



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

---

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Εργασία Μαθήματος «Μηχανική Πολυμερών»

---

## ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

---

Συγγραφείς:

Βιδιάνος Γιαννίτσης

Θεοφανώ Αντωνία Πόταρη

Γιάννης Κατσουλάκης

Αριθμοί Μητρώου:

ch19113

ch19555

ch19013

Αθήνα, 2022

## Περίληψη

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ή αλλιώς προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing, AM) μεταφράζει τα εικονικά τρισδιάστατα μοντέλα σχεδίασης με τη βοήθεια λογισμικού CAD (Computer Aided Design) σε φυσικά αντικείμενα. Τα πολυμερή είναι η πιο ευρεία χρησιμοποιημένη κατηγορία υλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση για αυτό και είναι και το επίκεντρο της εργασίας αυτής. Πιο συγκεκριμένα, εστιάζει στις βασικότερες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης, στην σύγκριση της τρισδιάστατης εκτύπωσης με άλλες τεχνικές μορφοποίησης, στα βασικότερα πολυμερή που βρίσκουν εφαρμογή στις διάφορες τεχνικές, στον ρόλο της τρισδιάστατης στην προστασία του περιβάλλοντος και στη διαμόρφωση ενός μοντέλου κυκλικής οικονομίας και στις εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή πολυμερικών προϊόντων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις ηλεκτρικές εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Βασικά στοιχεία της τρισδιάστατης εκτύπωσης</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης</b>	<b>2</b>
2.1	Fused Deposition Modeling (FDM) ή Fused Filament Fabrication (FFF) . .	2
2.2	Ink-jet 3d-printing (IJP) . . . . .	3
2.3	Selective Laser Sintering (SLS) . . . . .	5
2.4	Στερεολιθογραφία (SLA) . . . . .	6
2.5	Laminated Object Manufacturing (LOM) . . . . .	6
2.6	Τρισδιάστατη Βιοεκτύπωση . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Βασικά υλικά που βρίσκουν εφαρμογή στο 3d-printing</b>	<b>8</b>
3.1	PLA - Το βασικότερο πολυμερές της μεθόδου FDM . . . . .	9
3.1.1	Βελτίωση του PLA με σύνθετα ή πολυμίγματα . . . . .	10
3.2	ABS - Το βασικό engineering plastic της τρισδιάστατης εκτύπωσης . . . . .	10
3.3	Χρήση άλλων engineering plastics στο 3d printing . . . . .	11
3.4	PE και PP - Χρήση commodities στην τρισδιάστατη εκτύπωση . . . . .	11
3.5	Θερμοπλαστικά Ελαστομερή και τρισδιάστατη εκτύπωση . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Ο ρόλος του 3d-printing στην βιώσιμη ανάπτυξη και στην κυκλική οικονομία</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης</b>	<b>13</b>
5.1	Ηλεκτρικές Εφαρμογές . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Appendix - Άρθρα από το Scopus</b>	<b>18</b>

# 1 Βασικά στοιχεία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing) είναι μία σύγχρονη τεχνική μορφοποίησης πολυμερών με την οποία είναι εφικτό να δημιουργηθούν πολύ συγκεκριμένες και πιθανόν περίπλοκες γεωμετρίες, οδηγώντας σε αρκετά εξατομικευμένα προϊόντα. Επιπλέον, ορισμένες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι εύκολες, φθηνές και δεν παράγουν όσα απόβλητα όσο άλλες τεχνικές μορφοποίησης [1]. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις, η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι πολύ κερδοφόρα [2]. Για αυτούς τους λόγους, έχει ευρεία υιοθέτηση τα τελευταία χρόνια. Βέβαια, είναι λιγότερο καθολική μέθοδος μορφοποίησης από μεθόδους όπως η χύτευση με έγχυση (injection molding) η οποία μπορεί να επεξεργαστεί ένα πιάτο ευρή φάσμα πολυμερών. Επίσης, οι ιδιότητες ενός πολυμερούς από 3d printing είναι σχετικά χαμηλότερες αυτών των υλικών που φτιάχτηκαν από injection molding [3, 4]. Βέβαια μία πιο πρόσφατη μελέτη [5] έδειξε πως βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους της τρισδιάστατης εκτύπωσης, με ένα παραγοντικό πείραμα για παράδειγμα, είναι εφικτό να πάρουμε ένα προϊόν με συγκρίσιμες μηχανικές ιδιότητες με αυτές του injection molding έχοντας όμως την ευελιξία στην γεωμετρία που προσφέρει το 3d printing. Όμως, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί πως οι βέλτιστες αυτές συνθήκες διαφέρουν από πολυμερές σε πολυμερές [6] ή ανάλογα αν θα χρησιμοποιηθεί καινούργιο ή ανακυκλωμένο πολυμερές [4]. Δεν πρέπει να γίνει το λάθος να μορφοποιούνται όλα τα πολυμερή με τις ίδιες (ή παρόμοιες) συνθήκες αλλά να αναγνωρίζονται οι βέλτιστες σε κάθε περίπτωση.

## 2 Τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης

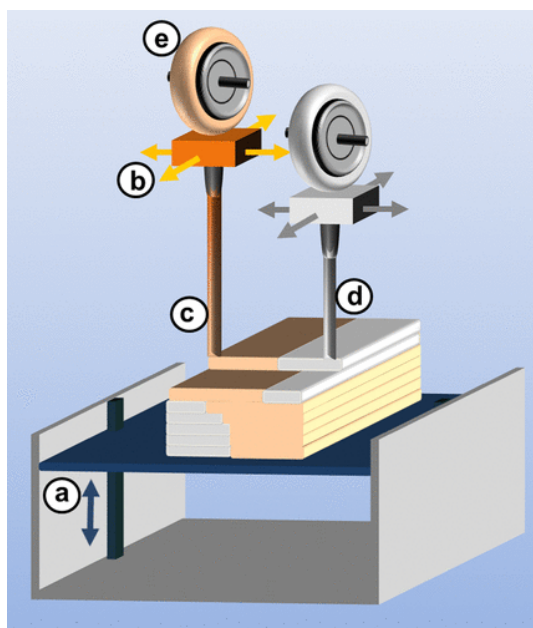
Οι βασικότερες τεχνικές 3d printing είναι οι 3d printing με έγχυση μελανιού (IJP), επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λείζερ (SLS), μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (FDM) ή κατασκευή λιωμένου νήματος (FFF), η στερεολιθογραφία (SLA), η κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων (LOM) και η τρισδιάστατη βιοεκτύπωση (3d bioprinting).

Η τεχνική FDM είναι η πιο διαδεδομένη καθώς είναι απλή, δεν έχει απόβλητα και δεν εξειδικεύεται σε πολύ συγκεκριμένα προϊόντα [7].

### 2.1 Fused Deposition Modeling (FDM) ή Fused Filament Fabrication (FFF)

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για 3d printing πολυμερικών υλικών είναι η μέθοδος FDM [7, 8]. Καθώς το όνομα FDM είναι trademarked από συγκεκριμένη εταιρεία, εμφανίζεται στην βιβλιογραφία και ως FFF [9]. Είναι μία φθηνή και κερδοφόρα μέθοδος [2], που είναι σχετικά εύκολα διαθέσιμη και έχει ένα μικρό όργανο που δεν απαιτεί assembly. Δεν έχει πολλά απόβλητα και τα τυπικά της υλικά δεν είναι τοξικά. Παρακάτω ακολουθεί και μία σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου.

Αρχή της μεθόδου αποτελεί η τήξη του πολυμερούς και έπειτα μέσω του στόμιου του εκτυπωτή το οποίο δύναται να κινηθεί και στις 3 διαστάσεις βγαίνουν λεπτά στρώματα του πολυμερούς (συνήθως αναφέρονται και ως νήματα) με τα οποία δημιουργείται η απαιτούμενη γεωμετρία. Βασικό ρόλο στην τελική ποιότητα του υλικού παίζουν και οι παράμετροι του οργάνου, όπως ο αριθμός των στιβάδων που χρησιμοποιήθηκε και το πάχος τους, η ταχύτητα εκτύπωσης, η γωνία που τοποθετείται ο εκτυπωτής, η διάμετρος του νήματος και οι θερμοκρασίες λειτουργίας του στόμιου και της πλατφόρμας στην οποία γίνεται η εκτύπωση [5, 10]. Θεωρείται πως οι σημαντικότερες αυτών είναι οι 2 θερμοκρασίες και η γωνία του εκτυπωτή [5]. Βέβαια, επίσης πολύ σημαντικό ρόλο μπορούν να παίξουν και οι ιδιότητες του



Σχήμα 1: Η διαδικασία μοντελοποίησης συντηγμένης εναπόθεσης που εφευρέθηκε από τον Scott Crump στην Stratasys, Inc., αποτελείται από (α) μια κατακόρυφα κινητή πλατφόρμα δημιουργίας και (β) μια κεφαλή εκτύπωσης με σκληρυμένη εξώθηση για την εναπόθεση του (γ) μοντέλου και (δ) υλικό υποστήριξης αποθηκευμένο σε (ε) πρώτες ύλες που περιέχουν νήματα από θερμοπλαστικά τυλιγμένα σε καρούλι.

πολυμερικού νήματος.

Η χρυσταλλικότητα για παράδειγμα κρίνει πόσο εύκολο είναι να λιώσει το πολυμερές. Προτιμούνται άμορφα πολυμερή καθώς λιώνουν πιο εύκολα. Από τις θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία τήξης και αποσύνθεσης) του πολυμερούς καθορίζεται η θερμοκρασία λειτουργίας. Από τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες καθορίζεται η ποιότητα του τελικού υλικού και από τις ρεολογικές πόσο εύκολο είναι να χρησιμοποιηθεί με αυτή τη μέθοδο. Γενικά, είναι επιθυμητό να μην έχει τόσο υψηλό ιξώδες το τήγμα για να μην προκαλέσει αστοχία στο όργανο [10].

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως αν τα στρώματα δεν κολλήσουν πολύ καλά, το υλικό θα έχει πολύ υποβαθμισμένες ιδιότητες. Αλλά ακόμη και στην περίπτωση που η συγκόλληση είναι καλή, η επιφάνεια που δημιουργείται είναι λίγο τραχεία (της τάξης των μικρομέτρων) με αποτέλεσμα να υπάρχει μία ανισοτροπία που οδηγεί σε ελαφρώς υποβαθμισμένες ιδιότητες σε σχέση με άλλες μεθόδους μορφοποίησης. Επιπροσθέτως, είναι μία μέθοδος η οποία είναι χρονοβόρα και απαιτεί επόπτευση από κάποιον για να είναι σίγουρο πως δεν πάει κάτι λάθος [10].

## 2.2 Ink-jet 3d-printing (IJP)

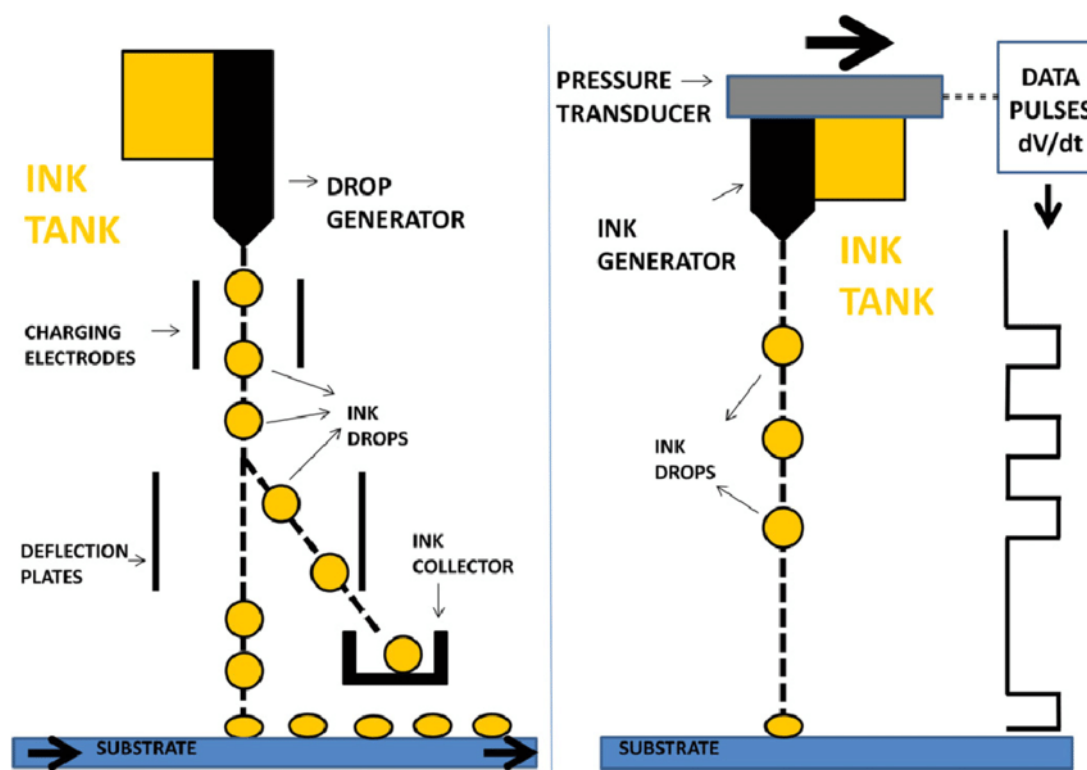
Πέρα από την μέθοδο FDM η τρισδιάστατη εκτύπωση μελάνης (IJP) είναι αρκετά διαδεδομένη. Η μέθοδος IJP βασίζεται στην μορφοποίηση μίας πολυμερικής σκόνης και ένα πίδακα μελανιού που εγχύεται μέσω πιεζοηλεκτρικής δράσης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προσαρμοστεί για την κατασκευή 2D και 3D τυπωμένων αντικειμένων και να δημιουργηθούν πολύ περίπλοκες γεωμετρίες για αυτό είναι η κατ'εξοχήν μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης στην μηχανική ιστών. Η εκτύπωση με την τεχνική αυτή πραγματοποιείται χωρίς επαφή, άρα είναι επεκτάσιμη και είναι λιγότερο επιρρεπής σε μόλυνση της πρώτης ύλης. Τέλος, η μέθοδος IJP είναι συμβατή με διαφορετικά υγρά, συμπεριλαμβανομένων των διαλυμάτων πολυμερών, των

αιωρούμενων σωματιδίων και των βιομορίων, υπό τον όρο ότι το μελάνι ικανοποιεί ορισμένες απαιτήσεις υγρών [11]. Βέβαια, είναι αρκετά ακριβή μέθοδος και ο εξοπλισμός της είναι πολύ εύθραυστος [7] .

Οι δύο βασικοί τρόποι εκτύπωσης inkjet είναι η λειτουργία συνεχούς ψεκασμού (CIJ) και η λειτουργία drop-on-demand (DOD) [12, 13]. Και στις δύο μεθόδους, το υγρό περνά μέσα από ένα στόμιο ή ακροφύσιο. Στην τεχνική συνεχούς inkjet, οι σταγόνες ωθούνται συνεχώς μέσα από το ακροφύσιο και οι διαδρομές τους ποικίλλουν ανάλογα με την ποσότητα φόρτισης που εφαρμόζεται. Στην τεχνική έγχυσης μελάνης drop-on-demand, τα σταγονίδια παράγονται ανάλογα με τις ανάγκες, εφαρμόζοντας την τάση μόνο όταν είναι επιθυμητή πτώση. Και στις δύο λειτουργίες IJP, το υγρό υλικό εκτοξεύεται από την κεφαλή του εκτυπωτή με μια σειρά μικροσταγονιδίων μέσω μιας κεφαλής ακροφυσίου (nozzle) μεγέθους μικρομέτρου, τα οποία στη συνέχεια στερεοποιούνται στο υπόστρωμα. Τα εναποτιθέμενα υλικά έχουν τη μορφή χημικών διαλυμάτων και κολλοειδών διασπορών. Οι κύριοι μηχανισμοί ενεργοποίησης της κεφαλής ακροφυσίου inkjet είναι θερμικοί, πιεζοηλεκτρικοί και ηλεκτροϋδροδυναμικοί [14] .

Στην λειτουργία CIJ υπάρχει συνεχής δράση εκτόξευσης και το ακροφύσιο είναι λιγότερο πιθανό να φράξει λόγω της εξάτμισης του διαλύτη, ειδικά εάν χρησιμοποιείται πτητικός διαλύτης. Ωστόσο, η ανάλυση του CIJ είναι γενικά χαμηλότερη από αυτή του DOD [15]. Η ανακύκλωση του μελανιού μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μόλυνση και να απαιτήσει αναπροσαρμογή της συγκέντρωσης του μελανιού. Η εκτύπωση inkjet τύπου DOD χρησιμοποιείται ευρύτερα, όπου η πτώση δημιουργείται μόνο όπως απαιτείται από θερμική ή πιεζοηλεκτρική ενεργοποίηση. Ένα μειονέκτημα της DOD εκτύπωσης είναι ότι το μελάνι στεγνώνει στο ακροφύσιο κατά τη διάρκεια διακοπής λειτουργίας, που μπορεί περαιτέρω να οδηγήσει σε εναπόθεση σωματιδίων στο ακροφύσιο και πιθανή απόφραξη [11] .

Παρακάτω ακολουθεί και μία σχηματική σύγκριση των δύο μηχανισμών.



Σχήμα 2: Μηχανισμός συνεχούς (αριστερά) και DOD (δεξιά) εκτύπωσης με έγχυση μελάνης

## 2.3 Selective Laser Sintering (SLS)

Η μέθοδος επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS) βασίζεται σε μία πηγή λέιζερ υψηλής ισχύος και ένα οπτικό λέιζερ, τα οποία σαρώνουν τα περιγράμματα και τα στρώματα του μοντέλου σύμφωνα με δεδομένα CAD. Έτσι, μπορούν να συντεθούν τα σωματίδια του πολυμερούς. Η ακτινοβολία λέιζερ απορροφάται, επηρεάζοντας την τοπική θέρμανση των σωματιδίων της σκόνης, προκαλώντας μαλάκυνση, τήξη και στερεοποίηση των σωματιδίων [16, 17].

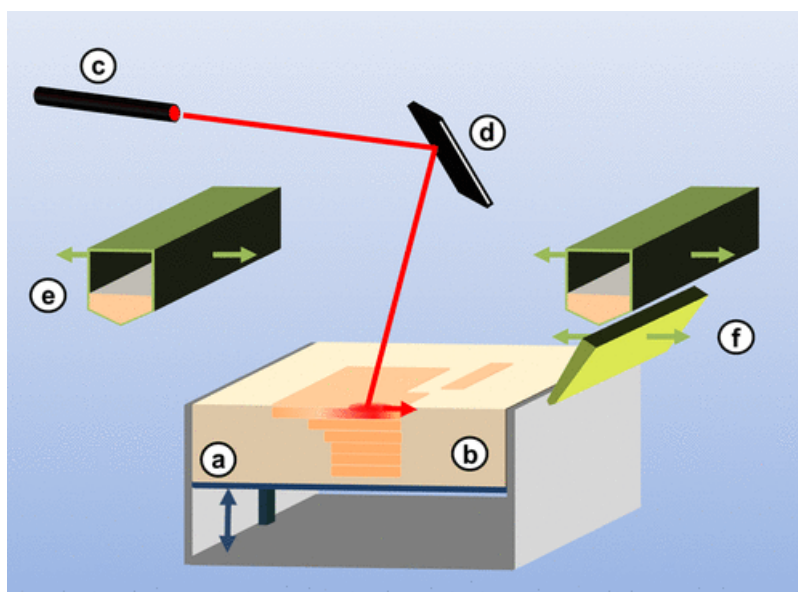
Η εναπόθεση σκόνης μεταξύ της πυροσυσσωμάτωσης παρακείμενων στρωμάτων πραγματοποιείται με χρήση λεπίδας (σύντηξη λέιζερ) ή κυλίνδρου (SLS) για τη διανομή σωματιδίων σκόνης που παρέχονται είτε από μία ή δύο χοάνες που κινούνται κατά μήκος του περιβλήματος ή από μία ή δύο πρόσθετες πλατφόρμες που παρέχουν την τροφοδοσία σκόνης. Καθ' όλη τη διάρκεια της περιγραφόμενης διαδικασίας, ο θάλαμος επεξεργασίας διατηρείται σε υψηλή θερμοκρασία, λίγους βαθμούς κάτω από το σημείο μαλακώματος (softening point) του επεξεργασμένου υλικού. Αυτό συμβαίνει για να μειωθεί ο χρόνος επεξεργασίας και να μειωθεί η ποσότητα των θερμικά επαγόμενων εσωτερικών τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά τη στερεοποίηση των στρωμάτων [12].

Είναι παρόμοια της IJP καθώς ξεκινάει και αυτή με μία σκόνη η οποία θερμαίνεται λίγο κάτω από το σημείο τήξης της. Το τελικό προϊόν προκύπτει μόλις αφαιρεθεί όποια σκόνη δεν έχει πυροσυσσωματωθεί [7].

Στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας έχει αρχίσει να αναπτύσσεται, μία τεχνική για την εκμετάλλευση της σκόνης που δεν πυροσυσσωματώθηκε στην SLS (η οποία σε άλλη περίπτωση θα πεταγόταν) για να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για νήμα FDM [8].

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι τα υλικά στα οποία εφαρμόζεται είναι εξαιρετικά περιορισμένα βρίσκοντας εφαρμογή μόνο σε υλικά όπως πολυαμίδια (PA), πολυαιθυλένιο (PE), πολυκαπρολακτόνη (PCL) και κετόνη πολυαιθέρα αιθέρα (PEEK) [7].

Τέλος, ακολουθεί μία σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου.

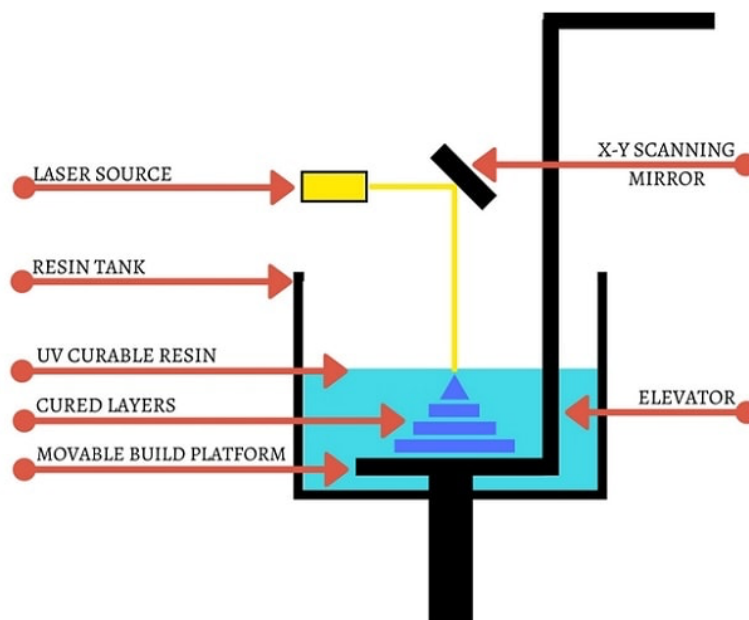


Σχήμα 3: Επιλεκτική διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης λέιζερ που αποτελείται από (α) κατακόρυφα κινούμενη πλατφόρμα κατασκευής, (β) κλίνη σκόνης με ενσωματωμένα, συντηγμένα στρώματα μοντέλου, (γ) πηγή λέιζερ και (δ) οπτικό λέιζερ, (ε) τροφοδοσία σκόνης και χοάνη εναπόθεσης και (στ) λεπίδα για διανομή σκόνης και ισοπέδωση.

## 2.4 Στερεολιθογραφία (SLA)

Η στερεολιθογραφία είναι μία τεχνική που χρησιμοποιεί υπεριώδη ακτινοβολία για να προκαλέσει μία αλυσιδωτή αντίδραση σε μία πολυμερική ρητίνη. Βασίζεται στη τεχνική του φωτοπολυμερισμού, όπου τα μονομερή ενώνονται μέσω της εκπομπής τους σε ακτινοβολία (τυπικά υπεριώδη). Είναι μία αρκετά γρήγορη τεχνική πολυμερισμού, αλλά είναι ακριβή [7, 18]. Τα στρώματα της ρητίνης αντιδρούν σταδιακά με την ακτινοβολία για να προκύψει το τελικό προϊόν, αλλά απαιτείται και κάποιου είδους θέρμανση πριν είναι έτοιμο αλλιώς δεν θα έχει τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Τυπικά χρησιμοποιεί ακρυλικές ή εποξειδικές ρητίνες. Παράγει εξαιρετικά υψηλής ποιότητας υλικά, αλλά έχει δυνατότητα μόνο για σχετικά μικρά προϊόντα. Επίσης, το κόστος της τεχνικής την κάνει λιγότερο επιθυμητή [7].

Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας είναι η ταχύτητα σάρωσης, το πάχος του στρώματος και οι φωτοχημικές ιδιότητες της ρητίνης.



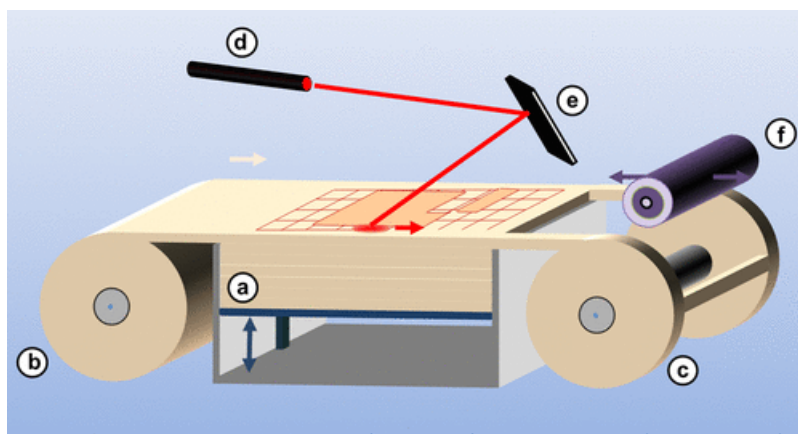
Σχήμα 4: Σχηματικό διάγραμμα μεθόδου SLA

## 2.5 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Αρχικά, στη διαδικασία LOM, φύλλα υλικού επικαλύπτονται με κόλλα και τροφοδοτούνται μέσω κυλίνδρων στην πλατφόρμα δημιουργίας όπου πλαστικοποιούνται χρησιμοποιώντας έναν θερμαινόμενο κύλινδρο. Έπειτα, τα περιγράμματα κόβονται σύμφωνα με διαστάσεις τμήματα ενός αρχείου 3D CAD. Η κοπή μπορεί να πραγματοποιηθεί με λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα ή με ειδικά μαχαίρια προσαρτημένα σε κεφαλή εκτύπωσης. Μόλις ένα στρώμα έχει κολληθεί στη θέση του και έχουν σχεδιαστεί οι απαιτούμενες διαστάσεις, η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται προς τα κάτω, ώστε το υπόλοιπο στρώμα υλικού να μπορεί να τοποθετηθεί στη θέση του μέσω του θερμαινόμενου κυλίνδρου. Για να διευκολυνθεί η απελευθέρωση του τμήματος μετά την κατασκευή, το υπολειπόμενο φύλλο, που περιβάλλει την περιοχή με περίγραμμα, κόβεται σε ορθογώνια διαμερίσματα. Η περιγραμμένη περιοχή προσαρτάται στο αντικείμενο κατασκευής και στη συνέχεια απομακρύνεται από το φύλλο. Το υλικό παραλαμβάνεται με κυλίνδρους και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το



μοντέλο ή το πρωτότυπο [12]. Μία σχηματική αναπαράσταση αυτού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 5: Διαδικασία μοντελοποίησης πλαστικοποιημένου αντικειμένου που αποτελείται από (α) κατακόρυφα κινούμενη πλατφόρμα κατασκευής, (β) πρώτη ύλη υλικών που περιέχει κυλίνδρους φύλλων, (γ) συλλογή υπολειπόμενου υλικού, (δ) λέιζερ CO<sub>2</sub> και (ε) οπτικά λέιζερ που κόβουν στρώματα και τα διασταυρώνουν με το πρότυπο.

Η LOM προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για τη βιομηχανία για τη γρήγορη και φθηνή παραγωγή πρωτοτύπων και άλλων προϊόντων. Η διαδικασία LOM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία συμπαγών και κοίλων αντικειμένων, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων εξαρτημάτων, ταχύτητα και με μικρότερο κόστος από ό,τι με την τυπική κατασκευή πρόσθετων. Μπορούν να δημιουργηθούν εύκολα σχετικά μεγάλα εξαρτήματα, καθώς δεν υπάρχει χημική αντίδραση στη διαδικασία κατασκευής, ενώ δεν υπάρχει επίσης ανάγκη για υλικό στήριξης καθώς το δομικό υλικό εκτός του περιγράμματος του μοντέλου στηρίζεται μόνο του κατά την διαδικασία πλαστικοποίησης. Παρόλα αυτά, επειδή το LOM είναι μια διαδικασία αφαίρεσης άρα δεν είναι τόσο εύκολο να παραχθούν πολύπλοκα γεωμετρικά σχήματα όπως με άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν είναι πάντα δυνατή η πρόσβαση στα εσωτερικά μέρη του αντικειμένου ή η απομάκρυνση της περίσσειας υλικού μέσα από ένα αντικείμενο. Η LOM προσφέρει μειωμένη ακρίβεια διαστάσεων σε σύγκριση με τη στερεολιθογραφία και την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ και οι μηχανικές ιδιότητες δεν είναι ικανοποιητικές. Επιπλέον, ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται, τα μέρη LOM μπορεί επίσης να έχουν κακό φινίρισμα επιφάνειας και τα πιο ευαίσθητα χάρτινα μέρη έχουν χαμηλή αντοχή. Τα χάρτινα εξαρτήματα LOM μπορούν επίσης να απορροφήσουν εύκολα την υγρασία αν δεν υποβληθούν σε επεξεργασία [19].

## 2.6 Τρισδιάστατη Βιοεκτύπωση

Η τρισδιάστατη βιοεκτύπωση είναι μια κατηγορία παρασκευής προσθέτων που χρησιμοποιεί κύτταρα και βιοϋλικά αντί για παραδοσιακά μέταλλα και πλαστικά, για τη κατασκευή λειτουργικών ιστών και οργάνων. Αυτά τα βιοϋλικά ονομάζονται βιομελάνια και μιμούνται τη σύνθεση των ιστών του ανθρώπου. Εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων της αναγεννητικής ιατρικής, της ανακάλυψης και ανάπτυξης φαρμάκων, της τρισδιάστατης κυτταροκαλλιέργειας καθώς και στη βιολογική αξιολόγηση ουσιών χωρίς να απαιτούνται δοκιμές σε ζώα [12].

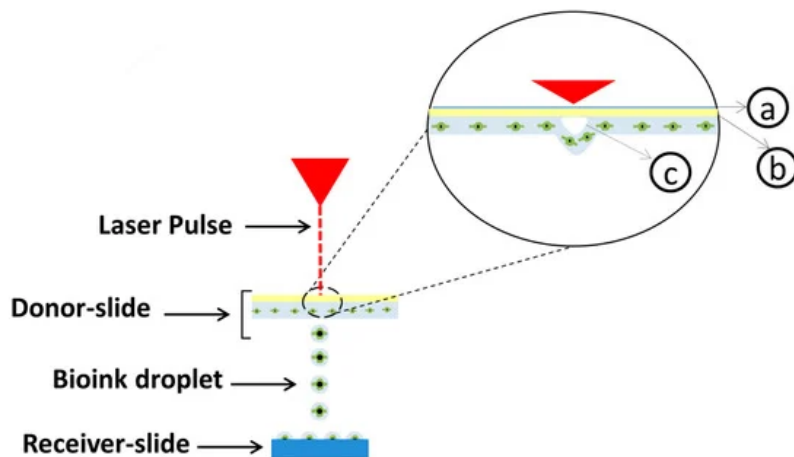
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της βιοεκτύπωσης είναι η χρήση βιομελανών. Τα κυτταρικά βιομελάνια βασίζονται σε υδρογέλη, καθώς οι υδρογέλες έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε νερό που είναι σημαντική για την επιβίωση των κυττάρων και προστατεύει τα κύτταρα



από τις διάφορες δυνάμεις που προκαλούνται κατά την κατασκευή. Οι κύριες ιδιότητες μίας βιομελάνης που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν από την εκτύπωση περιλαμβάνουν το ιξώδες, τη ζελατινοποίηση και τις ικανότητες των σταυροδεσμών. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την πιστότητα εκτύπωσης (σταθερότητα κατασκευής και απόκλιση εκτύπωσης από τα σχέδια με τη βοήθεια υπολογιστή) καθώς και τη βιωσιμότητα, τον πολυπλασιασμό και τη μορφολογία των κυττάρων μετά την εκτύπωση [20] .

Η εκτόξευση υλικών χωρίζεται σε βιοεκτύπωση με βάση inkjet και με λέιζερ, και δεν απαιτεί επαφή με το υπόστρωμα [21] . Η τρισδιάστατη βιοεκτύπωση που βασίζεται σε inkjet είναι παρόμοια με την εκτύπωση inkjet χρησιμοποιώντας τους κοινούς εμπορικούς επιτραπέζιους εκτυπωτές. Με αυτή τη μέθοδο, οι δομές κυψελών 3D κατασκευάζονται μέσω εκτύπωσης στρώσης προς στρώση βιομελανών με κελιά με μεταφορά προς τα εμπρός. Η βιοεκτύπωση inkjet παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς παρουσιάζει υψηλή ανάλυση και βιωσιμότητα κυττάρων. Με αυτή τη διαδικασία, είναι δυνατή η ακριβής θέση πολλαπλών τύπων κυττάρων [22], ωστόσο, οι περιορισμοί της κατακόρυφης εκτύπωσης και τα περιορισμένα ιξώδη δείχνουν ότι η βιοεκτύπωση inkjet πρέπει να συνδυαστεί με άλλες τεχνικές εκτύπωσης για μελλοντικές εξελίξεις.

Η βιοεκτύπωση με λέιζερ (LAB) αποτελείται από τρία μέρη: μια διαφάνεια δότη (ή κορδέλα), έναν παλμό λέιζερ και μια διαφάνεια δέκτη. Μια κορδέλα είναι κατασκευασμένη από ένα στρώμα διαφανούς γυαλιού, ένα λεπτό στρώμα μετάλλου και ένα στρώμα βιομελανιού [21]. Το βιομελάνι μεταφέρεται από την κορδέλα στη διαφάνεια του δέκτη όταν το μεταλλικό στρώμα κάτω από την υδρογέλη εξατμίζεται με παλμό λέιζερ, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6: Βιοεκτύπωση με υποβοήθηση με Laser. (α) διαφανές γυαλί, (β) λεπτό μεταλλικό στρώμα, (γ) φυσαλίδα που προκαλείται από την εξάτμιση

Το πλεονέκτημα της διαδικασίας LAB είναι ότι έχει την ικανότητα να τοποθετεί πολλαπλούς τύπους κυττάρων με υψηλό βαθμό ακρίβειας. Ωστόσο, είναι μια ακριβή και δαπανηρή διαδικασία στην εκτέλεση και έχει χαμηλή σταθερότητα και επεκτασιμότητα και είναι καλό να συνδυάζεται με άλλες τεχνικές βιοκατασκευής [21] .

### 3 Βασικά υλικά που βρίσκουν εφαρμογή στο 3d-printing

Πολλές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι αρκετά εξειδικευμένες στα υλικά που χρησιμοποιούν και γι αυτό έχει αναφερθεί παραπάνω ποιά υλικά χρησιμοποιούν. Στη παράγραφο

αυτή, θα αναλυθούν κυρίως τα υλικά της τεχνικής FDM, καθώς έχει μεγαλύτερο εύρος υλικών που εφαρμόζονται σε αυτή. Επίσης, είναι και η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη τεχνική.

Παρόλα αυτά τα βασικότερα πολυμερή που βρίσκουν εφαρμογή στη τρισδιάστατη εκτύπωση με την μέθοδο FDM είναι 2. Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και το πολυ(ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο) (ABS). Είναι υλικά που τήκονται σχετικά εύκολα με καλές μηχανικές ιδιότητες, άρα είναι ιδανικά για χρήση στην τεχνική αυτή [2, 4, 7, 8, 10, 23]. Το PLA είναι το υλικό που έχει "κατακτήσει" την αγορά των τρισδιάστατων εκτυπωτών καθώς έχει παρόμοιες και στις περισσότερες περιπτώσεις καλύτερες ιδιότητες από το ABS αλλά παράγεται από βιολογικές πρώτες ύλες και είναι βιοδιασπώμενο, συμβάλλοντας έτσι στην βιωσιμότητα της διεργασίας [1, 10, 23].

Όμως, στην βιβλιογραφία υπάρχουν πάρα πολλά άλλα υλικά που έχουν δοκιμαστεί στη μέθοδο FDM, με πολλά να έχουν επιτυχία. Για παράδειγμα, διάφοροι μελετητές έχουν εξετάσει commodities όπως το πολυαιθυλένιο (PE) και το πολυπροπυλένιο (PP) σε 3d printing καθώς είναι από τα φθηνότερα πολυμερή και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ευρέως [1, 3, 5, 10, 23]. Αυτά μορφοποιούνται τυπικά με άλλες τεχνικές όπως η injection molding, αλλά η υιοθέτηση μίας φθηνότερης και πιο ευέλικτης τεχνικής είναι δελεαστική.

Ακόμη, καθώς το ABS είναι ένα από τα πιο χρησιμοποιημένα υλικά στην τεχνική αυτή, πολλά άλλα engineering plastics (πολυμερικά υλικά με καλές θερμομηχανικές ιδιότητες) έχουν μελετηθεί με περισσότερη λεπτομέρεια. Παραδείγματα τέτοιων πολυμερών είναι το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), τα πολυανθρακικά (PC) και τα πολυαμίδια (PA) όπως πχ το Nylon 6-6 ή το Nylon 12 τα οποία μπορούν να παράξουν υλικά με πολύ καλύτερες θερμομηχανικές ιδιότητες [4, 9, 10, 24]. Εκ αυτών, υπάρχει πιο ευρεία βιβλιογραφία πάνω στην χρήση του PC σε τέτοιες εφαρμογές [7, 9].

Επιπλέον, λόγω της τεράστιας επιτυχίας του PLA στο 3d printing, πολλοί έχουν μελετήσει την συμπεριφορά άλλων βιοπολυμερών όπως τα πολυυδροξυαλκανοϊκά (PHAs), το ηλεκτρικό πολυβουτυλένιο (PBS) και η πολυκαπρολακτόνη (PCL) είτε μόνα τους ή σε συνδυασμό με το PLA [1, 4, 23].

Τέλος, έχει εξεταστεί και η κατηγορία των θερμοπλαστικών ελαστομερών στην τρισδιάστατη εκτύπωση [2, 25], υλικά που έχουν ιδιότητες και θερμοπλαστικών και ελαστομερών υλικών με αποτέλεσμα να είναι αρκετά ενδιαφέροντα υλικά σε ποικίλες εφαρμογές.

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα αναπτυχθούν με περισσότερη λεπτομέρεια τα υλικά αυτά και η χρήση τους στη τρισδιάστατη εκτύπωση.

### 3.1 PLA - Το βασικότερο πολυμερές της μεθόδου FDM

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το PLA είναι το βασικότερο υλικό που χρησιμοποιείται στην τρισδιάστατη εκτύπωση με την τεχνική FDM. Είναι ένα βιοπολυμερές που παράγεται εύκολα από ανανεώσιμες πηγές όπως το ζαχαροκάλαμο ή το καλαμπόκι. Είναι ημικρυσταλλικό με χαμηλά επίπεδα κρυσταλλικότητας στις περισσότερες περιπτώσεις και τήκεται σχετικά εύκολα σε θερμοκρασίες πάνω από 180 βαθμούς κελσίου συνήθως. Έχει καλές μηχανικές ιδιότητες και είναι βιοδιασπώμενο. Λόγω αυτού, μπορούν πολύ εύκολα να καθαριστούν υπολείμματα του πάνω στο όργανο και κατά την διάσπαση του δεν εκλύει επικίνδυνες ουσίες [10, 26]. Επίσης, προβλέπεται πως η τιμή του θα πέσει αρκετά στα επόμενα χρόνια και θα γίνει και αυτό commodity [1].

Βέβαια, έχει κάποια προβλήματα. Για παράδειγμα, αποσυντίθεται σχετικά εύκολα μετά την τήξη του και είναι ένα αρκετά υγροσκοπικό υλικό, περιορίζοντας έτσι το εύρος συνθηκών στις οποίες μπορεί να μορφοποιηθεί [27]. Επίσης είναι σχετικά εύθραυστο υλικό με κακή

αντοχή σε κρούση και δεν είναι τόσο εύκαμπτο.

Όλα αυτά μπορούν να βελτιωθούν με την δημιουργία συνθέτων ή μιγμάτων του PLA με άλλα υλικά που έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες. Λόγω της σημασίας του υλικού αυτού στην τρισδιάστατη εκτύπωση, η επόμενη παράγραφος έχει αφιερωθεί στο αντικείμενο αυτό.

### 3.1.1 Βελτίωση του PLA με σύνθετα ή πολυμίγματα

Υλικά όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα ή το γραφένιο βελτιώνουν τις ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές του ιδιότητες ενώ gel από διοξείδιο του πυριτίου (silica gel) διορθώνει το πρόβλημα της υγροσκοπικότητας μαζί με βελτίωση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων του υλικού [1]. Επίσης, έχει εξεταστεί η χρήση βιολογικών προσθέτων που προκύπτουν από αγρονομικά συνήθως απόβλητα, για την παραγωγή ενός πλήρως βιοδιασπώμενου υλικού το οποίο παράγεται από απόβλητα και συντελεί σε μεγάλο βαθμό στην κυκλική οικονομία [1, 23]. Εν γένει, τα περισσότερα εκ αυτών δεν βελτιώνουν το υλικό. Βέβαια, ορισμένα, όπως οι νανοκρύσταλλοι κυτταρίνης (CNC) βελτιώνουν την κρυσταλλικότητα και της θερμομηχανικές ιδιότητες του PLA [1].

Εκτός όμως από την δημιουργία σύνθετων υλικών με βάση το PLA μία άλλη συχνή τεχνική είναι η δημιουργία πολυμιγμάτων του PLA με άλλα βιοπολυμερή. Για παράδειγμα το τερεφθαλικό αδιπικό πολυβουτυλένιο (PBAT) αυξάνει την αντοχή του υλικού, την θερμική του σταθερότητα και την ευπλαστότητα του. Βέβαια, απαιτείται κάποιος πλαστικοποιητής (πχ γλυκερόλη) για την μίξη [1, 27].

Βέβαια, το "κορυφαίο" από άποψη ιδιοτήτων πολυμίγμα σε τέτοιες εφαρμογές είναι το μίγμα PLA-PBS. Το PBS, είναι ένα πολυμερές με πολύ καλές θερμικές ιδιότητες και ορισμένες καλές αντοχές (πχ σε κρούση). Βέβαια, τήκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το PLA. Το μίγμα PLA-PBS είναι εύπλαστο και έχει πολύ καλές θερμομηχανικές ιδιότητες, χωρίς όμως υψηλό σημείο τήξης (κάτι που βολεύει για εφαρμογές όπως το 3d printing) [1, 26, 27]. Ακόμη, ένας τρόπος να βελτιώσει κανείς περαιτέρω το μίγμα αυτό είναι η προσθήκη κάποιου ανόργανου πρόσθετου όπως το talc το οποίο αυξάνει την θερμική σταθερότητα, την κρυσταλλικότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς [26, 27].

## 3.2 ABS - Το βασικό engineering plastic της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Το ABS είναι ένα τριπολυμερές ακρυλονιτριλίου, βουταδιενίου και στυρενίου. Είναι άκαμπτο, έχει καλή αντοχή σε κρούση και τριβή και είναι εύπλαστο. Επίσης, έχει καλή θερμοχημική σταθερότητα (αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, οξέα και βάσεις). Ανήκει στην κατηγορία των engineering plastics, πολυμερών με πολύ καλές θερμομηχανικές ιδιότητες, τα οποία βέβαια είναι πιο ακριβά από τα commodities.

Είναι άμορφο υλικό που τήκεται μετά τους 240 βαθμούς κελσίου και έχει τις επιθυμητές ιδιότητες για να χρησιμοποιηθεί ευρέως στην τρισδιάστατη εκτύπωση [4, 10, 23]. Επίσης, είναι σχετικά εύκολα ανακυκλώσιμο και δεν εκλύει επικίνδυνες ουσίες σε τυπικές θερμοκρασίες. Αν ξεπεραστούν οι 400 βαθμούς κελσίου βέβαια, μπορεί να αποσυντεθεί στα συστατικά του που είναι καρκινογενή. Όμως, καθώς, τα πλεονεκτήματα του έναντι του PLA είναι λίγα, έχει μειωθεί αρκετά η χρήση του.

Για την μείωση της τιμής του, έχει μελετηθεί και η χρήση βιολογικών προσθέτων σε αυτό, τα οποία είναι πολύ φθηνά καθώς συνήθως προέρχονται από απόβλητα. Τα αποτελέσματα όμως έδειξαν πως δεν υπάρχει κάποια σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων του καθ'αυτόν τον τρόπο [23].

### 3.3 Χρήση άλλων engineering plastics στο 3d printing

Πέρα από το ABS, εφαρμογή στο 3d printing βλέπουν και άλλα engineering plastics όπως το PBT, τα PC ή το nylon [9, 10, 24]. Ειδικά η κατηγορία των πολυανθρακικών (PC) είναι πολύ χρήσιμη στην τρισδιάστατη εκτύπωση και έχει μελετηθεί αρκετά [7, 9].

Τα PC είναι υλικά με αρκετά καλύτερες θερμομηχανικές ιδιότητες από υλικά όπως το ABS ή το PLA. Για αυτό, αν θέλει κανείς σκληρά υλικά που τήκονται δύσκολα, μπορεί να είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί κάτι τέτοιο. Είναι πιο δύσκολο να κατεργαστεί κανείς τέτοια πολυμερή καθώς πρέπει να επιτευχθούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες στον εκτυπωτή [9]. Έχει εξεταστεί επίσης η χρήση νανοϊνών κυτταρίνης (CNFs) μαζί με PC [9] καθώς είναι ένα φθηνό βιοδιασπώμενο υλικό που παράγεται από βιομάζα και αν βελτιώνει τις ιδιότητες του PC, συμφέρει σίγουρα η χρήση του. Η μελέτη έδειξε πως για περιεκτικότητες μέχρι 0.5% οι ιδιότητες του PC αυξήθηκαν σημαντικά, συμπεραίνοντας ότι η χρήση τους αυτή είναι επιθυμητή.

### 3.4 PE και PP - Χρήση commodities στην τρισδιάστατη εκτύπωση

Το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο είναι δύο πολυμερή τα οποία έχουν μαζική παραγωγή και αρκετά χαμηλή τιμή (γιά αυτό χαρακτηρίζονται και ως commodities). Καθώς είναι τόσο φθηνά, έχει υπάρξει ενδιαφέρον να μελετηθεί η χρήση τους στην τρισδιάστατη εκτύπωση [3, 23]. Βέβαια, ακόμη περισσότερο ενδιαφέρον από τα πρωτογενή υλικά είναι η χρήση ανακυκλωμένων πολυμερών από απόβλητα, ώστε να επαναχρησιμοποιηθούν [5, 8]. Λόγω της ευρείας χρήσης των υλικών αυτών, υπάρχουν σίγουρα πολλά απόβλητα τους στην φύση. Για παράδειγμα μία μελέτη [5] έγινε γιά την εκμετάλλευση θαλάσσιων αποβλήτων που αποτελούνταν από PE και PP, ενώ μία άλλη εξέτασε τον ρόλο της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην ανακύκλωση και την κυκλική οικονομία [8]. Αυτά τα υλικά συνήθως μορφοποιούνται με injection molding, γιά αυτό ένα ενδιαφέρον ζήτημα γιά αρκετούς μελετητές είναι και η σύγκριση της τεχνικής αυτής με την τρισδιάστατη εκτύπωση [3, 5]. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία πιο εύκολη και φθηνή μέθοδος άρα μπορεί σίγουρα να εφαρμοστεί γιά την διαχείριση πλαστικών αποβλήτων.

Ένα βασικό πρόβλημα των υλικών αυτών στο 3d printing είναι ότι λόγω του υψηλού επιπέδου κρυσταλλικότητας που έχουν είναι πιο δύσκολο να τηχθούν από ότι υλικά όπως το PLA και το ABS. Επίσης, δεν έχουν όσο καλή συγκολλητική ικανότητα μεταξύ των στρωμάτων. Γιά αυτό δεν χρησιμοποιούνται τόσο πολύ στο 3d printing αλλά προτιμούνται μέθοδοι όπως το injection molding γιά την μορφοποίηση τους.

Επίσης, γιά τα υλικά αυτά ισχύει ότι με την προσθήκη βιολογικών πρόσθετων από αγρονομικά απόβλητα, οι ιδιότητες των υλικών αυξήθηκαν σημαντικά [5, 23] κάτι που έρχεται σε αντίθεση με το συμπέρασμα γιά άλλα πολυμερή (πχ PLA) [23]. Επίσης, η προσθήκη τέτοιων βιολογικών πρόσθετων βελτιώνει σημαντικά και την συγκολλητική τους ικανότητα και κάνει την μορφοποίηση τους με τρισδιάστατη εκτύπωση εφικτή [5].

### 3.5 Θερμοπλαστικά Ελαστομερή και τρισδιάστατη εκτύπωση

Τα θερμοπλαστικά ελαστομερή είναι στην ουσία πολυμερικά υλικά τα οποία έχουν ιδιότητες και θερμοπλαστικών και ελαστομερών υλικών. Έχουν πολύ καλές ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και μεγάλη επιμήκυνση πριν την θραύση λόγω της ελαστομερικής φάσης τους. Επίσης, έχουν καλή αντοχή σε ρωγμές και λειτουργούν και σε σχετικά υψη-

λές θερμοκρασίες [25] . Τα filaments τέτοιων υλικών είναι βέβαια ακριβότερα από αυτά υλικών όπως το PLA και ο χρόνος που χρειάζονται για να εκτυπωθούν είναι περισσότερος (ανεβάζοντας το ενεργειακό κόστος της διεργασίας) [2] . Βέβαια, είναι υλικά με χαμηλότερη πυκνότητα από τα κλασσικά θερμοπλαστικά, μειώνοντας την ποσότητα που απαιτείται για μία εφαρμογή και παραμένουν πολύ αποδοτικά υλικά από οικονομικής άποψης. Άρα λόγω αυτών και των προαναφερθέντων καλών ιδιοτήτων τους είναι σίγουρα μία αρκετά επιθυμητή κατηγορία υλικών στην τρισδιάστατη εκτύπωση [2, 25] .

Λόγω των πλεονεκτημάτων τους αυτών, είναι μία πολύ ενδιαφέρουσα κατηγορία υλικών για να χρησιμοποιηθεί στην τρισδιάστατη εκτύπωση. Βέβαια, έχουν γενικότερο υψηλό ιξώδες που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στο όργανο καθώς και υψηλή τριβή και πορώδες αλλά και χαμηλή συγκολλητική ικανότητα μεταξύ των στρωμάτων, πράγματα που υποβαθμίζουν σημαντικά τις μηχανικές του ιδιότητες [25] .

Τα προβλήματα αυτά βέβαια, μπορούν με τα κατάλληλα υλικά να διορθωθούν. Το ιξώδες μπορεί να ελεγχθεί κατά τον βουλκανισμό του πολυμερούς και όσο χαμηλότερο είναι το ιξώδες της θερμοπλαστικής μήτρας τόσο καλύτερο [25]. Η συγκολλητική ικανότητα μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη κάποιας κόλλας ή με την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας που γίνεται η εκτύπωση, βέβαια αυτά ανεβάζουν περισσότερο και το κόστος [2] . Επιπλέον, βελτιστοποιώντας τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του πολυμερούς καθώς και τις παραμέτρους του εκτυπωτή, μπορεί να δημιουργηθεί ένα υλικό το οποίο είναι ποιοτικό για τρισδιάστατη εκτύπωση. Ένα τέτοιο παράδειγμα από την βιβλιογραφία είναι ένα μίγμα PLA (το οποίο είναι αποδεδειγμένα από τα καλύτερα πολυμερή στο 3d printing) με φυσικό ελαστομερές [25] .

## 4 Ο ρόλος του 3d-printing στην βιώσιμη ανάπτυξη και στην κυκλική οικονομία

Η τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποτελεί μία σύγχρονη τεχνική μορφοποίησης υλικών που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στα πολυμερή. Σε μία εποχή όπου πολλά πλαστικά καταργούνται λόγω της αρνητικής επίδρασης που έχουν στο περιβάλλον, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξεταστεί λεπτομερώς η επίδραση της τεχνικής αυτής στο περιβάλλον. Επίσης, αξίζει να μελετηθεί περαιτέρω ο ρόλος που μπορεί να παίξει στην κυκλική οικονομία και την βιώσιμη ανάπτυξη, έννοιες ιδιαίτερα σημαντικές τη σημερινή εποχή. Παραπάνω αναφέρθηκαν μερικές περιπτώσεις όπου μπορεί η τρισδιάστατη εκτύπωση να συντελέσει στην κυκλική οικονομία, αλλά ο σκοπός της παραγράφου αυτής είναι να μελετήσει με περισσότερη λεπτομέρεια τις έννοιες αυτές.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση και ιδιαίτερα η μέθοδος FDM είναι μία σχετικά φιλική προς το περιβάλλον τεχνική η οποία έχει λίγα απόβλητα σε σχέση με άλλες τεχνικές [1] . Αρχικά, όπως προαναφέρθηκε το βασικότερο υλικό που βρίσκει εφαρμογή στην τεχνική αυτή είναι το PLA, ένα βιοδιασπώμενο πολυμερές που παράγεται από βιολογικές πρώτες ύλες όπως για παράδειγμα αγρονομικά απόβλητα. Πέρα από αυτό, μελετάται και η χρήση άλλων βιολογικών στη τρισδιάστατη εκτύπωση. Επίσης, πολλά άρθρα έχουν δώσει ιδιαίτερη βάση στη προσθήκη βιολογικών πρόσθετων σε πολυμερή για τρισδιάστατη εκτύπωση, τα οποία σε πολλές περιπτώσεις έχουν βελτιώσει και τις ιδιότητες του υλικού [1, 3, 5, 9, 23].

Ακόμη, υπάρχουν πολλά άρθρα που έχουν εξετάσει την χρήση ανακυκλωμένων πολυμερών από απόβλητα και πως μπορούν να ξαναγίνουν χρήσιμα τελικά προϊόντα με τη βοήθεια της τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς είναι εύκολη τεχνική που μπορεί να φτιάξει περίπλοκες γεωμετρίες από πρώτες ύλες χωρίς ιδιαίτερους περιορισμούς [2, 5, 4, 8]. Αυτό ιδιαίτερα είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς η χρήση

ανακυκλωμένων πολυμερών για την παραγωγή νέων προϊόντων, μειώνει σημαντικά το κόστος της διεργασίας και την επίδραση που έχει το υλικό στο περιβάλλον, βελτιώνοντας έτσι την βιωσιμότητα της διεργασίας και συντελώντας στην κυκλική οικονομία.

Τέλος, ορισμένα άρθρα έχουν γραφθεί με σκοπό να μελετήσουν κατά πόσο μπορεί η τρισδιάστατη εκτύπωση να παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση ενός μοντέλου κυκλικής οικονομίας [4, 8, 28].

Με βάση τις πληροφορίες αυτές, είναι εύκολο να συμπεράνει κανείς πως η τεχνική αυτή, μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαχείριση πλαστικών και αγρονομικών αποβλήτων και την ένταξη τους σε ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας που αποσκοπεί στην βιώσιμη ανάπτυξη. Η χρήση βιοπολυμερών, βιολογικών πρόσθετων από αγρονομικά απόβλητα και ανακυκλωμένων πλαστικών είναι όλα στοιχεία απαραίτητα για κάτι τέτοιο, τα οποία πληροί η τρισδιάστατη εκτύπωση. Επίσης, όπως φαίνεται και από άρθρα που έχουν αναλύσει διεξοδικά το θέμα αυτό, παρόλο που υπάρχουν ακόμη αντικείμενα που πρέπει να διερευνηθούν, η τεχνική αυτή προβλέπεται πως θα παίζει καθοριστικό ρόλο στην βιώσιμη ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια.

## 5 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία πολύ χρήσιμη μέθοδος μορφοποίησης πολυμερών. Παρόλο που έχει κάποια μειονεκτήματα και δεν είναι ιδανική για κάθε τομέα, σε πολλούς τομείς έχει αρχίσει να υιοθετείται σαν μέθοδος.

Βασικά παραδείγματα είναι η βιοιατρική, η αεροναυπηγική και η ηλεκτρονική. Στην βιοιατρική, μπορούν πολλά τεχνητά όργανα να φτιαχτούν με 3d printing καθώς είναι εφικτό να δημιουργηθούν ποικίλες γεωμετρίες [1, 7]. Βέβαια, απαιτείται πολύ προσοχή για αυτή την χρήση. Τεχνικές όπως η FDM για παράδειγμα έχουν ορισμένα ποιοτικά προβλήματα που δυσχεραίνουν την χρήση αυτή [10]. Στην ηλεκτρική, μπορούν πολλές ηλεκτρικές συσκευές, πχ ηλεκτρόδια, μπαταρίες ή πυκνωτές να φτιαχτούν από ηλεκτρικά αγωγίμα πολυμερή με 3d printing [1, 10].

Στην αεροναυπηγική, συνήθως χρησιμοποιούνται ελαφριά μέταλλα όπως το αλουμίνιο. Αυτό είναι επειδή γενικά χρειάζεται ένα ελαφρύ υλικό για να μπορεί να πετάξει εύκολα το αεροπλάνο, όμως πρέπει να έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και για αυτό χρησιμοποιούνται συχνά μέταλλα. Βέβαια, ορισμένα πολυμερή, με τα κατάλληλα σύνθετα μπορούν να έχουν πολύ καλές θερμομηχανικές ιδιότητες, παρόμοιες με αυτές του αλουμινίου με περίπου το μισό βάρος. Συγκεκριμένα, η τρισδιάστατη εκτύπωση, μπορεί να πετύχει εύκολα και περίπλοκες γεωμετρίες, άρα εξετάζεται η κατασκευή μέρων αεροπλάνων μέσω της μεθόδου αυτής [1, 7].

Εξετάζεται η χρήση του 3d printing και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Για παράδειγμα, όταν πρωτοεμφανίστηκε ο covid-19, οι μάσκες που φτιάχτηκαν ήταν σε μεγάλο βαθμό με 3d printing [10]. Επίσης, καθώς μπορούν να επιτευχθούν διάφορες γεωμετρίες και το PLA μπορεί επίσης να είναι σε διάφορα χρώματα, εξετάζεται η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία παιχνιδιών [2, 10]. Έχουν γίνει και δοκιμές να εφαρμοστεί η τρισδιάστατη εκτύπωση στη συσκευασία τροφίμων καθώς πολυμερή όπως το PLA μορφοποιούνται εύκολα με 3d printing [1]. Βέβαια, καθώς η αντικατάσταση των κλασικών πλαστικών είναι ήδη δύσκολη σε τέτοιες εφαρμογές και μας ενδιαφέρουν πολύ οι θερμομηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου υλικού, δεν προτιμάται το 3d printing το οποίο έχει δείχθει να έχει υποδιεστέρες ιδιότητες από υλικά που παράγονται από άλλες μεθόδους όπως το injection molding ή το extrusion [3, 26].

Ένας τελευταίος τομέας στον οποίο εξετάζεται η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης



είναι η διαχείριση των υδάτων. Μπορούν να συντεθούν πολυμερικές μεμβράνες με τρισδιάστατη εκτύπωση, οι οποίες να ελέγξουν την διάχυση του νερού και να ελαχιστοποιήσουν την απώλεια πίεσης που έχει αυτό κατά την ροή του, λύνοντας έτσι κάποια προβλήματα του τομέα [1] .

Βέβαια, γενικά κάθε τομέας που χρειάζεται πολυμερή σε πολύ συγκεκριμένες και εύκολα μεταβαλλόμενες γεωμετρίες μπορεί να εκμεταλλευτεί την τρισδιάστατη εκτύπωση, καθώς είναι η καλύτερη μέθοδος μορφοποίησης σε τέτοιες περιπτώσεις (το injection molding για παράδειγμα χρησιμοποιεί συγκεκριμένα καλούπια και δεν έχει τόσο ευελιξία).

Παρακάτω θα αναπτυχθεί περαιτέρω η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην παραγωγή πολυμερικών υλικών για ηλεκτρικές εφαρμογές

## 5.1 Ηλεκτρικές Εφαρμογές

Έχει παρατηρηθεί ότι η δημιουργία σύνθετων υλικών με πληρωτικά με βάση τον άνθρακα όπως νανοσωλήνες άνθρακα ή γραφένιο έχουν πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες. Όταν τέτοια νανοσωματίδια προστίθενται σε πολυμερικές μήτρες, αυτές οι ιδιαίτερες ιδιότητες ενισχύονται [29] . Η τρισδιάστατη εκτύπωση αγωγίμων υλικών έχει δείξει αρκετές ηλεκτρικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα διασυνδέσεις, ηλεκτροχημικά συστήματα, κεραίες [29] , ευέλικτες ηλεκτρονικές συσκευές και αποθήκευση ενέργειας [30] .

Παραδείγματα αγωγίμων πολυμερών που χρησιμοποιούνται στην τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελούν το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) με νανοπλακίδια γραφενίου (GNPs) και νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs) [29], PLA με μαύρο του άνθρακα [30] και πολυακρυλικό μείγμα ρητίνης με νανοΐνες πολυανιλίνης και γραφένιο [31] .

Όσον αφορά την αγωγιμότητα σε συνεχές ρεύμα, έχει παρατηρηθεί ότι το PLA εμπλουτισμένο με GNPs και MWCNTs παρουσιάζει αγωγιμότητα πέντε τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του καθαρού πολυγαλακτικού οξέος [29] . Εφόσον παρουσιάζει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και σε εναλλασσόμενο ρεύμα, αυτό το ηλεκτρικά αγωγίμο σύνθετο πολυμερές μπορεί να βρει ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές όπως ασπίδες, φίλτρα και υλικά απορρόφησης ραντάρ [29] . Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα σύνθετα PLA χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές εφαρμογές αισθητήρων. Για παράδειγμα, ενεργοποιητές PLA-MWCNT χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή σπироειδών, πολλαπλών λειτουργιών, υγρών τρισδιάστατων αισθητήρων. Μετά την τρισδιάστατη εκτύπωση, ο αισθητήρας είχε σχετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, καλή ευαισθησία και επιλεκτικότητα χάρη στην σπειροειδή ελικοειδή δομή του [32] .

Το μείγμα carbon black/PLA είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται αρκετά στην τρισδιάστατη εκτύπωση αγωγίμων πολυμερών. Σε μια έρευνα αυτό το σύνθετο πολυμερές εφαρμόστηκε στην κατασκευή ηλεκτροδίων. Η εσωτερική δομή και ο προσανατολισμός των μορίων CB/PLA καθορίζει την επιτυχία στον σχηματισμό αγωγίμων μονοπατιών. Επίσης παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του πάχους στρώματος, η αγωγιμότητα μειώνεται [33] . Τρισδιάστατα εκτυπωμένο PLA έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή κεραίων. Σε μια μελέτη, εκτυπώθηκαν τμήματα μιας κεραίας από αυτό το πολυμερές και καλύφθηκαν με μια στρώση αγωγίμης μπογιάς και πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η κεραία που κατασκευάστηκε είχε πολύ καλές επιδόσεις ζυγίζοντας μόνο το 20% μιας τυπικής μεταλλικής κεραίας [32] . Σύνθετες δομές PLA-ABS (acrylonitrile butadiene styrene) χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή μεταλλικών μικροκυμάτων. Τρισδιάστατα εκτυπωμένοι απορροφητές μικροκυμάτων μπορούν να παραχθούν προσθέτοντας άλατα LZFO στο PLA και σε μια παρόμοια μελέτη, πολυγαλακτικό οξύ με νανοπλακίδια γραφενίου αξιοποιήθηκε για την κατασκευή πλακιδίων που απορροφούν μικροκύματα.

Τρισδιάστατα εκτυπωμένο PLA με γραφένιο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή επίπεδων

ηλεκτροδίων και χαρακτηρίστηκαν ηλεκτροχημικά και φυσικοχημικά μέσα σε μπαταρίες λιθίου ως στερεοί υπερπυκνωτές. Η ίδια ομάδα κατασκεύασε ανόδους λιθίου για μπαταρίες λιθίου χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα εκτυπωμένο PLA και γραφένιο, με την περιεκτικότητα του γραφενίου να κυμαίνεται από 1-40% και η βέλτιστη ηλεκτρική αγωγιμότητα επιτεύχθηκε σε περιεκτικότητα 20% κατά βάρος [32] .

Η τρισδιάστατη εκτύπωση βρίσκει εφαρμογή και σε εύκαμπτα τρισδιάστατα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της υγείας του ατόμου. Για την παραγωγή εύκαπτων συσκευών, εκτυπώνονται ηλεκτρικά κυκλώματα απευθείας σε ένα εύκαμπτο υπόστρωμα. Παράδειγμα τέτοιων συσκευών είναι ένας αισθητήρας καρδιακών παλμών που κατασκευάζεται εκτυπώνοντας μελάνι χρυσών νανοσωματιδίων πάνω σε ένα υπόστρωμα πολυϊμιδίου [34] .

Τα έξυπνα υφάσματα επίσης αποκτούν όλο και περισσότερο προσοχή πρόσφατα για εύκαμπτα και φορετές ηλεκτρονικές συσκευές. Τα έξυπνα υφάσματα είναι έξυπνα φορητά υλικά που ενσωματώνουν ηλεκτρονικές συσκευές σε υφάσματα διατηρώντας την ευελιξία του υφάσματος. Λειτουργικά μελάνια μπορούν να εκτυπωθούν πάνω στις επιφάνειες των υφασμάτων με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η ιατρική είναι η προφανής εφαρμογή αυτών των υφασμάτων [34] .

Μαζί με τα ευέλικτα τρισδιάστατα εκτυπωμένα ηλεκτρονικά, μερικές τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπουν λειτουργικά μελάνια να εκτυπωθούν απευθείας σε σύμμορφες επιφάνειες για την κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών συσκευών σε τρισδιάστατες επιφάνειες. Άλλες τεχνικές εκτύπωσης τρισδιάστατων ηλεκτρονικών επιτρέπουν εκτύπωση σε πολλαπλές κλίμακες, υλικά και λειτουργίες. Μιλάμε για πολυδιάστατα και πολλαπλών υλικών ηλεκτρονικά (multilayered and multimaterial electronics, MLMM) [34] .

## 6 Βιβλιογραφία

### References

- [1] Radhika Mandala, Anjaneya Prasad Bannoth, Suresh Akella, Vijaya K. Rangari, and Deepa Kodali. A short review on fused deposition modeling 3D printing of bio-based polymer nanocomposites. 139(14):51904.
- [2] Aubrey L. Woern and Joshua M. Pearce. Distributed Manufacturing of Flexible Products: Technical Feasibility and Economic Viability. 5(4):71.
- [3] Q. Tarrés, J. K. Melbø, M. Delgado-Aguilar, F. X. Espinach, P. Mutjé, and G. Chinga-Carrasco. Bio-polyethylene reinforced with thermomechanical pulp fibers: Mechanical and micromechanical characterization and its application in 3D-printing by fused deposition modelling. 153:70–77.
- [4] Jukka Pakkanen, Diego Manfredi, Paolo Minetola, and Luca Iuliano. *About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing*.
- [5] Benjamin Maldonado-García, Akhilesh K. Pal, Manjusri Misra, Stefano Gregori, and Amar K. Mohanty. Sustainable 3D printed composites from recycled ocean plastics and pyrolyzed soy-hulls: Optimization of printing parameters, performance studies and prototypes development. 6:100197.

- [6] N. Whiteman, A. Auchter, A. Christie, and M. Prue. Rethinking the paper cup — beginning with extrusion process optimization for compostability and recyclability. 20(6):353–362.
- [7] A. El Moumen, M. Tarfaoui, and K. Lafdi. Additive manufacturing of polymer composites: Processing and modeling approaches. 171:166–182.
- [8] Fabio A. Cruz Sanchez, Hakim Boudaoud, Mauricio Camargo, and Joshua M. Pearce. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. 264:121602.
- [9] N. Vidakis, M. Petousis, E. Velidakis, M. Spiridaki, and J.D. Kechagias. Mechanical performance of fused filament fabricated and 3d-printed polycarbonate polymer and polycarbonate/ cellulose nanofiber nanocomposites. 9(11).
- [10] Fredrick Madaraka Mwema and Esther Titilayo Akinlabi. Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). pages 1–15.
- [11] Yang Guo, Huseini Patanwala, Brice Bognet, and Anson Ma. Inkjet and inkjet-based 3D printing: Connecting fluid properties and printing performance. 23.
- [12] S.C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mulhaupt. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing - PubMed.
- [13] A. Salim and S. Lim. Sensors | Free Full-Text | Review of Recent Inkjet-Printed Capacitive Tactile Sensors.
- [14] Michael Ogunsanya, Joan Isichei, Santosh Kumar Parupelli, Salil Desai, and Yi Cai. In-situ Droplet Monitoring of Inkjet 3D Printing Process using Image Analysis and Machine Learning Models. 53:427–434.
- [15] I.M. Hutchings and G.D. Martin. Inkjet Technology for Digital Fabrication | Wiley.
- [16] S. Kumar. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach | Springer-Link.
- [17] Nikolay K. Tolochko, Yurii V. Khlopkov, Sergei E. Mozzharov, Michail B. Ignatiev, Tahar Laoui, and Victor I. Titov. Absorptance of powder materials suitable for laser sintering. 6(3):155–161.
- [18] Setareh Zakeri, Minnamari Vippola, and Erkki Levanen. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography.
- [19] A Pilipovic, P Raos, and M. Sercer. (2) (PDF) Experimental testing of quality of polymer parts produced by laminated object manufacturing - LOM.
- [20] J Malda, J Visser, F. P. Melchels, T. Jungst, W. E. Hennink, W.J.A. Dhert, J. Groll, and D. W. Hutmacher. 25th anniversary article: Engineering hydrogels for biofabrication - PubMed.
- [21] Željka P. Kačarević, Patrick M. Rider, Said Alkildani, Sujith Retnasingh, Ralf Smeets, Ole Jung, Zrinka Ivanišević, and Mike Barbeck. An Introduction to 3D Bioprinting: Possibilities, Challenges and Future Aspects. 11(11):2199.

- [22] Makoto Nakamura, Akiko Kobayashi, Fumio Takagi, Akihiko Watanabe, Yuko Hiruma, Katsuhiro Ohuchi, Yasuhiko Iwasaki, Mikio Horie, Ikuo Morita, and Setsuo Takatani. Biocompatible inkjet printing technique for designed seeding of individual living cells. 11(11-12):1658–1666, 2005 Nov-Dec.
- [23] Valentina Mazzanti, Lorenzo Malagutti, and Francesco Mollica. FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. 11(7):1094.
- [24] J.M. Jafferson and D. Chatterjee. A review on polymeric materials in additive manufacturing. volume 46, pages 1349–1365.
- [25] P. Awasthi and S.S. Banerjee. Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities. 46.
- [26] Maria Rossella Nobile, Pierfrancesco Cerruti, Mario Malinconico, and Roberto Pantani. Processing and properties of biodegradable compounds based on aliphatic polyesters. 132(48).
- [27] M. Barletta and M. Puopolo. Thermo-Mechanical Properties of Injection Molded Components Manufactured by Engineered Biodegradable Blends. 27(10):2105–2118.
- [28] Menberu Zeleke Shiferaw and Hailu Shimels Gebremedhen. Recycled Polymer for FDM 3D Printing Filament Material: Circular Economy for Sustainability of Additive Manufacturing. In Mulatu Liyew Berihun, editor, *Advances of Science and Technology*, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, pages 243–261. Springer International Publishing.
- [29] Giovanni Spinelli, Patrizia Lamberti, Vincenzo Tucci, Radost Ivanova, Sonia Tabakova, Evgeni Ivanov, Rumiana Kotsilkova, Sossio Cimmino, Rosa Di Maio, and Clara Silvestre. Rheological and electrical behaviour of nanocarbon/poly(lactic) acid for 3D printing applications. 167:467–476.
- [30] I. Tirado-Garcia, D. Garcia-Gonzalez, S. Garzon-Hernandez, A. Rusinek, G. Robles, J. M. Martinez-Tarifa, and A. Arias. Conductive 3D printed PLA composites: On the interplay of mechanical, electrical and thermal behaviours. 265:113744.
- [31] Hoseong Han and Sunghun Cho. Fabrication of Conducting Polyacrylate Resin Solution with Polyaniline Nanofiber and Graphene for Conductive 3D Printing Application. 10(9):1003.
- [32] Eda Hazal Tümer and Husnu Yildirim Erbil. Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review. 11(4):390.
- [33] A. Abdalla, H. H. Hamzah, O. Keattch, D. Covill, and B. A. Patel. Augmentation of conductive pathways in carbon black/PLA 3D-printed electrodes achieved through varying printing parameters. 354:136618.
- [34] Hong Wei Tan, Yu Ying Clarrisa Choong, Che Nan Kuo, Hong Yee Low, and Chee Kai Chua. 3D printed electronics: Processes, materials and future trends. 127:100945.

## 7 Appendix - Άρθρα από το Scopus

Καθώς είναι ζητούμενο της εργασίας, αναφέρονται εδώ κάποιες από τις πηγές που βρέθηκαν από την βάση δεδομένων Scopus

[24] - [https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85112457854&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=3d+printing%2cpolycarbonates+review&sid=7694b6605b0a&sot=b&sdt=b&sl=49&s=TITLE-ABS-KEY%283d+printing%2c+polycarbonates+review%29&relpos=4&citeCnt=4&searchTerm=&featureToggles=FEATURE\\_NEW\\_DOC\\_DETAILS\\_EXPORT:1](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85112457854&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=3d+printing%2cpolycarbonates+review&sid=7694b6605b0a&sot=b&sdt=b&sl=49&s=TITLE-ABS-KEY%283d+printing%2c+polycarbonates+review%29&relpos=4&citeCnt=4&searchTerm=&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1)

[25] - [https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85110435754&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=elastomers+fdm&sid=c53fc15341c5494c737dd3760c3c8f4e&sot=b&sdt=b&sl=29&s=TITLE-ABS-KEY%28elastomers+fdm%29&relpos=7&citeCnt=5&searchTerm=&featureToggles=FEATURE\\_NEW\\_DOC\\_DETAILS\\_EXPORT:1](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85110435754&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=elastomers+fdm&sid=c53fc15341c5494c737dd3760c3c8f4e&sot=b&sdt=b&sl=29&s=TITLE-ABS-KEY%28elastomers+fdm%29&relpos=7&citeCnt=5&searchTerm=&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1)

[9] - [https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119878030&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=3d+printing%2cpolycarbonates&sid=076d3df80afa64aa86d&sot=b&sdt=b&sl=42&s=TITLE-ABS-KEY%283d+printing%2c+polycarbonates%29&relpos=17&citeCnt=4&searchTerm=&featureToggles=FEATURE\\_NEW\\_DOC\\_DETAILS\\_EXPORT:1](https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85119878030&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=3d+printing%2cpolycarbonates&sid=076d3df80afa64aa86d&sot=b&sdt=b&sl=42&s=TITLE-ABS-KEY%283d+printing%2c+polycarbonates%29&relpos=17&citeCnt=4&searchTerm=&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1)