



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης
Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης»

ΑΝΔΡΕΑΣ ΚΟΡΟΣΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΕΥΓΕΝΙΑ ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΥ
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης
Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης»

ΑΝΔΡΕΑΣ ΚΟΡΟΣΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΕΥΓΕΝΙΑ ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΥ
Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Οκτωβρίου 2023.

.....
Κωνσταντίνος Δεμέστιχας
Επικουρος Καθηγητής ΓΠΑ

.....
Ευστάθιος Συκάς
Ομότ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ευγενία Αδαμοπούλου
Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

.....
Ανδρέας Κοροσίδης

Copyright © Ανδρέας Κοροσίδης, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται αναλυτικά τις έννοιες της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης αξιοποιώντας ως μεθοδολογική επιλογή τη βιβλιογραφική επισκόπηση. Επιπλέον αναδεικνύει τους τρόπους μέσα από τους οποίους η συσχέτιση των δύο αυτών τεχνολογιών οδηγεί στη βελτιστοποίηση των φάσεων της παραγωγικής διαδικασίας.

Αρχικά, παρουσιάζεται εκτενώς η έννοια της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και παρατίθενται και εξηγούνται όλες οι βιβλιογραφικές έννοιες, προκειμένου να καταστεί σαφές στον αναγνώστη το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών, μεθόδων και υλικών που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Στη συνέχεια αναδεικνύονται επίσης τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης από εταιρείες.

Επιπρόσθετα αναλύεται η έννοια της Μηχανικής Μάθησης, των μεθόδων εκπαίδευσης των αλγορίθμων καθώς και η συσχέτιση με την Τρισδιάστατη Εκτύπωση. Τέλος αναδεικνύονται και επεξηγούνται μελέτες περίπτωσης οι οποίες αφορούν την άνωθεν συσχέτιση των δύο τεχνολογιών και αποτελούν εφαρμοσμένα παραδείγματα που απαντούν στους στόχους της έρευνας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία διερευνητική προσπάθεια για τη πληρέστερη κατανόηση της συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης, καθώς και την βελτιστοποίηση που επιφέρει στην παραγωγική διαδικασία. Φιλοδοξεί να προάγει έναν τεκμηριωμένο και κριτικό λόγο υπέρ της εφαρμογής των τεχνολογιών αυτών στην παραγωγική δραστηριότητα.

Λέξεις – Κλειδιά

Τρισδιάστατη Εκτύπωση, Τρισδιάστατος Εκτυπωτής, Μηχανική Μάθηση, Υλικά, Τεχνικές Εκτύπωσης, Παραγωγή, Αλγόριθμοι, Μελέτες Περίπτωσης

ABSTRACT

The present paper discusses analytically the meanings of Three-Dimensional Printing and Machine Learning using as a methodological choice the literature review. In addition, it highlights the ways through which the correlation of these two technologies results in phase optimization of the production process.

First, the meaning of Three-Dimensional printing is thoroughly presented, and all the bibliographical meanings are quoted and explained, so that the reader can understand the theoretical background of the technologies, methods and materials that are used by the technology in question. Also, its advantages and disadvantages of Three-Dimensional Printing are pointed out and typical corporate use examples are given.

In addition, the meaning of Machine Learning, training methods of the algorithms and the correlation with Three-Dimensional Printing are thoroughly analysed. In the end, case studies on the above correlation that can be considered applied examples and answer to the study's goals, are analysed, and clarified.

This study is a research attempt towards the most content comprehension of the correlation between Three-Dimensional Printing and Machine learning and the optimization it brings upon the productive process. It aspires to promote a documented and critical reason to use these technologies in productive activity.

Key – Words

Three-Dimensional Printing, Three-Dimensional Printer, Machine Learning, Materials, Printing Technologies, Production, Algorithms, Case Studies

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου κ. Ευγενία Αδαμοπούλου, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και για τη βοήθεια την οποία μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλη την υπομονή και υποστήριξη που έδειξαν.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στη μητέρα μου, που έφυγε νωρίς.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή | 13 |
| 1.1 Περιγραφή Έρευνας..... | 13 |
| 1.2 Πρόβλημα της Έρευνας..... | 13 |
| Κεφάλαιο 2: Πλαίσιο Τρισδιάστατης Εκτύπωσης..... | 14 |
| 2.1 Τι είναι η Τρισδιάστατη Εκτύπωση | 14 |
| 2.2 Ιστορική Αναδρομή | 14 |
| 2.3 Κατασκευαστική Δομή ενός Τρισδιάστατου Εκτυπωτή..... | 15 |
| 2.3.1 Κεφαλή Απόθεσης Υλικού..... | 15 |
| 2.3.2 Μηχανισμός/Δοχείο απόθεσης Υλικού | 17 |
| 2.3.3 Πλάκα εκτύπωσης | 17 |
| 2.4 Διαδικασία Εκτύπωσης..... | 18 |
| 2.4.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου μέσω CAD ή άλλων προγραμμάτων και με τη χρήση τρισδιάστατης σάρωσης..... | 18 |
| 2.4.2 Μετατροπή του ψηφιακού μοντέλου σε G-code | 19 |
| 2.4.3 Τρισδιάστατη Εκτύπωση | 19 |
| 2.4.4 Επεξεργασία τελικού αντικειμένου | 20 |
| 2.5 Τεχνολογίες Εκτύπωσης..... | 21 |
| 2.5.1 SLA Στερεολιθογραφία | 21 |
| 2.5.2 FDM Μοντελοποίηση Αποκομιδόμενης Αποθέσεως | 22 |
| 2.5.3 SLS Selective Laser Sintering..... | 23 |
| 2.5.4 DLP Digital Light Processing | 24 |
| 2.5.5 MJF Multi Jet Fusion | 25 |
| 2.5.6 Polyjet | 26 |
| 2.5.7 DMLS Direct Metal Laser Sintering | 27 |
| 2.5.8 EBM Electron Beam Melting | 28 |
| 2.6 Υλικά που χρησιμοποιούνται στη Τρισδιάστατη Εκτύπωση..... | 29 |
| 2.6.1 Πλαστικά..... | 29 |
| Θερμοπλαστικά..... | 30 |
| 1. ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene | 30 |
| 2. PLA Polylactic Acid | 31 |
| 3. PET/PETG..... | 32 |
| 4. HIPS..... | 33 |
| 5. TPU..... | 34 |
| 6. PVA (Πολυβινυλική Αλκοόλη) | 35 |
| 7. Carbon Fiber (νημάτιο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα - Ανθρακόνημα)..... | 36 |
| 2.6.2 Resin (Ρητίνες)..... | 37 |
| 2.6.3 Μέταλλα..... | 38 |
| 1. Ανοξείδωτο Ατσάλι | 38 |
| 2. Τιτάνιο | 39 |
| 2.6.4 Κεραμικά..... | 40 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 2.7 | Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Χρήσης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης..... | 41 |
| 2.7.1 | Πλεονεκτήματα | 41 |
| 1) | Σχεδιασμός | 41 |
| 2) | Ωφέλεια Κόστους | 42 |
| 3) | Επιτάχυνση της Παραγωγής..... | 42 |
| 4) | Παραγωγή κατά παραγγελία..... | 43 |
| 5) | Περιβαντολογικά Φιλική..... | 43 |
| 6) | Νέες Γεωμετρίες..... | 43 |
| 2.7.2 | Μειονεκτήματα..... | 44 |
| 1) | Περιορισμένα Υλικά..... | 44 |
| 2) | Κόστος Απόκτησης και χρήσης των Μηχανημάτων..... | 44 |
| 3) | Ζητήματα Πνευματικών Δικαιωμάτων | 45 |
| 4) | Περιορισμένος όγκος κατασκευής..... | 45 |
| 5) | Ανακρίβειες Σχεδιασμού..... | 46 |
| 2.8 | Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης | 46 |
| 2.8.1 | Ιατρική..... | 46 |
| 2.8.2 | Κατασκευαστικός Τομέας..... | 47 |
| 2.8.3 | Αεροδιαστημική | 48 |
| 2.8.4 | Αυτοκινητοβιομηχανία | 49 |
| 2.8.5 | Αθλητισμός | 50 |
| Κεφάλαιο 3: | Πλαίσιο Μηχανικής Μάθησης | 52 |
| 3.1 | Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)..... | 52 |
| 3.2 | Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)..... | 52 |
| 1. | Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning)..... | 53 |
| 2. | Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση (Unsupervised Learning)..... | 56 |
| 3. | Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning) | 57 |
| 3.3 | Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης | 58 |
| 1) | Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα | 58 |
| 2) | Συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN- Convolutional Neural Networks)..... | 58 |
| 3) | Δίκτυα Διανυσμάτων Υποστήριξης (SVM – Support Vector Machines)..... | 59 |
| 4) | K-Κοντινότεροι Γείτονες (K- nearest Neighbors)..... | 59 |
| 5) | Δέντρα Αποφάσεων (Decision Trees – DT)..... | 60 |
| 6) | Λογιστική Παλινδρόμηση | 61 |
| 7) | Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)..... | 61 |
| 3.4 | Deep Learning | 61 |
| 3.5 | Πλεονεκτήματα Μηχανικής Μάθησης στις Διαδικασίες Παραγωγής..... | 62 |
| 3.5.1 | Μηχανική Μάθηση στο Σχεδιασμό..... | 62 |
| 1) | Βελτιστοποίηση Τοπολογίας (Topology Optimization – TO) | 62 |
| 2) | Γενετικός Σχεδιασμός (Generative Design) | 62 |
| 3.5.2 | Μηχανική Μάθηση στη Παραγωγή | 63 |
| 1) | Βελτιστοποίηση Παραμέτρων (Parameter Optimization)..... | 63 |
| 2) | Παρακολούθηση των Διαδικασιών (Process Monitoring)..... | 63 |

| | |
|--|----|
| 3) Αναγνώριση Ελλοματικών (Defect Detection) | 64 |
| 4) Πρόβλεψη Ποιότητας (Quality Prediction) | 64 |
| 5) Έλεγχος Κλειστού Βρόγχου (Closed Loop Control)..... | 64 |
| 6) Εκτίμηση Κόστους (Cost Estimation)..... | 65 |
| Κεφάλαιο 4: Μελέτες Περίπτωσης..... | 66 |
| 4.1 Dreamfusion | 66 |
| 4.2 Αναγνώριση και Διόρθωση Σφαλμάτων στη Τρισδιάστατη Εκτύπωση..... | 66 |
| 4.3 Style2Fab..... | 69 |
| Κεφάλαιο 5: Επίλογος – Συμπεράσματα..... | 71 |
| Βιβλιογραφία | 72 |
| Ιστότοποι | 76 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Κεφαλή Απόθεσης Υλικού | 16 |
| Εικόνα 2: Πλάκες Εκτύπωσης στις μεθόδους Τρισδιάστατης Εκτύπωσης | 18 |
| Εικόνα 3: Διαδικασία Εκτύπωσης SLA | 22 |
| Εικόνα 4: Διαδικασία Εκτύπωσης FDM | 23 |
| Εικόνα 5: Διαδικασία Εκτύπωσης SLS | 24 |
| Εικόνα 6: Διαδικασία Εκτύπωσης DLP | 25 |
| Εικόνα 7: Διαδικασία Εκτύπωσης Polyjet..... | 27 |
| Εικόνα 8: Διαδικασία εκτύπωσης DMLS..... | 28 |
| Εικόνα 9: Διαδικασία Εκτύπωσης EBM | 29 |
| Εικόνα 10: Αντικείμενο κατασκευασμένο απο ABS | 31 |
| Εικόνα 11: Benchy κατασκευασμένο απο PLA..... | 32 |
| Εικόνα 12: Πιάτα κατασκευασμένα από PET/PETG..... | 33 |
| Εικόνα 13: Αντικείμενο κατασκευασμένο από TPU | 35 |
| Εικόνα 14: Φιγούρα, που η στήριξης της είναι κατασκευασμένη απο ABS..... | 36 |
| Εικόνα 15: Αναλώσιμα κατασκευασμένα απο Carbon Fiber | 37 |
| Εικόνα 16: Οδοντικά Εμφυτεύματα κατασκευασμένα από Ρητίνη..... | 38 |
| Εικόνα 17: Εξαρτήματα κατασκευασμένα από Ανοξείδωτο Ατσάλι | 39 |
| Εικόνα 18: Εξαρτήματα για χειρουργείο Ισχίου κατασκευασμένα από Τιτάνιο..... | 40 |
| Εικόνα 19: Εμφυτεύματα για Οδοντιατρική Χρήση κατασκευασμένα από Κεραμικά | 41 |
| Εικόνα 20: Προσθετικά Μέλη κατασκευασμένα με Τρισδιάστατη Εκτύπωση..... | 47 |
| Εικόνα 21: Πύργος από αφρό, εκτυπωμένος από drone. | 48 |
| Εικόνα 22: Τρισδιάστατος εκτυπωτής της Made in Space, (spaceflight101, 2018)... | 49 |
| Εικόνα 23: Ψηφιακό Σχέδιο, πρόσθιου μέρους φορτηγού, της εταιρείας Volvo Trucks | 50 |
| Εικόνα 24: Το υπόδημα της εταιρείας Adidas, STRUNG | 51 |
| Εικόνα 25: Διαδικασία της Επιβλεπόμενης Μάθησης..... | 54 |
| Εικόνα 26: Παράδειγμα Κατηγοριοποίησης..... | 55 |
| Εικόνα 27: Παράδειγμα Συσταδοποίησης..... | 57 |
| Εικόνα 28: Μία ατμομηχανή σε υψηλή ανάλυση, δημιουργημένη από το Dreamfusion | 66 |

Εικόνα 29: Προβλέψεις του αλγορίθμου σε συνάρτηση με το χρόνο, παραδείγματα υλικών και αντικειμένων. 68

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή Έρευνας

Η παρούσα διπλωματική έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της συσχέτισης της τρισδιάστατης εκτύπωσης και της μηχανικής μάθησης. Ο συνδυασμός του ML με το 3d Printing πρέπει να βελτιώνει τις διαδικασίες παραγωγής και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Ο σκοπός της μεθόδου είναι :

- Η περιγραφή της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης
- Η ανάλυση των τεχνολογιών και υλικών της.
- Η αναγνώριση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της.
- Η ανάλυση των μεθόδων εκπαίδευσης της Μηχανικής μάθησης.
- Η παρουσίαση των πλεονεκτημάτων της εφαρμογής Μηχανικής Μάθησης.
- Η παρουσίαση Μελετών Περίπτωσης που επιβεβαιώνουν τον στόχο.

1.2 Πρόβλημα της Έρευνας

Τι οφέλη δημιουργεί η συσχέτιση της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανική Μάθηση.

Κεφάλαιο 2: Πλαίσιο Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

2.1 Τι είναι η Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής με την οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στη τρισδιάστατη εκτύπωση είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικών, κυρίως κεραμικά, πολυμερή και μέταλλα. Σε σύγκριση με παραδοσιακές τεχνολογίες κατασκευής, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Αυτό έχει δημιουργήσει την τάση πολλοί να πιστεύουν ότι τα επόμενα χρόνια η παγκόσμια παραγωγή αγαθών θα στραφεί προς την τρισδιάστατη εκτύπωση, αντικαθιστώντας τις συμβατικές τεχνικές.

Στο τομέα της παραγωγής αρκετοί πιστεύουν ότι η τρισδιάστατη εκτύπωση θα αποτελέσει μία «νέα βιομηχανική επανάσταση», με την αποκέντρωση των παραγωγικών διαδικασιών και μονάδων, ανοίγοντας τον δρόμο για παραγωγές τοπικές σε μικρότερη κλίμακα, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε περιοχής και αγοράς.

Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται συχνά για την δημιουργία φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων από σχεδιαστές και μηχανικούς, έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. (Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019)

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η Τρισδιάστατη εκτύπωση, όπως την γνωρίζουμε σήμερα, άρχισε τα μέσα του 1980. Μερικά από τα σημαντικότερα στάδια της είναι:

- 1984: Οι πρώτες πατέντες για τη Στερεολιθογραφία από τους Alain Le Méhauté, Olivier de Witte, Jean Claude André στη Γαλλία και Charles 'Chuck' Hull στις ΗΠΑ
- 1986: Ο Charles Hull κατασκευάζει τον πρώτο SLA εκτυπωτή
- 1988: 3D εκτύπωση μέσω laser για τη σύντηξη κονιοποιημένου υλικού (SLS)
- 1989: Πατέντα για εκτύπωση μέσω Fused Deposition Modelling
- 1999: Πρώτη κατασκευή συνθετικών ανθρώπινων οργάνων
- 2005: RepRap project. Εκτυπωτές ανοικτού κώδικα
- 2006: Λήξη πατεντών για την τεχνολογία FDM

- 2008: 1^{ος} φθηνός FDM εκτυπωτής «Darwin» RepRap
- 2011: Εκτύπωση του πρώτου αυτοκινήτου
- 2013: Η NASA εκτυπώνει στο διάστημα
- 2018: Φθηνοί εκτυπωτές ρητίνης

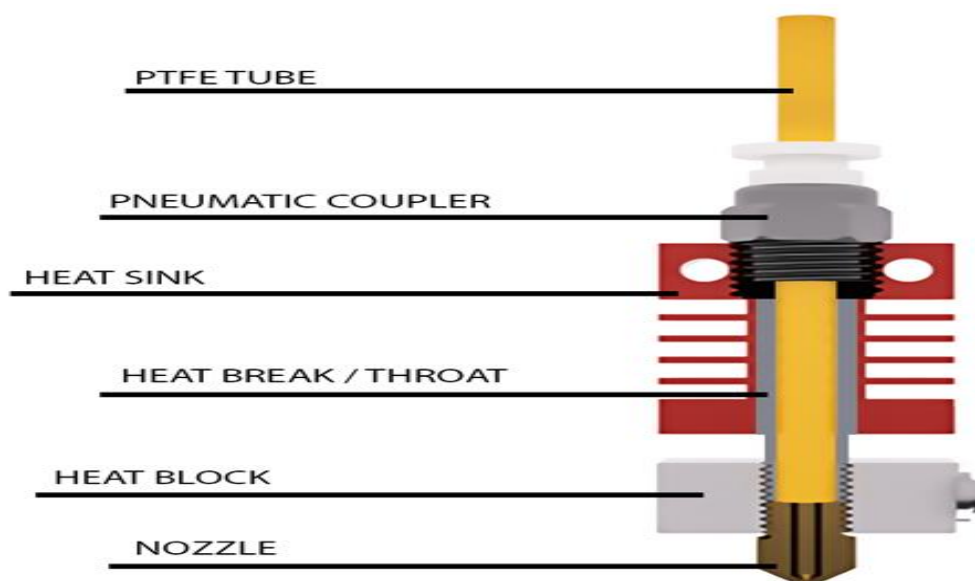
2.3 Κατασκευαστική Δομή ενός Τρισδιάστατου Εκτυπωτή

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

- Κεφαλή απόθεσης υλικού
- Μηχανισμός εξώθησης υλικού
- Πλάκα εκτύπωσης

2.3.1 Κεφαλή Απόθεσης Υλικού

Η κεφαλή απόθεσης υλικού αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια του εκτυπωτή. Έχει πολλούς ρόλους κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης και αποτελεί ένα από τα κρισιμότερα μέρη του. Ο μηχανισμός εξώθησης ωθεί το νήμα στην κεφαλή μέσω ενός κοχλία και φτάνει στο θερμαντικό μπλοκ. Με τη χρήση μίας αντίστασης αναπτύσσει υψηλές θερμοκρασίες για τη τήξη του νήματος. Το νήμα μέσω του μηχανισμού εξώθησης περνάει στο θάλαμο όπου θερμαίνεται και έπειτα ωθείται ως τηγμένο υλικό από το ακροφύσιο, στη πλάκα εκτύπωσης. (Kiranlal *et al.*, 2022)



Εικόνα 1: Κεφαλή Απόθεσης Υλικού¹

- **Pneumatic coupler:** Εξασφαλίζει ότι ο σωλήνας PTFE ή Teflon δεν μετακινείται.
- **Σύστημα ψύξης (heatsink και heat break):** Εξασφαλίζει ότι η ανώτερη περιοχή παραμένει αρκετά κρύα, ώστε να μην λιώσει το πλαστικό και βουλώσει η μύτη (clogging). Αυτό το μέρος λειτουργεί σε συνεργασία με τον ανεμιστήρα hotend.
- **Heat block:** Εκεί τοποθετείται το θερμόμετρο (thermistor) μαζί με τον μηχανισμό θέρμανσης (heater cartridge). Η θερμότητα μεταφέρεται από το heater μέσω του heat block στη μύτη (nozzle) και ρυθμίζεται από τον θερμοστάτη. Ως συνήθως, για να μειωθούν οι απώλειες θερμότητας του heat block, χρησιμοποιείται κάλυμμα από πυρίτιο (silicon sock).
- **Μύτη (nozzle):** Οι μύτες έχουν διάφορες διαμέτρους, ανάλογα με τη χρήση. Οι πολύ λεπτές είναι για μικρά κομμάτια με λεπτομέρεια, ενώ οι παχύτερες για δραστική επιτάχυνση της εκτύπωσης. Η πιο συχνή διάμετρος είναι 0.4mm.

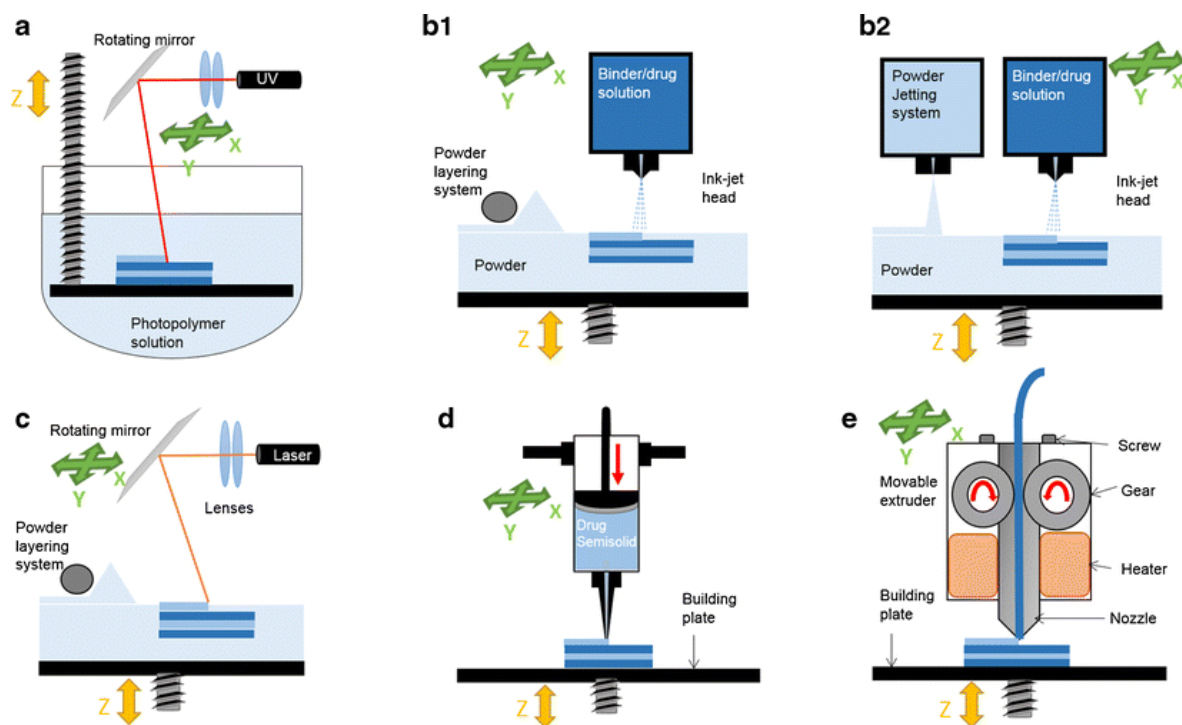
¹ Η εικόνα είναι από τον ιστότοπο <https://www.crealityexperts.com/bimetallic-heatbreak-install-hot-end> - προσπελάστηκε 2 Αυγούστου 2023

2.3.2 Μηχανισμός/Δοχείο απόθεσης Υλικού

Ο μηχανισμός εξώθησης υλικού είναι το εξάρτημα που τροφοδοτεί την κεφαλή απόθεσης στους εκτυπωτές FDM. Στους εκτυπωτές που χρησιμοποιούν μεταλλικές πούδρες δεν υπάρχει κεφαλή απόθεσης αλλά ένα δοχείο που αποθέτει την πούδρα και ένα ρολό που την λειαινεί. Ένα σύστημα με γρανάζια εισάγει το νήμα στο θάλαμο θέρμανσης. Η συχνότητα προώθησης των υλικών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, καθορίζει και την ταχύτητα με την οποία βγαίνει το ρευστοποιημένο νήμα. (Kiranlal *et al.*, 2022)

2.3.3 Πλάκα εκτύπωσης

Η πλάκα εκτύπωσης είναι το ωφέλιμο επίπεδο στο οποίο γίνεται η εκτύπωση του υλικού, και αποτελεί ένα σημαντικό τμήμα του εκτυπωτή. Είναι μία σταθερή και ευθυγραμμισμένη επιφάνεια. Ανάλογα με την τεχνολογία εκτύπωσης που χρησιμοποιείται, αλλάζει και το υλικό κατασκευής της, προκειμένου να αντέχει τις θερμοκρασίες που δημιουργούνται και να έχει την κατάλληλη προσκόλληση. Είναι συνήθως ασφαλισμένη στο σασί του εκτυπωτή, ή στο θάλαμο εκτύπωσης, για να αποφεύγεται η μετακίνηση της. Ενώ στην κάτω πλευρά της υπάρχει μηχανισμός που την μετακινεί στο τρισδιάστατο χώρο κατά τις οδηγίες του σχεδίου. Βάσει του υλικού ενδέχεται να είναι και θερμαινόμενη, με σκοπό την καλύτερη προσκόλληση του υλικού σε αυτήν. (Kiranlal *et al.*, 2022)



Εικόνα 2: Πλάκες Εκτύπωσης στις μεθόδους Τρισδιάστατης Εκτύπωσης²

2.4 Διαδικασία Εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ακολουθεί τα εξής βήματα, ανεξάρτητα από την μέθοδο και την τεχνολογία του εκτυπωτή που χρησιμοποιείται

2.4.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου μέσω CAD ή άλλων προγραμμάτων και με τη χρήση τρισδιάστατης σάρωσης

Τα δεδομένα τα οποία θα σταλούν στο εκτυπωτή προκειμένου να διαμορφώσει το αντικείμενο, δημιουργούνται από τη χρήση CAD ή κάποιου άλλου 3D σχεδιαστικού λογισμικού, διαφορετικά από τη σάρωση του αντικειμένου που επιθυμείτε η εκτύπωση. Η διαδικασία δημιουργίας αποτελεί το πρώτο στάδιο της εκτύπωσης, αυτό της σχεδίασης και ελέγχου της λειτουργικότητας του αντικειμένου.

² Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο https://www.researchgate.net/figure/Mechanism-of-various-3D-printing-technologies-a-Stereolithographic-SLA-b1-2_fig1_303364837 - προσπελάστηκε 2 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

Η εναλλακτική μέθοδος της σάρωσης υπαρκτών αντικειμένων λειτουργεί με τη χρήση τρισδιάστατων σαρωτών. Συλλέγουν δεδομένα για τη γεωμετρία του αντικειμένου και δημιουργούν ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο.

Η κύρια τεχνική σάρωσης είναι η λήψη δειγμάτων από πολλά διαφορετικά σημεία και γωνίες. Οι επικρατέστερες μέθοδοι είναι οι μέθοδοι επαφής με τη χρήση αρθρωτών βραχιόνων και οι μη-επαφής με τη αυτή της καθυστερημένης διάδοσης. (Jandyal *et al.*, 2022)

Οι αρθρωτοί βραχιόνες βασίζονται σε ένα σύστημα βραχιόνων σε πλήρη ελευθερία κίνησης, στην άκρη κάθε βραχίονα υπάρχουν αισθητήρες που συλλέγουν τα δεδομένα. Στη περίπτωση της καθυστερημένης διάδοσης, χρησιμοποιείται ένα λέιζερ.

Για τη ορθή δημιουργία του αντικειμένου είναι απαραίτητη η γνώση απόστασης της πηγής του λέιζερ καθώς και η οριζόντια και κατακόρυφες γωνίες που υπάρχουν μεταξύ της πηγής και του αντικειμένου.

Ενώ το ψηφιακό μοντέλο δημιουργείται μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται η ακτίνα για να φτάσει στο σημείο και να επιστρέψει η αντανάκλαση. (Srinivasan *et al.*, 2021)

2.4.2 Μετατροπή του ψηφιακού μοντέλου σε G-code

Ο όρος g-code αναφέρεται στο τεμαχισμό του τρισδιάστατου μοντέλου σε οριζόντια τμήματα, ώστε να μπορεί ο εκτυπωτής να δημιουργεί ένα στρώμα την φορά. Ο τεμαχισμός αυτός ονομάζεται τρισδιάστατο τεμάχιο εκτύπωσης και αποτελεί τη διαδρομή εκτύπωσης (πυκνότητα, γωνία, κέλυφος) που πρέπει να ακολουθήσει ο εκτυπωτής. Για τη δημιουργία του κώδικα χρησιμοποιούνται λογισμικά που ονομάζονται slicers. (3d hubs, 2022)

2.4.3 Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Μετά τη δημιουργία, το αρχείο G-code μεταφέρετε στο τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Ορίζονται οι παράμετροι εκτύπωσης, καθώς και γίνεται έλεγχος στην βάση εκτύπωσης.

Ο εκτυπωτής θα ακολουθήσει τη διαδρομή εκτύπωσης, και αποθέτοντας στρώση κατά στρώση θα δημιουργήσει το τελικό αντικείμενο.

2.4.4 Επεξεργασία τελικού αντικειμένου

Η μετά επεξεργασία που απαιτείται στο τελικό προϊόν αναφέρεται στις λειτουργίες ή εργασίες που πρέπει να εκτελεστούν.

Οι κύριες εργασίες που χρειάζονται κατά τη διαδικασία αυτή είναι, η αφαίρεση δομών υποστήριξης ή του υπερβολικού υλικού, η στίλβωση, ο χρωματισμός και η σκλήρυνση.

2.5 Τεχνολογίες Εκτύπωσης

2.5.1 SLA Στερεολιθογραφία

Η Στερεολιθογραφία είναι μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές 3d εκτύπωσης, ήταν η πρώτη που εφευρέθηκε, με τη πρώτη πατέντα να κατοχυρώνεται στον Chuck Hull ιδρυτή της 3D Systems Corporation το 1986. Χρησιμοποιεί φωτοευαίσθητη ρητίνη σε υγρή μορφή, συνήθως κάποιο τύπου φωτοπολυμερούς που αποθηκεύεται στη δεξαμενή.

Η δεξαμενή βρίσκεται κάτω από την πλατφόρμα, η οποία κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης κατεβαίνει σταδιακά και ανεβαίνει όσο το σχέδιο εκτυπώνεται.

Η διαδικασία εκτύπωσης αρχίζει με τη πλατφόρμα να οδηγείται στο βάθος της δεξαμενής, και ένα λέιζερ υπέρυθρων ακτινών χτυπάει την επιφάνεια της ρητίνης και προκαλεί στερεοποίηση δημιουργώντας έτσι την πρώτη στρώση του αντικειμένου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί η εκτύπωση. Χρησιμοποιείται σε τομείς υγείας, αυτοκινητοβιομηχανιών κλπ. (Bourell *et al.*, 2017)

Πλεονεκτήματα

Μεγάλη Λεπτομέρεια Εκτύπωσης

Υψηλή Ευστοχία και Ακρίβεια

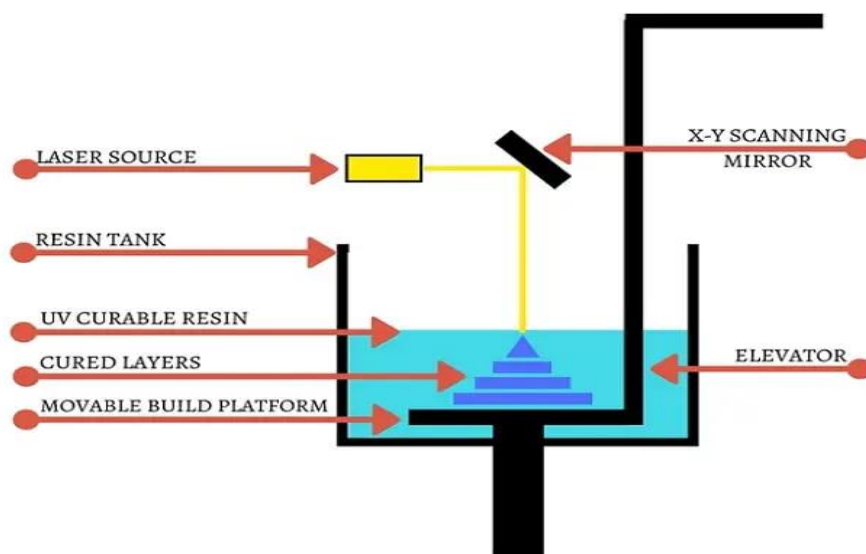
Δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων Σχεδίων

Μειονεκτήματα

Υψηλό Κόστος εξοπλισμού

Μικρός όγκος εκτύπωσης

Μεσαίο κόστος πρώτης ύλης



Εικόνα 3: Διαδικασία Εκτύπωσης SLA³

2.5.2 FDM Μοντελοποίηση Αποκομιδόμενης Αποθέσεως

Η τεχνική FDM είναι μία από τις πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες.

Η διαδικασία της εκτύπωσης ξεκινάει θερμαίνοντας το θερμοπλαστικό νήμα έως το σημείο τήξης του και το ακροφύσιο εναποθετεί το λιωμένο υλικό στην πλατφόρμα, τα ακροφύσια έχουν μέγεθος από 0.1mm έως και 0.03mm. Ανάλογα με το 3d σχέδιο το ακροφύσιο μετακινείται και ακολουθεί τις συντεταγμένες στους άξονες x,y,z.

Πιο συχνή χρήση για πρωτότυπα.(Ngo *et al.*, 2018)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Χαμηλό Κόστος Εξοπλισμού

Πληθώρα Υλικών

Εύκολο στη χρήση

Μεγάλος Όγκος Εκτύπωσης

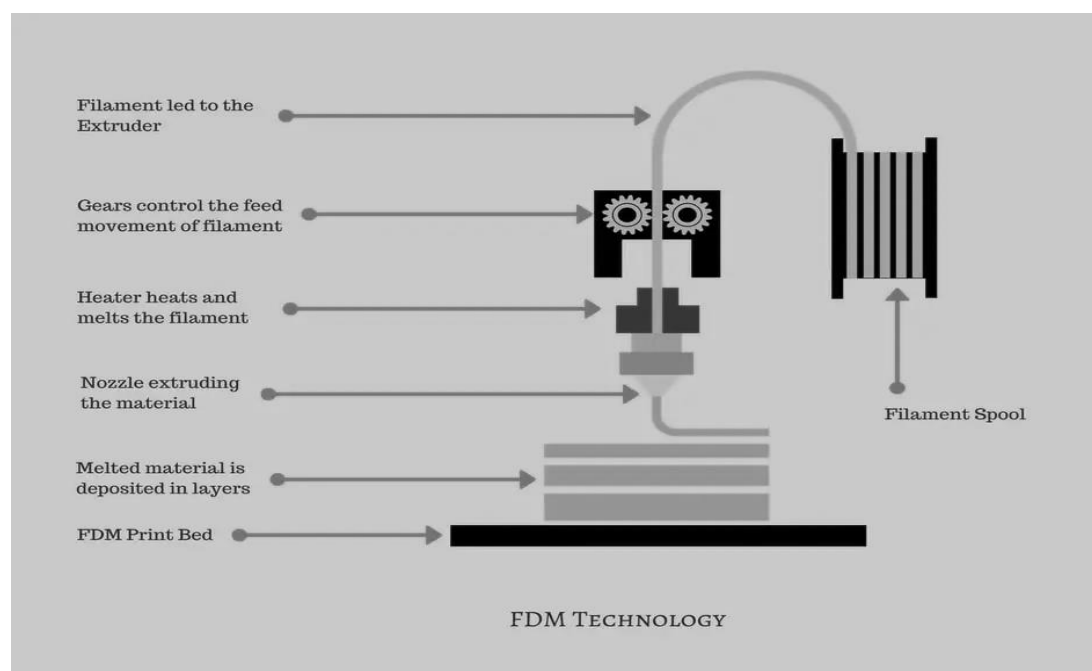
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μικρή τελική ποιότητα

³ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://manufactur3dmag.com/stereolithography-sla-3d-printing-works/> - προσπελάστηκε 3 Αυγούστου 2023

Μικρή λεπτομέρεια επιφάνειας

Χαμηλή ακρίβεια εκτύπωσης



Εικόνα 4: Διαδικασία Εκτύπωσης FDM⁴

2.5.3 SLS Selective Laser Sintering

Η τεχνολογία SLS χρησιμοποιεί υλικό με μορφή πούδρας, όπου ένα λέιζερ τήκει τα σωματίδια μεταξύ τους, ανά στρώση μέχρι να δημιουργηθεί το τελικό στερεό αντικείμενο.

Η διαδικασία λαμβάνει μέρος σε ένα θερμαινόμενο θάλαμο, και αρχικά ένα λεπτό στρώμα πούδρας στρώνεται στο θάλαμο εκτύπωσης και το λέιζερ κατευθύνεται πάνω στην επιφάνεια της πούδρας λιώνοντας τα σωματίδια της στα επιθυμητά σημεία, ανάλογα με το σχέδιο. Ο θάλαμος εκτύπωσης κατεβαίνει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.(Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019)

Είναι ιδανική για την κατασκευή ανταλλακτικών, πρωτοτύπων και λειτουργικών εξαρτημάτων.

⁴ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-3d-printing-technology/> - προσπελάστηκε 3 Αυγούστου 2023

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Πολύ πυκνά αντικείμενα

Μεγάλη Αντοχή

Τεράστια Ακρίβεια

Αξιοπρεπής Επιφάνεια

Δεν χρειάζεται στηρίξεις κατά την εκτύπωση

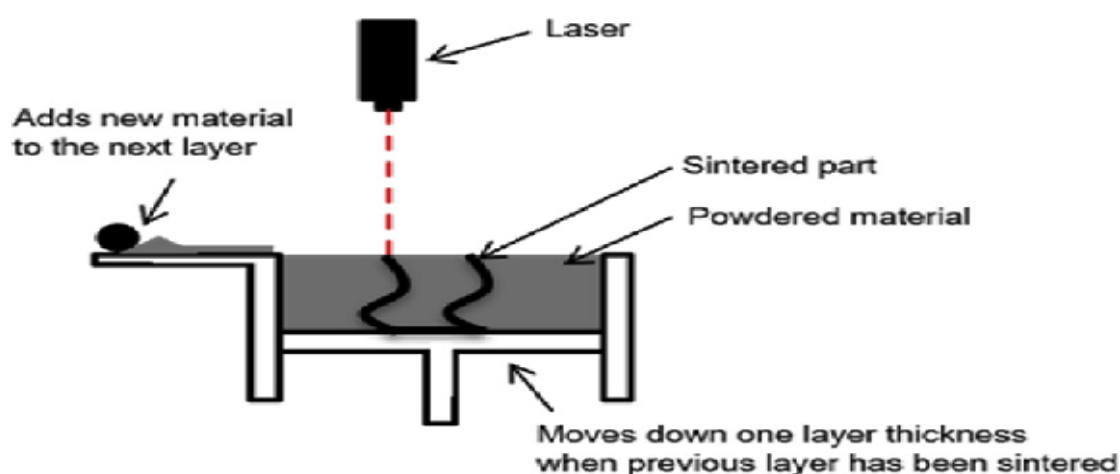
Μεγάλη γκάμα υλικών

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Υψηλό Κόστος Αγοράς Εξοπλισμού

Αργή Εκτύπωση

Υψηλό Κόστος Υλικών



Εικόνα 5: Διαδικασία Εκτύπωσης SLS⁵

2.5.4 DLP Digital Light Processing

Η DLP χρησιμοποιεί μία συσκευή ψηφιακού προβολέα προκειμένου να προβάλλει ολόκληρη την εικόνα κάθε στρώματος σε όλη τη πλατφόρμα. Επειδή ο προβολέας είναι μία ψηφιακή οθόνη, η εικόνα κάθε στρώσης αποτελείται από τετραγωνικά εικονοστοιχεία (pixels). Τα pixel εξαιτίας του φωτός που προβάλλεται δημιουργούν μια μάσκα, λευκό όπου πρέπει να γίνει πολυμερισμός, μαύρο όπου δεν χρειάζεται.

⁵ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο https://www.researchgate.net/Εικόνα/The-SLS-printing-process_fig1_328604028 - προσπελάστηκε 3 Αυγούστου 2023

Χρησιμοποιείται για τη κατασκευή κοσμημάτων, στην οδοντιατρική καθώς και κατά τη διάρκεια σχεδιασμών προϊόντων.(Iftekar *et al.*, 2023)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μέγιστη ανάλυση σε υλοποιήσεις μικρής έκτασης

Γρήγορη εκτύπωση μεγάλων τμημάτων

Μεγάλη ποικιλία ρητινών

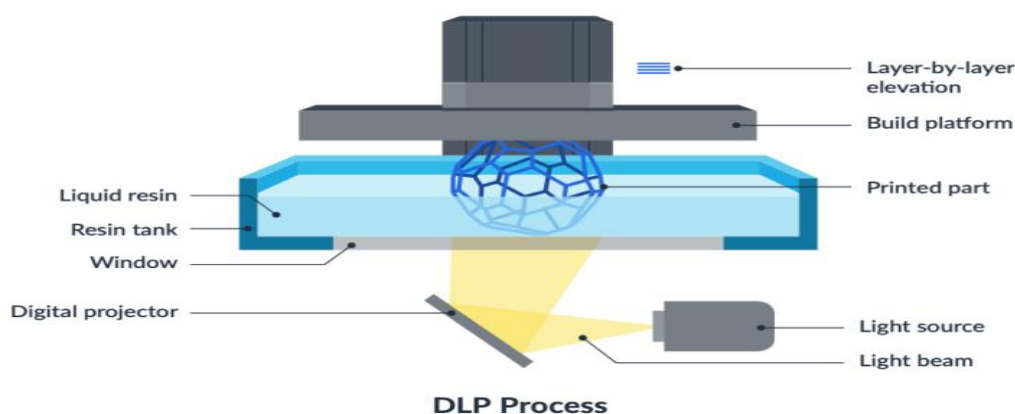
Πιο εύκολη χρήση ρητινών, λόγω ρύθμισης της έκθεσης προβολής

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μειωμένη Ακρίβεια στα άκρα

Ανάγκη Φινιρίσματος

Μικρή ακρίβεια σε μεγάλες υλοποιήσεις



Εικόνα 6: Διαδικασία Εκτύπωσης DLP⁶

2.5.5 MJF Multi Jet Fusion

Αναπτύχθηκε από την HP και χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό inkjet printing και τήξη πούδρας στο επίπεδο. Η διαδικασία εκτύπωσης αρχίζει απλώνοντας ένα επίπεδο θερμοπλαστικής πούδρας στην πλατφόρμα εκτύπωσης, το σύστημα inkjet printing επιλεκτικά εφαρμόζει μία στρώση παράγοντα σύντηξης που βοηθάει τα σωματίδια να

⁶ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://nexa3d.com/blog/choosing-between-resin-3d-printers-and-filament-3d-printers/> - προσπελάστηκε 4 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

κολλήσουν μεταξύ τους. Επίσης τοποθετεί έναν παράγοντα που βελτιώνει τη λεπτομέρεια της επιφάνειας του τελικού αντικειμένου.

Αφού οι παράγοντες εφαρμοστούν στην στρώση το μηχάνημα ρίχνει μία πηγή φωτός, όπως μίας υπέρυθρης λάμπας (Kundu and Mandal, 2022)

2.5.6 Polyjet

Η τεχνολογία Polyjet λειτουργεί σαν την διαδικασία του inkjet, αλλά η διαφορά τους είναι ότι εκρέει μικροσκοπικά σταγονίδια φωτοπολυμερών υλικών πάνω στην επιφάνεια. Τα υλικά που χρησιμοποιείται στην τεχνική αυτή σκληραίνουν όταν εκτίθενται σε υπεριώδες φως.

Συνήθως οι μηχανές αυτές έχουν δύο (2) ή περισσότερες κεφαλές που μπορούν να εκρέουν ακόμα και διαφορετικά υλικά παράλληλα. Χρησιμοποιείται στη δημιουργία ιατρικών εργαλείων και αναλωσίμων, ακόμα και σε ανταλλακτικά και τελικά προϊόντα σε αυτοκινητοβιομηχανίες. (Stratasys)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μεγάλη ποικιλία χρωμάτων στα υλικά

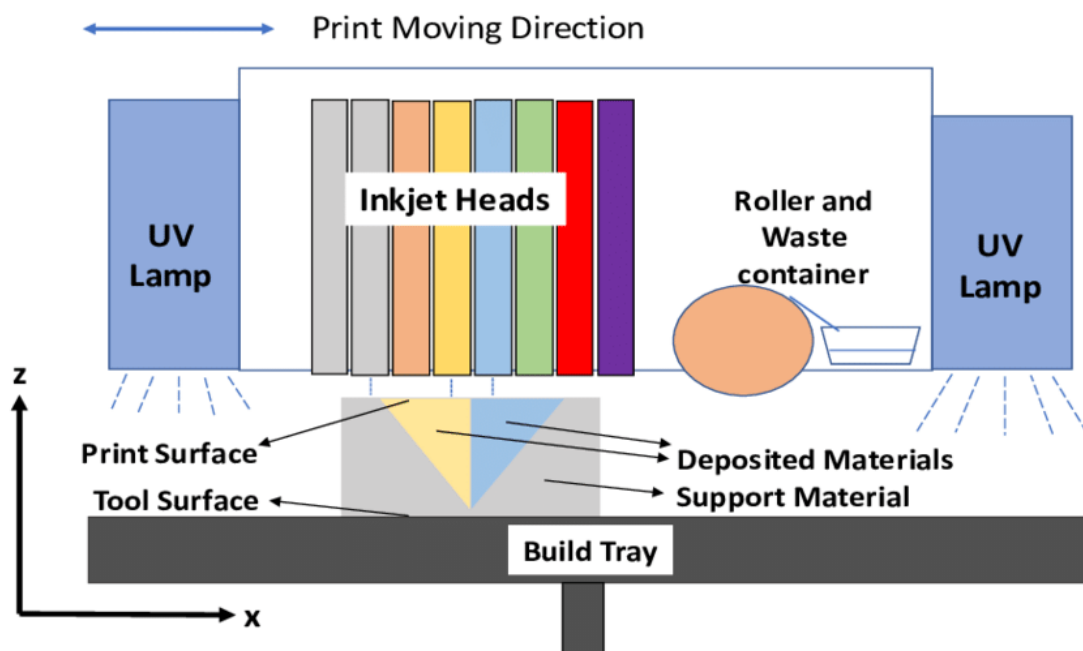
Καλή Λεπτομέρεια

Μεγάλη Διαβάθμιση

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Μικρός Όγκος κατασκευής

Αρκετά δύσχρηστο στη λειτουργία



Εικόνα 7: Διαδικασία Εκτύπωσης Polyjet⁷

2.5.7 DMLS Direct Metal Laser Sintering

Δημιουργεί κομμάτια από μεταλλικές πούδρες τις οποίες πυροσυσσωματώνει με τη χρήση υψηλούς ισχύος λέιζερ.

Είναι επίσης γνωστή ως SLM Selective Laser melting ή LPBF Laser Powder bed fusion, η διαδικασία ξεκινάει με την ανατοποθέτηση της πούδρας στο επίπεδο και έπειτα το λέιζερ λιώνει το υλικό στις επιθυμητές περιοχές δημιουργώντας ένα στερεό τμήμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως το τέλος της εκτύπωσης. Το λέιζερ που χρησιμοποιείται συνήθως είναι οπτικών ινών που κατευθύνεται από ένα υπολογιστικό σύστημα που ακολουθεί το προκαθορισμένο σχέδιο. Χρησιμοποιείται για τελικά προϊόντα διαχείρισης υγρών, συστήματα cooling, κινητήρες κλπ. (Park *et al.*, 2022)

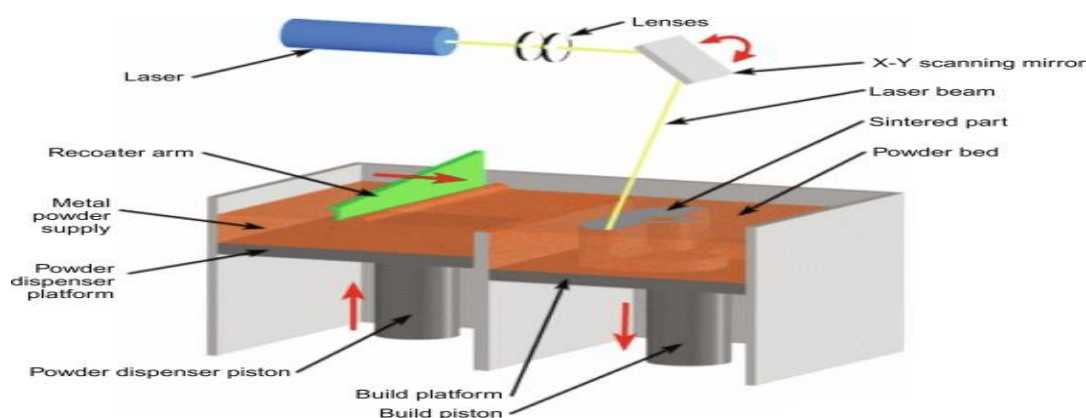
⁷ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο https://www.researchgate.net/Εικόνα/PolyJet-printing-process_fig1_327011848 - προσπελάστηκε 5 Αυγούστου 2023

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Μεγάλη γκάμα μετάλλων
- Δυνατότητα εκτύπωσης περίεργων γεωμετριών
- Υψηλή Δύναμη
- Μεγάλη Αντοχή
- Μεγάλη Πυκνότητα
- Ανθεκτικότητα σε μεγάλα βάρη και μηχανικό στρες

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Μικρότερος όγκος εκτύπωσης
- Υψηλό κόστος αγοράς εξοπλισμού
- Υψηλό Κόστος υλικών
- Μεγάλη Διάρκεια εκτύπωση (ώρες έως και μέρες)



Εικόνα 8: Διαδικασία εκτύπωσης DMLS⁸

2.5.8 EBM Electron Beam Melting

Η τεχνολογία EBM χρησιμοποιεί μία ακτίνα ηλεκτρονίων υψηλής ισχύος προκειμένου να λιώσει και να τήξει τη μεταλλική πούδρα που τοποθετείται στο επίπεδο. Μοιάζει αρκετά με το DMLS, με διαφορά ότι δεν χρησιμοποιεί λέιζερ. Η εκπομπή της δέσμης υψηλής ισχύος εκπέμπεται πάνω στη πλατφόρμα με τη χρήση κατόπτρων και ειδικού υπολογιστικού συστήματος, με μεγάλη ακρίβεια. Χρησιμοποιείται στην

⁸ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-metal-laser-sintering> - προσπελάστηκε 5 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

αεροδιαστημική για τη κατασκευή περίπλοκων τελικών προϊόντων, καθώς και στην ιατρική για εξαρτήματα και ανταλλακτικά. (Bourell *et al.*, 2017)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Υψηλή Ποιότητα

Υψηλή Ακρίβεια

Μεγάλη Λεπτομέρεια

Αντοχή σε Μηχανικά Φορτία

Δυνατότητα Κατασκευής περιέργων γεωμετρικά σχεδίων

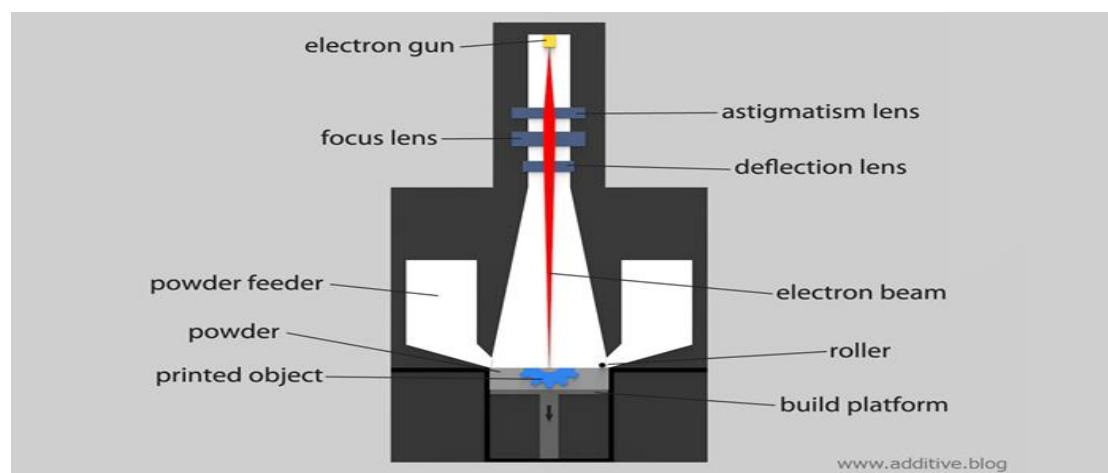
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Υψηλό Κόστος Αγοράς Μηχανήματος

Υψηλή Τιμή Υλικών

Μικρός Όγκος Εκτύπωσης

Μεγάλος Χρόνος Εκτύπωσης



Εικόνα 9: Διαδικασία Εκτύπωσης EBM⁹

2.6 Υλικά που χρησιμοποιούνται στη Τρισδιάστατη Εκτύπωση

2.6.1 Πλαστικά

⁹ Η Εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.3d.directory/community/what-is-electron-beam-melting> - προσπελάστηκε 6 Αυγούστου 2023

Τα πλέον διαδεδομένα υλικά που χρησιμοποιούνται στο 3d printing είναι τα πλαστικά, χωρίζονται σε δύο ομάδες, τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρόμενα.

Είναι χαμηλά στο κόστος, με πολλές διαφορετικές ιδιότητες, η χρήση τους είναι από οικιακή έως και επαγγελματική.

Θερμοπλαστικά

Είναι ένας τύπος πλαστικού που μπορεί να μορφοποιηθεί και να αναμορφωθεί αρκετές φορές σε υψηλές θερμοκρασίες. Χάρη στη διαδικασία χύτευσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό από την άποψη της ανακύκλωσης, καθώς μπορεί να αναδιαμορφωθεί για να τις αναμορφώσει και να τους δώσει μια νέα ζωή. Καθώς λιώνουν τα πλαστικά, υλικά που χάνουν τις ιδιότητές τους μπορούν να αναμορφωθούν. Το πρόβλημα είναι ότι γίνεται όλο και λιγότερο ανακυκλώσιμο και δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί.

1. ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene

Είναι ένα πολυμερές με μεγάλη αντοχή, σε μηχανικό στρες και θερμοκρασία. Χρησιμοποιείται στις περισσότερες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, ακόμα και στους FDM.

Η εκτύπωση όμως με αυτό το υλικό πολλές φορές είναι δύσκολη, διότι έχει την τάση να συστέλλεται και είναι πολύ ευαίσθητο στις απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας. Αποτελεί μία συχνή επιλογή υλικού γιατί κατά την τελική του επεξεργασία, μετά της εκτύπωσης, δύναται να τριφτεί, βαφτεί και να λουστραριστεί. Ιδιότητες που αυξάνουν την τελική του εξωτερική επιφάνεια οπτικά και λειτουργικά, αφού αφαιρούνται όλες οι προεξοχές και ατέλειες. (Zhu *et al.*, 2021)



Εικόνα 10: Αντικείμενο κατασκευασμένο από ABS¹⁰

2. PLA Polylactic Acid

Είναι το πιο φιλικό στο περιβάλλον υλικό που χρησιμοποιείται στη τρισδιάστατη εκτύπωση. Είναι βιοδιασπώμενο και εύκολο στη χρήση ακόμα και για ερασιτέχνες. Ανήκει στην οικογένεια των πολυμερών και δημιουργείται από ανανεώσιμες βιομάζες, όπως το άμυλο καλαμποκιού και τα ζαχαροκάλαμα, κάτι που το κάνει ένα εξαιρετικά βιώσιμο ανταλλακτικό έναντι των άλλων πλαστικών που είναι όλα βασισμένα στο πετρέλαιο και τα υποπαράγωγά του.

Είναι άοσμο και δεν παράγει αέρια κατά την θέρμανση του, μειώνοντας την τοξικότητα του. Επίσης επειδή παράγεται από βιομάζες έχει χαμηλό κόστος αγοράς, με μεγάλη γκάμα χρωμάτων και πάχους.

Η ιδιότητα του να βιοδιασπαστεί, όταν εκτεθεί σε υγρασία και οξυγόνο το κάνει τη βέλτιστη επιλογή για προϊόντα που έχουν μικρή διάρκεια ζωής, όπως για παράδειγμα παιχνίδια, αρτιστικά αντικείμενα, συσκευασίες. (Zhu *et al.*, 2021)

¹⁰ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://3dwithus.com/abs-filament> - προσπελάστηκε 5 Αυγούστου 2023



Εικόνα 11: Benchy κατασκευασμένο από PLA¹¹

3. PET/PETG

Τα υλικά PET (τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο) και το PETG (τροποποιημένο με γλυκόζη PET), είναι θερμοπλαστικά, ευρέως χρησιμοποιούμενα στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Συγκεκριμένα το PETG είναι μία από τις τροποποιημένες εκδόσεις του PET, με τη χρήση γλυκόζης.

Τα υλικά αυτά προσφέρουν μεγάλη αντοχή, ανθεκτικότητα και ευελιξία στο τελικό προϊόν. Συμπληρωματικά το PETG ενδείκνυται για κατασκευές που απαιτούν μεγαλύτερη αντοχή στις κρούσεις, διότι προσδίδει μεγαλύτερη σκληρότητα έναντι του PET.

Συνήθως χρησιμοποιούνται σε τρισδιάστατους εκτυπωτές τεχνολογίας FDM, όπου τήκονται και εξωθούνται στη πλατφόρμα κατασκευής μέσω του ακροφύσιου. Η ιδιότητα τους να μπορούν να τήκονται πολλές φορές δίχως να χάνουν τις ιδιότητες του. Επιπλέον η χαμηλή τοξικότητα του, και η αντοχή τους στην υγρασία και στις χημικές

¹¹ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/pla/> - προσπελάστηκε 6 Αυγούστου 2023

ουσίες, τα κάνει μία βέλτιστη επιλογή στην κατασκευή φιαλών, συσκευασιών τροφίμων και δοχείων.

Σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης των υλικών PET και PETG στη παραγωγική διαδικασία με τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η ευκολία χρήσης, η προσιτή τους τιμή και η μεγάλη ποικιλία χρωμάτων που διατίθενται τα υλικά. Ωστόσο η χαμηλή θερμοκρασία τήξης τους, τα κάνει επιρρεπή σε στρεβλώσεις και συρρικνώσεις κατά την διάρκεια εκτύπωσης.(Shahrubudin, Lee and Ramlan, 2019)



Εικόνα 12: Πιάτα κατασκευασμένα από PET/PETG¹²

4. HIPS

Το HIPS (πολυστυρένιο υψηλής πρόσκρουσης) είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό που συνδυάζει τις ιδιότητες, σκληρότητας και αντοχής του καουτσούκ, με αυτές του πολυστυρένιου.

Συνήθως χρησιμοποιείται σε εκτυπωτές FDM και το σημαντικότερο πλεονέκτημα του, είναι η συμβατότητα εκτύπωσης του με άλλα υλικά όπως το ABS. Στις περιπτώσεις αυτές το HIPS λειτουργεί ως υλικό στήριξης και έπειτα διαλύεται με τη χρήση διαλύτη, αφήνοντας μόνο το εκτυπωμένο τελικό προϊόν.

Είναι ένα υλικό που μπορεί, χωρίς δυσκολία, δύνανται να τριφθεί, βαφτεί, κολληθεί και φινιριστεί, καθιστώντας το μια δημοφιλή επιλογή για χομπίστες και σχεδιαστές.

¹² Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://3dwithus.com/petg-filament-review-waterproof-pros-cons> - προσπελάστηκε 6 Αυγούστου 2023

Είναι ένα προσιτό υλικό με ευκολία στη χρήση και χαμηλή τιμή. Η ευθραυστότητα του, το καθιστά επιρρεπές σε ρωγμές από το μηχανικό στρες. (Formlabs)

5. TPU

Το TPU (θερμοπλαστική πολυουρεθάνη) είναι ένα εύκαμπτο νήμα. Είναι μια δημοφιλής επιλογή για την κατασκευή εξαρτημάτων, προστατευτικών θηκών, εύκαμπτων συνδέσμων και αναλωσίμων που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική, σε Βιομηχανίες και στη Ρομποτική.

Οι ιδιότητες του, που το κάνουν τόσο εύχρηστο σε εύρος παραγωγικών διαδικασιών είναι η ευελιξία και η ελαστικότητα του. Απορροφά την ενέργεια από τις κρούσεις και έχει μεγάλη αντοχή στους κραδασμούς. Επίσης έχει μεγάλη αντοχή σε χημικές ουσίες, όπως έλαια, γράσα και διαλύτες. Επιπλέον τα προϊόντα εκτυπωμένα με TPU παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στη τριβή, και είναι κατάλληλα για συνεχή χρήση. Η απαλότητα και η ευκαμπτότητα του, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, όπως παραμόρφωση του εκτυπωμένου ή ακόμα και φράξιμο του ακροφύσιου. Προτιμάται η χρήση του για απλές κατασκευές που δεν απαιτούν μεγάλη λεπτομέρεια. (Formlabs)



Εικόνα 13: Αντικείμενο κατασκευασμένο από TPU¹³

6. PVA (Πολυβινυλική Αλκοόλη)

Χρησιμοποιείται συνήθως ως δομή στήριξης για πολύπλοκα η προεξέχοντα μέρη.

Κατά τη διάρκεια εκτυπώσεων διπλής εξώθησης, εκτυπώνεται παράλληλα με το κύριο υλικό, και παρέχει προσωρινή στήριξη κατά την διάρκεια της εκτύπωσης.

Είναι συμβατό με τα περισσότερα θερμοπλαστικά (PLA, ABS, PETG), αφού προσκολλάει σε αυτά χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στην εκτύπωση τους.

Η βασική του ιδιότητα της υδατοδιάλυσης το καθιστά συχνή επιλογή, επειδή στην μετεπεξεργασία του τελικού αντικειμένου, βυθίζοντας στο σε νερό, αφαιρείται ευκολά, δίχως την παρουσία σημαδιών η υπολειμμάτων.

Είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο υλικό για εκτυπώσεις σύνθετων γεωμετρικών σχεδίων ή σχεδίων με εσωτερικές κοιλότητες. Η υγροσκοπικότητα του, το αποτρέπει από το να χρησιμοποιηθεί ως βασικό υλικό εκτύπωσης. (Ngo *et al.*, 2018)

¹³ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο

<https://www.thefabricator.com/additivereport/news/additive/forward-am-partners-with-shapeways-to-enable-am-production-at-scale> - προσπελάστηκε 7 Αυγούστου 2023



Εικόνα 14: Φιγούρα, που η στήριξής της είναι κατασκευασμένη απο ABS¹⁴

7. Carbon Fiber (νημάτιο ενισχυμένο με ίνες άνθρακα - Ανθρακόνημα)

Το Carbon Fiber είναι ένα υλικό που δημιουργείται από ένα θερμοπλαστικό, συνήθως ABS ή PLA, με τη ζεύξη ινών άνθρακα. Έχει υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, διότι οι ίνες του άνθρακα παρέχουν ενισχυμένη δομική ακεραιότητα και ανθεκτικότητα, ενώ το βάρος του παρεμένει μικρό. Σε σύγκριση με τα πλαστικά νήματα έχει μεγαλύτερη θερμική αντοχή. Επίσης το Ανθρακόνημα συμβάλει στη μείωση των παραμορφώσεων και των συρρικνώσεων κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, με αποτέλεσμα βέλτιστη ακρίβεια τελικών διαστάσεων.

Τα αρνητικά χαρακτηριστικά του ανθρακονήματος είναι το υψηλό κόστος αγοράς του, η δυσκολία χρήσης στις τρισδιάστατες εκτυπώσεις, διότι είναι ένα εύθραυστο θερμοπλαστικό. Απαιτείται υψηλή κατάρτιση για την εκτύπωση του, διότι κατάλληλες ρυθμίσεις και τεχνικές είναι αναγκαίες για την αποφυγή καταστροφής

¹⁴ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.3dhub.gr/product-tag/pva/> - προσπελάστηκε 7 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης των ακροφυσίων. Στις εκτυπώσεις με Ανθρακόνημα, συχνά παρατηρείται φθορά και φραγμοί στα ακροφύσια.

Τα τελικά προϊόντα που εκτυπώνονται με ανθρακονηματα, είναι συνηθέστερα ρομποτικά τμήματα και εξαρτήματα, που αξιοποιούνται στις βιομηχανίες τις αεροδιαστημικής, αυτοκινητοβιομηχανίας, και βιομηχανικών εξοπλισμών. (Formlabs)



Εικόνα 15: Αναλώσιμα κατασκευασμένα από Carbon Fiber¹⁵

2.6.2 Resin (Ρητίνες)

Οι Ρητίνες χρησιμοποιούνται στου εκτυπωτές που εκτυπώνουν με τεχνικές SLA ή DLP. Στερεοποιούνται όταν εκτίθενται σε μήκη κύματος φωτών, και επιλεκτικά σκληραίνουν, μέσω της χρήσης λέιζερ ή προβολέα.

Η υψηλή λεπτομέρεια και ανάλυση των τελικών αντικειμένων, επιτρέπουν τη παραγωγή περίπλοκων αντικειμένων, με ανάγκη ακρίβειας λεπτών χαρακτηριστικών και λείων επιφανειών. Οι ρητίνες διατίθενται για αγορά σε πολλαπλές συνθέσεις, καλύπτοντας ένα μεγάλο φάσμα ιδιοτήτων. Συγκεκριμένα στις συνθέσεις αυτές περιλαμβάνονται ρητίνες στοχευμένες στις μηχανικές ιδιότητες, εύκαμπτες, χυτές κ.α. Η μεγάλη γκάμα ρητινών, επιτρέπει εκτυπώσεις προϊόντων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες.

¹⁵ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.imeche.org/news/news-article/nylon-carbon-fibre-printer-makes-strong-light-and-customisable-parts-for-drones-and-robots> - προσπελάστηκε 8 Αυγούστου 2023

Έχουν περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες, ειδικά η ανθεκτικότητα τους και ενδέχεται να είναι επιρρεπής σε σπασίματα ή παραμορφώσεις.

Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ιατρικών αναλωσίμων, στις τέχνες και όπου απαιτείται η υψηλή ακρίβεια και λεπτομέρεια. (Tamez and Taha, 2021)



Εικόνα 16: Οδοντικά Εμφυτεύματα κατασκευασμένα από Ρητίνη¹⁶

2.6.3 Μέταλλα

1. Ανοξείδωτο Ατσάλι

Το ανοξείδωτο ατσάλι ή χάλυβας είναι ένα υλικό, που συνηθέστερα χρησιμοποιείται στις εκτυπώσεις με τεχνολογία SLS ή DMLS. Οι τεχνολογίες αυτές κάνουν σύντηξη στρωμάτων πούδρας με τη χρήση υψηλής ισχύος λέιζερ.

Ο χάλυβας, όταν χρησιμοποιείται ως υλικό μεταφέρει τις εξαιρετικές του μηχανικές ιδιότητες και στο τελικό προϊόν. Η υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα, η αντίσταση στον εφελκυσμό. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση όπως σκουριά ή οξείδωση, καθώς και σε άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Είναι ευέλικτα σχεδιάσιμο υλικό που επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετρικά σχεδίων, που οι παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής θα ήταν δύσκολο και οικονομικά ασθενέστερο να παράγουν.

¹⁶ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.cadfab3d.de/en/> - προσπελάστηκε 6 Αυγούστου 2023

Παρόλα αυτά έχει περιορισμένη ποικιλία υλών, διότι η γκάμα κραμάτων ανοξείδωτου χάλυβα, που διατίθενται για χρήση στις τρισδιάστατες εκτυπώσεις είναι περιορισμένη, επίσης απαιτείται εκπαιδευμένο προσωπικό για την διαδικασία της εκτύπωσης.

Οι συχνότερες χρήσεις του χάλυβα είναι η κατασκευή ανταλλακτικών για βιομηχανίες, όπως αεροδιαστημική, ιατρική και αυτοκινητοβιομηχανίες. Πρόκειται για την φθηνότερη μορφή εκτύπωσης μετάλλου και είναι πολύ ισχυρή για μεγάλες εκτυπώσεις. (Schmidt *et al.*, 2017)



Εικόνα 17: Εξαρτήματα κατασκευασμένα από Ανοξείδωτο Ατσάλι¹⁷

2. Τιτάνιο

Το τιτάνιο είναι ένα πολύ ισχυρό, ελαφρύ, με χαμηλή πυκνότητα και ανθεκτικό στη διάβρωση υλικό. Χρησιμοποιείται στις εκτυπώσεις SLS και DMLS, και χρειάζεται ένα πολύ δυνατό λέιζερ, εξαιτίας του υψηλού σημείου τήξης του.

Χρησιμοποιείται σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης, καθώς και σε βιομηχανίες όπως της αεροδιαστημικής, αυτοκινητοβιομηχανίας για την κατασκευή κινητήρων, και οχημάτων. Επίσης, είναι δυνατή η κατασκευή ορθοπεδικών υλικών και αναλωσίμων και εμφυτευμάτων στην οδοντιατρική, αφού είναι ένα μη τοξικό υλικό για τον άνθρωπο. (Duda and Raghavan, 2016)

¹⁷ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://all3dp.com/2/stainless-steel-3d-printer-how-to-3d-print-stainless-steel/> - προσπελάστηκε 6 Αυγούστου 2023



Εικόνα 18: Εξαρτήματα για χειρουργείο Ισχίου κατασκευασμένα από Τιτάνιο¹⁸

2.6.4 Κεραμικά

Τα κεραμικά υλικά είναι ικανά να αντέξουν υψηλές θερμοκρασίες, διάβρωση και χρήση. Οι συνηθέστεροι τύποι κεραμικών που χρησιμοποιούνται στη τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η αλουμίνα και το καρβίδιο του πυριτίου. Τα κεραμικά υλικά συνήθως εκτυπώνονται με την τεχνολογία SLS.

Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχή και ανθεκτικότητα στο στρες, κάτι που τα καθιστά ιδανικά για κατασκευές που απαιτούν υψηλή απόδοση, περίπλοκες γεωμετρίες και λεπτομέρειες.

Έχουν μεγάλο κόστος αγοράς και πολλές φορές εξαιτίας των μεγάλων θερμοκρασιών που απαιτούνται για την τήξη τους, παρατηρείται θραύση ή σκέβρωση των εκτυπωμένων προϊόντων. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, προτείνεται η χρήση υβριδίων κεραμικών υλικών, με τη χρήση μεταλλικής πούδρας ή πολυμερών.

Χρησιμοποιούνται, σαν υλικά για την εκτύπωση ιατρικών εμφυτευμάτων, ηλεκτρονικών αναλωσίμων και μηχανικά εξαρτήματα. (Chen *et al.*, 2019)

¹⁸ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://all3dp.com/1/3d-printing-orthopedics-knee-hip-spine-implants/> - προσπελάστηκε 6 Αυγούστου 2023



Εικόνα 19: Εμφυτεύματα για Οδοντιατρική Χρήση κατασκευασμένα από Κεραμικά¹⁹

2.7 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Χρήσης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης

2.7.1 Πλεονεκτήματα

1) Σχεδιασμός

Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει ταχύτερο σχεδιασμό πρωτοτύπων και τις επαναληπτικές διαδικασίες σχεδίασης που ενδέχεται να χρειαστούν σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, όπως η χύτευση ή η κατεργασία με CNC.

Η ευκολότερη και ταχύτερη μετατροπή των ψηφιακών σχεδίων σε φυσικά αντικείμενα, οδηγεί σε γρηγορότερη τελική αξιολόγηση και εάν χρειάζεται διόρθωση του σχεδίου. Μειώνεται ο χρόνος που απαιτείται για την ανάπτυξη νέων προϊόντων, προσδίδοντας μεγάλο πλεονέκτημα στη ταχύτερη απόκτηση μεριδίου στην αγορά. Επιτρέπει τη ενσωμάτωση περίπλοκων γεωμετριών, οργανικών δομών και σχημάτων, διότι έχει μεγάλη ευελιξία για καινοτομία και δημιουργικότητα. (Attaran, 2017)

¹⁹ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://avantdental.com.au/news/pros-and-cons-of-an-in-house-dental-milling-machine/> - προσπελάστηκε 7 Αυγούστου 2023

2) Ωφέλεια Κόστους

Σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, η παραγωγή με τρισδιάστατη εκτύπωση μειώνει το κόστος εργαλείων που χρειάζονται, διότι το παραχθέν αντικείμενο τυπώνεται εξ ολοκλήρου από το τρισδιάστατο εκτυπωτή. Αυτό εξαλείπτει την ανάγκη αγοράς εργαλείων, αναλωσίμων και μητρών.

Η ανάγκη για συναρμολόγηση επίσης μειώνεται, διότι παράγονται τελικά προϊόντα που χρειάζονται μικρότερο όγκο τελικής επεξεργασίας και συναρμολόγησης. Επίσης οι παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής όπως αυτή του CNC που είναι αφαιρετική μέθοδος κατασκευής, δημιουργούν μεγάλες ποσότητες αποβλήτων, οι οποίες δεν θα υπάρχουν στο ίδιο βαθμό ως κόστος ανακύκλωσης και διαχείρισης όταν χρησιμοποιείται η τρισδιάστατη εκτύπωση.

Τέλος παρατηρείται επίσης μεγάλη ανάγκη ανακατασκευής και απόκτησης νέων εργαλείων, προκειμένου να επιτευχθεί εξατομίκευση στη παραγωγική δραστηριότητα. Σε αντίθεση, η παραγωγή με τρισδιάστατη εκτύπωση χρήζει μόνο αλλαγής σχεδιασμού του αντικειμένου, με αποτέλεσμα την οικονομικότερη εξατομίκευση με μικρές αλλαγές στην παραγωγή και στα αναγκαία εργαλεία. Αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή μείωσης του κόστους ειδικά σε προσωποποιημένα αντικείμενα η μικρού όγκου παραγωγές. (Attaran, 2017)

3) Επιτάχυνση της Παραγωγής

Μία από τις βέλτιστες χρήσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η ικανότητα παραγωγής ταχίστων πρωτοτύπων που οι παραδοσιακές μέθοδοι χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να καταφέρουν. Με τη τρισδιάστατη εκτύπωση σε μειωμένο χρόνο ένα ψηφιακό σχέδιο μετατρέπεται σε φυσικό αντικείμενο, κάτι που οδηγεί σε γρηγορότερες διορθώσεις και αλλαγές που ενδέχεται να χρειαστούν. Ο παραγωγικός κύκλος από την ιδέα στην αγορά συνολικά μειώνεται.

Επιπρόσθετα, η ταυτόχρονη παραγωγή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, και η εύκολη επεκτασιμότητα της παραγωγικής ισχύς της οδηγεί σε μείωση των περιορισμών που υπάρχουν στις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, όπως οι πολλές φάσεις παραγωγής και η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων. (Attaran, 2017)

4) Παραγωγή κατά παραγγελία

Η εκτύπωση κατά παραγγελία αναφέρεται στην κατασκευή προϊόντων, βάσει συγκεκριμένων αναγκών των πελατών ή της αγοραίας ζήτησης. Με τη τρισδιάστατη εκτύπωση, οι εταιρείες αποκτούν ευρύτερη προσαρμογή των παραμέτρων των προϊόντων. Δημιουργούνται ευκολότερα αγαθά εξατομικευμένα στις ανάγκες των πελατών με μικρότερο κόστος.

Με την παραγωγή κατά παραγγελία μειώνεται η πολυπλοκότητα στην εφοδιαστική αλυσίδα, με τη μείωση των βρόχων της και κατορθώνεται η συνολική απαίτηση μικρότερων αποθεμάτων. Τέλος η δοκιμή νέων προϊόντων είναι ταχύτερη στην αγορά. (Behm *et al.*, 2018)

5) Περιβαντολογικά Φιλική

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένας τύπος παραγωγής που προσφέρει πολλά οφέλη όσον αφορά το περιβάλλον και τη προστασία του. Ο μειωμένος όγκος αποβλήτων και η συχνή δυνατότητα ανακύκλωσης των υλικών, η μειωμένη χρήση ενέργειας και το μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα αποτελούν σημαντικά περιβαντολογικά οφέλη. (Behm *et al.*, 2018)

6) Νέες Γεωμετρίες

Η ικανότητα κατασκευής πολύπλοκων και γεωμετρικά δύσμορφων αντικειμένων είναι εφικτή, διότι η σχεδίαση προϊόντων για κατασκευή με τρισδιάστατη εκτύπωση, επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Οι εκτυπωτές κατορθώνουν και αντιπαραέρχονται στους περιορισμούς, γεωμετρικούς και σχεδιαστικούς, των παραδοσιακών μεθόδων.

Κατορθώνεται η σχεδίαση ακόμα και σε μικρο – νάνο κλίμακες και τελικά η παραγωγή αυτών, όπως πχ η εκτύπωση βλαστοκυττάρων. (Cochran *et al.*, 2016)

2.7.2 Μειονεκτήματα

1) Περιορισμένα Υλικά

Η επιλογή υλικών για την τρισδιάστατη εκτύπωση πολλές φορές είναι περιορισμένη. Οι διαφορετικές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης απαιτούν άλλα υλικά, και άρα η συμβατότητα χρήσης των υλικών σε διαφορετικές μεθόδους είναι περιορισμένη.

Η εύρεση υλικών στις συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής είναι μεγαλύτερος σε σχέση με αυτή της τρισδιάστατης εκτύπωσης, διότι απαιτούνται να βρίσκονται σε συγκεκριμένες καταστάσεις όπως αυτή του νήματος ή της πούδρας.

Τέλος επειδή απαιτείται προηγούμενη επεξεργασία των υλικών για τη χρήση τους στους εκτυπωτές, αυξάνεται και η τιμή απόκτησης των υλικών. (Jandyal *et al.*, 2022)

2) Κόστος Απόκτησης και χρήσης των Μηχανημάτων

Το κόστος των τρισδιάστατων εκτυπωτών κυμαίνεται σε αναλογία με αρκετές παραμέτρους, όπως το είδος της τεχνολογίας, ο όγκος εκτύπωσης, η μάρκα και τις δυνατότητες. Οι εκτυπωτές που χρησιμοποιούν οι καταναλωτές για ίδια χρήση είναι πιο φτηνού σε σύγκριση με τους επαγγελματικούς και η τιμή τους κυμαίνεται από εκατοντάδες έως χιλιάδες ευρώ. Είναι σχεδιασμένοι με σκοπό την προσωπική χρήση, κυρίως από χομπίστες και μικρές παραγωγές.

Οι επαγγελματικοί εκτυπωτές είναι κατασκευασμένοι με στόχο την κατασκευή προϊόντων υψηλής ποιότητας. Το κόστος τους ανέρχεται σε δεκάδες χιλιάδες έως εκατοντάδες χιλιάδες.

Η μεγαλύτερη ποιότητα βιομηχανικών εκτυπωτών, οι high end, προτείνονται για μεγάλο όγκου παραγωγής, συνδυάζουν υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης με δυνατότητες εκτυπώσεις σε μεγάλες θερμοκρασίες. Συνήθως αφορούν εκτυπωτές για παράλληλη παραγωγή με διαφορετικά υλικά ή εκτυπωτές για πολύ συγκεκριμένες παραγωγικές δραστηριότητες. Η τιμή τους κυμαίνεται από εκατοντάδες χιλιάδες έως εκατομμύρια ευρώ.

Σημαντικό κόστος επίσης των μηχανημάτων είναι τα κόστη των υλικών, το κόστος της συντήρησης των μηχανημάτων και το επίπεδο εξυπηρέτησης της εταιρείας από όπου αγοράστηκε ο εκτυπωτής. Κάποιοι κατασκευαστές με την αγορά των εκτυπωτών προσφέρουν πακέτα εκπαίδευσης εργαζομένων, τεχνική υποστήριξη και εγγυήσεις. Σημαντικοί παράγοντες που όταν παραλείπονται ανεβαίνει το συνολικό κόστος χρήσης του εκτυπωτή από την επιχείρηση. (Laguna *et al.*, 2021)

3) Ζητήματα Πνευματικών Δικαιωμάτων

Ο κλάδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει δημιουργήσει αρκετά προβλήματα στα θέματα πνευματικών δικαιωμάτων, εξαιτίας της δυνατότητας φυσικών αντικειμένων που παράγονται από ψηφιακά σχέδια.

Η αναπαραγωγή των αντικειμένων είναι ευκολότερη, διότι το μόνο που χρειάζεται κάποιος για να αναπαράγει το ίδιο αντικείμενο είναι το ψηφιακό σχέδιο. Πατενταρισμένα σχέδια, λογότυπα και αρτιστικές εργασίες είναι εύκολο να αναπαραχθούν και να οδηγήσουν σε νομικές αντιδικίες για καταπάτηση πνευματικών δικαιωμάτων. Σε αυτό η ψηφιακή πειρατεία αποτελεί το μεγαλύτερο κίνδυνο για αναπαραγωγή των σχεδίων, εξαιτίας του παράνομου διαμοιρασμού, αντίστοιχες καταστάσεις που αντιμετωπίζουν οι κλάδοι της μουσικής και των ταινιών.

Τέλος, με την αύξηση των χρηστών που παράγουν ψηφιακά σχέδια και κοινωνίες ανοιχτών δεδομένων, γίνεται εξαιρετικά δυσκολότερη η ταυτοποίηση του ιδιοκτήτη των σχεδίων.

Είναι αναγκαία η δημιουργία ή αλλαγή, υπάρχοντων νόμων για τη προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων των σχεδιαστών, σε προσωπικό αλλά και σε βιομηχανικό επίπεδο. (Laguna *et al.*, 2021)

4) Περιορισμένος όγκος κατασκευής

Ένας από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης είναι ο περιορισμός των διαστάσεων εκτύπωσης των μηχανημάτων.

Ο μέγιστος όγκος εκτύπωσης του κάθε εκτυπωτή είναι συνάρτησή του μεγέθους πλάκας εκτύπωσης που διαθέτει. Αν υπάρχει η ανάγκη εκτύπωσης μεγάλων αντικειμένων τότε απαιτείται η αγορά εκτυπωτών μεγαλύτερου κόστους.

Αν το μέγεθος του αντικειμένου είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπτό μέγεθος του εκτυπωτή, τότε χρειάζεται η σμίκρυνση του αντικειμένου ή η διάσπαση του σε περισσότερα κομμάτια. Αν και αυτό αποτελεί μία λύση, ενδέχεται να επηρεαστεί το συνολικό μέγεθος, η λεπτομέρεια και η χρηστικότητα του τελικού προϊόντος. (Jiménez *et al.*, 2019)

5) Ανακρίβειες Σχεδιασμού

Διάφοροι παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν ανακρίβειες στο σχεδιασμό, και να επηρεάσουν την ακρίβεια και λεπτομέρεια του τελικού προϊόντος. Η σωστή βαθμονόμηση του εκτυπωτή είναι απαραίτητη για αποφυγή εσφαλμένων αποκλίσεων από το σχέδιο. Απαιτούνται συχνές διαδικασίες συντήρησης και βαθμονόμησης για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων.

Επίσης η σωστή ρύθμιση του ύψους και της ανάλυσης κάθε στρώσης είναι απαραίτητη, καθώς τα ψιλά στρώματα χρειάζονται μεγαλύτερο χρόνο εκτύπωσης, ενώ τα πιο παχιά μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη λεπτομέρεια και πιο τραχύ επιφάνειες. (Karakurt and Lin, 2020)

2.8 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Οι ανάγκες για αύξηση της παραγωγικότητας, τη μείωση του βιομηχανικού κόστους αλλά και οι υπάρχουσες ανάγκες μίας πιο προσωποποιημένης και σύγχρονης βιομηχανίας, ώθησαν την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε υψηλότερο επίπεδο. Οι τομείς εφαρμογής της έχουν πλέον αυξηθεί και δεν περιορίζονται σε μικρές κλίμακες. Παρακάτω παρατίθενται μερικά παραδείγματα κλάδων που χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη εκτύπωση για την βελτιστοποίηση των προϊόντων τους.

2.8.1 Ιατρική

Η χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών στην Ιατρική Βιομηχανία εξελίσσεται με σταθερό και ταχύ ρυθμό, καθώς πλέον χρησιμοποιείται ευρέως και σε πιο προχωρημένα στάδια. Σε αρκετούς ασθενείς στον κόσμο, έχει βελτιωθεί η ιατρική τους περίθαλψη μέσα από τα τρισδιάστατα μοσχεύματα και τα προσθετικά μέλη.

Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πολλά υποσχόμενη στην ιατρική, καθώς αποδεικνύει καθημερινά τη δυνατότητα βελτίωσης της περίθαλψης των ασθενών.

Πρόσφατες μελέτες και δοκιμές, δείχνουν πολύ ενθαρρυντικά και ελπιδοφόρα αποτελέσματα στην παραγωγή στην Βιοιατρική. Χρειάζονται όμως αρκετά χρόνια προκειμένου να ενταχθεί πλήρως στην Ιατρική Βιομηχανία. Το εργαστήριο Ozbolat Lab που βρίσκεται στο Penn State και το οποίο ερευνά την κατασκευή με τρισδιάστατη εκτύπωση ανθρώπινου ιστού και οργάνων από κύτταρα, και πιστεύουν ότι μελλοντικά θα μπορούν να μεταμοσχευθούν σε ασθενείς. Πρόσφατα κατόρθωσαν την βιοεκτύπωση κοκάλου εντός του κρανίου ποντικών αλλά και την εκτύπωση ενός

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης
καρκινικού όγκου του μαστού που πιστεύουν θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση
των καρκίνων του μαστού.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην κατασκευή προσθετικών
μελών. Η χρήση της είναι ιδανική για κατασκευές εξατομικευμένες με υψηλές
απαιτήσεις. Επιτρέπει την απόκτηση, σε άτομα που έχουν χάσει κάποιο μέλος τους,
ακριβώς αυτού που χρειάζονται σε μέγεθος, βάρος και αίσθηση.(Chunhua and
Guangqing, 2020) (<https://www.asme.org>)



Εικόνα 20: Προσθετικά Μέλη κατασκευασμένα με Τρισδιάστατη Εκτύπωση²⁰

2.8.2 Κατασκευαστικός Τομέας

Ερευνητές στο Imperial College δημιούργησαν ένα σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης
που χρησιμοποιεί drones για να χτίζουν κάθετα ενώ βρίσκονται σε πτήση. Η
Διαδικασία ονομάστηκε από τον Mirko Kovacs, καθηγητή της αερο-ρομποτικής και
ηγείται της ερευνητικής ομάδας, «Aerial additive Manufacturing» (Aerial – AM). Ένας
στόλος από drones που χωρίζονται σε “BuildDrones” που αποθέτουν τα υλικά και
“ScanDrones” τα οποία καταγράφουν τη διαδικασία και αποστέλλουν τα επόμενα
κατασκευαστικά βήματα.

Και οι δύο τύποι μπορούν και δουλεύουν στις τρεις διαστάσεις, είτε παράλληλα είτε
διαδοχικά και με τη χρήση ενός βραχίονα, αποθέτουν τα υλικά με κατασκευαστική
ακρίβεια χιλιοστού.

²⁰ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://edition.cnn.com/2017/11/14/health/gallery/3d-printer-prosthetics-e-nable/index.html> - προσπελάστηκε 6 Αυγούστου 2023

Ως απόδειξη της ιδέας τα drone κατασκεύασαν ένα κύλινδρο ύψους 2.05 μέτρων και 0.3 μέτρων διάμετρο με την χρήση 72 επιπέδων από αφρό. (<https://www.imperial.ac.uk>)



Εικόνα 21: Πύργος από αφρό, εκτυπωμένος από drone.²¹

2.8.3 Αεροδιαστημική

Το 2014 η εταιρεία Made in Space σε συνεργασία με τη NASA, κατασκεύασαν το πρώτο αντικείμενο στο διάστημα. Τότε ανέπτυξαν και δημιούργησαν μία μόνιμη εγκατάσταση, στο Διεθνή Διαστημικό σταθμό, την εγκατάσταση Προσθετικής Κατασκευής.

Η εγκατάσταση προσθετικής κατασκευής λειτούργησε για πρώτη φορά το 2016, όπου κατασκεύασαν για πρώτη φορά ένα γαλλικό κλειδί, έκτοτε περισσότερα από 115 εργαλεία και εξαρτήματα έχουν παραχθεί εκεί.

Η εγκατάσταση σχεδιάστηκε με τη δυνατότητα εύκολης αναβάθμισης, με σκοπό την βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας της και είναι συμβατή με περισσότερα από 30

²¹ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.imperial.ac.uk/news/239973/3d-printing-drones-work-like-bees/> - προσπελάστηκε 8 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

πολυμερή υλικά. Χρησιμοποιείται η μέθοδος FDM και τα συχνότερα υλικά είναι πολυμερή όπως το ABS, PEI/PC και HDPE.

Σε καταστάσεις που απειλείται η αποστολή ή σε αποστολές μεγάλης διάρκειας, αξιοποιείται καλύπτοντας ανάγκες που προκύπτουν.

Η παραγωγή εργαλείων και εξαρτημάτων όταν χρειάζονται παρέχει ευελιξία στην ίδια την εγκατάσταση, μειώνει τους συνεχείς ανεφοδιασμούς και αυξάνει την ασφάλεια των αποστολών. . (Made in Space, 2019)



Εικόνα 22: Τρισδιάστατος εκτυπωτής της Made in Space, (spaceflight101, 2018)²²

2.8.4 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η εταιρεία Volvo, και συγκεκριμένα η εταιρεία Volvo Trucks, με έδρα στη Σουηδία χρησιμοποιώντας τη τρισδιάστατη εκτύπωση έχει κατασκευάσει περισσότερα από 500

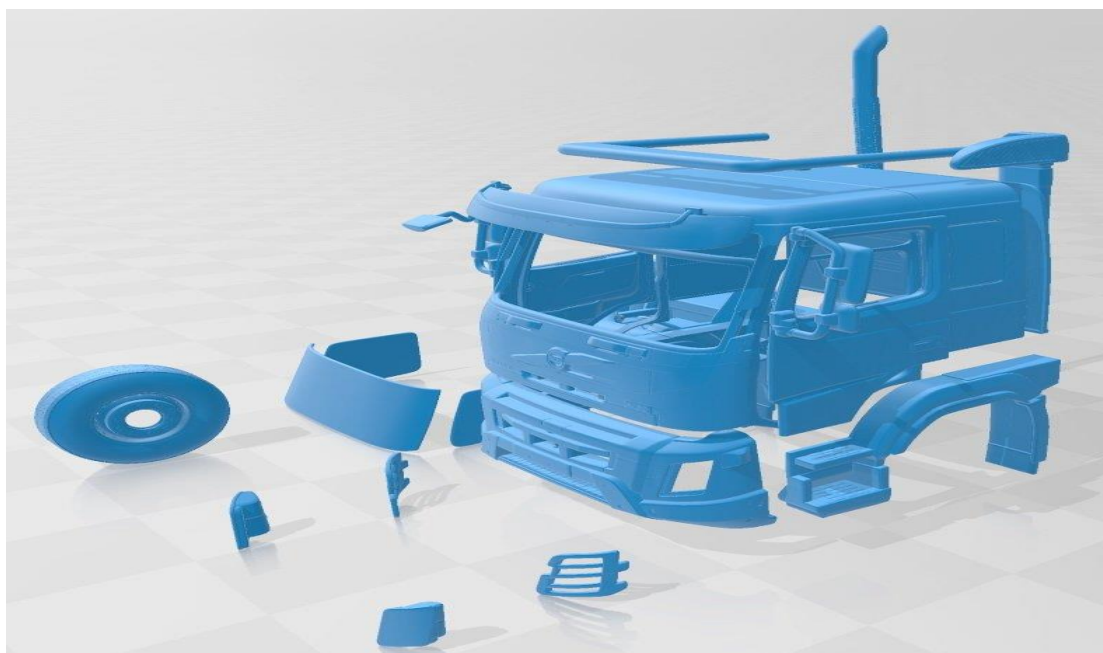
²² Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://www.3dnatives.com/en/3d-printer-space250520184/> - προσπελάστηκε 10 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

εργαλεία. Με τη χρήση της τεχνολογίας SLS, επιταχύνει τις διαδικασίες παραγωγής και διαρκώς βελτιώνει τα εξαρτήματα των οχημάτων.

Έχει δημιουργήσει ένα παγκόσμιο δίκτυο εγκαταστάσεων κατασκευής, στο σύνολο 12 εγκαταστάσεις, που συνεργάζονται για την συνεχή ανάπτυξη νέων εφαρμογών τις τρισδιάστατης εκτύπωσης και της βελτίωσης της παραγωγής.

Με τη χρήση της SLS για την παραγωγή σχεδιάζουν και παράγουν μέρη μέσα σε λίγες ώρες, μειώνοντας αρκετά το χρόνο σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους. Επίσης δεν εκμηδενίζουν την αναμονή για εξαρτήματα από προμηθευτές, με την παραγωγή στις δικές τους εγκαταστάσεις. (Mitchell, 1997) (<https://www.volvogroup.com/>)



Εικόνα 23: Ψηφιακό Σχέδιο, πρόσθιου μέρους φορτηγού, της εταιρείας Volvo Trucks²³

2.8.5 Αθλητισμός

Η εταιρεία Adidas το 2017 ξεκίνησε τη συνεργασία με την Carbon, μια εταιρεία που κατασκευάζει τρισδιάστατους εκτυπωτές. Επιθυμούσαν την δημιουργία ενός προϊόντος με την ονομασία STRUNG και χρησιμοποίησαν την τεχνολογία της Carbon, Digital Light Synthesis. Με τη δεσμών φωτών και οξυγόνου αναπτύζουν, υψηλής ποιότητας μέρη από πολυμερή. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί δεδομένα, προσωποποιημένα για κάθε αθλητή, ανάλογα με τις ανάγκες κάθε αθλήματος. Με τη χρήση της τεχνολογίας αυτής κατασκευάστηκε ένα σχέδιο το οποίο αποτελείται από

²³ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://cults3d.com/en/3d-model/game/volvo-fmx-2013-printable-cabin-truck> - προσπελάστηκε 10 Αυγούστου

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

20.000 υποστυλώματα, και θα ήταν αδύνατο να κατασκευαστεί με τις συμβατικές μεθόδους, όπως της χύτευσης ή της συμπίεσης.

Στο μέλλον ελπίζουν οι αθλητές και οι πελάτες να συνεργάζονται με τους σχεδιαστές με στόχο τη δημιουργία του κατάλληλου υποδήματος. (<https://www.wired.co.uk/>)



Εικόνα 24: Το υπόδημα της εταιρείας Adidas, STRUNG²⁴

²⁴ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://settingmind.com/adidass-ingenious-futurecraft-strung-is-the-future-of-running/> - προσπελάστηκε 13 Αυγούστου 2023

Κεφάλαιο 3: Πλαίσιο Μηχανικής Μάθησης

3.1 Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει επιφέρει τεράστιες αλλαγές στη καθημερινότητα και στους τρόπους που οργανώνεται η αγορά. Η επικοινωνία παραγωγών και πελατών, οι τρόποι παραγωγής των πληροφοριών και των υπηρεσιών έχουν αλλάξει ριζικά σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς τρόπους.

Επιβάλλεται η κατανόηση των πεδίων εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης στις σύγχρονες επιστήμες. Αφού είναι ένα σύστημα που δίνει τη δυνατότητα επίλυσης σε υπάρχοντα και νέα προβλήματα, εφευρίσκοντας καινούργιες λύσεις και κάνοντας ευφυείς επιλογές (Calum, 2018)

3.2 Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)

Η Μηχανική Μάθηση είναι μία υποκατηγορία της Τεχνητής Νοημοσύνης, που ασχολείται με τη δημιουργία αλγορίθμων που είναι ικανοί να μαθαίνουν και να επιλύουν προβλήματα. Είναι ένα εργαλείο που η Τεχνητή Νοημοσύνη χρησιμοποιεί για να επιλύσει καταστάσεις που είναι βασισμένες στην επαγωγική μάθηση.

Αυτός ο τύπος μάθησης, στα βήματα λειτουργίας του, είναι η αναγνώριση εμπειρικών δεδομένων, η συλλογή τους, η ανάλυση και τέλος η παρουσίαση λύσεων. Η συλλογή των δεδομένων και η επεξεργασία τους, δίνει στους αλγόριθμους που τα χρησιμοποιούν τη δυνατότητα εξέλιξης και τελικά εύρεσης νέων και βέλτιστων λύσεων. Το 1997 ο Tom M. Mitchell έδωσε ως ορισμό «ένα πρόγραμμα υπολογιστών λέγεται ότι μαθαίνει από την εμπειρία E , σε σχέση με κάποια τάξη εργασιών T και μέτρηση απόδοσης P , εάν η απόδοσή του σε εργασίες στο T , όπως μετρούνται από το P , βελτιώνεται με την εμπειρία E » (Mitchell, 1997)

Παρουσιάζει χρησιμότητα σε εύρος κλάδων, διότι παρέχει πλεονεκτήματα όπως:

- **Καινοτομία:** Με τη χρήση αλγορίθμων, που διαρκώς βελτιώνονται, αυξάνεται η ικανότητα λήψης αποφάσεων, και αναπτύσσονται νέα μοντέλα και υπηρεσίες.

- Μεγάλη Προσαρμοστικότητα: Η δυνατότητα μεταβολής τάχιστα σε νέα περιβάλλοντα, με τη διαρκή προσθήκη νέων δεδομένων.
- Γρήγορες Αποφάσεις: Παρέχει ταχύτερα και ασφαλέστερα αποτελέσματα.
- Αναγνώριση Μοτίβων: Έχει τη δυνατότητα εύρεσης μοτίβων και συνδέσεων που ο ανθρώπινος νους δεν μπορεί να κάνει.

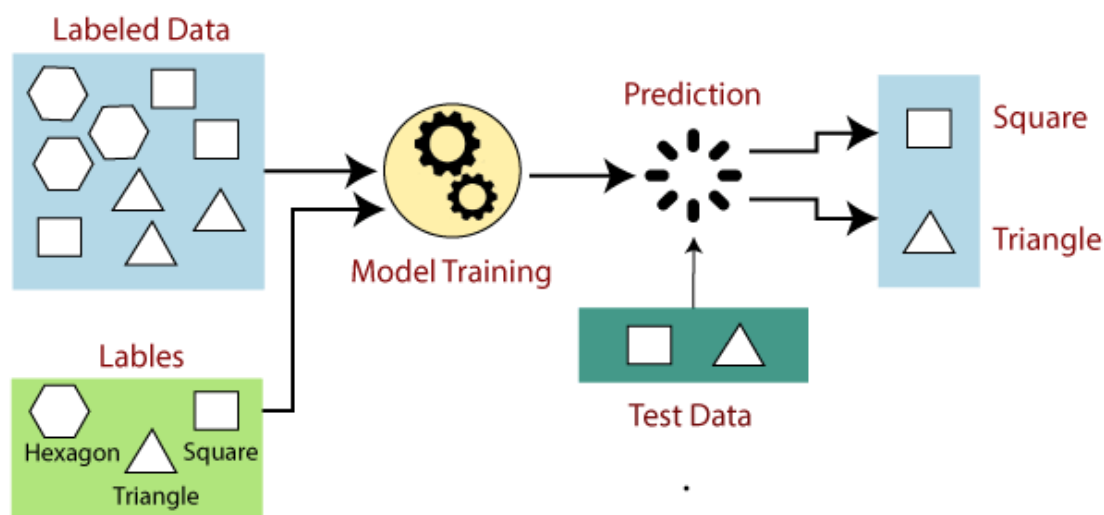
Στη μηχανική μάθηση, η αυτοματοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων απαρτίζεται από τρεις τύπους μάθησης, η επιβλεπόμενη (Supervised Learning), η μη επιβλεπόμενη (Unsupervised Learning) και η ενισχυτική (Reinforcement Learning).

Οι κυριότερες μέθοδοι της επιβλεπόμενης είναι η κατηγοριοποίηση (classification) και η παλινδρόμηση (regression), στη μη επιβλεπόμενη ο μετασχηματισμός και η συσταδοποίηση, έννοιες που θα αναπτυχθούν έπειτα.

1. Επιβλεπόμενη Μάθηση (Supervised Learning)

Στη τεχνική αυτή ο αλγόριθμος εκπαιδεύεται με σκοπό την κατανόηση της σχέσης μεταξύ των δεδομένων που του δίνουμε και ενός επιθυμητού αποτελέσματος. Έχουμε μια προκαθορισμένη είσοδο (input) και μία έξοδο (output). Ο χρήστης προσπαθεί να εκπαιδεύσει τον αλγόριθμο με στόχο την εύρεση μεθόδων για τον πώς να φτάσουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος αναγνωρίζει μοτίβα, μαθαίνει από τις παρατηρήσεις και καταλήγει σε προβλέψεις. Ο χρήστης διορθώνει τον αλγόριθμο και η διαδικασία μάθησης επαναλαμβάνεται έως ότου ο αλγόριθμος φτάσει σε ένα υψηλό επίπεδο ευστοχίας ή αποτελεσμάτων.

Συνολικά δύο υπό κατηγορίες επιβλεπόμενης μάθησης υπάρχουν, η κατηγοριοποίηση και η παλινδρόμηση. Αλγόριθμοι που εφαρμόζουν επιβλεπόμενη μάθηση είναι τα νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks), τα τυχαία δάση (Random Forest), τα δέντρα απόφασης (Decision Trees), η γραμμική και η λογιστική παλινδρόμηση (Linear and Logistic Regression), η μάθηση Bayes (Bayesian Learning), οι k πλησιέστεροι συγγενείς (k means Neighbors) και οι μηχανές διανυσμάτων στήριξης (Support Vector Machines). (Bishop, 2006)



Εικόνα 25: Διαδικασία της Επιβλεπόμενης Μάθησης²⁵

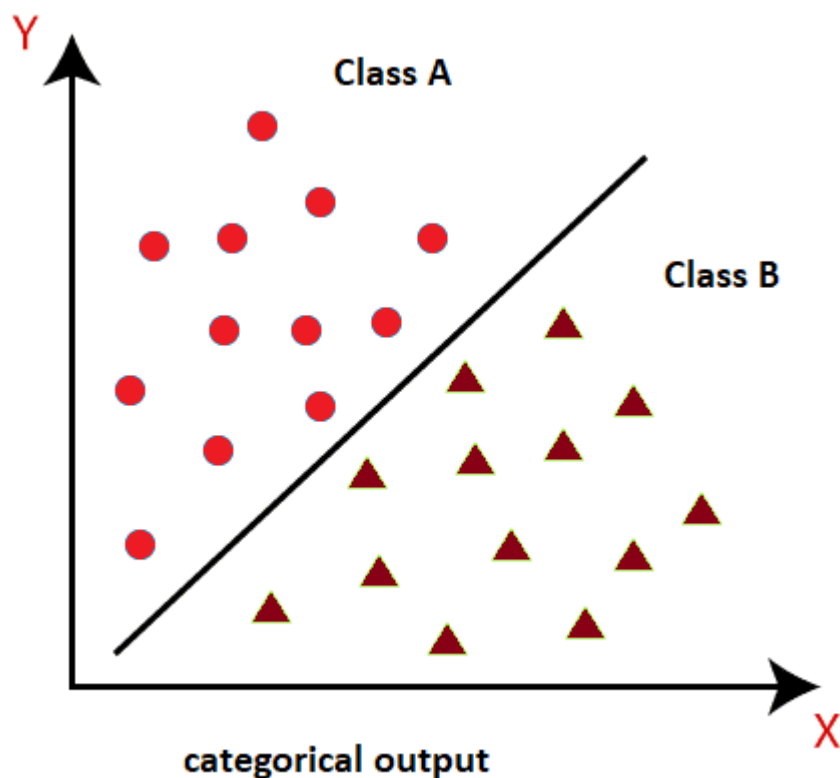
Η εικόνα παρουσιάζει το τρόπο που λειτουργεί η επιβλεπόμενη μάθηση, τα labeled data είναι το σύνολο εκπαίδευσης, τα labels είναι η ετικέτα κατηγοριοποίησης, το Model Training είναι το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί. Ολοκληρώνοντας της εκπαίδευση εισάγονται τα νέα δεδομένα (test data) και εφαρμόζονται στο μοντέλο, το οποίο βασισμένο στον αλγόριθμο μηχανικής μάθησης παράγει το αποτέλεσμα πρόβλεψης (Prediction).

1. Κατηγοριοποίηση (Classification)

Μία από τις βασικότερες εργασίες του ML είναι η κατηγοριοποίηση. Στόχος της η πρόβλεψη μίας κατηγοριοποιημένης ετικέτας για νέες περιπτώσεις που βασίζεται σε προηγούμενες παρατηρήσεις. Η κατηγοριοποίηση είναι δυαδικά χωρισμένη και ο αλγόριθμος μαθαίνει μια σειρά από κανόνες για τη διάκριση των ετικετών μεταξύ των δυο κατηγοριών. Σε πολλαπλή κατηγοριοποίηση (Multiclass Classification), ο αλγόριθμος κατηγοριοποιεί τα δεδομένα σε περισσότερες από δυο κατηγορίες.

Παραδείγματα αλγορίθμων είναι ο k κοντινότεροι γείτονες, τα δέντρα απόφασης, τα νευρωνικά δίκτυα.(Awad and Khanna, 2015)

²⁵ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://eduindex.org/2022/04/01/> - προσπελάστηκε 19 Αυγούστου 2023



Εικόνα 26: Παράδειγμα Κατηγοριοποίησης²⁶

Στο παράδειγμα της εικόνας, είναι δυαδική κατηγοριοποίηση και τα σύνολο αποτελείται από 25 δείγματα. Η διαγώνιος δείχνει τη διαχώριση των δειγμάτων στην κατηγοριοποίηση.

II. Παλινδρόμηση (Regression)

Η μέθοδος της παλινδρόμησης είναι η δεύτερη μέθοδος επιβλεπόμενης μάθησης. Χρησιμοποιείται στην πρόβλεψη συνεχών αποτελεσμάτων. Στόχος της μεθόδου είναι η πρόβλεψη ενός συνεχούς αριθμού, αφού στην αρχή έχει δοθεί ένας αριθμός από τον παράγοντα της μεταβλητής και μία συνεχής μεταβλητή αποτελέσματος. Προσπαθούμε να βρούμε μια σχέση μεταξύ των μεταβλητών, για να προβλέψουμε το αποτέλεσμα.

Παλινδρόμηση μπορεί να εφαρμοστεί στους αλγορίθμους, γραμμική παλινδρόμησης, τα δένδρα απόφασης, τα νευρωνικά δίκτυα και στα τυχαία δάση. (Awad and Khanna, 2015)

²⁶ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://medium.com/> - προσπελάστηκε 19 Αυγούστου

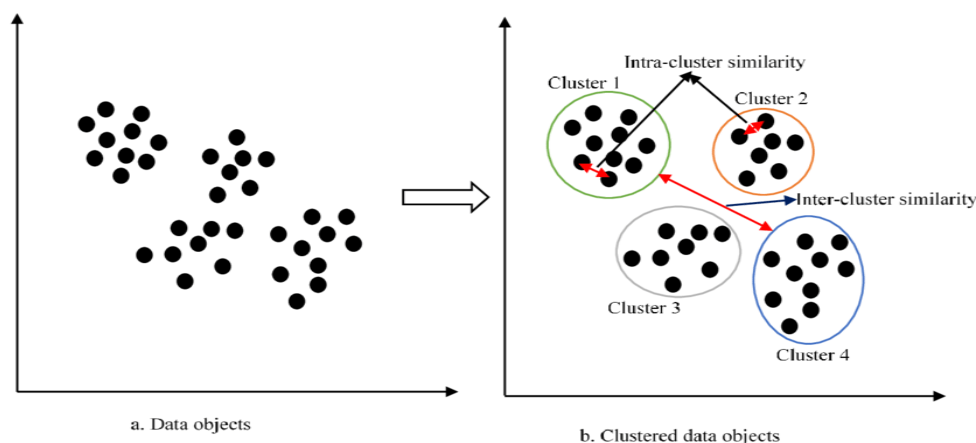
2. Μη Επιβλεπόμενη Μάθηση (Unsupervised Learning)

Η μη επιβλεπόμενη μάθηση, διαφέρει από την επιβλεπόμενη μάθηση στην οποία ξέραμε την απάντηση, στην μη επιβλεπόμενη αντιμετωπίζουμε μη κατηγοριοποιημένα δεδομένα και με δομή που δεν γνωρίζουμε. Η τεχνική αυτή ερευνά τη δομή των δεδομένων και καταλήγει στην εξαγωγή πληροφοριών δίχως την ανάγκη γνωστών αποτελεσμάτων. Οι αλγόριθμοι δέχονται τα δεδομένα και εξάγεται η γνώση από αυτά. Στη μη επιβλεπόμενη μάθηση υπάρχουν δύο υποκατηγορίες, ο μετασχηματισμός και η συσταδοποίηση. Παραδείγματα αλγορίθμων είναι ο K-means, η τυποποίηση (Standardization), η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (PCA- Principal Components Analysis) και η κανονικοποίηση (Normalization). (Selvakuberan *et al.*, 2011)

Συσταδοποίηση (Clustering)

Η μέθοδος της συσταδοποίησης, οργανώνει μία ομάδα από πληροφορίες σε υποομάδες (clusters), δίχως την ανάγκη ύπαρξης προηγούμενης γνώσης. Οι υποομάδες, που προκύπτουν από την ανάλυση, δημιουργούνται από μία ομάδα με κοινά χαρακτηριστικά και είναι ανόμοια με τις άλλες υποομάδες. Ανάλογα με τη μέθοδο για τη δημιουργία των συστάδων, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τους αλγορίθμους στις εξής κατηγορίες:

1. Ασαφής συσταδοποίηση
2. Συσταδοποίηση υποχωρών
3. Βασισμένη σε πλέγμα συσταδοποίηση
4. Βασισμένη στην πυκνότητα συσταδοποίηση
5. Ιεραρχική συσταδοποίηση
6. Διαιρετική συσταδοποίηση



Εικόνα 27: Παράδειγμα Συσταδοποίησης²⁷

Μετασχηματισμός (Transformation)

Μετασχηματισμός ονομάζεται η χρήση αλγορίθμων για δημιουργία καινούργιων παραστάσεων ενός συνόλου δεδομένων. Οι αναπαραστάσεις αυτές διευκολύνουν την κατανόηση, για την καλύτερη σύγκριση των δεδομένων. Η μείωση διαστάσεων είναι η συχνή εφαρμογή αλγορίθμων μετασχηματισμού. Τα δεδομένα έχουν πολλές διαστάσεις, πράγμα που δημιουργεί ζητήματα χώρων αποθήκευσης και της ανάγκης μεγαλύτερης υπολογιστικής δύναμης. Στη προ επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιείται η μείωση διαστάσεων και αφαιρεί το θόρυβο από τα δεδομένα. Επίσης τα δεδομένα συμπιέζονται σε μικρότερο διάστημα, χωρίς την αφαίρεση μεγάλου όγκου της πληροφορίας.

Παραδείγματα της μείωσης διαστάσεων είναι η κανονικοποίηση και η τυποποίηση.

3. Ενισχυτική Μάθηση (Reinforcement Learning)

Η ενισχυτική μάθηση επικεντρώνεται σε διεργασίες μάθησης με κανόνες, όπου ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης παρέχεται με ένα σύνολο ενεργειών, παραμέτρων και τελικών τιμών. Καθορίζοντας τους κανόνες, ο αλγόριθμος μηχανικής μάθησης προσπαθεί στη συνέχεια να διερευνήσει διαφορετικές επιλογές και δυνατότητες, παρακολουθώντας και αξιολογώντας κάθε αποτέλεσμα για να καθορίσει ποιο είναι το βέλτιστο. Η ενισχυτική μάθηση διδάσκει τη μηχανική δοκιμής και σφάλματος.

²⁷ Η εικόνα είναι από το <https://www.researchgate.net/> - προσπελάστηκε 21 Αυγούστου 2023

Μαθαίνει από προηγούμενες εμπειρίες και αρχίζει να προσαρμόζει την προσέγγισή του ως απάντηση στην κατάσταση για να επιτύχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

3.3 Αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης

1) Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, που πολλές φορές αναφέρονται ως απλά νευρωνικά δίκτυα (NN), είναι μια κατηγορία αλγορίθμων ML που κατασκευάζονται από μια σειρά διασυνδεδεμένων κόμβων, ή νευρώνων, σε πολλαπλά επίπεδα με τη βασική δομή ενός επιπέδου εισόδου, ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα και ένα επίπεδο εξόδου. Κάθε νευρώνας δέχεται σήματα εισόδου από έναν ή περισσότερους προηγούμενους νευρώνες, εκτελεί μια μαθηματική πράξη σε αυτούς και εξάγει ένα αριθμητικό σήμα στους νευρώνες στο επόμενο στρώμα (Meng et al., 2020). Ο ορισμός της μαθηματικής πράξης θα εξαρτηθεί από την αρχιτεκτονική και το σκοπό του δικτύου, αλλά οι απλούστερες εκδόσεις πολλαπλασιάζουν την έξοδο κάθε νευρώνα στο προηγούμενο επίπεδο με μια τιμή βάρους και, στη συνέχεια, οι σταθμισμένες εισοδοί που προκύπτουν αθροίζονται. Εάν το άθροισμα είναι μεγαλύτερο από κάποια τιμή κατωφλίου, ο νευρώνας «ενεργοποιείται» και στη συνέχεια περνάει ένα σήμα στο επόμενο στρώμα νευρώνων (Soni et al., 2021). Η απλούστερη υλοποίηση αυτού είναι ως δυαδικό σήμα, «1» εάν ο νευρώνας είναι ενεργοποιημένος και «0» εάν όχι..

Τα βάρη ενημερώνονται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, συνήθως μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως back propagation, για να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ μιας πρόβλεψης και του στόχου (Gardner & Dorling, 1998). Τα τεχνητά νευρωνικά καλύπτουν μια μεγάλη οικογένεια διαφορετικών αλγορίθμων.(Chun et al., 2007)

2) Συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNN- Convolutional Neural Networks)

Τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα είναι γνωστά για την ικανότητά τους να μαθαίνουν βασικά χαρακτηριστικά από δεδομένα που βασίζονται σε εικόνες (Lecun et al., 2015). Αυτό μπορεί να επεκταθεί από δεδομένα από θερμικές κάμερες ή κάμερες ορατού φωτός, σε οποιαδήποτε δομή δεδομένων που βασίζεται σε συστοιχίες με χωρικές σχέσεις μεταξύ σημείων, όπως τα φασματικά γραφήματα για την ταξινόμηση των

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης επιπέδων. Η δομή του CNN περιλαμβάνει μικρότερα φίλτρα που συγκεντρώνονται στη συστοιχία δεδομένων και μαθαίνουν διάφορα χαρακτηριστικά (γραμμές, καμπύλες, κ.λπ.), τα οποία στη συνέχεια εξάγονται ως χάρτες χαρακτηριστικών που υποδεικνύουν που εμφανίζονται αυτά τα χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται συνελίξεις σε αυτούς τους χάρτες χαρακτηριστικών, εντοπίζοντας πιο σύνθετα χαρακτηριστικά. Οι λειτουργίες ομαδοποίησης εφαρμόζονται επίσης μεταξύ συνελίξεων για να συγκεντρωθούν παρόμοια χαρακτηριστικά σε μικρότερο χώρο, διατηρώντας παράλληλα τη διάταξή τους και καθιστώντας το δίκτυο αμετάβλητο σε μικρές μετατοπίσεις σε σχετικές θέσεις χαρακτηριστικών. Μέσω ενός συνδυασμού λειτουργιών συνέλιξης και συγκέντρωσης, ένα CNN μαθαίνει να αναγνωρίζει εικόνες και να ταξινομεί δεδομένα με παρόμοιο τρόπο με τον τρόπο που κάνει ένας άνθρωπος. (Mehlig, 2019)

3) Δίκτυα Διανυσμάτων Υποστήριξης (SVM – Support Vector Machines)

Τα SVM έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά για την ταξινόμηση δεδομένων από επιτόπια παρακολούθηση. Ένα SVM γενικά δέχεται χαρακτηριστικά ή σημεία δεδομένων που μπορούν να εξαχθούν από τον αισθητήρα και μαθαίνει πώς να διαχωρίζει τα δεδομένα διαφορετικών κλάσεων με ένα βέλτιστο υπερεπίπεδο. Εάν τα δισδιάστατα δεδομένα δεν μπορούν να διαχωριστούν, τότε το SVM θα ρίξει τα δεδομένα σε τρεις ή μεγαλύτερες διαστάσεις, κατασκευάζοντας ένα υπερεπίπεδο που θα διαχωρίσει τα δεδομένα, με αποτέλεσμα ένα $(n-1)$ -διάστατο επίπεδο για διαχωρισμό δεδομένων σε n -διαστάσεις. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπου είναι δυνατό να εξαχθούν χαρακτηριστικά από δεδομένα, όπως η γεωμετρία της δεξαμενής τήξης από την ανάλυση εικόνας, οι παράμετροι επεξεργασίας ή οι λόγοι του φασματόμετρου. (Evgeniou and Pontil, 2001)

4) K-Κοντινότεροι Γείτονες (K- nearest Neighbors)

Οι αλγόριθμοι K-Nearest Neighbor (KNN) λειτουργούν με την υπόθεση ότι τα χαρακτηριστικά που μοιράζονται τα σημεία δεδομένων με άλλα σημεία βρίσκονται κοντά τους σε έναν χώρο παραμέτρων. Η απόσταση μεταξύ των σημείων σε αυτόν τον χώρο είναι συνάρτηση της ομοιότητάς τους, με παρόμοια σημεία να ομαδοποιούνται

Ως εκ τούτου, όταν ταξινομείται ένα νέο σημείο δεδομένων, ο αλγόριθμος θα εξετάσει τις ετικέτες των πλησιέστερων σημείων δεδομένων για να καθορίσει την πιο πιθανή ετικέτα για αυτό το νέο σημείο δεδομένων. Η τιμή του «k» είναι ο αριθμός των πλησιέστερων γειτόνων που λαμβάνονται υπόψη και συνήθως χρησιμοποιείται μια προσέγγιση της πλειοψηφίας, έτσι ώστε η πιο κοινή ετικέτα σε αυτό το σύνολο είναι η ετικέτα που έχει εκχωρηθεί στο νέο δεδομένο (Chen et al., 2021a). Η ίδια η απόσταση μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με το συγκεκριμένο πρόβλημα που επιλύεται. Αυτή η διαδικασία επεκτείνεται και σε χώρους υψηλότερων διαστάσεων, έτσι ώστε, με δεδομένο ένα διάνυσμα συντεταγμένων, z , σε έναν διανυσματικό χώρο με N παρατηρήσεις, συμβουλευόμαστε τους πλησιέστερους γείτονες «k» για να προσδιοριστεί η πιο πιθανή ετικέτα για το ερώτημα. (Awad and Khanna, 2015)

5) Δέντρα Αποφάσεων (Decision Trees – DT)

Τα Δέντρα Αποφάσεων (DT) αποτελούν τη βάση για την ομάδα αλγορίθμων ML που βασίζονται σε δέντρα. Το DT είναι ένα δίκτυο ταξινομητή που χρησιμοποιεί μια σειρά κόμβων και διακλαδώσεων για την ταξινόμηση των δεδομένων εισόδου. Τυπικά, κάθε κόμβος του δέντρου ταξινομεί ένα διάνυσμα εισόδου με βάση ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά, πιο απλά εφαρμόζοντας ένα όριο σε ένα χαρακτηριστικό του διανύσματος. Αυτά τα κατώτατα όρια ενημερώνονται κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας για να επιτευχθεί η καλύτερη ταξινόμηση των δεδομένων εκπαίδευσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα δεδομένα εισόδου μπορεί να είναι κατηγορικά ή αριθμητικά, σε αντίθεση με τα NN, τα οποία απαιτούν μόνο αριθμητικά δεδομένα, διατηρώντας περισσότερες πληροφορίες από την πηγή δεδομένων (Günllük et al., 2021). Οι αλγόριθμοι Τυχαίου Δάσους (Random Forest - RF) δημιουργούν ένα σύνολο DTs χρησιμοποιώντας υποσύνολα δεδομένων εκπαίδευσης και στη συνέχεια συγκεντρώνουν τα αποτελέσματα για να σχηματίσουν έναν ταξινομητή που είναι πιο ισχυρός από ένα μόνο DT. (Rokach and Maimon, 2005)

6) Λογιστική Παλινδρόμηση

Η λογιστική παλινδρόμηση (Logistic Regression), είναι ένα στατιστικό μοντέλο για ταξινόμηση. Τα αποτελέσματα της κατηγοριοποιούνται σε πιθανότητα να είναι θετικά ή αρνητικά. (Pavlyshenko, 2016)

7) Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)

Η γραμμική παλινδρόμηση είναι ένα γραμμικό μοντέλο που ερευνά τη γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και της μεμονωμένης μεταβλητής εξόδου. Ως απλή γραμμική παλινδρόμηση ονομάζεται όταν υπάρχει μόνο μια μεταβλητή εισόδου, ενώ αν υπάρχουν περισσότεροι από μια μεταβλητές εισόδου τότε η μέθοδος μετονομάζεται σε πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.

Με τη μέθοδο της απλής παλινδρόμησης αναζητούμε μία ευθεία η οποία να περιγράφει την σχέση των δύο μεταβλητών που ανήκουν στο δείγμα τιμών. (Pavlyshenko, 2016)

3.4 Deep Learning

Η βαθιά μάθηση είναι μέρος της Μηχανικής Μάθησης. Διαρκώς αυξανόμενα δεδομένα με αλγόριθμους μάθησης μεταδίδονται σε μεγάλου βαθμού τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών, όπως της σκέψης και της μάθησης. Η διαδικασία εκμάθησης είναι μεγάλου βάθους, διότι τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από μεγάλο βαθμό επιπέδων, που σταδιακά αυξάνονται ανάλογα με τα δεδομένα. Παρόλο που οι διαδικασίες της βαθιάς μάθησης ελέγχονται από τον άνθρωπο, ο στόχος των επιστημόνων είναι να δημιουργήσουν νευρωνικά δίκτυα που θα μπορούν να δημιουργούνται να μαθαίνουν αυτόνομα. Η κατηγορία αυτή της Μηχανικής Μάθησης, επιτρέπει στους ερευνητές να επικεντρώνονται στη πληροφορία, και στην παραγωγή νέων δεδομένων, με τη χρήση της ισχύς των νέων υπολογιστών. (LeCun, Bengio and Hinton, 2015)

3.5 Πλεονεκτήματα Μηχανικής Μάθησης στις Διαδικασίες Παραγωγής

3.5.1 Μηχανική Μάθηση στο Σχεδιασμό

1) Βελτιστοποίηση Τοπολογίας (Topology Optimization – TO)

Η βελτιστοποίηση Τοπολογίας είναι η βελτιστοποίηση σχημάτων που χρησιμοποιεί αλγοριθμικά μοντέλα μηχανικής μάθησης, μέσω σε ένα συγκεκριμένο χώρο, αφού πρώτα ο χρήστης έχει εισάγει δεδομένα όπως παραμέτρους όγκου, μεταβλητές, σχήμα. Το TO μεγιστοποιεί την απόδοση και την αποδοτικότητα του σχήματος, αφαιρώντας περίσσεια υλικά που δεν απαιτούνται για τη στήριξη των δομών του αντικειμένου καθώς και μειώνει τις ανακρίβειες που έχουν προκύψει κατά το σχεδιασμό από τον άνθρωπο.

Τα τελικά σχέδια που δημιουργούνται από TO συνήθως είναι ελεύθερες μορφές και περίεργα σχήματα που είναι δύσκολα ή ακόμα και αδύνατο να δημιουργηθούν από συμβατικές κατασκευαστικές μεθόδους. (Ntintakis, Stavroulakis and Plakia, 2020)

2) Γενετικός Σχεδιασμός (Generative Design)

Ο γενετικός σχεδιασμός είναι μια διαδικασία εξερεύνησης του σχεδιασμού. Οι σχεδιαστές ή οι μηχανικοί εισάγουν στόχους σχεδίασης στο λογισμικό δημιουργίας σχεδιασμού, μαζί με παραμέτρους όπως οι επιδόσεις ή οι χωρικές απαιτήσεις, τα υλικά, οι μέθοδοι κατασκευής και οι περιορισμοί κόστους. Το λογισμικό διερευνά όλες τις πιθανές μεταθέσεις μιας λύσης, δημιουργώντας γρήγορα εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις. Δοκιμάζει και μαθαίνει από κάθε επανάληψη τι λειτουργεί και τι όχι.

Τα οφέλη που παρουσιάζονται από το γενετικό σχεδιασμό είναι η ταχύτερη δημιουργία σχεδίων καθώς και η μείωση του αναγκαίου εξειδικευμένου προσωπικού για την κατασκευή των ψηφιακών σχεδίων. (Han *et al.*, 2022)

3.5.2 Μηχανική Μάθηση στη Παραγωγή

1) Βελτιστοποίηση Παραμέτρων (Parameter Optimization)

Η βελτιστοποίηση παραμέτρων διαδικασίας είναι συχνά μια χειροκίνητη και χρονοβόρα διαδικασία, γεγονός που την καθιστά δαπανηρή. Ομοίως, η μη αυτόματη παρακολούθηση/έλεγχος διεργασιών δημιουργεί επίσης πρόσθετο κόστος. Η χρήση Μηχανικής κατά τη διάρκεια της παραγωγής κατορθώνει να βελτιστοποιεί τις παραμέτρους της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο, να επιλύει προβλήματα και να μειώνει το κόστος ανακατασκευής. (Raja *et al.*, 2022)

2) Παρακολούθηση των Διαδικασιών (Process Monitoring)

Ενώ η βελτιστοποίηση παραμέτρων μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της προβλεψιμότητας της διαδικασίας, δεν μπορεί να εξαλείψει πλήρως τις αστοχίες. Καθώς οι αστοχίες εκτύπωσης συμβάλλουν σημαντικά στο κόστος των εξαρτημάτων, είναι απαραίτητες τεχνικές παρακολούθησης διεργασιών ικανές να ανιχνεύουν αστοχίες και ελαττώματα κατασκευής. Διάφορες υλοποιήσεις ML λύνουν αυτό το πρόβλημα και εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο δεδομένων εισόδου τους: οπτική και ακουστική .

Οι λύσεις οπτικής παρακολούθησης είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες, με τα δεδομένα να προέρχονται συχνά από ψηφιακές, υψηλής ταχύτητας ή υπέρυθρες κάμερες.

Οπτική παρακολούθηση έχει επίσης εφαρμοστεί για άλλες διεργασίες AM, συμπεριλαμβανομένης της εκτόξευσης συνδετικού υλικού και της εξώθησης υλικού.. Στην εξώθηση υλικού, έχει εφαρμοστεί οπτική παρακολούθηση για την επιτόπια ανίχνευση ελαττωμάτων.

Η ακουστική παρακολούθηση είναι μια νεότερη και λιγότερο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος παρακολούθησης ενός build mid-print. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται σε χαρακτηριστικά ακουστικά σήματα που σχετίζονται με το πορώδες τμήματος και τις καταστάσεις τήξης καθώς και με αστοχίες διεργασίας στην εξώθηση υλικού. Τα πλεονεκτήματα των λύσεων ακουστικής παρακολούθησης περιλαμβάνουν τους αισθητήρες χαμηλότερου κόστους σε σύγκριση με τις τεχνικές οπτικής παρακολούθησης. Οι αλγόριθμοι ML που εφαρμόζονται ποικίλλουν επίσης από

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης εποπτευόμενα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα έως λύσεις ομαδοποίησης. (Delli and Chang, 2018)

3) Αναγνώριση Ελλαττωματικών (Defect Detection)

Η αναγνώριση Ελλαττωματικών προϊόντων γίνεται με τη χρήση αλγορίθμων κατηγοριοποίησης. Κάμερες δημιουργούν εικόνες και μηχανική μάθηση και κατηγοριοποιούν τα εκτυπώμενα προϊόντα ως ελλαττωματικά βάσει του επιπέδου λεπτομέρειας που έχουν στην τελική επιφάνεια τους. Η χρήση Μηχανικής Μάθησης για την αναγνώριση ελλαττωματικών δημιουργεί δεδομένα που επαναχρησιμοποιούνται για τη μελλοντική αναγνώριση νέων. (Farhan Khan *et al.*, 2021)

4) Πρόβλεψη Ποιότητας (Quality Prediction)

Σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση οπτικού εξοπλισμού, η διαδικασία της εκτύπωσης αναλύεται και δημιουργούνται εικόνες, σε κάθε στρώση της εκτύπωσης. Οι εικόνες αυτές επεξεργάζονται από τον αλγόριθμο και εξάγεται η πιθανότητα πρόβλεψης ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η πιθανότητα αυτή δείχνει το πόσο πιθανό είναι το προϊόν να μας να είναι ελαττωματικό ή βέλτιστο. Συνήθως χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης και εκπαιδεύεται ο αλγόριθμος με τη χρήση εικόνων, ανάλογα με το συγκεκριμένο υλικό και μέθοδο εκτύπωσης. (Zhu *et al.*, 2024)

5) Έλεγχος Κλειστού Βρόγχου (Closed Loop Control)

Με την εφαρμογή Μηχανικής Μάθησης στη παραγωγή γίνεται δυνατή η δημιουργία Κλειστού Βρόγχου Ελέγχου. Το σύστημα αυτό αυτόματα διατηρεί τη παραγωγή στα επιθυμητά χαρακτηριστικά χωρίς την ανάγκη του ανθρώπινου παράγοντα. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται δέχονται δεδομένα, που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγής, αυτόματα. Τα οφέλη που δημιουργούνται από την ύπαρξη του κλειστού βρόγχου ελέγχου είναι η διατήρηση της παραγωγής δίχως την ανάγκη ανθρώπου, η μείωση της ευαισθησίας των εξωτερικών παραμέτρων και η επιβεβαίωση της απόδοσης παραγωγής. (Kucukdeger and Johnson, 2023)

6) Εκτίμηση Κόστους (Cost Estimation)

Η μηχανική μάθηση, ενισχύει την εκτίμηση κόστους της συνολικής παραγωγής. Αναλύοντας ιστορικά δεδομένα και τωρινά δεδομένα από την παραγωγή και άλλες διαδικασίες, όπως συμβόλαια, τιμολόγια, τιμές αγοράς και προγραμματισμένων έργων, αναγνωρίζει μοτίβα και σχέσεις που επηρεάζουν τη συνολική αξία της παραγωγής.

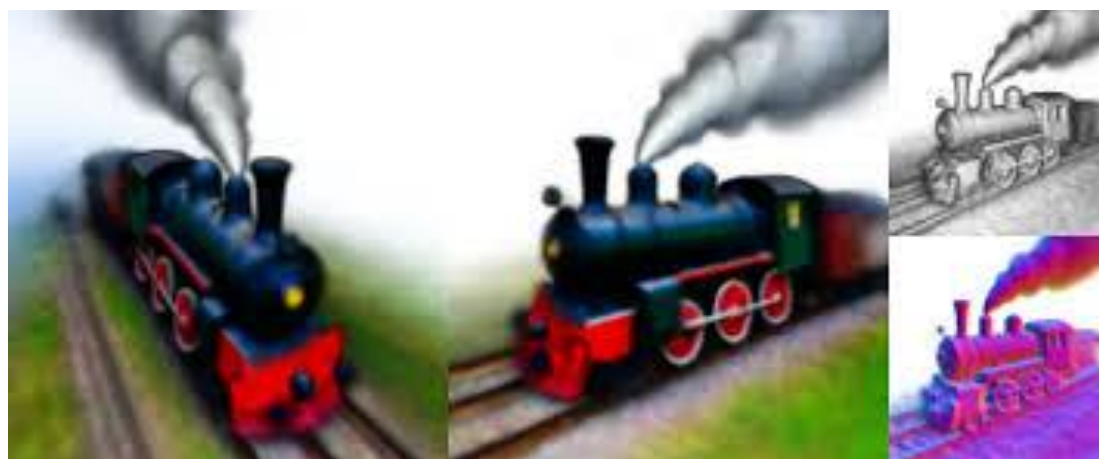
Τα δεδομένα που εξάγονται είναι χρήσιμα για τις επιχειρήσεις για να πάρουν τις σωστές αποφάσεις για την αλλαγή της παραγωγής τους, την αύξηση του όγκου παραγωγής, την μείωση των βιομηχανικών τους εξόδων καθώς και τη μείωση του ρίσκου που παρουσιάζονται στις εμπορικές σχέσεις. (Al Asheeri and Hammad, 2019)

Κεφάλαιο 4: Μελέτες Περίπτωσης

4.1 Dreamfusion

Το Dreamfusion είναι μια τεχνική για σύνθεση τρισδιάστατων σχεδίων, μεταφέροντας κλιμακούμενα, υψηλής ποιότητας, μοντέλα διάχυσης εικόνας δύο διαστάσεων. Αυτή η σύνθεση επιτυγχάνεται με τη χρήση προσέγγισης δειγματοληψίας βαθμολογίας και μια μηχανή απόδοσης. Το Dreamfusion δεν απαιτεί δεδομένα εκπαίδευσης με προέλευση τρισδιάστατες προβολές και χρησιμοποιεί μόνο ένα προ εκπαιδευμένο μοντέλο δυσδιάστατης διάχυσης για την εκτέλεση της τρισδιάστατης σύνθεσης.

Ο χρήστης δίνει μία περιγραφή και το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο text – image δημιουργεί μία τρισδιάστατη σκηνή. (Poole *et al.*, 2022)



Εικόνα 28: Μία ατμομηχανή σε υψηλή ανάλυση, δημιουργημένη από το Dreamfusion²⁸

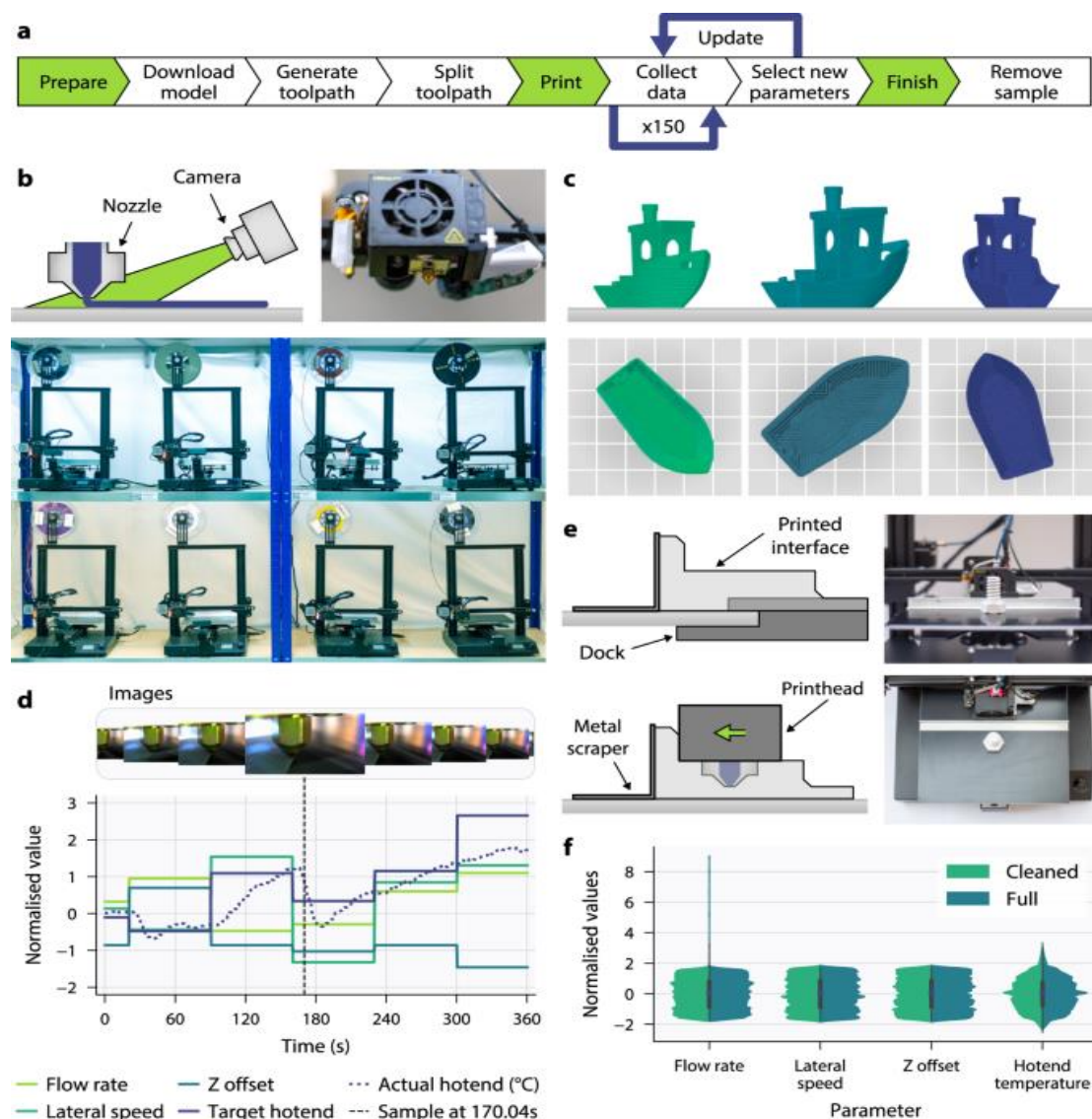
4.2 Αναγνώριση και Διόρθωση Σφαλμάτων στη Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Οι Douglas A. J. Brion & Sebastian W. Pattinson από το Πανεπιστήμιο του Cambridge χρησιμοποίησαν ένα σύστημα οκτώ εκτυπωτών για τη συλλογή των δεδομένων τους. Οι εκτυπωτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι Creality CR-20 Pro, λόγω του χαμηλού κόστους αγοράς τους, και του αυτόματης διόρθωσης της πλάκας εκτύπωσης που διαθέτουν και οκτώ διαφορετικά υλικά. Σε κάθε εκτυπωτή εφάρμοσαν ένα Raspberry Pi 4 Model B για να χρησιμοποιηθεί ως ο δέκτης και πομπός των δεδομένων που εισέρχονται και εξέρχονται στους εκτυπωτές. Επίσης, κάμερες (Logitech C270) τοποθετήθηκαν και συνδέθηκαν με το Pi προκειμένου να παίρνουν φωτογραφίες κατά

²⁸ Η εικόνα είναι από τον Ιστότοπο <https://dreamfusion3d.github.io/> - προσπελάστηκε 24 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

τη διάρκεια της εκτύπωσης, σε κάθε στρώση υλικού που αποθετήθηκε. (Brion and Pattinson, 2022)



Εικόνα 29: Overview του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για την αυτόματη δημιουργία των δεδομένων.²⁹

Με τη χρήση σκριπτ, αρχεία STL κατέβηκαν από τον Ιστότοπο Thingiverse, που είναι ένας ανοιχτός ιστότοπος ψηφιακών σχεδίων. Για την δημιουργία του κώδικα g-code τα STLs έλαβαν τυχαία περιστροφή από μία κατανομή άκρων (0 μοίρες έως 360 μοίρες), και έπειτα τοποθετήθηκαν στο κέντρο της πλάκας εκτύπωσης, αφού πρώτα τροποποιήθηκε ο όγκος τους για να χωράει στον εκτυπωτή.

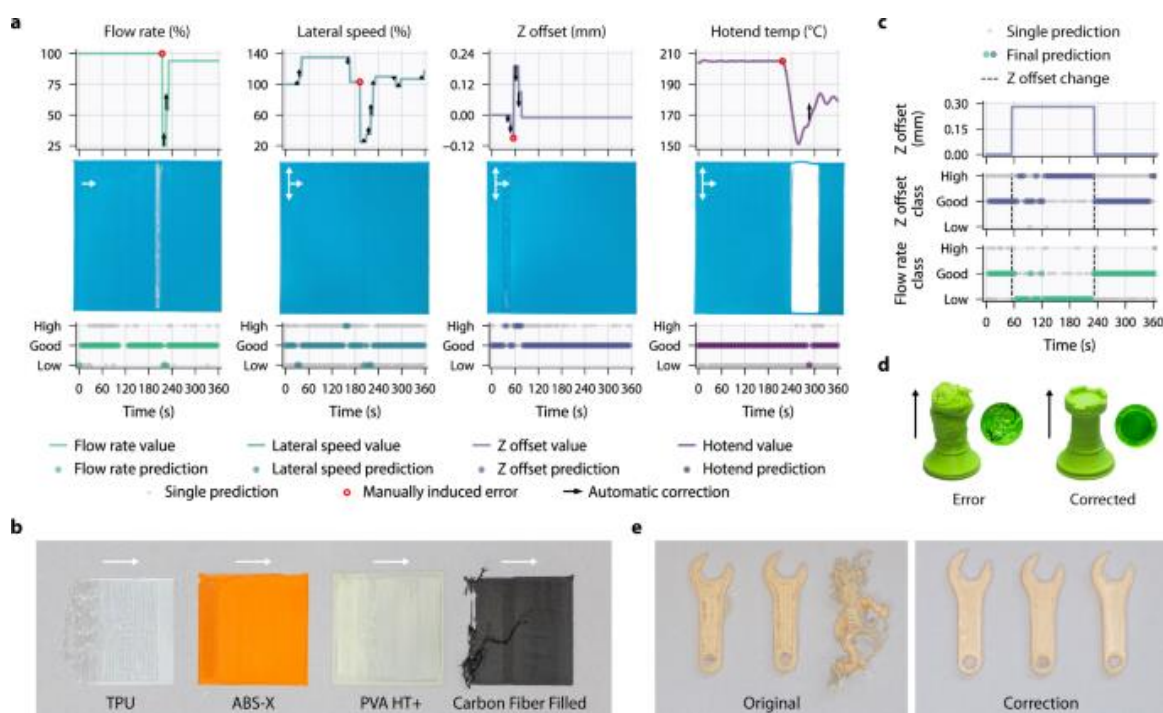
²⁹ Η εικόνα είναι από το https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-the-CAXTON-system-used-for-automated-data-collection-a-Workflow-for_fig1_362705879 - προσπελάστηκε 27 Αυγούστου 2023

Διερεύνηση Συσχέτισης της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης και της Μηχανικής Μάθησης

Κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης, οι κάμερες τραβούσαν εικόνες, οι οποίες κατηγοριοποιήθηκαν βάσει της θερμοκρασίας ακροφύσιου, την θερμοκρασία της πλάκας εκτύπωσης, της ταχύτητας εκτύπωσης και της απόστασης του ακροφύσιου από την πλάκα εκτύπωσης. Ανά 150 φωτογραφίες οι παράμετροι αυτοί άλλαζαν τυχαία από κατανομές. Ο αλγόριθμος που επιλέχτηκε ήταν ένα νευρωνικό δίκτυο πολλαπλών κεφαλών. (Brion and Pattinson, 2022)

Με τη ολοκλήρωση του πειράματος κατάφεραν σε πραγματικό χρόνο να διορθώσουν τις παραμέτρους που αναφέραμε προηγουμένως. Με άλλα λόγια ο αλγόριθμος έχει μάθει από της κατηγοριοποιημένες εικόνες και μπορεί να προβλέπει σε πραγματικό χρόνο την πιθανότητα το τελικό αντικείμενο να είναι καλής ποιότητας.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 30, για τις 4 παραμέτρους που εφάρμοσαν το πείραμα, σε συνάρτηση με το χρόνο ο αλγόριθμος παρουσιάζει τη πρόβλεψη ποιότητας.



Εικόνα 30: Προβλέψεις του αλγορίθμου σε συνάρτηση με το χρόνο, παραδείγματα υλικών και αντικειμένων.³⁰

³⁰ Η εικόνα είναι από το https://www.researchgate.net/figure/Printer-and-feedstock-agnostic-online-parameter-correction-and-discovery-a-Rapid_fig4_362705879 - προσπελάστηκε 1 Σεπτεμβρίου 2023

4.3 Style2Fab

Ερευνητές στο MIT δημιούργησαν ένα λογισμικό το οποίο χρησιμοποιεί Μηχανική Μάθηση και επιτρέπει τη προσωποποίηση ψηφιακών σχεδίων. Το Style2Fab χρησιμοποιεί αλγόριθμος Βαθιάς Μάθησης που χωρίζουν τα ψηφιακά σχέδια σε αισθητικά και λειτουργικά τμήματα βάσει της ταξινόμησης που έχουν αναπτύξει οι ερευνητές. Το εργαλείο που κατασκεύασαν δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να αλλάξουν την αισθητική των σχεδίων χωρίς να μειώνεται η λειτουργικότητα και εκτυπωσιμότητα τους.

Ο αλγόριθμος ταξινομεί τα γεωμετρικά στοιχεία ενός τρισδιάστατου πλέγματος σε τρεις κατηγορίες: αισθητικά, εσωτερικά-λειτουργικά και εξωτερικά-λειτουργικά. Η ταξινόμηση έχει σχεδιαστεί για να είναι ημιαυτόματη, πράγμα που σημαίνει ότι αξιοποιεί τόσο τους υπολογιστικούς αλγόριθμους όσο και τα δεδομένα των χρηστών για την επίτευξη ακριβούς τμηματοποίησης.

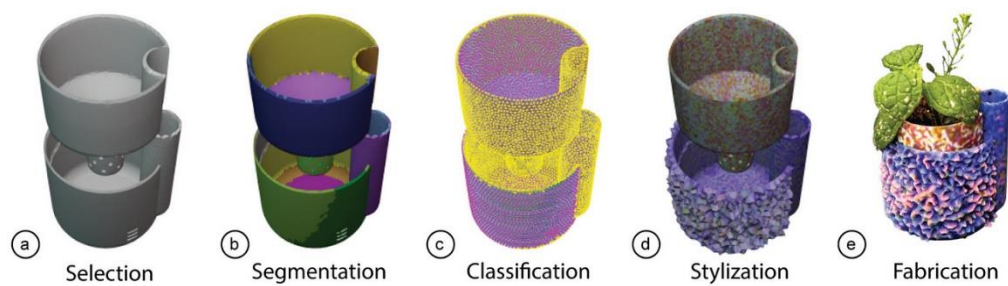
Μόλις τμηματοποιηθεί το μοντέλο, το Style2Fab χρησιμοποιεί αλγόριθμους δημιουργίας εμφάνισης για να βοηθήσει τους χρήστες να τροποποιήσουν τα αισθητικά στοιχεία χωρίς να επηρεάσουν τα λειτουργικά στοιχεία. Το εργαλείο στοχεύει να διασφαλίσει ότι τυχόν τροποποιήσεις που γίνονται στην αισθητική του μοντέλου δεν θέτουν σε κίνδυνο τη λειτουργική του ακεραιότητα.

Μόλις το μοντέλο διαχωριστεί σε λειτουργικά και αισθητικά στοιχεία μέσω της ημιαυτόματης μεθόδου ταξινόμησης του εργαλείου, η γενετική τεχνητή νοημοσύνη αρχίζει τη διαδικασία της.

Οι αλγόριθμοι AI λειτουργούν ουσιαστικά ως ένα εξελιγμένο επίπεδο υπολογιστικής λογικής που κατανοεί την τμηματοποιημένη ταξινόμηση του τρισδιάστατου μοντέλου. Στο πλαίσιο του Style2Fab, το Text2Mesh χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση τρισδιάστατων μοντέλων με βάση τις προτροπές κειμένου που παρέχονται από τον χρήστη. Το Text2Mesh χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου που αξιοποιεί την αναπαράσταση CLIP (Contrastive Language–Image Pretraining) για να ερμηνεύσει τα μηνύματα κειμένου.

Αυτό επιτρέπει την εισαγωγή της αισθητικής πρόθεσης του χρήστη, η οποία στη συνέχεια μεταφράζεται σε τροποποιήσεις στο τρισδιάστατο μοντέλο.

Με την ενσωμάτωση του Text2Mesh, το Style2Fab παρέχει μια πιο φιλική προς το χρήστη διεπαφή για αισθητική προσαρμογή, επιτρέποντας στους χρήστες να διατυπώνουν τις σχεδιαστικές προτιμήσεις τους με φυσική γλώσσα. (Faruqi *et al.*, 2023)



Εικόνα 31: Διαδικασία Λειτουργίας του Style2Fab³¹

³¹ Η εικόνα είναι από το <https://hcie.csail.mit.edu/research/style2fab/style2fab.html> - προσπελάστηκε 4 Σεπτεμβρίου 2023

Κεφάλαιο 5: Επίλογος – Συμπεράσματα

Η συσχέτιση της Τρισδιάστατης Εκτύπωσης με τη Μηχανική Μάθηση θα αποτελούσε όφελος για τον χρήστη προσφέροντας δυνατότητας που έως σήμερα χρειαζόντουσαν τεχνογνωσία, εξειδίκευση, υψηλό κόστος και προσωπικό προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα στις παραγωγικές διαδικασίες.

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην ανάλυση της Τρισδιάστατης εκτύπωσης, τα κομμάτια που αποτελούν έναν εκτυπωτή, τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα υλικά που αντιστοιχούν σε κάθε είδος εκτυπωτή. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάστηκαν, ενισχύονται ή μειώνονται με τη εφαρμογή της Μηχανικής Μάθησης.

Αναλύοντας τι είναι η Μηχανική Μάθηση, επεξηγώντας τους αλγόριθμους που εμπεριέχει και τα είδη μάθησης που υπάρχουν, δίνεται η δυνατότητα κατανόησης της ωφέλειας της κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.

Οι Μελέτες Περίπτωσης που παρουσιάστηκαν, αποτελούν πραγματικά παραδείγματα και εφαρμογές που ερευνώνται στο κλάδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Οι κύριοι παράγοντες επιτυχίας από τη πλευρά του κατασκευαστή για την εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι:

- Η αυτόματη και επί τόπου βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής, με τη χρήση της Μηχανικής Μάθησης δημιουργούνται προγράμματα που μπορούν και ελέγχουν την κατάσταση της παραγωγής, αντιλαμβάνονται ελαττωματικά προϊόντα και μπορούν σε πραγματικό χρόνο να διορθώσουν τις ρυθμίσεις εκτυπώσεις προκειμένου να μειώσουν τις ποσότητες των ελαττωματικών.
- Ο σχεδιασμός προϊόντων γίνεται ευκολότερος, με τη χρήση γενετικών προγραμμάτων σχεδιασμού. Η δημιουργία των ψηφιακών σχεδίων και η μετατροπή αυτών είναι πραγματοποιήσιμη σχεδόν αυτόματα, και έτσι διευκολύνεται η χρήση σχεδιαστικών προγραμμάτων από χρήστες που δεν έχουν την τεχνογνωσία.
- Η αυτοματοποίηση της παραγωγής με τη δημιουργία κλειστών βρόγχων ελέγχου. Με την αυτοματοποίηση της παραγωγής με τη χρήση Μηχανικής Μάθησης καθώς και με την παρακολούθηση της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο με διόρθωση παραμέτρων, δημιουργούνται αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής που δεν χρειάζονται τον ανθρώπινο παράγοντα. Οι γραμμές αυτές καταλήγουν να έχουν μικρότερο κόστος λειτουργίας κάτι που σημαντικά αυξάνει τα κέρδη των επιχειρήσεων.

Βιβλιογραφία

Al Asheeri, M.M. and Hammad, M. (2019) ‘Machine Learning Models for Software Cost Estimation’, in 2019 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT). 2019 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT), Sakhier, Bahrain: IEEE, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1109/3ICT.2019.8910327>.

Attaran, M. (2017) ‘The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing’, *Business Horizons*, 60(5), pp. 677–688. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.

Awad, M. and Khanna, R. (2015) *Efficient learning machines: theories, concepts, and applications for engineers and system designers*. New York, NY: Apress, Springer Science+Business Media (The expert’s voice in machine learning).

Behm, J.E. et al. (2018) ‘Benefits and limitations of three-dimensional printing technology for ecological research’, *BMC Ecology*, 18(1), p. 32. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12898-018-0190-z>.

Bishop, C.M. (2006) *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer (Information science and statistics).

Bourell, D. et al. (2017) ‘Materials for additive manufacturing’, *CIRP Annals*, 66(2), pp. 659–681. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>.

Brion, D.A.J. and Pattinson, S.W. (2022) ‘Generalisable 3D printing error detection and correction via multi-head neural networks’, *Nature Communications*, 13(1), p. 4654. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31985-y>.

Calum, C. (2018) *Artificial Intelligence and the Two Singularities*. 1st edn. Chapman and Hall/CRC. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781351254465>.

Chen, Z. et al. (2019) ‘3D printing of ceramics: A review’, *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), pp. 661–687. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>.

Chun, F.K.-H. et al. (2007) ‘A critical appraisal of logistic regression-based nomograms, artificial neural networks, classification and regression-tree models, look-up tables and risk-group stratification models for prostate cancer’, *BJU International*, 99(4), pp. 794–800. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1464-410X.2006.06694.x>.

Chunhua, S. and Guangqing, S. (2020) ‘Application and Development of 3D Printing in Medical Field’, *Modern Mechanical Engineering*, 10(03), pp. 25–33. Available at: <https://doi.org/10.4236/mme.2020.103003>.

- Cochran, J.A. et al. (2016) ‘Expanding Geometry Understanding with 3D Printing’, *Mathematics Teaching in the Middle School*, 21(9), pp. 534–542. Available at: <https://doi.org/10.5951/mathteacmidscho.21.9.0534>.
- Delli, U. and Chang, S. (2018) ‘Automated Process Monitoring in 3D Printing Using Supervised Machine Learning’, *Procedia Manufacturing*, 26, pp. 865–870. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.111>.
- Duda, T. and Raghavan, L.V. (2016) ‘3D Metal Printing Technology’, *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), pp. 103–110. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>.
- Evgeniou, T. and Pontil, M. (2001) ‘Support Vector Machines: Theory and Applications’, in G. Paliouras, V. Karkaletsis, and C.D. Spyropoulos (eds) *Machine Learning and Its Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), pp. 249–257. Available at: https://doi.org/10.1007/3-540-44673-7_12.
- Farhan Khan, M. et al. (2021) ‘Real-time defect detection in 3D printing using machine learning’, *Materials Today: Proceedings*, 42, pp. 521–528. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.482>.
- Faruqi, F. et al. (2023) ‘Style2Fab: Functionality-Aware Segmentation for Fabricating Personalized 3D Models with Generative AI’. Available at: <https://doi.org/10.1145/3586183.3606723>.
- Han, L. et al. (2022) ‘Generative Design and Integrated 3D Printing Manufacture of Cross Joints’, *Materials*, 15(14), p. 4753. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15144753>.
- Iftekar, S.F. et al. (2023) ‘Advancements and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review’, *Polymers*, 15(11), p. 2519. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym15112519>.
- Jandyal, A. et al. (2022) ‘3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0’, *Sustainable Operations and Computers*, 3, pp. 33–42. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.09.004>.
- Jiménez, M. et al. (2019) ‘Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects’, *Complexity*, 2019, pp. 1–30. Available at: <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.
- Karakurt, I. and Lin, L. (2020) ‘3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing’, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28, pp. 134–143. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001>.
- Kiranlal, S. et al. (2022) ‘A Review on Electrical and Electronics Part of 3D Printer’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1228(1), p. 012007. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1228/1/012007>.

Kucukdeger, E. and Johnson, B.N. (2023) ‘Closed-loop controlled conformal 3D printing on moving objects via tool-localized object position sensing’, *Journal of Manufacturing Processes*, 89, pp. 39–49. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.020>.

Kundu, M. and Mandal, A. (2022) ‘Additive Manufacturing Process (3D Printing): “A Critical Review of Techniques, Applications & Future Scope”’, *International Journal of Engineering and Technical Research*, 11, pp. 171–193.

Laguna, O.H. et al. (2021) ‘A review on additive manufacturing and materials for catalytic applications: Milestones, key concepts, advances and perspectives’, *Materials & Design*, 208, p. 109927. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109927>.

LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015) ‘Deep learning’, *Nature*, 521(7553), pp. 436–444. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature14539>.

Mehlig, B. (2019) ‘Machine learning with neural networks’. Available at: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1901.05639>.

Mitchell, T.M. (1997) *Machine Learning*. New York: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in computer science).

Ngo, T.D. et al. (2018) ‘Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges’, *Composites Part B: Engineering*, 143, pp. 172–196. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

Ntintakis, I., Stavroulakis, G.E. and Plakia, N. (2020) ‘Topology Optimization by the use of 3D Printing Technology in the Product Design Process’, *HighTech and Innovation Journal*, 1(4), pp. 161–171. Available at: <https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-04-03>.

Park, S. et al. (2022) ‘3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications’, *Matter*, 5(1), pp. 43–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.10.018>.

Pavlyshenko, B. (2016) ‘Machine learning, linear and Bayesian models for logistic regression in failure detection problems’, in *2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. 2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Washington DC, USA: IEEE, pp. 2046–2050. Available at: <https://doi.org/10.1109/BigData.2016.7840828>.

Poole, B. et al. (2022) ‘DreamFusion: Text-to-3D using 2D Diffusion’. Available at: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2209.14988>.

Raja, S. et al. (2022) ‘Optimization of 3D Printing Process Parameters of Polylactic Acid Filament Based on the Mechanical Test’, *International Journal of Chemical Engineering*. Edited by G.L. Balaji, 2022, pp. 1–7. Available at: <https://doi.org/10.1155/2022/5830869>.

Rokach, L. and Maimon, O. (2005) ‘Decision Trees’, in O. Maimon and L. Rokach (eds) *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. New York: Springer-Verlag, pp. 165–192. Available at: https://doi.org/10.1007/0-387-25465-X_9.

Schmidt, M. et al. (2017) ‘Laser based additive manufacturing in industry and academia’, *CIRP Annals*, 66(2), pp. 561–583. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.011>.

Selvakuberan, K. et al. (2011) ‘An efficient feature selection method for classification in health care systems using machine learning techniques’, in 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology (ICECT), Kanyakumari, India: IEEE, pp. 223–226. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5941891>.

Shahrubudin, N., Lee, T.C. and Ramlan, R. (2019) ‘An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications’, *Procedia Manufacturing*, 35, pp. 1286–1296. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.

Srinivasan, D. et al. (2021) ‘3D Printing Manufacturing Techniques, Materials, and Applications: An Overview’, *Advances in Materials Science and Engineering*. Edited by C. R. Rambo, 2021, pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/5756563>.

Tamez, M.B.A. and Taha, I. (2021) ‘A review of additive manufacturing technologies and markets for thermosetting resins and their potential for carbon fiber integration’, *Additive Manufacturing*, 37, p. 101748. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101748>.

Zhu, C. et al. (2021) ‘Realization of Circular Economy of 3D Printed Plastics: A Review’, *Polymers*, 13(5), p. 744. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym13050744>.

Zhu, J. et al. (2024) ‘Surface quality prediction and quantitative evaluation of process parameter effects for 3D printing with transfer learning-enhanced gradient-boosting decision trees’, *Expert Systems with Applications*, 237, p. 121478. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121478>.

Ιστότοποι

- 1 <https://www.hubs.com/> - προσπελάστηκε 10 Αυγούστου 2023
- 2 <https://www.3dhub.gr/> - προσπελάστηκε 10 Αυγούστου 2023
- 3 <https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-materials/> - προσπελάστηκε 8 Αυγούστου 2023
- 4 <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/> - προσπελάστηκε 19 Αυγούστου 2023
- 5 <https://www.protolabs.com/resources/guides-and-trend-reports/3d-printing-for-end-use-production/> - προσπελάστηκε 19 Αυγούστου 2023
- 6 https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/3d-printing-product-design-and-development/DUP_708_3DOpportunityProductDesign.pdf – προσπελάστηκε 11 Αυγούστου 2023
- 7 <https://www.imperial.ac.uk/news/239973/3d-printing-drones-work-like-bees/> - προσπελάστηκε 1 Σεπτεμβρίου 2023
- 8 <https://news.mit.edu/2023/ai-driven-tool-personalize-3d-printable-models-0915> - προσπελάστηκε 3 Σεπτεμβρίου 2023
- 9 <https://dreamfusion3d.github.io/> - προσπελάστηκε 6 Σεπτεμβρίου 2023