποψη, θα ήταν πολύ δύσκολο ή αντιοικονομικό να κατασκευαστούν με τις συμβατικές μεθόδους. Τέλος, είναι δυνατή η κατασκευή προϊόντων με ειδικά χαρακτηριστικά, όπως τα χάπια της αμερικανικής εταιρίας Therics, τα οποία κατασκευάζονται με την αλληλεπίθεση διαδοχικών στρώσεων διαφορετικών υλικών, επιτρέποντας την απελευθέρωση συγκεκριμένων δόσεων φαρμάκου ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Οι τομείς της παραγωγής στους οποίους έχουν ήδη εισαχθεί τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, περιλαμβάνουν την κατασκευή αεραγωγών και άλλων εξαρτημάτων για κινητήρες jet και πυραυλοκινητήρες, καλυμμάτων για τα ηλεκτρικά συστήματα αγωνιστικών αυτοκινήτων, ηλεκτρονικών και ηλεκτρομηχανικών εξαρτημάτων από κεραμικά υλικά, κεραμικών φίλτρων υψηλής απορροφητικότητας, μικρών γραναζιών, εξαρτημάτων αντλιών, βοηθημάτων ακοής, ιατρικών εμφυτευμάτων και προσθετικών οστών, τρισδιάστατων αρχιτεκτονικών μοντέλων, τρισδιάστατων τοπογραφικών μοντέλων

για τον σχεδιασμό στρατιωτικών επιχειρήσεων, αντιγράφων αρχαιολογικών ευρημάτων, αλλά και μοντέλων βρεφών λίγο πριν τη γέννησή τους (!) για ανυπόμονους γονείς.

Ο περιορισμένος αριθμός των προϊόντων που κατασκευάζονται με τη χρήση μηχανημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον, καθώς τα μηχανήματα θα γίνονται όλο και πιο γρήγορα με τη χρήση ισχυρότερων υπολογιστών, σύνθετου λογισμικού και βελτιωμένων συστημάτων ελέγχου και υλικών. Επίσης, βελτιώσεις στα οπτικά των λέιζερ και των σερβομηχανισμών που κινούν τις κεφαλές εκτύπωσης θα επιτρέψουν την αύξηση της ακρίβειας (η οποία φθάνει σήμερα τα 0,08 mm στους άξονες x,y αλλά είναι μικρότερη στον άξονα ζ) και βελτίωση του φινιρίσματος των επιφανειών των κατασκευαζόμενων αντικειμένων. Σημαντική αύξηση των προϊόντων αναμένεται επίσης καθώς όλο και περισσότερα υλικά (κεραμικά, σύνθετα και ιδίως μέταλλα) θα γίνονται διαθέσιμα σε μορφή τέτοια ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα μηχανήματα.

Η διάδοση των μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης αναμένεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον τομέα των ανταλλακτικών αυτοκινήτων και άλλων οχημάτων. Οι κατασκευαστές δεν θα χρειάζεται πλέον να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ανταλλακτικών, ούτε οι πελάτες να περιμένουν ημέρες για την άφιξή τους, καθώς οι παραγωγοί θα μπορούν κατασκευάζουν ανταλλακτικά γρήγορα και on-demand. Επίσης, θα διευκολυνθεί η προμήθεια προϊόντων περιορισμένης παραγωγής και η κατασκευή παλαιότερων ή δυσεύρετων εξαρτημάτων και ανταλλακτικών. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι επίσης ιδανική για την κατασκευή προϊόντων κατά παραγγελία: Για παράδειγμα, με βάση το τρισδιάστατο μοντέλο του κρανίου ενός ατόμου, είναι δυνατή η κατασκευή ενός κράνους με εξαιρετική εφαρμογή στο συγκεκριμένο άτομο. Επίσης, είναι γνωστό ότι η NASA πειραματίζεται με τη χρήση μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή γαντιών και άλλων τμημάτων διαστημικών στολών, τα οποία θα ταιριάζουν απόλυτα στις σωματικές αναλογίες και διαστάσεις του αστροναύτη που θα τα φορέσει. Οι δυνατότητες της χρήσης τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης στον τομέα αυτόν είναι ανεξάντλητες, καθώς αυτή επιτρέπει το customizing μιας μεγάλης ποικιλίας συσκευών, αντικειμένων προσωπικής χρήσης, παιχνιδιών ή προϊόντων για χομπίστες.

Ο Αμερικανικός Στρατός έχει δώσει μια νέα διάσταση στην τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς μελετά την κατασκευή κινητών μονάδων τοποθετημένων σε φορτηγά, οι οποίες θα μπορούν να συνοδεύουν τεθωρακισμένα και άλλα οχήματα στο πεδίο της μάχης και να κατασκευάζουν επιτόπου ανταλλακτικά, με βάση ψηφιακά αρχεία ή το επιτόπου σκανάρισμα των αντικειμένων.

Αρκετοί ερευνητές και κατασκευαστές μιλούν για την προοπτική της διάθεσης μηχανών τρισδιάστατης εκτύπωσης απευθείας στους καταναλωτές και για τις πραγματικά επαναστατικές αλλαγές που θα επέφεραν αυτές στη λειτουργία της παραγωγής και της

οικονομίας. Έχοντας στο γραφείο ή στο σπίτι του ένα μηχάνημα τρισδιάστατης εκτύπωσης, ο κάθε καταναλωτής θα μπορούσε να κατασκευάζει ο ίδιος αντικείμενα, εξαρτήματα, ανταλλακτικά, παιχνίδια κλπ., είτε προμηθευόμενος ψηφιακά σχέδια, είτε σκανάροντας φυσικά αντικείμενα. Προς το παρόν, πάντως, το κόστος των μηχανημάτων αυτών (τα φθηνότερα κοστίζουν 25.000-30.000 δολάρια) δεν επιτρέπει την απόκτησή τους από τον οποιονδήποτε καταναλωτή. Αρκετοί αναλυτές εκτιμούν πως ακόμη και αν το κόστος των μηχανών αυτών πέσει στα 10.000 δολάρια μέσα στην επόμενη δεκαετία, οι κύριοι χρήστες θα ήταν ένας αριθμός αυτοαπασχολούμενων τεχνικών οι οποίοι θα κατασκεύαζαν πρωτότυπα ή custom προϊόντα, καθώς και οι χομπίστες εκείνοι οι οποίοι θα ήταν διατεθειμένοι να διαθέσουν τα απαραίτητα χρήματα. Για μεγάλης κλίμακας διάθεση των μηχανών αυτών σε καταναλωτές, δεν μπορεί να γίνει λόγος αν η τιμή τους δεν πέσει στο επίπεδο των 1000 δολαρίων.

Οι προσδοκίες πάντως που έχουν εκφραστεί κατά καιρούς από διάφορες πλευρές, οι οποίες υπαινίσσονται την περίπου γενικευμένη χρήση των παραπάνω μηχανών σε 6αθμό που το σύνολο σχεδόν των τομέων της παραγωγής θα εξοπλιστεί με μηχανήματα τρισδιάστατης εκτύπωσης και κάθε καταναλωτής θα μπορεί να κατασκευάσει άμεσα το αντικείμενο της αρεσκείας του αρκεί να προμηθευτεί ένα μηχάνημα λίγο μεγαλύτερο από έναν εκτυπωτή, φαίνονται μάλλον εξωπραγματικές τουλάχιστον για το άμεσο μέλλον. Άλλωστε, είναι αμφίβολο αν οι τεχνικές Ταχείας Παραγωγής θα αντικαταστήσουν άλλες μεθόδους και ιδίως τις τεχνικές μαζικής παραγωγής, οι οποίες είναι οικονομικότερες όταν πρόκειται να παραχθούν μεγάλες ποσότητες προϊόντων. Όπως και αν έχει πάντως, η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς σε πολλές χώρες του κόσμου. Οι ΗΠΑ θεωρούνται επικεφαλής στον τομέα, αλλά η Γερμανία, η Ιαπωνία και το Ισραήλ έχουν πραγματοποιήσει αξιοσημείωτη πρόοδο, ενώ αναμένεται ότι η τεχνολογία θα 6ρει σημαντική ανταπόκριση και σε λιγότερο ανεπτυγμένες τεχνολογικά χώρες. Μια από τις πλέον ενδιαφέρουσες εξελίξεις θα είναι η ανάπτυξη της λεγόμενης Παραγωγής από Απόσταση On-Demand (Distance Manufacturing On-Demand), η οποία συνδυάζει τεχνικές Ταχείας Παραγωγής με το Internet και θα επιτρέπει τόσο την αποστολή ψηφιακών σχεδίων προς τις κατασκευάστριες εταιρίες για άμεση παραγωγή, όσο και την προμήθεια/αγορά έτοιμων ψηφιακών σχεδίων για παραγωγή από τους ενδιαφερόμενους. Ας επισημάνουμε τέλος, πως η εμφάνιση των τεχνολογιών ταχείας προτυποποίησης/παραγωγής, έδωσε ώθηση και στον παραδοσιακό τομέα της κατασκευής προϊόντων με τη χρήση εργαλειομηχανών. Οι πρόοδοι στο λογισμικό αριθμητικού ελέγχου (numerical control), αλλά και στις δυνατότητες των μηχανημάτων αυτών, οδήγησαν στην αύξηση της ταχύτητας και της ακρίβειας των κατεργασιών. Τα σύγχρονα κέντρα κατεργασίας διαθέτουν μηχανήματα με πολλαπλούς άξονες η ταχύτητα των οποίων μπορεί να φθάσει έως και 100.000 στρ./λεπτό, με ανάλογη αύξηση των

ταχυτήτων πρόωσης των εργαλείων, επιτρέποντας εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς αφαίρεσης υλικού, οι οποίοι μεταφράζονται σε ταχείς ρυθμούς παραγωγής. Αναμφίβολα, οι εργαλειομηχανές και τα κέντρα κατεργασίας θα εξακολουθήσουν και στο μέλλον να αποτελούν βασική συνιστώσα της παραγωγής (κυρίως όταν πρόκειται για την κατεργασία μετάλλων) και είναι ασφαλέστερο να υποθέσουμε ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση μάλλον θα συμπληρώσει παρά θα υποκαταστήσει τις μεθόδους αυτές.

3 Ανάλυση

Η ραγδαία ανάπτυξη της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει επιβάλει τους ρυθμούς της και στην ανάπτυξη μηχανημάτων παραγωγής τρισδιάστατων αντικειμένων. Καθημερινά αναπτύσσονται, κατασκευάζονται ή βελτιώνονται νέα μοντέλα τρισδιάστατων εκτυπωτών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας ως προς την ποιότητα εκτύπωσης, τον χρόνο αλλά και το κόστος κατασκευής. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που κάνουν χρήση της τεχνολογίας απόθεσης τηγμένου υλικού (FDM) παρουσιάζουν μια κοινή δομή ως προς τα δομικά τους στοιχεία και τα μηχανικά τους μέρη. Αυτά μπορούν να ομαδοποιηθούν και να μελετηθούν ξεχωριστά στις εξής κατηγορίες:

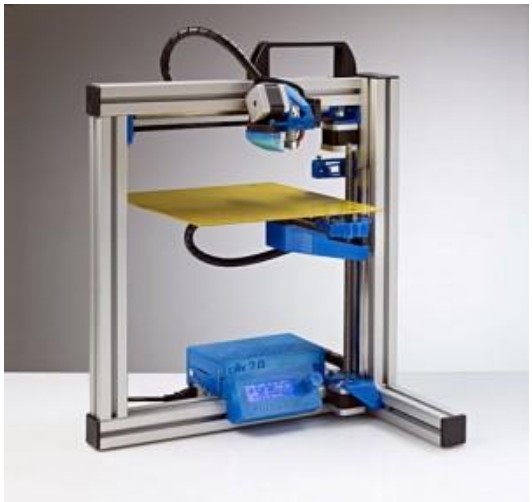
- Πλαίσιο στήριξης
- Κίνηση στο επίπεδο
- Κεφαλή απόθεσης υλικού
- Μηχανισμός εξώθησης υλικού
- Πλάκα εκτύπωσης
- Υλικό εκτύπωσης

3.1 Πλαίσιο στήριξης

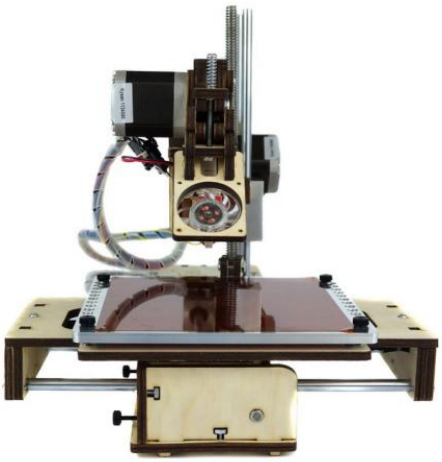
Η μηχανική αντοχή και η στιβαρότητα της βάσης είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα και την ορθή λειτουργία ενός μηχανικού συστήματος. Ο έλεγχος και ο ορθός σχεδιασμός αποτελούν προτεραιότητα για να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες ή δυσλειτουργίες.

Η επιστήμη της αντοχής των υλικών μελετά την αντοχή των στερεών υπό ένταση, την κατανομή των τάσεων στα στερεά, τις παραμορφώσεις καθώς και τις σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων. Για τον υπολογισμό των αντιδράσεων στηρίξεων, των δυνάμεων συνδέσμων και των φορτίων διατομής, που αναπτύσσονται σε ένα δομικό σύστημα, από ένα σύνολο εξωτερικών δράσεων, θεωρείται ότι τα μέλη του συστήματος συμπεριφέρονται ως απολύτως στερεά σώματα. Μια τέτοια υπόθεση διευκολύνει την μαθηματική ανάλυση των δομικών συστημάτων και παρέχει αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια για μια συγκεκριμένη κατηγορία υλικών, που, για τις συνηθισμένες φορτίσεις, υφίστανται απειροστές παραμορφώσεις.

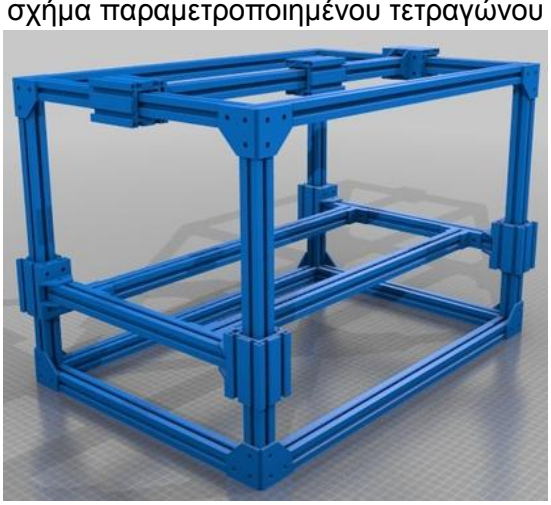
Μεγάλη ποικιλία επικρατεί στις δομές και τα σχέδια των τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους. Μερικά από αυτά παραθέτονται στις Εικόνες 7 έως 13.



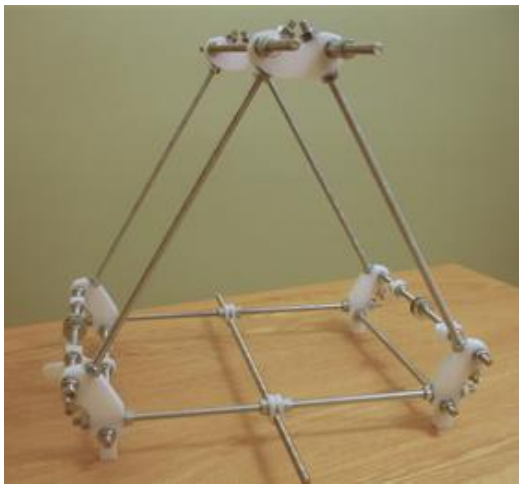
Εικόνα 7. Παράδειγμα πλαισίου 1: Κατασκευή από αλουμινένιους δοκούς σε σχήμα παραμετροποιημένου τετραγώνου



Εικόνα 8. Παράδειγμα πλαισίου 2: Ξύλινη κατασκευή βάσης σε τετραγωνικό σχήμα.



Εικόνα 9. Παράδειγμα πλαισίου 3: Κατασκευή από δοκούς αλουμινίου σε σχήμα ορθογώνιου παραλληλόγραμμου



Εικόνα 10. Παράδειγμα πλαισίου 4: Κατασκευή από σιδερένιες ράβδους σε τριγωνικό σχήμα

Εικόνα 11. Παράδειγμα πλαισίου 5: Κατασκευή από αλουμινένιους δοκούς σε σχήμα παραμετροποιημένου κύβου.

Εικόνα 12. Παράδειγμα πλαισίου 6: Συνεργασία σιδερένιων ράβδων και πλάκας αλουμινίου για την κατασκευή του πλαισίου.

Εικόνα 13. Παράδειγμα πλαισίου 7:
Κατασκευή από δοκούς αλουμινίου
σε οριζόντια διάταξη.

3.2 Κίνηση στο επίπεδο

Για την δημιουργία ενός τρισδιάστατου αντικειμένου στον φυσικό χώρο, απαιτείται ένας συνδυασμός κινήσεων και ένας συντονισμός αυτοματισμών. Σε μηχανικό επίπεδο η επιλογή των επιτρεπόμενων κινήσεων της κεφαλής απόθεσης υλικού και του τραπεζίου εκτύπωσης είναι αυτά που καθορίζουν το αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας. Μεγάλη ποικιλία παρουσιάζουν οι επιλογές των μηχανισμών κινήσεως στους τρισδιάστατους εκτυπωτές χαμηλού κόστους. Ο καρτεσιανός τρισδιάστατος χώρος ορίζεται από τρεις ευθείες κάθετες μεταξύ τους (X, Y, Z). Αν θεωρήσουμε τον Z ως κατακόρυφο άξονα ο οποίος καθορίζει το ύψος των επιμέρους στρώσεων απόθεσης υλικού (slicing), τότε οι άξονες X και Y ορίζουν το επίπεδο εκείνο στο οποίο πραγματοποιείται η μορφοποίηση του φυσικού αντικειμένου και η απόθεση υλικού στα σημεία εκείνα που έχουν οριστεί από το λογισμικό σχεδίασης και παραμετροποίησης.

Μεγάλη ποικιλία μεθόδων και διατάξεων χρησιμοποιούνται για να επιτευχτεί η κίνηση στον τρισδιάστατο χώρο σε φυσικό επίπεδο. Ανάλογα με τη διάταξη κίνησης που έχει επιλεχθεί, η αναλογία του όγκου εκτύπωσης και των διαστάσεων της μηχανής θα ποικίλουν. Θεωρητικά σε μια ιδανική περίπτωση οι διαστάσεις του όγκου εκτύπωσης θα είναι και οι τελικές διαστάσεις της μηχανής. Προκειμένου οι διαστάσεις εκτύπωσης να είναι όσο το δυνατόν κοντά σε αυτές της μηχανής , το τραπέζι εκτύπωσης θα πρέπει να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ή όλο το χώρο του που ορίζει οριζόντιο επίπεδο του πλαισίου στήριξης. Ως εκ τούτου η κίνηση που θα εκτελεί θα πρέπει να είναι κατακόρυφη.

Αυτή η διάταξη έχει υιοθετηθεί από τους περισσότερους κατασκευαστές εκτυπωτών χαμηλού κόστους. Ανάλογα με το βάρος και τον όγκο της εκτυπωμένης μάζας, υπάρχουν δύο επιλογές:

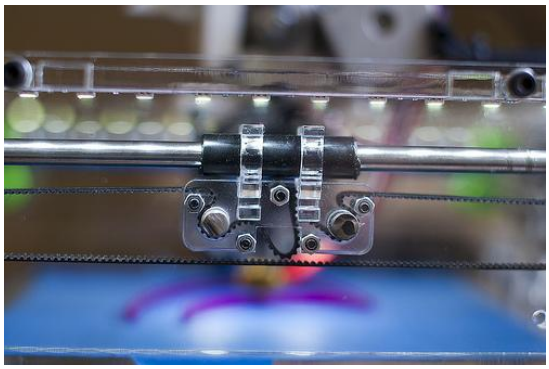
- Για ελαφριά αντικείμενα εκτύπωσης: το τραπέζι εκτύπωσης μετακινείται κατακόρυφα κατά μήκος του άξονα Z.
- Για αντικείμενα μεγαλύτερου βάρους: το τραπέζι εκτύπωσης είναι πακτωμένο και η κεφαλή εκτύπωσης εκτελεί όλες τις κινήσεις στον τρισδιάστατο χώρο.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που έχει η διάταξη με το τραπέζι εκτύπωσης να κινείται μόνο κατακόρυφα είναι ότι η εκτύπωση δεν επιβραδύνεται καθώς η εκτυπωμένη μάζα αυξάνει και μεγαλώνει. Το βάρος της κεφαλής απόθεσης παραμένει αμετάβλητο και συνήθως μικρότερο από αυτό του κρεβατιού εκτύπωσης.

3.2.1 Τρόποι μετάδοσης κίνησης

3.2.1.1 Απευθείας μετάδοση κίνησης με ιμάντες χρονισμού

Αυτή είναι η ευκολότερη και φθηνότερη από όλες τις μεθόδους. Ο ιμάντας προσαρμόζεται στον κινούμενο «φορέα» και άμεσα συνδεδεμένο με τον άξονα του κινητήρα μέσω μιας τροχαλίας, επιτρέποντάς του να μετακινείται κατά μήκος του άξονα στον οποίο εδράζεται. Ο κινητήρας παραμένει πακτωμένος στο πλαίσιο, επιτρέποντας στην κεφαλή απόθεσης να διατηρήσει χαμηλό βάρος. Ίσως ένα μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι σε αυτές τις διατάξεις, ο ιμάντας θα πρέπει να είναι τεντωμένος. Υπάρχουν εργαλεία ελέγχου της τάνυσης του ιμάντα, αλλά δεν λαμβάνουν υπόψη την επιμήκυνση του με την πάροδο του χρόνου, ή την μεταβολή του μεγέθους του λόγω της θερμοκρασίας. Προεντατήρες ελατηρίου μπορούν να μετριάσουν αυτό το πρόβλημα. Επιπλέον ένας άλλος περιορισμός για αυτήν την επιλογή ίσως αποτελεί το κινούμενο βάρος που μεταφέρουν οι ιμάντες χρονισμού. Στην περίπτωση που είναι αυξημένο είναι πιθανόν να παρατηρηθούν μικρές παλινδρομικές κινήσεις (backlash).

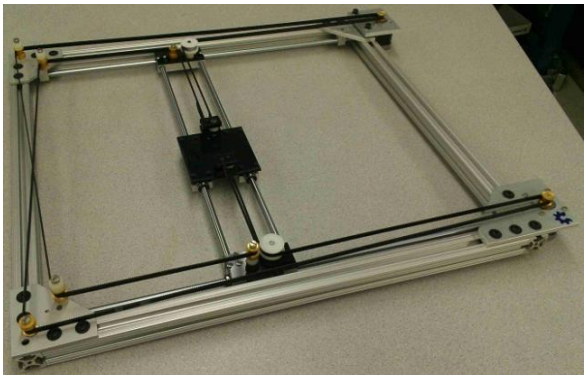


Εικόνα 14. Μετάδοση κίνησης με ιμάντα

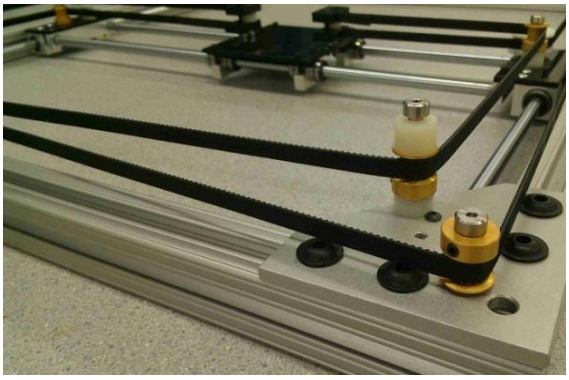
Εικόνα 15. Ιμάντας - τροχαλία

3.2.1.2 Μετάδοση κίνησης με μονό ιμάντα χρονισμού

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται με επιτυχία σε πολλούς εμπορικούς εκτυπωτές. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί έναν μεγάλο κατά μήκος ιμάντα του οποίου οι άκρες προσαρμόζονται εκατέρωθεν του φορέα της κεφαλής απόθεσης. Τον ιμάντα χρονισμού διέπουν μια σειρά τροχαλιών και τριβέων ολίσθησης καθώς επίσης και οι δύο βηματικοί κινητήρες. Η ταχύτητα και η διεύθυνση περιστροφής των κινητήρων καθορίζουν και το είδος της κίνησης που θα εκτελέσει ο φορέας της κεφαλής απόθεσης υλικού. Επειδή ο ιμάντας είναι “ανοικτός” και συνδέεται με το φορέα σε κάθε άκρο του, είναι ευκολότερο να ελεγχτεί και να προσαρμοστεί η ένταση του. Το πλεονέκτημα είναι ότι σε αυτή τη διάταξη ο ιμάντας καταπονείται με μικρότερα φορτία σε σχέση με αυτά που δέχονται οι ιμάντες στη διάταξη πολλαπλών ιμάντων χρονισμού, ενώ η ταχύτητα μετάδοσης κίνησης παραμένει η ίδια. Ωστόσο, υπάρχει περιορισμός διαστάσεων καθότι σε ένα εκτυπωτή μεγάλου όγκου, το μήκος του ιμάντα αυξάνει κατά πολύ (7m-8m ή περισσότερο). Το αποτέλεσμα αυτού είναι πιθανές παλινδρομικές κινήσεις (backlash) λόγω του αναλογικά μεγαλύτερου βάρους του φορέα της κεφαλής απόθεσης υλικού.



Εικόνα 16. Μετάδοση κίνησης με μονό ιμάντα (γενική όψη)

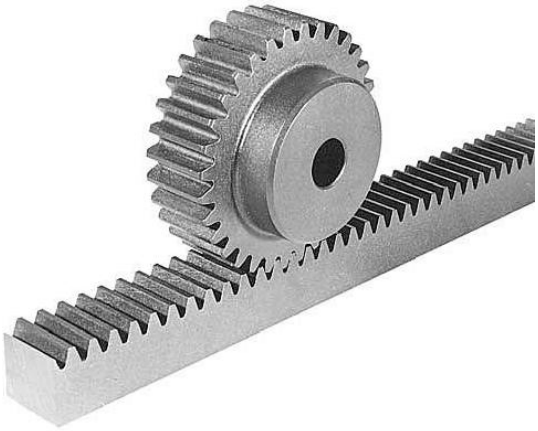


Εικόνα 17. Μετάδοση κίνησης με μονό ιμάντα (λεπτομέρεια)

3.2.1.3 Μετάδοση κίνησης με οδοντωτό δοκό και γρανάζι (κρεμαγιέρα)

Η κρεμαγιέρα είναι μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση όταν η διαδρομή κατά μήκος ενός άξονα είναι μεγάλη. Σε σύγκριση με τις συστήματα που χρησιμοποιούν ιμάντες χρονισμού, η παλινδρομική κίνηση (backlash) δεν αυξάνεται καθώς μεταβάλλεται το μήκος και το αποτέλεσμα παρέχει σημαντικά καλύτερη ακρίβεια. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι η αρμονία της κίνησης δεν επηρεάζεται από το βάρος του φορέα της κεφαλής απόθεσης υλικού. Μειονέκτημα αποτελεί το κόστος , καθότι είναι αισθητά αυξημένο σε σχέση με την επιλογή ιμάντων χρονισμού. Επιπλέον το γεγονός ότι η κινητήρας στον οποίο εδράζεται το πινιόν γρανάζι συνήθως προσαρμόζεται στον φορέα

κίνησης, προσθέτει μεγαλύτερο βάρος στην κατασκευή και ίσως συνεισφέρει στην μείωση ταχύτητας εκτύπωσης.



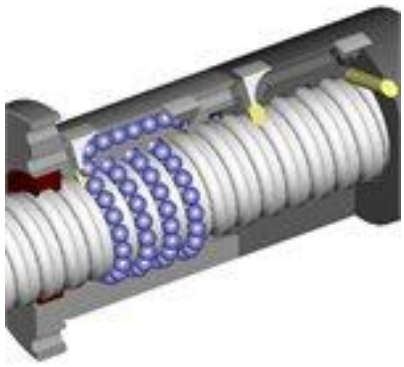
Εικόνα 18. Κρεμαγιέρα με γρανάζι

Εικόνα 19. Μηχανισμός κρεμαγιέρας

3.2.1.4 Μετάδοση κίνησης με ατέρμονες κοχλίες με επανακυκλοφορούντα σφαιρίδια (ballscrews)

Η επιλογή αυτή παρέχει τη μικρότερη δυνατή παλινδρομική κίνηση (backlash) στη μετάδοση κίνησης και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που η ακρίβεια κατέχει σημαντικό ρόλο. Μειονέκτημα αποτελεί το αυξημένο κόστος αυτής της επιλογής καθώς και το γεγονός ότι η ταχύτητα μετάδοσης της κίνησης εξαρτάται από τις μέγιστες στροφές του κινητήρα (rpm) που λειτουργούν υπό φορτίο. Μια οικονομικότερη λύση χωρίς όμως να παρέχει το πλήρες εύρος των πλεονεκτημάτων της χρήσης των επανακυκλοφορούντων σφαιριδίων αποτελεί η χρήση απλού κοχλία. Η επιλογή των ατέρμονων κοχλιών συνήθως εφαρμόζεται για μετάδοση κίνησης στον κατακόρυφο άξονα Z.

Εικόνα 20. Ball screw

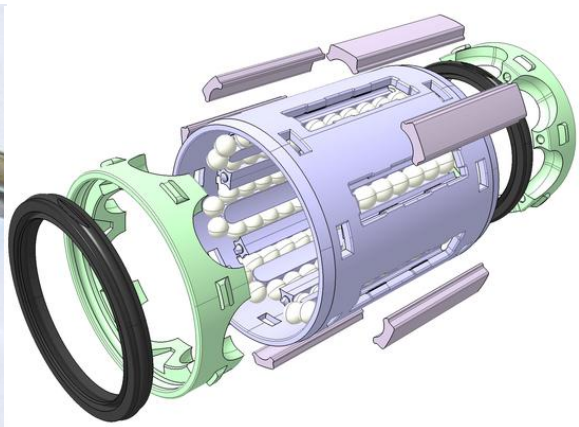


Εικόνα 21. Μηχανισμός ball screw

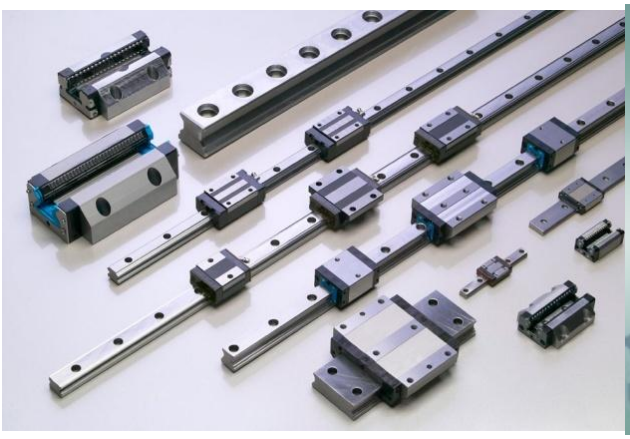
3.2.1.5 Οδήγηση με άξονες, γραμμικά ρουλεμάν και γραμμικούς οδηγούς

Οποιαδήποτε διάταξη ή μέθοδο μετάδοσης κίνησης επιλέξει ο σχεδιαστής, οι ένσφαιροι τριβής γραμμικής ολίσθησης και οι γραμμικοί οδηγοί κίνησης είναι αυτοί που τελικά θα του επιτρέψουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η πιο οικονομική μέθοδος είναι η χρήση ενός απλού άξονα στον οποίο θα ολισθαίνει το ρουλεμάν γραμμικής κίνησης. Για μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και αντοχή, ανάλογα την εφαρμογή, υπάρχουν οι οδηγοί γραμμικής κίνησης. Αυτούς αποτελούν ειδικά διαμορφωμένες δοκοί πάνω στις οποίες ολισθαίνει ένας φορέας στον οποίο εδράζεται η μετακινούμενη μάζα. Τα προφίλ αυτών των οδηγών αλλά και των φορέων που ολισθαίνουν ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή, το μέγεθος αλλά και τη διεύθυνση των δυνάμεων που αναπτύσσονται.

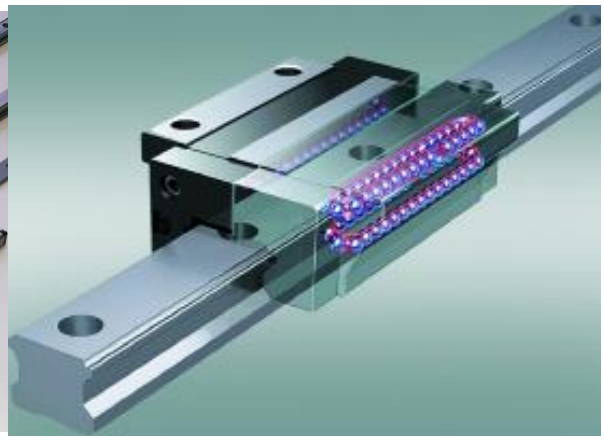
Εικόνα 22. Γραμμικά ρουλεμάν



Εικόνα23. Στοιχεία γραμμικού ρουλεμάν



Εικόνα 24. Γραμμικοί οδηγοί

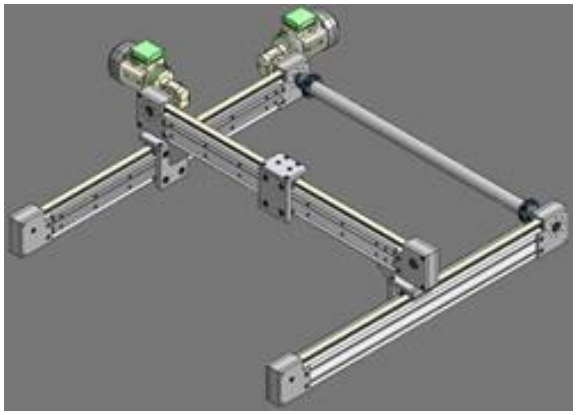


Εικόνα 25. Γραμμικός οδηγός

3.2.2 Κινηματικές δομές

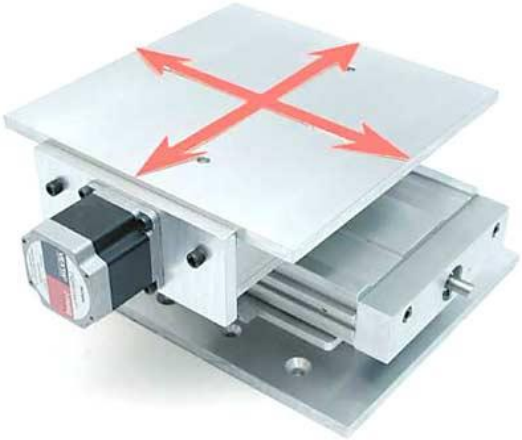
Υπάρχει μεγάλη ποικιλία κινηματικών δομών στους τρισδιάστατους εκτυπωτές χαμηλού κόστους. Ανάλογα με το μέγεθος του εκτυπωτή, τον όγκο εκτύπωσης, τα υλικά

επιλέγονται διαφορετικοί συνδυασμοί συνεργασίας αξόνων κίνησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αναφέρονται παρακάτω:



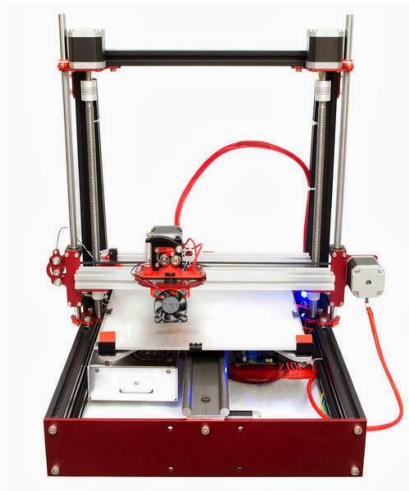
Εικόνα 26. Κινηματική δομή(1)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάταξης στην οποία η κεφαλή απόθεσης υλικού κινείται κατά μήκος μίας δοκού στήριξης η οποία μεταφέρεται κατά μήκος μιας κάθετης σε αυτήν διάταξης με τη βοήθεια βηματικού κινητήρα. Σε μια τέτοια εφαρμογή το τραπέζι εκτύπωσης κινείται κατακόρυφα.



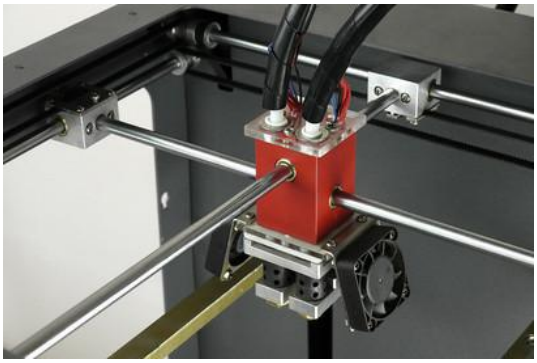
Εικόνα 27. Κινηματική δομή (2)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάταξης στην οποία το τραπέζι εκτύπωσης κινείται κατά μήκος μίας δοκού στήριξης η οποία μεταφέρεται κατά μήκος μιας άλλης, κάθετης σε αυτήν δοκού. Η κίνηση αυτή συνήθως επιτυγχάνεται με βηματικούς κινητήρες στους οποίους εφαρμόζονται κοχλίες και περικόχλια που επιτρέπουν τη γραμμική κίνηση. Σε τέτοιες διατάξεις η κεφαλή απόθεσης είναι αυτή που κινείται κατακόρυφα.



Εικόνα 28. Κινηματική δομή (3)

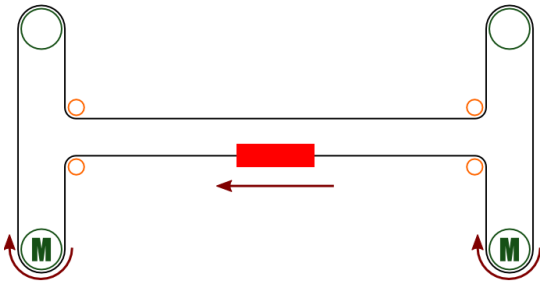
Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάταξης στην οποία το τραπέζι εκτύπωσης κινείται στο επίπεδο (X ή Y) και η κεφαλή απόθεσης υλικού κινείται γραμμικά επάνω σε μια δοκό στήριξης (Y ή X) η οποία με τη σειρά της κινείται κατακόρυφα με τη βοήθεια βηματικών κινητήρων.



Εικόνα 29. Κινηματική δομή (4)

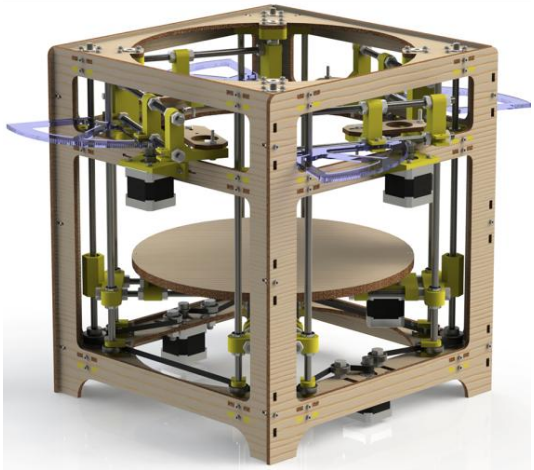
Χαρακτηριστικό σύστημα συνδυαστικής κίνησης στο επίπεδο. Η κεφαλή απόθεσης έχει τη δυνατότητα να κινείται ανεξάρτητα στο επίπεδο (κατά μήκος του X και του Y άξονα) ενώ το τραπέζι εκτύπωσης κινείται κατακόρυφα στον μηχανισμό αυτόν.

Εικόνα 30. Κινηματική δομή (5)



Εικόνα 31. Λειτουργία διάταξης

Χαρακτηριστικό σύστημα συνδυασμένης κίνησης στο επίπεδο. Η κεφαλή απόθεσης μπορεί να εκτελέσει οποιαδήποτε κίνηση στο επίπεδο με τη βοήθεια της συντονισμένης περιστροφής των βηματικών κινητήρων που κινούν τους ιμάντες χρονισμού. Πιο αναλυτικά μια δοκός στεγάζει την υποδοχή της κεφαλής η οποία με τη σειρά της εδράζεται σε δύο άλλες κάθετες σε αυτήν δοκούς στήριξης. Ένας μοναδικός ιμάντας χρονισμού συνδέει τους βηματικούς κινητήρες και την κεφαλή εκτύπωσης. Η φορά με την οποία περιστρέφεται ο κάθε κινητήρας καθώς και η ταχύτητα του αποτελούν τους παράγοντες που καθορίζουν διεύθυνσης της κίνησης.



Εικόνα 32. Κινηματική δομή (6)

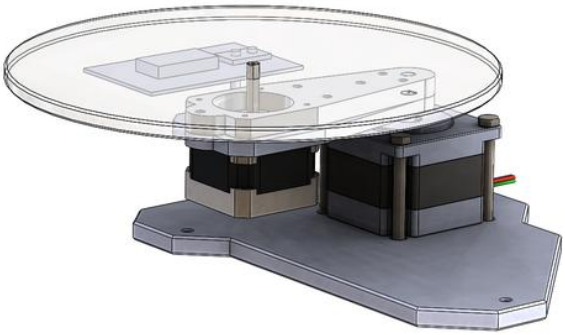
Παράδειγμα γραμμικής κίνησης ως αποτέλεσμα συνδυασμένης περιστροφικής. Το τραπέζι εκτύπωσης έχει τη δυνατότητα κατακόρυφης αλλά και περιστροφικής κίνησης. Επιπλέον, η κεφαλή απόθεσης υλικού κινείται πάνω σε τροχιά κυκλικού τόξου. Με τον χρονικό συντονισμό της περιστροφής του τραπεζιού και της κεφαλής εκτύπωσης επιτυγχάνεται οποιαδήποτε κίνηση στο επίπεδο.

Εικόνα 33. Κινηματική δομή (7)

Ένα μοναδικό σύστημα σχεδίασης στο οποίο το τραπέζι εκτύπωσης δεν εκτελεί καμία κίνηση. Η κεφαλή απόθεσης υλικού αρθρώνεται σε τρεις βραχίονες οι οποίοι με τη σειρά τους αρθρώνονται με κινητή άρθρωση σε ξεχωριστούς κατακόρυφους άξονες. Ο συνδυασμός της κατακόρυφης κίνησης αυτών των τελευταίων αρθρώσεων των βραχιόνων επιτρέπει στην κεφαλή εκτύπωσης να κινηθεί στο οριζόντιο αλλά και στο κατακόρυφο επίπεδο.

Εικόνα 34. Κινηματική δομή (8)

Παράδειγμα συνδυασμού περιστροφικής κίνησης. Η κεφαλή απόθεσης εκτελεί μόνο κατακόρυφη κίνηση. Το τραπέζι εκτύπωσης περιστρέφεται. Όλο το σύστημα είναι συναρμολογημένο σε μια δοκό της οποίας το άλλο άκρο περιστρέφεται στο ίδιο επίπεδο. Με δύο περιστροφικές κινήσεις στο ίδιο επίπεδο αλλά με διαφορετικά κέντρα και το συνδυασμό διεύθυνσης και ταχύτητας μπορούμε να επιτύχουμε οποιαδήποτε τροχιά στο επίπεδο.



Εικόνα 35. Λειτουργία διάταξης

3.2 Κεφαλή απόθεσης υλικού

Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη του εκτυπωτή αποτελεί η κεφαλή απόθεσης υλικού (hotend). Έχοντας τη δυνατότητα να αποτελέσει αυτόνομο πεδίο έρευνας, η κεφαλή απόθεσης υλικού κατέχει παράλληλα πολλαπλούς ρόλους. Αποτελεί το κρίσιμο μέρος του εκτυπωτή στο οποίο ο μηχανισμός εξώθησης προωθεί το νήμα είτε άμεσα (directdrive) είτε μέσω ενός ολισθηρού σωλήνα φτιαγμένου συνήθως από τεφλόν (PTFE). Το κρύο νήμα εισέρχεται σε έναν διάτρητο κοχλία ο οποίος εδράζεται στον κύβο θέρμανσης ή "μπλόκ θέρμανσης" (heatedblock). Το τελευταίο με τη βοήθεια μιας αντίστασης αναπτύσσει υψηλή θερμοκρασία με σκοπό την τήξη του νήματος. Διαμετρικά τοποθετημένο βρίσκεται το ακροφύσιο. Ο μηχανισμός προώθησης νήματος ωθεί το κρύο νήμα μέσα στον θάλαμο θέρμανσης το οποίο με τη σειρά του ωθεί το ρευστοποιημένο πλέον υλικό να εξέλθει από το ακροφύσιο. Σχεδόν πάντα στην κεφαλή απόθεσης υλικού εδράζεται ένας αισθητήρας (thermistor) για τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Μια ενδεικτική κεφαλή απόθεσης υλικού αποτελείται από το ακροφύσιο, έναν διάτρητο κοχλία και το "μπλόκ" θέρμανσης το οποίο αποτελεί και τον συνδετικό κρίκο των προηγούμενων. Η ορθή επιλογή των στοιχείων επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα αλλά και το χρόνο εκτύπωσης.

3.2.1 Το ακροφύσιο

Εικόνα 36. Ακροφύσιο

Το ακροφύσιο αποτελεί σημαντικό στοιχείο στη διαδικασία της εκτύπωσης. Η διάμετρος εξόδου καθορίζει το πάχος του ρευστού πλέον νήματος, ως εκ τούτου επηρεάζει την ποιότητα και το χρόνο εκτύπωσης. Οι διαστάσεις για την διάμετρο της οπής εξόδου ποικίλουν από 0.2mm έως και 1.2mm για τους τρισδιάστατους εκτυπωτές χαμηλού κόστους.

Η επιλογή μεγαλύτερης ή μικρότερης διαμέτρου συνοδεύεται από ανάλογα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

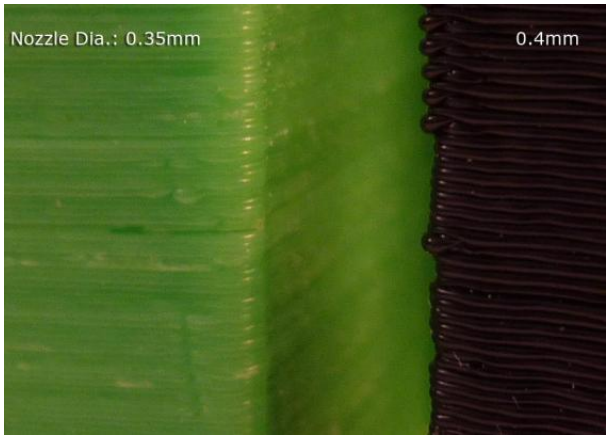
3.2.1.1Μεγάλη διάμετρος ακροφυσίου:

- Μεγαλύτερη ταχύτητα εκτύπωσης. Το πάχος του ρευστοποιημένου νήματος που εξέρχεται είναι μεγαλύτερο με αποτέλεσμα η κεφαλή απόθεσης υλικού να χρειάζεται λιγότερες στρώσεις για ολοκληρώσει το αντικείμενο.

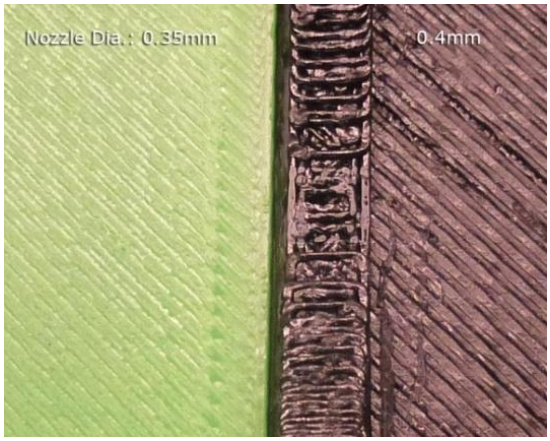
- Καλύτερη επαφή/πρόσφυση με το τραπέζι εκτύπωσης. . Ένα ακροφύσιο με μικρότερη διάμετρο παράγει λεπτότερα νήματα τα οποία ψύχονται και στερεοποιούνται πολύ γρήγορα αμέσως μετά την έξοδο τους από το ακροφύσιο, το οποίο βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία. Τα πλαστικά έχουν γίνονται λιγότερο κολλώδη με τη μείωση της θερμοκρασίας. Το αποτέλεσμα είναι να παρουσιάζεται ένα φαινόμενο αποκόλλησης από το τραπέζι εκτύπωσης και παραμόρφωσης του αντικειμένου προς εκτύπωση. Το νήμα που εξωθείται από ένα μεγαλύτερο ακροφύσιο, ωστόσο, διατηρεί τη θερμοκρασία του περισσότερο, με αποτέλεσμα να προσφύεται καλύτερα στην πλάκα του τραπεζιού εκτύπωσης.
- Λιγότερα υποστυλώματα. Ανάλογα με το σχέδιο εκτύπωσης τα λογισμικά σχεδίασης και παραμετροποίησης προσφέρουν την επιλογή πρόσθεσης κάποιον νεύρων με σκοπό να στηρίξουν και να επιτρέψουν την δημιουργία σημείων/περιοχών στο εκάστοτε επίπεδο. Η εκτύπωση με χρήση μεγαλύτερου ακροφυσίου επιτρέπει την έξοδο νήματος με αυξημένο πάχος και την αποφυγή χρήσης πολλών νεύρων και υποστυλωμάτων.
- Καλύτερη αξιοπιστία. Το μεγαλύτερο πάχος του ρευστοποιημένου νήματος που εκτυπώνεται είναι πιθανό να αντισταθμίσει τυχόν μηχανικά λάθη όπως φαινόμενα παλινδρόμησης (backlash) ή κάποια αστοχία υλικού (π.χ. φθαρμένος οδόντας γραναζιού).

3.2.1.2 Μικρότερη διάμετρος ακροφυσίου:

- Καλύτερη ποιότητα επιφάνειας. Η χρήση της μικρότερης διαμέτρου ακροφυσίου έχει μεγάλο προβάδισμα στη δημιουργία λεπτομερειών και ποιότητας επιφάνειας. Το μικρότερο πάχος του νήματος που εξέρχεται παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας πολύπλοκων δομών, μικρότερων επιφανειών και περισσότερων σημείων.
- Μεγαλύτερη στιβαρότητα. Η χρήση πολλών επιπέδων εκτύπωσης (layers) για δημιουργία ενός αντικειμένου ως αποτέλεσμα της επιλογής της διαμέτρου του ακροφυσίου, έχει ως συνέπεια καλύτερη αντοχή. Τα πολλαπλά επίπεδα που δημιουργούνται υποβοηθούν την στιβαρότητα της κατασκευής.



Εικόνα 37. Σύγκριση της ταχύτητας εκτύπωσης διαφορετικών διαμέτρων ακροφυσίου



Εικόνα 38 Σύγκριση της ποιότητας εκτύπωσης διαφορετικών διαμέτρων ακροφυσίου

3.2.2 Ο διάτρητος κοχλίας

Εικόνα 39. Διάτρητος κοχλίας

Ο διάτρητος κοχλίας αποτελεί ουσιαστικά τον μεταλλικό σωλήνα στον οποίο το νήμα εισέρχεται κρύο και με τον οποίο συνδέεται το ακροφύσιο. Θα πρέπει να είναι στεγανοποιημένος και μεταλλικός ώστε να αντισταθμίσει τη θερμότητα από το θερμαντικό στοιχείο. Σαν υλικό κατασκευής ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι ίσως η καλύτερη επιλογή αν εξαιρέσουμε τη δυσκολία στη μορφοποίηση του.

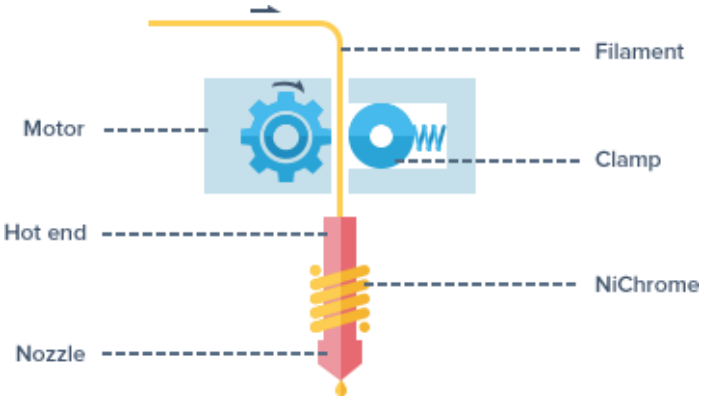
3.2.3 Κύβος (μπλόκ) θέρμανσης (heatedblock)

Εικόνα 40. Κύβος θέρμανσης

Πρόκειται για κομμάτι αλουμινίου με τρεις οπές: Μία οριζόντια για το στοιχείο θέρμανσης (αντίσταση ισχύος), μια για τον αισθητήρα θερμοκρασίας και άλλη μια στην οποία θα τοποθετούνται εκατέρωθεν το ακροφύσιο και ο διάτρητος κοχλίας. Αποτελεί τον θάλαμο μέσα στον οποίο το νήμα μετατρέπεται από στερεά σε ρευστή μορφή, έτοιμο να εξέλθει από το ακροφύσιο.

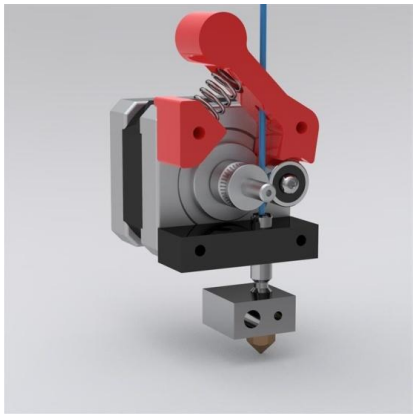
3.3 Ο μηχανισμός προώθησης νήματος εκτύπωσης

Ο μηχανισμός προώθησης του νήματος λειτουργεί σαν τροφοδότης για την κεφαλή απόθεσης υλικού. Κάνοντας χρήση ενός συστήματος με γρανάζια καταφέρνει να εισάγει το κρύο νήμα μέσα στο θάλαμο θέρμανσης. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο ρυθμός προώθησης (feedrate) καθότι, συναρτήσει της θερμοκρασίας, ορίζει την ταχύτητα εξόδου του ρευστοποιημένου νήματος.

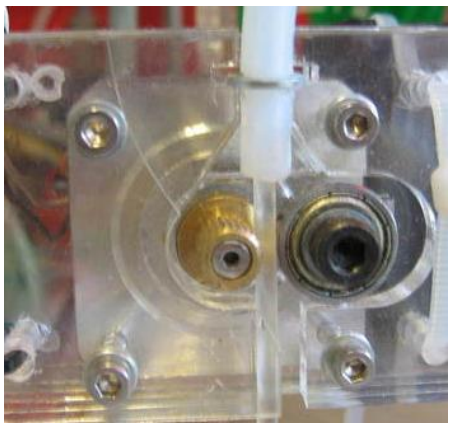


Εικόνα 41. Διάταξη μηχανισμού προώθησης νήματος

Δύο είναι οι επικρατέστερες διατάξεις για το μηχανισμό προώθησης του νήματος. Η πρώτη θέλει τον μηχανισμό να εδράζεται στον ίδιο φορέα που βρίσκεται και η κεφαλή απόθεσης του υλικού. Ο φορέας κινεί ταυτόχρονα και την κεφαλή αλλά και το μηχανισμό προώθησης προς όλες τις κατευθύνσεις. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει μεν καλή τροφοδοσία, αλλά και σημαντικά αυξημένο βάρος στον φορέα. Η δεύτερη διάταξη θέλει τον μηχανισμό τοποθετημένο μακριά από τον φορέα κίνησης και πακτωμένο σταθερά σε κάποιο σημείο της βάσης του εκτυπωτή. Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται χαμηλό βάρος στον φορέα που εδράζει την κεφαλή εκτύπωσης και με τη βοήθεια ενός τοξοειδούς σωλήνα οδηγείται το νήμα στην κεφαλή απόθεσης υλικού (hotend).

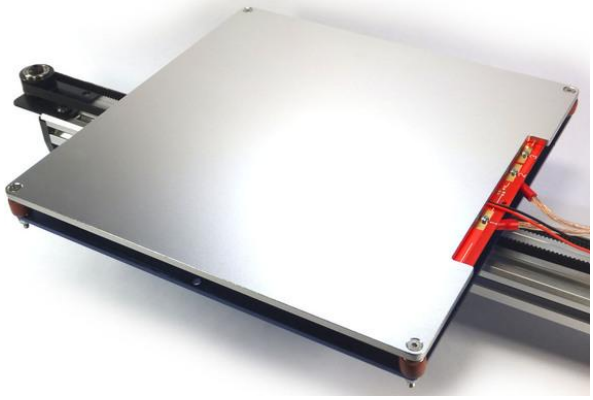


Εικόνα 42. Μηχανισμός προώθησης νήματος προσαρτημένος πάνω στην κεφαλή εκτύπωσης

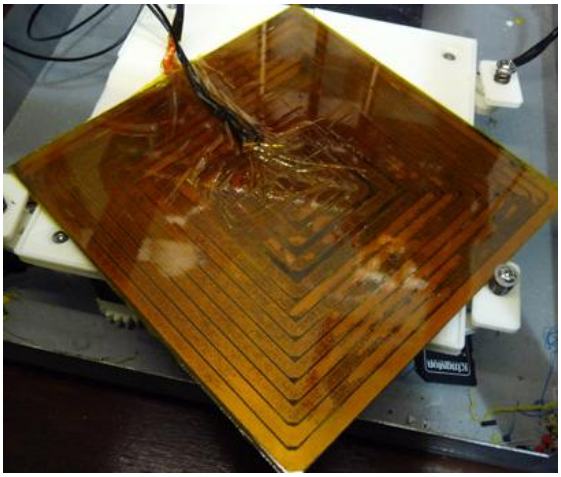


Εικόνα 43. Μηχανισμός προώθησης νήματος τοποθετημένος σε ανεξάρτητο σημείο

3.4 Η πλάκα εκτύπωσης



Εικόνα 44. Πλάκα εκτύπωσης



Εικόνα 45. Θέρμανση πλάκας εκτύπωσης

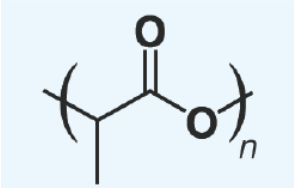
Η πλάκα εκτύπωσης είναι η ωφέλιμη περιοχή στην οποία παίρνουν υλική μορφή τα αντικείμενα που έχουν σχεδιαστεί. Αποτελεί το οριζόντιο επίπεδο και το σημείο εκκίνησης βάσει του οποίου γίνεται η εκτύπωση και η εναπόθεση του τηγμένου υλικού. Ποικίλουν οι επιλογές για το υλικό που χρησιμοποιείται. Τις επικρατέστερες θέσεις κατέχουν το γυαλί και το μέταλλο. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα ρύθμισης του επιπέδου και της ευθυγράμμισης, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται συνήθως με τέσσερις κοχλίες στις γωνίες της πλάκας. Αρκετά διαδεδομένες είναι επίσης και οι θερμαινόμενες πλάκες. Με θερμοκρασία γύρω στους 100°C παρέχουν σημαντική βοήθεια στην αποφυγή του φαινομένου της αποκόλλησης του υλικού από την πλάκα λόγω απότομης αλλαγής της θερμοκρασίας και τήξης του νήματος.

3.5 Υλικά εκτύπωσης

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται με τη μέθοδο της εξώθησης τηγμένου υλικού ποικίλουν ανάλογα την εφαρμογή και τις προδιαγραφές του αντικειμένου προς εκτύπωση. Στην κατηγορία των τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους τα πολυμερή είναι αυτά που συναντώνται πιο συχνά.

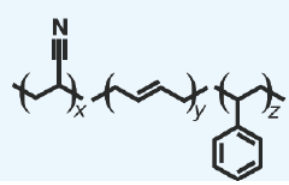
PLA (πολυγαλακτικό οξύ) είναι ένα από τα δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά στους τρισδιάστατους εκτυπωτές χαμηλού κόστους. Είναι χρήσιμο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών εκτύπωσης και έχει το πλεονέκτημα να είναι άοσμο παρέχοντας παράλληλα μεγαλύτερη αντοχή στη στρέβλωση. Αποτελεί επίσης ένα από τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον υλικά. Παράγεται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες (καλαμπόκι-άμυλο) και απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την επεξεργασία από τα παραδοσιακά (με βάση το πετρέλαιο) πλαστικά. Το υλικό αυτό συχνά χρησιμοποιείται σε συσκευασίες τροφίμων,

όπως περιτυλίγματα καραμελών, και βιοδιασπώμενα ιατρικά εμφυτεύματα, όπως τα ράμματα.



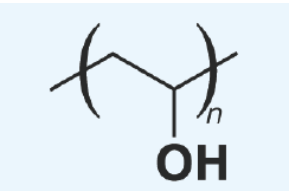
Θερμοκρασία κεφαλής: 160-220°C
Θερμοκρασία πλάκας: 60 ^{o}C
Επιφάνεια πλάκας: Μπλε ταινία βαψίματος

ABS (συμπολυμερέςακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου) είναι ένα άλλο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στους τρισδιάστατους εκτυπωτές χαμηλού κόστους, κυρίως. για την κατασκευή ανθεκτικών αντικειμένων που πρέπει να αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Σε σύγκριση με το PLA, το ABS είναι λιγότερο «ψαθυρό». Έχει τη δυνατότητα επίσης να επεξεργαστεί περαιτέρω με ακετόνη ώστε να αποκτήσει γυαλιστερό φινίρισμα. Για χρήση του ABS συνίσταται θερμαινόμενη επιφάνεια εκτύπωσης, καθότι το συγκεκριμένο υλικό έχει την τάση να συρρικνώνεται όταν ψύχεται.



Θερμοκρασία κεφαλής: 215-250 ^{o}C
Θερμοκρασία πλάκας: 90-103°C
Επιφάνεια πλάκας: Μονωτική ταινία (Kapton)

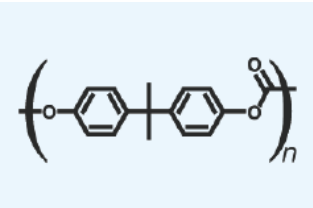
PVA (πολυμερισμένος οξικός εστέρας της βινυλικής αλκοόλης) είναι ημιδιαφανές υλικό με ελαφρώς κίτρινη απόχρωση και χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τη δημιουργία υποστυλωμάτων και γενικά δομών στήριξης του αντικειμένου προς εκτύπωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι υδατοδιαλυτό, κάτι το οποίο επιβάλλει να διατηρείται στεγνό πριν τη χρήση του. Το PVA συχνά χρησιμοποιείται σε εκτυπωτές με δύο κεφαλές απόθεσης υλικού, έναν για την εξαγωγή πρωτογενούς υλικού (όπως ABS ή PLA) και άλλον έναν για το υδατοδιαλυτό υλικό και την κατασκευή υποστηρικτικών δομών.



Θερμοκρασία κεφαλής: 180-200 ^{o}C
Θερμοκρασία πλάκας: 50 ^{o}C
Επιφάνεια πλάκας: Μπλε ταινία βαψίματος

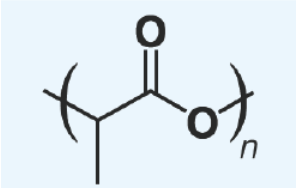
PC (πολυανθρακικό υλικό). Το υλικό αυτό έχει μεγάλη αντοχή και είναι πολύ ανθεκτικό σε κρούση. Χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή αλεξίσφαιρων επιφανειών. Πρόκειται για εξαιρετικά σκληρό και ανθεκτικό θερμοπλαστικό υλικό που

παράλληλα έχει υψηλή αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες . Είναι εύπλαστο και μπορεί να καμφθεί χωρίς να υποστείρωγμές.



Θερμοκρασία κεφαλής: 280-305 ^{o}C
Θερμοκρασία πλάκας: 85-95 ^{o}C
Επιφάνεια πλάκας: Μονωτική ταινία (Kapton)

Soft PLA ("εύκαμπτο" πολυγαλακτικό οξύ). Το υλικό αυτό είναι επίσης γνωστό και ως PLA και χρησιμοποιείται για την κατασκευή ελαστικών αντικειμένων.



Θερμοκρασία κεφαλής: 200-220 ^{o}C
Θερμοκρασία πλάκας: -^{o}C
Επιφάνεια πλάκας: Γυαλί

HDPE (υψηλής περιεκτικότητας πολυαιθυλένιο). Το HDPE είναι ένα ανακυκλώσιμο υλικό και συναντάται σε πολλές εφαρμογές (π.χ. μπουκάλια γάλακτος). Παρουσιάζει αρκετά καλή μηχανική αντοχή αλλά οι ιδιότητες του το καθιστούν δύσκολο για επεξεργασία. Επίσης χρειάζεται προσοχή, ανάλογα με την εφαρμογή, το γεγονός ότι το υλικό παρουσιάζει παραμορφώσεις κατά την πήξη του.

Θερμοκρασία κεφαλής: 225-230 ^{o}C
Θερμοκρασία πλάκας: -^{o}C
Επιφάνεια πλάκας: φύλλο πολυπροπανίου

Η τεχνολογία των υλικών αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς. Η ενσωμάτωση όλο και περισσότερων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει την δημιουργία αντικειμένων πολλαπλών χρήσεων σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω:

Νάιλον. Είναι ένα πολυχρηστικό υλικό με φωτεινή εμφάνιση φυσικού λευκού και ημιδιαφανή επιφάνεια. Μπορεί επίσης να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία και να αποκτήσει οποιοδήποτε άλλο χρωματισμό. Το νάιλον είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στην υγρασία, κατά συνέπεια η λήψη μέτρων ξήρανσης κατά την αποθήκευση του είναι απαραίτητη. Ως θερμοπλαστικό υλικό το νάιλον μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί χωρίς να χάσει της ιδιότητές του. Λόγω της πυκνότητας του είναι πιθανή η ανάγκη άσκησης μεγαλύτερης πίεσης για την εξώθηση του από την κεφαλή εκτύπωσης, κάτι το οποίο ρυθμίζεται από τον μηχανισμό προώθησης του νήματος. Η θερμοκρασία επεξεργασίας του υλικού κυμαίνεται στους 225-265°C.

Εικόνα 46. Nylon

LAYWOO-D3. Είναι ένα υλικό που παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το ξύλο και έχει την ικανότητα να προσθέτει στα αντικείμενα την εμφάνιση και την αίσθηση της ινοσανίδας μέσης πυκνότητας (MDF). Τα αντικείμενα που είναι κατασκευασμένα από LAYWOOD-D3 μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία όπως κοπή και χρωματισμό. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του είναι η αλλαγή στη διαύγεια και την εμφάνιση σύμφωνα με την αναλογία προώθησης του νήματος και της θερμοκρασίας τήξης του. Η θερμοκρασία επεξεργασίας του υλικού κυμαίνεται στους 175-250°C.

Εικόνα 47. Laywood-d3

LAYBRICK. Το υλικό αυτό δίνει την εμφάνιση και την αίσθηση γκρι πέτρας, ενώ παράλληλα διατηρεί την ελαστικότητα του πλαστικού, ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό για κατασκευή τοπίων και αρχιτεκτονικών μακετών. Τα αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί με LAYBRICK μπορούν να χρωματιστούν και υποστούν περαιτέρω επεξεργασία. Σε θερμοκρασίες εκτύπωσης από 165°C έως 190°C, η εκτύπωση θα βγει ως επί το πλείστον ομαλή, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες τα αντικείμενα θα αρχίσουν να έχουν μια πιο τραχιά, κοκκώδη υφή.

Εικόνα 48. LAYBRICK

Εικόνα 49. BENDLAY

BENDLAY. Το υλικό αυτό είναι ημιδιαφανές (91% διαπερατότητα) και αρκετά εύκαμπτο και ανθεκτικό. Το BendLay είναι ουσιαστικά τροποποιημένο βουταδιένιο, το οποίο είναι ασφαλές για οικιακή χρήση και τα προϊόντα διατροφής. Σε σύγκριση με το ABS είναι σημαντικά λιγότερο ευπαθές στην υγρασία, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι πιθανότητες στρέβλωσης κατά την επαφή του με την πλάκα εκτύπωσης.

Εικόνα 50. TPE

TPE (θερμοπλαστικό ελαστομερές). Το υλικό αυτό είναι εύκαμπτο και δίνει την αίσθηση του καουτσούκ. Το TPE χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αντικειμένων τα οποία θα υποστούν θλίψη ή εφελκυσμό και πιθανό να χρειαστεί να παραμορφωθούν. Η θερμοκρασία επεξεργασίας του υλικού κυμαίνεται στους 210-230°C.

4 Σχεδιασμός

4.1 Η σχεδιομελέτη

Ως σχεδιομελέτη και παραγωγή με χρήση υπολογιστή ορίζεται η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος και ιδιαίτερα στη δημιουργία, μεταβολή, ανάλυση, βελτιστοποίηση της μορφής και τον προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών του προϊόντος. Στηρίζεται κυρίως στην τεχνολογία των γραφικών, των βάσεων δεδομένων, της μαθηματικής μοντελοποίησης, της προσομοίωσης και του ελέγχου των δεδομένων, και αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος που περιγράφει όλο τον κύκλο ανάπτυξης και εισαγωγής του στην αγορά. Βασικός παράγοντας στη διαδικασία της σχεδιομελέτης είναι η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος, με τα συστήματα μοντελοποίησης με υπολογιστή (Computer Aided Design - CAD). Στη συνέχεια αυτό το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά από κάθετες εφαρμογές όπως:

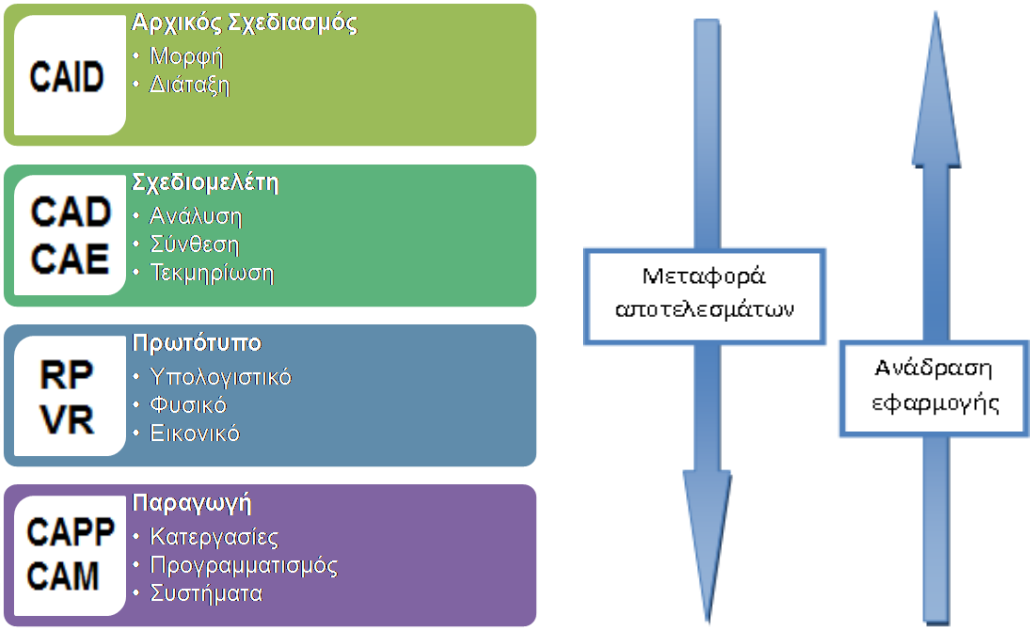
- Παρουσίαση με χρήση τεχνικών φωτορεαλισμού: Στο ψηφιακό μοντέλο του προϊόντος μπορεί να γίνει απόδοση της υφής και του χρώματος των επιφανειών, να γίνει προσομοίωση σε υπολογιστή των συνθηκών λειτουργίας και φωτισμού και να ενοποιηθεί στον τελικό χώρο λειτουργίας με τη χρήση εικόνων ή άλλων μοντέλων.
- Προγραμματισμός των παραγωγικών διαδικασιών: Γίνεται κυρίως σε μηχανές ψηφιακής καθοδήγησης (Computer Numerical Control-CNC), με χρήση συστημάτων σχεδιασμού παραγωγής με χρήση υπολογιστή (Computer Aided Manufacture-CAM). Τα συστήματα CAM μπορούν να προσομοιώσουν την κίνηση του κοπτικού εργαλείου της εργαλειομηχανής και να ελέγξουν τη μορφή του μοντέλου και την ακρίβεια της κατεργασίας πριν από την πραγματική εκτέλεση των κατεργασιών στην εργαλειομηχανή.
- Ανάλυση και βελτιστοποίηση μορφής και λειτουργίας: Με χρήση των συστημάτων μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Computer Aided Engineering-CAE, Finite Elements Modeling-FEM) για μια πληθώρα εφαρμογών όπως τον έλεγχο της αντοχής, την συμπεριφορά σε ροή, την κατεργασιμότητα κ.α. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται γραφικά στην οθόνη, για αξιολόγηση του αποτελέσματος και βελτιστοποίηση της μορφής ή των λειτουργικών χαρακτηριστικών του προϊόντος ή της κατεργασίας παραγωγής του.

- Ταχεία παραγωγή πρωτοτύπου και παραγωγή του προϊόντος: Παραγωγή πρωτοτύπων ή τελικών προϊόντων άμεσα από το τρισδιάστατο μοντέλο CAD, με χρήση ειδικών μηχανών και σε μικρή ποσότητα παραγωγής, με σκοπό την παρουσίαση ή τη δοκιμή του πρωτοτύπου, ή την παραγωγή μικρών ποσοτήτων παραγωγής (Rapid Prototyping and Manufacturing).
- Ανάλυση της λειτουργικότητας του πρωτοτύπου με χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας: Κύριος στόχος είναι η μείωση η ακόμα και εξάλειψη του αριθμού των απαιτούμενων φυσικών πρωτοτύπων καθώς και η αξιολόγηση των τεχνικών λύσεων σε πρώιμο στάδιο (εικονικό πρότυπο-Virtual Prototype). Η ανάλυση αυτή μπορεί να συνδυαστεί με άλλα συστήματα ανάλυσης και συστήματα φωτορεαλισμού για την προσομοίωση και αξιολόγηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου.
- Ανάλυση της μεθόδου παραγωγής, με χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας: Εικονική παραγωγή και συναρμολόγηση, Virtual manufacturing and assembly). Προσομοίωση όλης της γραμμής παραγωγής ή της γραμμής συναρμολόγησης, για την αξιολόγηση της μεθόδου παραγωγής ή της δυνατότητας συναρμολόγησης σε πρώιμο στάδιο πριν από κάθε παραγγελία οδηγών, σφικτήρων, ιδιοσυσκευών ή εργαλείων και άλλων αυτοματοποιημένων συστημάτων.

Διακρίνουμε τέσσερα στάδια στην διαδικασία ανάπτυξης ενός προϊόντος:

1. Αρχικός Σχεδιασμός
2. Σχεδιομελέτη
3. Πρωτότυπο
4. Παραγωγή

Τα στάδια αυτά δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, υπάρχει επικάλυψη και συνεχής ανταλλαγή πληροφορίας, τόσο προς τα μετέπειτα στάδια, όσο και από τα μετέπειτα προς τα προηγούμενα στάδια μετά την ολοκλήρωση τους. Αποφάσεις και επιλογές που λαμβάνονται στα πρώτα στάδια επηρεάζουν τις εργασίες στα επόμενα στάδια και συχνά μετά την εκτέλεση των τελευταίων εργασιών πρέπει να αλλάξουν οι αρχικές αποφάσεις και επιλογές, όπως υλικά, ακρίβεια, ανοχές κ.α. Όσο περισσότερο προχωράει η διαδικασία της ανάπτυξης, τόσο περισσότερο είναι και το τεχνικό έργο που απαιτείται και τόσο πιο έντονη είναι η χρήση ειδικευμένων εργαλείων σχεδιομελέτης με υπολογιστή.



Εικόνα 51. Στάδια σχεδιομελέτης

4.2 Προδιαγραφές εκτυπωτή

Είναι μεγάλο το εύρος των εφαρμογών των τρισδιάστατων εκτυπωτών και για αυτό το λόγο ποικίλουν και οι κατηγορίες τους. Την κάθε κατηγορία πλαισιώνει ένα σύνολο χαρακτηριστικών και προδιαγραφών. Ο παρών σχεδιασμός περιορίστηκε στα όρια των τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους. Τα παρακάτω στοιχεία αποτελούν και κριτήρια προδιαγραφών για την κατηγορία των τρισδιάστατων εκτυπωτών χαμηλού κόστους που κάνουν χρήση της μεθόδου εναπόθεσης τηγμένου υλικού (FDM).

- **Διαστάσεις**: Ο συνολικός όγκος που καλύπτει το μηχάνημα στον χώρο. Οι εκτυπωτές χαμηλού κόστους στο εμπόριο δεν ξεπερνούν συνήθως διαστάσεις της τάξης 80cm X 80cm X 80cm.
- **Βάρος:** Το συνολικό βάρος της συναρμολογημένης κατασκευής. Το εύρος είναι ανάλογο με τις διαστάσεις και το υλικό κατασκευής και κυμαίνεται από 5kg – 40kg
- **Ακρίβεια:** Αφορά την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να καλύψει η κεφαλή απόθεσης υλικού. Αντιπροσωπεύει συνήθως την οριζόντια κίνηση στο X-Y επίπεδο και εξαρτάται αφενός από το βήμα του κινητήρα και αφετέρου από το μέγεθος του ακροφυσίου.
- **Ανάλυση:** Αφορά το πάχος της κάθε στρώσης εκτύπωσης. Αντιπροσωπεύει συνήθως την κίνηση στον άξονα Z. Το εύρος κυμαίνεται συνήθως από 0.1mm έως και 0.5mm.

- **Όγκος εκτύπωσης:** Το μέγιστο μέγεθος που μπορεί να έχει ένα αντικείμενο προς εκτύπωση. Οι διαστάσεις συνήθως δεν ξεπερνούν τα 200mm x 200mm x 200mm.
- **Ταχύτητα εκτύπωσης:** Η γραμμική ταχύτητα κίνησης της κεφαλής απόθεσης υλικού. Εξαρτάται από το υλικό, την προώθηση του νήματος και την ποιότητα εκτύπωσης. Μπορεί αν είναι από 40mm/s έως και 150mm/s και ποικίλει γενικά ανάλογα με την εφαρμογή.
- **Ακροφύσιο:** Η διάμετρος της οπής στην έξοδο της κεφαλής απόθεσης υλικού. Ανάλογα με την εφαρμογή και την ποιότητα εκτύπωσης οι τυποποιημένες επιλογές ποικίλουν από 0.05mm μέχρι 0.5mm.
- **Κόστος:** Το συνολικό κόστος σε ευρώ.
- **Υλικά εκτύπωσης:** Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκτύπωση.

Για τον ορθό σχεδιασμό και μελέτη του τρισδιάστατου εκτυπωτή ορίστηκαν αρχικά συγκεκριμένες προδιαγραφές και τεχνικά χαρακτηριστικά. Με αυτόν τον τρόπο τέθηκαν όρια για τη διαδικασία της σχεδίασης.

Πίνακας 1. Προδιαγραφές εκτυπωτή

Προδιαγραφές	Στοιχεία	Σχόλια
Διαστάσεις (mm)	530x330x330	Πραγματικές
Βάρος (Kg)	3.1	Εκτίμηση από μοντέλοCAD
Ανάλυση (mm)	0.1	Εκτίμηση. Ρυθμιζόμενη από τον μικροελεγκτή
Ακρίβεια (mm)	0.2	Εκτίμηση
Όγκος εκτύπωσης (mm)	120 x 120 x 120	Εκτίμηση. Επιδέχεται αύξησης λόγω μεγάλης διαδρομής στον κατακόρυφο άξονα
Ταχύτητα εκτύπωσης (mm/s)	80	Εκτίμηση. Ρυθμιζόμενη από τον μικροελεγκτή
Διάμετρος ακροφυσίου (mm)	0.3	Πραγματική
Υλικά εκτύπωσης	PLA, ABS	Ανάλογα με τη θερμοκρασία της κεφαλής εκτύπωσης
Κόστος (€)	300	Εκτίμηση

4.3 Γεωμετρική μοντελοποίηση μηχανολογικών στοιχείων

4.3.1 Το λογισμικό μοντελοποίησης

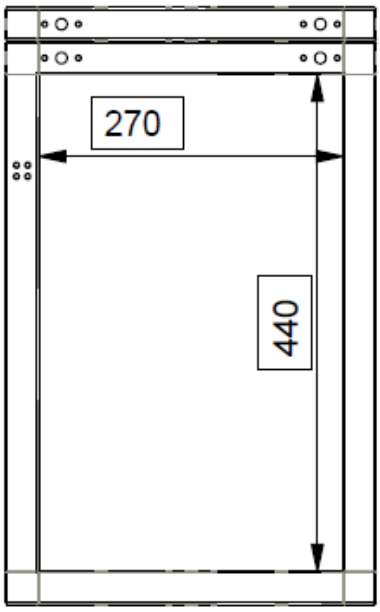
Το **ProEngineer** της PTC είναι μια εφαρμογή λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης στην κατηγορία λογισμικών CAD / CAM / CAE. Είναι ένα πρόγραμμα παραμετρικής σχεδίασης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Αποτελεί μια κλιμακωτή, λειτουργική σουίτα λογισμικού σχεδιασμού προϊόντων που παρέχει ταχύτητα και ποιότητα στην μοντελοποίηση και μελέτη. Παρέχει τη δυνατότητα σε εις βάθος έλεγχο σύνθετων γεωμετριών. Οι δυνατότητες του προϊόντος μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: Μηχανολογικής Σχεδίασης, Ανάλυσης και Παραγωγής.

4.3.2 Τα στοιχεία που μοντελοποιήθηκαν

Για τις ανάγκες τις γεωμετρικής μοντελοποίησης και του οπτικού σχεδιασμού της κατασκευής, σχεδιάστηκαν σαράντα ξεχωριστά μηχανολογικά στοιχεία. Αυτά μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πέντε σύνολα με γνώμονα την σύνδεση και την λειτουργικότητά τους. Παρακάτω παρουσιάζονται σε γενική όψη, καθώς αναλυτικά μηχανολογικά σχέδια τους βρίσκονται στο παράρτημα.

Πλαίσιο – Βάση στήριξης

Εικόνα 52. Τρισδιάστατο σχέδιο πλαισίου

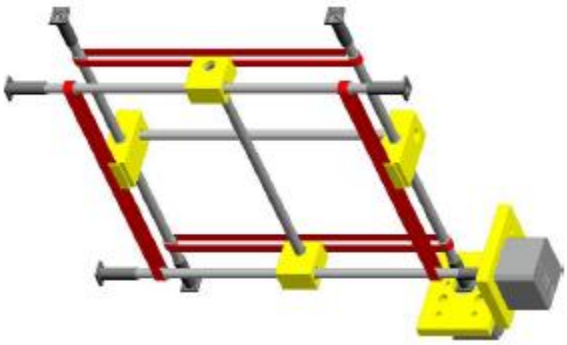


Εικόνα 53. Σχέδιο πλαισίου

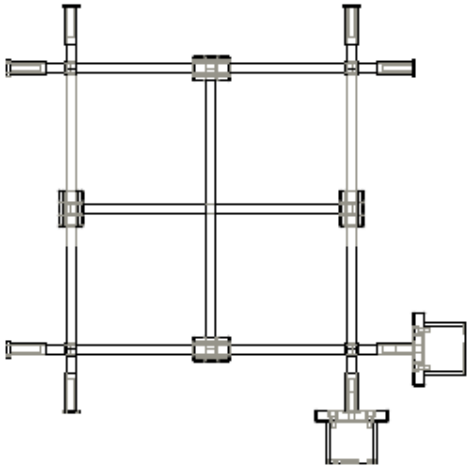
Ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση του πλαισίου βασίστηκε στα διαθέσιμα υλικά του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ. Αυτά αποτελούν δοκοί

τετραγωνικής διατομής 30mm x 30mm από μαλακό χάλυβα. Οι διαστάσεις του πλαισίου υπολογίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές που τέθηκαν σε προηγούμενο βήμα. Θα πρέπει να αποτελεί μια στιβαρή κατασκευή που να εδράζει τους άξονες και τους μηχανισμούς κίνησης καθώς και όλα τα επιμέρους μηχανολογικά στοιχεία. Επιπλέον προσφέρει χώρο για την τοποθέτηση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού ελέγχου και εντολών. Οπές κατάλληλων διαμέτρων δημιουργήθηκαν με σκοπό να επιτρέψουν την στήριξη των επιμέρους στοιχείων. Οι ακριβείς διαστάσεις και το μηχανολογικό σχέδιο υπάρχουν στο Παράρτημα.

Σύστημα κίνησης στο οριζόντιο επίπεδο (XY)



Εικόνα 54. Τρισδιάστατο σχέδιο συστήματος κίνησης



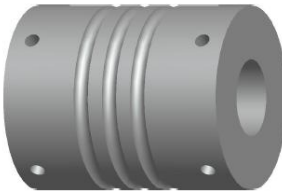
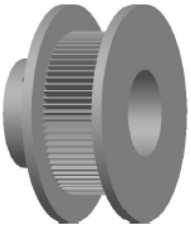
Εικόνα 55. Σχέδιο συστήματος κίνησης

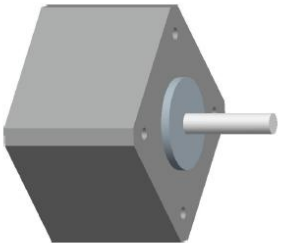
Το σύστημα κίνησης του φορέα της κεφαλής απόθεσης υλικού στο οριζόντιο επίπεδο αποτελεί συναρμολόγημα πολλών μηχανολογικών στοιχείων. Οι απαιτήσεις για αυτόν το μηχανισμό κίνησης ήταν η στιβαρότητα της κατασκευής, η αποφυγή βάρους στον φορέα κίνησης, η ακρίβεια στις μετατοπίσεις και η εξάλειψη παλινδρομικών κινήσεων (backlash).

Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο εξής: ένας βηματικός κινητήρας περιστρέφει έναν άξονα. Με τη βοήθεια τροχαλιών και ιμάντων χρονισμού περιστρέφεται άλλος ένας άξονας παράλληλα με τον κινητήριο σε κάποια απόσταση. Ο ίδιος μηχανισμός αλλά σε διαφορετικό κάθετο επίπεδο και περιστραμμένος κατά 90^0 σε συνδυασμό με τον προηγούμενο δημιουργεί ένα σύστημα XY. Στους άξονες αυτούς ολισθαίνουν με τη βοήθεια των ιμάντων και γραμμικών τριβέων κίνησης, οδηγοί οι οποίοι εδράζουν δύο άλλους μικρότερους σε μήκος και σε διαφορετικά επίπεδα άξονες. Ο μηχανισμός αυτός δημιουργεί έναν “σταυρό” σε διαφορετικά επίπεδα επιτρέποντας στον φορέα της κεφαλής να κινείται ανεξάρτητα είτε στο X είτε στο Y επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα η περιστροφή για

παράδειγμα των κινητήριων αξόνων οι οποίοι βρίσκονται κατά σύμβαση προσανατολισμένοι κατά τον άξονα Χ επιτρέπουν την γραμμική κίνηση του φορέα στην Υ διεύθυνση, με την φορά της περιστροφής του βηματικού κινητήρα. Ο ίδιος τρόπος λειτουργίας ισχύει και για το άλλο ζευγάρι κινητήριων αξόνων. Ο συνολικός μηχανισμός κίνησης στο ΧΥ επίπεδο αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα.

Πίνακας 2. Σχέδια και περιγραφή στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα οριζόντιας κίνησης

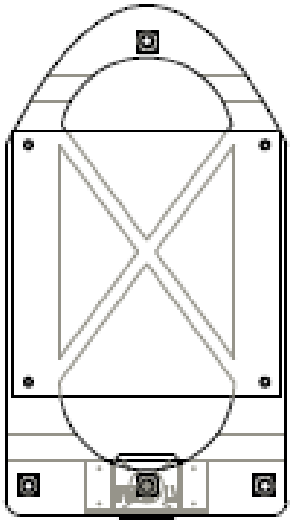
	Το κόμπλερ ή αλλιώς ο μηχανισμός σύζευξης, επιτρέπει την μετάδοση κίνησης μεταξύ αξόνων ίδιας ή διαφορετικής διαμέτρου. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση του κινητήρα με τον άξονα μετάδοσης κίνησης.
	Η τροχαλία χρονισμού συνεργάζεται με τον ιμάντα χρονισμού και χρησιμεύει στην μετάδοση κίνησης. Η οδόντωση του δίσκου περιστροφής επιτρέπει μεγάλη ακρίβεια στην κίνηση. Στην παρούσα εφαρμογή οι τροχαλίες αυτές εδράζονται στους άξονες μετάδοσης κίνησης.
	Ο ιμάντας χρονισμού διαφέρει από τον απλό ιμάντα λόγω ύπαρξης οδόντωσης. Συνεργάζεται με την τροχαλία χρονισμού για την μετάδοση κίνησης.
	Τα γραμμικά ρουλεμάν εντάσσονται στα σημαντικά μηχανολογικά στοιχεία. Επιτρέπουν τη γραμμικής κίνηση κατά μήκος ενός άξονα. Συνήθως διαθέτουν σφαιρικά σώματα κύλισης αλλά σε ορισμένες εφαρμογές δεν διαθέτουν τέτοια (bushings).

	Για τις ανάγκες της κατασκευής, σχεδιάστηκαν ειδικές φωλιές για τα γραμμικά ρουλεμάν. Με σφιχτή συναρμογή (H7) φιλοξενείται το ρουλεμάν και με τις οπές στήριξης στην φλάντζα μπορεί να στηριχθεί στον άξονα κατά μήκος του οποίου κινείται.
	Ο σχεδιασμός των κινητήρων στηρίχτηκε στις φυσικές διαστάσεις βηματικών κινητήρων τύπου NEMA 17. Πανομοιότυπο αντίγραφο επέτρεψε να δοκιμαστούν πολλές διαφορετικές εναλλακτικές θέσεις πριν την τελική κατασκευή.
	Για τη στήριξη των βηματικών κινητήρων πάνω στο πλαίσιο ήταν επιτακτική η ανάγκη σχεδιασμού βάσεων στήριξης. Στο μοντέλο υπάρχει πρόβλεψη για την στήριξη σε δύο επίπεδα (γωνιά) με σκοπό την εξασφάλιση της στιβαρής σύνδεσης.
	Απλές βίδες με σπείρωμα χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιήσουν τη φυσική συναρμολόγηση του μοντέλου. Τα μεγέθη ποικίλουν ανάλογα την εφαρμογή (M2, M3, M5, M6)

	Ένα από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα στη χρήση του συγκεκριμένου συστήματος κίνησης είναι αυτό που λειτουργεί ως σύνδεσμος των κάθετων αξόνων. Παρέχουν έδραση του γραμμικού ρουλεμάν και οπή για την πάκτωση του μικρού σε μήκος κάθετου άξονα. Επιπλέον η ύπαρξη τετραγωνικής διαμήκους οπής επιτρέπει την πάκτωση του ιμάντα χρονισμού ο οποίος θα κινεί το σύνδεσμο. Λόγω υψομετρικών διαφορών έγινε σχεδιασμός δύο διαφορετικών σε διαστάσεις συνδέσμων.
	Απλοί άξονες κυκλικής διατομής σε διάφορα μήκη σχεδιάστηκαν για την λειτουργία του συστήματος κίνησης της κεφαλής απόθεσης υλικού.

Σύστημα κίνησης στο κάθετο επίπεδο (Z)

Εικόνα 56. Τρισδιάστατο σχέδιο συστήματος κατακόρυφης κίνησης

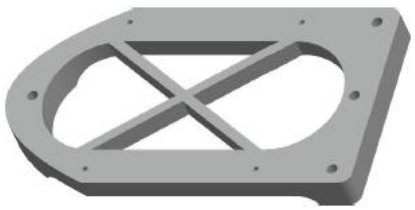
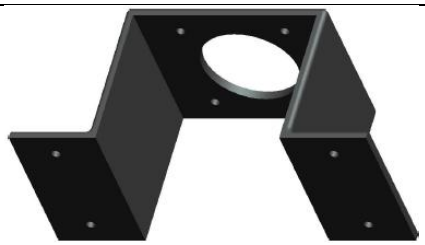


Εικόνα 57. Κάτοψη συστήματος κατακόρυφης κίνησης

Το σύστημα κατακόρυφης κίνησης αποτελείται από έναν βηματικό κινητήρα ο οποίος με τη βοήθεια ενός κόπλερ δίνει κίνηση σε κοχλία κίνησης. Ένα περικόχλιο με

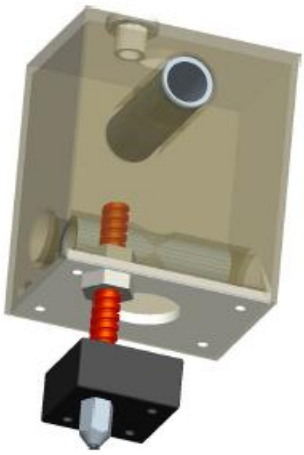
φλάντζα που είναι τοποθετημένο στον κοχλία κίνησης, εδράζει τη βάση εκτύπωσης. Η βάση εκτύπωσης σχεδιασμένη με κατάλληλα νεύρα και διατομές για μείωση βάρους μετακινείται κατακόρυφα και φιλοξενεί την πλάκα εκτύπωσης. Η πλάκα εκτύπωσης εδράζεται στην βάση με τέσσερις βίδες οι οποίες περιλαμβάνουν ελατήρια και παρέχουν δυνατότητα ρύθμισης της επιπεδότητας της πλάκας. Επιπλέον έχουν σχεδιαστεί τρείς κατακόρυφοι άξονες, δύο εκατέρωθεν του κοχλία κίνησης και ένας απέναντι του, με σκοπό την οδήγηση της βάσης. Τέλος ένα έλασμα σε σχήμα “Π” διασφαλίζει την σταθερή θέση του βηματικού κινητήρα πάνω στο πλαίσιο.

Πίνακας 3. Στοιχεία που απαρτίζουν το κατακόρυφο σύστημα κίνησης

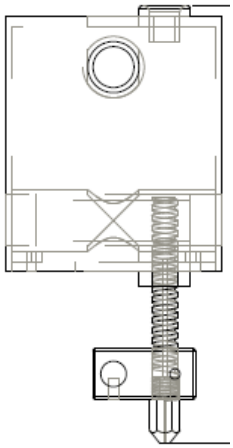
	Η σχεδιομελέτη του τραπεζιού στήριξης είχε ως γνώμονα μια στιβαρή και ελαφριά κατασκευή. Αυτό επιτεύχθηκε με την αφαίρεση υλικού και τη χρήση νεύρων. Η φυσική κατασκευή του μοντέλου αυτού προτείνεται να είναι από κράμα αλουμινίου για σχετικά μεγάλη δυσκαμψία και μικρό βάρος.
	Η πλάκα εκτύπωσης αποτελεί την επιφάνεια στην οποία η κεφαλή εκτύπωσης θα εναποθέτει το τηγμένο υλικό. Είναι πολύ σημαντικό να είναι επίπεδη και λεία για την ορθή λειτουργία του συστήματος και την αποφυγή παραμορφώσεων στο τελικό αντικείμενο.
	Το στοιχείο δέσμευσης του κινητήρα σχεδιάστηκε με σκοπό τη σταθερή πάκτωση του βηματικού κινητήρα στο πλαίσιο.
	Το περικόχλιο ανύψωσης, μετατρέπει την περιστροφική κίνηση του κοχλία περιστροφής σε γραμμική του τραπεζιού εκτύπωσης. Με το εσωτερικό σπείρωμα που διαθέτει, επιτρέπει πολύ μικρές μετατοπίσεις που βοηθούν στην καλύτερη ανάλυση εκτύπωσης.

	Ο κοχλίας κίνησης, με το βήμα του σπειρώματος που διαθέτει και σε συνδυασμό με το βήμα περιστροφής του βηματικού κινητήρα επιτρέπει τις μικρές κατακόρυφες μετατοπίσεις του τραπεζιού εκτύπωσης και κατ' επέκταση καλύτερη ανάλυση στο τελικό αντικείμενο.

Κεφαλή απόθεσης υλικού



Εικόνα 58. Τρισδιάστατο μοντέλο κεφαλής απόθεσης υλικού

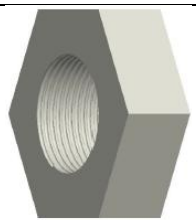
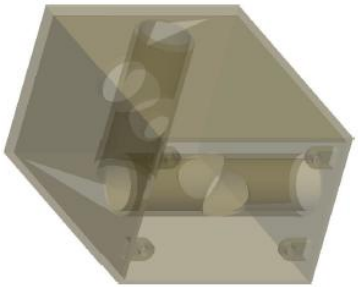


Εικόνα 59. Πλάγια όψη κεφαλής απόθεσης υλικού

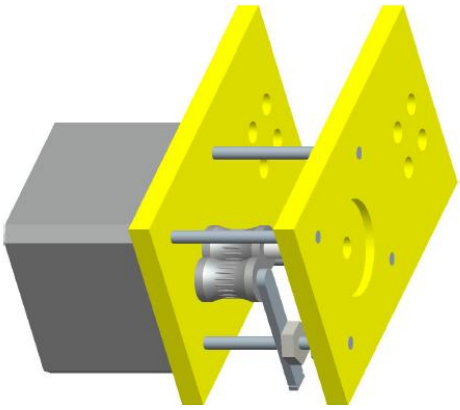
Το σύστημα της κεφαλής απόθεσης υλικού αποτελείται από τον φορέα κίνησης και την κεφαλή εκτύπωσης. Ένα ειδικό κέλυφος σχεδιάστηκε με σκοπό να εδράσει όλα τα επιμέρους στοιχεία. Οι ειδικές οπές που λειτουργούν ως φωλιά για τα γραμμικά ρουλεμάν μετατρέπουν το κέλυφος αυτό σε φορέα κίνησης. Μια ακόμα οπή επιτρέπει την ελεγχόμενη εισαγωγή του νήματος στην κεφαλή εκτύπωσης μέσα από το κέλυφος. Επιπλέον, έχει γίνει πρόβλεψη για την έδραση μεταλλικής πλάκας στην οποία θα στεγάζεται η κεφαλής εκτύπωσης. Η κεφαλή εκτύπωσης αποτελείται από έναν διάτρητο κοχλία μικρού μήκους, το θερμαινόμενο κύβο (μπλόκ) και το ακροφύσιο. Η οπή εισαγωγής του νήματος στο κέλυφος βρίσκεται στον ίδιο κατακόρυφο άξονα με την κεφαλή εκτύπωσης για την ανεπηρέαστη είσοδό του στο θάλαμο θέρμανσης. Επιπλέον, ένα ειδικό εξάρτημα υποδοχής χωρίς γωνίες επιτρέπει την ομαλή εισαγωγή του νήματος στο κέλυφος. Τέλος η επιλογή σχεδίασης αποσπώμενης πλάκας από το κέλυφος επιτρέπει τυχόν μελλοντική αντικατάσταση κεφαλής εκτύπωσης ή του μηχανισμού γενικότερα.

Πίνακας 4. Στοιχεία που απαρτίζουν την κεφαλή απόθεσης υλικού

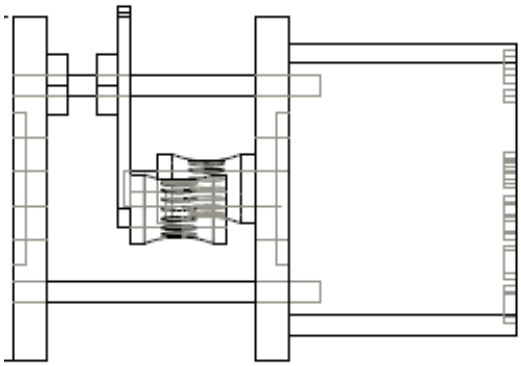
	Το ακροφύσιο, αντίγραφό από το φυσικό μοντέλο, διαθέτει εξωτερικό σπείρωμα για την εισαγωγή του στο θερμαινόμενο κύβο και επίπεδες επιφάνειες για εύκολη εισχώρησή του.
	Ο θερμαινόμενος κύβος σχεδιάστηκε με σκοπό να λειτουργεί ως θάλαμος θέρμανσης του νήματος αλλά και να εδράζει το θερμαντικό στοιχείο, τον αισθητήρα θερμοκρασίας, τον διάτρητο κοχλία και το ακροφύσιο. Τα δύο τελευταία είναι απολύτως ευθυγραμμισμένα, τοποθετημένα στην ίδια οπή και βρίσκονται κοντά στο θερμαντικό στοιχείο.
	Ο διάτρητος κοχλίας σχεδιάστηκε ως οδηγός του νήματος εκτύπωσης και εισαγωγής του στον θάλαμο τήξης. Επιπλέον, αποτελεί το συνδετικό στοιχείο της κεφαλής εκτύπωσης και του φορέα καθώς η μια του άκρη εδράζεται στην μεταλλική πλάκα του κελύφους.
	Η μεταλλική πλάκα του κελύφους σχεδιάστηκε με γνώμονα την εργονομία. Στόχος είναι το χαμηλό βάρος και η δυνατότητα τοποθέτησης διαφορετικών κεφαλών εκτύπωσης ανάλογα την εφαρμογή. Για το λόγο αυτό υπάρχουν οπές διαφορετικών μεγεθών για την σύνδεση της πλάκας στο κέλυφος, τη μείωση βάρους και την έδραση της κεφαλής εκτύπωσης.

	Η μοντελοποίηση περικοχλίων πραγματοποιήθηκε με σκοπό την λεπτομερή προσομοίωση του εκτυπωτή.
	Το κέλυφος αποτελεί τον φορέα κίνησης της κεφαλής εκτύπωσης. Σχεδιάστηκε με σκοπό να πλαισιώνει τα δύο κάθετα μεταξύ τους γραμμικά ρουλεμάν, να υποδέχεται σε ένα προστατευμένο περιβάλλον το νήμα εκτύπωσης και να εδράζει μια εργονομική πλάκα για ποικιλία τοποθέτησης κεφαλών εκτύπωσης. Στη σχεδιομελέτη θεωρήθηκε ως υλικό κατασκευής πλαστικό για λόγους βάρους, κόστους και ευκολίας κατασκευής.
	Το ειδικό εξάρτημα υποδοχής του νήματος στο κέλυφος σχεδιάστηκε με σκοπό την ομαλή είσοδο του νήματος στο εσωτερικό, καθώς και τη δυνατότητα έδρασης εύκαμπτου σωλήνα οδήγησης από τον μηχανισμό προώθησης του νήματος.

Σύστημα προώθησης νήματος



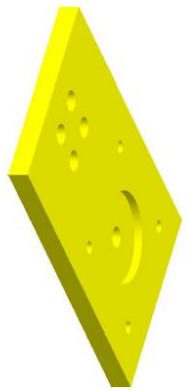
Εικόνα 60. Τρισδιάστατο σχέδιο μηχανισμού προώθησης νήματος



Εικόνα 61. Σχέδιο μηχανισμού προώθησης νήματος

Ο σκοπός του μηχανισμού προώθησης του νήματος είναι η οδήγηση του νήματος από τη συσκευασία αποθήκευσης (καρούλι) στην κεφαλή εκτύπωσης του υλικού. Τα κύρια μέρη του είναι ο βηματικός κινητήρας που παρέχει την απαιτούμενη ροπή και ταχύτητα για την οδήγηση του νήματος, το πινιόν γρανάζι που σε συνεργασία με μια περιστρεφόμενη επιφάνεια ή ένα συνεργαζόμενο γρανάζι εγκλωβίζουν μέρος του νήματος και το ωθούν προς την κατεύθυνση περιστροφής και τέλος οι βάσεις στήριξης του μηχανισμού στο πλαίσιο. Ο μηχανισμός σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να εδράζεται στο πλαίσιο του εκτυπωτή, σε μία από τις τέσσερις κατακόρυφες δοκούς. Με αυτόν τον τρόπο η οδήγηση του νήματος γίνεται στην κατακόρυφη διεύθυνση με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται τυχόν τριβές και απωθητικές δυνάμεις. Για το αποτέλεσμα αυτό είναι σημαντικό το γεγονός ότι το σύνολο του νήματος (καρούλι) θα βρίσκεται κάτω από τον μηχανισμό προώθησης. Για τον εγκλωβισμό του νήματος στον μηχανισμό προώθησης επιστρατεύτηκαν δύο γρανάζια. Το πινιόν βρίσκεται προσαρτημένο απευθείας στον άξονα του κινητήρα, ενώ το συνεργαζόμενο σε ένα ειδικό εξάρτημα το οποίο τοποθετείται σε μια από της τέσσερις βίδες σύσφιξης. Με την βοήθεια ενός ελατηρίου ή κάποιου εύκαμπτου ιμάντα, δημιουργούνται συνθήκες μόχλευσης και στρεπτικές τάσεις στο εξάρτημα έδρασης του συνεργαζόμενου γραναζιού με αποτέλεσμα το τελευταίο να εφάπτεται στο πινιόν με μια σχετικά σταθερή δύναμη. Με αυτό τον τρόπο τα δύο γρανάζια εγκλωβίζουν το νήμα και του προκαλούν εξαναγκασμένη γραμμική κίνηση.

Πίνακας 5. Στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα προώθησης του νήματος

	Η πλάκα στήριξης του μηχανισμού προώθησης, σχεδιάστηκε για να μπορεί να στηρίξει σταθερά το βηματικό κινητήρα πάνω στη δοκό του πλαισίου. Επιπλέον έχουν σχεδιαστεί οπές για την προσάρτηση μεγάλων σε μήκος κοχλιών (βίδες σύσφιξης με μήκος μεγαλύτερο από 30mm), μια από τις οποίες θα αποτελεί και το κέντρο περιστροφής του συνεργαζόμενου γραναζιού.
	Για τα στοιχεία προώθησης του νήματος (πινιόν γρανάζι και συνεργαζόμενο) σχεδιάστηκαν ειδικά εξαρτήματα κυκλικής διατομής με ισομετρικά τραχιά επιφάνεια που προσομοιώνει τα δόντια ενός γραναζιού αλλά χωρίς να προκαλεί καταπόνηση και μόνιμη παραμόρφωση

	στο νήμα κατά την προώθησή του.
	Το ειδικό εξάρτημα στήριξης του συνεργαζόμενου γραναζιού σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε μια από τις βίδες σύσφιξης. Με μια ειδική οπή στην μια του άκρη για την εύκολη προσαρμογή ελαστικού ιμάντα ή ελατηρίου, εκμεταλλεύεται τη σταθερή πάκτωση της βίδας και ωθεί το συνεργαζόμενο γρανάζι προς το πινιόν, μέσα στο μικρό χώρο του μηχανισμού.
	Για την μελέτη του μηχανισμού μοντελοποιήθηκαν τυποποιημένες βίδες του εμπορίου με σκοπό την λεπτομερή επεξεργασία του σχεδίου και την βελτίωση της εργονομίας και της λειτουργικότητας του.

Το τελικό μοντέλο του τρισδιάστατου εκτυπωτή μετά τη συναρμολόγηση

Εικόνα 62. Τρισδιάστατο σχέδιο μηχανισμού προώθησης νήματος

4.4 Ιδιοανυσματική ανάλυση και ανάλυση φάσεων (modal analysis)

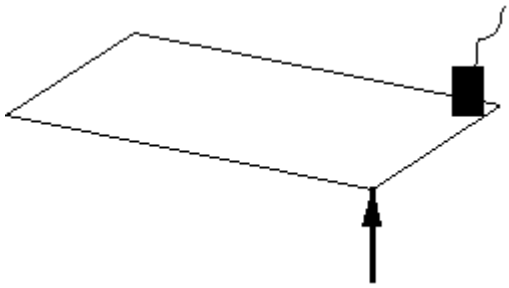
Με τον όρο ιδιοανυσματικά μεγέθη εννοούνται ζωτικής σημασίας χαρακτηριστικά μιας κατασκευής, αποτελούμενα από τα μεγέθη των ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και αποσβέσεων της. Ως ιδιοσυχνότητα ορίζεται μια συχνότητα με την οποία είναι δυνατό να ταλαντωθεί μια κατασκευή, ενώ ο τρόπος με τον οποίο αυτή ταλαντώνεται αποτυπώνεται στην αντίστοιχη ιδιομορφή. Η απόσβεση υποδηλώνει την ταχύτητα με την οποία αποσβένεται μια ταλάντωση.

Κάθε μηχανολογική κατασκευή, καλούμενη και «σύστημα», υπόκειται σε σύνθετη διέγερση και αντίστοιχη απόκριση (ταλαντωτική κίνηση). Εφόσον αυτή η κίνηση - η οποία θεωρείται ότι έχει καταρχήν γραμμική συμπεριφορά - μπορεί να εκφραστεί σαν συνδυασμός στοιχειωδών ιδιοανυσματικών (**modal**) κινήσεων, είναι επιθυμητό η δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής να μπορεί να χαρακτηριστεί με τη βοήθεια ενός ιδιοανυσματικού μοντέλου. Ένα τέτοιο μοντέλο αποτελείται από τις ακόλουθες συνιστώσες:

- τις ιδιοσυχνότητες(συχνότητες συντονισμού) της κατασκευής
- τις αντίστοιχες ιδιομορφές της κατασκευής
- την απόσβεση της κατασκευής

4.4.1 Τι είναι η ιδιοανυσματική ανάλυση

Θεωρούμε μια απλή, ελεύθερα κρεμασμένη επίπεδη πλάκα. Μία σταθερή δύναμη εφαρμόζεται σε μία γωνία της πλάκας, αλλά η συχνότητα εφαρμογής (διέγερσης) μεταβάλλεται κατά ημιτονοειδή τρόπο. Η απόκριση σε μια άλλη γωνία της πλάκας με επιταχυνσιόμετρο.

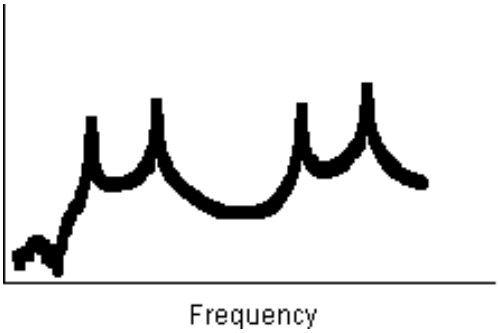


Εικόνα 63. Πειραματική πλάκα

Μετρώντας τη χρονική απόκριση με το επιταχυνσιόμετρο, θα παρατηρούμε ότι το πλάτος απόκρισης αλλάζει καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα ταλάντωσης. Αυτό αρχικά φαίνεται περίεργο, δεδομένου ότι το πλάτος της διέγερσης είναι σταθερό.

Εικόνα 64. Κυματομορφή απόκρισης

Περισσότερες πληροφορίες αντλούνται στο πεδίο των συχνοτήτων, με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transform). Ένα τυπικό διάγραμμα χαρακτηριστικής συνάρτησης απόκρισης συχνότητας (Frequency Response Function) παρουσιάζεται παρακάτω. Οι κορυφές σε αυτό το διάγραμμα αντιστοιχούν στη συχνότητα της ταλάντωσης, όπου το πλάτος της απόκρισης είναι μεγαλύτερο.



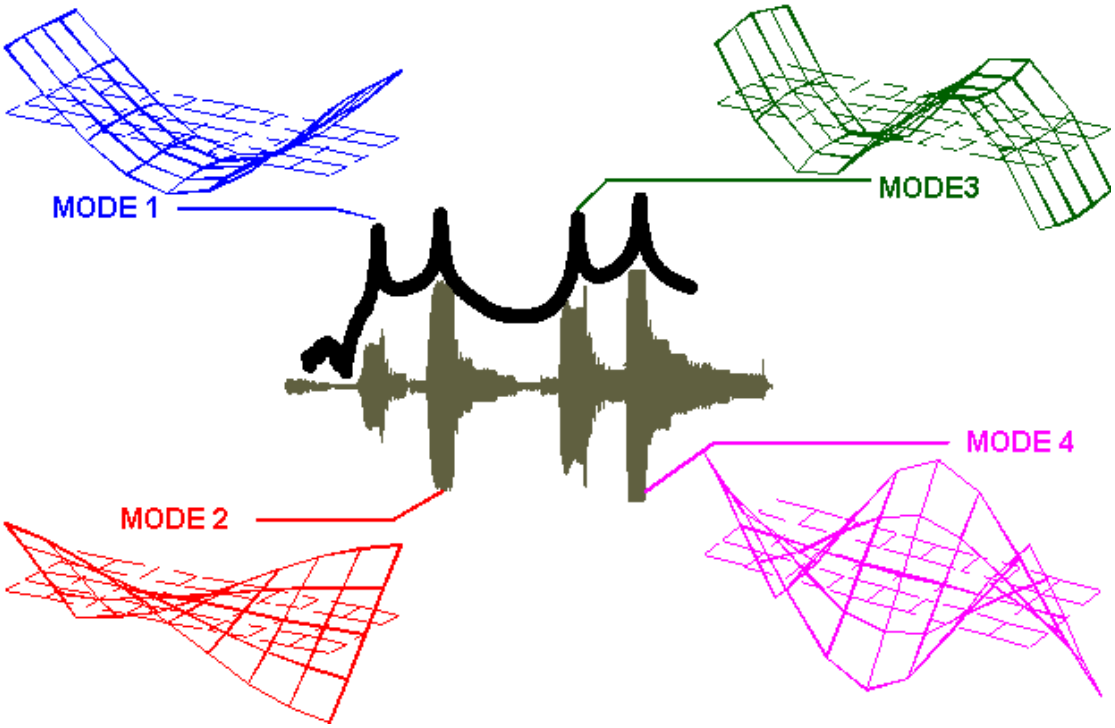
Εικόνα 65. Φάσμα απόκρισης

Προβάλοντας το χρονικό σήμα μαζί με αυτό της συχνότητας, για μια δεδομένη χρονική περίοδο, παρατηρείται ότι με το πλάτος του χρονικού σήματος αυξάνεται ανάλογα και το σήμα στο πεδίο των συχνοτήτων. Τα σημεία αυτά αυξημένου πλάτους οφείλονται στις φυσικές συχνότητες του συστήματος, που εξαρτώνται από τη μάζα και τη δυσκαμψία του συστήματος.

Εικόνα 66. Περιβάλλουσα κυματομορφής

Για να δούμε τι συμβαίνει με το μοτίβο παραμόρφωσης στη δομή σε κάθε μία από αυτές τις φυσικές συχνότητες έστω ότι τοποθετούμε 45 ομοιόμορφα κατανεμημένα επιταχυνσιόμετρα στην πλάκα. Αυτοί οι αισθητήρες μετρούν το εύρος απόκρισης της πλάκας όταν η διέγερση συμπίπτει με κάθε μία από τις τέσσερις συχνότητες συντονισμού

(κορυφές του διαγράμματος από επεξεργασμένο σήμα στο πεδίο των συχνοτήτων). Το παρακάτω σχήμα δείχνει τα μοτίβα παραμόρφωσης που θα προκύψουν όταν η συχνότητα διέγερσης συμπίπτει με μία από τις φυσικές συχνότητες του συστήματος.

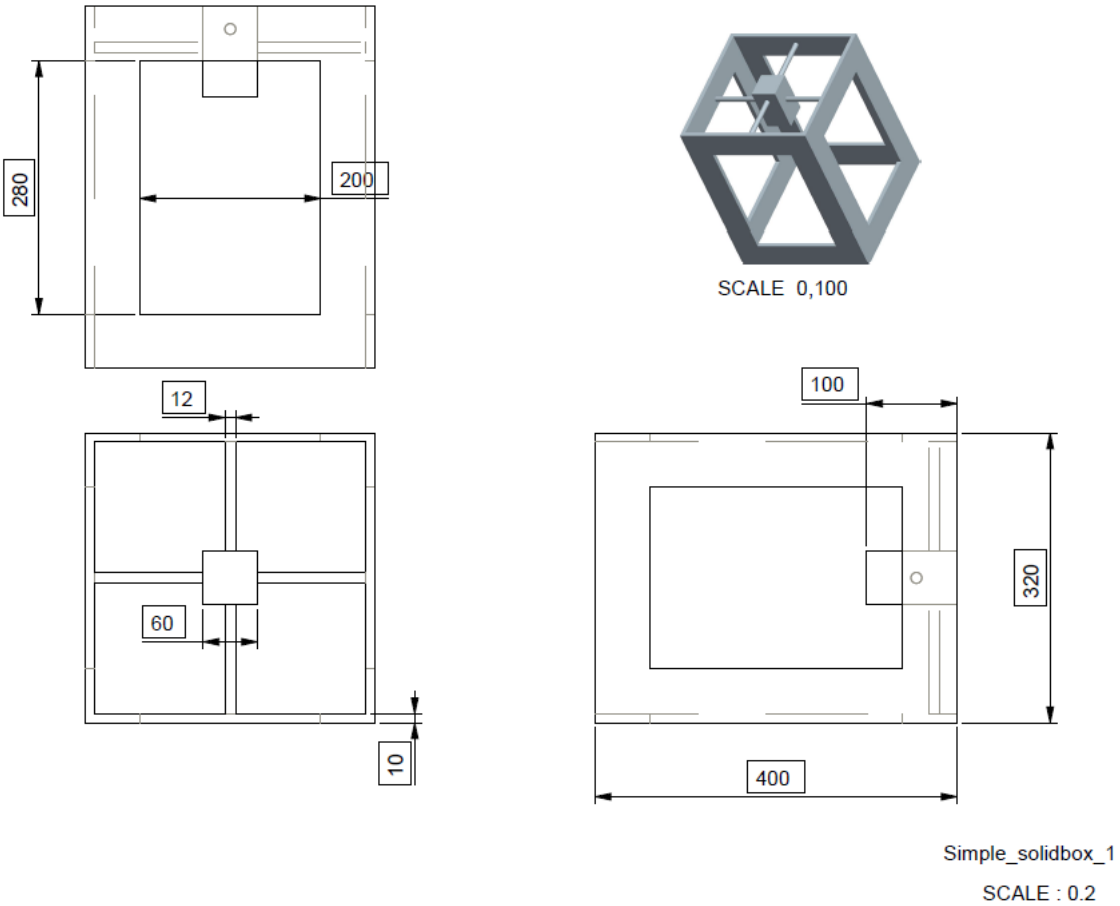


Εικόνα 67. Συσχετισμός παραμορφώσεων με συχνότητες

Η απόκριση της κατασκευής είναι διαφορετική σε κάθε μία από τις διαφορετικές φυσικές συχνότητες. Αυτά τα μοτίβα παραμόρφωσης ονομάζεται ιδιομορφές (mode shapes). Σαν ιδιοανυσματική ανάλυση ορίζεται λοιπόν η μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών των δομών. Τόσο οι φυσικές συχνότητες (οι οποίες εξαρτώνται από τη μάζα και τη στιβαρότητα) όσο και τα μοτίβα παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στο σχεδιασμό αλλά και τη βελτιστοποίηση συστημάτων ως προς το θόρυβο και τους κραδασμούς.

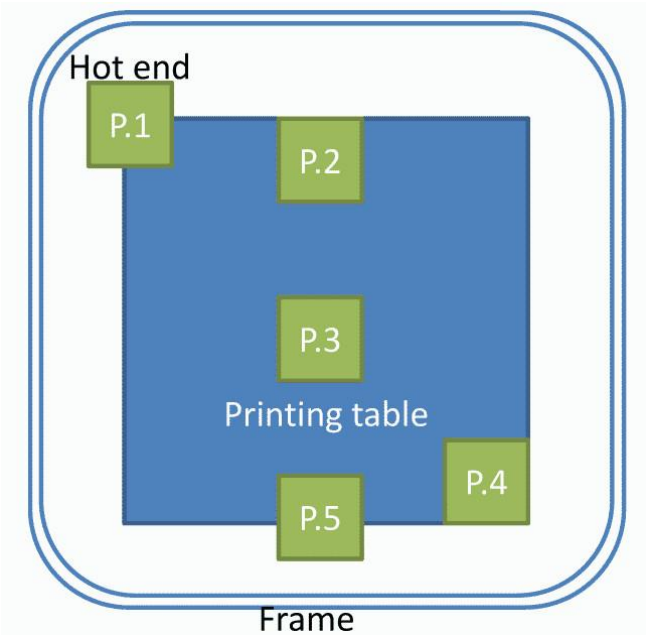
4.4.2 Το μοντέλο μελέτης

Το λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης (ProEngineerwildfire 4.0) μας βοήθησε στο να υπολογίσουμε θεωρητικά της ιδιοσυχνότητες και τις μετατοπίσεις ενός πρώτου πρωτότυπου μοντέλου. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε μια δομή πλαισίου με ενσωματωμένους άξονες που εδράζουν το φορέα κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιείται μια προσέγγιση του πραγματικού μοντέλου αλλά μειώνεται δραματικά ο υπολογιστικός φόρτος.



Εικόνα 68. Σχέδιο απλοποιημένης διάταξης

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι η ανάλυση γίνεται σε ένα ‘στατικό’ μοντέλο, αλλά η κατασκευή στην πραγματικότητα αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα. Το κινούμενο μέρος σε αυτήν την περίπτωση είναι ο φορέας της κεφαλής απόθεσης υλικού, που με τη βοήθεια των βηματικών κινητήρων και της διάταξης μετάδοσης κίνησης κινείται σε οριζόντιο επίπεδο. Διακρίνονται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχέδιο, οι πέντε κρισιμότερες θέσεις της κεφαλής απόθεσης υλικού. Κάθε μια από αυτές επηρεάζει ανάλογα την απόκριση του συστήματος και για αυτό το λόγο μελετάται ξεχωριστά. Επομένως, μελετώνται πέντε διαφορετικά στατικά συστήματα. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται υπόψη περισσότερες ιδιοσυχνότητες που μπορούν να εμφανιστούν στο σύστημα ανάλογα με τη διαφορετική κατανομή μάζας στο φυσικό μοντέλο.



Εικόνα 69. Θέσης μελέτης κεφαλής εκτύπωσης

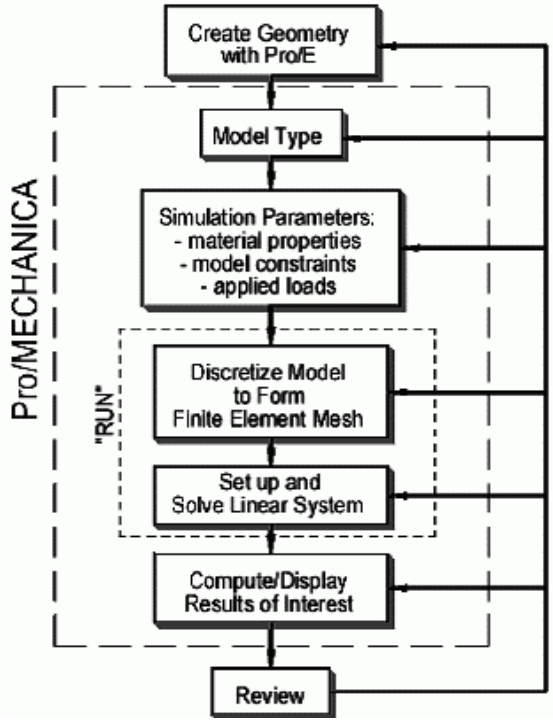
Πίνακας 6. Ονοματολογία σημείων κεφαλής εκτύπωσης

Θέση	**Περιγραφή**
P.1	Ακραία γωνιακή θέση
P.2	Μεσαία θέση
P.3	Κεντρική θέση
P.4	Γωνιακή θέση
P.5	Ακραία θέση

4.4.3 Διαδικασία ανάλυσης

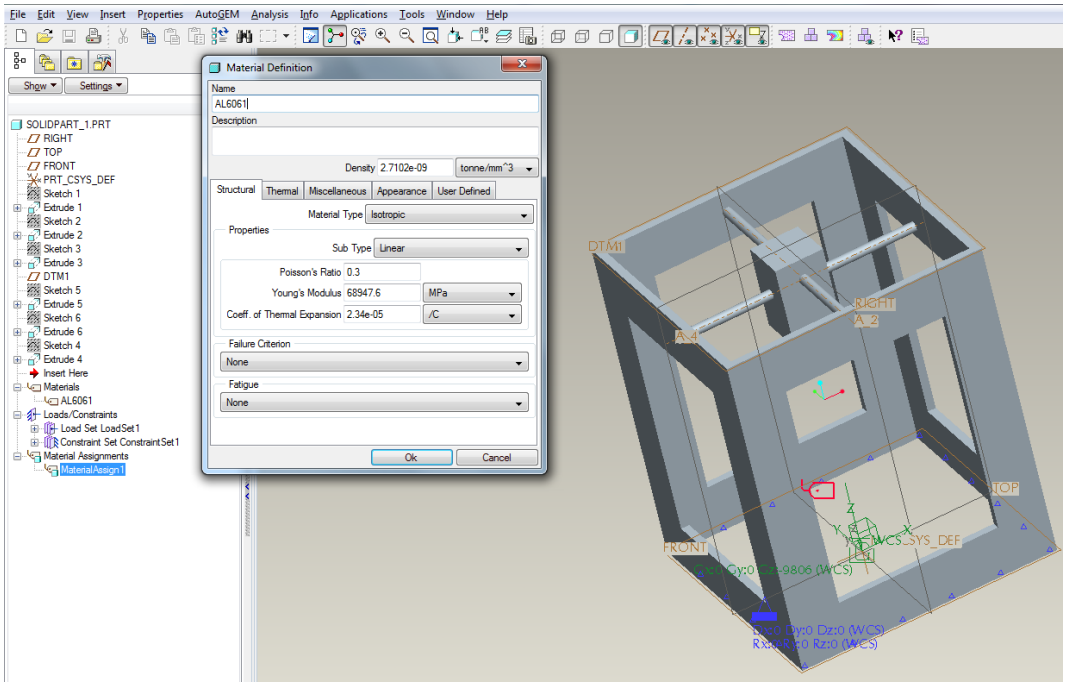
Η διαδικασία ανάλυσης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Ορισμός τύπου μοντέλου.
2. Ορισμός υλικών, ιδιοτήτων, περιορισμών και φορτίων.
3. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας για τη δημιουργία κατανομής μάζας.
4. Επίλυση των εξισώσεων του συστήματος.
5. Υπολογισμός των ζητούμενων στοιχείων.
6. Προβολή και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.



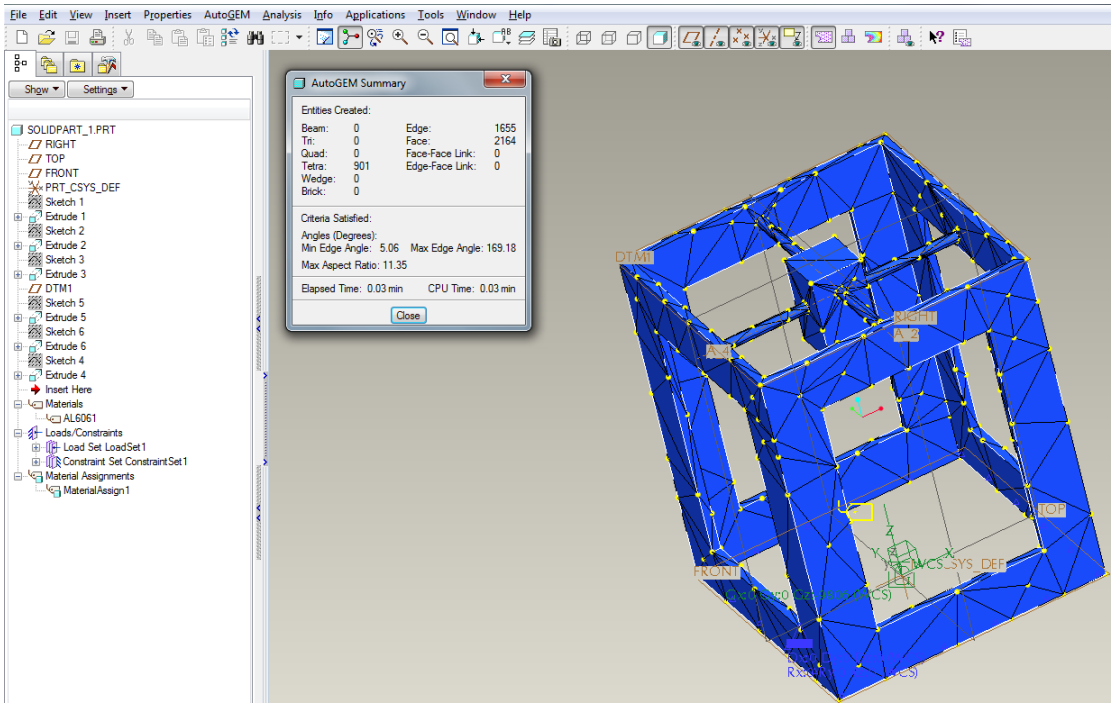
Εικόνα 70. Διαδικασία υπολογισμού που ακολουθεί το λογισμικό

Έχοντας σχεδιάσει το απλοποιημένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς στο ProEngineer, γίνεται μετάβαση στην εφαρμογή ProMechanica. Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα, ορίζεται το υλικό της κατασκευής (αλουμίνιο 6061). Ορίζεται η διεύθυνση και το μέγεθος της επιτάχυνσης της βαρύτητας (g), καθώς και ένας περιορισμός σταθερής επιφάνειας η οποία είναι ουσιαστικά το κάτω μέρος της βάσης.



Εικόνα 71. Ρυθμίσεις παραμέτρων 1

Στη συνέχεια διακριτοποιείταιη δομή σε πεπερασμένα στοιχεία. Στο συγκεκριμένο μοντέλο δημιουργήθηκαν 901 στοιχεία, 1655 γωνίες και 2164 επιφάνειες (πρόσωπα).



Εικόνα 72. Ρυθμίσεις παραμέτρων 2

Για εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων επιλέγουμε από το μενού των μελετών την επιλογή new modal analysis.Στο νέο παράθυρο που εμφανίζεται ορίζεται από το χρήστη το όνομα της μελέτης και μια σύντομη περιγραφή. Επιπλέον επιλέγεται αν και ποιο σύνολο περιορισμών θα συμπεριληφθεί στη μελέτη. Αυτή η επιλογή δίνει τη δυνατότητα να επιλεγεί διερεύνηση του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες (περιορισμοί) ή υπό το συνδυασμό κάποιων από αυτούς. Επιπλέον, οι καρτέλες στο παράθυρο Modal Analysis Definition παρέχουν τη δυνατότητα παραμετροποίησης της μελέτης.

Από την καρτέλα Modes, επιλέγεται το εύρος συχνοτήτων στο οποίο θα αναζητηθούν ιδιοσχνότητες. Στην παρούσα περίπτωσή ορίστηκε από 100Hzέως 3000Hz για την κάλυψη όλων των πιθανών περιπτώσεων.

Από την καρτέλα Output επιλέγονται οι υπολογισμοί που θα πραγματοποιήσει το πρόγραμμα. Στην παρούσα περίσταση μελετώνται οι περιστροφές (Rotations) και οι αντιδράσεις (reactions). Μια επιπλέον επιλογή είναι το Plotting Grid. Στην ανάλυση που γίνεται είναι δυνατή η επέμβαση στη βελτίωση του πλέγματος στο οποίο το λογισμικό προβάλει τις μετατοπίσεις και τις τάσεις. Η τιμή που ορίζεται καθορίζει τον αριθμό των διαστημάτων σε κάθε άκρο του κάθε στοιχείου που χρησιμοποιεί το λογισμικό για να δημιουργήσει τα πλέγματα. Από μια δεδομένη κλίμακα τάξεως 2 έως 10 και για λόγους υπολογιστικού φόρτου επιλέχθηκε ποιότητα προβολής 4.

Η επόμενη καρτέλα είναι πολύ σημαντική και αφορά την μέθοδο σύγκλισης. Για την διασφάλιση της ακρίβειας του αποτελέσματος που εξάγει το λογισμικό θα πρέπει κάνοντας χρήση διαφορετικών μεθόδων να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα ή τουλάχιστο τα αποτελέσματα να συγκλίνουν κατά ένα ποσοστό. Η λύση από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ελέγχεται έναντι μιας λύσης αυξημένης ακριβείας. Εάν η πιο ακριβής λύση είναι δραματικά διαφορετική από την αρχική, τότε η λύση δεν συγκλίνει. Ωστόσο, εάν η λύση δεν αλλάζει πολύ (διαφορά λιγότερο από μερικές ποσοστιαίες μονάδες), τότε η λύση θεωρείται ότι συγκλίνει. Οι δύο μέθοδοι είναι η P-method και η H-method.

4.4.3.1 Σύγκλιση με H-method

Απλές συναρτήσεις παρεμβολής και πολλά μικρά στοιχεία χρησιμοποιούνται στην H-method. Προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια της λύσης, πρέπει να προστεθούν περισσότερα στοιχεία. Αυτό σημαίνει τη δημιουργία ενός λεπτομερέστερου πλέγματος. Σε πρώτο βήμα, ένα δομικό πλέγμα χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει το πρόβλημα βάσει του οποίου προκύπτει μια λύση. Για τον έλεγχο της λύσης, δημιουργείται ένα λεπτότερο πλέγμα. Σε περίπτωση που απαιτείται ακριβέστερη λύση το δομικό πλέγμα αλλάζει. Το πρόβλημα τρέχει και πάλι για να προκύψει μια δεύτερη λύση. Αν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο λύσεων, τότε το πλέγμα πρέπει να γίνει ακόμα πιο λεπτομερές και, στη συνέχεια, υπολογίζεται εκ νέου η λύση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το αποτέλεσμα δεν αλλάζει πολύ από πείραμα σε πείραμα. Όταν χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με H-method (όπως ANSYS), ο χρήστης πρέπει να εκτελέσει δύο ή περισσότερες φορές τη διαδικασία για να εξασφαλίσει ότι το αποτέλεσμα έχει συγκλίνει. Η πυκνότητα του πλέγματος χρειάζεται να αυξηθεί μόνο στις περιοχές εκείνες όπου εμφανίζονται μεγάλα μεγέθη ή τα μεγέθη αλλάζουν γρήγορα σε μια μικρή απόσταση. Στα τμήματα της δομής, όπου δεν εμφανίζονται υψηλές τάσεις απαιτούνται λιγότερα στοιχεία για την ανάλυση.

4.4.3.2 Σύγκλιση με P-method

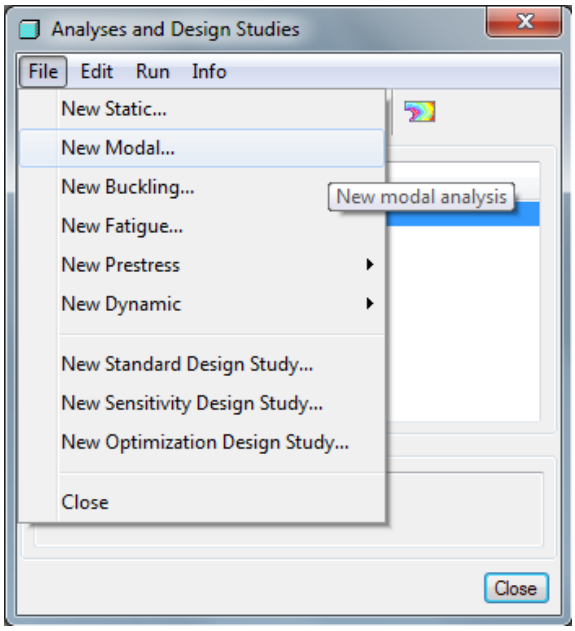
Στην μέθοδο P χρησιμοποιούνται μεγάλα σε έκταση στοιχεία και πολύπλοκες συναρτήσεις παρεμβολής. Προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια του αποτελέσματος, υπάρχει η ανάγκη για πολυπλοκότερες συναρτήσεις σχημάτων, χωρίς όμως να αλλάζει το πλέγμα. Αυξάνοντας την τάξη του πολυώνυμου, αυξάνεται η πολυπλοκότητα της συνάρτησης του σχήματος. Αρχικά, επιδιώκεται αποτέλεσμα με τη χρήση μιας πολυωνυμικής συνάρτησης πρώτης τάξης. Για τον έλεγχο της λύσης του προβλήματος θα επαναληφθεί η διαδικασία με μια πιο πολύπλοκη συνάρτηση. Ένα πολυώνυμο δεύτερης τάξης, που θα αποτελεί την συνάρτηση η οποία θα εκφράζει τις γραμμές του πλέγματος θα χρησιμοποιηθεί για το λόγο αυτό. Αν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο

αποτελεσμάτων, τότε η διαδικασία θα επαναληφθεί χρησιμοποιώντας μιας τρίτης τάξης πολυωνυμική συνάρτηση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το αποτέλεσμα δεν αλλάζει πλέον ουσιαστικά σε κάθε επανάληψη. Στα προγράμματα που κάνουν χρήση της P-method (όπως ProMechanica), η διαδικασία του ελέγχου της σύγκλισης μπορεί να αυτοματοποιηθεί εύκολα. Αυτό συμβαίνει επειδή το πλέγμα δεν αλλάζει σε κάθε επανάληψη. Κατά την εκτέλεση κάθε επανάληψης, το πρόγραμμα θα αυξήσει την τάξη του πολυωνύμου μέχρι ένα όριο στο οποίο τα κριτήρια σύγκλισης πληρούται.

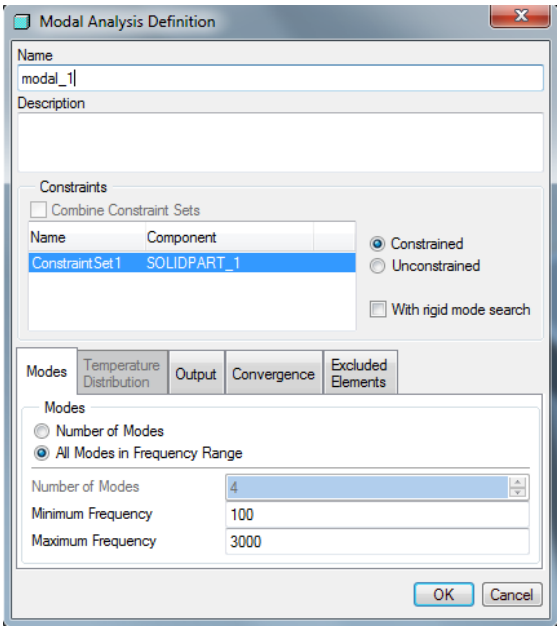
Το λογισμικό σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε δίνει τη δυνατότητα επιλογής τριών μεθόδων σύγκλισης, όπως παρακάτω.

Πίνακας 7. Επιλογές μεθόδου σύγκλισης

Multi-Pass Adaptive	Το λογισμικό εκτελεί τη διαδικασία ξεκινώντας από πολυώνυμα πρώτης τάξης και αυξάνει την τάξη σε κάθε επανάληψη έως ότου τα αποτελέσματα πληρούν τα κριτήρια σύγκλισης.
Single-Pass Adaptive	Το λογισμικό εκτελεί τη διαδικασία ξεκινώντας από πολυώνυμα τρίτης τάξης καθορίζοντας μια εκτίμηση σφάλματος. Βάσει αυτής της εκτίμησης ορίζει μια νέα μεγαλύτερη τάξη πολυωνύμου και επαναλαμβάνει τη διαδικασία μια ακόμα φορά.
Quick Check	Το λογισμικό εκτελεί τη διαδικασία μια φορά χρησιμοποιώντας πολυώνυμα τρίτης τάξης.

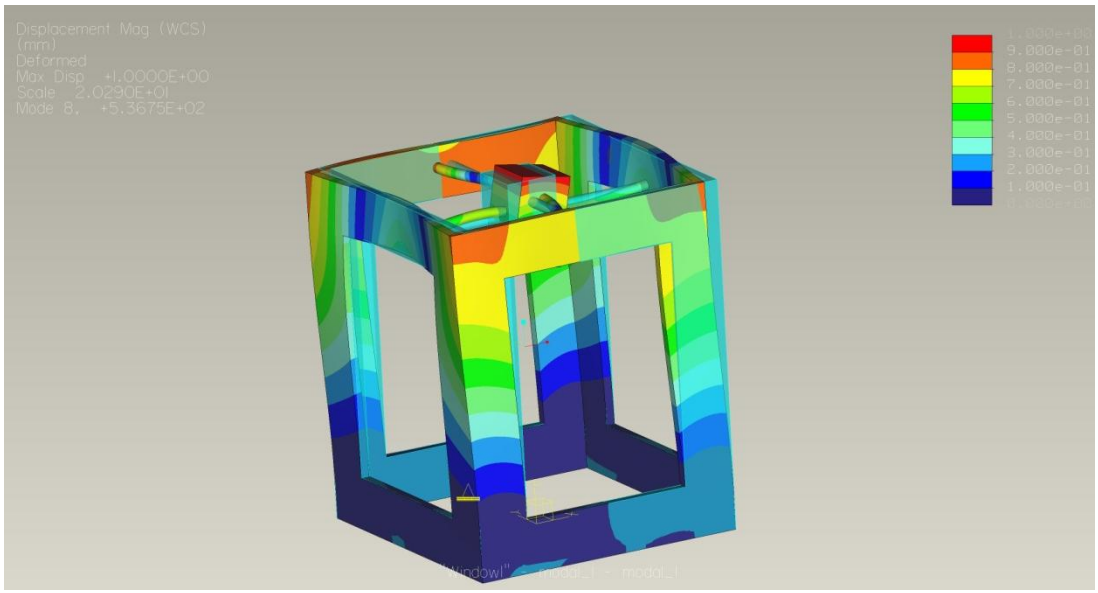


Εικόνα 73. Εξαγωγή αποτελεσμάτων



Εικόνα 74. Επιλογές ανάλυσης

Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε μια από τις πέντε θέσεις της κεφαλής εκτύπωσης. Για κάθε μία από αυτές το πρόγραμμα υπολόγισε περίπου 45 ιδιοσυχνότητες (45 modes) από τα 100Hz έως τα 3000Hz. Σε κάθε μια από αυτές παρουσιάζονται γραφικά οι μετατοπίσεις στις οποίες υπόκειται το σύστημα. Για παράδειγμα όταν η κεφαλή εκτύπωσης βρίσκεται στο κέντρο (θέση 3), οι υπολογισμοί του προγράμματος υποδεικνύουν την ύπαρξη ιδιοσυχνότητας στα 556,23Hz. Οι μετατοπίσεις στις οποίες υπόκειται η δομή παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

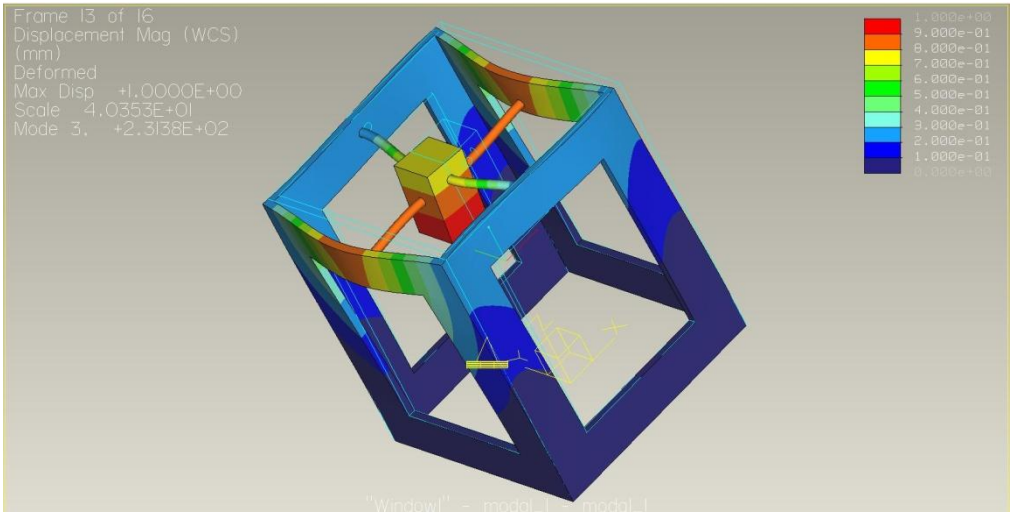


Εικόνα 75. Παραμορφώσεις δοκιμαστικού μοντέλου, 556.23Hz, θέση κεφαλής P.3

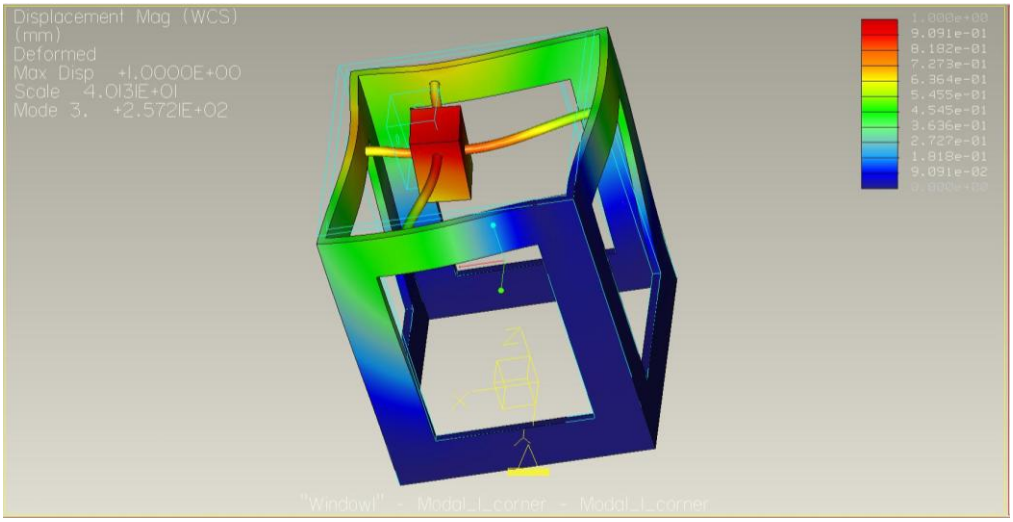
Η χρωματική κλίμακα υποδεικνύει το μέγεθος της παραμόρφωσης ενώ το σταθερό γαλάζιο πλαίσιο την αρχική κατάσταση. Για μια συνολική εικόνα των ιδιοσυχνοτήτων της δομής, μετά από περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε θέση της κεφαλής εκτύπωσης διακρίνονταιοι εξής κρίσιμες περιοχές γύρω από τις παρακάτω συχνότητες: 190Hz, 230Hz, 370Hz, 400Hz, 550Hz, 750Hz, 875Hz, 930Hz, 1000Hz, 1100Hz, 1250Hz, 1350Hz, 1460Hz, 1550Hz, 1660Hz, 1800Hz, 2000Hz, 2150Hz, 2250Hz, 2320Hz, 2500Hz, 2800Hz, 2950Hz.

Από τη μελέτη των ιδιοσυχνότητων προκύπτει η εξής παρατήρηση: Συγκεκριμένα είδη μετατοπίσεων συμβαίνουν σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Αυτό μπορεί να είναι γνωστό γενικά, όμως στην περίπτωσή μας μελετήσαμε την κατασκευή μας σε πέντε διαφορετικές θέσης της κεφαλής εκτύπωσης. Παρά την αλλαγή κατανομής μάζας φαίνεται να μην επηρεάστηκε σημαντικά η περιοχή στην οποία εμφανίζεται μια ιδιοσυχνότητα (mode) και το είδος της μετατόπισης που προκαλεί στην κατασκευή. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από την τρίτη ιδιοσυχνότητα (mode 3) την οποία το λογισμικό υπολόγισε, για κάθε μια από τις πέντε διαφορετικές θέσης της κεφαλής εκτύπωσης. Παρατηρείται πως όλες κυμαίνονται μεταξύ 230 – 260Hz. Επιπλέον το είδος της

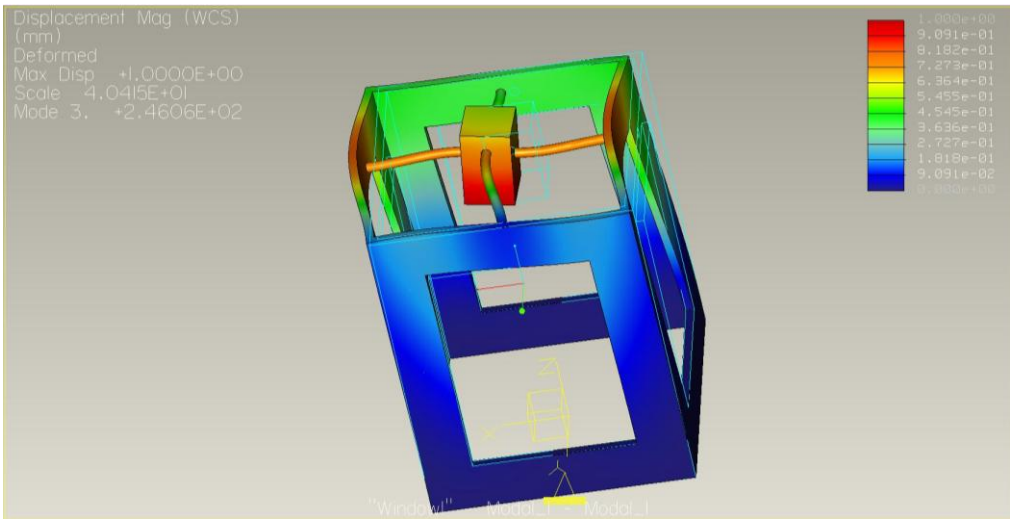
μετατόπισης είναι το ίδιο για όλες τις θέσεις της κεφαλής εκτύπωσης, εκτός από την τελευταία (γωνιακή θέση, P.4) στην οποία η συγκεκριμένη μετατόπιση εμφανίζεται στο mode 2.



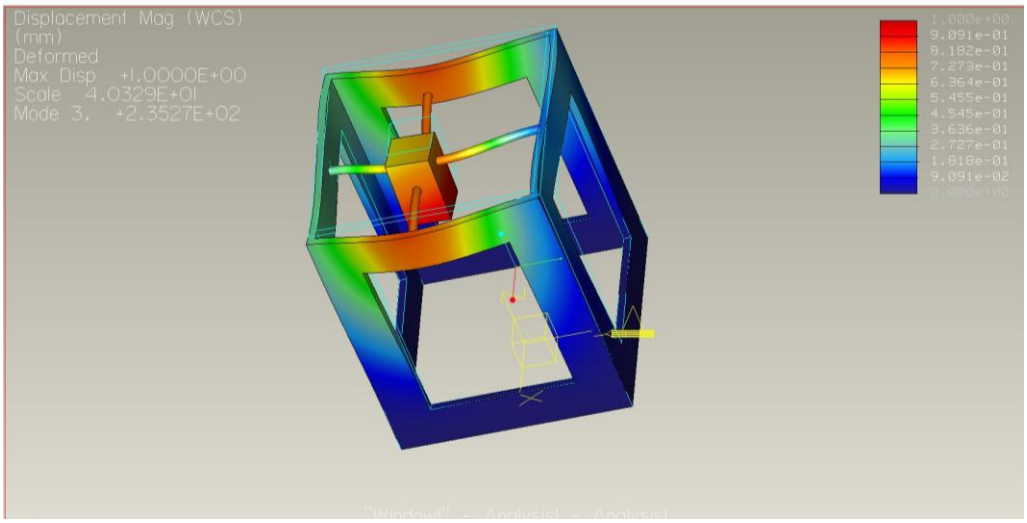
Εικόνα 76. Παραμόρφωση διάταξηςmode 3, θέση κεφαλής P.3



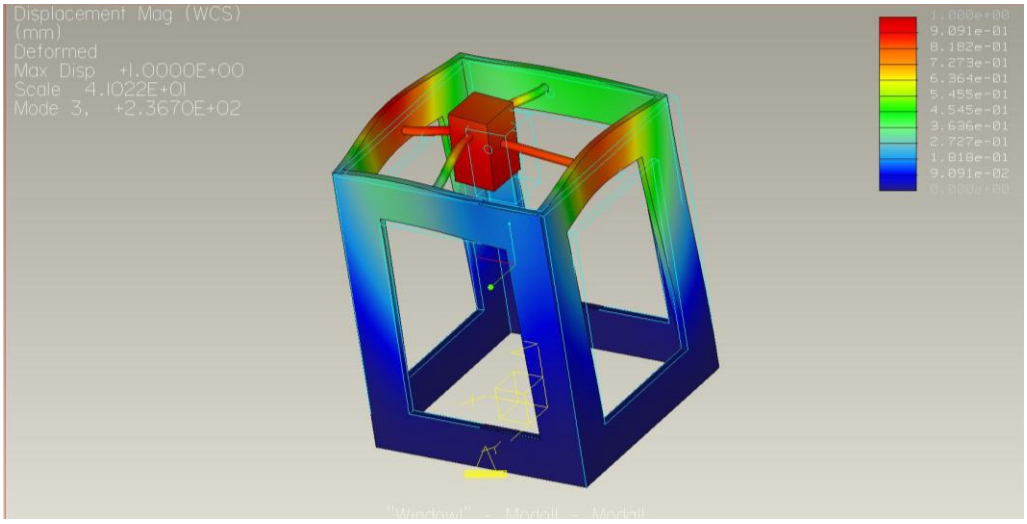
Εικόνα 77. Παραμόρφωση διάταξης mode 3, θέση κεφαλής P.1



Εικόνα 78. Παραμόρφωση διάταξης, mode 3, θέση κεφαλής P.5

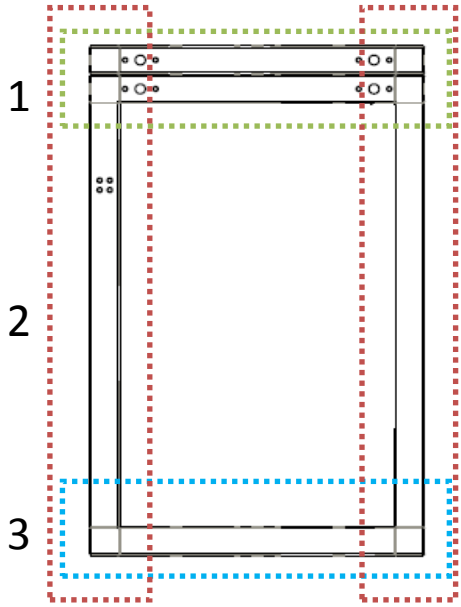


Εικόνα 79. Παραμόρφωση διάταξης, mode 3, θέση κεφαλής P.2



Εικόνα 80.Παραμόρφωση διάταξης, mode 3, θέση κεφαλής P.4

Μια άλλη παρατήρηση που μπορεί να κάνει κανείς αφορά το είδος της μετατόπισης στο οποίο υπόκεινται η κατασκευή ανάλογα με την ιδιοσυχνότητα ή ένα εύρος συχνοτήτων. Από την μελέτη και τα αποτελέσματα των ιδιοσυχνότητων που υπολόγισε το λογισμικό μπορούμε να διακρίνουμε τρεις κύριες περιοχές στο πλαίσιο, στις οποίες εκτονώνεται το αποτέλεσμα τις κάθε ιδιοσυχνότητας. Η κάθε συχνότητα ταλάντωσης στην οποία συντονίζει η κατασκευή μας έχει ως αποτέλεσμα την ελαστική παραμόρφωση του πλαισίου με συγκεκριμένη μορφή και σε συγκεκριμένη περιοχή. Οι δύο τελευταίες μεταβάλλονται με την αλλαγή της συχνότητας, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται παραμορφώσεις σε μια από τις τρεις διαφορετικές περιοχές ενδιαφέροντος που ορίστηκαν ή σε συνδυασμό αυτών.

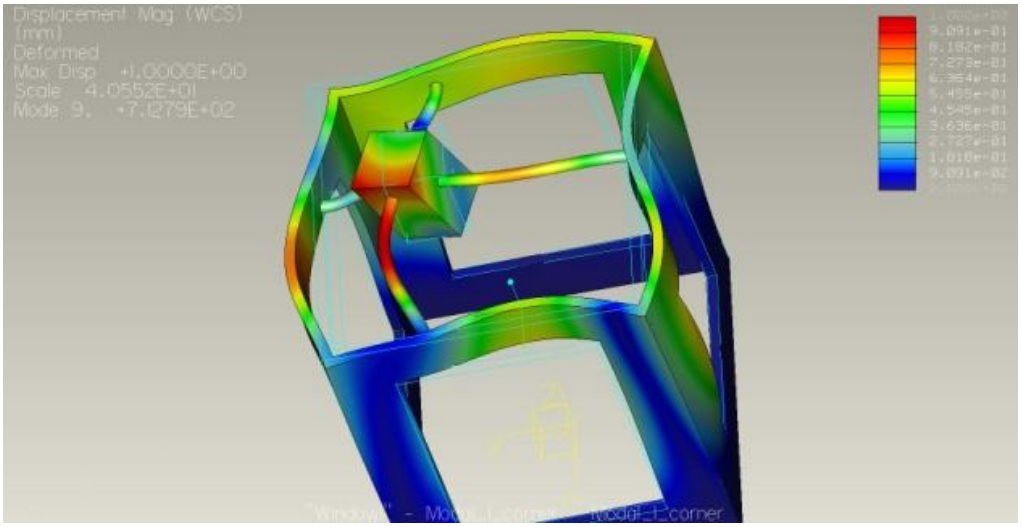


Εικόνα 81. Περιοχές ενδιαφέροντος του πλαισίου

Πίνακας 8. Επεξήγηση θέσεων ενδιαφέροντος του πλαισίου

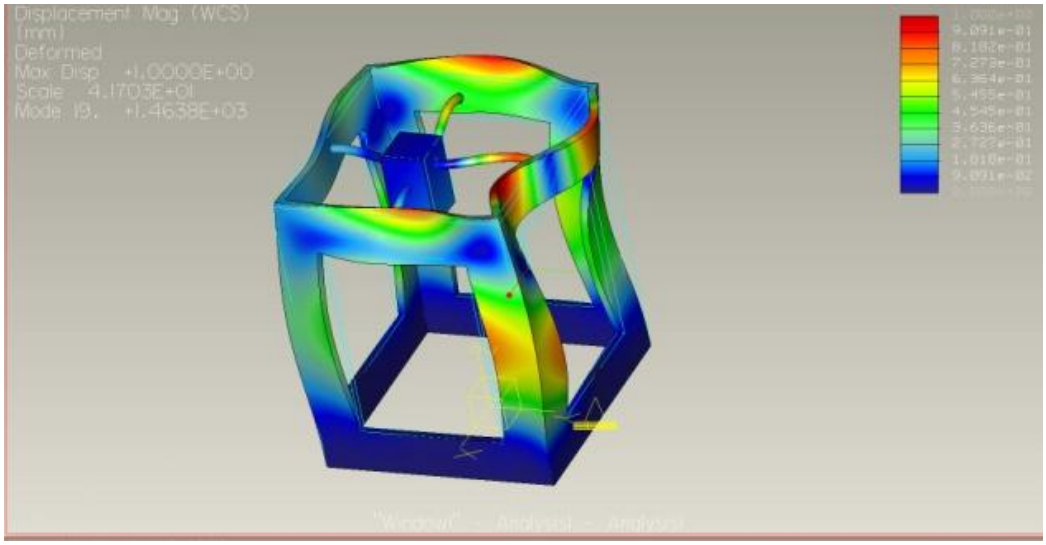
Θέση	Χρωματισμός	Περιοχή
1		Άνω μέρος κατασκευής, πλαίσιο, κεφαλή εκτύπωσης
2		Μεσαίο μέρος κατασκευής, δοκοί στήριξης
3		Κάτω μέρος πλαίσιο

Οι συχνότητες συντονισμού μέχρι τα 800Hz ή τα πρώτα 10 modes περίπου, προκαλούν παραμορφώσεις στη θέση ένα. Αφορούν μετατοπίσεις στις οποίες υπόκεινται τα πάνω τοιχώματα του πλαισίου, και η κεφαλή εκτύπωσης.



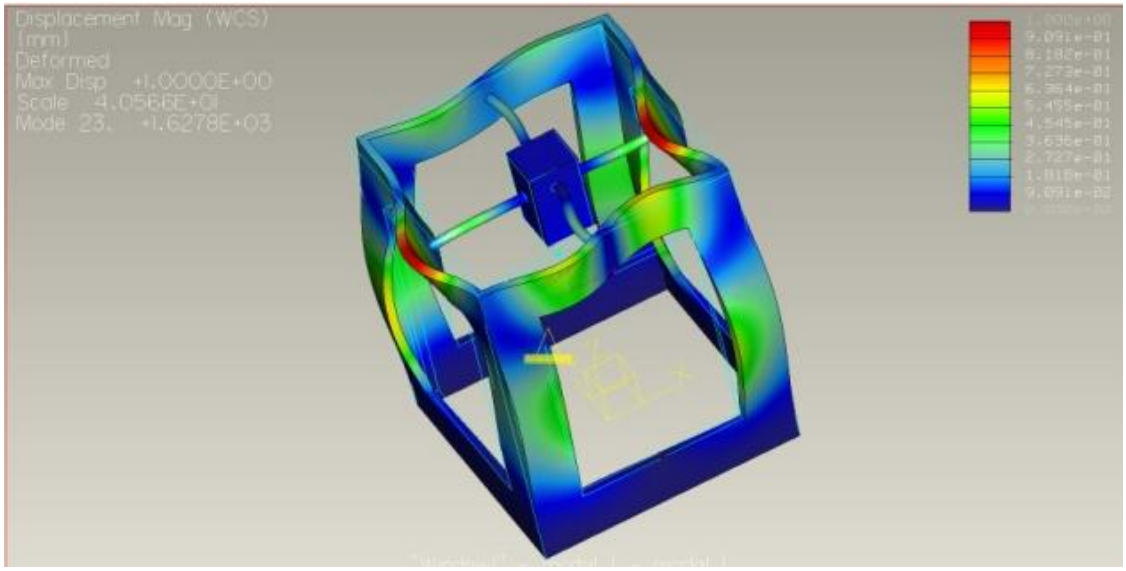
Εικόνα 82. Παραμόρφωση διάταξης, 712.79 Hz, θέση κεφαλής P.1

Στη συνέχεια και μέχρι περίπου τα 1500Hz ή αλλιώς mode 20, οι μετατοπίσεις παρουσιάζονται κυρίως στις τέσσερις κάθετους δοκούς στήριξης. Αξίζει να σημειωθεί η σταδιακή μετατόπιση των παραμορφώσεων από το άνω μέρος της κατασκευής στη μέση αυτής.



Εικόνα 83 Παραμόρφωση διάταξης, 1463.80 Hz, θέση κεφαλής P.5

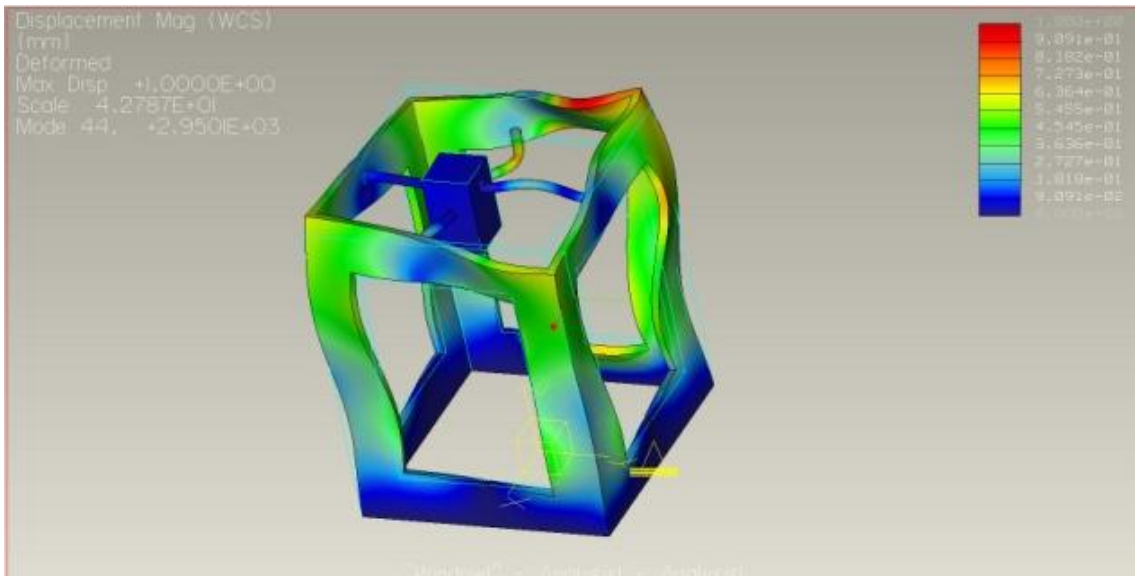
Στη συνέχεια και μέχρι περίπου τα 2500Hz(mode 40) παρουσιάζονται παραμορφώσεις συνδυαστικά στο άνω μέρος της κατασκευής καθώς και στις τέσσερις δοκούς στήριξης.



Εικόνα 84. Παραμόρφωση διάταξης, 1627.79 Hz, θέση κεφαλής P.3

.

Τέλος μετά τα 2500 Hz και μέχρι τα 3000Hz στα οποία έγινε η μελέτη, τα φαινόμενα του συντονισμού έχουν ως αποτέλεσμα παραμορφώσεις από τη μέση της κατασκευής μέχρι το κάτω μέρος αλλά και συνδυαστικά πλέον σε όλον τον όγκο της.



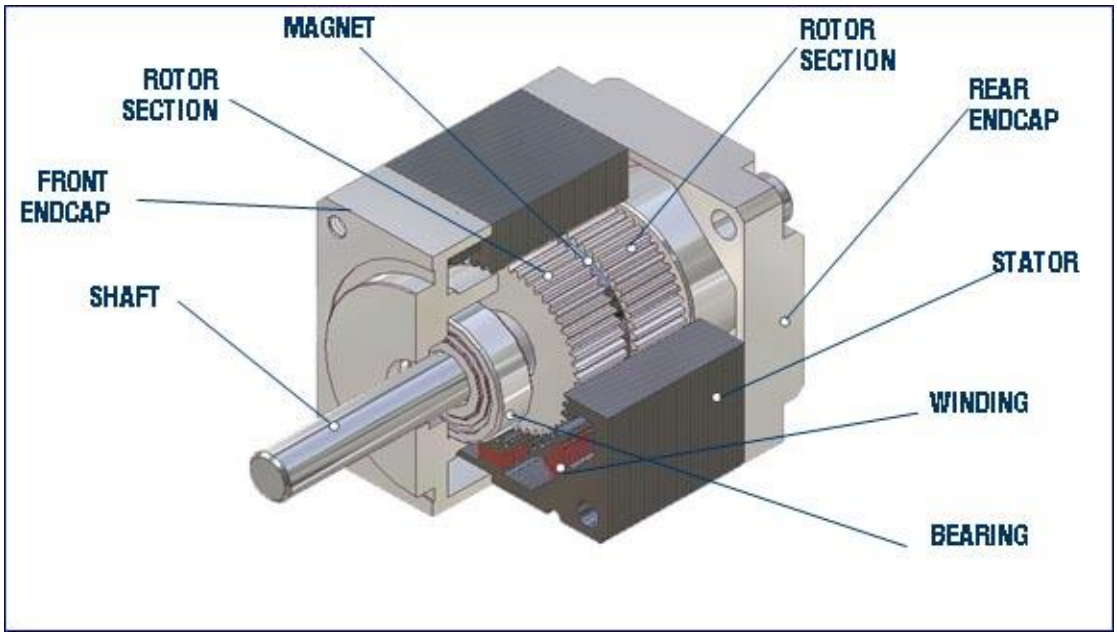
Εικόνα 85. Παραμόρφωση διάταξης, 2950.08 Hz, θέση κεφαλής P.2

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί πως όλες οι ιδιοσυχνότητες και οι παραμορφώσεις που προκαλούνται είναι αποτέλεσμα θεωρητικών υπολογισμών.

Τα αποτελέσματα όλων των ιδιοσυχνοτήτων αναλυτικά καθώς και των παραμορφώσεων που υπόκεινται η κατασκευή παρουσιάζεται αναλυτικά σε παρακάτω παράρτημα.

4.4 Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος.

Οι συνεχόμενες παλινδρομικές μετατοπίσεις στις οποίες υπόκειται το σύστημα είναι αποτέλεσμα των περιστροφικών κινήσεων ορισμένων μηχανικών στοιχειών. Τα κινούμενα μέρη του συστήματος μας αποτελούν οι άξονες, οι τροχαλίες, τα κοπλερ, οι ιμάντες, τα ρουλεμάν το τραπέζι εκτύπωσης και η κεφαλή απόθεσης υλικού. Η κινητήρια δύναμη για την περιστροφή όλων των παραπάνω στοιχείων είναι οι βηματικοί κινητήρες που έχουν τοποθετηθεί στη συγκεκριμένη κατασκευή. Για αυτό το λόγο θα επικεντρωθούμε κυρίως στις δονήσεις που προκαλούνται και στη συχνότητα λειτουργίας τους.



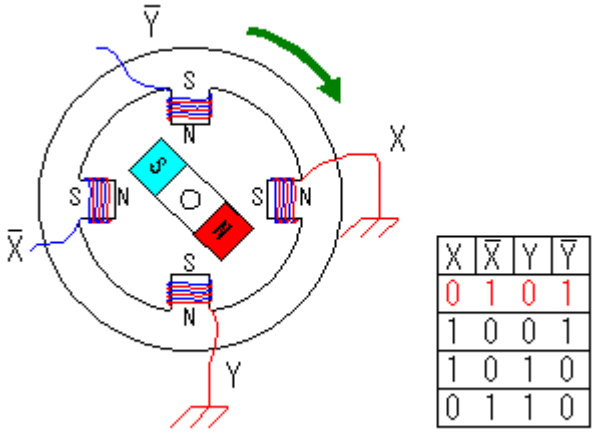
Εικόνα 86. Σχέδιο βηματικού κινητήρα

4.4.1 Αρχή λειτουργίας βηματικού κινητήρα.

Ειδικότερα ως βηματικός κινητήρας ορίζεται μια ηλεκτρομηχανική συσκευή η οποία μετατρέπει τους ηλεκτρικούς παλμούς σε ιδιαίτερες μηχανικές κινήσεις, δηλαδή σε πολλαπλά μηχανικά βήματα. Στους βηματικούς κινητήρες τύπου PM ορότορας είναι μόνιμο; μαγνήτης, και στο σώμα του κινητήρα-στάτορα-υπάρχουν πηνία.

Στους τετραπολικούς κινητήρες, κάθε δύο απέναντι πηνία λειτουργούν σαν ζευγάρια. Δηλαδή το πηνίο X και το πηνίο $\overline{X}$ όπως και το Y με το $\overline{Y}$ λειτουργούν ταυτόχρονα με ανάποδη όμως μαγνητική ροή. Για παράδειγμα τα πηνία Y και $\overline{Y}$ βρίσκονται στον κάτω και επάνω πόλο, και είναι τοποθετημένα έτσι ώστε όταν περάσει ρεύμα από μέσα τους να παράγουν αντίθετη μαγνητική ροή. Το ίδιο ισχύει και για τα άλλα δύο πηνία X και $\overline{X}$. Η περιστροφή του κινητήρα, γίνεται με την ροή ρεύματος μέσα από τα πηνία X, $\overline{X}$, Y και $\overline{Y}$. Η ταχύτητα περιστροφής όπως και η φορά, ελέγχονται με συνδυασμό παλμικών ρευμάτων που ρέουν μέσα από τα δύο αυτά ζευγάρια πηνίων. Ο

ρότορας μένει σταθερός ανάμεσα σε δύο πόλους του στάτορα. Όταν ένα ζευγάρι πηνίων του στάτορα πάρει ρεύμα τότε δημιουργείται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που επιδρά με τον μόνιμο μαγνήτη του ρότορα, και παράγεται κίνηση του ρότορα κατά ένα βήμα. Ένα χαρακτηριστικό των βηματικών κινητήρων είναι πως τα βήματα της κίνησης τους μπορούν να ελεγχθούν με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης η ροπή είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα σταματήματος της περιστροφής σε οποιοδήποτε βήμα (γωνία).



Εικόνα 87. Λειτουργία βηματικού κινητήρα

Κάθε βήμα του κινητήρα κατά την περιστροφή του μπορεί να προσομοιωθεί και με έναν κρουστικό παλμό. Κατά την λειτουργία του λοιπόν, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συχνότητα στην οποία παράγονται οι κρουστικοί αυτοί παλμοί. Σκοπός είναι οι συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, που κυρίως είναι η συχνότητα από τους βηματικούς κινητήρες, να μην συμπίπτει με κάποια ιδιοσυχνότητα της κατασκευής ώστε να αποφεύγεται τυχόν συντονισμός.

Για τον τρισδιάστατο εκτυπωτή χρησιμοποιήθηκαν βηματικοί κινητήρες NEMA 17 (μοντέλο είναι το 42BYGHM809). Τα κατασκευαστικά στοιχεία είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 9. Τεχνικά χαρακτηριστικά βηματικού κινητήρα

Step Angle (°)	Motor Length L(mm)	Rate Voltage (V)	Rate Current (A)	Phase Resistance (Ω)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (g.cm)	Lead Wires (NO)	Rotor Inertia (g. cm^2)	Detent Torque (g.cm)	Motor Weight (kg)
0.9	48	2.8	1.7	1.65	4	4200	4	68	220	0.34

4.4.2 Υπολογισμός συχνότητας λειτουργίας του βηματικού κινητήρα

Από τις τεχνικές λεπτομέρειες του κινητήρα προκύπτουν τα εξής στοιχεία:

Πίνακας 10. Στοιχεία υπολογισμών συχνότητας λειτουργίας συστήματος

Γωνία βήματος (°)	0.9
Συνολικά βήματα μιας περιστροφής	400
Διάμετρος τροχαλίας (mm)	15
Περίμετρος τροχαλίας (mm)	47,1
Ζητούμενη γραμμική ταχύτητα λειτουργίας (mm/s)	80
Περιστροφές κινητήρα κατά τη ταχύτητα λειτουργίας (rev/s)	1,7
Βήματα του κινητήρα για την ταχύτητα λειτουργίας (step/s)	679,4
Συχνότητα που διεγείρεται στις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας (Hz)	679,4

Η ζητούμενη γραμμική ταχύτητα είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται η κεφαλή απόθεσης υλικού (80mm/s). Ο φορέας όπου εδράζεται η κεφαλή εκτύπωσης μετακινείται πάνω σε δύο άξονες οι οποίοι με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος περιστρεφόμενων αξόνων και ιμάντων χρονισμού εκτελούν κινήσεις στο οριζόντιο επίπεδο. Οι συγκεκριμένοι ιμάντες χρονισμού συνεργάζονται με τροχαλίες χρονισμού οι οποίες περιστρέφονται σύμφωνα με την ταχύτητα περιστροφής των βηματικών κινητήρων με σχέση μετάδοσης 1:1. Η γραμμική ταχύτητα της κεφαλής εκτύπωσης επηρεάζεται από τη διάμετρο της τροχαλίας και την περιστροφική ταχύτητα του κινητήρα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, απαιτούνται από τον κινητήρα 679,4 steps/s. Αυτή η τιμή αποτελεί και τη συχνότητα που διεγείρει ο βηματικός κινητήρας από τους παλμούς που προκαλούνται (679,4 Hz).

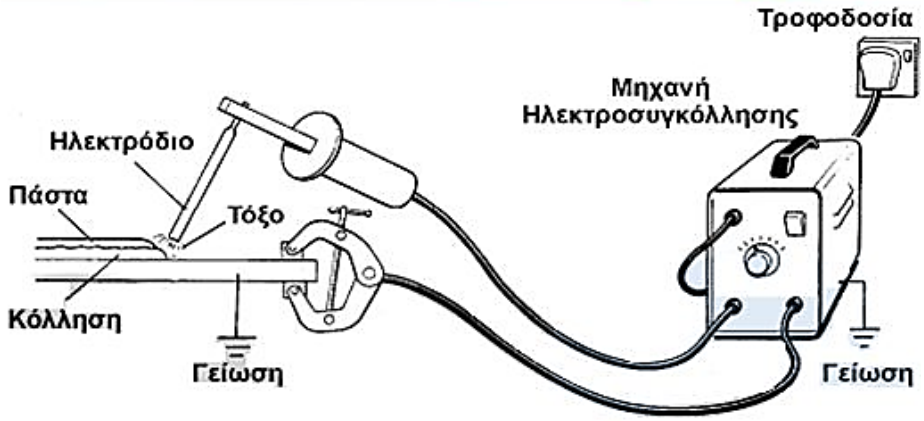
Στην περίπτωση που συμπίπτει η συχνότητα διέγερσης με κάποια από τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος, υπάρχουν δύο επιλογές. Αρχικά μπορούμε να αλλάξουμε την ταχύτητα γραμμικής κίνησης της κεφαλής εκτύπωσης και κατ’ επέκταση τις στροφές του κινητήρα ή τη διάμετρο της τροχαλίας. Αυτό θα επηρεάσει τη συχνότητα που διεγείρει η λειτουργία του κινητήρα. Σαν δεύτερη επιλογή μπορούμε να επέμβουμε στην ίδια την κατασκευή, αλλάζοντας ουσιαστικά τη μάζα της με την πρόσθεση/αφαίρεση βάρους ή/και τη δυσκαμψία της, με την προσθήκη κάποιων νεύρων, ώστε να αλλάξουν οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος. Βέβαια, σε αυτή την περίπτωση επιβάλλεται η επανεξέταση της δομής για την εύρεση των νέων ιδιοσυχνοτήτων.

5

5.1 Βασικές κατεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν

5.1.1 Συγκολλήσεις

Οι συγκολλήσεις ανήκουν στην κατηγορία των μόνιμων συνδέσεων ανάμεσα σε τεμάχια. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της θερμότητας, είναι σύνδεση κρυσταλλική και έχει στόχο το τελικό τεμάχιο να έχει την ίδια αντοχή με τα αρχικά κομμάτια. Στην συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήθηκε, αναπτύσσεται μεγάλη θερμοκρασία στη θέση κόλλησης, γύρω στους 4000 °C. Στη θερμοκρασία αυτή το μέταλλο που συγκολλάτε λιώνει, ενώ από πάνω του δημιουργείται ένα στρώμα αερίων, που προέρχονται από την επένδυση του ηλεκτροδίου. Ταυτόχρονα με τη δημιουργία των αερίων, δημιουργείται πάνω από τη ραφή μία πάστα, επίσης από την επένδυση του ηλεκτροδίου. Η πάστα αυτή βοηθά στην τήξη του μετάλλου και εμποδίζει τη γρήγορη απόψυξη, που θα είχε συνέπεια να βαφεί η ραφή. Η ραφή συγκόλλησης προκύπτει από το λιωμένο μέταλλο που συγκολλάτε και από λιωμένο μέταλλο του πυρήνα του ηλεκτρόδιου. Ο συγκολλητής, για να ξεκινήσει τη διαδικασία συγκόλλησης, χτυπά ή τρίβει το ηλεκτρόδιο πάνω στο προς συγκόλληση τεμάχιο και στη συνέχεια το σηκώνει, διατηρώντας από κει και πέρα μία σταθερή απόσταση.



Εικόνα 88. Συγκόλληση τόξου

Οι μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ή συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα και χαρακτηρίζονται από την ένταση του ρεύματος, που μπορούν να δώσουν, και την τάση του ρεύματος για το ξεκίνημα του τόξου (τάση εν κενώ).

Τα συνήθη ηλεκτρόδια έχουν επένδυση που είναι κράμα διαφόρων οργανικών και ορυκτών συστατικών, ενώ ο πυρήνας τους είναι συχνά από μαλακό χάλυβα. Τα ηλεκτρόδια κυκλοφορούν σε πολλά μεγέθη με διαφορετικό μήκος και διάμετρο, όπως και με διαφορετικό πάχος επένδυσης, είναι δε τυποποιημένα σύμφωνα με Ευρωπαϊκά και άλλα διεθνή πρότυπα. Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην πάστα των ηλεκτροδίων είναι τέσσερα: κυτταρίνη, ρουτίλιο, βασική επένδυση και οξείδιο του σιδήρου.

Στα ηλεκτρόδια κυτταρίνης, ρουτιλίου και στα βασικά, προστίθεται ένας σταθεροποιητής τόξου ο οποίος βελτιώνει τις ιδιότητές τους. Υπάρχουν δύο είδη σταθεροποιητών: νατρίου και καλλίου. Το ηλεκτρόδιο ρουτιλίου με σταθεροποιητή το κάλιο (τύπος 13), είναι πολύ εύκολο στη χρήση.

5.1.2 Κοπές

Παρακάτω ορίζονται ορισμένες βασικές έννοιες που αφορούν στην κατεργασία με τόρνο, φρέζα ή δράπανο.

Εκχόνδριση: Η εκχόνδριση αποτελεί μια φάση κοπής ενός τεμαχίου. Αποτελεί το στάδιο κατά το οποίο αφαιρείται ο πρώτος (και μεγάλος) όγκος του υλικού σε όσο το δυνατό λιγότερο χρόνο. Στο τέλος της εκχόνδρισης απομένει ένα στρώμα υλικού αρκετά μικρού πάχους, το οποίο θα αφαιρεθεί κατά την επόμενη φάση, έτσι ώστε να προκύψει η τελική επιφάνεια. Εφόσον οι επιφάνειες που προκύπτουν από την εκχόνδριση δεν είναι οι τελικές (εκτός αν ένα τεμάχιο έχει μικρές απαιτήσεις ποιότητας, οπότε τότε μπορεί να ολοκληρωθεί η κοπή μόνο με τη φάση αυτή), δεν ενδιαφέρει ιδιαίτερα η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, όσο η ελαχιστοποίηση του χρόνου κοπής και το κατάλληλο πάχος παραμένοντος υλικού.

Φινίρισμα: Το φινίρισμα ακολουθεί τη φάση της εκχόνδρισης και αποπερατώνει την κοπή, έτσι ώστε στο τέλος να προκύπτουν οι τελικές-ζητούμενες επιφάνειες του τεμαχίου. Ανάλογα με τις απαιτήσεις ποιότητας του τεμαχίου, το φινίρισμα εστιάζεται κυρίως στην ποιότητα επιφάνειας, με το χρόνο να παραμένει σε δεύτερη μοίρα (σε λογικά πλαίσια πάντα). Γι' αυτό και συνήθως ο χρόνος φινιρίσματος είναι αρκετά μεγαλύτερος του χρόνου εκχόνδρισης. Τόσο το φινίρισμα, όσο και η εκχόνδριση μπορούν να πραγματοποιούνται σε περισσότερες φάσεις, ανάλογα με τη γεωμετρία του τεμαχίου και τα απαιτούμενα εργαλεία.

Rest Material (παραμένον υλικό): Ο όρος Rest Material αναφέρεται στον όγκο του υλικού επιπλέον του τελικού – ζητούμενου όγκου υλικού του τεμαχίου. Πρόκειται δηλαδή για όγκο υλικού που υπάρχει πάνω από τις επιφάνειες του ζητούμενου τεμαχίου μετά το τέλος μιας φάσης ή ολόκληρης της κοπής. Κατά την εκχόνδριση είναι απόλυτα φυσιολογικό να υπάρχει παραμένον υλικό, εφόσον αυτό θα αφαιρεθεί κατά τη διάρκεια του φινιρίσματος. Ιδανικά, μετά το φινίρισμα δεν θα έπρεπε να υπάρχει καθόλου rest material, παρόλ' αυτά κάτι τέτοιο δεν ισχύει, έστω και αν μιλάμε για ελάχιστο όγκο υλικού. Το παραμένον υλικό στο τέλος της κοπής αποτελεί και ένα κριτήριο ποιότητας της κοπής και καθορίζει σε κάποιο βαθμό την επιτυχία της διαδικασίας, αν τηρούνται δηλαδή οι ζητούμενες διαστασιακές ανοχές ή όχι.

Υποκοπές - Gouges: είναι αντίστοιχα του rest material, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση ο όγκος αναφέρεται σε όγκο που έχει αφαιρεθεί επιπλέον από τον ζητούμενο,

δηλαδή «σκαψίματα» που έχουν προκύψει στην τελική επιφάνεια από το κοπτικό εργαλείο. Και εδώ ισχύουν τα ίδια ως προς το κριτήρια ποιότητας του τεμαχίου, με πρόσθετο παράγοντα πιθανή μείωση μηχανικής του τεμαχίου, σε περίπτωση που τα σκαψίματα δημιουργούν κρίσιμες διατομές.

Τροχιά κοπτικού εργαλείου: Πρόκειται για τη διαδρομή που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο κατά τη διάρκεια της κοπής, τις καμπύλες κίνησης δηλαδή, όπως αυτές αποτυπώνονται στο χώρο.

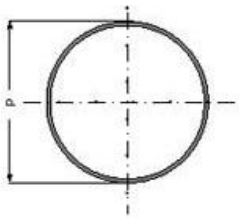
Πάσα κοπής: Τα πάσα κοπής είναι τα παράλληλα επίπεδα στα οποία κόβει το εργαλείο μέχρι να φτάσει το τελικό βάθος κοπής. Με δεδομένο δηλαδή το βάθος κοπής, είναι πολύ πιθανό να απαιτούνται περισσότερες επαναλήψεις των ίδιων τροχιών σε διαφορετικά επίπεδα μέχρι να κοπεί όλο το πάχος του υλικού που επιθυμούμε.

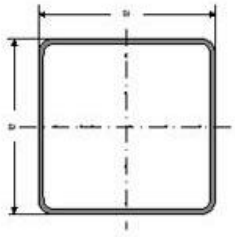
Ρυθμός αφαίρεσης υλικού (Q): Είναι ο ρυθμός με τον οποίο αφαιρείται υλικό από το τεμάχιο και μετριέται σε cm3 /min.

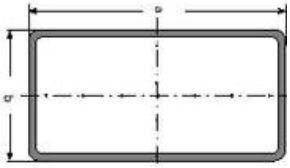
Ισχύς εργαλειομηχανής (Pc): Πρόκειται για την ισχύ της εργαλειομηχανής και εξαρτάται από το ρυθμό αφαίρεσης υλικού και από το είδος του υλικού και τον τύπο του εργαλείου. Προφανώς κάθε εργαλειομηχανή έχει μια μέγιστη ισχύ την οποία δεν μπορεί να υπερβεί. Μετριέται σε kW.

5.2 Η κατασκευή του πλαισίου

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν δοκοί χάλυβα τετραγωνικής διατομής 30mm X 30mm, αλλά και διατομής 30mm X 60mm για το πάνω μέρος του πλαισίου στο οποίο θα προσαρμοστεί το σύστημα κίνησης.







Εικόνα 89. Κατασκευή πλαισίου

Το αποτέλεσμα είναι η κατασκευή ενός στιβαρού και σταθερού πλαισίου, το οποίο θα μπορούμε να κατεργαστούμε για η δημιουργία οπών ώστε να προσαρμόσουμε με ασφάλεια όλα τα επιμέρους κομμάτια.

5.3 Κατασκευή συστήματος κατακόρυφης κίνησης

Το σύστημα κατακόρυφης κίνησης περιλαμβάνει τα εξής υλικά:

- Τρεις απλούς άξονες κίνησης
- Έναν κεντρικό άξονα με εξωτερικό σπείρωμα
- Έναν βηματικό κινητήρα
- Κόπλερ
- Ρουλεμάν και κουζινέτα
- Πλάκα εκτύπωσης

Η διαδικασία κατασκευής τους περιλάμβανε αρχικά την κοπή των αξόνων κυκλικής διατομής στο κατάλληλο μήκος χρησιμοποιώντας την μηχανή κοπής με τροχό. Επιπλέον ο κεντρικός άξονας με το σπείρωμα υπέστη περαιτέρω επεξεργασία στον τόρνο αφενός

για να πληροί τις γεωμετρικές προδιαγραφές και αφετέρου για να αφαιρεθεί το σπείρωμα του στα άκρα με σκοπό την σύνδεση του στον βηματικό κινητήρα μέσω του κόπλερ.

Η κατασκευή της πλάκας εκτύπωσης περιλάμβανε την συναρμολόγηση δύο επίπεδων επιφανειών από αλουμίνιο, διαφορετικής διατομής για λόγους στιβαρότητας και βάρους. Μετά από την κοπή τους στις κατάλληλες διαστάσεις, η πλάκα ωφέλιμης εκτύπωσης προσαρμόστηκε πάνω στην πλάκα κατακόρυφης κίνησης χρησιμοποιώντας διαμήκης κοχλίες σε συνδυασμό με ελατήρια και περικόχλια. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η εύκολη ρύθμιση της παράλληλης και γωνιακής της απόκλισης από την πλάκα κατακόρυφης κίνησης (επιπεδότητα).

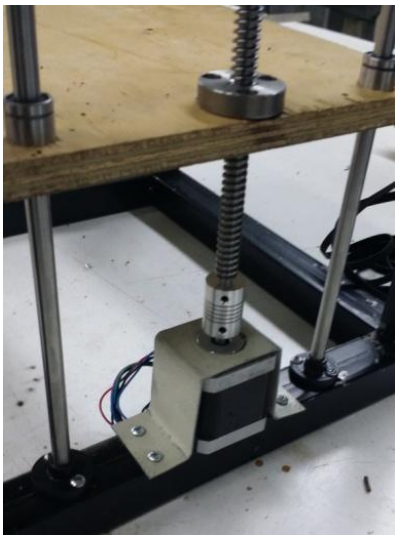
Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν στον τόρνο οι φωλιές που θα εδράζουν αυτούς τους άξονες πάνω στο πλαίσιο. Είναι σε μορφή φλάντζας με εσοχή στις διαστάσεις του άξονα. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν και οι φωλιές των γραμμικών ρουλεμάν της πλάκας εκτύπωσης, ώστε να πραγματοποιείται η ορθή συναρμογή τους με την πλάκα εκτύπωσης.

Ένας ειδικός προφυλακτήρας κατασκευάστηκε επιπλέον με σκοπό να ασφαλίζει τον βηματικό κινητήρα πάνω στο πλαίσιο. Η γεωμετρία του είναι σε σχήμα “Π” και αποτρέπει τυχόν αποκλίσεις από τον άξονα κίνησης.

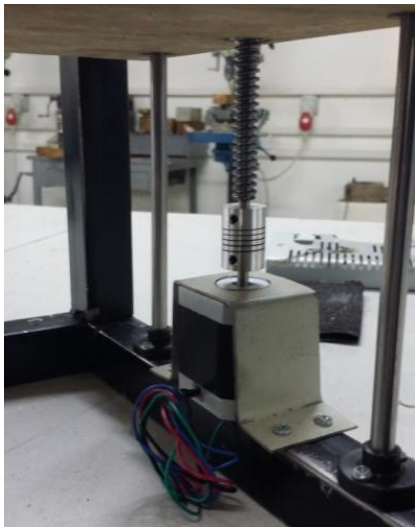
Ένα ειδικό κουζινέτο από αλουμίνιο κατασκευάστηκε για να εδράζει το ρουλεμάν του κεντρικού άξονα κίνησης και να επιτρέπει την ομαλή περιστροφική του κίνηση.

Ο κεντρικός άξονας με το εξωτερικό σπείρωμα υπέστη περαιτέρω κατεργασία για να πληροί τις γεωμετρικές προδιαγραφές και με τη χρήση ενός κόπλερ συνδέθηκε στον βηματικό κινητήρα.

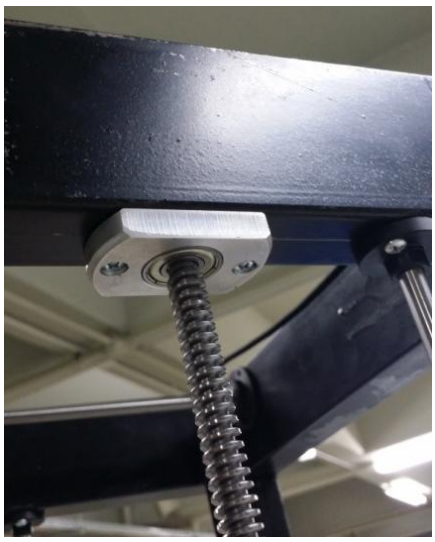
Για τη σύνδεση των υλικών στο πλαίσιο χρησιμοποιήθηκαν ‘αυτοδιάτρητες’ βίδες.



Εικόνα 90. Σύστημα κίνηση κάθετου άξονα

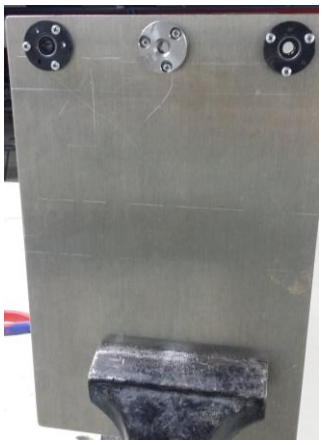


Εικόνα 91. Διάταξη κίνησης κάθετου άξονα

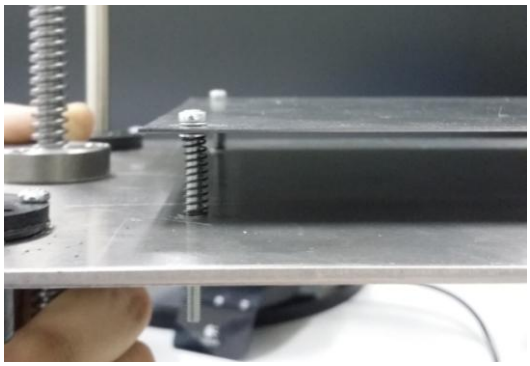


Εικόνα 92. Ρουλεμάν κάθετου κοχλία κίνησης

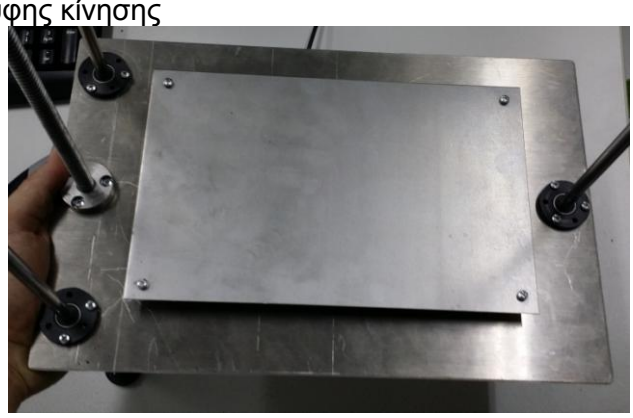
Εικόνα 93. Διάταξη κίνησης στο κατακόρυφο επίπεδο



Εικόνα 94. Φωλιές με μορφή φλάντζας για τα γραμμικά ρουλεμάν της πλάκας κατακόρυφης κίνησης



Εικόνα 95. Μηχανισμός ρύθμισης επιπεδότητας της πλάκας ωφέλιμης εκτύπωσης



Εικόνα 96. Τελική διάταξη συστήματος κατακόρυφης κίνησης

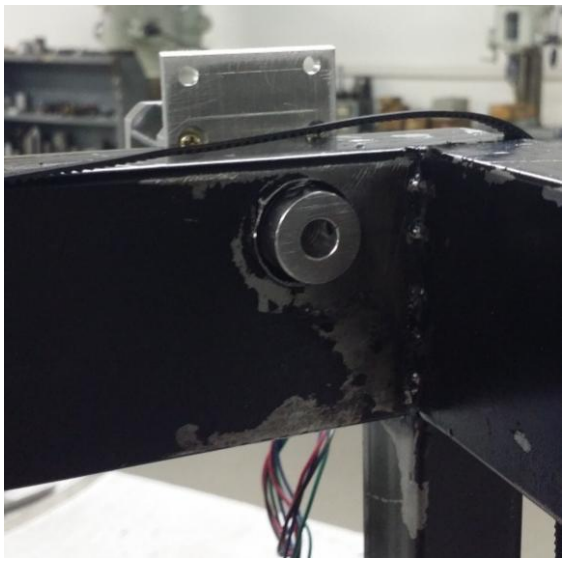
5.4 Κατασκευή συστήματος οριζόντιας κίνησης

Το σύστημα οριζόντιας κίνησης περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

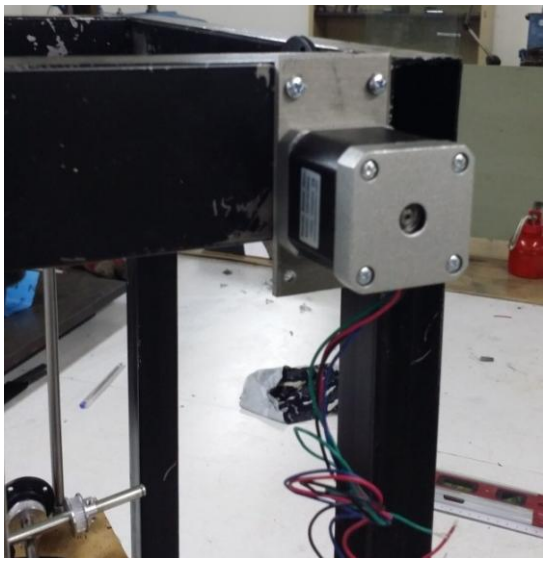
- Έξι άξονες κυκλικής διατομής
- Ρουλεμάν με κουζινέτα για την έδραση των αξόνων
- Ιμάντες χρονισμού
- Τροχαλίες χρονισμού
- Γραμμικά ρουλεμάν
- Δύο βηματικοί κινητήρες
- Στηρίγματα για την προσαρμογή των κινητήρων πάνω στο πλαίσιο
- Κόπλερ

Για την ενσωμάτωση του συστήματος οριζόντιας κίνησης, δημιουργήθηκαν οπές στο πλαίσιο για την εισαγωγή των βηματικών κινητήρων και την ένωσή τους με τους άξονες κίνησης μέσω κόπλερ. Οι οπές αυτές δημιουργήθηκαν στο δράπανο σταδιακά με χρήση διάφορων μεγεθών τρυπανιών.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν ειδικοί σταθεροποιητές θέσης για τους βηματικούς κινητήρες για την προσάρτησή τους πλευρικά του πλαισίου.



Εικόνα 97. Οπή στο πλαίσιο για την λειτουργικότητα του συστήματος

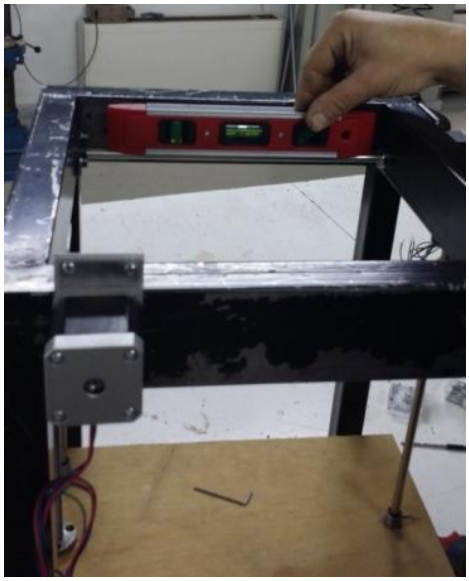


Εικόνα 98. Τοποθέτηση βηματικού κινητήρα στο πλαίσιο

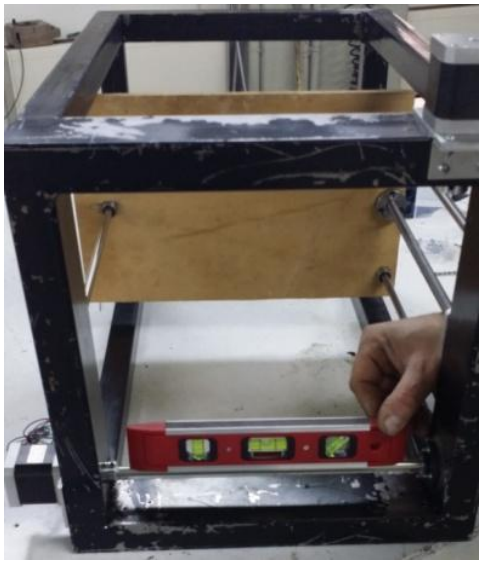
Για την προσάρτηση των αξόνων κίνησης πάνω στο πλαίσιο κατασκευάστηκαν στον τόρνο ειδικές φωλιές για τα ρουλεμάν με μεγάλη κυκλική επιφάνεια για την αξονική τοποθέτησή τους. Στη συνέχεια και με τη βοήθεια μέγγενης για τον ομαλή κατανομή δυνάμεων, τα ρουλεμάν πακτώθηκαν στις φωλιές.

Εικόνα 99. Φλατζωτή φωλιά ρουλεμάν κατασκευασμένη στον τόρνο

Έπειτα έγινε η σταδιακή τοποθέτηση των αξόνων κίνησης και η ευθυγράμμιση τους. Η ευθυγράμμιση πραγματοποιήθηκε σε σταθερή και επίπεδη βάση, που χρησιμοποιήθηκε σαν αναφορά. Ο βηματικός κινητήρας αποτέλεσε το σταθερό μέρος της ευθυγράμμισης η οποία πραγματοποιήθηκε με αλφάδι σε δύο επίπεδα. Με τον τρόπο αυτό ελέγχτηκε η γωνιακή απόκλιση σε κάτοψη και πλάγια όψη της κατασκευής. Λόγω των συμβατικών οργάνων δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθεί ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια. Όμως, το γεγονός ότι το κόπλερ έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει τυχόν αποκλίσεις σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στο πλαίσιο δημιουργήθηκαν οπές μεγαλύτερης διαμέτρου από τις απαιτούμενες, παρέχει στον εφαρμοστή τη δυνατότητα διορθώσεων.



Εικόνα 100. Έλεγχος γωνιακής απόκλισης σε κάθετη θέση



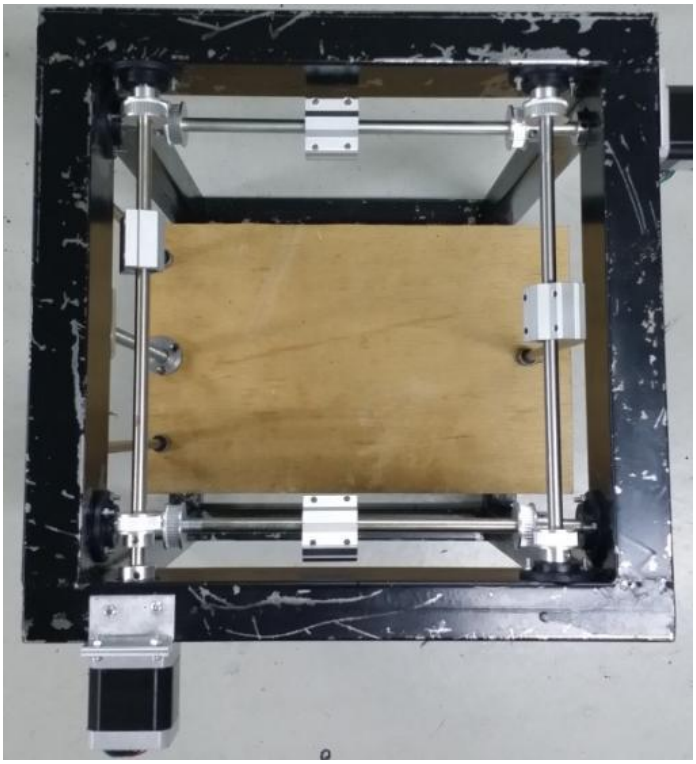
Εικόνα 101. Έλεγχος γωνιακής απόκλισης σε οριζόντια θέση

Εικόνα 102. Δημιουργία οπών για στήριξη του άξονα

Εικόνα 103. Τοποθέτηση άξονα στο πλαίσιο

Στη συνέχεια και αφού πραγματοποιήθηκε η δημιουργία οπών στήριξης για όλους τους άξονες κίνησης, οι τελευταίοι αφαιρέθηκαν με σκοπό να συναρμολογηθούν επάνω τους τα απαραίτητα μηχανολογικά στοιχεία (τροχαλίες, γραμμικά ρουλεμάν) και να επανατοποθετηθούν εκ νέου στο πλαίσιο.

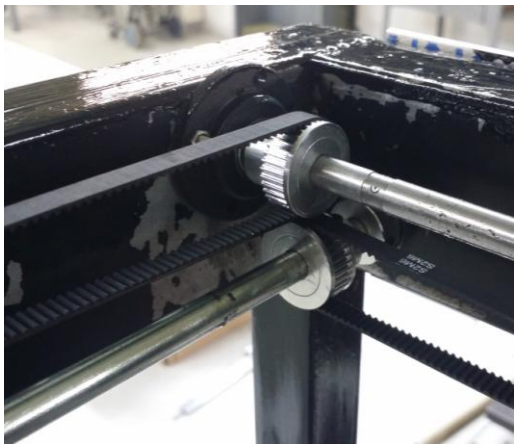
Εικόνα 104. Πλήρης διάταξη οριζόντιου άξονα κίνησης



Εικόνα 105. Διάταξη μετά από την τοποθέτηση των τεσσάρων αξόνων κίνησης

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν δύο επιπλέον άξονες, μικρότερου μήκους, για τη δημιουργία του “σταυρού”. Τέσσερις φωλιές κυκλικής διατομής υλοποιούν την έδρασή τους πάνω στα κουζινέτα των γραμμικών ρουλεμάν. Τέλος οι ιμάντες χρονισμού, μετά από την έντασή τους, πακτώθηκαν σημειακά στο εκάστοτε κουζινέτο με σκοπό να επιτρέπουν την γραμμική του κίνηση.

Εικόνα 106. Τελική μορφή μετά την τοποθέτηση όλων των αξόνων



Εικόνα 107. Συναρμογή αξόνων, τροχαλιών και ιμάντων μετάδοσης κίνησης.

5.5 Κατασκευή υλικών σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας κατασκευής ήταν η κεφαλή εκτύπωσης και ο μηχανισμός προώθησης υλικού. Η κατασκευή τους πραγματοποιήθηκε από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου CubeX.

5.5.1 Ο εκτυπωτής CubeX

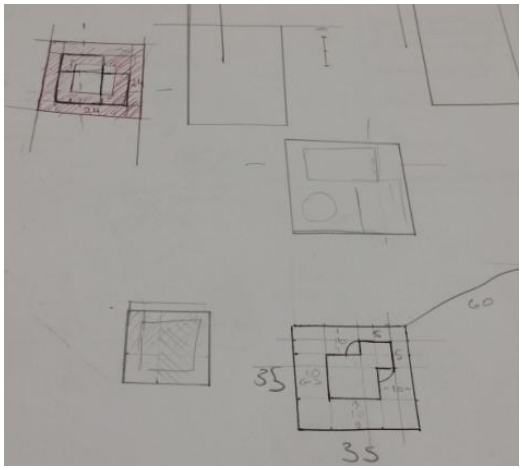
Εικόνα 108. Εκτυπωτής CubeX

Πίνακας 11. Τεχνικά χαρακτηριστικά εκτυπωτή CubeX

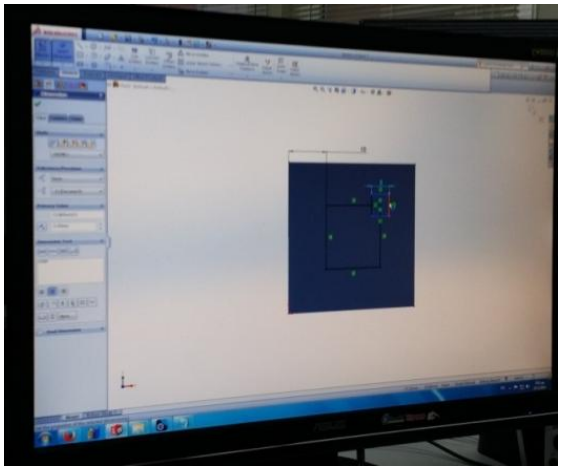
Μέγιστο μέγεθος εκτύπωσης	275 x 265 x 240 mm
Διαθέσιμες αναλύσεις	0,1 mm (100μ) 0,25 mm (250μ) 0,5 mm (500 μ)
Εξωτερικές διαστάσεις(Μ,Π,Υ)	515 x 515 x 598 mm
Διαθέσιμα χρώματα - Υλικά	PLA, ABS
Αρ.Κεφαλών - Χρώματα &Υλικά ανά εκτύπωση	1
Υποστηριζόμενα Αρχεία	STL , CubeX
Δημιουργία υποστηρικτικής δομής	ΝΑΙ
Δημιουργία υποστηρικτικής δομής που διαλύεται	ΟΧΙ

5.5.2 Σχεδιασμός και κατασκευή

Για τις ανάγκες του εκτυπωτή σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στον τρισδιάστατο εκτυπωτή η βάση του ακροφυσίου και ο μηχανισμός προώθησης του νήματος. Αρχικά η τετραγωνικής διατομής διάτρητη βάση σχεδιάστηκε με γνώμονα το βάρος και τη λειτουργικότητα. Η κεντρική οπή μειώνει το βάρος της κατασκευής, ενώ η πλευρική παρέχει τον απαραίτητο χώρο για την είσοδο του νήματος και την οδήγησή του στο ακροφύσιο.

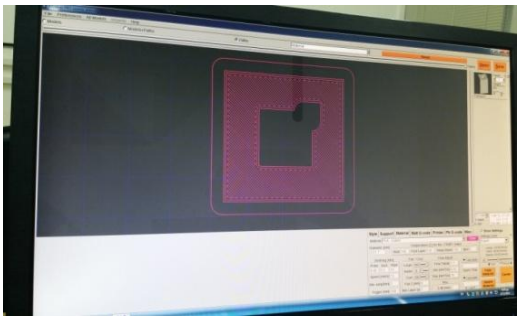


Εικόνα 109. Σκαρίφημα βάσης κεφαλής εκτύπωσης

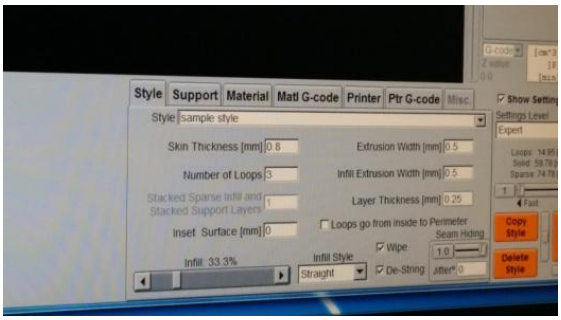


Εικόνα 110. Σχεδιασμός στο λογισμικό

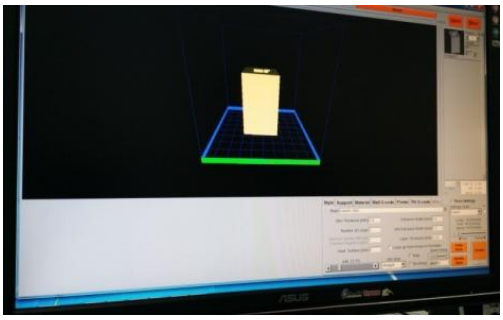
Μετέπειτα του σχεδιασμού έγινε η εξαγωγή του μοντέλου σε μορφή STL και η εισαγωγή του στο πρόγραμμα εκτύπωσης του τρισδιάστατου εκτυπωτή για να πραγματοποιηθούν οι τελευταίες ρυθμίσεις. Η πυκνότητα του υλικού, το πάχος στρώσης, η μορφή του γεμίσματος, τα υποστυλώματα και η χωρική τοποθέτηση του τεμαχίου προς εκτύπωση ήταν μερικές από της επιλογές εκτύπωσης .



Εικόνα 111. Ρυθμίσεις γεμίσματος της δομής

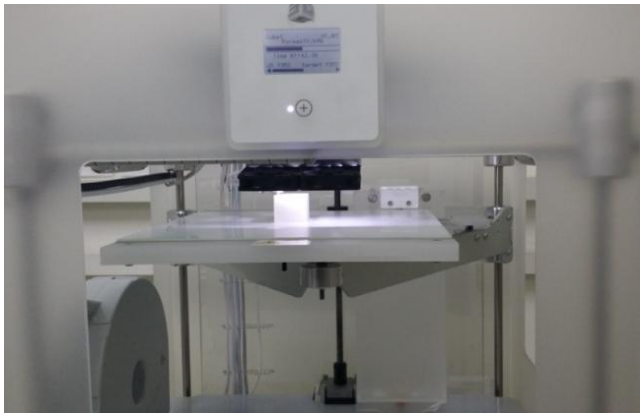


Εικόνα 112. Χαρακτηριστικά εκτύπωσης

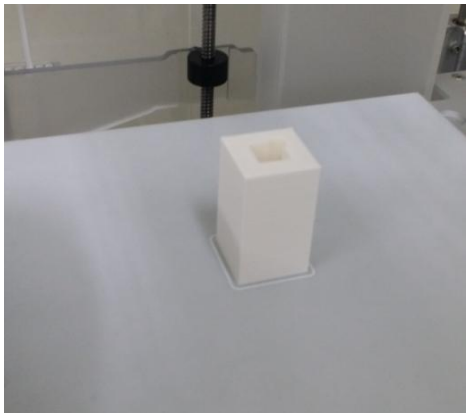


Εικόνα 113. Τοποθέτηση αντικειμένου προς εκτύπωση

Στη συνέχεια και αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία προετοιμασίας το αρχείο φορτώνεται σε μια κάρτα μνήμης (USB) και τοποθετείται στον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ο τελευταίος είναι πλέον σε θέση να ξεκινήσει τη διαδικασία κατασκευής.

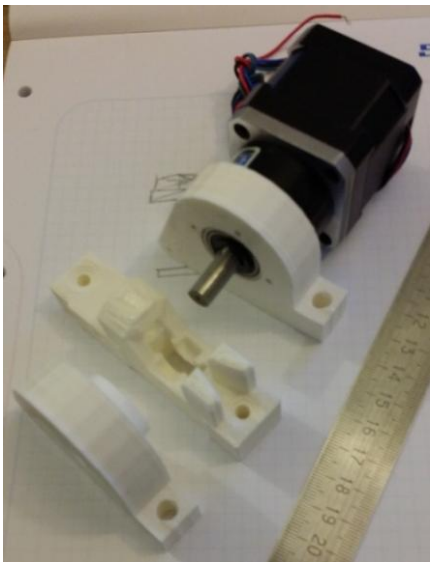


Εικόνα 114. Διαδικασία εκτύπωσης

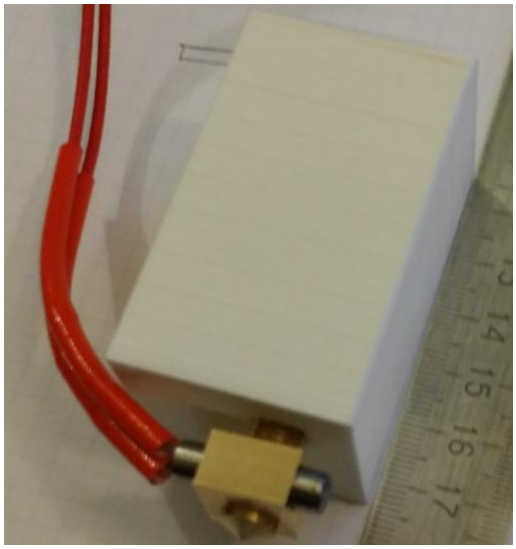


Εικόνα 115. Η βάση κεφαλής εκτύπωσης

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα κομμάτια που κατασκευάστηκαν με αυτή τη μέθοδο.



Εικόνα 116. Εξαρτήματα μηχανισμού προώθησης νήματος εκτύπωσης

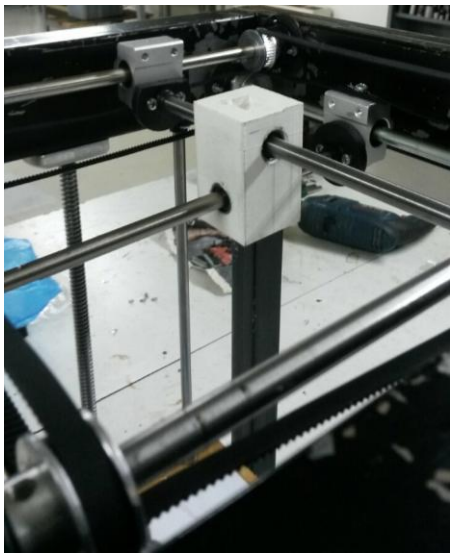


Εικόνα 117. Η κεφαλή εκτύπωσης

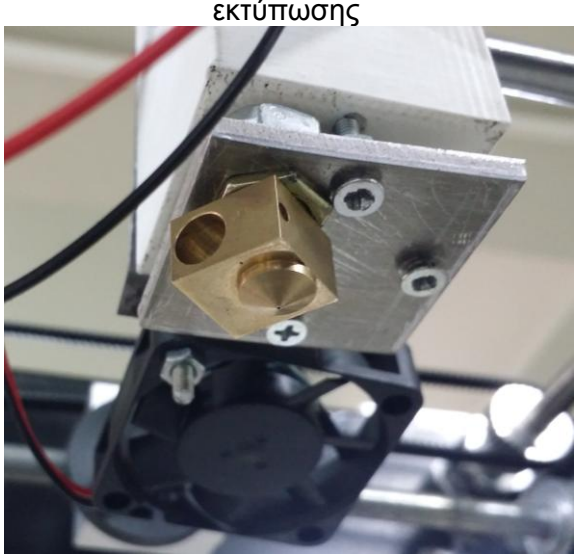
5.5.3 Τροποποίηση και κατεργασία τεμαχίων

Η βάση της κεφαλής απόθεσης υλικού υπέστη περαιτέρω κατεργασία. Για να τοποθετηθούν τα γραμμικά ρουλεμάν τα οποία θα εδράζουν τους άξονες στήριξης της κεφαλής, δημιουργήθηκαν οπές σε δύο επίπεδα. Επιπλέον προσαρτήθηκαν δύο μεταλλικά ελάσματα τετραγωνικής διατομής στο επάνω και κάτω μέρος της. Το πρώτο έχει σκοπό να συγκρατεί τον σωλήνα οδήγησης του νήματος και στο δεύτερο να τοποθετηθεί το ακροφύσιο. Η συγκεκριμένη πλάκα, διατηρεί μια απόσταση από την βάση της κεφαλής για λόγους μετάδοσης θερμότητας.

Εικόνα 118. Κατεργασία φορέα κεφαλής εκτύπωσης



Εικόνα 119. Το σύστημα οριζόντιας κίνησης με την κεφαλή απόθεσης υλικού

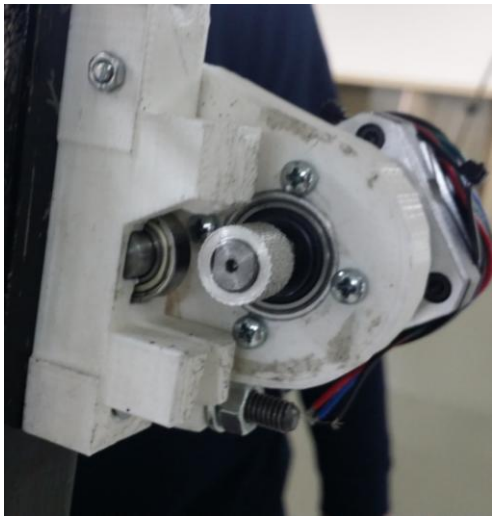


Εικόνα 120. Προσάρτηση του ακροφυσίου με τη βοήθεια του μεταλλικού ελάσματος

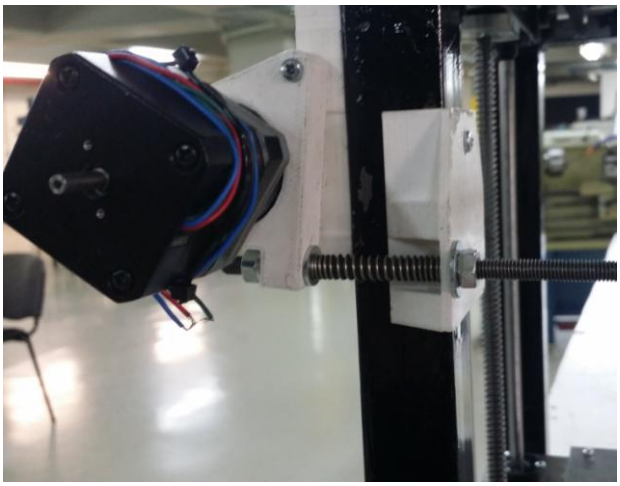
Εικόνα 121. Τελική μορφή κεφαλής εκτύπωσης

Για την ολοκλήρωση του μηχανισμού προώθησης του νήματος, χρειάστηκε εκτός από την εκτύπωση των επιμέρους στοιχείων του, η συναρμολόγησή τους αλλά και η τοποθέτηση επιπλέων μηχανολογικών στοιχείων για την ορθή λειτουργία του. Για να μπορεί να προωθήσει το νήμα εκτύπωσης ο μηχανισμός, το εγκλωβίζει ουσιαστικά ανάμεσα σε δύο περιστρεφόμενα μέρη. Ένα ρουλεμάν το οποίο λειτουργεί ως συνεργαζόμενη επιφάνεια και ένα πινιόν γρανάζι. Στη θέση του πινιόν γραναζιού κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του τόρνου ένα ειδικό δαχτυλίδι με τραχιά επιφάνεια (ροζέτα). Η συναρμολόγηση όλων των παραπάνω συνθέτη την τελική μορφή του μηχανισμού προώθησης του νήματος εκτύπωσης. Επιπλέον, για την ρύθμιση της δύναμης που θα ασκεί ο μηχανισμός στο νήμα και με σκοπό την αποφυγή τραυματισμού

και αστοχίας του κατασκευάστηκε ένας μηχανισμός ρύθμισης της απόστασης του πινιόν δακτυλίου με το συνεργαζόμενο ρουλεμάν.



Εικόνα 122. Τελική συναρμολόγηση μηχανισμού προώθησης νήματος

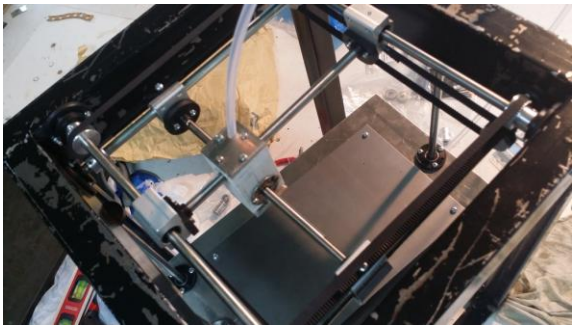


Εικόνα 123. Μηχανισμός ρύθμισης απόστασης πινιόν δακτυλίου με συνεργαζόμενο ρουλεμάν (ρεγουλατόρος)

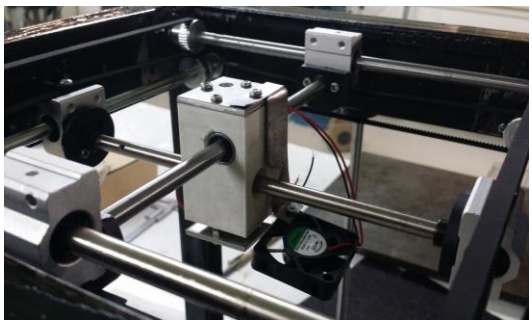
Εικόνα 124. Κατασκευή πινιόν δακτυλίου και ροζέτας

5.6 Τελική μορφή

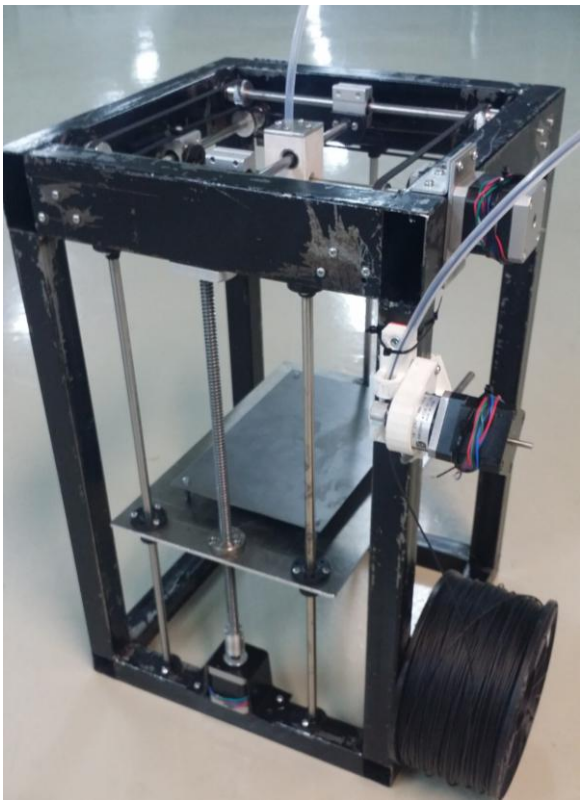
Έπειτα από την κατασκευή όλων των επιμέρους δομικών στοιχείων ακολούθησε συναρμολόγηση τους για την δημιουργία της τελικής μορφής του εκτυπωτή. Για την ολοκλήρωση της κατασκευής προστέθηκαν επιπλέον ο σωλήνας οδήγησης του νήματος εκτύπωσης, καθώς και ένας ανεμιστήρας ψύξης στην κεφαλή απόθεσης υλικού.



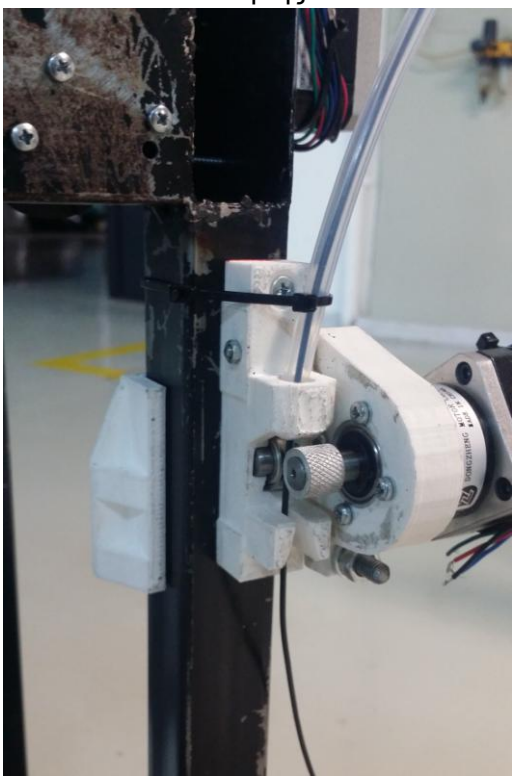
Εικόνα 125. Κάτοψη διάταξης οριζόντιας κίνησης



Εικόνα 126. Προσαρμογή κεφαλής εκτύπωσης στο σύστημα οριζόντιας κίνησης



Εικόνα 127. Τελική μορφή τρισδιάστατου εκτυπωτή



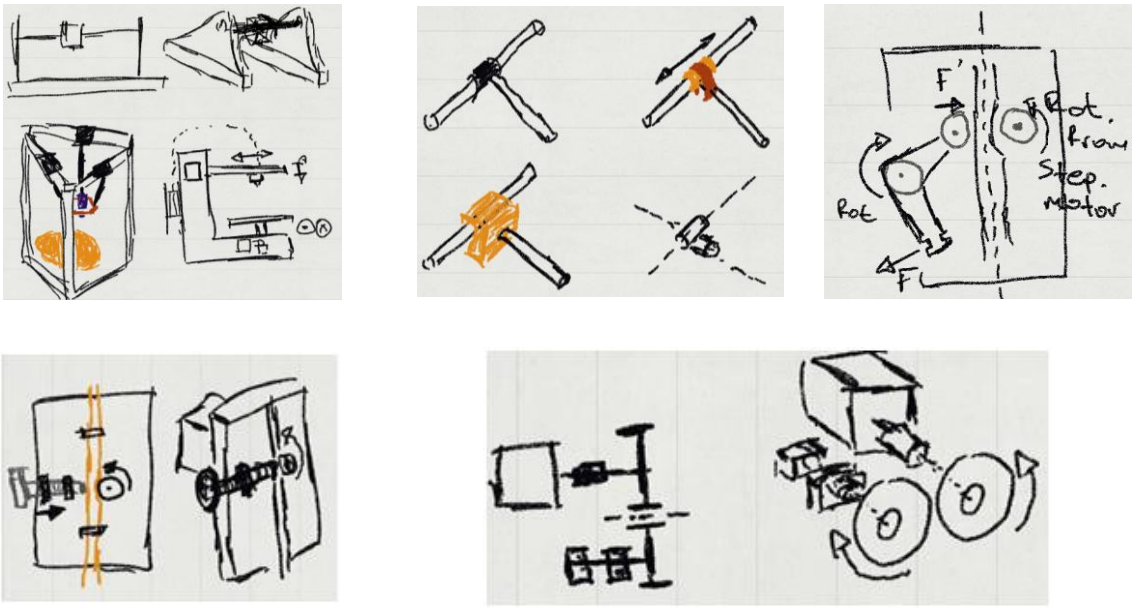
Εικόνα 128. Λειτουργία μηχανισμού προώθησης νήματος εκτύπωσης

6 Συμπεράσματα

6.1 Παρατηρήσεις

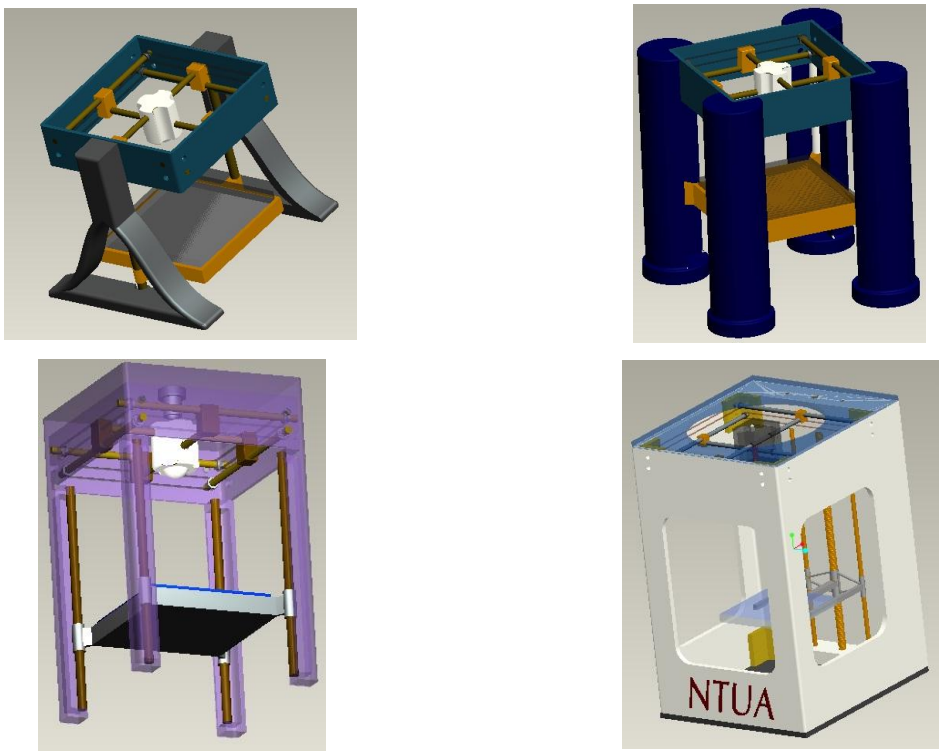
Το γεγονός ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή στηρίχτηκαν αρχικά στην δημιουργία ενός πλαισίου και μετέπειτα στην προσαρμογή όλων των επιμέρους στοιχείων πάνω σε αυτό, δημιούργησε κάποιους περιορισμούς. Μπορεί από τη μια ένα στιβαρό πλαίσιο να έχει πλεονεκτήματα όπως μηχανική και θερμική αντοχή, αλλά από την άλλη περιορίζει τυχόν μελλοντικές αλλαγές ή βελτιώσεις. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δημιούργησε δυσκολίες στην ευθυγράμμιση των αξόνων μετάδοσης κίνησης. Καθώς το πλαίσιο κατασκευάστηκε πρώτο, οι οπές για τους άξονες πραγματοποιήθηκαν σε επόμενο χρόνο, κάτι που περιόρισε αρκετά τις επιλογές θέσης και τυχόν τροποποιήσεις. Συμπέρασμα από την διαδικασία κατασκευής, αποτελεί το γεγονός ότι στη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής προτεραιότητα θα πρέπει να έχει το σύστημα μετάδοσης κίνησης με τα επιμέρους στοιχεία και τέλος το πλαίσιο στήριξης. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι το “κτίσιμο” της κατασκευής θα πρέπει να γίνεται από “μέσα” προς τα “έξω”, καθώς αυτή η μεθοδολογία παρέχει τη δυνατότατα ευκολότερων αλλαγών κατά τη διαδικασία κατασκευής. Το συμπέρασμα αυτό αποτελεί καθαρά προσωπική εκτίμηση.

Ο συνδυασμός ιδεών, εργονομίας, λειτουργικότητας, αποδοτικότητας και μηχανικής αποτέλεσε τον οδηγό της διαδικασίας σχεδιασμού. Η μορφοποίηση των ιδεών πραγματοποιήθηκε αρχικά μέσα από πρόχειρα σκαριφήματα, εωσότου προκύψει, μετά από πληθώρα διαφοροποιήσεων, μια υλοποιήσιμη μορφή τους.



Εικόνα 129. Σκαριφήματα ιδεών

Έπειτα για την καλύτερη επεξεργασία και βελτιστοποίηση του σχεδίου πραγματοποιήθηκε η τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Ήταν πολλά τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν προτού καταλήξουμε στο τελικό αποτέλεσμα. Σε κάθε βήμα του σχεδιασμού μετά από συζήτηση και διευκρίνιση των πλεονεκτημάτων, μειονεκτημάτων αλλά και της κατασκευασιμότητας του μοντέλου, προχωρούσαμε στην πραγματοποίηση αλλαγών και βελτιστοποιήσεων. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβανόταν έως ότου το αποτέλεσμα πληρούσε τις ζητούμενες προδιαγραφές.



Εικόνα 130. Δοκιμαστικές διατάξεις τελικής μορφής

Απαραίτητοι ήταν οι υπολογισμοί γεωμετρικής και διαστασιολογικής φύσεως, τόσο για τα επιμέρους στοιχεία όσο και για την συναρμολόγησή τους. Η ορθός συνυπολογισμός τους στο στάδιο του σχεδιασμού (διαστάσεις, βάρος, υλικό, συναρμογή, κτλ) έχει ως αποτέλεσμα την ευκολότερη μετάβαση στο κατασκευαστικό στάδιο, χωρίς την παρουσία αλλαγών και διαφοροποιήσεων. Αυτό είναι και το ιδανικό μοντέλο, συνεργασίας σχεδιαστή και κατασκευαστή. Στην συγκεκριμένη εργασία, υπήρξε η ανάγκη αλλαγών και απόκλισης από τον αρχικό σχεδιασμό λόγω πρακτικών ζητημάτων. Με γνώμονα τη λειτουργικότητα, το χαμηλό κόστος και την ευκολία κατασκευής πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στο φυσικό μοντέλο του εκτυπωτή. Σημαντικό ρόλο σε αυτήν την ενέργεια είχε η αγορά ενός εμπορικού τρισδιάστατου εκτυπωτή από το εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας διεύρυνε τις κατασκευαστικές δυνατότητες μας, τόσο στην πολυπλοκότητα των εξατομικευμένων προς κατασκευή στοιχείων όσο και στον χρόνο παραγωγής τους.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί η δυνατότητα παραγωγής σύνθετων δομών με αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Το γεγονός αυτό

παρέχει την δυνατότητα στους οικιακούς τρισδιάστατους εκτυπωτές να μπορούν να αναπαράγουν τον εαυτό τους. Τα δομικά στοιχεία των οποίων οι ιδιότητες δεν υπερβαίνουν τις τιμές των μηχανικών και θερμικών περιορισμών, μπορούν να παραχθούν από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή με σκοπό την δημιουργία ενός νέου. Ένα τέτοιο παράδειγμα βλέπουμε σε αυτήν την εργασία, που είναι ο φορέας της κεφαλής απόθεσης υλικού και το σύστημα προώθησης του νήματος. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής μας παρείχε την δυνατότητα παραγωγής ενός εξατομικευμένου σχεδίου του φορέα της κεφαλής απόθεσης υλικού σύμφωνα με τις ανάγκες μας. Οι επιλογές της εκτύπωσης (ανάλυση, πυκνότητα) σε συνδυασμό με το υλικό εκτύπωσης προσέδωσαν στον τελικό στοιχείο τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες. Το γεγονός αυτό επαληθεύτηκε μετά από περαιτέρω επεξεργασία του τεμαχίου στο δράπανο του εργαστηρίου για την δημιουργία οπών. Το τεμάχιο παρουσίασε άριστη συμπεριφορά χωρίς την δημιουργία ρωγμών ή δειγμάτων αστοχίας γύρο από την περιοχή της οπής.

Ο χρονικός ορίζοντας ολοκλήρωσης της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να υπολογιστεί ως άθροισμα των επιμέρους χρόνων μελέτης, αναζήτησης στοιχείων, σχεδιασμού και κατασκευής. Σε μια προσπάθεια προσδιορισμού αυτού του χρόνου και των εργατοωρών που δαπανήθηκαν θα μπορούσε να μιλήσει κανείς για μια τάξη μεγέθους μηνών. Επιπλέον το συνολικό κόστος αυτής της προσπάθειας κυμαίνεται γύρο στα τετρακόσια ευρώ (400€). Το γεγονός της διαθεσιμότητας κάποιων υλικών από το εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών, είχε σαν αποτέλεσμα την συνεισφορά στην μείωση του τελικού κόστος. Αρνητικό αντίκτυπο στον προσδιορισμό του τελικού κοστολογίου, είχε το γεγονός της αυξημένης τιμολόγησης των υλικών από τους εξωτερικούς προμηθευτές. Σε διαφορετική περίπτωση, το γεγονός ύπαρξης μιας παγκόσμιας αγοράς, παρέχει την δυνατότητα προμήθειας υλικών σε αρκετά χαμηλότερο κόστος. Αναλυτικό κοστολόγιο παρουσιάζεται στο παράρτημα 8.3.

6.2 Προτάσεις βελτίωσης

Σε συνέχεια της παρούσας εργασίας προτείνονται οι παρακάτω βελτιώσεις – αλλαγές με σκοπό την επέκταση της αποδοτικότητας του τρισδιάστατου εκτυπωτή. Οι βελτιώσεις αφορούν τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν των εκτυπωτή.

Προτείνεται η αντικατάσταση της βάσης εκτύπωσης με αυτήν που είχε αρχικά σχεδιαστεί (Πίνακας 3). Η υπάρχουσα επίπεδη βάση στήριξης που εδράζει την πλάκα εκτύπωσης πληροί μεν τις προδιαγραφές που αφορούν τη στιβαρότητα και την ακεραιότητά της, αλλά η αρχικά σχεδιασμένη βάση παρέχει επιπλέον στιβαρότητα στα σημεία έδρασης των γραμμικών ρουλεμάν λόγο του αυξημένου πάχους. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό της, που διαθέτει οπές για μείωση του βάρους και νεύρα για αύξηση ακαμψίας την καθιστούν σημαντικά καλύτερη από την υπάρχουσα.

Επιπλέον προτείνεται η αντικατάσταση της πλάκας εκτύπωσης ή η τροποποίησή της σε θερμαινόμενη. Είναι συχνό το φαινόμενο της στρέβλωσης και αποκόλλησης του κατώτατο στρώματος του αντικειμένου εκτύπωσης. Αυτό οφείλεται στην διαφορά θερμοκρασίας που έχει η πλάκα εκτύπωσης με αυτήν του υλικού εκτύπωσης που εξέρχεται από το ακροφύσιο. Το αποτέλεσμα είναι η ταχεία και μη ομαλή τήξη του και κατ' επέκταση η αστοχία του (φαινόμενα στρέβλωσης). Η θερμαινόμενη πλάκα παρέχει σημαντική βοήθεια στην εξάλειψη αυτού του φαινομένου.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την ακρίβεια και, κατ' επέκταση, την ποιότητα εκτύπωσης είναι οι βηματικοί κινητήρες. Η αντικατάστασή τους με άλλους που έχουν μικρότερο βήμα μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια εκτύπωσης παρέχοντας τη δυνατότητα στην κεφαλή εκτύπωσης να εκτελέσει ακόμα μικρότερα βήματα – αποστάσεις. Η βελτίωση αυτή θα πρέπει να πραγματοποιηθεί παράλληλα με την ορθή επιλογή κατάλληλου μεγέθους ακροφυσίου.

Η κεφαλή απόθεσης υλικού κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο στην ποιότητα εκτύπωσης και αποτελεί από μόνη της ένα ξεχωριστό τομέα ενδιαφέροντος. Η αντικατάσταση της υπάρχουσας με μια μεταλλικής κατασκευής η οποία παρέχει κάποιο σύστημα θερμικής απομόνωσης (όπως μεταλλικούς δακτυλίους κατά μήκους του διάτρητου κοχλία οδήγησης του νήματος στο ακροφύσιο ή ανεμιστήρα) ίσως αποτελέσει μια ειδοποιό διαφορά.

Όπως προαναφέρθηκε, η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει σημαντικά την τήξη του ρευστού νήματος εκτύπωσης και κατ' επέκταση την ποιότητα εκτύπωσης. Η θερμική απομόνωση του χώρου εκτύπωσης μπορεί να διασφαλίσει την κατάλληλη θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω από το σημείο εκτύπωσης, εμποδίζοντας τυχόν ψυχρά ρεύματα να εισέλθουν στο χώρο ή διαρροές θερμικών φορτίων. Το ρόλο αυτό μπορεί να αναλάβει ένα πλαίσιο από Plexiglas το οποίο θα τοποθετηθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να περιβάλλει τον εκτυπωτή. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλάκες στα κενά της είδη υπάρχουσας δομής του πλαισίου του εκτυπωτή με αποτέλεσμα να δημιουργούν ένα κλειστό χώρο εκτύπωσης.

7 Βιβλιογραφία

[1] A. Budding, T.H.J. Vaneker, A.J.A. Winnubst, “Open source powder based rapid prototyping machine for ceramics”, Procedia CIRP, Volume 6, 2013, pp. 534-539.

[2] B.K.N. Rao, “Handbook of condition Monitoring”, Elsevier Science, 1996.

[3] Brett P. Conner, Guha P. Manogharan, Ashley N. Martof, Lauren M. Rodomsky, Caitlyn M. Rodomsky, Dakesha C. Jordan, James W. Limperos, “Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services”, Additive Manufacturing, Volume 1-4, 2014, pp. 64-76.

[4] D.E. Newland, “Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis”, 3rd ed., Longman Scientific and Technical, 1993.

[5] Dong Soo Kim, Sung Woo Bae, Kyung Hyun Choi, “Development of industrial SFF system using dual laser and optimal process”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 23, 2007, pp. 659–666.

[6] Douglas R. Gress, Ronald V. Kalafsky, “Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing”, Geoforum, Issue 60, 2015, pp. 43-52.

[7] Edson Costa Santos, Masanari Shiomi, Kozo Osakada, Tahar Laoui, “Rapid manufacturing of metal components by laser forming”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 46, 2006, pp. 1459–1468.

[8] Eric Luttersa, Fred J.A.M. van Houtena, Alain Bernardb, Emmanuel Mermozc, Corné S.L. Schutted, “Tools and techniques for product design”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 63, Issue 2, 2014, pp. 607-630.

[9] Florencia Edith Wiria, Novella Sudarmadji, Kah Fai Leong, Chee Kai Chua, E. Wei Chng and Chian Chai Chan, “Selective laser sintering adaptation tools for cost effective fabrication of biomedical prototypes”, Rapid Prototyping Journal, Volume 16, 2010, pp. 90-99.

[10] G.C. Anzalone , Chenlong Zhang, B. Wijnen, P.G. Sanders, J. M. Pearce, “A Low-Cost Open-Source Metal 3-D Printer”, Access, IEEE , Volume 1, 2013, pp. 803-810.

[11] H. Karagulle, L. Malgaca, “Analysis of end point vibrations of a two-link manipulator by integrated CAD/CAE procedures”, Finite Elements in Analysis and Design, Issue 15, September 2004, pp. 2049-2061.

[12] Ikuta K, Kirowatari K, “Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding”, Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS’93), 2013, New York, pp. 42-47.

[13] J.-P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, “Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 47, Issue 2, 1998, pp. 525-540.

[14] J.P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, L. Froyen, “Lasers and materials in selective laser sintering”, Assembly Automation, Volume 23, Issue 4, 2003, pp. 357-371.

[15] Jae-Won Choi, Eric MacDonald, Ryan Wicker, “Multi-material microstereolithography”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 49, Issue 5-8, pp 543-551.

[16] Jialin Yang, Hongwu Ouyang, Yang Wang, “Direct metal laser fabrication: machine development and experimental work”, Int J Adv Manuf Technol, Volume 46, (2010), pp. 1133–1143.

[17] Jim Jose, Dr. Rajakannu Amuthakkannan, “Design, Development and Analysis of FDM based Portable Rapid Prototyping Machine”, International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET), Volume 4, Issue 4, 2014, pp. 324-232.

[18] Kuang-Hua Chang, “Product Design Modeling Using CAD/CAE”, The Computer Aided Engineering Design Series, 2014

[19] L. Villalpando, H. Eiliat, R. J. Urbanic, “An optimization approach for components built by fused deposition modeling with parametric internal structure”, Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems, Procedia CIRP, Issue 17, 2014, pp. 800-805.

[20] Lee K., “Principles of CAD/CAM/CAE Systems”, Addison-Wesley, 1999.

[21] LJubisa Stankovic, Tatiana Alieva, Martin J. Bastiaans, “Time–frequency signal analysis based on the windowed fractional Fourier transform”, Signal Processing, Issue 83, 2003, pp. 2459-2468.

[22] M M Savalani, L Hao, R A Harris, “Evaluation of CO2 and Nd: YAG lasers for the selective laser sintering of HAPEX”, Proc. IMechE, Volume 220, 2006, pp.171-182.

[23] M.L. Aenlle, R.Brincker, “Modal scaling in operational modal analysis using a finite element model”, International Journal of Mechanical Sciences, Issue 76, 2013, pp. 86-101.

[24] Make magazine, Special issue 3d printing 2012, “Ultimate guide to 3d printing”, Issue 42, 2015.

[25] Ming C. Leu, Hoda A. ElMaraghy , Andrew Y.C. Nee, SohKhimOng, Michele Lanzetta, Matthias Putz, Wenjuan Zhu, Alain Bernard, “CAD model based virtual assembly simulation, planning and training”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Issue 62, 2013, pp. 799-822.

[26] Motam j. T., Shaw C. T., “Using Finite Elements in Mechanical Design”, McGraw Hill, 1996

[27] Pavol Lengvarský, Jozef Bocko, “Theoretical Basis of Modal Analysis”, Department of Applied Mechanics and Mechatronics, Technical University of Košice, Slovakia, American Journal of Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 7, 2013, pp. 173-179.

[28] Pranjal Jain, A. M. Kuthe, “Feasibility Study of manufacturing using rapid prototyping: FDM Approach”, The Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2013) Procedia Engineering, Issue 63, 2013, pp.4-11.

[29] R. K. Rajput, “A textbook of Manufacturing Technology: Manufacturing processes”, Firewall Media, 2007.

[30] Raju B.S., U. Chandra Shekar, K. Venkateswarlu, D. N. Drakashayani, “Establishment of Process model for rapid prototyping technique (Stereolithography) to enhance the part quality by Taguchi method”, 2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering (ICIAME 2014), Procedia Technology, Issue 14, 2014, pp. 380-389.

[31] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design”, 8th ed., McGraw−Hill Primis, 2006.

[32] Seung-Jae Lee, Hyun-Wook Kang, Tae-yeun Kang, Byung Kim, Geunbae Lim, Jong-Won Rhie2 and Dong-Woo Cho, “Development of a scaffold fabrication system using an axiomatic approach”, J. Micromech. Microeng., Volume 17, 2007, pp. 147-153.

[33] Tirupathi R. Chandrupalta, Ashok D. Belegundu, “Introduction to Finite Elements in Engineering”, 3rd ed., Published by Pearson Education, Publishing as Prentice Hall, 2002.

[34] Toogood R., “Pro/MECHANICA Structure – Student Edition Tutorial”, Mechanical Engineering University of Alberta, SDC, 2001.

[35] Xudong Zhang, ZhipingQiu,Qi Li, “Fuzzy variational principle for modal analysis of structures and its application”, Finite Elements in Analysis and Design 100, Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, PR China, 2015 pp. 54-64.

[36] Xue Yan, P Gu, “A review of rapid prototyping technologies and systems”, Computer-Aided Design, Volume 28, Issue 4, 1996, pp. 307-318.

[37] Y. Altintas, “Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics”, Machine Tool Vibrations and CNC Design, Chapter 5: Design and Analysis of CNC Systems, Cambridge University Press, 2000.

[38] Y. Altintas, A. Bernard, D. Brissaud, N. Duffie, C. Evans, M. Hauschild, B. Karpuschewski, M. Kunieda, B. Lauwers, D. Lucca, S. Smith, S. Takata, A.E.

Tekkaya, D. Y. Yang, “CIRP Annals - Manufacturing Technology”, Elsevier USA, 2012.

[39] Z. Fu, J. He, “Modal Analysis”, Butterworth-Heinemann, 2001.

[40] Α Κανάρχος, “Πεπερασμένα Στοιχεία και Ανάλυση Κατασκευών στην Μηχανολογία”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1995.

[41] Α. Κανάρχος, Ι. Αντωνιάδης, “Δυναμική Μηχανών”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1998.

[42] Βοσνιάκος Γ.Χ., “Εργαλειομηχανές CNC-CAM”, ΕΜΠ, 2003.

[43] Η. Παπαθανάσης, “Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης”, Τεχνολογία, Περιοδικό Περισκόπιο της επιστήμης, Τεύχος 297, Οκτώβριος 2005.

[44] Μαυρομμάτης Στ. Α., “Μηχανολογικό Σχέδιο και Στοιχεία Παραστατικής Γεωμετρίας”, 3η έκδοση, 2003.

[45] Μπιλάλης Ν., Μαραβελάκης Ε., “Συστήματα CAD/CAM και Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση”, Εκδόσεις Κριτική, 2009.

[46] Σουρέλης Ι. Κ., “Μεταλλογνωσία και Θερμικές κατεργασίες των μετάλλων”, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα, 1997.

Διαδικτυακές πηγές:

[47] Association of 3D Printing, 2014. 3D Printing Map – Where are the 3D printers around the world? <http://associationof3dprinting.com/3d-printing-mapwhere- are-the-3d-printers-around-the-world/> (accessed 10.01.15).

[48] Crawford S., 2011. How 3-D Printing Works. <http://computer.howstuffworks.com/3-d-printing.htm> (accessed 15.10.14).

[49] Desai, D., Magliocca, N., 2013. 3D printers as the next intellectual property game changer. National Constitution Center. <http://article.wn.com/view/2013/10/21/3D_printers_as_the_next_intellectual_property_game_changer/> (accessed 15.10.14).

[50] Gilpin, L., 2014. ‘10 industries 3D printing will disrupt or decimate’. Tech Republic. <http://www.techrepublic.com/article/10-industries-3d-printing-will-disruptor-decimate/> (accessed 15.10.14).

[51] Άλλες διαδικτυακές πηγές:

http://www.ptc.com/

http://reprap.org/

http://www.3ders.org

http://diy3dprinting.blogspot.de/

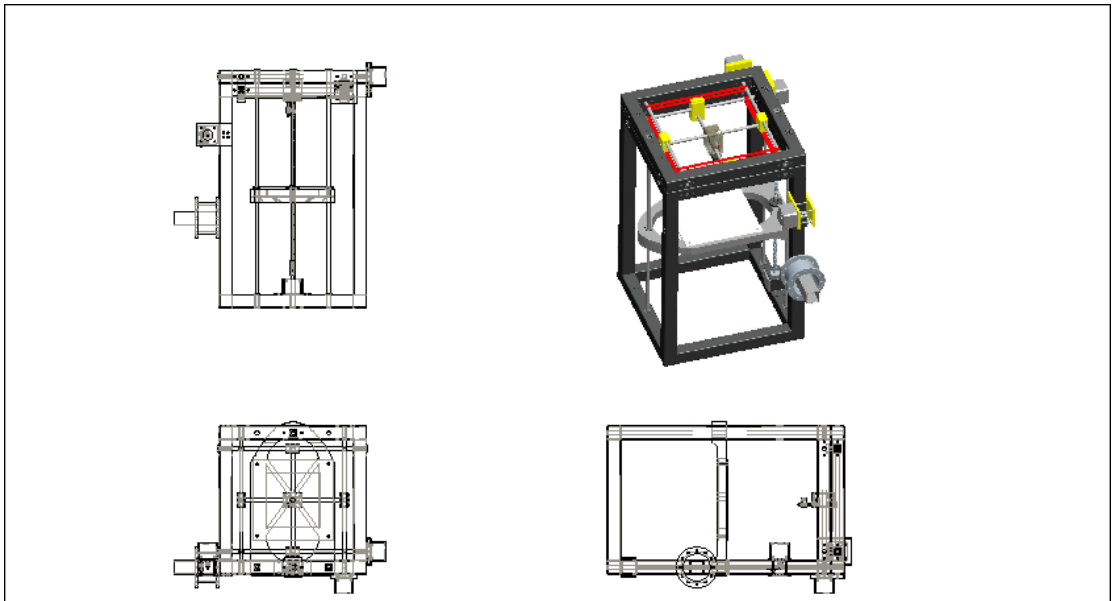
http://3dprinting.com/

http://makezine.com/

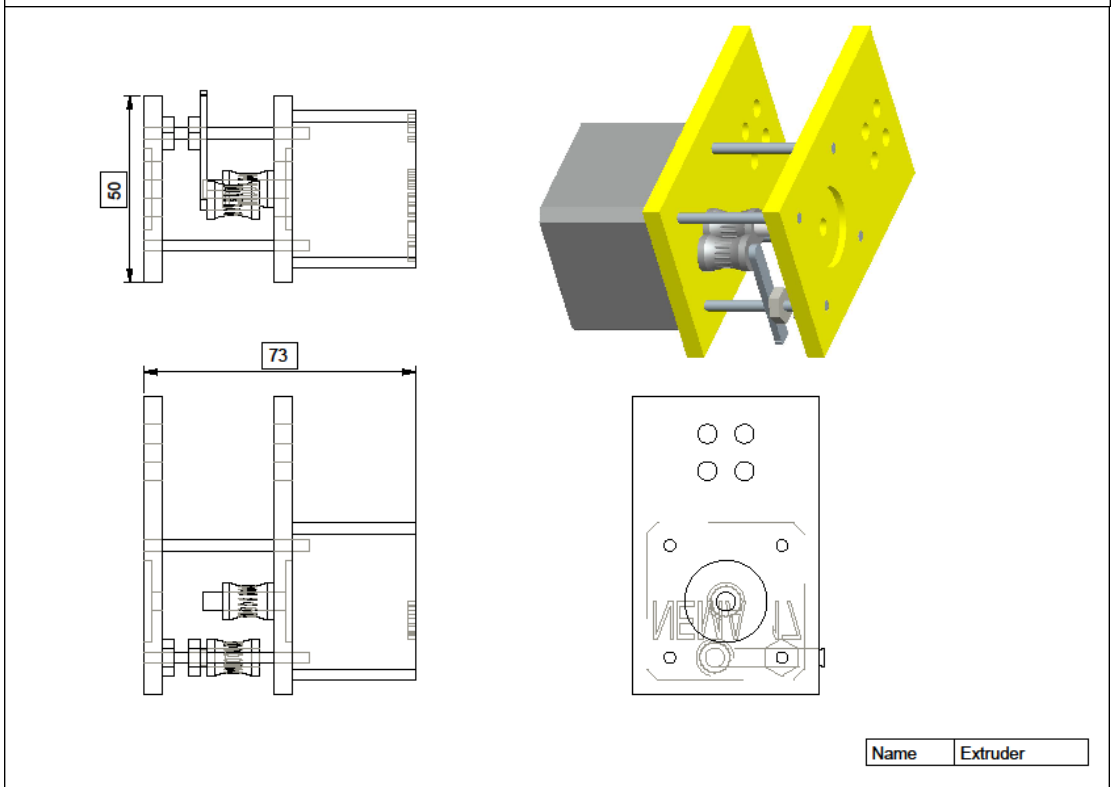
http://reprap.org/

8 Παράρτημα

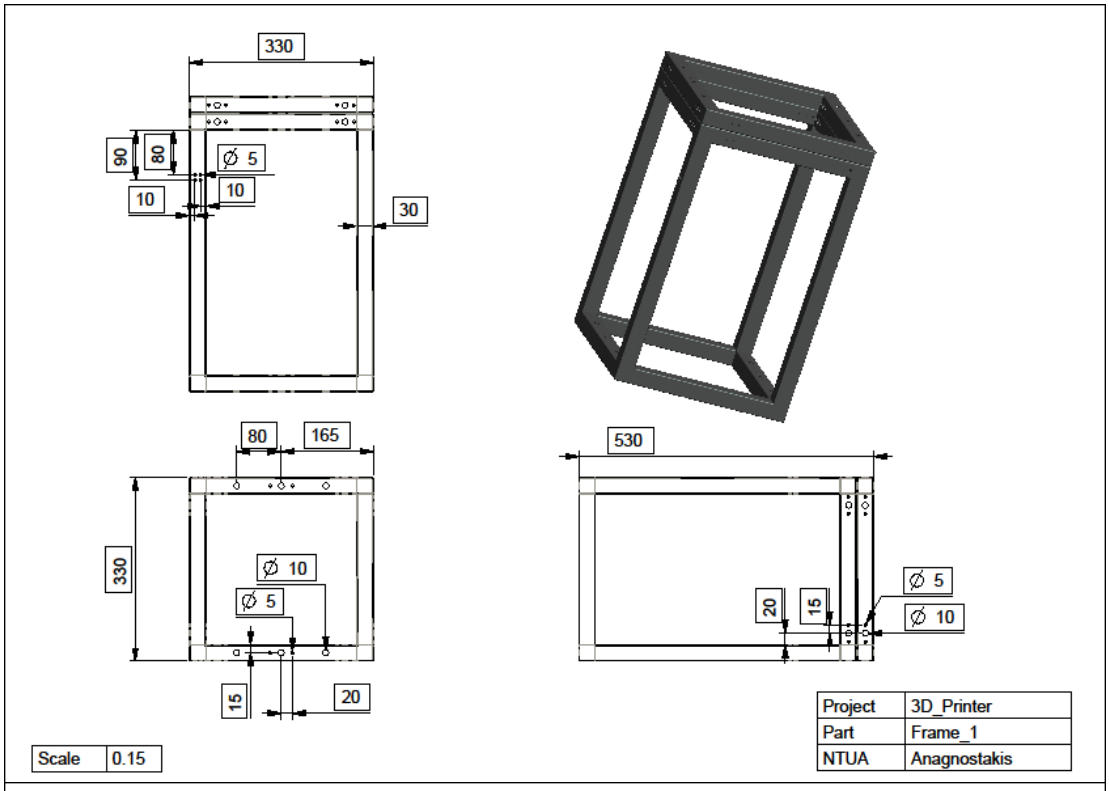
8.1 Ενδεικτικά μηχανολογικά σχέδια των στοιχείων του εκτυπωτή

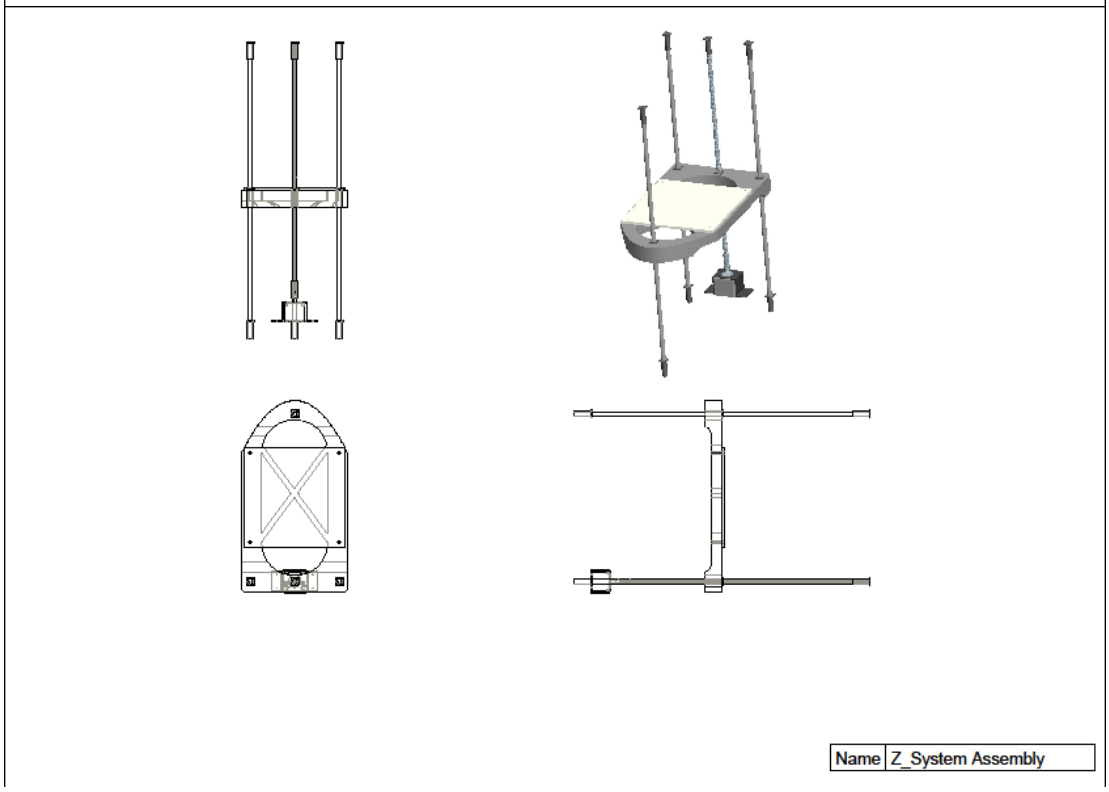


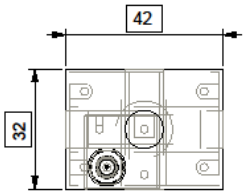
Name	3D_PRINTER
Final assembly	
	Anagnostakis
	NTUA

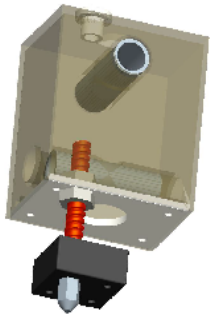


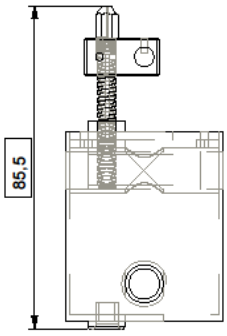
Name	Extruder

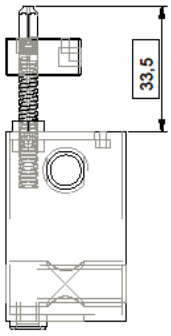

330
90
80
Ø 5
10
10
30
80
165
330
Ø 10
Ø 5
15
20
530
20
15
Ø 5
Ø 10
Project 3D_Printer
Part Frame_1
NTUA Anagnostakis
Scale 0.15


Name Z_System Assembly

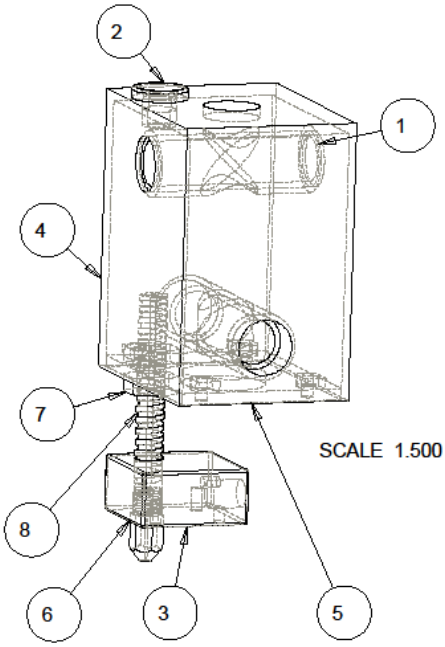








Name	Hotend_assembly



No.	Part name	Qty
1	BUSHING_8MM	2
2	CAP_FILLAMENT_MM	1
3	HEATER_BLOCK	1
4	HOTEND_CUP	1
5	HOTEND_METALSHEET	1
6	NOZZLE_04MM	1
7	NUT_5MM	2
8	THREADED_ROD_HOTEND	1

Project	Hot End
	Bill of Materials
Name	Anagnostakis

8.2 Συνεπτυγμένα αποτελέσματα ιδιοανυσματικής ανάλυσης (Hz)

mode	center position	corner position	down position	middle position	middle corner position
1	189.15	205.14	192.11	188.84	191.83
2	221.94	245.79	236.06	225.34	229.05
3	231.38	257.21	246.06	235.27	236.70
4	370.96	368.90	366.81	370.17	368.60
5	393.20	472.40	439.52	409.27	414.60
6	426.63	523.14	474.83	428.38	457.83
7	528.22	569.55	516.85	521.37	515.46
8	536.75	578.80	589.2	560.32	558.19
9	556.23	712.79	614.89	562.10	584.17
10	720.46	742.97	757.39	732.99	747.66
11	868.99	828.09	771.76	831.70	815.03
12	876.34	887.87	908.94	882.35	873.50
13	880.03	946.21	929.94	909.73	903.03
14	953.07	1016.54	1003.11	964.74	962.18
15	1223.74	1038.69	1017.29	1109.84	1086.20
16	1247.24	1060.02	1091.57	1154.14	1152.28
17	1248.12	1160.89	1243.16	1248.68	1221.10
18	1270.43	1248.15	1381.57	1355.20	1250.98
19	1322.24	1283.31	1397.59	1463.76	1368.22
20	1463.83	1418.48	1463.8	1478.89	1475.96
21	1477.97	1472.18	1513.64	1520.83	1505.53
22	1616.57	1523.96	1520.32	1550.23	1575.70
23	1627.79	1525.10	1610.9	1639.89	1673.50
24	1644.15	1559.43	1673.19	1708.17	1719.31
25	1911.44	1693.34	1699.01	1808.88	1838.88
26	1994.76	1803.50	1748.73	1981.78	1862.71
27	1997.67	1826.75	1952.16	1998.38	2037.85
28	2078.93	1916.60	1995.64	2072.65	2066.50
29	2091.25	2037.77	2048.69	2164.23	2109.85
30	2142.42	2059.82	2146.14	2224.54	2175.98
31	2187.18	2148.67	2204.11	2229.12	2194.58
32	2219.75	2192.37	2254.64	2260.07	2222.83
33	2234.37	2248.77	2268.27	2287.52	2253.05
34	2262.02	2267.09	2307.42	2326.95	2297.86
35	2325.35	2306.32	2348.52	2335.94	2328.00
36	2407.16	2318.30	2362.47	2386.35	2367.00
37	2560.88	2363.71	2419.5	2468.62	2428.54
38	2648.60	2491.40	2503.16	2641.84	2468.11

39	2772.97	2534.78	2545.71	2701.07	2468.11
40	2800.75	2557.77	2608.19	2772.38	2638.74
41	2808.66	2705.03	2815.76	2818.21	2694.04
42	2923.04	2754.84	2845.27	2854.50	2772.97
43	2941.28	2805.98	2868.01	2906.00	2797.85
44	2955.87	2823.86	2873.07	2950.08	2835.11
45	2996.68	2887.56	2950.98	2959.26	2886.99
46		2924.27	2964.9		2935.81
47		2971.62			2944.57
48					2973.16

8.3 Ενδεικτικό κοστολόγιο προμήθειας υλικών

Υλικό	Περιγραφή	Τιμή μονάδας	Μονάδες	Σχόλια	Κόστος
nozzle	brass 0.3mm	7,00 €	1		7,00 €
timing belt	GT2	6,00 €	3		18,00 €
bushing		3,00 €	18		54,00 €
bearing	6o8ZZ size	4,00 €	1	4pcs	4,00 €
cable tie		0,70 €	1	100pcs	0,70 €
timing pulley		9,00 €	8		72,00 €
coupler		4,80 €	3		14,40 €
cartridge heater	12V 40W	4,00 €	1		4,00 €
pinion Gear	32T	13,60 €	1		13,60 €
DC Fan	40x40x10 5V	5,20 €	1		5,20 €
nut	3mm	0,02 €	30		0,60 €
screw	M3, 10mm	0,04 €	30		1,20 €
ροδέλα	μεταλλική	0,01 €	30		0,30 €
αποστάτης	πλαστικός	0,25 €	10		2,50 €
stepper motor	nema 17	17,00 €	3		51,00 €
mounting hub	5mm aluminium	8,09 €	1		8,09 €
filament	ABS 1.75mm	32,00 €	1		32,00 €
filament	1.75mm PLA	35,90 €	1		35,90 €
bearing	688zz	6,32 €	1	10pcs	6,32 €
PFA tube	1m	7,84 €	1		7,84 €
stepper motor with gearbox	42STH38 nema-17	52,80 €	1	extruder	52,80 €
				SUM	**391,45 €**

8.4 Ηλεκτρονικό παράρτημα