



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

# Ανάπτυξη Τρισδιάστατου Εκτυπωτή

ΠΑΥΛΟΣ Α. ΡΟΥΣΣΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Ευάγγελος Χριστοφόρου

Αθήνα, Ιούλιος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## *Ανάπτυξη Τρισδιάστατου Εκτυπωτή*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΥΛΟΣ Α. ΡΟΥΣΣΟΣ

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 18/7/2017

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Αθηνά Τσετσέκου, Καθηγήτρια .....(Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Τσακαλάκης, Καθηγητής .....(Υπογραφή)

Αθήνα, Ιούλιος 2017



# Περίληψη

---

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας συσκευής που θα παράγει μαγνητικό νήμα το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιονδήποτε 3D εκτυπωτή. Η συσκευή θα παρέχει τη δυνατότητα ρυθμιζόμενης έγχυσης μαγνητικών νανοσωματιδίων. Με αυτό τον τρόπο το εκάστοτε εκτυπωμένο υλικό θα έχει την επιθυμητή μαγνητική επιδεκτικότητα άρα και διαφορετική συμπεριφορά σε εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Επίσης θα κατασκευαστεί συσκευή με στόχο τον προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών του υλικού και θα αναπτυχθεί πρότυπη μέθοδος προσδιορισμού της μαγνητικής επιδεκτικότητας του υλικού που χρησιμοποιείται.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή εισαγωγή στους 3D εκτυπωτές καθώς και στο μαγνητισμό ο οποίος χρησιμοποιείται εμμέσως στην 3D εκτύπωση. Για τη σύνδεση αυτή γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην οποία αναφέρονται εφαρμογές και μελέτες που σχετίζονται με το μαγνητισμό και την 3D εκτύπωση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η 3D εκτύπωση. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή και εξηγούνται τα στάδια της διαδικασίας από το σχεδιασμό στον υπολογιστή ως το τελικό προϊόν. Επίσης αναφέρονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται και καθορίζουν τα είδη των εκτυπωτών σύμφωνα με αυτές. Τέλος, αναφέρονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στην 3D εκτύπωση καθώς και οι εφαρμογές της εκτύπωσης που έχουν απήχηση στην παραγωγή και στις επιστήμες.

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει το θεωρητικό υπόβαθρο του μαγνητισμού. Αναφέρονται εξισώσεις, λίγα λόγια για τους μαγνήτες και οι κατηγορίες του μαγνητισμού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, τα υλικά, τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν και τα προβλήματα που προέκυψαν. Περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα, και αναφέρονται μελλοντικές κατευθύνσεις.

# Abstract

---

The purpose of this diploma thesis is to produce a magnetic thread able to be used by any 3d printer. The device will provide the possibility of adjustable injection of magnetic nanoparticles. In this way the printed material will have the desired magnetic susceptibility and therefore different behavior in an externally imposed magnetic field. Also, a device designed to orient the magnetic areas of the material will be constructed and a standard method for determining the magnetic susceptibility of the material used will be developed.

The first chapter presents an introduction to printing, how the idea of printing and its benefits emerged. There is a small introduction to 3d printers as well as magnetism which is implicitly used in 3D printing through the use of magnetic materials. For this connection a bibliographic review is made, which reports applications and studies related to magnetism and 3d printing.

In the second chapter, 3D printing is presented in detail. A historical review is made and the stages of the process are explained from design to computer as the final product. Also refer to the technologies used and determine the types of printers according to them. Finally, the materials that are widely used in 3d printing as well as printing applications that have a resonance in production and in science are mentioned.

The third chapter contains the theoretical background of magnetism. There are equations about the magnets and the categories of magnetism.

The fourth chapter shows all the work done in the laboratory. It explains the experimental layout, the materials, the components used and the problems that were arisen. We describe the experimental process, present and analyze the results and refer to future directions.

# Περιεχόμενα

---

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
1.1	Γενικά .....	9
1.2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	10
2	Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ.....	12
2.1	Γενικά .....	12
2.2	Ιστορική Εξέλιξη .....	12
2.3	Από τις δύο στις τρεις διαστάσεις.....	16
2.4	Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	17
2.4.1	Computer Aided Design (Σύστημα CAD) & Μοντελοποίηση τρισδιάστατων αντικειμένων.....	17
2.4.2	Ταχεία Πρωτοτυποποίηση.....	18
2.4.3	Τρόπος λειτουργίας .....	18
2.5	Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	18
2.5.1	Stereolithography (SL) .....	20
2.5.2	Selective Laser Sintering (SLS) .....	22
2.5.3	Electron Beam Melting (EBM) .....	23
2.5.4	Τεχνολογία Inkjet .....	24
2.5.5	Fused Deposition Modelling (FDM) .....	26
2.5.6	Laminated Object Manufacturing (LOM).....	27
2.5.7	Digital Light Processing (DLP).....	28
2.6	Υλικά .....	29
2.6.1	Πλαστικά .....	29
2.6.2	Μέταλλα .....	32

2.6.3	Κεραμικά .....	33
2.6.4	Χαρτί και Βιοϋλικά .....	34
2.6.5	Τροφή και άλλα .....	35
2.7	Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης .....	36
3	ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ .....	40
3.1	Μαγνήτες .....	40
3.2	Γενικά .....	40
3.3	Κατηγορίες Μαγνητισμού .....	42
3.3.1	Διαμαγνητισμός.....	42
3.3.2	Παραμαγνητισμός.....	42
3.3.3	Σιδηρομαγνητισμός .....	43
3.3.4	Βρόχος Υστέρησης.....	44
3.3.5	Υπερμαγνητισμός.....	46
3.3.6	Μαγνητική Ανισοτροπία .....	49
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ.....	50
4.1	Εισαγωγή .....	50
4.2	Προετοιμασία.....	51
4.3	Ανάπτυξη Συσκευής.....	53
4.4	Πειραματική Διαδικασία.....	61
4.5	Επεξεργασία Μετρήσεων.....	63
4.5.1	Αισθητήρας LVDT.....	63
4.5.2	Πρότυπη Μέθοδος Μαγνητικής Επιδεκτικότητας.....	65
5	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....	70
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73



7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....74

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 Γενικά

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

Οι τεχνικές της τρισδιάστατης εκτύπωσης παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά σε σχέση με τις μεθόδους κατασκευής (παραδοσιακές και μη) διαφόρων προϊόντων οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα και βασίζονται ουσιαστικά στην αφαίρεση υλικού από ακατέργαστα, χυτά, σφυρήλατα ή πρεσσαριστά τεμάχια, είτε με τη χρήση εργαλείων χειρός, είτε με τη χρήση εργαλειομηχανών (τόρνων, φρεζών, δραπάνων κλπ.) είτε με τη χρήση αυτοματοποιημένων μηχανών CNC ελεγχόμενων από υπολογιστή, μέχρις ότου το αντικείμενο λάβει την επιθυμητή μορφή. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, από την άλλη πλευρά, αποτελεί μια

διαδικασία πρόσθεσης υλικού κατά την οποία η κατασκευή ενός αντικειμένου πραγματοποιείται με την εναπόθεση, στερεοποίηση ή συγκόλληση διαδοχικών στρώσεων υλικού κατάλληλα διαμορφωμένων με τη χρήση τεχνικών παρόμοιων με τις τεχνικές της διδιάστατης εκτύπωσης, σύμφωνα με το αποθηκευμένο στον υπολογιστή σχέδιο ή εικόνα.

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

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση και κατ' επέκταση οι τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης αποτελούν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον και κατά συνέπεια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εργασίες σε αυτόν τον τομέα. Εκτός από τις τεχνολογίες παραγωγής και μεθόδων κατασκευής, η επιστημονική κοινότητα έχει ασχοληθεί πολύ με το στάδιο της ανάλυσης και του σχεδιασμού και πιο συγκεκριμένα με την μελέτη ιδιοσυχνοτήτων και την παραμετρική μοντελοποίηση. Ωστόσο δεν υπάρχουν πολλές αναφορές που να αναφέρονται επακριβώς στο αντικείμενο της εργασίας αυτής.

Οι Huber, Abert et.al. [1] δημιούργησαν μαγνητικό πλαστικό μέσω της ανάμιξης πολυμερούς με μαγνητική σκόνη με στόχο να δημιουργήσουν μόνιμους μαγνήτες που συνδέονται με πολυμερές. Χρησιμοποίησαν έναν 3d εκτυπωτή της Code P για να τυπώσουν τους μαγνήτες, καθώς και μετέτρεψαν τον εκτυπωτή σε έναν σαρωτή πεδίου (field scanner) για να αναγνωρίσουν το μαγνητικό πεδίο στα αντικείμενα που κατασκεύασαν.

Οι Kokkinis, Schaffner, και Studarta [2] χρησιμοποίησαν το μαγνητισμό για να παραμετροποιήσουν τη δομή των υλικών που χρησιμοποιούνται στη 3d εκτύπωση. Εμπνευσμένοι από την πολύπλοκη αρχιτεκτονική που βρίσκονται στα φυσικά υλικά, πρότειναν μια πρόσθετη διαδικασία παραγωγής που επιτρέπει την κατασκευή συνθετικών μικροδομών μέσα σε έναν πενταδιάστατο σχεδιαστικό χώρο. Πέραν της τρισδιάστατης δυνατότητας μορφοποίησης της παραγωγής αντικειμένων, μια τέτοια διαδικασία περιλαμβάνει τον τοπικό έλεγχο της σύνθεσης του υλικού που χρησιμοποιείται και τον προσανατολισμό των σωματιδίων του υλικού. Για την επίτευξη αυτού του στόχου,

χρησιμοποίησαν τον μαγνητισμό για να εισάγουν τις δύο επιπλέον διαστάσεις στο σχεδιασμό τους, και να μπορέσουν να παρέμβουν στη δομή και τα σωματίδια του εκάστοτε υλικού.

Οι Yan, Gu [3] εξετάζουν τις κύριες τεχνολογίες και τις εφαρμογές της ταχείας πρωτοτυποποίησης και κατασκευής. Οι αρχές και τα χαρακτηριστικά των εν λόγω τεχνολογιών παρουσιάζονται εκτενώς, καθώς επίσης αναφέρονται και τα υπάρχοντα προβλήματα. Οι ίδιοι έχουν ασχοληθεί αρκετά και με την γεωμετρική μοντελοποίηση σε παρόμοιες δημοσιεύσεις τους.

Οι Kruth, Leu, Nakagawa [4] στην συγκεκριμένη δημοσίευση προσπαθούν να συνοψίσουν μια δεκαετία ερευνών και εξελίξεων πάνω στην ταχεία πρωτοτυποποίηση. Το πρώτο μέρος της εργασίας αφορά περισσότερο ορισμένες γενικές οικονομικές και τεχνολογικές τάσεις. Το δεύτερο μέρος παρέχει περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις διαδικασίες και τις μεθόδους.

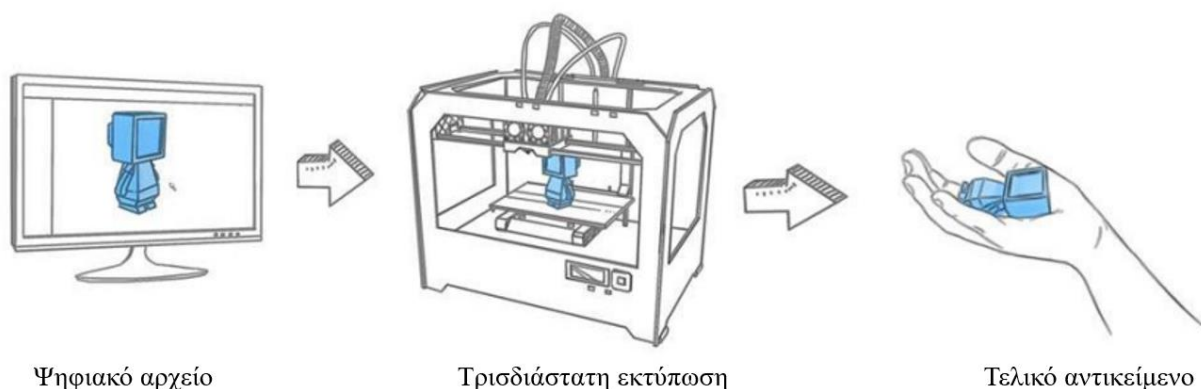
Οι Μπιλάλης, Μαραβελάκης [5] μέσα από το βιβλίο τους αναλύουν τον τρόπο γεωμετρικής μοντελοποίησης και σχεδιασμού με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Παρομοίως, ο Chang [6], αναλύει την τρισδιάστατη μοντελοποίηση και παρουσιάζει αρκετά παραδείγματα εφαρμογής μέσα από γνωστά σχεδιαστικά προγράμματα όπως είναι το Pro/Engineer και το Solidworks.

## 2 Η ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

---

### 2.1 Γενικά

Αποτελεί μια τεχνολογία ταχείας προτυποποίησης που χρησιμοποιείται για τη γρήγορη κατασκευή ενός μοντέλου σε φυσική κλίμακα. Με τους τρισδιάστατους εκτυπωτές έχουμε απευθείας μετάβαση από το ψηφιακό μοντέλο ή σχέδιο, στο φυσικό αντικείμενο τριών διαστάσεων. Αυτοί οι εκτυπωτές χρησιμοποιούν ψηφιακά αρχεία που έχουν δημιουργηθεί/σχεδιαστεί από κάποιον μηχανικό ή έχουν προκύψει από ένα φυσικό αντικείμενο το οποίο έχει σαρωθεί και “τυπώνουν” έτσι το αντικείμενο σε τρεις διαστάσεις (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 Διαδικασία δημιουργίας αντικειμένου μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης

### 2.2 Ιστορική Εξέλιξη

Οι πρώτες τεχνολογίες 3D εκτύπωσης εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1980, οπότε και ονομάζονταν τεχνολογίες ταχείας προτυποποίησης (ΤΠ). Αυτό συμβαίνει επειδή οι τεχνολογίες αυτές είχαν αρχικά σχεδιαστεί ως μια γρήγορη και πιο αποδοτική μέθοδος για τη δημιουργία πρωτοτύπων για την ανάπτυξη προϊόντων στη βιομηχανία. Η πρώτη αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία ΤΠ κατατέθηκε από τον Dr. Kodama, στην Ιαπωνία το Μάιο του 1980. Δυστυχώς για τον Dr. Kodama, η πλήρης περιγραφή του διπλώματος ευρεσιτεχνίας δεν είχε κατατεθεί πριν από τη λήξη της προθεσμίας ενός έτους μετά την εφαρμογή. Σε πραγματικούς όρους, όμως, η προέλευση της 3D εκτύπωσης μπορεί να επισημανθεί το 1986, όταν εκδόθηκε το πρώτο δίπλωμα

ευρεσιτεχνίας για τη συσκευή στερεολιθογραφίας (SLA). Αυτό το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ανήκει στον Charles (Chuck) Hull (Εικόνα 2.2), ο οποίος εφηύρε το πρώτο SLA μηχάνημα το 1983. Ο Χαλ συνέχισε ιδρύοντας την 3D Systems Corporation - μια από τις μεγαλύτερες και πιο παραγωγικές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον τομέα της 3D εκτύπωσης σήμερα.



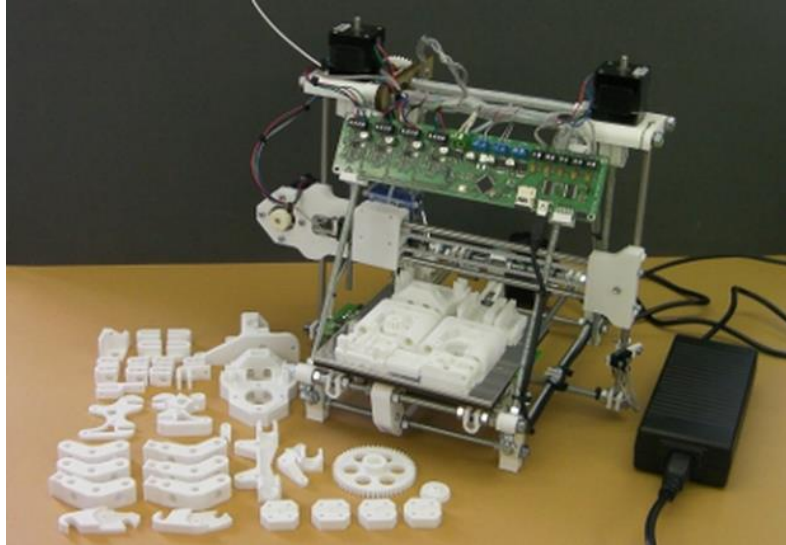
Εικόνα 2.2 Ο Charles Hall, εφευρέτης της στερεολιθογραφίας, ιδρυτής της “3d Systems” και ο πρώτος εκτυπωτής της 3d Systems

Το 1988, η 3D Systems κυκλοφορεί την πρώτη έκδοση του μηχανήματος για το κοινό, που ονομάζεται SLA-250 δεν ήταν το μόνο μηχάνημα τεχνολογίας ΤΠ που εξελισσόταν. Το 1987, ο Carl Deckard, ο οποίος εργάζεται στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, κατέθεσε αίτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας στις ΗΠΑ για την επιλεκτική διαδικασία ΤΠ Laser Sintering (SLS). Αυτό το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας εκδόθηκε το 1989 και η SLS στη συνέχεια παραχωρήθηκε στην εταιρία DTM Inc., η οποία εξαγοράστηκε αργότερα από την 3D Systems. Το 1989 ήταν επίσης η χρονιά που ο Scott Crump, συν-ιδρυτής της Stratasys Inc. κατέθεσε αίτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία FDM αποκλειστική τεχνολογία που εξακολουθεί να κατέχεται από την εταιρία σήμερα, αλλά είναι επίσης και η διαδικασία που χρησιμοποιείται από πολλές μηχανές entry-level, με βάση το μοντέλο RepRap ανοιχτού κώδικα, που είναι ευρέως διαδεδομένη σήμερα. Το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας FDM εκδόθηκε για τη Stratasys το 1992. Η Ευρώπη, το 1989 είδε επίσης το σχηματισμό της EOS GmbH στη Γερμανία, που ιδρύθηκε από τον Hans Langer αναπτύσσοντας τη διαδικασία LS. Σήμερα, τα συστήματα EOS αναγνωρίζονται σε όλο τον κόσμο για την ποιότητα της παραγωγής τους για την κατασκευή βιομηχανικών πρωτοτύπων και την παραγωγή εφαρμογές

3D εκτύπωσης. Η EOS πούλησε το πρώτο σύστημα "Stereos" το 1990. Η διαδικασία direct metal laser sintering (DMLS) της εταιρείας προέκυψε από ένα έργο της EOS με ένα τμήμα της Electrolux, η οποία αργότερα αποκτήθηκε από την EOS.

Άλλες τεχνολογίες 3D εκτύπωσης και διαδικασίες επίσης εμφανίζονται κατά τη διάρκεια αυτών των ετών, επιγραμματικά η διαδικασία Ballistic Particle Manufacturing (BPM) αρχικά με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον William Masters, Laminated Object Manufacturing (LOM) αρχικά με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Michael Feygin, Solid Ground Curing (SGC), αρχικά με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από Itzhak Pomerantz κ.α. και «τριδιάστατη εκτύπωση» (3DP) αρχικά με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Emanuel Sachs, κ.α. Και έτσι στις αρχές της δεκαετίας παρατηρήθηκε μια αύξηση του αριθμού των ανταγωνιστικών εταιρειών στην αγορά της ΤΠ, αλλά μόνο τρία από τα πρωτότυπα παραμένουν και σήμερα - 3D Systems, η EOS και η Stratasys.

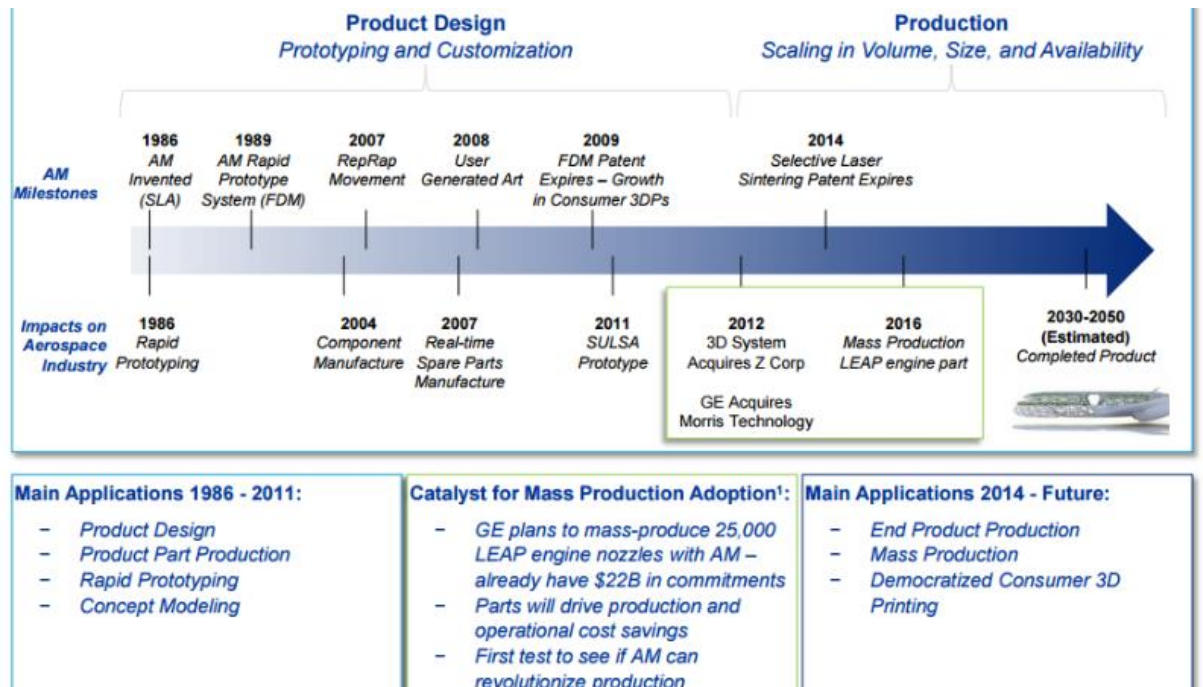
Όλη τη δεκαετία του 1990 και στις αρχές του 2000, εισήχθησαν πλήθος νέων τεχνολογιών, εξακολουθώντας να επικεντρώνονται εξολοκλήρου σε βιομηχανικές εφαρμογές. Έχουμε την εμφάνιση της νέας ορολογίας, όπως Rapid Tooling (RT), Rapid Casting και Rapid Manufacturing. Το 1993, Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αναπτύσσει την τεχνολογία, που ονομάζεται "3 διαστάσεων τεχνικές εκτύπωσης" (3DP), η οποία είναι παρόμοια με την τεχνολογία inkjet που χρησιμοποιείται σε 2D εκτυπωτές. Το 1995, η Z Corporation λαμβάνει αποκλειστική άδεια από το MIT να χρησιμοποιήσει την τεχνολογία και άρχισε να αναπτύσσει 3D εκτυπωτές που βασίζονται στην τεχνολογία 3DP. Το 1996, τα τρία κύρια προϊόντα, " Genisys " από Stratasys, " ACTUA 2100 " από 3D Systems και " Z402 " από Z Corporation, εισήχθησαν. Ήταν μόνο κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου που ο όρος "3D εκτυπωτής" χρησιμοποιείται για πρώτη φορά για μηχανήματα ταχείας πρωτοτυποποίησης.



Εικόνα 2.3 RepRap: ο εκτυπωτής που εκτυπώνει τα μέρη που τον αποτελούν

Το 2007, η αγορά είδε το πρώτο σύστημα κάτω από \$10.000 από την 3D Systems χωρίς την αναμενόμενη επιτυχία λόγω του συστήματος αλλά και των αναγκών της αγοράς. Ο πραγματικός στόχος ήταν η κυκλοφορία ενός 3D εκτυπωτή με κόστος κάτω των 5.000\$ αυτό ήταν το κλειδί για να ανοίξει η αγορά των 3D εκτυπωτών σε ένα ευρύτερο κοινό εκτός των βιομηχανιών. Όπως αποδείχθηκε όμως, το 2007 ήταν στην πραγματικότητα η χρονιά που είχε σηματοδοτήσει το σημείο καμπής για την προσβάσιμη τεχνολογία της 3D εκτύπωσης όταν το RepRap φαινόμενο ριζωσε. Ο Dr. Bowyer συνέλαβε τον RepRap (Εικόνα 2.3), το σενάριο ενός ανοιχτού κώδικα, αυτοανατυπούμενου 3D εκτυπωτή ήδη από το 2004. Το 2007 όμως το open source κίνημα της 3D εκτύπωσης άρχισε να αποκτά προβολή. Μια συνοπτική αναδρομή της εξέλιξης της 3D εκτύπωσης και της παραγωγής παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4.



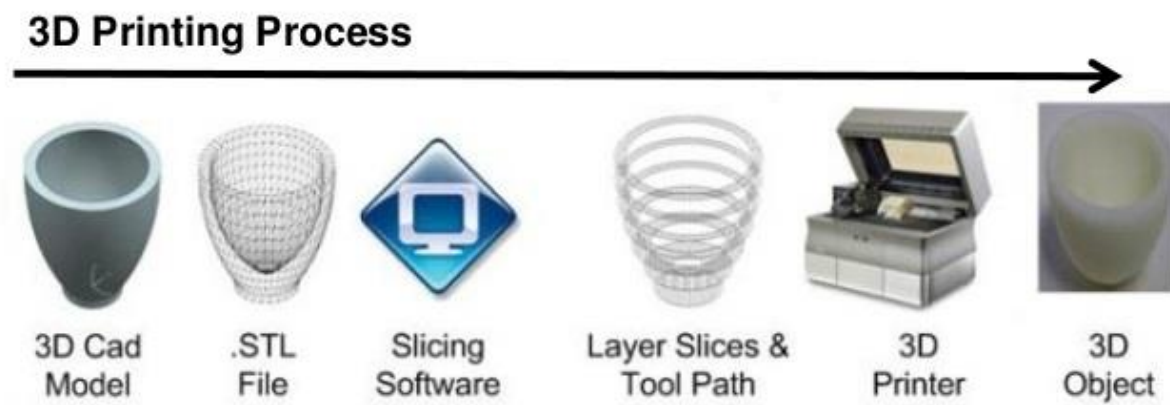


Εικόνα 2.4 Εξέλιξη της 3D εκτύπωσης

### 2.3 Από τις δύο στις τρεις διαστάσεις

Για την μετάβαση από την συνηθισμένη δισδιάστατη εκτύπωση στην τρισδιάστατη, και για την δημιουργία εκτυπωτών που θα τυπώνουν σε τρεις διαστάσεις χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί κάποιο μαθηματικό υπόβαθρο στο οποίο θα στηριζόταν η λειτουργία τους. Το θεώρημα Fubini είναι αυτό, πάνω στο οποίο βασίζεται το λειτουργικό σύστημα των 3D εκτυπωτών. Στην μαθηματική ανάλυση, το θεώρημα αυτό εισήχθη από τον Guido Fubini το 1907 και μας δίνει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες είναι δυνατόν να υπολογιστεί ένα διπλό ολοκλήρωμα, χρησιμοποιώντας επαναληπτικά ολοκληρώματα. Με βάση αυτό το θεώρημα, κάθε αντικείμενο ( $n$ ) διαστάσεων μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα φάσμα επιπέδων ( $n-1$ ) διαστάσεων. Επομένως εάν κάποιος αναρωτηθεί αν θα μπορούσαμε να εκτυπώσουμε τρισδιάστατα οποιοδήποτε φυσικό αντικείμενο, η απάντηση είναι πως μπορούμε και μας την δίνει το θεώρημα Fubini [7].

## 2.4 Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης



Εικόνα 2.5 Η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Για να εξηγήσουμε εκτενέστερα τη διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, θα αναφέρουμε μια περιγραφή της διαδικασίας με ορισμούς και επεξηγήσεις.

### 2.4.1 Computer Aided Design (Σύστημα CAD) & Μοντελοποίηση τρισδιάστατων αντικειμένων

Ο σχεδιασμός με τη βοήθεια υπολογιστή ορίζεται ως η δημιουργία και ο χειρισμός σχεδιαστικών πρωτοτύπων ως εργαλείο στη διαδικασία του σχεδιασμού. Η τεχνολογία των συστημάτων CAD αποτελείται από τρία μέρη, τον υπολογιστή, το λογισμικό και τον χρήστη. Ο συνδυασμός της ανθρώπινης ικανότητας και των υπολογιστών δίνει το βέλτιστο CAD σύστημα. Ο σχεδιασμός, η ανάλυση και η κατασκευή αποτελούν τις βασικές λειτουργίες ενός συστήματος CAD.

Για τη μοντελοποίηση τρισδιάστατων αντικειμένων έχουν εφαρμοστεί αρκετές μεθοδολογίες, με αρκετές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Οι βασικότερες είναι: τα μοντέλα ακμών, τα μοντέλα επιφανειών, τα μοντέλα στερεών και τα στερεά μοντέλα με μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Οι διαφορές μεταξύ των συγκεκριμένων μεθοδολογιών αφορούν την πληρότητα του ψηφιακού μοντέλου. Τα μοντέλα ακμών είναι τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν και θεωρούνται τα απλούστερα στη χρήση και τα λιγότερο απαιτητικά στην εφαρμογή από άποψη υπολογιστικής ισχύος. Σήμερα λόγω του περιορισμένου αριθμού εφαρμογών τους,

χρησιμοποιούνται ως το ενδιάμεσο στάδιο για τη δημιουργία των μοντέλου επιφανειών ή του στερεού μοντέλου. Τα μοντέλα επιφανειών μπορούν να εμφανίσουν με μεγάλη ακρίβεια τη μορφή του τελικού αντικειμένου, χωρίς όμως να πλησιάζει την ακρίβεια του μοντέλου που δημιουργείται με τη μεθοδολογία στερεού.

Τα στερεά μοντέλα είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα στη βιομηχανία λόγω της υψηλής ακρίβειας και της δυνατότητας προσομοίωσης της συναρμολόγησης που προσφέρουν. Τα ψηφιακά μοντέλα είναι πλέον κλειστοί όγκοι και όχι μόνο ένα σύνολο επιφανειών.

#### **2.4.2 Ταχεία Πρωτοτυποποίηση**

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση (ΤΠ) είναι η τεχνολογία κατασκευής μοντέλων στρώμα-στρώμα (layer by layer) που μείωσε το χρόνο κατασκευής μοντέλων κάθε πολυπλοκότητας σε ώρες αντί για ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Αποτελεί πλέον για πολλές εταιρείες έναν απαραίτητο κρίκο στη διαδικασία εξέλιξης των προϊόντων και έχει καθιερωθεί να περιγράφει τις νέες τεχνολογίες που κατασκευάζουν μοντέλα προσθέτοντας υλικό και όχι αφαιρώντας.

#### **2.4.3 Τρόπος λειτουργίας**

Από το συστήματα στερεάς μοντελοποίησης παίρνουμε ένα αρχείο τύπου STL. Αυτό τροφοδοτείται στο σύστημα (ΤΠ) που κόβει λεπτές οριζόντιες διατομές διαμέσου του αρχείου STL, στο επιθυμητό πάχος (πχ. 0.2mm). Το εξάρτημα δημιουργείται σε στρώματα. Το σύστημα ΤΠ χειρίζεται τη στοίβα των ψηφιακών διατομών για να παράγει το κάθε επίπεδο υλικού, το έναν πάνω από το άλλο.

### **2.5 Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης**

Η ονομασία τους ‘τρειςδιάστατοι εκτυπωτές’ αντανακλά τις τεχνικές που χρησιμοποιούν, οι οποίες θυμίζουν σε μεγάλο βαθμό, τις τεχνικές που χρησιμοποιούν οι απλοί εκτυπωτές laser και ink-jet. Οι τεχνικές παραγωγής που χρησιμοποιούμε μέχρι σήμερα, διαφέρουν αρκετά από την τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Για να κατασκευάσουμε το αντικείμενο που θέλουμε ως τώρα χρησιμοποιούμε μεθόδους αφαίρεσης υλικού από χυτά,

σφυρήλατα, ακατέργαστα τεμάχια, χρησιμοποιώντας τα απαραίτητα εργαλεία προκειμένου να πάρει το αντικείμενο την επιθυμητή μορφή. Αντίθετα με αυτήν μέθοδο, η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία έχουμε πρόσθεση υλικού. Η δημιουργία ενός αντικειμένου πραγματοποιείται με την διαδοχική συγκόλληση, την εναπόθεση ή με την στερεοποίηση λεπτών στρώσεων του υλικού, σύμφωνα με το σχέδιο ή την εικόνα που θα έχουμε στον υπολογιστή. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες, τις οποίες χρησιμοποιούν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές, ανάλογα με τις απαιτήσεις των προϊόντων που θέλουμε να εκτυπώσουμε.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι 3D εκτυπωτών, καθένας χρησιμοποιεί μια διαφορετική τεχνολογία που επεξεργάζεται διαφορετικά υλικά με διαφορετικούς τρόπους. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι ένας από τους πιο βασικούς περιορισμούς της 3D εκτύπωσης - από την άποψη των υλικών και εφαρμογών - είναι ότι δεν υπάρχει «μία λύση για όλα». Για παράδειγμα, ορισμένοι 3D εκτυπωτές επεξεργάζονται υλικά σε σκόνη (νάιλον, πλαστικό, κεραμικά, μέταλλα), χρησιμοποιούν μία ακτίνα φωτός/πηγή θερμότητας για να συντήξουν τη σκόνη στο καθορισμένο σχήμα. Άλλη επεξεργασία υλικών είναι αυτή της πολυμερούς ρητίνης και πάλι χρησιμοποιούν μία ακτίνα φωτός/λείζερ για να στερεοποιηθεί η ρητίνη σε εξαιρετικά λεπτές στρώσεις. Μια άλλη διαδικασία εκτύπωσης 3D είναι η διοχέτευση λεπτών σταγονιδίων από ακροφύσιο (jetting), θυμίζει την 2D inkjet εκτύπωση, αλλά με υλικά υψηλής ποιότητας και ένα binder για να σταθεροποιεί τα επίπεδα. Ίσως η πιο κοινή διαδικασία είναι η εναπόθεση χρησιμοποιείται από την πλειονότητα των entry-level 3D εκτυπωτών. Αυτή η διαδικασία εξωθεί πλαστικό, συνήθως PLA ή ABS, σε μορφή νήματος μέσω ενός θερμαινόμενου εξωθητή για να σχηματίσει στρώματα και να δημιουργήσει το προκαθορισμένο σχήμα.

Επειδή η φύση της εκτύπωσης μας επιτρέπει να τυπώνουμε τα μέρη απευθείας, είναι δυνατό να παραχθούν πολύ λεπτομερή και περίπλοκα αντικείμενα, αναιρώντας την ανάγκη για συναρμολόγηση. Ο σχεδιασμός για 3D εκτύπωση απαιτεί, την προετοιμασία του αρχείου και τη μετατροπή του μία διαδικασία που μπορεί να αποδειχθεί χρονοβόρα και πολύπλοκη, ιδιαίτερα για τα τμήματα που απαιτούν στηρίγματα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. Ωστόσο, υπάρχουν συνεχείς ενημερώσεις και αναβαθμίσεις λογισμικού για αυτές τις λειτουργίες και η κατάσταση βελτιώνεται. Επιπλέον, από τη στιγμή που θα

τελειώσει η εκτύπωση, πολλά μέρη θα πρέπει να υποβληθούν σε εργασίες φινιρίσματος που απαιτούν ικανότητα, χρόνο και υπομονή.

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει διάφορες τεχνολογίες που εφαρμόζονται στην τρισδιάστατη εκτύπωση καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται (τα υλικά θα αναπτυχθούν σε επόμενη ενότητα) και παρακάτω αναλύονται μερικές από τις τεχνολογίες.

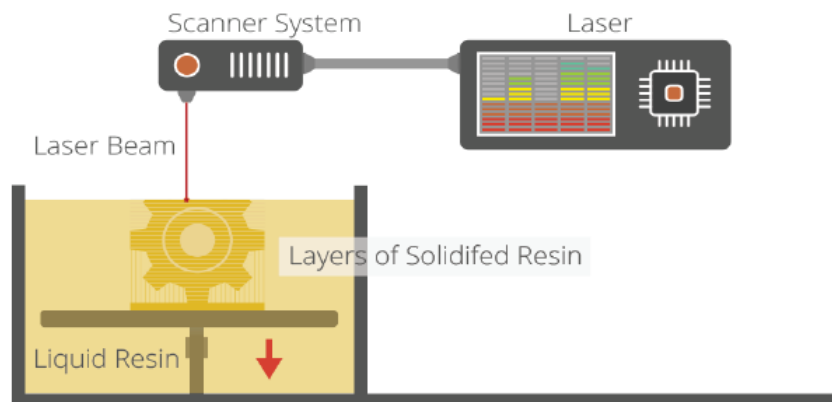
Τύπος	Τεχνολογία	Υλικά
<b>Κόκκοι / granular</b>	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Σχεδόν όλα τα κράματα μετάλλων
	Electron Beam Melting (EBM)	Κράματα τιτανίου
	Selective Heat Sintering (SHS)	Θερμοπλαστική σκόνη / πούδρα
	Selective Laser Sintering (SLS)	Θερμοπλαστικά, σκόνες μετάλλων, σκόνες κεραμικών
	Powder bed and inkjet head 3D printing, Plaster-based 3D printing (PP)	Γύψος
<b>Εξώθηση</b>	Fused Deposition Modeling (FDM)	Θερμοπλαστικά (π.χ. PLA, ABS, εύτηκτα υλικά)
<b>Laminated / με πολλαπλές στρώσεις</b>	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Χαρτί, μεταλλικό φύλλο, πλαστικό φύλλο
<b>Πολυμερισμένο φως / Light polymerized</b>	Stereolithography (SL)	Φωτοπολυμερή
	Digital Light Processing (DLP)	Υγρή ρητίνη

Πίνακας 2.1 Τεχνολογίες και Υλικά της 3D εκτύπωσης

### 2.5.1 Stereolithography (SL)

Αναπτύχθηκε και εκμεταλλεύθηκε εμπορικά από την εταιρεία 3D Systems Inc. Η στερεολιθογραφία (SL) είναι ευρέως αναγνωρισμένη ως η πρώτη διαδικασία 3D εκτύπωσης.

Η SL είναι μια διαδικασία με λέιζερ, λειτουργεί με φωτο πολυμερείς ρητίνες, που αντιδρούν με το λέιζερ για να σχηματίσουν ένα στερεό με ένα πολύ ακριβή τρόπο.



Εικόνα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας της στερεολιθογραφίας.

Πρόκειται για μια περίπλοκη αλλά πολύ ακριβής διαδικασία. Η φωτοπολυμερής ρητίνη κρατείται σε μια δεξαμενή με μια κινητή πλατφόρμα στο εσωτερικό. Μία δέσμη λέιζερ κατευθύνεται στους άξονες XY σε ολόκληρη την επιφάνεια της ρητίνης, σύμφωνα με τα 3D δεδομένα που παρέχονται στη μηχανή (το αρχείο .STL), οπότε η ρητίνη σκληραίνει ακριβώς όπου το λέιζερ χτυπά την επιφάνεια. Η ακτίνα laser που στερεοποιεί το ρευστό είναι η ακτίνα HeCd. Μια δεύτερη ακτίνα laser χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώνει ότι η επιφάνεια του ρευστού βρίσκεται στη σωστή θέση. Ο σαρωτής 'σπάει' τις επιφανειακές τάσεις, και επιβεβαιώνει ότι πετυχαίνουμε επίπεδη επιφάνεια. Αυτό συνεχίζεται μέχρι το σύνολο του αντικειμένου να έχει ολοκληρωθεί και η πλατφόρμα μπορεί να ανυψωθεί για να αφαιρεθεί από το κάδο.

Λόγω της φύσης της διαδικασίας SL, απαιτεί δομές στήριξης για ορισμένα μέρη, ειδικά εκείνα με προεξοχές ή εσωτερικές τομές. Οι δομές αυτές θα πρέπει να αφαιρεθούν με το χέρι. Σε άλλα στάδια επεξεργασίας, πολλά αντικείμενα που εκτυπώνονται 3D χρησιμοποιώντας SL πρέπει να καθαρίζονται και να υποβάλλονται σε μια ειδική διαδικασία ξήρανσης σε ένα μηχάνημα σαν φούρνο με πολύ έντονη ακτινοβολία για να σκληρύνει πλήρως η ρητίνη. Η SL είναι γενικά αποδεκτή ως μία από τις πιο ακριβές 3D διεργασίες εκτύπωσης με εξαιρετικό φινίρισμα επιφάνειας. Ωστόσο, οι περιοριστικοί παράγοντες είναι τα

στάδια μετα-επεξεργασίας που απαιτούνται και τη σταθερότητα των υλικών αφού με την πάροδο του χρόνου μπορεί να γίνουν πιο εύθραυστα.

Μια από τις τελευταίες μηχανές της 3D Systems Inc. Είναι ο εκτυπωτής iPro 9000 Stereolithography. Το πάχος των επιπέδων που συνθέτονται μπορεί να είναι 0.1 mm, κατασκευάζει μοντέλα βάρους μέχρι και 68 kg, λειτουργεί σε Windows NT, και έχει βάρος σχεδόν 1700 kg.

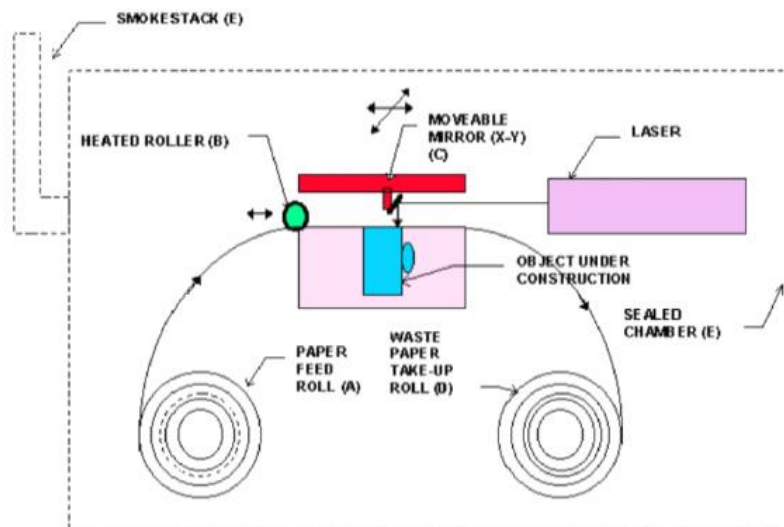


Εικόνα 2.7 3D Systems iPro 9000 Stereolithography system

### 2.5.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Texas από τον Carl Deckard και κατοχυρώθηκε το 1989. Στην τεχνική αυτή, μια ακτίνα λέιζερ λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Ένας κύλινδρος στρώνει μια ποσότητα σκόνης με το κατάλληλο πάχος πάνω σε μια επιφάνεια και μια κεφαλή λέιζερ διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής λιώνοντας και στερεοποιώντας την σκόνη επιλεκτικά. Στην συνέχεια η επιφάνεια κατέρχεται κατά το πάχος της επόμενης διατομής, τοποθετείται εκ νέου σκόνη την οποία στρώνει ο κύλινδρος και η κεφαλή λέιζερ διαγράφει την επόμενη διατομή στερεοποιώντας την πάνω στην πρώτη. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί

το αντικείμενο. Το περίσσειμα σκόνης χρησιμεύει ως υποστήριγμα του υπό κατασκευή αντικειμένου.



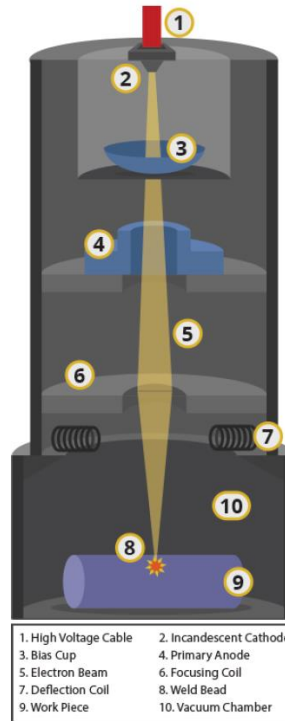
Εικόνα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας SLS

### 2.5.3 Electron Beam Melting (EBM)

Η τεχνική 3D εκτύπωσης της τήξεως με δέσμη ηλεκτρονίων είναι μια διαδικασία που αναπτύχθηκε από τη σουηδική εταιρεία ARCAM. Αυτή η μέθοδος εκτύπωσης είναι παρόμοια με τη διαδικασία Direct Metal Laser Sintering (DLMS) όσον αφορά τον σχηματισμό των τμημάτων από μεταλλική σκόνη. Η βασική διαφορά είναι η πηγή θερμότητας, η οποία, όπως υποδηλώνει το όνομα είναι μία δέσμη ηλεκτρονίων, αντί για ένα λέιζερ, το οποίο προϋποθέτει ότι η διαδικασία διεξάγεται υπό συνθήκες κενού.

Η EBM έχει δημιουργεί αντικείμενα με υψηλή πυκνότητα από μια ποικιλία από κράματα μετάλλων. Ως αποτέλεσμα η τεχνική να είναι ιδιαίτερα επιτυχής σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών παραγωγής στον ιατρικό κλάδο, κυρίως για εμφυτεύματα. Ωστόσο, άλλοι τομείς υψηλής τεχνολογίας, όπως η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία έχουν επίσης εξετάσει την τεχνολογία για EBM.



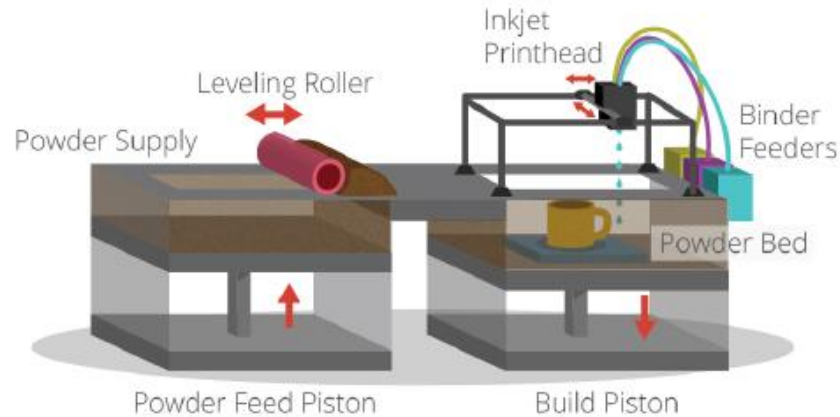


Εικόνα 2.9 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας EBM

#### 2.5.4 Τεχνολογία Inkjet

Υπάρχουν δύο 3D διαδικασίες εκτύπωσης που χρησιμοποιούν την τεχνική εκτόξευσης (jetting). Binder jetting: όπου το υλικό που ρέει είναι ένα συνδετικό υλικό, και επιλεκτικά ψεκάζεται σε μια κλίνη σκόνης ώστε να συντηχθεί σε ένα στρώμα για τη δημιουργία/εκτύπωση του απαιτούμενου τμήματος. Μόλις ένα στρώμα έχει ολοκληρωθεί, η κλίνη κόνεως πέφτει σταδιακά και ένας κύλινδρος ή λεπίδα λειαίνει τη σκόνη πάνω από την επιφάνεια της κλίνης, πριν από το επόμενο πέρασμα των κεφαλών jet, με το συνδετικό υλικό για το επόμενο στρώμα διαμορφώνεται και συντήκεται με την προηγούμενη στρώση.

## Inkjet: Binder Jetting

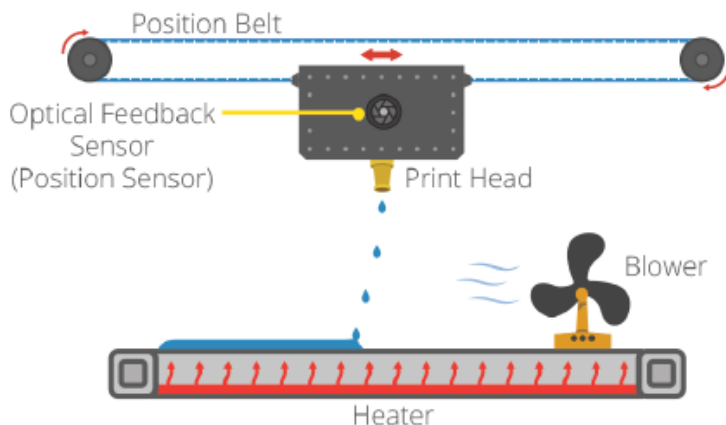


Εικόνα 2.10 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Binder Jetting

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας, όπως και με την SLS, είναι ότι περιλαμβάνουν το γεγονός ότι η ανάγκη για υποστρώματα αναιρείται επειδή το ίδιο το στρώμα σκόνης παρέχει αυτή τη λειτουργία. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία από διαφορετικά υλικά, περιλαμβανομένων των κεραμικών και των τροφίμων. Ένα περαιτέρω χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της διαδικασίας είναι η ικανότητα να προσθέτει εύκολα μια πλήρη παλέτα χρωμάτων τα οποία μπορούν να προστεθούν στο συνδετικό υλικό.

Τα τμήματα που προκύπτουν άμεσα από τη μηχανή, ωστόσο, δεν είναι τόσο δυνατά όσο με τη διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης και απαιτούν μετά-επεξεργασία για να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητά τους.

## Inkjet: Material Jetting



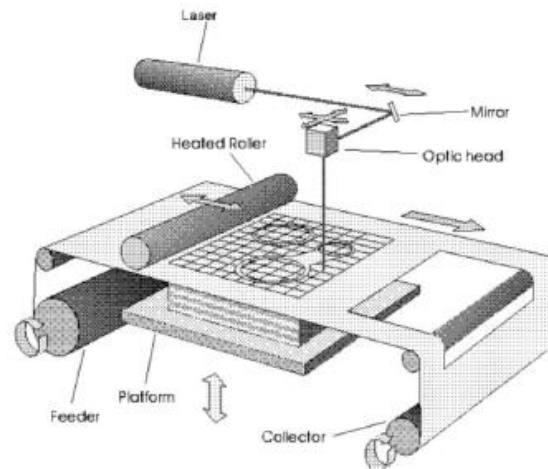
Εικόνα 2.11 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας Material Jetting

Material jetting: είναι μια 3D διαδικασία εκτύπωσης σύμφωνα με την οποία τα υλικά κατασκευής (σε υγρή ή ρευστή κατάσταση) ρέουν μέσα από πολλαπλές κεφαλές εκτόξευσης (με άλλα ταυτόχρονα υλικά). Ωστόσο, τα υλικά είναι υγρά φωτοπολυμερή, τα οποία ισχυροποιούνται με ένα πέρασμα υπεριώδους ακτινοβολίας.

Η φύση αυτού του προϊόντος επιτρέπει την ταυτόχρονη απόθεση μιας σειράς υλικών, πράγμα που σημαίνει ότι ένα μόνο τμήμα μπορεί να παραχθεί από πολλαπλά υλικά με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Είναι μια πολύ ακριβής μέθοδος 3D εκτύπωσης για την παραγωγή ακριβών εξαρτημάτων με πολύ λείο φινίρισμα.

### 2.5.5 Fused Deposition Modelling (FDM)

Σε αυτήν την τεχνική, ίνες θερμού πλαστικού υλικού εξέρχονται από μία κεφαλή η οποία κινείται στο επίπεδο (x,y). Η κεφαλή εναποθέτει λεπτές στρώσεις του πλαστικού πάνω σε μία βάση, διαγράφοντας την πρώτη διατομή. Η βάση βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και έτσι το υλικό στερεοποιείται γρήγορα. Στην συνέχεια η βάση κατέρχεται και η κεφαλή εναποθέτει το δεύτερο στρώμα πάνω στο πρώτο. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του αντικειμένου.

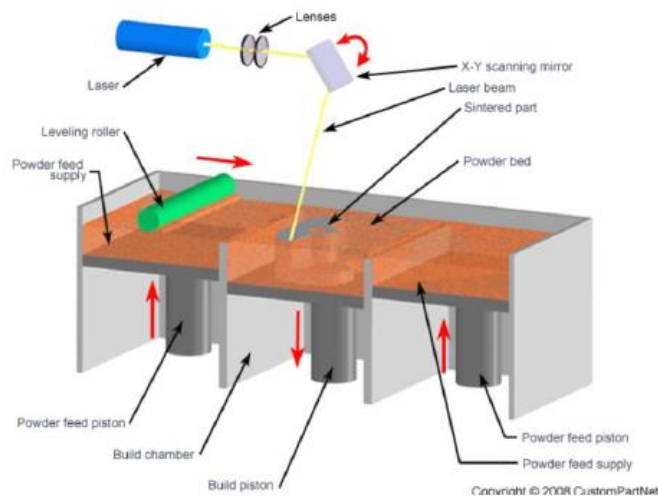


Εικόνα 2.12 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας FDM

Στην τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, κυρίως κεραμικά και πολυμερή. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμό προσθετικής κατασκευής, οι εν λόγω εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Είναι πολύ σημαντικό να τονίσουμε ότι έχουν την δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής [8] , [9].

### 2.5.6 Laminated Object Manufacturing (LOM)

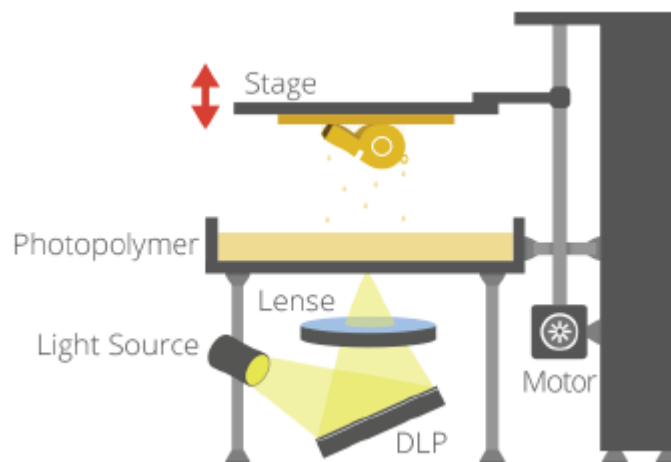
Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε από την εταιρία Helisys στην Αμερική. Βασίζεται στην κατασκευή αντικειμένων με την συγκόλληση λεπτών φύλλων υλικού που φέρουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας. Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χαρτί, ενώ αργότερα η εταιρία ανέπτυξε και χρησιμοποίησε και άλλα υλικά όπως αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά, λεπτές ταινίες κεραμικών υλικών ή μετάλλων υπό μορφή σκόνης.



Εικόνα 2.13 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας LOM

## 2.5.7 Digital Light Processing (DLP)

DLP ή ψηφιακή επεξεργασία φωτός, είναι μια παρόμοια διαδικασία με αυτή της SL αφού είναι μια διαδικασία 3D εκτύπωσης που λειτουργεί με φωτοπολυμερή. Η κύρια διαφορά είναι η πηγή φωτός. Η DLP χρησιμοποιεί μία πιο συμβατική πηγή φωτός, μια λάμπα τόξου με ένα πάνελ υγρού κρυστάλλου ή μια συσκευή παραμορφωμένου καθρέπτη (DMD), η οποία εφαρμόζεται σε ολόκληρη την επιφάνεια του κάδου ρητίνης σε ένα μόνο πέρασμα, γενικά καθιστώντας ταχύτερη τη διαδικασία σε σχέση με τη SL.



Εικόνα 2.14 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας DLP

## 2.6 Υλικά

Τα υλικά που διατίθενται για 3D εκτύπωση έχουν εξελιχθεί αρκετά σε σχέση με το παρελθόν. Υπάρχει τώρα μια ευρεία ποικιλία διαφορετικών τύπων υλικών, που παρέχονται σε διαφορετικές καταστάσεις (σκόνη, νήμα, σφαιρίδια, κοκκία, ρητίνη κλπ). Ειδικά υλικά έχουν πλέον αναπτυχθεί για συγκεκριμένες πλατφόρμες εκτέλεσης ειδικών εφαρμογών με τις ιδιότητες του υλικού που ταιριάζει με μεγαλύτερη ακρίβεια ανάλογα τις ανάγκες. Ωστόσο, υπάρχουν πλέον πάρα πολλά ιδιόκτητα υλικά από τα πολλούς διαφορετικούς πωλητές 3D εκτυπωτών. Αντ' αυτού, θα εξετάσουμε τα πιο δημοφιλή είδη.

### 2.6.1 Πλαστικά

Το πολυαμίδιο (νάιλον) είναι ένα μακρομόριο με επαναλαμβανόμενες μονάδες οι οποίες συνδέονται με ομόλογα αμιδίου. Μπορεί να είναι φυσικό ή και τεχνητό [10]. Πρόκειται για ένα δυνατό, ευέλικτο υλικό με δυνατότητα μεγάλης λεπτομέρειας [11]. Τα αντικείμενα σε πολυαμίδιο είναι κατασκευασμένα από μια λευκή, πολύ λεπτή κοκκώδη σκόνη. Έτσι μπορούμε να παράγουμε ένα δυνατό εύκαμπτο υλικό, που μπορεί να αντέξει κάποια πίεση ενώ κάμπτεται. Η επιφάνεια έχει μια αμμόδη, κοκκώδη και ελαφρώς πορώδη εμφάνιση [12].



Εικόνα 2.15 Δείγμα τρισδιάστατης εκτύπωσης πολυαμιδίου [13]

Το πολυαμίδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολύπλοκα μοντέλα, μικρές σειρές μοντέλων, (πολλά αντίγραφα ενός μοντέλου) καθώς επίσης για φωτιστικά και λειτουργικά

μοντέλα. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού όλων των όλων των 3D τεχνικών εκτύπωσης [14] , [15].

Το πολυαμίδιο είναι ένα υλικό ιδανικό για αρχάριους σχεδιαστές που θέλουν μια καλή τιμή , μέγιστη ελευθερία δημιουργίας και δεν θέλουν να ενοχλούνται από τους περιορισμούς της διαδικασίας εκτύπωσης. Τα μοντέλα πολυαμιδίου δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε εξωτερικούς χώρους, καθώς απορροφούν την υγρασία. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις το υλικό μπορεί να επεξεργαστεί και να γίνει υδατοστεγές. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στα μοντέλα με μεγάλες επίπεδες επιφάνειες ή πλάκες. Όταν ένα τέτοιο μοντέλο κρυώσει, είναι πιθανόν να παραμορφωθεί (στρέβλωση) [12].

Το ABS (Ακρυλονιτρίλιο Βουταδιένιο Στυρολίου) είναι ένα άλλο κοινό πλαστικό που χρησιμοποιείται για 3D εκτύπωση, και χρησιμοποιείται ευρέως στους entry-level FDM 3D εκτυπωτές σε μορφή νήματος. Είναι ένα ιδιαίτερα ισχυρό πλαστικό και υπάρχει σε ένα ευρύ φάσμα των χρωμάτων. Το ABS μπορεί να αγοραστεί σε μορφή νήματος είναι ευρέως διαδεδομένο και αρκετά δημοφιλές.



Εικόνα 2.16 Διάφορα είδη πλαστικού

Το PLA είναι ένα πλαστικό υλικό βιοδιασπώμενο που έχει κερδίσει έδαφος στην 3D εκτύπωση για αυτόν ακριβώς τον λόγο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μορφή ρητίνης για διεργασίες DLP/SL, καθώς και σε μορφή νηματίου για τη διαδικασία FDM. Προσφέρεται σε μια ποικιλία χρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των διαφανών, η οποία έχει αποδειχθεί ότι είναι μια χρήσιμη επιλογή για ορισμένες εφαρμογές 3D εκτύπωσης. Ωστόσο, δεν είναι τόσο ανθεκτικό ή τόσο ευέλικτο όσο το ABS.

Το LayWood είναι ένα ειδικά σχεδιασμένο υλικό εκτύπωσης 3D για entry-level 3D εκτυπωτές. Έρχεται σε μορφή νήματος και είναι από ξύλο/πολυμερές σύνθετο υλικό (που αναφέρεται επίσης ως WPC).

### 2.6.1.1 ABS

Το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρολίου (ABS) με χημικό τύπο:  $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$  είναι ένα κοινό θερμοπλαστικό. Η θερμοκρασία της υαλώδους μεταπτώσεώς του είναι περίπου 105°C (221°F). Το ABS είναι άμορφο και ως εκ τούτου δεν έχει κανένα πραγματικό σημείο τήξεως [23]. Τα μοντέλα σε ABS είναι φτιαγμένα από θερμοπλαστικό, και είναι εξαιρετικά χρήσιμα για λειτουργικές εφαρμογές. Επίσης, τα συγκεκριμένα μοντέλα έχουν μεγάλη ακρίβεια και ένα ενδιάμεσο επίπεδο εκτύπωσης λεπτομερειών. Προσφέρουν μεγάλη ελευθερία σχεδιασμού, αλλά η ποιότητα της επιφάνειας των μοντέλων είναι πιο τραχειά σε σύγκριση με άλλα υλικά [12].



Εικόνα 2.17 Τρισδιάστατη εκτύπωση με ABS

Το υλικό είναι διαπερατό από νερό (δεν είναι αδιάβροχο), ενώ η εκτύπωση είναι σχετικά αργή, αλλά απαιτείται λιγότερο χειρωνακτικό φινίρισμα σε σύγκριση με άλλα υλικά. Μπορούμε να έχουμε πολύπλοκα σχέδια, καθώς το υλικό υποστήριξης είναι απορροφήσιμο [24]. Ο Πίνακας 2.2 και ο Πίνακας 2.3 αναφέρουν κάποια χαρακτηριστικά του ABS.

Προδιαγραφές Σχεδιασμού	
Ελάχιστο πάχος τοιχώματος	1mm
Ελάχιστες λεπτομέρειες	0.3mm



<b>Μέγιστο μέγεθος</b>	400x355x400
<b>Εκαθάριση</b>	0.4mm

Πίνακας 2.2

<b>Τεχνικά Χαρακτηριστικά</b>	
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό D638 (MPa)</b>	22
<b>Μέτρο ελαστικότητας D638 (MPa)</b>	1627
<b>Αντοχή σε κάμψη D790 (MPa)</b>	41
<b>Καμπτική Modulus D790 (MPa)</b>	1834
<b>Notched κρούση Izod D256 (J/m<sup>2</sup>)</b>	107
<b>Unnotched κρούση Izod D256 (J/m<sup>2</sup>)</b>	214
<b>Θερμότητα εκτροπής t D648 (° C)</b>	90 σε 0.45MPa 76 σε 1.81MPa
<b>Ποκνότητα (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.05
<b>Επιμήκυνση θραύσης (%)</b>	6
<b>Χρώματα</b>	Κόκκινο, γκρι, μαύρο, λευκό

Πίνακας 2.3

Όπου

- ASTM D638: Πρότυπη μέθοδος ελέγχου για ιδιότητες των πλαστικών σε εφελκυσμό.
- ASTM D790: Πρότυπη μέθοδος δοκιμής για τις καμπτικές ιδιότητες των οπλισμένων και ενισχυμένων πλαστικών και για ηλεκτρικά μονωτικά υλικά.
- ASTM D256: Πρότυπη μέθοδος δοκιμής για τον προσδιορισμό της αντίστασης Izod
- ASTM D648: Πρότυπη μέθοδος ελέγχου της θερμοκρασίας εκτροπής.

## 2.6.2 Μέταλλα

Ένας αυξανόμενος αριθμός των μετάλλων και σύνθετων υλικών χρησιμοποιούνται για τη βιομηχανική 3D εκτύπωση. Δύο από τα πιο κοινά είναι τα παράγωγα αλουμινίου και κοβαλτίου. Ένα από τα ισχυρότερα και επομένως δημοφιλή μέταλλα για 3D εκτύπωση είναι από ανοξείδωτο χάλυβα σε μορφή σκόνης για τις διαδικασίες

πυροσυσσωμάτωσης/τήξης/EBM. Επίσης, ο άργυρος μπορεί να επιστρώνεται με άλλα υλικά για να δώσουν ένα χρυσό ή χάλκινο αποτέλεσμα.



Εικόνα 2.18 Κόκκοι μετάλλου προς εκτύπωση

Κατά τα τελευταία δύο χρόνια ο χρυσός και ο άργυρος έχουν προστεθεί στη γκάμα των μεταλλικών υλικών που μπορούν να εκτυπωθούν 3D απευθείας, με προφανείς εφαρμογές σε όλο τον κλάδο της αργυροχρυσοχοΐας. Αυτά είναι τα δύο πολύ ισχυρά υλικά και υποβάλλονται σε επεξεργασία σε μορφή σκόνης. Το τιτάνιο είναι ένα από τα ισχυρότερα μεταλλικά υλικά και έχει χρησιμοποιηθεί για 3D εκτύπωση σε βιομηχανικές εφαρμογές για κάποιο χρονικό διάστημα. Παρέχεται σε μορφή σκόνης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις διαδικασίες πυροσυσσωμάτωσης/τήξης/EBM.

### 2.6.3 Κεραμικά

Τα κεραμικά υλικά είναι ανόργανα, μη μεταλλικά, συχνά κρυσταλλικά οξειδία, νιτρίδια ή καρβίδια. Ορισμένα στοιχεία, όπως ο άνθρακας ή το πυρίτιο, μπορούν να θεωρηθούν κεραμικά. Τα κεραμικά υλικά είναι εύθραυστα, σκληρά, δυνατά σε συμπίεση, αδύναμα στην διάτμηση και την ένταση. Είναι ανθεκτικά στην χημική διάβρωση που εμφανίζεται σε άλλα υλικά όταν υποβάλλονται σε όξινα ή καυστικά περιβάλλοντα. Τα κεραμικά γενικά μπορούν να αντέξουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες (από 1000°C έως 1600°C), (1800°F έως 3000°F). Παραδοσιακά οι πρώτες ύλες κεραμικών, περιελάμβαναν αργιλικά ορυκτά, όπως καολινίτη. Πλέον τα πιο πρόσφατα υλικά, περιλαμβάνουν οξείδιο αργιλίου, που είναι γνωστό και ως αλουμίνα. Τα σύγχρονα κεραμικά υλικά, τα οποία έχουν ταξινομηθεί ως προηγμένα κεραμικά, περιλαμβάνουν καρβίδιο του πυριτίου και καρβίδιο του βολφραμίου.

Και τα δύο εκτιμώνται για αντοχή στην τριβή τους, και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι πλάκες φθοράς του εξοπλισμού θραύσης σε εξορυκτικές επιχειρήσεις. Προηγμένα κεραμικά χρησιμοποιούνται επίσης στην ιατρική, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών προϊόντων [16], [17].



Εικόνα 2.19 Εκτυπωμένα αντικείμενα από κεραμικό υλικό

Τα κεραμικά μοντέλα κατασκευάζονται από πυριτία-αλουμίνα κεραμική σκόνη και σφραγίζονται με πορσελάνη και διοξείδιο του πυριτίου. Το λούστρο που εφαρμόζεται μετά την εκτύπωση είναι μια μη-τοξική γυαλάδα χωρίς μόλυβδο. Το υλικό είναι ανθεκτικό στη θερμότητα (μέχρι 600°C) , ανακυκλώσιμο, και προς το παρόν είναι το μόνο υλικό από τρισδιάστατη εκτύπωση που ενδείκνυται για σκεύη τροφής. Πρόκειται για ένα υλικό που είναι ιδανικό για οικιακή διακόσμηση, καθώς επίσης για είδη κουζίνας, όπως για παράδειγμα κούπες, πιάτα κτλ. [12].

#### **2.6.4 Χαρτί και Βιοϋλικά**

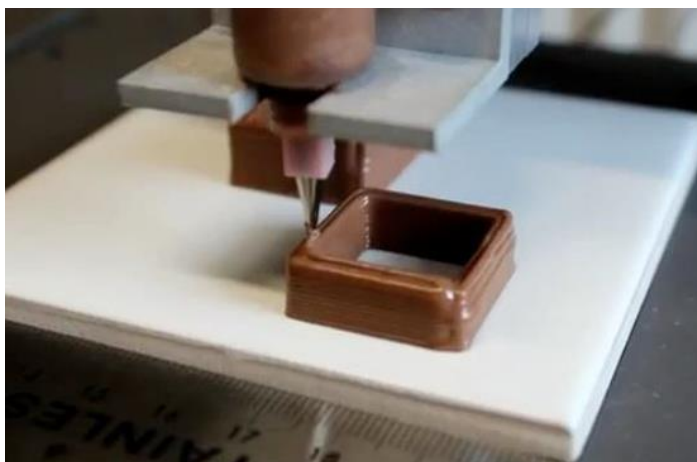
Πρότυπο A4 φωτοαντιγραφικό χαρτί είναι ένα υλικό 3D εκτύπωσης που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία SDL και παρέχεται από τη Mcor Technologies. Τα 3D τυπωμένα μοντέλα που γίνονται με χαρτί είναι ασφαλή, φιλικά προς το περιβάλλον, ανακυκλώνονται εύκολα και δεν απαιτούν μετά-επεξεργασία.

Υπάρχει μία εκτενής ποικιλία βιολογικών υλικών λόγω της έρευνας που διεξάγεται στο δυναμικό της 3D εκτύπωσης για μια σειρά από ιατρικές (και άλλες) εφαρμογές. Ο ζωντανός ιστός αποτελεί αντικείμενο έρευνας σε μια σειρά από κορυφαία ιατρικά ιδρύματα με σκοπό την ανάπτυξη εφαρμογών, που περιλαμβάνουν την εκτύπωση ανθρώπινων οργάνων για μεταμόσχευση, καθώς και εξωτερικών ιστών για την αντικατάσταση τμημάτων του

σώματος. Άλλες έρευνες σε αυτόν τον τομέα επικεντρώνονται στην ανάπτυξη τροφίμων με το κρέας είναι το χαρακτηριστικό παράδειγμα.

### 2.6.5 Τροφή και άλλα

Πειράματα με εξωθητήρες για 3D εκτύπωση των ουσιών των τροφίμων έχουν αυξηθεί τα τελευταία δύο χρόνια. Η σοκολάτα είναι η πιο κοινή (και επιθυμητή). Υπάρχουν επίσης εκτυπωτές που λειτουργούν με τη ζάχαρη και ορισμένα πειράματα με ζυμαρικά και κρέας. Κοιτώντας προς το μέλλον, διεξάγονται έρευνες, ώστε να χρησιμοποιηθεί η 3D τεχνολογία εκτύπωσης για να παράγει ισορροπημένα γεύματα.



Εικόνα 2.20 Τρισδιάστατη εκτύπωση σοκολάτας

Πειράματα με εξωθητήρες για 3D εκτύπωση των ουσιών των τροφίμων έχουν αυξηθεί τα τελευταία δύο χρόνια. Η σοκολάτα είναι η πιο κοινή (και επιθυμητή). Υπάρχουν επίσης εκτυπωτές που λειτουργούν με τη ζάχαρη και ορισμένα πειράματα με ζυμαρικά και κρέας. Κοιτώντας προς το μέλλον, διεξάγονται έρευνες, ώστε να χρησιμοποιηθεί η 3D τεχνολογία εκτύπωσης για να παράγει ισορροπημένα γεύματα.

Και τέλος, μια εταιρεία που έχει ένα μοναδικό υλικό είναι η Stratasys, με τα ψηφιακά υλικά της για την πλατφόρμα Objet Connex 3D εκτύπωσης. Αυτό σημαίνει ότι η προσφορά πρτύπων υλικών εκτύπωσης Objet 3D μπορούν να συνδυαστούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης σε διάφορες συγκεντρώσεις για να σχηματίσουν νέα υλικά με τις απαιτούμενες ιδιότητες. Έως 140 διαφορετικά ψηφιακά υλικά μπορεί να φτιαχτούν από το συνδυασμό των πρώτων υλών με διαφορετικούς τρόπους.

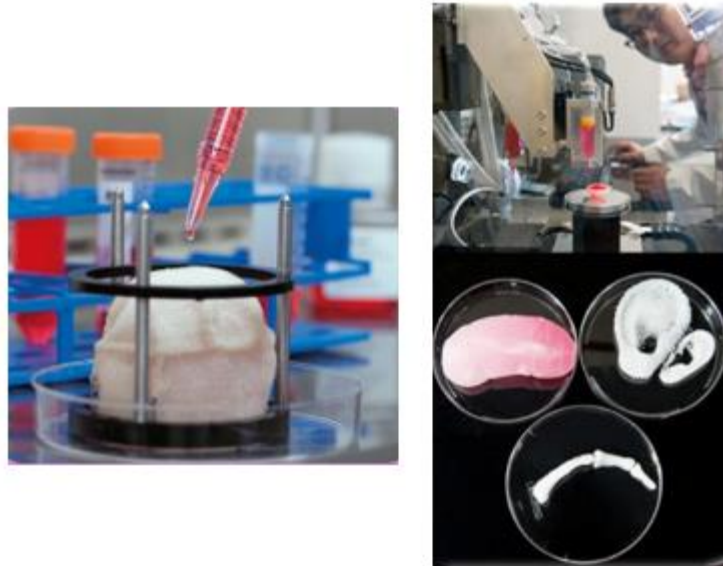
## 2.7 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση απηχεί σε πολλούς τομείς της παραγωγής και εφαρμόζεται σε διάφορες επιστήμες. Εφαρμόζεται τόσο σε πειραματικό (δημιουργία πρωτοτύπων) στάδιο όσο και σε παραγωγικό. Έτσι, βρίσκει πρόσφορο έδαφος στην αυτοκινητοβιομηχανία, την ιατρική, την αεροναυπηγική, το βιομηχανικό σχεδιασμό, την αρχιτεκτονική, την μηχανική και τις κατασκευές (ΑΕΚ), και άλλους τομείς (Εικόνα 2.21)



Εικόνα 2.21 Εφαρμογές της 3D εκτύπωσης

Το 1999 δημιουργείται το πρώτο όργανο που είναι καλλιεργημένο σε εργαστήριο. Ασθενείς νέοι σε ηλικία, υποβάλλονται σε αύξηση της ουροδόχου κύστης με χρήση ενός ικριώματος που έχει εκτυπωθεί τρισδιάστατα και έχει επικαλυφθεί από δικά τους κύτταρα. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από επιστήμονες στο Wake Forest Institute για την αναγεννητική ιατρική και άνοιξε δρόμους για την ανάπτυξη άλλων στρατηγικών για την τρισδιάστατη εκτύπωση οργάνων. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται τα κύτταρα του ασθενή, ο κίνδυνος 10 της απόρριψης από τον οργανισμό, είναι ελάχιστος έως μηδενικός. Έπειτα, το 2002 κατασκευάστηκε ένα λειτουργικό νεφρό. Το νεφρό αυτό είχε την ικανότητα να φιλτράρει το αίμα και να παράγει αραιωμένα ούρα σε ζώο. Αυτή η εφεύρεση συνετέλεσε στην διεξαγωγή ερευνών στο Wake Forest Institute για την εκτύπωση οργάνων και ιστών.



Εικόνα 2.22 Όργανο που χρησιμοποιείται στην αύξηση της ουροδόχου κύστης (αριστερά) και νεφρό (δεξιά) που κατασκευάστηκαν από 3D εκτυπωτές

Το 2010 κατασκευάστηκε το πρωτότυπο αυτοκίνητο με 3D τυπωμένο αμάξωμα το οποίο ονομάστηκε Urbee καθώς και τα πρώτα 3D εκτυπωμένα αιμοφόρα αγγεία από την εταιρία αναγεννητικής ιατρικής Organovo. Το 2011 μηχανικοί του βρετανικού πανεπιστημίου του Σαουθάμπτον δημιουργούν και καταφέρουν να απογειώσουν το πρώτο 3D εκτυπωμένο μοντέλο αεροσκάφους. Το 2012 ιατροί και μηχανικοί στην Ολλανδία χρησιμοποιούν έναν 3D εκτυπωτή της LayerWise για να εκτυπώσουν μια προσαρμοσμένη τρισδιάστατη κάτω σιαγόνα η οποία στη συνέχεια εμφυτεύθηκε σε μία γυναίκα 83 ετών που πάσχει από χρόνια λοίμωξη των οστών. Αυτή η τεχνολογία διερευνάται για την προώθηση της ανάπτυξης νέου ιστού οστού.



Εικόνα 2.23 Πρωτότυπο όχημα Urbee (αριστερά) και το πρώτο 3D εκτυπωμένο αεροσκάφος (δεξιά)



Το 2013 δημιουργείται το πρώτο 3D εκτυπωμένο πιστόλι με το όνομα Liberator στο Ωστιν του Τέξας από την εταιρία παραγωγής Defence Distributed και πυροδοτεί αντιδράσεις για τη χρήση της τεχνολογίας. Επίσης ο Foodini είναι ο πρώτος 3D εκτυπωτής φαγητού για οικιακή χρήση. Ένα μείγμα τεχνολογίας, τέχνης φαγητού και design. Το 2014 ο Richard Arm (MSc Smart Design, ερευνητής στο πανεπιστήμιο του Νοττινγκχαμ της Μεγάλης Βρετανίας) δημιουργεί την πρώτη καρδιά με τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη, προκειμένου να ενισχύσει τη δυνατότητα έρευνας και την πειραματική χειρουργική. Την ίδια χρονιά ο πρώτος 3D εκτυπωτής με το όνομα made in space προσγειώθηκε στη διαστημική βάση της NASA και θα εκτυπώνει σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας.



Εικόνα 2.24 Η πρώτη καρδιά με τρισδιάστατα εκτυπωμένα μέρη (αριστερά) και ο πρώτος τρισδιάστατος εκτυπωτής που θα εκτυπώνει σε συνθήκες μηδενικής βαρύτητας (δεξιά)

Άλλα παραδείγματα αντικειμένων που έχουν κατασκευαστεί από τρισδιάστατη εκτύπωση και παρουσιάζουν ενδιαφέρον: ένα μαχητικό αεροσκάφος τύπου Tornado πέταξε για πρώτη φορά με μεταλλικά εξαρτήματα τυπωμένα σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Τα εξαρτήματα αυτά ήταν ένα προστατευτικό κάλυμμα για το πιλοτήριο, ένα τμήμα του συστήματος εισαγωγής αέρα και ένα μέρος στο σύστημα προσγείωσης (σύμφωνα με την βρετανική αεροναυπηγική ομάδα της BAE Systems).

Η NASA έχει εκτοξεύσει πύραυλο, του οποίου το ακροφύσιο του κινητήρα είχε τυπωθεί σε τρισδιάστατο εκτυπωτή. Σύμφωνα με την BAE Systems η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών θα μπορούσε να επιτρέψει την εξοικονόμηση εκατοντάδων χιλιάδων λιρών κάθε χρόνο στον τομέα της αεροναυπηγικής καθώς επίσης η τεχνολογία αυτή θα μπορούσε, να χρησιμοποιηθεί για να εξοπλίσει «πολεμικά πλοία και αεροπλανοφόρα» [18].

Το πρώτο περίστροφο όπλο που εκτυπώθηκε τρισδιάστατα, δημιουργήθηκε από την ομάδα Defense Distributed, με επικεφαλής τον φοιτητή νομικής Cody Wilson. Ολόκληρο το όπλο είναι πλαστικό, εκτος από τον επικρουστήρα, ο οποίος είναι από μέταλλο. Πλέον τυπώνονται μεταλλικά όπλα, πενηνταπλάσιας δυναμικότητας σε σχέση με τα πλαστικά, απλοποιώντας έτσι την διαδικασία παραγωγής όπλων. Τα όπλα που τυπώνονται τρισδιάστατα έχουν την δυνατότητα να σκοτώσουν.

Και μία υπό μελέτη, μελλοντική εφαρμογή που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η κατασκευή μιας βάσης στη Σελήνη, η οποία θα γινόταν πολύ πιο εύκολη χρησιμοποιώντας έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή που χτίζει με ντόπια υλικά. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές κατασκευάζουν συμπαγή αντικείμενα από αλληπάλληλα στρώματα μιας ρευστής ουσίας που στερεοποιείται. Η τεχνολογία χρησιμοποιείται ήδη για την παραγωγή μικρών αντικειμένων, στο μέλλον όμως θα μπορούσε να επεκταθεί για την κατασκευή ολόκληρων κτηρίων. Η ESA ελπίζει να κατασκευάσει στο μέλλον μια βάση στη Σελήνη που θα αποτελείται από ένα τυπωμένο, στέρεο κέλυφος γύρω από ένα φουσκωτό, αεροστεγή χώρο διαβίωσης. Στο πλαίσιο της μελέτης, οι μηχανικοί του προγράμματος χρησιμοποίησαν έναν ογκώδη 3D εκτυπωτή για να κατασκευάσουν ένα συμπαγές μπλοκ βάρους 1,5 τόνου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το υπόστρωμα αποτελούνταν από ηφαιστειακό βράχο παρόμοιο με τα πετρώματα της σελήνης, ενώ ως κόλλα χρησιμοποιήθηκε ένα υλικό που συνδέει τους κόκκους του πετρώματος και το μετατρέπει σε συνθετικό βράχο.



## 3 ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

---

### 3.1 Μαγνήτες

Ως μαγνήτης ορίζεται ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από συγκεκριμένα υλικά, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει μαγνητικό πεδίο στο χώρο γύρω του.

Οι μαγνήτες αποτελούνται από δυο πόλους - το βόρειο και το νότιο - μεταξύ των οποίων δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Αυτό το πεδίο προσδιορίζεται διανυσματικά στο χώρο, με βάση την ένταση και την κατεύθυνση του και απεικονίζεται μέσω των λεγόμενων μαγνητικών γραμμών. Μαγνητική (δυναμική) γραμμή είναι η νοητή γραμμή σε κάθε σημείο της οποίας η ένταση του μαγνητικού πεδίου εφάπτεται σε αυτή. Οι μαγνητικές γραμμές είναι προσανατολισμένες και απεικονίζουν τη φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου, ξεκινώντας από το βόρειο και καταλήγοντας στο νότιο πόλο του μαγνήτη. Η πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου.

Οι μαγνήτες μπορεί να είναι φυσικοί ή τεχνητοί. Οι τεχνητοί διακρίνονται με τη σειρά τους σε μόνιμους και παροδικούς. Οι φυσικοί μαγνήτες είναι τεμάχια του ορυκτού μαγνητίτη. Αντίθετα, οι τεχνητοί είναι κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα, που αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες εξαιτίας της επιβολής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

### 3.2 Γενικά

Ο μαγνητισμός των υλικών οφείλεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων τα οποία είναι ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια και γι' αυτό δημιουργούν μαγνητικά πεδία γύρω τους. Κάθε ηλεκτρόνιο έχει μαγνητική ροπή η οποία είναι το διανυσματικό μέγεθος της έντασης του μαγνητικού πεδίου λόγω της κίνησης του ηλεκτρονίου. Οφείλεται στην περιστροφή γύρω από τον πυρήνα και στην περιστροφή γύρω από τον άξονά του. Η συνισταμένη μαγνητική ροπή μπορεί να είναι μηδέν ή διάφορη του μηδενός. Από την ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα (Pauli) στο τροχιακό κάθε ενεργειακού επιπέδου υπάρχουν μέχρι 2 ηλεκτρόνια που περιστρέφονται με αντίθετη φορά γύρω από τον άξονά τους, δηλαδή έχουν αντίθετους κβαντικούς αριθμούς spin και άρα η μαγνητική τους ροπή είναι αντίθετη. Επομένως, όταν τα τροχιακά είναι πλήρη, η συνολική μαγνητική ροπή στο άτομο είναι μηδέν.

Αν ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε ένα άτομο είναι περιττός, τότε και πάλι η συνισταμένη των μαγνητικών ροπών είναι μηδέν, γιατί το μονήρες ηλεκτρόνιο είναι ηλεκτρόνιο σθένους και αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνια σθένους άλλων ατόμων, σχηματίζοντας χημικούς δεσμούς. Υπάρχουν όμως και τα μεταβατικά στοιχεία τα οποία έχουν τα τροχιακά 3d μερικώς συμπληρωμένα και παράλληλα διαθέτουν ηλεκτρόνια και στην 4η στιβάδα, επομένως παρουσιάζουν μαγνητική ροπή [19].

Η απόκριση στην επιβολή μαγνητικού πεδίου  $H$  σε υλικό ονομάζεται μαγνητική επαγωγή  $B$ . Η σχέση που συνδέει το  $H$  και το  $B$  είναι η εξής:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad 3.1)$$

όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ( $=4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ ) και  $M$  η μαγνήτιση του μέσου. Ως μαγνήτιση ορίζεται το πεδίο ενός υλικού παρουσία εξωτερικού πεδίου και ισούται με τη μαγνητική ροπή  $m$  ανά μονάδα όγκου  $V$ :

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V} \quad 3.2)$$

Μαγνήτιση είναι η πυκνότητα των προσανατολισμένων μαγνητικών διπολικών ροπών στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και προκύπτει από την ηλεκτρονική δομή του στερεού. Εξαρτάται από τις επιμέρους μαγνητικές ροπές των ιόντων, ατόμων ή μορίων και από τον τρόπο που αυτές αλληλοεπιδρούν. Επομένως είναι ιδιότητα του υλικού.

Η απόκριση των υλικών εξαρτάται από την ατομική τους δομή, την θερμοκρασία και το πεδίο. Με επιβολή μαγνητικού πεδίου οι μαγνητικές ροπές των ατόμων τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα με το πεδίο, αλλά οι θερμικές κινήσεις αντιτίθενται σε αυτή τη μεταβολή.

Για τον προσδιορισμό του βαθμού απόκρισης ενός υλικού σε μαγνητικό πεδίο εισάγεται ο όρος μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$  που εκφράζεται από το νόμο Curie-Weiss [20]:

$$\chi = \frac{M}{H} \quad 3.3)$$

### 3.3 Κατηγορίες Μαγνητισμού

Ανάλογα με τη συμπεριφορά του υλικού στην επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στα υλικά που μαγνητίζονται μόνο όταν τους ασκηθεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, όπως τα διαμαγνητικά και τα παραμαγνητικά.
- Στα υλικά που διατηρούν τη μαγνητική τους κατάσταση ακόμα και κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου όπως τα φερρομαγνητικά, τα αντιφερρομαγνητικά και τα φερριμαγνητικά.

Ακολουθεί μία σύντομη ανάλυση των κατηγοριών μαγνητισμού.[21]

#### 3.3.1 Διαμαγνητισμός

Ο διαμαγνητισμός είναι ασθενής μορφή μαγνητισμού και διαρκεί όσο εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Όταν δεν εφαρμόζεται πεδίο, οι μαγνητικές ροπές λόγω ηλεκτρονιακών spin και τροχιακής κίνησης ηλεκτρονίων είναι μηδέν. Όταν όμως εφαρμόζεται πεδίο, τα τροχιακά των ηλεκτρονίων των ατόμων μεταβάλλονται σύμφωνα με το νόμο του Laplace, κατά τον οποίο όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο κινείται εντός ενός μαγνητικού πεδίου, αποκλίνει από την πορεία του. Αυτή η μεταβολή στα τροχιακά και στις μαγνητικές ροπές προκαλεί το σχηματισμό μαγνητικών διπόλων στο άτομο που αντιτίθενται στο εξωτερικό πεδίο, οδηγώντας σε αρνητικό μαγνητικό αποτέλεσμα και άρα στην άπωση των διαμαγνητικών υλικών από μόνιμο μαγνήτη. Η μαγνητική διαπερατότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι λίγο μικρότερη της μονάδας και η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή.

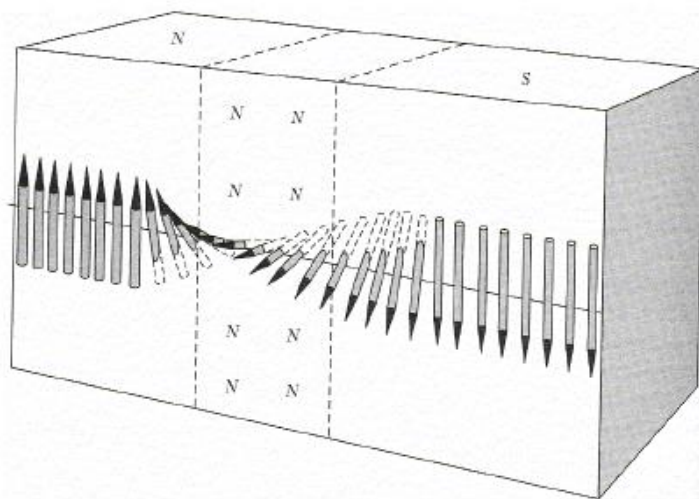
#### 3.3.2 Παραμαγνητισμός

Παραμαγνητισμός είναι το φαινόμενο που παρουσιάζουν τα μαγνητικά υλικά των οποίων η μαγνητική διαπερατότητα είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας και η μαγνητική

επιδεκτικότητα θετική και πολύ μικρή. Απουσία μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές ροπές που προκύπτουν από το spin των ηλεκτρονίων δεν αλληλοαναιρούνται, με αποτέλεσμα κάθε άτομο να έχει μαγνητική ροπή τυχαίας διεύθυνσης. Σε στατιστικά μεγαλύτερη περιοχή όμως, η μαγνητική ροπή και η μαγνήτιση είναι μηδενικές. Υπό την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου οι μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται στη διεύθυνση του πεδίου αυξάνοντας, έτσι, την έντασή του. Τα παραμαγνητικά υλικά έλκονται ελαφρά από μόνιμο μαγνήτη.

### 3.3.3 Σιδηρομαγνητισμός

Στο σιδηρομαγνητισμό, τα άτομα στα σιδηρομαγνητικά υλικά υπό κανονικές συνθήκες έχουν ισχυρές μαγνητικές ροπές λόγω ασύζευκτων ηλεκτρονιακών spin στα 3d τροχιακά. Αυτές οι ροπές συνδυάζονται και σχηματίζουν μαγνητικές περιοχές με ομόρροπα spin. Τα όρια αυτών των περιοχών που καλούνται Weiss ονομάζονται τοιχώματα Bloch, όπου πραγματοποιείται σταδιακή μεταβολή στη διεύθυνση των μαγνητικών ροπών.



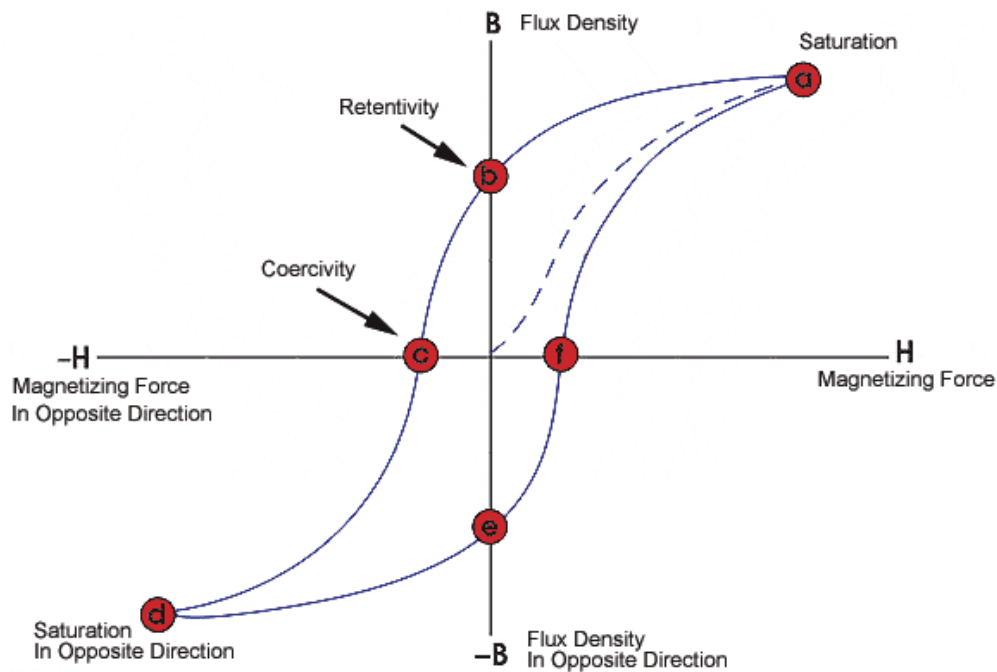
Εικόνα 3.1 Μεταβολή μαγνητικών ροπών στα τοιχώματα Bloch

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, επειδή οι περιοχές Weiss είναι τυχαία προσανατολισμένες και οι μαγνητικές τους ροπές αλληλοαναιρούνται, η συνολική μαγνήτιση  $M$  είναι μηδέν, λόγω της συνθήκης ελάχιστης ενέργειας. Με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου όμως, οι περιοχές Weiss προσανατολίζονται παράλληλα με τη διεύθυνση του πεδίου με αποτέλεσμα να προκύπτουν υψηλές επιδεκτικότητες  $\chi$ . Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες που το φαινόμενο

διαρκούσε για όση ώρα ασκείται μαγνητικό πεδίο, εδώ, μετά την αφαίρεση του πεδίου, ο προσανατολισμός των περιοχών Weiss δεν έχει λόγο να μεταβληθεί. Το μαγνητικό πεδίο σε συνάρτηση με τη μαγνήτιση  $M$  σχηματίζουν ένα βρόχο υστέρησης.

### 3.3.4 Βρόχος Υστέρησης

Συγκεκριμένα, σε ένα φερρομαγνητικό υλικό που μαγνητίζεται για πρώτη φορά, με εφαρμογή εξωτερικού πεδίου  $H$ , αυξάνεται η μαγνητική επαγωγή  $B$  προς τη διεύθυνση του πεδίου. Με αύξηση του πεδίου  $H$  τα σύνορα των περιοχών μετατοπίζονται και η μαγνήτιση μεγαλώνει. Φτάνοντας στο σημείο  $a$ , με επιπλέον αύξηση του μαγνητικού πεδίου η επαγωγή  $B$  επηρεάζεται ελάχιστα. Στο σημείο  $a$  η επαγωγή είναι  $B_s$  (επαγωγή κόρου), η μαγνήτιση είναι  $M_s$  (μαγνήτιση κόρου) και οι μαγνητικές ροπές έχουν ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$  και άρα με αύξηση του πεδίου δεν επηρεάζεται η μαγνήτιση  $M$ , όπως και η μαγνητική επαγωγή. Η  $M_s$  εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου. Στη συνέχεια, όσο το  $H$  ελαττώνεται, η καμπύλη μετακινείται προς το  $b$  όπου το εξωτερικό πεδίο είναι μηδέν, αλλά η επαγωγή έχει τιμή  $B_r$ . Το υλικό σε αυτό το σημείο θεωρείται μόνιμος μαγνήτης γιατί υπάρχει παραμένουσα μαγνήτιση  $M_r$  χωρίς εξωτερικό πεδίο  $H$ . Η μαγνητική επαγωγή είναι κι αυτή παραμένουσα  $B_r$ . Με επιβολή πεδίου που αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται μέχρι το σημείο  $c$  όπου μηδενίζεται ( $B=0$ ) και άρα το υλικό απομαγνητίζεται. Το πεδίο είναι  $-H_c$  και ονομάζεται συνεκτικό. Με αρνητική αύξηση του πεδίου το υλικό φτάνει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά στο σημείο  $d$ . Στη συνέχεια, με ελάττωση του εξωτερικού πεδίου η καμπύλη διέρχεται απ' το σημείο  $e$  όπου η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή είναι  $-B_r$ . Τέλος, με αύξηση του  $H$ , η καμπύλη του βρόχου περνάει από το  $f$  όπου έχουμε συνεκτικό πεδίο  $H_c$ . Το εμβαδόν που περικλείεται απ' τις γραμμές του βρόχου υστέρησης ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου στο υλικό.



Εικόνα 3.2 Βρόχος υστέρησης

Στα μαγνητικά υλικά υπάρχουν κενές θέσεις, ακαθαρσίες, όρια κόκκων, αλλά και η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, το σχήμα και το μέγεθος του κάθε σωματιδίου, παράγοντες που προκαλούν τον αναπροσανατολισμό και την ανάπτυξη αυθόρμητων μαγνητικών περιοχών στο υλικό.

Με βάση το συνεκτικό πεδίο, τα φερρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε μαλακά και σκληρά. Στα σκληρά μαγνητικά υλικά οι βρόχοι είναι ευρείς και άρα το συνεκτικό πεδίο μεγάλο. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μαγνητίζονται και να απομαγνητίζονται δύσκολα και άρα χρειάζεται να εφαρμοστούν μεγάλα πεδία. Χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες.

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν στενούς βρόχους υστέρησης και άρα το συνεκτικό τους πεδίο είναι μικρό. Άρα, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και χρειάζεται να εφαρμοστεί μικρότερο πεδίο.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, υπό την επίδραση πεδίου, τα ιόντα έχουν μαγνητικές ροπές που προσανατολίζονται αντιπαράλληλα μεταξύ τους, αλλά επειδή τα μεγέθη των

ιόντων διαφέρουν, προκύπτει κάποια συνισταμένη μαγνητική ροπή. Τέτοια υλικά είναι οι φερρίτες, δηλαδή οξειδία του σιδήρου με άλλα μέταλλα.

Αυτά ισχύουν σε θερμοκρασίες κατώτερες μιας κρίσιμης τιμής (της θερμοκρασίας Curie). Μετά από αυτή τη θερμοκρασία το υλικό γίνεται παραμαγνητικό. [22]

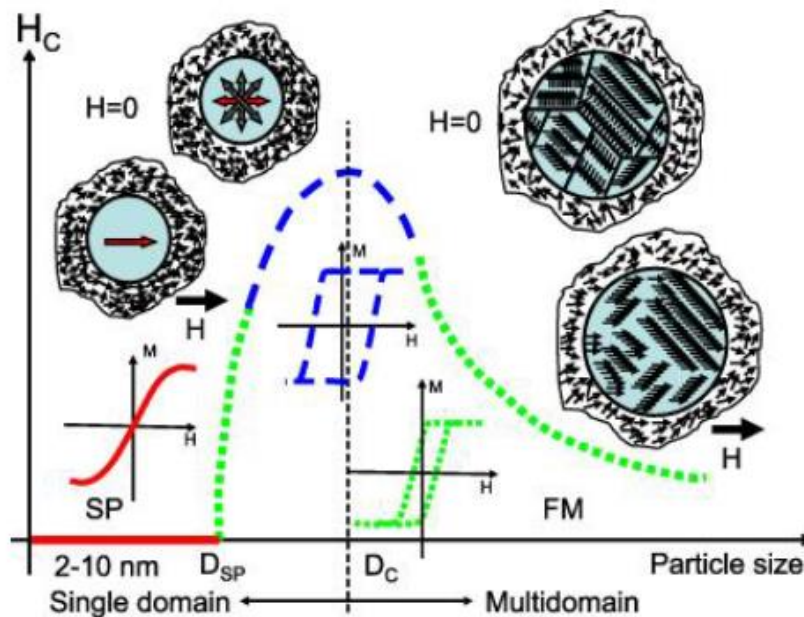
Στον αντισιδηρομαγνητισμό, με επιβολή μαγνητικού πεδίου πραγματοποιείται αντιπαράλληλος προσανατολισμός των μαγνητικών ατομικών ροπών και έτσι η μαγνητική ροπή αθροιστικά είναι μηδέν. Η διαφορά είναι ότι εδώ τα γειτονικά άτομα αντιτίθενται μεταξύ τους, ενώ στο σιδηρομαγνητισμό ενισχύονται.

Ο μαγνητίτης ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ο αιματίτης ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και ο βουσίτης ( $\text{FeO}$ ) απαρτίζουν τους φερρίτες οι οποίοι είναι κεραμικά οξειδία. Ο μαγνητίτης διαθέτει ιόντα σιδήρου σε δισθενή και τρισθενή οξειδωτική βαθμίδα και έτσι μπορεί να έχει οξειδωτικό ή αναγωγικό χαρακτήρα. Κρυσταλλώνεται σε ολοεδρία στο κυβικό σύστημα.

Ο μαγκεμίτης ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) έχει παρόμοια δομή με τη διαφορά ότι τα 5/6 των τετραεδρικών και οκταεδρικών θέσεων καταλαμβάνονται από άτομα σιδήρου. Η βασική τους διαφορά είναι ότι τα κατιόντα σιδήρου του μαγκεμίτη βρίσκονται όλα στην τρισθενή κατάσταση ( $\text{Fe}^{+3}$ ).

### 3.3.5 Υπερμαγνητισμός

Σε ένα υλικό, ένα σύνολο ιδιοπεριστροφών με ίδια κατεύθυνση μαγνητικών ροπών που αντιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε μαγνήτιση, καλείται τομέας. Οι τομείς χωρίζονται μεταξύ τους από τοιχώματα συγκεκριμένου πάχους και ενέργειας που είναι χαρακτηριστικά του κάθε υλικού. Αυτά τα τοιχώματα αποτελούν εμπόδιο στη μαγνήτιση. Σε ένα μεγάλο σωματίδιο η δομή αποτελείται από πολλά τοιχώματα και άρα πολλούς τομείς. Όσο μειώνεται όμως το μέγεθος των σωματιδίων και τείνει προς μια κρίσιμη διάμετρο  $D_c$ , τα τοιχώματα από ενεργειακή άποψη είναι δυσμενή ως προς την ύπαρξη τους. Δομές που αποτελούνται από μόνο έναν τομέα καλούνται σωματίδια μονού τομέα. Τέτοια σωματίδια έχουν μεγάλο συνεκτικό πεδίο.



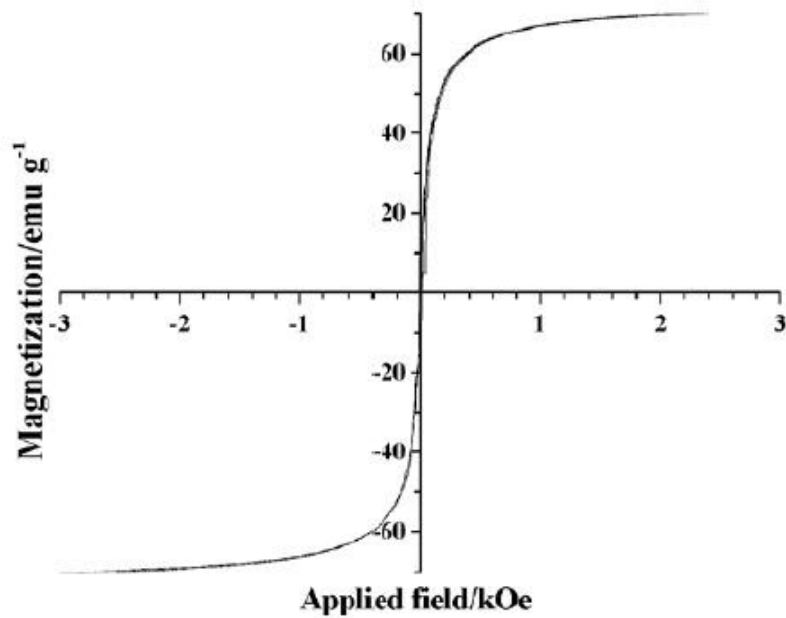
Εικόνα 3.3 Μεταβολή βρόχου υστέρησης συναρτήσει πολυπλοκότητας δομής

Ενδεικτικά, για το Σίδηρο (Fe) η κρίσιμη διάμετρος είναι 14nm για το  $Fe_3O_4$  128nm και για το  $\gamma-Fe_2O_3$  166nm.

Σε διαμέτρους ακόμα πιο μικρές από την κρίσιμη, οι θερμικές διακυμάνσεις επηρεάζουν τα spin και παρουσιάζουν υπερπαραμαγνητισμό. Συγκεκριμένα, όταν το μέγεθος του σωματιδίου γίνεται πολύ μικρό, το  $H_c$  τείνει να μηδενιστεί γιατί οι θερμικές διακυμάνσεις δεν επιτρέπουν τη σταθεροποίηση της μαγνήτισης.

Οι πειραματικές ενδείξεις του υπερπαραμαγνητισμού είναι ότι δεν υπάρχει υστέρηση στην καμπύλη μαγνήτισης και ότι σε διάφορες θερμοκρασίες οι καμπύλες μαγνήτισης υπερκαλύπτονται σε γραφήματα M συναρτήσει του H/T.





Εικόνα 3.4 Υπερκαλυπτόμενη καμπύλη μαγνήτισης υπερμαγνητικού υλικού σε χαμηλή θερμοκρασία

Ο χρόνος ηρεμίας της μαγνήτισης ενός μαγνητικού σωματιδίου δίνεται από τον τύπο:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (3.4)$$

$\Delta E$ : ο ενεργειακός φραγμός στη μεταβολή της μαγνητικής ροπής

$k_B T$ : η θερμική ενέργεια

$\tau_0$ :  $10^{-10}$ - $10^{-12}$  s

Συνήθως ισχύει ότι  $\Delta E = KV$  με  $K$  την πυκνότητα της ενέργειας ανισοτροπίας του σχήματος και  $V$  τον όγκο του σωματιδίου. Για μικρά σωματίδια το  $\Delta E$  είναι παρόμοιο με το  $K_B T$ .

Ανάλογα με το είδος της μαγνήτισης, μεταβάλλεται και ο χρόνος κατά τον οποίο υφίστανται οι υπερπαραμαγνητικές ιδιότητες [22].

### 3.3.6 Μαγνητική Ανισοτροπία

Η μαγνητική ανισοτροπία αναφέρεται στη σχέση εσωτερικής ενέργειας με την κατεύθυνση της αυθόρμητης μαγνήτισης. Πιο συγκεκριμένα, στο υλικό υπάρχει η αλληλεπίδραση σπιν-τροχιάς που προκαλεί την εγγενή ανισοτροπία, την επιφανειακή ανισοτροπία και την ανισοτροπία μαγνητικής στένωσης και η διπολική σύζευξη των μαγνητικών ροπών που προκαλεί ανισοτροπία σχήματος. Όσο χαμηλότερη είναι η συμμετρία, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια ανισοτροπίας και αντίστροφα. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E = KV \sin^2 \theta \quad (3.5)$$

**K**: η ενέργεια της συνολικής μονοαξονικής ανισοτροπίας ανά μονάδα όγκου

**$\theta$** : η γωνία μεταξύ της μαγνητικής ροπής και του εύκολου άξονα

**V**: ο όγκος των σωματιδίων

Αυτές οι δυο αλληλεπιδράσεις δημιουργούν τον εύκολο και το δύσκολο άξονα μαγνήτισης και προτιμάται ο εύκολος.

## 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ

---

### 4.1 Εισαγωγή

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με στόχο την ανάπτυξη μιας συσκευής που θα παράγει μαγνητικό νήμα το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιονδήποτε 3D εκτυπωτή. Η συσκευή δύναται να παρέχει ρυθμιζόμενη ποσότητα μαγνητικών νανοσωματιδίων ούτως ώστε το εκτυπωμένο υλικό να έχει την επιθυμητή μαγνητική επιδεκτικότητα και επομένως διαφορετική απόκριση στο εκάστοτε εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

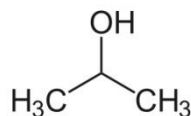
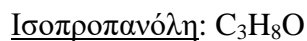
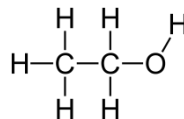
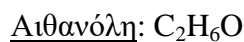
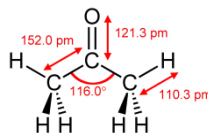
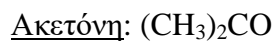
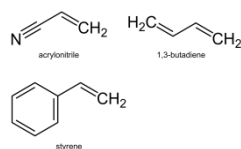
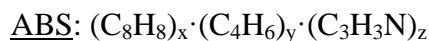
Μια τεχνολογία σαν κι αυτή ανοίγει το δρόμο της 4D εκτύπωσης λειτουργικών υλικών που ανταποκρίνονται σε εξωτερικά ερεθίσματα και εκτελούν εξεζητημένες και απαιτητικές εφαρμογές οι οποίες είναι αδύνατο να επιτευχθούν με συμβατικά υλικά. Επίσης, αυτά τα υλικά παρουσιάζουν σαφώς υψηλότερη ελαστικότητα συγκριτικά με κεραμικά υλικά αντίστοιχων ιδιοτήτων.

Στο πειραματικό μέρος θα αναλυθούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανάπτυξη, την κατασκευή και τη βελτιστοποίηση της συσκευής αυτής, καθώς θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μαγνητικής επιδεκτικότητας των δοκιμίων.

## 4.2 Προετοιμασία

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων, η βασική ιδέα ήταν να δημιουργηθεί ένα ρευστό μείγμα το οποίο θα επιτρέψει την ομοιόμορφη ανάμειξη των μαγνητικών νανοσωματιδίων με το πλαστικό με τη συμβολή κάποιου χημικού το οποίο θα δώσει αυτή τη δυνατότητα διαλύοντας το πλαστικό.

Αρχικά, αναμείχθηκαν όμοιες ποσότητες τεμαχισμένου νήματος ABS με ακετόνη, αιθανόλη και ισοπροπανόλη για την παρατήρηση της αποδόμησης των δεσμών του πολυμερούς. Οι χημικοί τύποι παρατίθενται:



Οι κετόνες (ακετόνη), είναι κατηγορία οργανικών ενώσεων που περιέχουν τη χαρακτηριστική ομάδα καρβονύλιο ( $C=O$ ) στην αλυσίδα τους.

Αντίθετα, αλκοόλες (αιθανόλη, ισοπροπανόλη) είναι οργανικές ενώσεις που περιέχουν ένα ή περισσότερα υδροξύλια ή υδροξυομάδες (-OH), συνδεδεμένα με άτομο άνθρακα και μόνο εφόσον το υδροξύλιο είναι η κύρια χαρακτηριστική ομάδα της ένωσης.

Αρχικά τοποθετήθηκαν τα 3 δείγματα σε λουτρό υπερήχων τύπου Sonicor (Εικόνα 4.1), όπου παρατηρήθηκε ότι η ακετόνη είναι ο πιο ισχυρός διαλύτης του πολυμερούς καθώς μετέτρεψε πλήρως το στερεό ABS σε πηκτό υγρό διάλυμα.



Εικόνα 4.1 Λουτρό υπερήχων τύπου Sonicor

Στη συνέχεια, το δοχείο με το διάλυμα τοποθετήθηκε σε θερμαντική πλάκα στους 200°C ώστε να εξατμιστεί η ακετόνη και να επανέλθει το ABS σε στερεή κατάσταση (Εικόνα 4.2). Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε με προσθήκη 1% w/w μαγνητικών νανοσωματιδίων στο διάλυμα ακετόνης ABS για να επιβεβαιωθεί ότι το μείγμα δεν υπόκειται σε κάποια αλλοίωση. Αυτή η θερμοκρασία επιλέχτηκε ώστε να προσομοιώσει τις συνθήκες που θα υφίστανται κατά την εκβολή του υλικού από τον εξωθητή.



Εικόνα 4.2. ABS μετά τη θερμαντική πλάκα χωρίς και με μαγνητικά νανοσωματίδια

Επομένως, με αυτή με τη δοκιμή προσδιορίστηκε ο κατάλληλος διαλύτης (ακετόνη) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και για τα υπόλοιπα πειράματα.

Επίσης, παρατηρήθηκε η συμπεριφορά του διαλύματος σε διάφορες αναλογίες ακετόνης - ABS και όπως αναμενόταν, αύξηση της ποσότητας ακετόνης προσέδιδε στο διάλυμα χαμηλότερο ιξώδες με γραμμικό τρόπο.

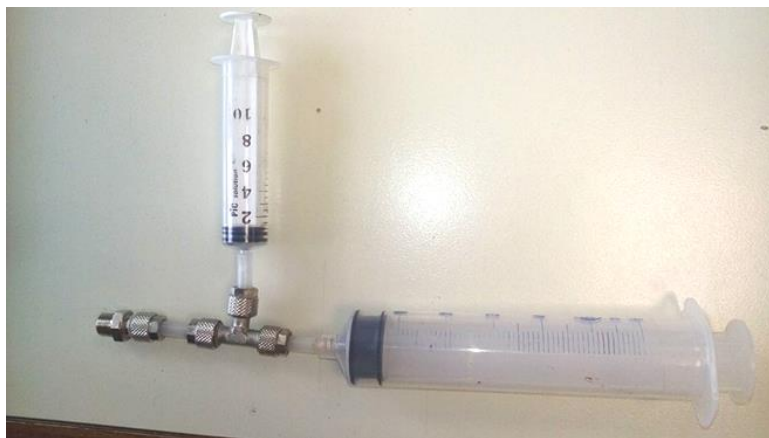
### 4.3 Ανάπτυξη συσκευής

Στη συνέχεια, αφού προσδιορίστηκε ο διαλύτης και παρατηρήθηκε η συμπεριφορά του ιξώδους του διαλύματος, σχεδιάστηκε η διάταξη και συλλέχθηκαν τα τμήματα της συσκευής. Σημειώνεται πως η πλειοψηφία των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, συλλέχθηκαν από τμήματα μηχανημάτων που προορίζονταν για ανακύκλωση και καταστροφή. Επομένως, το κόστος της διάταξης που παρουσιάζεται είναι πολύ χαμηλό.

Αρχή λειτουργίας της συσκευής είναι η δυνατότητα σταθερής πίεσης στο έμβολο με στόχο το μείγμα να διέρχεται από το θερμαντικό στοιχείο όπου θα ατμοποιείται η ακετόνη και το πλαστικό θα ξεπερνάει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης. Έτσι, το νήμα που θα εξέρχεται από το στόμιο, θα αποτελείται πλέον μόνο από πλαστικό και μαγνητικά νανοσωματίδια αναμειγμένα στη μήτρα του.

Τμήματα διάταξης:

- Σύριγγα (A) 60ml ( Εικόνα 4.3) : Χρησιμοποιήθηκε σύριγγα 60ml ως το δοχείο που φιλοξενεί το τεμαχισμένο ABS. Το έμβολο δίνει τη δυνατότητα εξώθησης του υλικού.
- Σύριγγα (B) 10ml ( Εικόνα 4.3) : Χρησιμεύει για την παροχέτευση συγκεκριμένης κάθε φορά ποσότητας εναιωρήματος ακετόνης - μαγνητικών νανοσωματιδίων στη σύριγγα (A).
- Σωληνάκια και τρίοδοι σύνδεσμοι για την ολοκλήρωση της διάταξης (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 Σύνδεση σύριγγας A και B

- Κινητήρας stepper (Εικόνα 4.4): Στοχεύει στη σταθερή και ρυθμιζόμενη πίεση στο έμβολο της σύριγγας (A) ούτως ώστε η εξώθηση του νήματος να είναι συνεχής και να υπάρχει ομοιομορφία στο υλικό που εκβάλλεται. Χρησιμοποιήθηκε ο κινητήρας του εκτυπωτή Epson με τη ράγα και τον ιμάντα του αναρτημένος στη βάση του.



Εικόνα 4.4 Κινητήρας Stepper

- Εξωθητής με θερμαντικό στοιχείο και αισθητήρα θερμότητας (Εικόνα 4.5): Είναι το τερματικό σημείο απ το οποίο διέρχεται το διάλυμα όπου αυξάνεται η

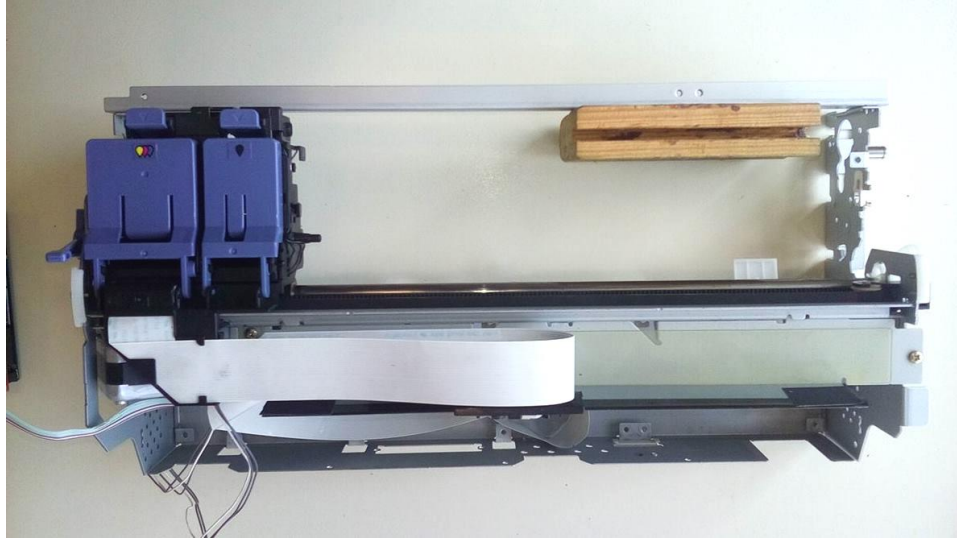
θερμοκρασία στους 200°C, ατμοποιείται η ακετόνη και συμπιέζεται το διάλυμα ώστε να εξωθηθεί μέσα από το στόμιο (nozzle) διαμέτρου 2mm. Σημειώνεται πως αυτή η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλότερη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης του ABS (105°C) και επομένως εξασφαλίζεται πως το πλαστικό θα καθίσταται εύπλαστο και θα μπορεί να διέλθει από το στόμιο χωρίς να το φρακάρει.



Εικόνα 4.5 Εξωθητής με αισθητήρα θερμοκρασίας και θερμαντικό στοιχείο

- Στήριγμα (Εικόνα 4.6): Για στήριγμα απομονώθηκε ο σκελετός του εκτυπωτή Epsilon ο οποίος διατηρεί σταθερό το σύστημα και επιτρέπει τη μετάδοση πίεσης από τον κινητήρα στο έμβολο της σύριγγας A μέσω της μιας πλευράς του δοχείου των μελανιών.





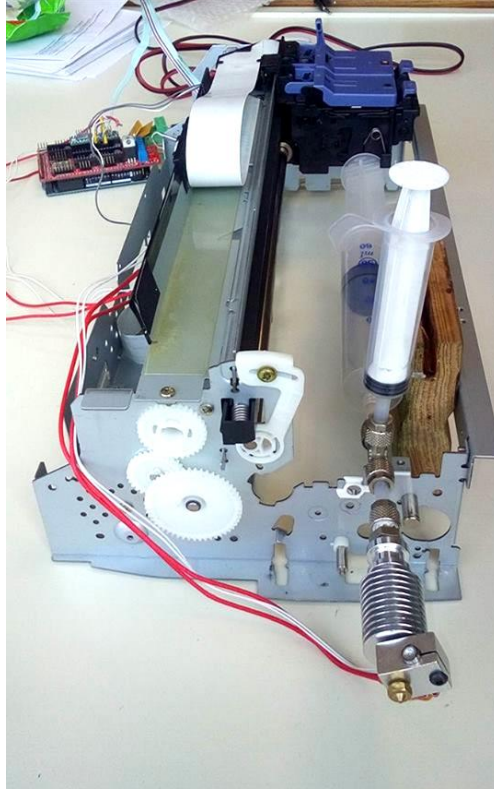
Εικόνα 4.6 Στήριγμα

- Τροφοδοτικό πάγκου (Εικόνα 4.7): Το τροφοδοτικό χρησιμοποιήθηκε για την ενεργοποίηση του κυκλώματος το οποίο με τη σειρά του επέβαλε σε λειτουργία το βηματικό κινητήρα, αφού αυτό είχε προγραμματιστεί κατάλληλα (Εικόνα 4.).



Εικόνα 4.7 Τροφοδοτικό

- Συνολική Διάταξη: Η ολοκληρωμένη διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.8



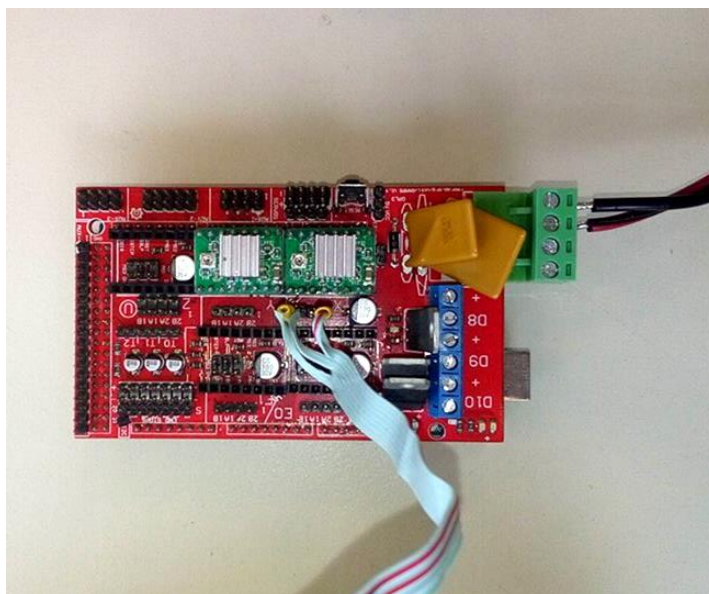
Εικόνα 4.8 Ολοκληρωμένη Διάταξη

Ο έλεγχος του βηματικού κινητήρα πραγματοποιείται μέσω Arduino Mega σε συνδυασμό με Ramps V1.4 Rep Rap Shield και ενός A4988 stepper motor driver (Εικόνα 4.9).

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους, η οποία μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring (C++ και ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++).

Το Ramps (**R**ep**r**ap **A**rduino **M**ega **S**hield) είναι μια πλακέτα που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των βηματικών κινητήρων.

Το stepper motor driver παρέχει τη δυνατότητα ρυθμιζόμενης παροχής ρεύματος, και προστατεύει το Ramps από αύξηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 4.9 Arduino Mega με Ramps V1.4 Rep Rap Shield και stepper motor driver

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του Arduino παρατίθεται:

```
/*  
  Simple demo, should work with any driver board  
  Connect STEP, DIR as indicated  
  Copyright (C)2015 Laurentiu Badea  
  This file may be redistributed under the terms of the MIT license.  
  A copy of this license has been included with this distribution in the file LICENSE.  
*/  
  
#include <Arduino.h>  
#include "BasicStepperDriver.h"  
  
// Motor steps per revolution. Most steppers are 200 steps or 1.8 degrees/step  
#define MOTOR_STEPS 200  
  
// All the wires needed for full functionality  
#define DIR 55  
#define STEP 54  
  
// Uncomment line to use enable/disable functionality  
#define ENBL 38  
  
// Since microstepping is set externally, make sure this matches the selected mode  
// 1=full step, 2=half step etc.
```

```

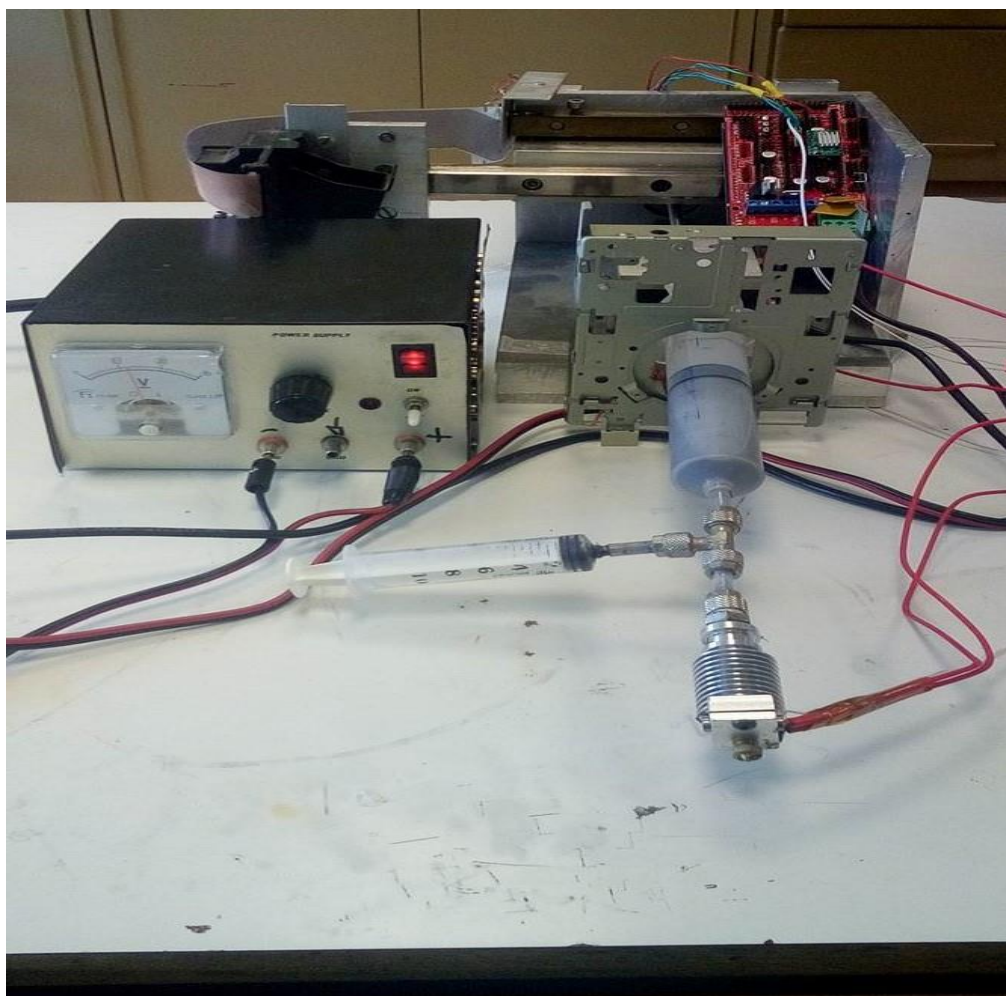
#define MICROSTEPS 1
// 2-wire basic config, microstepping is hardwired on the driver
//BasicStepperDriver stepper(MOTOR_STEPS, DIR, STEP);
//Uncomment line to use enable/disable functionality
BasicStepperDriver stepper(MOTOR_STEPS, DIR, STEP, ENBL);
void setup() {
  /*
   Set target motor RPM.
   These motors can do up to about 200rpm.
   Too high will result in a high pitched whine and the motor does not move.
  */
  stepper.setRPM(60);
}
void loop() {
  // energize coils - the motor will hold position
  stepper.enable();
  /*
   Tell the driver the microstep level we selected.
   If mismatched, the motor will move at a different RPM than chosen.
  */
  stepper.setMicrostep(MICROSTEPS);
}

```

Τρέχοντας τον κώδικα που παρουσιάζεται, ο βηματικός κινητήρας κινεί τον μάντα ο οποίος με τη σειρά του μετατοπίζει το δοχείο μελανιών το οποίο ασκεί πίεση στο έμβολο της σύριγγας (A). Παράλληλα, χειροκίνητα, από τη σύριγγα (B), προστίθεται η επιθυμητή ποσότητα ακετόνης - μαγνητικών νανοσωματιδίων. Το μείγμα εξωθείται μέσω του εξωθητή όπου η ακετόνη ατμοποιείται και μέσω του στομίου διαμέτρου 2 mm εξέρχεται το νέο μαγνητικό νήμα.

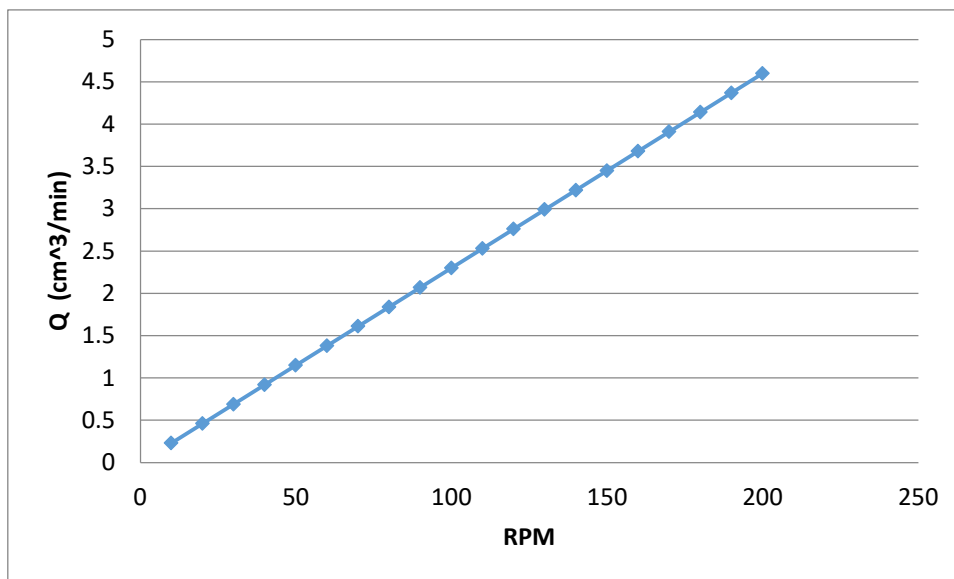
Κατά τη δοκιμή της πίεσης του εμβόλου με το βηματικό κινητήρα με άδεια σύριγγα, το έμβολο πιέστηκε επιτυχώς, αλλά με την εισαγωγή του μίγματος, το έμβολο δεν ήταν δυνατό να πιεστεί λόγω αυξημένης αντίστασης από το ρευστό. Γι αυτό κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός πιο ισχυρού κινητήρα.

Χρησιμοποιήθηκε γραμμικός κινητήρας RS 318-711 που παρέχει πολύ μεγαλύτερη δύναμη προσαρτημένος σε σύστημα ραγών όπως φαίνεται στο σχήμα με ακριβώς τον ίδιο κώδικα. Στη συνέχεια στερεώθηκαν οι σύριγγες που περιγράφηκαν προηγουμένως και το ρευστό πλαστικό εξωθήθηκε αποτελεσματικά.



Εικόνα 4.10 Ολοκληρωμένη Διάταξη με Γραμμικό Κινητήρα RS 318-711

Έπειτα, βαθμονομήθηκε το σύστημα κινητήρα - εμβόλου ώστε να προσδιοριστεί η παροχή του υγρού συναρτήσει των βημάτων (RPM) που δόθηκαν μέσω Arduino για να κινήσουν το βηματικό κινητήρα. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η σχέση των δυο μεγεθών.



Σχήμα 4.1 : Παροχή υγρού συναρτήσει βημάτων RPM

#### 4.4 Πειραματική διαδικασία

Αρχικά ζυγίστηκαν 350gr ABS και τρία δείγματα μαγνητικών νανοσωματιδίων 1, 5 και 10gr σε ζυγό ακριβείας. Τα 66gr ABS, προορίστηκαν για απώλειες στους αγωγούς και τα υπόλοιπα 284gr για 3 πειράματα.

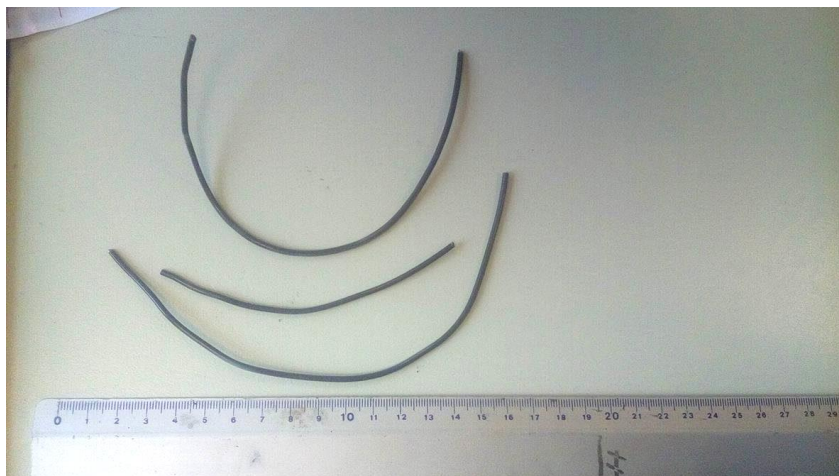




Εικόνα 4.11 Ζύγισμα υλικών

Παρασκευάστηκαν τρία μείγματα με ογκομετρικές αναλογίες 1%, 5% και 10% w/w μαγνητικών νανοσωματιδίων προς ABS κάθε ένα από τα οποία τροφοδοτήθηκαν στην σύριγγα A και ο γραμμικός κινητήρας ενεργοποιήθηκε μέσω του Arduino ώστε να εξωθηθεί το μείγμα με παράλληλη θέρμανση του εξωθητή στους 200°C.

Τα 3 δείγματα που εξωθήθηκαν, παρατίθενται στην εικόνα 4.12



Εικόνα 4.12 Νήματα μετά την εξώθηση για 1, 5 και 10%

## 4.5 Επεξεργασία μετρήσεων

Σχηματίστηκαν 3 σφαίρες διαμέτρου 3mm η καθεμία με διαφορετική ποσότητα μαγνητικών νανοσωματιδίων ανά σφαίρα, όπως παρουσιάζει ο πίνακας 4.2.

Σφαίρα	Σύσταση SPIONs/ABS (%w/w)
1	1
2	5
3	10

Πίνακας 4.2

Το σφαιρικό σχήμα επιλέχτηκε λόγω συμμετρίας το οποίο διευκολύνει τους μαγνητικούς και ρευστοδυναμικούς υπολογισμούς.

### 4.5.1 Αισθητήρας LVDT

Με στόχο την ποσοτικοποίηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας των εκτυπωμένων σφαιρών, κατασκευάστηκε διάταξη LVDT (γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής).

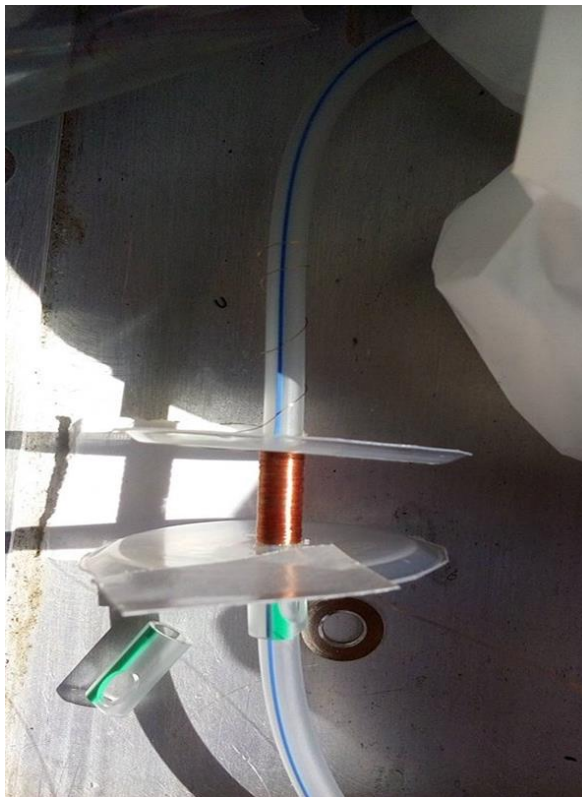
Η διάταξη αποτελείται από ένα πρωτεύον πηνίο (διέγερσης) και ένα δευτερεύον (λήψης). Όταν το πρωτεύον διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, παράγει εναλλασσόμενη μαγνητική ροή και σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής, επάγεται η ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δευτερεύον πηνίο. Αυτή η δύναμη είναι ανάλογη του ρεύματος που διαπερνά το πρωτεύον πηνίο και του πηλικού περιελίξεων πρωτεύοντος- δευτερεύοντος πηνίου.

Η περιέλιξη των πηνίων έγινε πάνω στον καθετήρα με στόχο την μέτρηση της μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας που προκαλείται όταν διέρχονται μέσα από τα πηνία εκτυπωμένες σφαίρες διαφορετικής μαγνητικής επιδεκτικότητας.

Η μαγνητική ροή θεωρητικά πρέπει να είναι μεγαλύτερη όταν η σφαίρα έχει μεγάλη ποσότητα μαγνητικών νανοσωματιδίων γιατί τότε θα διέρχεται περισσότερο μαγνητικό υλικό



το οποίο παίζει το ρόλο του πυρήνα. Αντίθετα, όταν διέρχεται η σφαίρα με τη μικρότερη συγκέντρωση μαγνητικών νανοσωματιδίων, ο αισθητήρας θα έχει λιγότερο μαγνητικό υλικό ως πυρήνα και άρα το σήμα που λαμβάνεται από το πηνίο λήψης θα πρέπει να είναι μειωμένο.



Εικόνα 4.13 Τύλιγμα πηνίου στον καθετήρα



Εικόνα 4.14 Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση με LVDT

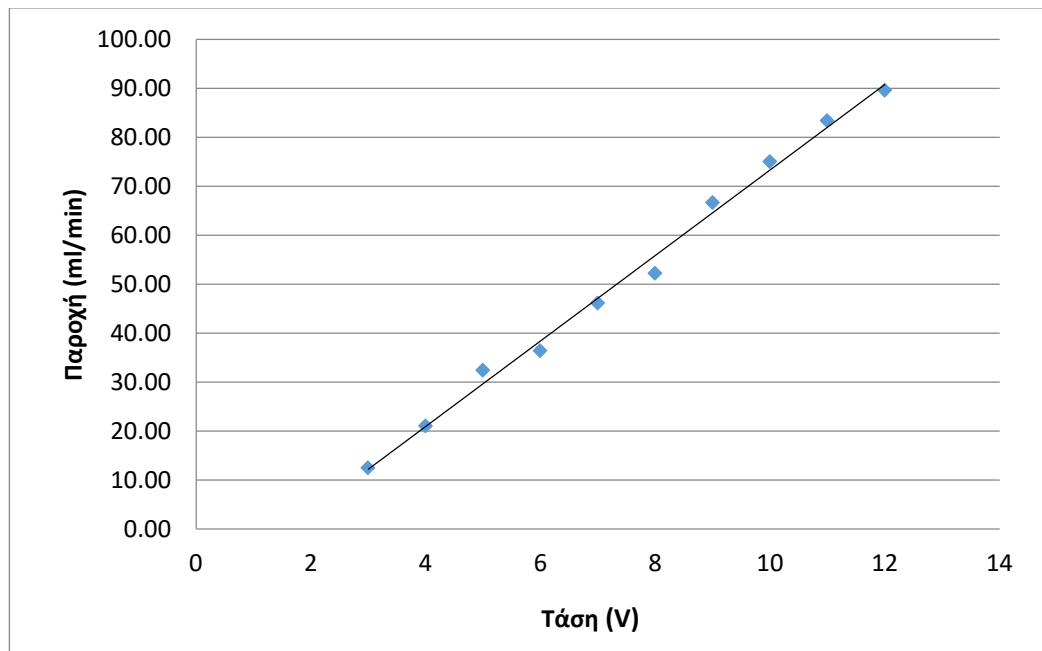
Τελικά, επειδή η ποσότητα του μαγνητικού υλικού που διέρχεται από τον αισθητήρα είναι πολύ μικρή, η μέτρηση αυτή δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τη χρήση του

συγκεκριμένου αισθητήρα, καθώς ήταν απαραίτητη η περαιτέρω αύξηση της ευαισθησίας του.

#### 4.5.2 Πρότυπη μέθοδος υπολογισμού μαγνητικής επιδεικτικότητας

Η πρότυπη μέθοδος που αναπτύχθηκε για τη μέτρηση της μαγνητικής επιδεικτικότητας του μαγνητικού νήματος βασίζεται στην ισορροπία των δυνάμεων που αναπτύσσονται χάρη στο μαγνητικό πεδίο ενός μόνιμου μαγνήτη και στη ροή νερού μέσα σε έναν καθετήρα.

Συνδέθηκε καθετήρας Levine με περισταλτική αντλία. Η παροχή της αντλίας συναρτήσει της τάσης στα άκρα του κινητήρα δίνεται στο σχήμα 4.2

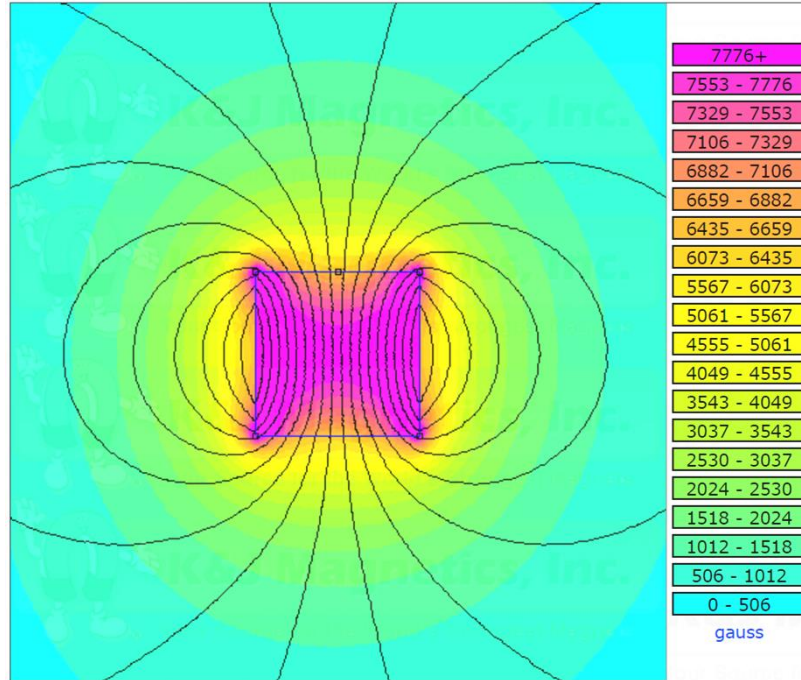


Σχήμα 4.2 : Διάγραμμα παροχή αντλίας συναρτήσει τάσης

Επίσης, γνωρίζοντας τη διάμετρο του καθετήρα, υπολογίζεται η επιφάνεια της διατομής και στη συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα του ρευστού σύμφωνα με την εξίσωση (4.1):

$$Q = u \cdot A \quad (4.1)$$

Σε ένα ευθύγραμμο τμήμα της διάταξης τοποθετήθηκε σε επαφή με τον καθετήρα μαγνήτης νεοδημίου βαθμού N50. Το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη είναι γνωστό και παρουσιάζεται προσομοίωση του στην Εικόνα 4.15.



Εικόνα 4.15 Προσομοίωση μαγνητικού πεδίου

Γνωρίζοντας την ακτίνα της σφαίρας ( $R$ ) και το ιξώδες του μέσου (νερό:  $\mu=0,001$ ) καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της δύναμης του ρευστού που ασκείται πάνω της χρησιμοποιώντας το νόμο του Stokes (εξίσωση (4.2)):

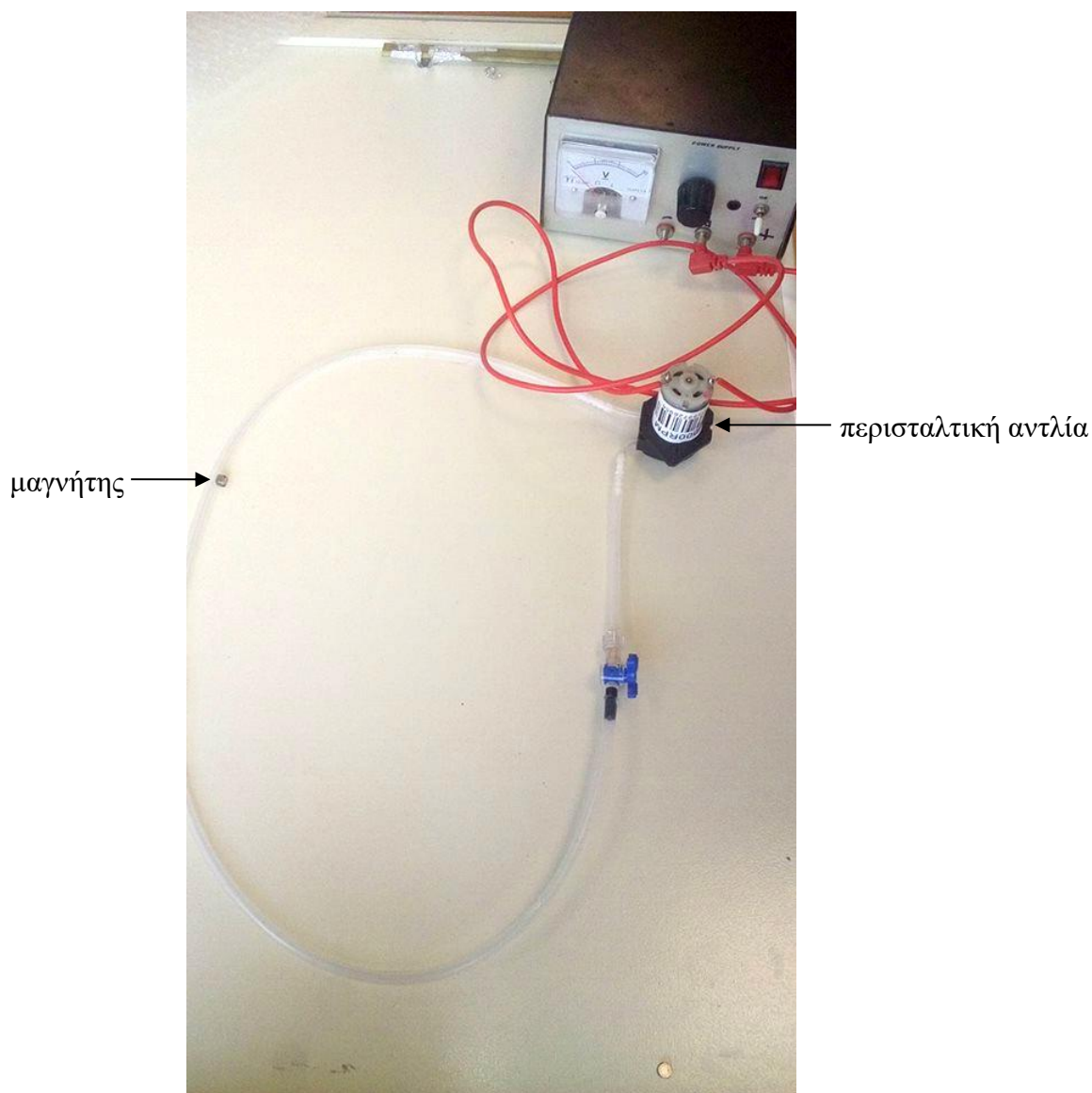
$$F = 6\pi\mu R u \quad (4.2)$$

Παράλληλα, για τον προσδιορισμό της μαγνητικής δύναμης απαιτείται να γνωρίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ), η βάρθρωση του ( $\frac{d\vec{H}}{d\vec{x}}$ ), ο όγκος της σφαίρας και η μαγνητική της επιδεκτικότητα ( $\chi$ ). Η μαγνητική δύναμη δίνεται από την εξίσωση (4.3):

$$\vec{F}_M = \frac{4\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_o\chi}{(1+\chi/3)} \vec{H} \frac{d\vec{H}}{d\vec{x}} = \frac{2\pi\alpha^3}{3} \frac{\mu_o\chi}{(1+\chi/3)} \nabla(|\vec{H}|^2) \quad (4.3)$$

Όπου  $\mu_o$ , η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό που ισούται με  $4\pi 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>. Για διάφορες τιμές ταχύτητας του ρευστού, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της οριακής ταχύτητας εκείνης που είναι ικανή να συγκρατήσει τη μαγνητική σφαίρα. Πάνω από αυτή την ταχύτητα, η σφαίρα παρασύρεται. Επομένως, σε αυτήν την ταχύτητα, η δύναμη του μαγνητικού πεδίου και του ρευστού που ασκούνται στη σφαίρα είναι ίσες μεταξύ τους και η σφαίρα ισορροπεί.

Εξισώνοντας τους δύο τύπους, ο μοναδικός άγνωστος παράγοντας είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi$ . Στην εικόνα 4.16 παρουσιάζεται ολοκληρωμένη η διάταξη.



Εικόνα 4.16 Ολοκληρωμένη διάταξη πρότυπης μεθόδου

Ο πίνακας 4.3 που ακολουθεί, παρουσιάζει τις ιδιότητες των 3 σφαιρών όσον αφορά την ποσότητα της καθεμιάς σε μαγνητικό υλικό και στην αντίστοιχη μαγνητική επιδεκτικότητα που προκύπτει έπειτα από τους υπολογισμούς.

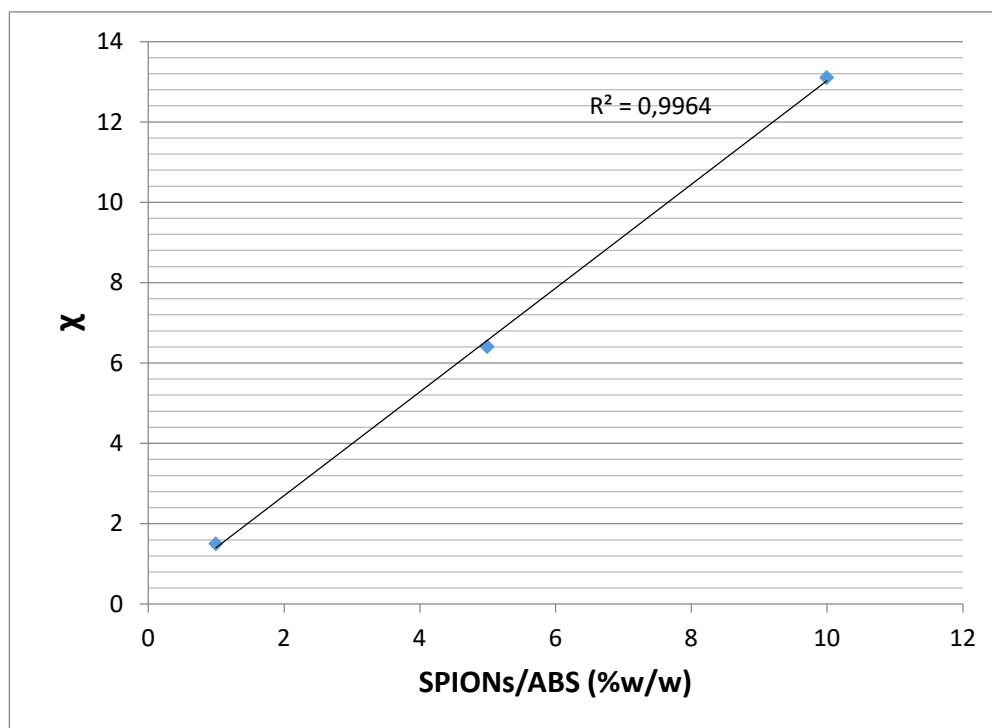
Ως  $u_{lim}$  λαμβάνεται η οριακή τιμή της ταχύτητας πάνω από την οποία παρασύρεται η σφαίρα. Επειδή δεν υπάρχει άμεσος τρόπος του υπολογισμού της ταχύτητας μέσα στον καθετήρα, η

τιμή λαμβάνεται κατ' αντιστοιχία με την τάση τροφοδοσίας της περισταλτικής αντλίας από τον Πίνακα 4.3.

Σφαίρα	Διάμετρος (mm)	SPIONs/ABS (%w/w)	$u_{lim}$ (m/s)	$F_d = F_{mag}$ ( $\mu N$ )	$\chi$
1	3	1	0,03	0,85	0,72
2	3	5	0,26	7,34	6,13
3	3	10	0,46	12,9	10,85

Πίνακας 4.3

Με τις τιμές του  $\chi$  και της περιεκτικότητας SPIONs/ABS σχεδιάζεται το διάγραμμα για να ελεγχθεί η γραμμικότητα της σχέσης τους (Σχήμα 4.3):



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα μαγνητικής επιδεκτικότητας ( $\chi$ ) συναρτήσει περιεκτικότητας ( SPIONs/ ABS)

Παρατηρείται πως η σχέση είναι σχεδόν γραμμική και επομένως οι ιδιότητες της συσκευής ικανοποιητικές. Η μικρή απόκλιση που παρατηρείται πιθανώς να οφείλεται σε ανομοιογένειες κατά την ανάμειξη του υλικού πριν εξέλθει από τον εξωθητή.

Αυτή η γραμμικότητα είναι ενδεικτική για την αξιοπιστία της μέτρησης συνεπώς, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη και τον προσδιορισμό της μαγνητικής επιδεκτικότητας του σύνθετου υλικού που προκύπτει, συναρτήσει της αναλογίας SPIONS/ABS (%w/w) που εισάγονται .

## 5. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

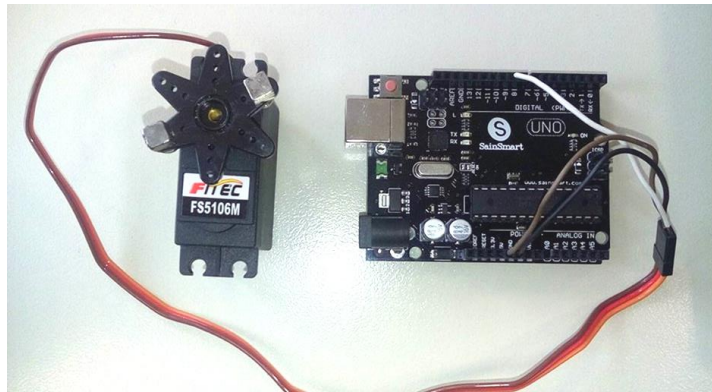
---

Οι δυνατότητες βελτίωσης και παραλλαγής στο σύστημα είναι άφθονες. Στα πλαίσια της διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Υπό συνθήκες περισσότερου διαθέσιμου εξοπλισμού θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν περισσότερες δοκιμές.

### Ανάπτυξη συστήματος προσανατολισμού μαγνήτισης

Μια από αυτές τις εφαρμογές είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος προσανατολισμού της μαγνήτισης στο υλικό που εκτυπώνεται κατά την εξώθηση του.

Αναπτύχθηκε συσκευή η οποία αποτελείται από ένα Arduino Uno, έναν κινητήρα τύπου servo, στις άκρες του οποίου τοποθετήθηκαν δυο μαγνήτες νεοδημίου N50 με αντίθετη πόλωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1. Η συσκευή τοποθετείται στην έξοδο του extruder και ρυθμίζεται περιστροφή του κινητήρα ώστε να εναλλάσσεται το μαγνητικό πεδίο περιοδικά κατά την εξώθηση. Με αυτόν τον τρόπο, το υλικό που εκτυπώνεται, μπορεί να αποτελείται από περιοχές συγκεκριμένης μαγνητικής πόλωσης συγκεκριμένου μήκους.



Εικόνα 5.1 Συσκευή Arduino Uno συνδεδεμένο με έναν κινητήρα τύπου servo

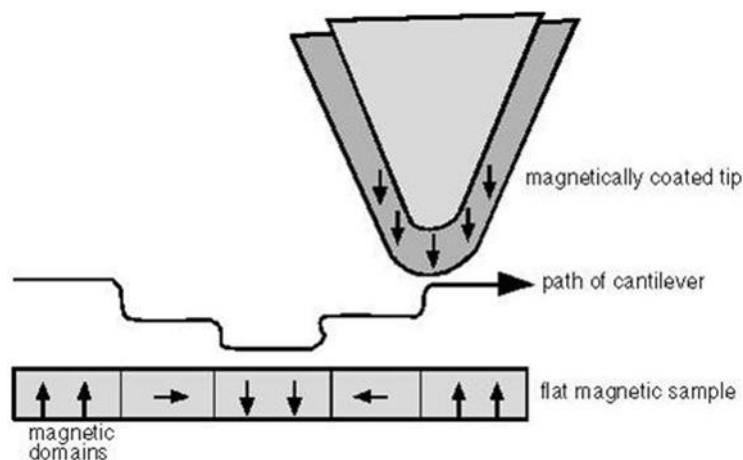


Αυτή η συσκευή καθιστά δυνατή την κατασκευή μαγνητικών λωρίδων εναλλασσόμενης πολικότητας. Τέτοιες μαγνητικές δομές ονομάζονται Hallbach arrays και βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών (από μαγνητάκια ψυγείου μέχρι σε φρένα ταχύτατων τρένων όπως το Hyperloop).



Εικόνα 5.2 Hyperloop

Για την ανάλυση και το χαρακτηρισμό του υλικού καθώς και για τη διαπίστευση του κατά πόσο είναι πράγματι δυνατός ο προσανατολισμός των περιοχών, είναι απαραίτητη η μέτρηση με μικροσκοπία μαγνητικής δύναμης (Magnetic Force Microscopy MFM), μέτρηση η οποία δεν ήταν διαθέσιμη στο εργαστήριο των Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων.



Εικόνα 5.3 Λειτουργία μέτρησης με μικροσκοπία μαγνητικής δύναμης



Επίσης, θα μπορούσαν να εξεταστούν διαφορετικές συστάσεις SPIONs/ABS (%w/w) και άλλα πλαστικά όπως το PLA αλλά αυτά θα μελετηθούν σε μελλοντική εργασία.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η κατασκευή μαγνητικού νήματος για χρήση σε 3D εκτυπωτή. Αυτή η τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής λειτουργικών υλικών που ανταποκρίνονται σε ερεθίσματα που επιβάλλονται εξωτερικά και παρέχουν στο υλικό τη δυνατότητα να επιτελεί εξειδικευμένους σκοπούς χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικών ή μηχανικών μέσων.

Κατασκευάστηκε πρωτότυπη συσκευή εξαγωγής μαγνητικού νήματος προς εκτύπωση σε πολύ μικρό κόστος. Αυτή η συσκευή έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της ποσότητας μαγνητικού υλικού που εισάγεται και άρα της μαγνητικής επιδεκτικότητας του τελικού προϊόντος.

Περιερίχτηκαν δύο πηνία (λήψης και διέγερσης) γύρω από τον καθετήρα για τον προσδιορισμό της μαγνητικής επιδεκτικότητας του υλικού. Το πλαστικό που αποτελεί τη μήτρα και παρεμβάλλεται ανάμεσα στα μαγνητικά νανοσωματίδια δημιουργεί κενά που μειώνουν δραματικά την επιδεκτικότητα του υλικού και αυξάνουν ραγδαία το πεδίο που απαιτείται για να φτάσει το υλικό σε κορεσμό και άρα να μπορεί να μετρηθεί η επιδεκτικότητα.

Τέλος, αναπτύχθηκε πρότυπη μέθοδος προσδιορισμού της μαγνητικής επιδεκτικότητας του υλικού με τη χρήση ισορροπίας μαγνητικών και ρευστοδυναμικών δυνάμεων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί ούτως ώστε να προβλεφθεί η μαγνητική επιδεκτικότητα του νήματος.

## 7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

- [1] C. Huber, C. Abert, F. Bruckner, M. Groenefeld, O. Muthsam, S. Schuschnigg, K. Sirak, R. Thanhoffer, I. Teliban, C. Vogler, R. Windl, and D. Suess, «3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer,» 10 2016. [Ηλεκτρονικό].
- [2] Dimitri Kokkinis, Manuel Schaffner, and André R. Studarta, «Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials,» Nature Communications, 2015.
- [3] Xue Yan, P Gu, «A review of rapid prototyping technologies and syst,» Computer-Aided Design, pp. 307-318, 1996.
- [4] J.-P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, «Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping,» CIRP Annals - Manufacturing Technology, pp. 525-540, 1998.
- [5] Μπιλάλης Ν., Μαραβελάκης Ε., Συστήματα CAD/CAM και Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση, Κριτική, 2009.
- [6] K.-H. Chang, Product Design Modeling Using CAD/CAE, he Computer Aided Engineering Design Series, 2014.
- [7] «<http://www.3dfuture.com.au/the-mathematics-of-3d-printing/#fubini>,» [Ηλεκτρονικό].
- [8] T. G. a. J. R. M. Durham, «SLS and SLA:Different Technologies for Different Applications,» Accelerated Technologies, 1996.
- [9] C.X.F Lama, X.M Moa, S.H Teoha, D.W Hutmacher, Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer, 2002, pp. 49-56.
- [10] R. J. Palmer, «Polyamides, Plastics,» σε Encyclopedia of Polymer Science and Technology, 2001.
- [11] Ceresana, «Market Study Engineering Plastics,» 2013.

- [12] «[i.materialise.com/materials](http://i.materialise.com/materials),» [Ηλεκτρονικό].
- [13] «<http://www.3ders.org/articles/20121029-3d-printed-water-waves-lamps-inspired-by-traditional-chinese-painting.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [14] «[www.3ders.org](http://www.3ders.org),» [Ηλεκτρονικό].
- [15] Α. Χ.Μπούσια, «Συνεργεία νανοτεχνολογίας και πολυμερισμού στερεάς κατάστασης για την αναβάθμιση πολυαμιδικών ρυτίνων».
- [16] Oxford University Press, 'ceramic'. Oxford English Dictionary (3rd ed.), 2005.
- [17] Ctioa.org, «Ceramic Tile and Stone Standards,» 2011.
- [18] «<http://news.in.gr/science-technology/>,» [Ηλεκτρονικό].
- [19] Δ. Παπαϊωάννου, «Σχεδίαση διάταξης τύπου Halbach για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου,» Θεσσαλονίκη, 2010-2011.
- [20] B. G. Frank S. Barnes, Bioengineering and Biophysical Aspects of Electromagnetic Fields, 2006.
- [21] Introduction to Solid State Physics, 1st ed. 1953 - 8th ed. 2005, Charles Kittel.
- [22] Sergey S. Shevkoplyas, Adam C. Siegel, Robert M. Westervelt, bc Mara G. Prentiss and George M. Whitesides, «The force acting on a superparamagnetic bead due to an applied magnetic field,» 2007.
- [23] Stratasys Inc., «ABS,» 2007.
- [24] «Mechatronics Volume 23,» 2013, pp. 713-726.