

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

# *Αξιοποίηση Σύνθετων Υλικών στην Προσθετική Κατασκευή*

ΟΝΟΜΑ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ: *Λυδία Αφροδίτη Ειρήνη*

Ιδιότητα Συγγραφέα: *Φοιτήτρια Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών*

ΟΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ

*Ιωάννης Ντιντάκης (PhD, Msc, BEng)*

*Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών*

## Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων .....	4
Abstract .....	6
Πρόλογος.....	7
Εισαγωγή.....	8
Ιστορική αναδρομή .....	10
Κεφάλαιο 1.....	12
1 Δυνατότητες χρήσης υλικών από 3d εκτυπωτές.....	12
1.1 Εφαρμογές και κατηγορίες υλικών .....	12
1.1.1 Fused Deposition Modeling (FDM).....	14
1.1.2 Powder Bed Fusion (PBF).....	17
1.1.4 Stereolithography (SLA) .....	19
1.1.5 Selective Laser Sintering (SLS).....	20
1.1.6 Binder Jetting (BJ) .....	21
1.1.7 Directed Energy Deposition (DED) .....	22
1.1.8 Laminated Object Manufacturing (LOM) και Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) .....	23
Κεφάλαιο 2.....	25
2 Βιοεκτύπωση .....	25
2.1 Στερεά μελάνια με βάση τα πολυμερή .....	26
2.2 Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS).....	28
2.3 Πολυγαλακτικό οξύ (PLA).....	28
2.4 Πολυκαπρολακτόνη (PCL).....	29
2.5 Πολυανθρακικό (PC).....	29
2.6 Πολυμερή υψηλής απόδοσης (PEEK, PEKK, ULTEM) .....	30
2.7 Πολυπροπυλένιο (PP).....	30
2.8 Πολυαμίδια .....	31
2.9 Θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU) .....	31
2.10 Πολυμερικά μελάνια με βάση την υδρογέλη.....	31
2.11 Υλικά με βάση τα κεραμικά .....	36
2.12 Εύκαμπτα ρομπότ και προσθετική κατασκευή .....	36
Κεφάλαιο 3.....	39
3 Νανοσύνθετα υλικά στην προσθετική κατασκευή.....	39
3.1 Βελτιώσεις στις μηχανικές ιδιότητες .....	40
3.1.2 Βελτιώσεις στις οπτικές ιδιότητες.....	42
3.1.3 Βελτιώσεις στις βιολογικές ιδιότητες.....	43
3.1.4 Νέες μέθοδοι για προσθετική κατασκευή με νανοσύνθετα υλικά .....	44
3.2 Νανοϋλικά στην κατασκευή αισθητήρων και οι εφαρμογές τους στο IoT: Πλεονεκτήματα και προκλήσεις. ....	45

3.3	Νανοϋλικά στη σύγχρονη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης .....	48
3.4	Μεταλλικά νανοσωματίδια στην προσθετική κατασκευή .....	48
3.5	Micro Stereolithography υψηλής ανάλυσης.....	49
3.5.1	Τρισδιάστατη μικροκατασκευή .....	50
	Κεφάλαιο 4.....	52
	4. Μελέτες περίπτωσης από σύγχρονες εφαρμογές στο χώρο της μηχανικής.....	52
4.1	Θεωρία συστήματος.....	53
4.1.1	Μια προοπτική συστημάτων παραγωγής για την προσθετική κατασκευή.....	54
4.1.2	Συλλογή δεδομένων .....	56
4.1.3	Ανάλυση δεδομένων .....	58
4.1.4	Αποτελέσματα.....	58
	Κεφάλαιο 5.....	59
5	Σύνθετα υλικά στην προσθετική κατασκευή.....	59
5.1	Βιομηχανική ζήτηση για σύνθετα υλικά .....	59
5.2	Ανθρακονήματα-πολυμερή .....	60
5.3	Πολυκατευθυντικά προμορφώματα για την παραγωγή σύνθετων υλικών .....	61
5.3.1	Προμορφώματα πολλαπλών κατευθύνσεων και συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων .....	62
5.4	Εκτύπωση πολυλειτουργικών νανوسύνθετων υλικών.....	64
5.5	Προσθετική κατασκευή σύνθετων υλικών πολυμερών-ινών .....	65
5.6	3D εκτύπωση σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στην Fused Deposition Modeling (FDM) ...	66
	Κεφάλαιο 6.....	68
	<b>6 Σύγχρονα αυξητικά υλικά</b> .....	68
6.1	Η εξέλιξη των αυξητικών υλικών μέσω μελέτης της μικροδομής της κηρήθρας.....	69
6.2	Προσθετική κατασκευή για τη δημιουργία αυξητικών μεταλλικών διπλού υλικού .....	70
6.3	Ανάπτυξη δομής αρνητικού λόγου Poisson από TiNi μέσω Selective Laser Melting.....	71
6.4	Υλικά/Κατασκευές με Αυξητικούς Πυρήνες: Εφαρμογές και Πλεονεκτήματα .....	73
	Κεφάλαιο 7.....	75
	<b>7 Το μέλλον της προσθετικής κατασκευής στη μηχανική</b> .....	75
7.1	Βασικές αρχές παραγωγής στην προσθετική κατασκευή.....	76
7.1.1	Ψηφιακή ροή εργασιών για την προσθετική παραγωγή .....	77
7.2	Σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή: τάσεις, ευκαιρίες, εκτιμήσεις και περιορισμοί.....	78
	Βιβλιογραφία/Αναφορές .....	80

## Πίνακας συντομεύσεων-ακρωνυμίων

AM	Additive Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
SLS	Selective Laser Sintering
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASTM	American Society for Testing and Materials
FDM	Fused Deposition Modeling
PLA	Polylactic Acid
PEEK	Polyetheretherketone
CFRP	Carbon Fiber-Reinforced Plastic
PBF	Powder Bed Fusion
LOM	Laminated Object Manufacturing
DED	Directed Energy Deposition
SLM	Selective Laser Melting
EBM	Electron Beam Melting
CAD	Computer-Aided Design
SFF	Solid Freeform Fabrication
STL	Standard Triangle Language
UV	Ultraviolet
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
BJ	Binder Jetting
MIT	Massachusetts Institute of Technology
2D	Two-Dimensional
3D	Three-Dimensional
DED	Directed Energy Deposition
PBF	Powder Bed Fusion
BPA	Bisphenol A
PC	Polycarbonate

PCL	Polycaprolactone
DIW	Direct-Ink-Writing
DED	Directed Energy Deposition
PBF	Powder Bed Fusion
PEKK	Polyetherketoneketone
ULTEM	Polyetherimide
PP	Polypropylene
TPU	Thermoplastic Polyurethane
ECM	Extracellular Matrix
CNT	Carbon Nanotubes
CFRP	Chopped Carbon Fiber
FFF	Fused Filament Fabrication
IoT	The Internet of Things
MEMS	Microelectromechanical Systems
P $\mu$ SL	Projection Micro-Stereolithography
PMC	Polymer Matrix Composites
MMC	Metal Matrix Composites
SFRPs	Secreted Frizzled-Related proteins
SMA	Shape Memory Alloy
NPR	Negative Poisson Ratio
SME	Shape Memory Effect
CT	Computed Tomography
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing

## Abstract

The thesis begins with an overview of abbreviations and acronyms related to the topic, followed by a prologue and introduction. The historical background of additive manufacturing is provided, tracing its evolution over time. The first chapter discusses the various possibilities of using materials from 3D printers, including applications and material categories. Specific techniques such as Fused Deposition Modeling (FDM), Powder Bed Fusion (PBF), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), and more are explored. Chapter 2 delves into the field of bioprinting, examining solid inks based on polymers and various materials used in the process. Materials such as Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polylactic Acid (PLA), Polycaprolactone (PCL), and others are discussed. The thesis also investigates the use of nanocomposite materials in additive manufacturing in Chapter 3, highlighting their enhancements in mechanical, optical, and biological properties. The chapter further explores the application of nanocomposites in sensors, the healthcare industry, and the use of metal nanoparticles in additive manufacturing. Chapter 4 presents case studies from contemporary engineering applications, showcasing the practical implementation of additive manufacturing. It discusses the system theory, data collection, analysis, and results obtained from these case studies. Chapter 5 focuses on composite materials in additive manufacturing, discussing the industrial demand for composites, carbon-based polymers, and the production of multifunctional nanocomposite materials. Chapter 6 explores modern additive materials, including a study on microstructure examination of dental ceramics, the development of dual-material additive structures, and the selective laser melting of TiNi with negative Poisson's ratio structure. Finally, Chapter 7 provides insights into the future of additive manufacturing in engineering, emphasizing the fundamental principles and digital workflow. It also discusses design considerations, trends, opportunities, and limitations in additive manufacturing. Overall, this thesis provides a comprehensive analysis of additive manufacturing in engineering, encompassing material categories, bioprinting, nanocomposites, composite materials, modern additive materials, and future perspectives. It highlights the transformative potential of additive manufacturing for the engineering industry.

## Πρόλογος

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων από ψηφιακά αρχεία. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη χρήση ειδικών εκτυπωτών, που μπορούν να κατασκευάσουν τα αντικείμενα από διαδοχικά στρώματα υλικού, χρησιμοποιώντας σκλήρυνση, εναπόθεση ή ενοποίηση υλικών. Αρχικά, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιούνταν κυρίως για την παραγωγή μοντέλων και πρωτοτύπων, καθώς αποτελούσε μια γρήγορη και φθηνή μέθοδο παραγωγής προϊόντων. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί πολύ και χρησιμοποιείται πλέον και για την παραγωγή ανταλλακτικών για διάφορα είδη μηχανών και συστημάτων. Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων γεωμετρικών σχημάτων και εξαρτημάτων, επιτρέποντας την παραγωγή προσαρμοσμένων λύσεων για τις απαιτήσεις που υπάρχουν.

Η ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980, ως μια τεχνολογία παραγωγής μοντέλων και πρωτοτύπων με χρήση των τεχνολογιών της προσθετικής κατασκευής και της υπολογιστικής τεχνολογίας. Η προσθετική κατασκευή είναι μια τεχνολογία που έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται πρωτότυπα και προϊόντα στον βιομηχανικό τομέα. Αυτές οι τεχνολογίες κατέστησαν δυνατόν να παραχθούν πρωτότυπα και προϊόντα με μεγαλύτερη ακρίβεια, ταχύτητα και οικονομία σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής.

Στην προσθετική κατασκευή μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, όπως πολυμερή πλαστικά, μέταλλα, κεραμικά, βιοσυμβατικά υλικά και σύνθετα υλικά. Αυτά τα υλικά καλύπτουν μια ευρεία γκάμα απαιτήσεων και εφαρμογών στην προσθετική κατασκευή, ανάλογα με τις ανάγκες του έργου. Οι επιλογές υλικού συνδέονται συχνά με τις ειδικές ιδιότητες που καλύπτουν τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος, όπως μηχανική αντοχή, αντοχή σε θερμοκρασία, βιοσυμβατότητα, αγωγιμότητα και άλλα. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού είναι κρίσιμη για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων στην προσθετική κατασκευή. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες που υπάρχουν, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Για τον λόγο αυτό πολύ πιθανόν στα επόμενα χρόνια η παγκόσμια παραγωγή αγαθών να στραφεί προς αυτή την κατεύθυνση, αντικαθιστώντας σταδιακά τις παραδοσιακές τεχνικές. Δεν είναι λίγοι αυτοί που πιστεύουν ότι η προσθετική κατασκευή θα αποτελέσει μία νέα βιομηχανική επανάσταση, καθώς θα ανοίξει τον δρόμο για την τοπική παραγωγή μικρής κλίμακας, προσαρμοσμένη στις ανάγκες του ανθρώπου σήμερα.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, παρουσιάζονται οι δυνατότητες και οι εξελίξεις στο χώρο της προσθετικής κατασκευής, με έμφαση στα υλικά από 3D εκτυπωτές και στα εύκαμπτα ρομπότ, καθώς και στις βελτιώσεις στις μηχανικές, οπτικές και βιολογικές ιδιότητες των νανοσύνθετων υλικών. Μέσα από μια μελέτη περίπτωσης στον τομέα της μηχανικής, αναλύονται οι δυνατότητες και οι προοπτικές αυτών των τεχνολογιών και παρουσιάζεται ποιο είναι το μέλλον της προσθετικής κατασκευής στη μηχανική.[10]

## Εισαγωγή

Η προσθετική κατασκευή αποτελεί μία καινοτόμο τεχνολογία που έχει ευρεία εφαρμογή σε ποικίλους τομείς της βιομηχανίας και της τεχνολογίας. Η συνεχής εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας έχει επιτρέψει την ανάπτυξη διάφορων ειδών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσθετική κατασκευή, εξασφαλίζοντας έτσι ευελιξία και αξιοπιστία στην κατασκευή αντικειμένων. Στον τομέα της ιατρικής, η προσθετική κατασκευή έχει ανοίξει νέους ορίζοντες για την παραγωγή προσαρμοσμένων εμφυτευμάτων, προσθετικών οργάνων και βοηθητικών συσκευών. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ακριβών μοντέλων και προσαρμοσμένων εξαρτημάτων, προσφέροντας έτσι ακρίβεια και εξατομίκευση στην ιατρική πρακτική. Επιπλέον, η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και την εξοικονόμηση πόρων, καθώς με την παραγωγή αντικειμένων ακριβώς όπως αυτά χρειάζονται, δεν απαιτούνται άσκοπες ποσότητες υλικών ή άλλων πόρων.

Η προσθετική κατασκευή έχει ήδη αρχίσει να αλλάζει τον τρόπο παραγωγής και διανομής αγαθών. Η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων στον τόπο χρήσης τους μπορεί να μειώσει το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να επιτρέψει στους καταναλωτές να προσαρμόζουν και να εξατομικεύουν τα προϊόντα τους. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να επηρεάσει επίσης τη βιομηχανία των κτιρίων, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή προτύπων ή προσαρμοσμένων κομματιών. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιοϊατρική και τη φαρμακευτική βιομηχανία, όπου μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία προσαρμοσμένων ιατρικών συσκευών και φαρμάκων.

Η προσθετική κατασκευή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους κατασκευής. Μερικά από αυτά αναλύονται παρακάτω:

1. Ακρίβεια: Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να δημιουργήσουν αντικείμενα με υψηλή ακρίβεια και λεπτομέρεια. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή πρωτοτύπων και μοντέλων με ακρίβεια και μεγάλη ανταπόκριση στις απαιτήσεις σχεδιαστών και μηχανικών.
2. Ταχύτητα: Η προσθετική κατασκευή μπορεί να είναι ταχύτερη σε σχέση με άλλες μεθόδους κατασκευής. Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη παραγωγή πρωτοτύπων και μοντέλων, μειώνοντας τον χρόνο παραγωγής και επιτρέποντας την ταχύτερη ανάπτυξη νέων προϊόντων.
3. Δυνατότητα προσαρμογής: Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές επιτρέπουν την ευκολότερη προσαρμογή των σχεδίων και των μοντέλων. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή προσαρμοσμένων και προσωποποιημένων αντικειμένων που ανταποκρίνονται στις ατομικές ανάγκες και απαιτήσεις που υπάρχουν.
4. Αειφορία: Η προσθετική κατασκευή συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και την εξοικονόμηση πόρων. Καθώς οι αντικείμενα παράγονται με τη χρήση ακριβώς των απαιτούμενων υλικών, δεν υπάρχει ανάγκη για την απόρριψη άσκοπων ποσοτήτων υλικών ή την υπερβολική χρήση πόρων. Αυτό οδηγεί σε μειωμένο αντίκτυπο στο περιβάλλον και προάγει την αειφόρο παραγωγή.



Συνολικά, η προσθετική κατασκευή αποτελεί μια επαναστατική τεχνολογία που επιτρέπει τη δημιουργία αντικειμένων με ακρίβεια, ταχύτητα και ευελιξία. Με τη δυνατότητα προσαρμογής στις ατομικές ανάγκες και την αειφορία που προσφέρει, αναμφίβολα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τη μελλοντική εξέλιξη και καινοτομία σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και της τεχνολογίας.

Ενώ η προσθετική κατασκευή αντιπροσωπεύει μια σύγχρονη και εξελιγμένη τεχνολογία, είναι σημαντικό να αναλογιστούμε και την ιστορική αναδρομή που την προηγείται. Οι πρώτες αναφορές στην προσθετική κατασκευή χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1980, όταν η τεχνολογία αυτή άρχισε να αναπτύσσεται. Αρχικά, οι εκτυπωτές 3D χρησιμοποιούνταν κυρίως για την παραγωγή πρωτοτύπων στον βιομηχανικό τομέα. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί ταχύτατα και έχει επεκταθεί σε πολλούς άλλους τομείς, ενσωματώνοντας καινοτόμες δυνατότητες και εφαρμογές. Με αυτόν τον τρόπο, η προσθετική κατασκευή έχει επαναπροσδιορίσει την τεχνολογική πρόοδο και συνεχίζει να ανοίγει νέους ορίζοντες για την κατασκευαστική βιομηχανία και όχι μόνο.

## Ιστορική αναδρομή

Η προσθετική κατασκευή είναι μια τεχνολογία που καθιστά δυνατή την δημιουργία ενός η παραπάνω αντικειμένων με την μέθοδο της πρόσθεσης πολλαπλών και επάλληλων στρώσεων υλικών. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους κατασκευής η τεχνική της προσθετικής κατασκευής εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η ακρίβεια, η ταχύτητα, η δυνατότητα προσαρμογής και το ευρύ φάσμα υλικών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός αντικειμένου. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων από σχεδιαστές, μηχανικούς και ομάδες ανάπτυξης νέων προϊόντων με τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες.

Το 1982, ο Chuck Hull άνοιξε τον δρόμο για μια επανάσταση στον χώρο της κατασκευής με την εφεύρεση της προσθετικής κατασκευής. Η ιδέα που είχε ήταν εκπληκτικά απλή και ταυτόχρονα καινοτόμα: αν μπορούσε να τοποθετήσει στρώματα πλαστικού το ένα πάνω από το άλλο και να χαράξει το σχήμα τους με τη χρήση του φωτός, τότε θα μπορούσε να δημιουργήσει τρισδιάστατα αντικείμενα. Μετά από περίπου έναν χρόνο πειραματισμού, ο Hull κατάφερε να αναπτύξει ένα σύστημα που θα άλλαζε για πάντα τον τρόπο κατασκευής αντικειμένων. Η καινοτόμα αυτή μέθοδος λειτουργεί με τη χρήση μιας ακτίνας υπεριώδους φωτός, η οποία καθοδηγείται από έναν υπολογιστή και κατευθύνεται προς έναν κάδο γεμάτο υγρό φωτοπολυμερές. Όταν η ακτίνα υπεριώδους φωτός αλληλεπιδρά με το υγρό, αυτό μετατρέπεται σε σταθερή μορφή, δημιουργώντας έναν τύπο πλαστικού.

Ο Hull συνειδητοποίησε ότι το εύρημά του δεν περιοριζόταν σε υγρά στοιχεία και ως εκ τούτου η ευρεσιτεχνία του ονομάστηκε στερεολιθογραφία ή προσθετική κατασκευή, καθώς κάλυπτε κάθε υλικό ικανό προς στερεοποίηση ή ικανό να μεταβάλει τη φυσική του κατάσταση. Έπειτα κατέθεσε την αίτησή του για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στις 8 Αυγούστου 1984 για την "Συσκευή παραγωγής τρισδιάστατων αντικειμένων με στερεολιθογραφία". Αυτή ήταν η αρχή για το ξεκίνημα πολλών άλλων μεθόδων προσθετικής κατασκευής. Αμέσως μετά, το 1987 στο Πανεπιστήμιο του Texas, ο Carl Deckard αναπτύσσει και τελειοποιεί την μέθοδο Selective Laser Sintering, η οποία διατέθηκε στην αγορά από την εταιρία DTM Corporation το 1992.

Αργότερα ιδρύθηκε η Stratasys, το 1989 από τον S. Scott Crump και τη σύζυγό του Lisa Crump στο Eden Prairie της Μινεσότα. Τα συστήματα της Stratasys χρησιμοποιήθηκαν για να μοντελοποιήσουν πολύπλοκες γεωμετρίες σε ένα ευρύ φάσμα θερμοπλαστικών υλικών, όπως ABS (Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιου στυρόλιο), πολυφαινολοσουλφόνη, πολυανθρακικό το πολυαιθεριμίδιο και το νάιλον.

Η Stratasys απέσπασε αμέσως το ενδιαφέρον με την παρουσίαση ενός 3D εκτυπωτή που ξεχώριζε για το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής του. Με μόλις 130.000 δολάρια, η εταιρεία προσέφερε μια προσιτή λύση

για την προηγμένη τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής. Όμως η εταιρεία δεν βρήκε αγοραστές για αυτό το πρώιμο προϊόν και προσπάθησε να αναπτύξει μεγαλύτερες μηχανές ταχείας προτυποποίησης κατάλληλες για την αγορά, πουλώντας σε μεγάλους εταιρικούς πελάτες όπως η General Motors, η 3M και η Pratt & Whitney που μπορούσαν να αντέξουν οικονομικά μια μεγάλη υψηλή τιμή. Για να κατασκευάσει πέντε από αυτά τα μηχανήματα, περίπου στο μέγεθος ενός ψυγείου, ο Crump συγκέντρωσε 264.000 δολάρια ρευστοποιώντας περιουσιακά στοιχεία και πούλησε το 35% των μετοχών της Stratasys με αντάλλαγμα 1,2 εκατομμύρια δολάρια σε επιχειρηματικό κεφάλαιο. Τον Απρίλιο του 1992 η Stratasys πούλησε το πρώτο της προϊόν, το 3D Modeler.

Τον Νοέμβριο του 1997 η Stratasys έλαβε έγκριση από τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων για το σύστημα MedModeler, το οποίο εξυπηρετούσε την ιατρική αγορά παράγοντας ανατομικά μέρη από μαγνητικές τομογραφίες και αξονικές τομογραφίες. Τον Ιανουάριο του 1998 η Stratasys παρουσίασε το επόμενο προϊόν της, το FDM Quantum, το οποίο θα μπορούσε να δικτυωθεί και να χρησιμοποιηθεί από έναν αριθμό χρηστών και να λειτουργήσει χωρίς καμία επίβλεψη. Διέθετε επίσης ένα νέο σύστημα κίνησης, το MagnaDrive, το οποίο κινούσε την άκρη εξώθησης σε ένα μαξιλάρι αέρα και το έλεγχε με μια ηλεκτρομαγνητική συσκευή υποδοχής. Όχι μόνο το σύστημα ήταν πιο ακριβές, αλλά περιλάμβανε λιγότερα κινούμενα μέρη και απαιτούσε λιγότερη συντήρηση.

Το 2000 η Stratasys παρουσίασε το Prodigy, ένα μηχάνημα υψηλής τεχνολογίας. Με την δυνατότητα κατασκευής πρωτότυπων μεγέθους 20x20x30 εκατοστών, το Prodigy πρόσφερε τρία διαφορετικά πάχη στρώσης. Έπειτα στα τέλη του 2000 η κυκλοφόρησε το FDM Maxum, το οποίο ήταν 50 τοις εκατό ταχύτερο από τα προηγούμενα προϊόντα της εταιρείας. Με ένα νέο λογισμικό προεπεξεργασίας, το Insight, κατάφερε να εξοικονομήσει χρόνο καθώς και υλικό για να κατασκευάσει περισσότερα από ένα μοντέλο ταυτόχρονα. Παρείχε επίσης ενημερώσεις κατάστασης σχετικά με τον χρόνο που πέρασε, τον χρόνο που απομένει και την ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Οι χρήστες μπορούσαν να ειδοποιηθούν μέσω email όταν μια εργασία διακόπηκε ή ολοκληρώθηκε.

Το 2000 ήταν ένας χρόνος ανάπτυξης καινούριων τεχνολογιών. Η Geometries of Israel ανακοίνωσε τον Quadra, έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή inkjet ο οποίος προκαλούσε την σκλήρυνση του πολυμερούς χρησιμοποιώντας 1.536 ακροφύσια με υπεριώδη ακτινοβολία. [10] [11] [12] [13] [14] [15]

# Κεφάλαιο 1

## 1 Δυνατότητες χρήσης υλικών από 3d εκτυπωτές

Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει στους κατασκευαστές να προσδιορίσουν οποιοδήποτε σχήμα, υφή και αντοχή για την κατασκευή ενός προϊόντος. Μεγάλο πλεονέκτημα στην προσθετική κατασκευή είναι η επίτευξη παραγωγής ενός προϊόντος με πολύ λιγότερα βήματα από αυτά που απαιτούνται συνήθως με τα παραδοσιακά μέσα παραγωγής. Επιπλέον η επιλογή οποιουδήποτε τύπου υλικού καθιστά την προσθετική κατασκευή ως ένα από τα πιο εύκολα μέσα παραγωγής τη σήμερον ημέρα. Σήμερα, η τεχνολογία προσθετικής κατασκευής προσφέρει ευρύ φάσμα εφαρμογών και σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς όπως η αεροδιαστημική, η ιατρική επιστήμη, η ηλεκτρονική, η πολιτική μηχανική, η αυτοκινητοβιομηχανία, κ.λπ. Καθώς σημειώνεται πρόοδος στον τομέα της προσθετικής κατασκευής, αναπτύχθηκαν διάφορα υλικά που για την προσθετική κατασκευή, υλικά όπως μέταλλα, πολυμερή, σύνθετα υλικά, κεραμικά, ξύλο, σκόνη, γυαλί και δομικά υλικά, βιοδιασπώμενα υλικά, έξυπνα υλικά. Αυτά τα υλικά εκτυπώνονται εύκολα με τη βοήθεια τρισδιάστατων εκτυπωτών και η κάθε μέθοδος έχει σχεδιαστεί για ένα συγκεκριμένο σκοπό, για την εκτύπωση συγκεκριμένου υλικού.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής, όπως Fused Deposition Modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Micro-stereolithography, Direct Sintering Metal Laser (DSML), PolyJet, Selective Laser Sintering (SLS), Laminated Object Manufacturing (LOM), Powder Bed fusion (LOM) και Inkjet printing όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά. Οι εξελίξεις σε αυτήν την τεχνολογία συμβάλλουν στη μείωση του κόστους καθώς οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές καθιστούν μια προσιτή τεχνολογία που μπορεί να εκτυπώσει ακόμη και προσαρμοσμένα προϊόντα καλύπτοντας όλες τις ανάγκες του κατασκευαστή. [1], [17]

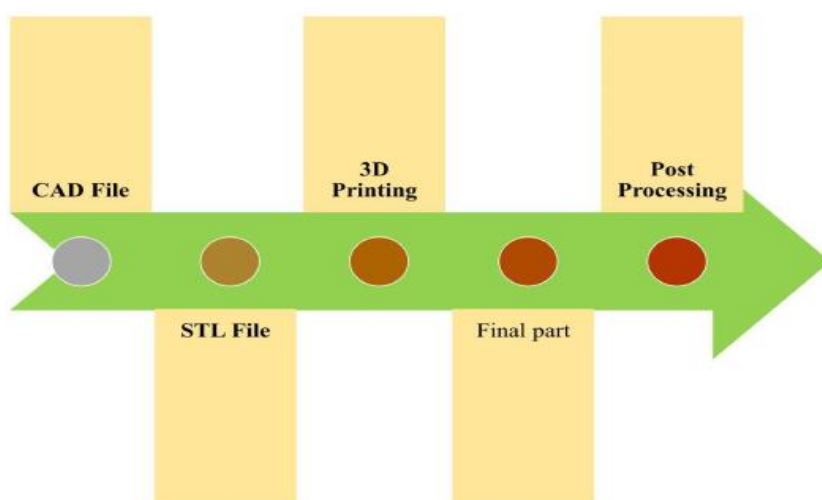
### 1.1 Εφαρμογές και κατηγορίες υλικών

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής προοδεύει μέρα με τη μέρα, καθώς βελτιώνεται η ακρίβεια και η ευελιξία της λόγω της προόδου που έχει σημειωθεί στα υλικά που χρησιμοποιούνται. Πλέον υπάρχουν διάφορα υλικά που διατίθενται στην αγορά, καθώς για κάθε τύπο υλικού χρειάζεται μια ξεχωριστή μέθοδος κατασκευής για να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο.

Η προσθετική κατασκευή, σε αντίθεση με άλλες διαδικασίες παραγωγής, έχει αναδειχθεί ως η πιο βιώσιμη τεχνολογία για την παραγωγή εξαρτημάτων στην μηχανική. Με την προσθετική κατασκευή γίνεται λιγότερη σπατάλη υλικού, υπάρχει ευκολία στην κατασκευή, και υπάρχει λιγότερη ανθρώπινη συμμετοχή με πολύ λιγότερη μεταποίηση, καθώς η ενεργειακή απόδοση καθιστά τη διαδικασία βιώσιμη για βιομηχανική χρήση.

Το πρώτο βασικό ερώτημα που θα σκεφτόταν κανείς σχετικά με τον τομέα της κατασκευής είναι πώς φτιάχνονται και πώς μετατρέπονται τα υλικά σε αντικείμενα που χρησιμοποιούνται ή καταναλώνονται με οποιονδήποτε τρόπο. Ένας από τους πρώτους και παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής είναι η αφαιρετική κατασκευή, όπου αφαιρείται υλικό από μια αρχική μάζα για να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν. Ένα παράδειγμα αυτής της μεθόδου είναι το τρνίρισμα, όπου ένα εργαλείο που περιστρέφεται αφαιρεί στρώματα υλικού από μια πρώτη ύλη, ώστε να δημιουργηθεί το επιθυμητό αντικείμενο. Αυτή η διαδικασία είναι κοινή στη μεταλλουργία και την ξυλουργία, και χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή προϊόντων με συγκεκριμένο σχήμα και διαστάσεις. Ωστόσο, η αφαιρετική κατασκευή έχει τον περιορισμό ότι υπάρχει σπατάλη υλικού κατά τη διαδικασία, ενώ είναι περίπλοκη και χρονοβόρα. Ο επόμενος τρόπος κατασκευής ονομάζεται μορφοποίηση, κατά τον οποίο ένα κομμάτι υλικού υφίσταται αλλαγές στις διαστάσεις του όταν εφαρμόζεται δύναμη σε αυτό. Ο τρίτος τύπος τεχνολογίας κατασκευής αντικειμένων είναι η χύτευση - όπου το υλικό σε στερεή μορφή τήκεται σε υγρή μορφή, και στη συνέχεια το υγρό μέταλλο χύνεται σε ένα συγκεκριμένο καλούπι για να παραχθεί το αντικείμενο. Ο τέταρτος τρόπος κατασκευής είναι η προσθετική κατασκευή όπου τα εξαρτήματα αναπτύσσονται προσθετικά στρώμα προς στρώμα. Η προσθετική κατασκευή καλύπτει ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών για τη δημιουργία τρισδιάστατων πρωτοτύπων και δομών από ψηφιακά αρχεία.

Για την κατασκευή ενός αντικειμένου με προσθετική κατασκευή, πρέπει να γίνει ο σχεδιασμός του εξαρτήματος που χρειάζεται να μοντελοποιηθεί. Το εν λόγω σχέδιο δημιουργείται σε ένα λογισμικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τρισδιάστατους εκτυπωτές. Αυτό το λογισμικό δημιουργεί στη συνέχεια έναν ειδικό τύπο αρχείου που θα σταλεί στον εκτυπωτή. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής διαβάζει αυτό το αρχείο και δημιουργεί το προϊόν συνδέοντας το ένα στρώμα πάνω στο άλλο. Η λειτουργία των τρισδιάστατων εκτυπωτών όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 1.1 βασίζεται στο γεγονός ότι έχουν σχεδιαστεί για να διαβάζουν τον τύπο αρχείου Standard Tessellation Language (STL). [1], [17], [35]



**Εικόνα 1.1** Απεικόνιση λειτουργίας των τρισδιάστατων εκτυπωτών [35].

Προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για εκτύπωση περίπλοκων μοντέλων με υψηλή ανάλυση, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι προσθετικής κατασκευής, που καλύπτουν μια ευρεία γκάμα αναγκών. Η ASTM International, μια αμερικανική εταιρεία δοκιμών και υλικών, έχει χωρίσει την προσθετική κατασκευή σε επτά διαδικασίες που είναι γνωστές και ως κωδικοί ASTM, αυτές είναι:

- Stereolithography (SLA)
- Digital light processing (DLP)
- Fused Deposition Modeling (FDM)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Binder Jetting (BJ)
- Material Jetting (MJ)
- Directed Energy Deposition (DED)

Αυτές οι διαδικασίες αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω. [1], [17], [35],[77]

### 1.1.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Οι τεχνολογίες FDM έχουν τη δυνατότητα κατασκευής αρχικών πρωτοτύπων από διάφορα υλικά. Η Fused Deposition Modeling είναι μια τυπική διαδικασία ταχείας προτυποποίησης που μπορεί να κατασκευάσει πρωτότυπα από πλαστικό (ABS), (PLA), αιθέρα κετόνης (PEEK), ακρυλικό (ASA), πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP) και άλλα. Τα πολυμερή υλικά αποτελούν τον πιο κοινό και βασικό τύπο υλικού που χρησιμοποιείται στην προσθετική κατασκευή, και αυτό οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες. Καταρχήν, τα πολυμερή υλικά είναι ευρέως διαθέσιμα στην αγορά, καθιστώντας την προμήθειά τους εύκολη και οικονομικά προσιτή. Επιπλέον, διαθέτουν καλές μηχανικές ιδιότητες το οποίο τα καθιστά κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές. Η ευκολία υιοθέτησής τους σε διαδικασίες 3D εκτύπωσης είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος, καθώς επιτρέπουν την απλή και αποτελεσματική κατασκευή αντικειμένων με τη χρήση της προσθετικής κατασκευής. Συνολικά, τα πολυμερή υλικά αποτελούν μια ιδανική επιλογή για την προσθετική κατασκευή λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν.

Το ABS είναι ο χημικός συνδυασμός τριών μονομερών μονάδων, δηλαδή ακρυλονιτρίλιο, βουταδιένιο, στυρόλιο και ο χημικός του τύπος είναι  $[(C_8H_8)_x * (C_4H_6)_y * (C_3H_3N)_z]$ . Το ABS είναι κοινό θερμοπλαστικό πολυμερές και ο κύριος λόγος της δημοτικότητάς του είναι η ευκολία διαθεσιμότητάς του και οι καλές μηχανικές του ιδιότητες. Η παραγωγή του ABS είναι εύκολη και οικονομική, το ABS είναι τριπολυμερές και παράγεται με πολυμερισμό ακρυλονιτρίλιου και στυρολίου παρουσία πολυβουταδιενίου. Αυτά τα μονομερή αναμιγνύονται χημικά σε ποικίλες αναλογίες, δηλαδή 15 έως 35% ακρυλονιτρίλιο, 40 έως 60% στυρόλιο, 5 έως 30% βουταδιένιο. Το ABS είναι ισχυρότερο από το καθαρό πολυστυρένιο λόγω της παρουσίας της ομάδας νιτρίλιου, είναι άμορφο στερεό και δεν έχει πραγματικό σημείο τήξης, με θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου τους 105 °C. Το ABS χρησιμοποιείται στους -20 έως 80 °C επειδή οι μηχανικές του ιδιότητες ποικίλλουν ανάλογα

με τη θερμοκρασία. Το ABS είναι ανακυκλώσιμο υλικό, μπορεί να ανακυκλωθεί από απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Κατά την ανακύκλωση του υλικού ABS μπορεί να προκύψουν κενά (ελαττώματα) και η κύρια αιτία αυτών των ελαττωμάτων είναι η έκλυση πτητικών ουσιών. Όσο αυξάνεται το επίπεδο κενών μειώνεται η αντοχή σε κάμψη και ολκιμότητα καθώς επίσης επηρεάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Από την άλλη πλευρά, το Πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι επίσης ένα από τα πιο κοινά πολυμερή που χρησιμοποιείται για προσθετική κατασκευή και συγκεκριμένα στην τεχνολογία FDM. Το PLA είναι ένας βιοδιασπώμενος και βιοδραστικός θερμοπλαστικός αλειφατικός πολυεστέρας που προέρχεται από ανανεώσιμους και φυσικούς πόρους όπως το ζαχαροκάλαμο ή το άμυλο, συγκεκριμένα άμυλο καλαμποκιού και ρίζες ταπιόκας. Το PLA είναι ο χημικός συνδυασμός δύο κύριων μονομερών, του κυκλικού διεστέρα και του λακτιδικού οξέος. Το PLA παράγεται με τη βοήθεια πολυμερισμού λακτιδίου με διάνοιξη δακτυλίου, στον οποίο προστίθενται διάφοροι μεταλλικοί καταλύτες στο διάλυμα ή στο τήγμα. Η βακτηριακή ζύμωση της ανανεώσιμης πρώτης ύλης βοηθά στην παραγωγή υλικού PLA και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται από την Reliance Life Sciences που ανέπτυξε μια πλήρη παραγωγή του υλικού. Το PLA έχει άριστες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πολυμερή, είναι ένα ημι-κρυσταλλικό και άμορφο στερεό με έχει θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου 55 °C και θερμοκρασία τήξης 180 °C.

Η FDM είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί θερμοπλαστικό νήμα που έχει στεγνώσει μέχρι το σημείο τήξεώς του και στη συνέχεια ωθείται στρώμα σε στρώμα για να σχηματίσει ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Η τεχνολογία FDM εισήχθη από τον Scott Crump την δεκαετία του 1990. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές που χρησιμοποιούνται για την FDM αποτελούνται από μια βάση στήριξης που έχει κάποιο βαθμό ελευθερίας καθώς και μια διάταξη τέτοια ώστε να μπορεί να κινείται σε κάθετη κατεύθυνση. Επάνω στην πλάκα υπάρχει ένας συνδεδεμένος εξωθητής που θερμώνει το νήμα μέχρι το σημείο τήξης του. Έτσι το εξωθεί από στρώμα σε στρώμα με τη βοήθεια ενός ακροφυσίου και σχηματίζει το απαιτούμενο αντικείμενο. Ο εξωθητής έχει την δυνατότητα να πραγματοποιεί κινήσεις και στις τρεις κατευθύνσεις (x, y και z). Ο λόγος που ονομάζεται Fused Deposition Modeling είναι ότι τα γειτονικά στρώματα ενοποιούνται μεταξύ τους ενώ η εναπόθεση ολοκληρώνεται από τον εξωθητή, επομένως ο 3D εκτυπωτής είναι υπεύθυνος για τη μοντελοποίηση του αντικειμένου. Με βάση το άκρο που απαιτείται για την διαδικασία, το προϊόν βυθίζεται σε ρητίνη όπως στη μέθοδο Selective Sintering (SL).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο SL έχουν αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, την σκληρότητα, την ημιδιαφάνεια και τη βιοσυμβατότητα, μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων. Αυτή η διαδικασία προσθετικής κατασκευής αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Ο πίνακας 1.1.1 παρουσιάζει λεπτομερώς τις ιδιότητες και τις εφαρμογές πολλών κατηγοριών υλικών και τα παραδείγματά τους. [1], [17], [31]. [4], [5], [6], [17], [31],[35].

Κατηγορία υλικού	Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές
Θερμοπλαστικό Πολυμερές	Πολυγαλακτικό οξύ (PLA), ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), ABSi, Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), Πολυφαινυλοσουλφόνη (PPSF), Πολυανθρακικά (PC), Τροποποιημένη με τερεφθαλική γλυκόλη πολυαιθυλενίου (PETG), Ultem 9085 (Πολυφθαλικό αιθέρα) Αιθέρα Κετόνη (PEEK), Ανακυκλωμένα Πλαστικά, Ακρυλονιτρίλιο Στυρένιο Ακρυλικό (ASA), Nylon 12, κ.λπ.	Οι ιδιότητες που σχετίζονται με αυτό περιλαμβάνουν τη σκληρότητα και την αντοχή, τη σταθερότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία, την καλή χημική αντοχή και την υψηλή αντοχή στην κόπωση μαζί με την υψηλή αντοχή σε κρούση. Διαθέτουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη κ.λπ.	Λόγω των μεγάλων ιδιοτήτων τους στη θερμική αντίσταση, είναι κατάλληλα για αεροδιαστημική και αεροδυναμική εφαρμογή.
Σύνθετα Πολυμερή	Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GFRP), Πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP)	Συμβατότητα με σκληρότητα, ολκιμότητα, αντοχή διαρροής κ.λπ.	Κατασκευαστικές εφαρμογές.
Κεραμικές λωρίδες και άργιλος	Αλουμίνα, Ζιργκόν, Καολίνη	Χημική και φυσική σταθερότητα, αντοχή στη θερμότητα και συμβατή θερμική αγωγιμότητα, αντοχή και σκληρότητα.	Χρήσεις γενικής χρήσης μαζί με εφαρμογές και στον οδοντιατρικό τομέα.
Κεραμικό/Μείγμα Binder	Ζιργκόν, φωσφορικό ασβέστιο.	Αντοχή σε χημικά και διάβρωση, μεγάλη συμβατότητα όσον αφορά την αντοχή στη θραύση, τη σκληρότητα, την αντοχή στη φθορά και τη θερμική αντίσταση καλή συμπεριφορά τριβής, χαμηλότερη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και μη μαγνητική φύση	Κατασκευές κατάλληλες για σκαλωσιές υποκατάστατων οστών[19] και για κατασκευή πιεζοηλεκτρικών εξαρτημάτων
Μίγμα Μετάλλου/ Συνδετικού	Ανοξειδωτο ασάλι, τιτάνιο, Inconel	Η παροχή ιξώδους συνδετικού υλικού, δυνατότητα ροής, μεγαλύτερη πυκνότητα πυροσυσσωμάτωσης, οδηγεί στην ομοιογενή μικροδομή των μερών. Έχει ως αποτέλεσμα ισχυρές, ελαφριές και ανθεκτικές στη διάβρωση ιδιότητες	Για την κατασκευή μηχανικών μερών που χρησιμοποιούνται σε εργαλεία και εξαρτήματα
Βιολογικά Υλικά	Bioink	Εύκολο στην εκτύπωση, με τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες,	Βιοτυπωμένα όργανα και σκαλωσιές



		<p>μπορεί εύκολα να βιοαποικοδομηθεί, και μπορούμε εύκολα να εγκαταστήσουμε τροποποιήσιμες λειτουργικές ομάδες στην επιφάνεια, την καλύτερη ικανότητα ωρίμανσης μετά την εκτύπωση, βιολογικά συμβατή και ικανή να διατηρήσει την τρισδιάστατη εκτυπωμένη δομή μετά την εκτύπωση</p>	
--	--	---	--

**Πίνακας 1.1.1** Υλικά, ιδιότητες και εφαρμογές στη μέθοδο FDM. [35].

### 1.1.2 Powder Bed Fusion (PBF)

Η προσθετική κατασκευή με μέταλλα και κράματα είναι μια σύγχρονη τεχνολογία που χρησιμοποιεί τρισδιάστατους εκτυπωτές για τη δημιουργία αντικειμένων. Αυτή η τεχνολογία έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους κατασκευής, καθώς επιτρέπει την κατασκευή περίπλοκων γεωμετρικών σχημάτων και εξαρτημάτων που δεν θα ήταν δυνατό να κατασκευαστούν με άλλες μεθόδους κατασκευής. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή με μέταλλα επιτρέπει μεγάλη ακρίβεια στην αναπαραγωγικότητα.

Η προσθετική κατασκευή μετάλλων και κραμάτων χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους εκτύπωσης, συμπεριλαμβανομένης PBF και της DED. Η Powder Bed Infusion είναι μια διαδικασία εκτύπωσης που χρησιμοποιεί ένα λέιζερ για να λιώσει σκόνη μετάλλου και να δημιουργήσει το τελικό αντικείμενο. Η DED είναι μια διαδικασία εκτύπωσης που χρησιμοποιεί μια συνεχή παροχή μεταλλικού σύρματος ή σκόνης και ένα λέιζερ ή ηλεκτρονικό ακροφύσιο για να λιώσει το μεταλλικό υλικό και να δημιουργήσει το τελικό αντικείμενο.

Υπάρχουν πολλά μέταλλα και κράματα που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή, όπως το τιτάνιο και τα κράματά του, τα κράματα με βάση το νικέλιο, το ασήμι, ο ανοξείδωτος χάλυβας, τα κράματα αλουμινίου, ο ορείχαλκος, ο χαλκός, ο χρυσός, η πλατίνα ο μπρούντζος κ.α. Η διαδικασία είναι η εξής: μεταλλική σκόνη ή σύρμα από το ανάλογο υλικό τοποθετούνται στον εκτυπωτή, έπειτα η πηγή ενέργειας (λέιζερ ή ηλεκτρόνια) χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και την τήξη του μεταλλικού υλικού στην επιφάνεια εκτύπωσης, σύμφωνα με το προκαθορισμένο 3D μοντέλο. Στη συνέχεια, η επιφάνεια κινείται κατακόρυφα κατά μήκος του άξονα Z, καθώς το επόμενο στρώμα του μεταλλικού υλικού τήξης στηρίζεται στο προηγούμενο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σταδιακά μέχρι να δημιουργηθεί ολόκληρο το 3D μοντέλο. Το αποτέλεσμα είναι ένα τελικό προϊόν από μέταλλο με ακρίβεια και λεπτομέρεια.

Η Powder Bed Fusion (PBF) αποτελεί μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους 3D εκτύπωσης για μέταλλα. Η μέθοδος PBF είναι μια από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους 3D εκτύπωσης, καθώς επιτρέπει την παραγωγή πολύπλοκων μεταλλικών αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια και αντοχή. Κατά τη διαδικασία αυτή, μια στρώση

μεταλλικής σκόνης τοποθετείται σε μια επιφάνεια και η θερμική πηγή ενεργοποιείται για να λιώσει το μεταλλικό υλικό σε επιλεγμένες περιοχές, σύμφωνα με το 3D CAD μοντέλο. Η στρώση σκόνης μετακινείται στη συνέχεια κάτω από τη θερμική πηγή και μια νέα στρώση σκόνης τοποθετείται πάνω από αυτήν. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε σειρά, με το μεταλλικό υλικό να συγκολλάται στρώμα προς στρώμα, μέχρι να δημιουργηθεί το τελικό 3D εκτυπωμένο αντικείμενο. Η διαδικασία Selective Laser Sintering (SLS) η μέθοδος Electron Beam Melting (EBM) και η μέθοδος Selective Laser Melting (SLM) αποτελούν τεχνολογίες Powder Bed Fusion (PBF) που χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση μετάλλων και κραμάτων. Τα υλικά, οι ιδιότητες και οι εφαρμογές που αναφέρονται στην μέθοδο αυτή παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 1.1.2 α και στον Πίνακα 1.1.2 β. [1], [7]. [17]. [35].

Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές
Τιτάνιο (Ti)	Αντοχή στη διάβρωση και τη θερμική διαστολή με μεγάλη συμβατότητα, μαζί με την υψηλή αντοχή και τη χαμηλότερη πυκνότητα.	Οι εφαρμογές του περιλαμβάνονται, αλλά δεν περιορίζονται σε αυτές, σε βιομηχανίες σχεδιασμού, ιατρικής, αυτοκινητοβιομηχανίας, αεροδιαστημικής, ναυτιλιακής βιομηχανίας και κοσμημάτων
Ανοξείδωτο ασάλι	Αυξημένη αντοχή στη φθορά, τη διάβρωση, μαζί με συμβατή ολκιμότητα, σκληρότητα και σκληρότητα.	Αυτά τα υλικά έχουν εκτεταμένη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυτιλιακή και ιατρική τεχνολογία, την κατασκευή εργαλείων και σε διάφορους τομείς της μηχανολογίας.
Αλουμίνιο (Al)	Ελαφρύ μέταλλο με χαμηλότερη πυκνότητα και καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα μαζί με ιδιότητες κράματος και εύκολες στην επεξεργασία ικανότητες.	Αυτά τα εξαρτήματα χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική μηχανική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στον τομέα της κατασκευής πρωτοτύπων, με περίπλοκες γεωμετρίες
Κοβάλτιο-Χρώμιο	Βιολογικά συμβατό, με αυξημένη σκληρότητα, αντοχή στη διάβρωση με συγκρίσιμη αντοχή και ολκιμότητα.	Στον ιατρικό και οδοντιατρικό τομέα, και σε βιομηχανίες που απαιτούν μεγαλύτερες θερμοανθεκτικές ιδιότητες, για παράδειγμα σε κινητήρες τζετ.
Κράματα με βάση το νικέλιο	Μεγάλη ικανότητα συγκόλλησης και σκληρυνσιμότητα μαζί με την αντοχή στη διάβρωση και την εξαιρετική μηχανική αντοχή	Χρησιμοποιείται στην αεροδιαστημική μηχανική και πεδία που απαιτούν θερμικά ανθεκτικές ιδιότητες έχουν επίσης εφαρμογές στην κατασκευή εργαλείων

**Πίνακας 1.1.2 α** Υλικά, ιδιότητες και εφαρμογές στη μέθοδο SLM. [35].

Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές
Τιτάνιο	Αντοχή στη διάβρωση και τη θερμική διαστολή με μεγάλη βιολογική συμβατότητα, σε συνδυασμό με υψηλή αντοχή και χαμηλότερη πυκνότητα	Κατασκευή πρωτοτύπων για αεροδιαστημικά και αγωνιστικά πεδία, στη ναυτιλία, τη χημική βιομηχανία και επίσης χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές όπως ορθοπεδικά εμφυτεύματα και

		προσθετικά.
Κοβάλτιο-Χρώμιο	Αυξημένη αντοχή και αντοχή στη φθορά, βιολογικά συμβατό, με θερμικές δυνατότητες	Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, της ορθοπεδικής, της αεροδιαστημικής και της οδοντιατρικής

**Πίνακας 1.1.2 β** Υλικά, ιδιότητες και εφαρμογές στη μέθοδο EBM. [35].

#### 1.1.4 Stereolithography (SLA)

Η *Stereolithography* είναι μια τεχνική που εισήχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Αν και πολλές άλλες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί από τότε, η *Stereolithography* παραμένει μια από τις πιο ευέλικτες. Έχει την υψηλότερη ακρίβεια κατασκευής και υπάρχει ένα ευρύ φάσμα υλικών που μπορεί να υποστεί αυτήν την επεξεργασία. Η *Stereolithography* είναι η πρώτη διαδικασία προσθετικής κατασκευής που εισήχθη ποτέ στην αγορά. Η *Stereolithography* είναι μια από τις πρώτες διαδικασίες προσθετικής κατασκευής που αναπτύχθηκαν και εξακολουθεί να είναι δημοφιλής στη βιομηχανία. Αρχικά, η *Stereolithography* χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων για ανάγκες πρωτοτύπων και μοντελοποίησης. Ωστόσο, σήμερα αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία σε πολλούς κλάδους, όπως η ιατρική, η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και πολλοί άλλοι.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της *Stereolithography*, το αρχικό αρχείο CAD μετατρέπεται σε αρχείο STL, το οποίο περιέχει τα γεωμετρικά δεδομένα του αντικειμένου που θα εκτυπωθεί σε 3D. Τα τέσσερα κύρια μέρη που συμβάλλουν στη σύνθεση της *Stereolithography* είναι το υπεριώδες (UV) σκληρυνόμενο υγρό φωτοπολυμερές, η διάτρητη επιφάνεια, η πηγή λέιζερ και ένας υπολογιστής για τον έλεγχο της διαδικασίας. Η διαδικασία ξεκινά με τη διάτρητη επιφάνεια να βυθίζεται στη δεξαμενή υγρού, ενώ η πηγή λέιζερ εκπέμπει υπεριώδη ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του υγρού πολυμερούς, δημιουργώντας έτσι μια γεωμετρία από στρώμα σε στρώμα. Το αντικείμενο μετακινείται σταδιακά προς τα κάτω και κάθε διαδοχικό στρώμα συγχωνεύεται ξεκινώντας από το βασικό, δημιουργώντας το τελικό 3D εκτυπωμένο τμήμα. Μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας στρώσης, το 3D εκτυπωμένο τμήμα βυθίζεται σε άλλη ρητίνη έτσι ώστε το τρισδιάστατο εκτυπωμένο μοντέλο να διαχωριστεί από το υγρό πολυμερές. Μετά από αυτή τη διαδικασία, η συγκόλληση των στρωμάτων γίνεται πολύ ισχυρή με την συγκεκριμένη ρητίνη και το τρισδιάστατο εκτυπωμένο μοντέλο μεταφέρεται σε φούρνο σκλήρυνσης με υπεριώδη ακτινοβολία. Μέσα σε αυτόν τον φούρνο, στην προκαθορισμένη θερμοκρασία, όλα τα στρώματα σκληραίνουν, η αντοχή αυξάνεται και επιτυγχάνεται το επιθυμητό φινίρισμα επιφάνειας. Έτσι, με αυτές τις διαδικασίες έχει δημιουργηθεί πλέον το τελικό αντικείμενο.

Η SLA, όπως εξηγήει ο ίδιος ο όρος, είναι μια μέθοδος κατασκευής στην οποία οι ακτίνες UV εφαρμόζονται σε υγρά μονομερή, για να τα συνδέσουν μεταξύ τους και να σχηματίσουν πολυμερή

(επιτρέποντάς τους να διασταυρωθούν μεταξύ τους). Αυτά τα πολυμερή στη συνέχεια στερεοποιούνται στρώμα προς στρώμα για να διατηρηθεί το επιθυμητό σχέδιο.

### 1.1.5 Selective Laser Sintering (SLS)

Ο Δρ. Carl Deckard και ο Δρ. Joe Beaman από το Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Austin επινόησαν αυτή τη μέθοδο στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Η Selective Laser Sintering (SLS) είναι μια μέθοδος ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων που επιτρέπει τη δημιουργία λεπτομερούς γεωμετρίας ενοποιώντας διαδοχικά στρώματα υλικού σε σκόνη το ένα πάνω στο άλλο. Η στερεοποίηση των στρωμάτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια λέιζερ CO<sub>2</sub>/Αζώτου, λαμβάνοντας υπόψη το είδος του άκρου της επιφάνειας και τη σύντηξη που απαιτείται. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιείται μια σκόνη χημικής ένωσης προκειμένου να επιτευχθεί η παραγωγή του αντικειμένου. Η σκόνη μπορεί να είναι από θερμοπλαστικό, κεραμικά, γυαλιά, μέταλλα κ.α. Εάν η σκόνη που χρησιμοποιείται είναι κατασκευασμένη από μέταλλο, τότε αυτή η μέθοδος θεωρείται ως Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Οι εκτυπωτές με Direct Metal Laser Sintering αποτελούνται από δύο θαλάμους, η μεταφορά ισχύος πραγματοποιείται από τον πρώτο θάλαμο στον δεύτερο, όπου εκεί γίνεται η πραγματική κατασκευή. Η σκόνη θερμαίνεται σε θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης της ισοδύναμης ουσίας. Ο κύλινδρος που υπάρχει στην κορυφή σχηματίζει στρώσεις από σκόνη. Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή, απαιτούνται μερικές εργασίες φινιρίσματος έτσι ώστε να τελειοποιηθεί το αντικείμενο.

Η Selective Laser Melting και η Selective Laser Sintering είναι δύο διαφορετικές τεχνικές παραγωγής αντικειμένων με τη χρήση λέιζερ. Η Selective Laser Melting χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή μικρών αντικειμένων και συνήθως περιορίζεται στα μέταλλα. Στη διαδικασία Selective Laser Sintering, το λέιζερ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θέρμανσης των σκόνων μετάλλων, καθώς επίσης και για τη δημιουργία συγκεκριμένων σχημάτων. Ο Πίνακας 1.1.5 παρουσιάζει μια συγκριτική μελέτη των υλικών που ενσωματώνονται σε αυτή τη διαδικασία. [35]. [40]

Λέιζερ	Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές
CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	Πολυμερή συμπεριλαμβανομένων Πολυαμιδίων, Πολυανθρακικά, Πολυστυρένιο (PS), Θερμοπλαστικό Ελαστομερές (TPE), Πολυαρυλαιθερκετόνη (PAEK)	Χαρακτηρίζεται από μια ιδανική συμπεριφορά πυροσυσσωμάτωσης όπως ένα ημι-κρυσταλλικό θερμοπλαστικό, υψηλή σκληρότητα, θερμική σταθερότητα	Κατασκευή πρωτοτύπων στην πρώιμη διαδικασία σχεδιασμού, ανταλλακτικά αυτοκινήτων, υλικό

Nd:YAG	Κεραμικά	Μεγάλη σκληρυνσιμότητα, μηχανική αντοχή, καλύτερη θερμική και χημική σταθερότητα και χρησιμοποίησιμα θερμικά, ηλεκτρικά, οπτικά και μαγνητικά χαρακτηριστικά.	Αεροναυπηγική, βιοϊατρική, μεταλλουργική εφαρμογή
Yb-Fiber	Γυαλιά όπως λιωμένο πυρίτιο, Βοροπυριτικό γυαλί	Χημική αντοχή, θερμική σταθερότητα	Γυάλινα φίλτρα, ιατρικός και χημικός τομέας.
	Μέταλλα	Καλή θερμική αγωγιμότητα επομένως, χρησιμοποιείται σε περίπτωση επιλεκτικής τήξης με λέιζερ	Ποικίλες εφαρμογές σε διάφορους κλάδους

**Πίνακας 1.1.5** Υλικά, ιδιότητες και εφαρμογές στη μέθοδο SLS. [35].

### 1.1.6 Binder Jetting (BJ)

Η Binder Jetting είναι μια διαδικασία παρόμοια της τεχνολογίας Inkjet. Το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) εισήγαγε για πρώτη φορά αυτή τη διαδικασία. Αντί να χρησιμοποιείται λέιζερ, χρησιμοποιείται μια τεχνολογία δισδιάστατου 2D εκτυπωτή inkjet σχηματίζοντας στρώμα σε στρώμα ένα τρισδιάστατο αντικείμενο. Σε αυτή τη διαδικασία, με τη βοήθεια μιας κεφαλής που κινείται σε δύο άξονες, εναποτίθεται με ακρίβεια ένα υγρό συνδετικό και ως αποτέλεσμα δημιουργείται ένα αντικείμενο.

Αυτή η διαδικασία ξεκινά όπως κάθε άλλη διαδικασία προσθετικής κατασκευής, δηλαδή δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο σχέδιο CAD που εισάγεται στο λογισμικό του εκτυπωτή. Για αυτή την διαδικασία απαιτείται σταθερή παροχή κατά την εκτύπωση, αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός διανομέα ο οποίος διασφαλίζει την παροχή. Μετά την εφαρμογή μιας στρώσης πούδρας, η κεφαλή εκτύπωσης προσαρτά το συνδετικό υλικό σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Πριν ξεκινήσει η επόμενη στρώση, ο διαλύτης που περιέχει το συνδετικό ξηραίνεται μέσω λαμπτήρων φθορισμού. Μετά από αυτό, το στρώμα πούδρας αποκλιμακώνεται και εφαρμόζεται μια νέα στρώση σκόνης. Το συνδετικό στη συνέχεια τοποθετείται σε κλίβανο μετά την ολοκλήρωση του κύκλου. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος που χρειάζεται εξαρτώνται από τη φύση του συνδετικού που χρησιμοποιείται. Τα μέταλλα και τα κεραμικά μέρη πρέπει να υποστούν πυροσυσσώματωση, διήθηση, θερμική επεξεργασία ή θερμή ισοστατική συμπίεση πριν χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα μέταλλα και τα πλαστικά υλικά δεν απαιτούν καμία μετα-επεξεργασία και είναι έτοιμα για χρήση μόλις βγουν από τα συστήματα εκτύπωσης. Τα παραδείγματα υλικών που χρησιμοποιούνται συνοψίζονται στον Πίνακα 1.1.6 παρακάτω. [35].

Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές
-------	-----------	-----------

Ανοξείδωτο ατσάλι	Ανθεκτικό στη θερμότητα και τη διάβρωση με μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό.	Χρησιμοποιείται για μέρη αντλιών, μηχανημάτων γεώτρησης και εξόρυξης.
Κεραμικές χάντρες	Υψηλή διαπερατότητα καθώς και καλύτερες θερμικές ιδιότητες	Τα κράματα χάλυβα χυτεύονται χρησιμοποιώντας αυτό και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εκτύπωση πυρήνων που πρέπει να υποστούν υψηλές μεταλλοστατικές δυνάμεις και επακόλουθες συνθήκες καταπόνησης κατά τη χύτευση.
Κράμα Inconel	Συμπλήρωση του προϊόντος με καλές μηχανικές ιδιότητες και ακόμη μεγαλύτερη πυκνότητα.	Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πτερυγίων αεροστροβίλων, για την παραγωγή γεννητριών ατμού που χρησιμοποιούνται σε αντιδραστήρες πυρηνικού νερού υπό πίεση, σφραγίδες και επίσης σε δοχεία πίεσης, αυτά είναι ευρέως εφαρμόσιμα στην αεροδιαστημική βιομηχανία.
Σίδηρο	Παρέχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και είναι επίσης εξαιρετικά ανθεκτικό στη φθορά.	Εφαρμογές είναι στην παραγωγή και επισκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτου, εργαλειομηχανές, καθώς και σε εργαλειομηχανές, μαζί με αυτό είναι επίσης δημοφιλείς στο διακοσμητικό υλικό.

**Πίνακας 1.1.6** Υλικά, ιδιότητες και εφαρμογές στη μέθοδο BJ. [35].

### 1.1.7 Directed Energy Deposition (DED)

Σε αντίθεση με τις άλλες διαδικασίες προσθετικής κατασκευής, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την επισκευή και τη συντήρηση αντί για την παραγωγή εξαρτημάτων. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία αυτή αποτελείται από την κεφαλή εναπόθεσης (που είναι ενσωματωμένη) και δύο ακροφύσια τροφοδοσίας σκόνης. Σε αυτή τη διαδικασία, τροφοδοτείται μεταλλική σκόνη ή ένα λεπτό σύρμα. Το συγκεκριμένο τμήμα που πρόκειται να κατασκευαστεί διατηρείται σε μια πλατφόρμα και σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει και μια σωλήνωση αδρανούς αερίου. Η κεφαλή εναπόθεσης υλικού (η οποία εναποθέτει σκόνη και ταυτόχρονα μια δέσμη λέιζερ) είναι μια μηχανή 4 ή 5 αξόνων. Η διαδικασία DED χρησιμοποιεί μια κεντρική παροχή θερμότητας (δέσμη ηλεκτρονίων ή λέιζερ) και στη συνέχεια καθώς στερεοποιείται το υλικό στερεοποιείται στρώμα προς στρώμα, δημιουργώντας νέα αντικείμενα.

Η ιδέα λειτουργίας της διαδικασίας DED διαφέρει από αυτή της PBF στο ότι στην DED το υψηλής πυκνότητας λέιζερ συγκεντρώνεται σε μια σταθερή ροή κονιοποιημένου υλικού που απλώνεται στην ίδια την ουσία αντί για ένα στρώμα μεταλλικής σκόνης. Στον παρακάτω πίνακα 1.1.7 παρουσιάζεται η συγκριτική μελέτη των υλικών και των ιδιοτήτων τους. [35].

Υλικά	Ιδιότητες	Εφαρμογές
-------	-----------	-----------

Τιτάνιο	Αντοχή στη διάβρωση και τη θερμική διαστολή με μεγάλη βιολογική συμβατότητα, σε συνδυασμό με υψηλή αντοχή και χαμηλότερη πυκνότητα.	Χρησιμοποιείται για επισκευές στη βιομηχανία αυτοματισμών και αεροδιαστημικής
Αλουμίνιο	Ελαφρύ μέταλλο με χαμηλότερη πυκνότητα και καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα με ιδιότητες κράματος και εύκολες στην επεξεργασία ικανότητες.	Συμπλήρωση ρωγμών και επανατοποθέτηση κατασκευασμένων εξαρτημάτων
Ανοξείδωτο ατσάλι	Ανθεκτικό στη θερμότητα και τη διάβρωση με μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό.	Επισκευή κινητήρων τουρμπίνας και άλλες τέτοιες πολύπλοκες εφαρμογές
Χαλκός	Ελατό, όλκιμο και καλύτερο φινίρισμα επιφάνειας.	Βιομηχανικές εφαρμογές.
Inconel, Κεραμικά	Καλές μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη πυκνότητα.	Αεροδιαστημική, βιοϊατρικές εφαρμογές.

**Πίνακας 4.1.6** Υλικά, ιδιότητες και εφαρμογές στη μέθοδο DED. [35].

### 1.1.8 Laminated Object Manufacturing (LOM) και Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)

Η κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων με χρήση της τεχνολογίας Laminated Object Manufacturing αποτελεί μια διαδικασία παραγωγής αντικειμένων που βασίζεται στην συγκόλληση πολλαπλών στρωμάτων χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου, στα οποία προηγουμένως έχει εφαρμοστεί κόλλα. Η διαδικασία αυτή ξεκινά με τον σχεδιασμό του αντικειμένου σε ηλεκτρονική μορφή, ο οποίος μεταφέρεται σε μια ειδική μηχανή που κόβει το υλικό σε στρώματα. Έπειτα, το κάθε στρώμα κολλάει στο προηγούμενο, δημιουργώντας έτσι ένα πολυστρωματικό αντικείμενο. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως στη βιομηχανία αυτοκινήτων, αεροναυπηγικής, ιατρικής και ακόμη και στη δημιουργία μοντέλων για τον σχεδιασμό ρούχων. Μια από τις βασικές προτεραιότητες της διαδικασίας είναι η δημιουργία αντικειμένων με μεγάλες διαστάσεις και πολύπλοκες γεωμετρίες.

Η Ultrasonic Additive Manufacturing μπορεί να είναι ένα υποσύνολο της διαδικασίας Laminated Object Manufacturing. Η μέθοδος UAM είναι μια προηγμένη μέθοδος προσθετικής κατασκευής, που συνδυάζει πλαστικοποίηση με σύνδεση μεταλλικών ραφών υπερήχων και CNC. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια αναβάθμιση της προηγούμενης μεθόδου της διαδικασίας Laminated Object Manufacturing όπου χρησιμοποιείται λέιζερ για την κοπή των φύλλων υλικού.

Η μέθοδος Ultrasonic Additive Manufacturing περιλαμβάνει την προσαρμογή και την κοπή των φύλλων υλικού με CNC, και στη συνέχεια τη συγκόλλησή τους με υπερήχους. Οι υπερήχοι αυτοί θερμαίνουν την περιοχή της επαφής μεταξύ των δύο φύλλων υλικού, προκαλώντας την συγκόλλησή μεταξύ τους (πλαστικοποίηση). Οι συνδεόμενες περιοχές ενισχύονται περαιτέρω μέσω φρεζαρίσματος CNC, παράγοντας

ένα πολύ ανθεκτικό και σταθερό τελικό προϊόν. Οι δύο κύριοι τύποι μεθόδων πλαστικοποίησης φύλλων είναι η LOM και η UAM. Στη LOM χρησιμοποιείται λέιζερ για την κοπή των φύλλων υλικού, ενώ στην UAM, τα φύλλα ενώνονται με υπερήχους. Στον Πίνακα 1.1.8 παρουσιάζονται ορισμένα υλικά μαζί με τις ιδιότητες και τις εφαρμογές τους [35].

<b>Υλικά</b>	<b>Ιδιότητες</b>	<b>Εφαρμογές</b>
Πολυμερή	Καλή θερμική αγωγιμότητα, συγκόλληση με κόλλα.	Βιομηχανία χαρτιού
Σύνθετα	Υψηλός συντελεστής, χαμηλή πυκνότητα, εξαιρετική αντοχή στην κόπωση	Βιομηχανίες χυτηρίου και σφυρηλάτησης
Κεραμικά	Χημική και φυσική σταθερότητα, αντοχή στη θερμότητα και συμβατή θερμική αγωγιμότητα, αντοχή και σκληρότητα	Βιομηχανίες χυτηρίου και σφυρηλάτησης
Χαρτί	Καλός αγωγός του ηλεκτρισμού	Βιομηχανία ηλεκτρονικών
Ταινίες γεμίσματος μετάλλων, Μεταλλικά ρολά	Καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.	Εφαρμόζεται σε έξυπνες κατασκευές

**Πίνακας 1.1.8** Υλικά, ιδιότητες και εφαρμογές στη μέθοδο LOM.. [35].



## Κεφάλαιο 2

### 2 Βιοεκτύπωση

Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει την κατασκευή διάφορων αντικειμένων και εξαρτημάτων σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της ιατρικής. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, είναι δυνατή η κατασκευή κρανιοπροσωπικών εμφυτευμάτων, οδοντικών καλουπιών, προσθετικών εξαρτημάτων και ιατρικού εξοπλισμού κατά παραγγελία. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή χειρουργικών μοντέλων, ικριωμάτων για αναγέννηση ιστών, εμφυτεύσιμων βιοαισθητήρων εκτύπωσης οργάνων και μοντέλων ιστών για την ανακάλυψη φαρμάκων. Η δυνατότητα κατασκευής ειδικών ικριωμάτων και προσθετικών με υψηλή δομική πολυπλοκότητα και ευελιξία σχεδιασμού, επιτρέπει τη δημιουργία προσαρμοσμένων λύσεων για την αντιμετώπιση ιατρικών προβλημάτων και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών. Παραδείγματα εφαρμογών της προσθετικής κατασκευής στην ιατρική είναι η κατασκευή εξατομικευμένων εμφυτευμάτων για την αντικατάσταση τμημάτων του σκελετού, όπως αρθρώσεις, και η κατασκευή εξατομικευμένων προσθετικών για την αντικατάσταση ή βελτίωση οδοντικών εμφυτευμάτων. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία προσαρμοσμένων ιατρικών συσκευών, όπως προσθετικά ακουστικά, προσθετικά μέλη, ορθωτικά και πλαστικές προσαρμογές για την αντιμετώπιση καταγμάτων και άλλων παθήσεων του σκελετού.

Γενικά πρέπει να χρησιμοποιούνται υλικά με επαρκές ιξώδες που να είναι εκτυπώσιμα και δομικά σταθερά, να έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν τρισδιάστατη δομή, να είναι μηχανικά ενισχυμένα (μέσω υπερϊώδους ακτινοβολίας), και να έχουν συντονίσιμες μηχανικές ιδιότητες. Τέτοια υλικά είναι πολυμερή, υδρογέλες ή βιομελάνια. Επίσης είναι απαραίτητο να είναι βιοσυμβατά, να έχουν επαρκή κινητική αποδόμησης, να σχηματίζουν μη τοξικά υποπροϊόντα αποδόμησης, να είναι βιομιμητικά και να μπορούν να ελέγχουν μόρια ή φάρμακα απελευθέρωσης. Επιπλέον, τα μελάνια βιοϋλικών θα πρέπει να κατασκευάζονται και να επεξεργάζονται εύκολα, να είναι οικονομικά προσιτά και να διατίθενται στο εμπόριο. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο τρόπος με τον οποίο τέτοια υλικά πρέπει να πληρούν καθεμία από αυτές τις απαιτήσεις εξαρτάται από τη μέθοδο εκτύπωσης και την τελική εφαρμογή χρήσης. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να βρεθεί μια ισορροπία μεταξύ όλων αυτών των παραμέτρων προκειμένου να δημιουργηθούν κατάλληλα εκτυπώσιμα βιοϋλικά με ισχυρά χαρακτηριστικά για διαφορετικές ανάγκες εφαρμογών στη βιοϊατρική.

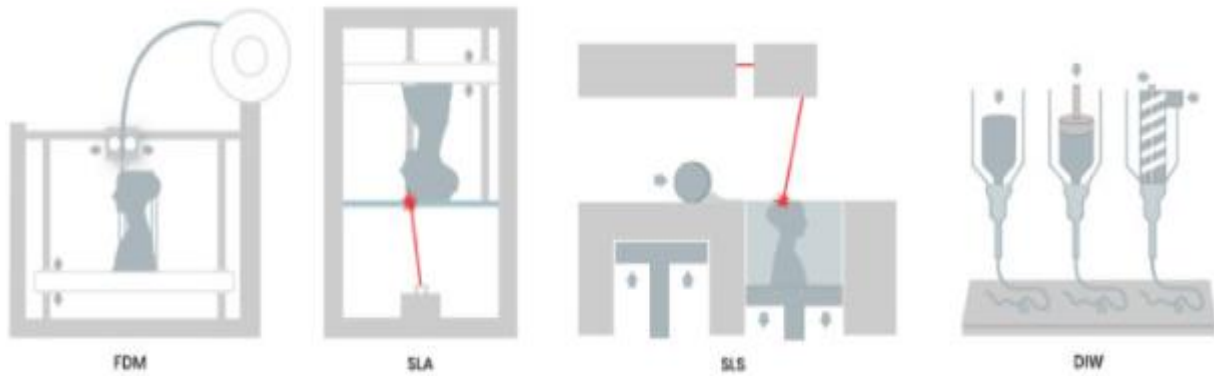
Η ανάπτυξη υλικών που πληρούν τις παραπάνω απαιτήσεις για εκτυπώσιμα βιοϋλικά είναι πραγματική πρόκληση στον τομέα της βιοϊατρικής. Η ικανότητα να συνδυάζουν τη μηχανική αντοχή με τη βιοσυμβατότητα και τη δυνατότητα δομικής σταθερότητας είναι κρίσιμη για πολλές εφαρμογές.

Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτή η ισορροπία είναι η χρήση πολυμερών και υδρογελών με ιδιότητες που τους επιτρέπουν να είναι ευέλικτα και εκτυπώσιμα, αλλά και ανθεκτικά και σταθερά στον χρόνο. Τα χαρακτηριστικά των υλικών μπορούν να ελεγχθούν μέσω της σύνθεσης του πολυμερούς, της μορφολογίας του, του βαθμού δικτύωσης και του βαθμού διάχυσης του. Η χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερών, όπως η αντοχή στην τριβή και η αντοχή στην κρούση. Οι υδρογέλες είναι πολυμερή με μεγάλο ποσοστό νερού στη δομή τους. Η ευέλικτη φύση των υδρογελών τους επιτρέπει να προσαρμόζονται σε πολλά διαφορετικά περιβαλλοντικά συστήματα, όπως οι επιφάνειες των επιστρωμάτων του δέρματος, των βλεννογόνων και των ενδοθηλιακών κυττάρων.

Η χρήση αυτής της τεχνολογίας μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία ακόμη και περίπλοκων δομών, όπως τα αγγεία και τους ιστούς, με μεγάλη ακρίβεια. Η χρήση πολυμερών και υδρογελών στη βιοϊατρική έχει μεγάλη σημασία και μπορεί να οδηγήσει σε πολλές εφαρμογές, όπως η δημιουργία εξατομικευμένων ιατρικών συσκευών και εμφυτευμάτων, η ανάπτυξη μοντέλων οργανισμών για τη μελέτη ασθενειών και τη δοκιμή φαρμάκων, καθώς και η κατασκευή αναπαραστατικών μοντέλων για την εκπαίδευση και εξάσκηση των χειρουργών. [36]

## **2.1 Στερεά μελάνια με βάση τα πολυμερή**

Τα πολυμερή είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους βιοϋλικών που χρησιμοποιούνται στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής. Αυτά τα υλικά έχουν τη μορφή νημάτων και χρησιμοποιούνται σε διάφορες τεχνολογίες, όπως η Fused Deposition Modeling (FDM), η Selective Laser Sintering (SLS), η Stereolithography (SLA) και η Direct Ink Writing (DIW). Ένα από τα πλεονεκτήματα των πολυμερών είναι ότι είναι βιοσυμβατά, πράγμα που τα καθιστά κατάλληλα για χρήση σε βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως ο ιατρικός εξοπλισμός και οι ιατρικές προσθήκες. Επίσης, τα πολυμερή έχουν συντονίσιμες μηχανικές ιδιότητες, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος, όπως η αντοχή, η ελαστικότητα και η σκληρότητα. Επιπλέον, τα πολυμερή υλικά μπορούν να έχουν ρυθμούς αποικοδόμησης που μπορούν να φτάνουν ταχύτητες εκτύπωσης ως και μερικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο, κάνοντας τη διαδικασία ταχύτερη και πιο αποδοτική από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής. [36]



**Εικόνα 2.1** Σχηματική αναπαράσταση τεχνικών προσθετικής κατασκευής. (α) Μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης (FDM), (β) Stereolithography (SLA), (γ) Selective Laser Sintering (SLS) και (δ) γραφή άμεσης μελάνης (DIW). [36].

Όνομα	Σημείο τήξης	Ακαμψία	Περιορισμός	Πλεονεκτήματα
ABS	105 °C	30 MPa	Δεν βιοδιασπάται και συρρικνώνεται σε επαφή με τον αέρα.	Καλή δύναμη και ευελιξία.
PLA	175 °C	230 MPa	Μακροχρόνια βιοσυμβατότητα.	Καλές μηχανικές ιδιότητες. Χαμηλό κόστος.
PCL	60 °C	216 MPa	Μεγάλος χρόνος αποικοδόμησης (3 χρόνια).	Εξαιρετικές ρεολογικές και ιξωδοελαστικές ιδιότητες κατά τη θέρμανση. Χαμηλό κόστος.
PC	110 °C	2250 MPa	Απορροφείστε την υγρασία από τον αέρα επηρεάζοντας την απόδοση και την αντίσταση εκτύπωσης.	Συντονίσιμη μηχανική και πορώδες.
PEEK	350 °C	3.6 GPa	Υψηλό σημείο τήξης.	Υψηλή μηχανική και θερμική αντοχή. Πολύ δυνατό και ταυτόχρονα πολύ πιο ελαφρύ από κάποια μέταλλα.
PP	165 °C	1.6 GPa	Αντοχή σε χαμηλή θερμοκρασία;	Πυγμάχος ελαφρού βάρους.

			Ευαισθησία στις ακτίνες UV.	
Πολυαμίδες	250 °C	10 MPa	Χρησιμοποιείται περισσότερο για την τεχνολογία SLS..	Καλή σταθερότητα, ευελιξία και αντοχή σε κραδασμούς
TPU	235 °C	100 MPa	Δεν αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες.	Συντονιζόμενη ακαμψία.

Πίνακας 2.1. Συνήθη πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή και οι ιδιότητές τους [36].

## 2.2 Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρόλιο (ABS)

Το ABS είναι ένα δημοφιλές υλικό για την προσθετική κατασκευή λόγω των ιδιοτήτων του. Έχει καλή αντοχή σε διάφορες θερμοκρασίες και ευκαμψία σε σύγκριση με άλλα πλαστικά υλικά, όπως τα πολυεστερικά υλικά. Είναι ένα πετροχημικό συμπολυμερές τριπλό με βάση το πολυβουταδιένιο. Το ABS είναι ένα από τα πιο κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή, καθώς μπορεί να αντέξει σε θερμοκρασίες από -20 °C έως 80 °C. Επίσης, το σημείο τήξης του είναι 105 °C, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα εκτύπωσης FDM και SLA, που χρησιμοποιούν υψηλές θερμοκρασίες για την επεξεργασία των υλικών. Έχει χαμηλό συντελεστή συρρίκνωσης και καλή διάσταση σταθερότητα, ενώ είναι επίσης εύκολο στον επεξεργασία. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν το ABS κατάλληλο για χρήση σε διάφορες εφαρμογές, όπως πρωτότυπα, κατασκευές, αντικείμενα και εξαρτήματα για τη βιομηχανία και τον επαγγελματικό τομέα. Επιπλέον, το ABS είναι διαθέσιμο σε πολλά χρώματα και είναι επίσης δυνατό να εκτυπωθεί με μεγάλη ακρίβεια και λεπτομέρεια. Παρόλα αυτά, το ABS δεν είναι βιοδιασπώμενο και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα περιβαλλοντικής ρύπανσης. Επίσης, συρρικνώνεται σε επαφή με τον αέρα, κάτι που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ακρίβειας στην εκτύπωση. [36]

## 2.3 Πολυγαλακτικό οξύ (PLA)

Το PLA είναι ένα πολυμερές που χρησιμοποιείται συχνά στην τεχνολογία Fused Deposition Modeling (FDM) λόγω του χαμηλού κόστους, της βιοσυμβατότητας, της βιοδιασπασιμότητας και της εύκολης επεξεργασίας του σε σχέση με το πλαστικό ABS. Είναι κατασκευασμένο από ανανεώσιμες πρώτες ύλες όπως το άμυλο αραβοσίτου και μπορεί εύκολα να εξωθηθεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 190 °C έως 230 °C, με θερμοκρασία τήξης 175 °C. Μία από τις κύριες ανησυχίες που υπάρχει όσον αφορά το πολυγαλακτικό οξύ, είναι η μακροπρόθεσμη βιοσυμβατότητα του λόγω της απελευθέρωσης υποπροϊόντων γαλακτικού οξέος κατά την αποικοδόμηση η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε φλεγμονή ιστού (σε περίπτωση ορθωτικών) ή κυτταρικό θάνατο (σε περίπτωση ικριωμάτων). Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, το PLA μπορεί να συνδυαστεί με ανθρακούχο φωσφορικό ασβέστιο λόγω της ικανότητάς του να εξουδετερώνει την οξύτητα και να ρυθμίζει το φυσιολογικό εύρος του pH. Παρά αυτά τα μειονεκτήματα, το PLA έχει καλές μηχανικές ιδιότητες και έχει παρόμοια αντοχή σε θλίψη σε σύγκριση με το οστό (230 MPa), για το λόγο αυτό η κύρια χρήση του είναι στη μηχανική

μυοσκελετικών ιστών. Σε αυτή, το PLA μπορεί να συνδυαστεί με κεραμικό προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η αντοχή σε θλίψη και η ανοργανοποίηση κατά την εμφύτευση. Επιπλέον, το PLA χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή άκαμπτων ορθώσεων καθώς και για ορθοπεδική υποστήριξη. [36]

#### **2.4 Πολυκαπρολακτόνη (PCL)**

Όπως και το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), η πολυκαπρολακτόνη (PCL) είναι ένα πολυμερές χαμηλού κόστους καθώς είναι βιοδιασπώμενο, με θερμοκρασία τήξης 60 °C. Τη σήμερα ημέρα, το PCL έχει εξαιρετικές ρεολογικές και ιξωδοελαστικές ιδιότητες κατά τη θέρμανση (με Young's Modulus 216 MPa, επιμήκυνση στις θραύσεις 746%, αντοχή σε εφελκυσμό 37 MPa) που το καθιστούν κύριο υποψήφιο υλικό για εκτύπωση με FDM για την παραγωγή μακροπρόθεσμων αποικοδομήσιμων εμφυτευμάτων τα οποία να διαθέτουν προσαρμοσμένες κινητικές αποικοδόμησης για να ταιριάζουν σε μια συγκεκριμένη ανατομική θέση. Η πολυκαπρολακτόνη μένει στο σώμα για πάνω από 6 μήνες και αποικοδομείται πλήρως σε περίπου 3 χρόνια, επιτρέποντάς της να παρέχει υποστήριξη για την αναγέννηση ή την επούλωση των ιστών και αργότερα βιοδιασπάται χωρίς το σχηματισμό δυνητικά επιβλαβών παραπροϊόντων. Επιπλέον, η πολυκαπρολακτόνη είναι κατάλληλη για την παραγωγή ικριωμάτων με Selective Laser Sintering και Direct Ink Writing, καθώς σχηματίζει πολύ διασυνδεδεμένες νανο- και μικρο-ίνες, οι οποίες οδηγούν στη μακροκλίμακα σε ένα ικρίωμα με κατάλληλο πορώδες για την ενσωμάτωση κυττάρων, αυξητικών παραγόντων, φαρμάκων κ.λπ. [36]

#### **2.5 Πολυανθρακικό (PC)**

Οι πολυανθρακικές ρητίνες έχουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως η ηλεκτρονική, η οπτική, η κατασκευή αυτοκινήτων και η ιατρική. Λόγω της υψηλής αντοχής στην κρούση και την ακαμψία, οι πολυανθρακικές ρητίνες χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή αντικειμένων όπου η ασφάλεια είναι ζωτικής σημασίας, όπως στα κράνη, τα γυαλιά ασφαλείας και τα πλαστικά παράθυρα. Επίσης, η υψηλή διαφάνεια και οι ηλεκτρικές ιδιότητες του το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές στην ηλεκτρονική όπως στις οθόνες υπολογιστών και κινητών τηλεφώνων. Οι πολυανθρακικές ρητίνες χρησιμοποιούνται επίσης στην κατασκευή μικρού μεγέθους εξαρτημάτων και στην ιατρική, για παράδειγμα για την κατασκευή οδοντικών εμφυτευμάτων.

Το πολυανθρακικό PC, είναι ένα βιοϋλικό υψηλής αντοχής, ικανό να αντισταθεί σε οποιαδήποτε φυσική παραμόρφωση έως περίπου τους 150 °C. Ωστόσο, είναι επιρρεπής στην απορρόφηση υγρασίας από τον αέρα, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση εκτύπωσης. Πρόσφατα, έχει χρησιμοποιηθεί ως ικρίωμα για ιατρικές εφαρμογές καθώς έχει συντονιζόμενο πορώδες (από 1 έως 30%) και μηχανικές ιδιότητες με τάση διαρροής, μέτρο ελαστικότητας και επιμήκυνση κατά τη θραύση, 50 MPa, 2250 MPa και 8,3 %, αντίστοιχα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι εξαιρετικές μηχανικές επιδόσεις μειώνονται ως συνάρτηση της αύξησης του πορώδους του ικριώματος. [36], [38]

## **2.6 Πολυμερή υψηλής απόδοσης (PEEK, PEKK, ULTEM)**

Η πολυαιθερική αιθερική κετόνη (PEEK), η πολυαιθερκετονοκετόν (PEKK) και το πολυαιθεριμίδιο (ULTEM), αποτελούν τρεις από τις πιο προηγμένες κατηγορίες πολυμερών στον τομέα της προσθετικής κατασκευής. Αυτά τα υψηλής απόδοσης υλικά παρέχουν ένα ευρύ φάσμα χρήσεων, όπως η βιομηχανία αεροδιαστημικής, η ιατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ηλεκτρονική. Τα υλικά αυτά έχουν εξαιρετικά υψηλές θερμικές, μηχανικές και χημικές αντοχές, καθιστώντας τα ιδανικά για απαιτητικές εφαρμογές. Επίσης, έχουν υψηλή αντίσταση σε χημικές ουσίες, υψηλές θερμοκρασίες και είναι ανθεκτικά στην φωτιά, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές στην βιομηχανία αεροδιαστημικής και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Ωστόσο, η πολυαιθερική αιθερική κετόνη (PEEK), η πολυαιθερκετονοκετόνη (PEKK) και το πολυαιθεριμίδιο (ULTEM) έχουν υψηλό σημείο τήξης (~ 350 °C), επομένως δεν μπορούν να εκτυπωθούν σε όλους τους εκτυπωτές Fused Deposition Modeling (FDM). Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής πρέπει να έχει θερμαντική πλάκα ικανή να φτάσει τουλάχιστον τους 230 °C, εξώθηση στους 350 °C και κλειστό θάλαμο. Αυτή η ιδιότητα δίνει στα 3D εκτυπωμένα πολυμερή υψηλής απόδοσης ανώτερη αντοχή στη θερμότητα, επιτρέποντάς τους να υποστούν αποστείρωση με ατμό χωρίς να μαλακώσουν. Ειδικότερα, η πολυαιθερική αιθερική κετόνη PEEK έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μηχανική οστικού ιστού, ως κρανιοπροσωπικό εμφύτευμα, λόγω των οστεοενσωματωτικών ιδιοτήτων, της βιοσυμβατότητας, της χαμηλής απορρόφησης υγρασίας και της ακτινοδιαύγειας του. Επιπλέον, το PEEK παρουσιάζει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες με συντελεστή Young 3,6 GPa και αντοχή εφελκυσμού 100 MPa. Αυτός ο μοναδικός συνδυασμός χημικών-φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων καθιστά αυτό το υλικό κατάλληλο και ευέλικτο για διάφορους ιατρικούς σκοπούς. [36]

## **2.7 Πολυπροπυλένιο (PP)**

Το πολυπροπυλένιο (PP) είναι ένα κρυσταλλικό θερμοπλαστικό πολυμερές, που παράγεται από μονομερές προπενίου (ή προπυλενίου), με σημείο τήξης 165 °C. Το πολυπροπυλένιο είναι ένα από τα ελαφρύτερα πολυμερή μεταξύ όλων των βασικών πλαστικών (πυκνότητα: 0,908 g/cm<sup>3</sup>). Αυτό το χαρακτηριστικό το καθιστά ως την πιο κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές που είναι απαραίτητη η εξοικονόμηση βάρους. Είναι γνωστό για την αντοχή του στην τριβή και την ικανότητά του να απορροφά κραδασμούς, καθώς και για την ακαμψία (1,2 - 1,6 GPa) και την αντοχή του σε θραύση (20 - 40 MPa). Ωστόσο, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του υλικού είναι η αντοχή του σε χαμηλή θερμοκρασία είναι εύθραυστο κάτω από -20 °C. Επίσης έχει ευαισθησία στις ακτίνες UV που μπορούν να το αναγκάσουν να διαστέλλεται και να διογκώνεται γρήγορα σε χλωριωμένους διαλύτες. Παρόλα αυτά, το πολυπροπυλένιο χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή εξατομικευμένων 3D εκτυπωμένων ορθώσεων για ασθενείς με κάταγμα οστών, λόγω των χαρακτηριστικών του. Επιπλέον, το πολυπροπυλένιο χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικών σωλήνων, καλωδίων, συσκευασιών τροφίμων και ποτών, εξαρτημάτων αυτοκινήτων, καθώς και για την κατασκευή εξοπλισμού για τη βιομηχανία τροφίμων και φαρμάκων, λόγω της χαμηλής του τοξικότητας και της

ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση. Επίσης, είναι ένα από τα πλαστικά με τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή του και έτσι, έχει μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον σε σύγκριση με άλλα πλαστικά. [36]

## **2.8 Πολυαμίδια**

Τα πολυαμίδια είναι ένα πολυμερές υλικό που ανήκει στην κατηγορία των πλαστικών. Η τεχνολογία Selective Laser Sintering και η Fused Deposition Modeling είναι δύο διαφορετικές μέθοδοι παραγωγής αντικειμένων με χρήση πολυαμιδίων. Η τεχνολογία Selective Laser Sintering χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αντικειμένων με πολύπλοκες γεωμετρίες και ακρίβεια λεπτομέρειας, ενώ η τεχνολογία Fused Deposition Modeling είναι πιο απλή και οικονομική, καθιστώντας την κατάλληλη για την παραγωγή αντικειμένων σε μεγάλη ποσότητα.

Η βιοσυμβατότητα των πολυαμιδίων τα καθιστά κατάλληλα για τη χρήση τους σε εξαρτήματα που έρχονται σε επαφή με το δέρμα, όπως στην παραγωγή προστατευτικών εξαρτημάτων για τον ανθρώπινο οργανισμό ή σε ιατρικά εξαρτήματα. Επίσης, η αντοχή των πολυαμιδίων σε κραδασμούς και η ευκαμψία τους τα καθιστούν κατάλληλα για τη χρήση τους σε εξαρτήματα που υφίστανται μηχανικές και δυναμικές πιέσεις, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροδιαστημική. Τα πολυαμίδια έχουν καλή ισορροπία χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχή εφελκυσμού 10 MPa) και προσφέρουν σταθερότητα, ακαμψία, ευκαμψία και αντοχή σε κραδασμούς. Πρόσφατα, πολυαμίδια έχουν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με υδροξυαπατίτη για την παραγωγή πορωδών ικτιωμάτων με υψηλή φέρουσα ικανότητα για οστική αναγέννηση. [36]

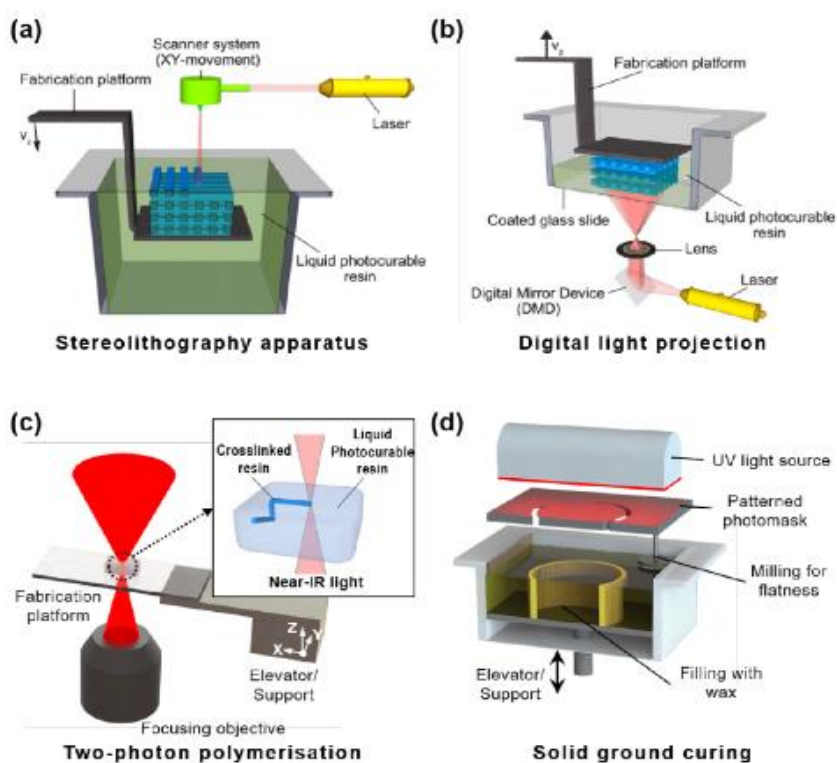
## **2.9 Θερμοπλαστική πολουρεθάνη (TPU)**

Το TPU είναι ένα εύκαμπτο, ανθεκτικό στην τριβή θερμοπλαστικό υλικό. Ωστόσο, δεν προσαρμόζεται καλά σε ζεστά περιβάλλοντα. Αυτός ο παράγοντας είναι αξιοσημείωτος, καθώς παρόλο που έχει μεγάλο εύρος εργασίας (210–350 °C), δεν μπορεί να αντέξει τις υψηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη πλευρά, το TPU εμφανίζει συντονίσιμες μηχανικές ιδιότητες, με συντελεστή Young που κυμαίνεται από 5 έως 100 MPa και επιμήκυνση σε θραύσματα 300%. Το TPU είναι ιδανικό για ευέλικτες, αλλά ανθεκτικές ορθωτικές συσκευές (π.χ. πέλματα, ορθώσεις ποδιών και στήριξη αντίχειρα).[36]

## **2.10 Πολυμερικά μελάνια με βάση την υδρογέλη**

Οι υδρογέλες έχουν πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία, την ιατρική, την κοσμητολογία και την περιβαλλοντική τεχνολογία. Στη βιομηχανία, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλλυντικών, φαρμάκων και ηλεκτρονικών συσκευών. Στην ιατρική, χρησιμοποιούνται για την αποδέσμευση φαρμάκων και για τη θεραπεία τραυμάτων και εγχειρήσεων. Στην κοσμητολογία, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κρεμών και λοσιόν με σκοπό την ενυδάτωση του δέρματος. Στην περιβαλλοντική τεχνολογία, χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση τοξικών ουσιών από το νερό και το έδαφος.

Οι υδρογέλες είναι δίκτυα πολυμερών με 3D διασταυρούμενη σύνδεση, τα οποία μπορούν να απορροφήσουν και να συγκρατήσουν μεγάλες ποσότητες νερού (> 90%). Συνήθως οι υδρογέλες συγκρατούνται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου, ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις, δεσμούς υδρογόνου που προκαλούνται από το νερό, αλληλεπιδράσεις van der Waals, ομοιοπολικές διασταυρώσεις ή ένας συνδυασμός των παραπάνω αλληλεπιδράσεων. Οι υδρογέλες παρέχουν ιδανικά συστήματα «μαλακού υλικού» για να μιμούνται μικροπεριβάλλοντα φυσικής εξωκυτταρικής μήτρας (ECM) λόγω της βιοσυμβατότητας, της συντονίσιμης μηχανικής και της αποδόμησής τους. Επιπλέον, είναι σε θέση να ενσωματώνουν εύκολα βιοδραστικές ενδείξεις ή άλλες βιομοριακές δομές όπως νουκλεϊκά οξέα, λιπαρά οξέα, γλυκάνες και αυξητικούς παράγοντες για να σχηματιστούν βιομιμητικά υπερμοριακά ικρίωματα. Τέλος, ορισμένες υδρογέλες είναι διατμητικές και θιξοτροπικές. [36]



**Εικόνα 2.10** Σχηματικές εικόνες συστημάτων προσθετικής κατασκευής υδρογέλης. [51]

Δεδομένων των συντονίσιμων ιδιοτήτων τους καθώς και των ευέλικτων μεθόδων κατασκευής τους, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι τα υλικά με βάση την υδρογέλη έχουν εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών βιοϊατρικής και μηχανικής, που κυμαίνονται από τη μηχανική ιστών και την αναγεννητική ιατρική έως την επεξεργασία λυμάτων και τη μαλακή ρομποτική. Τα συστήματα προσθετικής κατασκευής inkjet, με υποβοήθηση φωτός και εξώθησης είναι οι πιο κατάλληλες μέθοδοι για την εκτύπωση υδρογέλης και βιομελάνης. Γενικά, τα μελάνια υδρογέλης που διαμορφώνονται για βιοεκτύπωση απαιτούνται να ρέουν κάτω από μέτριες πιέσεις, να ζελατινοποιούνται γρήγορα, να έχουν κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες να διατηρούν



επαρκή ακεραιότητα μετά τη συσσώρευση προκειμένου να είναι αυτοδύναμα. Ως εκ τούτου, η απλούστερη προσέγγιση για το σχεδιασμό μελάνης υδρογέλης είναι η χρήση ενός διαλύματος πολυμερούς που ζελατινοποιείται αμέσως μετά την εκτύπωση, με απόκριση σε εξωτερικά ερεθίσματα όπως pH, θερμοκρασία, φως ή ιοντική συγκέντρωση.

Οι βιομελάνες πρέπει να είναι ασφαλείς και ανεκτικές στο σώμα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ιατρικές εφαρμογές. Για τον λόγο αυτό, η χρήση υλικών βιολογικής έμπνευσης συνήθως συνδυάζεται με τη χρήση υλικών που έχουν ήδη εγκριθεί από τις αρχές για ιατρική χρήση, όπως το κολλαγόνο ή το υαλουρονικό οξύ. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαραγωγή ιστών που έχουν υποστεί καταστροφή ή βλάβη, όπως για παράδειγμα ο καρδιακός ιστός μετά από έμφραγμα. Η χρήση βιομελανών για την αναπαραγωγή ιστών μπορεί να επιταχύνει την αποκατάσταση τους και να βοηθήσει στην αντιμετώπιση της ανεπάρκειας ιστών και οργάνων.

Ως εκτούτου, τα υλικά βιολογικής έμπνευσης στοχεύουν στη δημιουργία ικριωμάτων που μπορούν να ενσωματώσουν κύτταρα ή να υποστηρίξουν τις λειτουργίες ενός επιθυμητού οργάνου ή ιστού. Κατά συνέπεια, κατά την ανάπτυξη (ή την επιλογή) βιομελανών, πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη ο τύπος και η πυκνότητα των κυττάρων, οι φυσιολογικές πτυχές, οι λειτουργίες και οι μηχανικές ιδιότητες του επιθυμητού ιστού/οργάνου, επειδή οι ιδιότητες των βιομελανών επηρεάζουν την ανάπτυξη, τον πολλαπλασιασμό και τη διαφοροποίηση των κυττάρων, καθώς και τις δομές των κατασκευασμένων ιστών. Για να καλυφθούν αυτές τις ανάγκες, τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια ετερογενής βιβλιοθήκη υδρογέλης, με διαφορετικές ρεολογικές ιδιότητες, διαδικασία ζελατινοποίησης και βιολογική αλληλεπίδραση, ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν στις διαφορετικές ανάγκες της ανάπτυξης ιστών. (Πίνακας 2.10). [36]

Όνομα	Τύπος μορίου	Διάτμηση-Αραίωση	Βιολογικές Αλληλεπιδράσεις	Διαδικασία ζελατινοποίησης
Πρωτεΐνη κολλαγόνου	Πρωτεΐνη	Όχι	Υψηλή κυτταρική πρόσφυση	Θερμική/Ενζυματική
Ινώδες	Πρωτεΐνη	Όχι	Υψηλή κυτταρική πρόσφυση	Θερμική/Χημική/Ενζυματική
Ζελατίνη	Πρωτεΐνη	Ναι	Μέτρια πρόσφυση κυττάρων	Θερμική/Χημική/Ενζυματική
Spider Silk	Πρωτεΐνη	Ναι	Χαμηλή κυτταρική πρόσφυση	Αυτοσυναρμολογούμενη
Matrigel	Πρωτεΐνη	Ναι	Υψηλή κυτταρική πρόσφυση	Θερμική
Μεθακρυλαμίδιο ζελατίνης	Πρωτεΐνη	Ναι	Μέτρια πρόσφυση κυττάρων	Χημική/Ενζυματική

Αυτοσυναρμολογούμενα πεπτίδια	Πεπτίδιο	Ναι	Υψηλή κυτταρική πρόσφυση	Αυτοσυναρμολογούμενη
Αλας αλγινικού οξέως	Πολυσακχαρίτης	Ναι	Χαμηλή κυτταρική πρόσφυση	Ιονική/Χημικό
Χιτοζάνη	Πολυσακχαρίτης	Όχι	Χαμηλή κυτταρική πρόσφυση	Ιονική
Gellan Gum	Πολυσακχαρίτης	Ναι	Χαμηλή κυτταρική πρόσφυση	Ιονική
Αγαρόζη	Πολυσακχαρίτης	Ναι	Χαμηλή κυτταρική πρόσφυση	Θερμική
κ-Carrageenan	Πολυσακχαρίτης	Ναι	Χαμηλή κυτταρική πρόσφυση	Ιονική/ Θερμική
Μεθυλοκυτταρίνη	Πολυσακχαρίτης	Όχι	Χαμηλή κυτταρική πρόσφυση	Θερμική

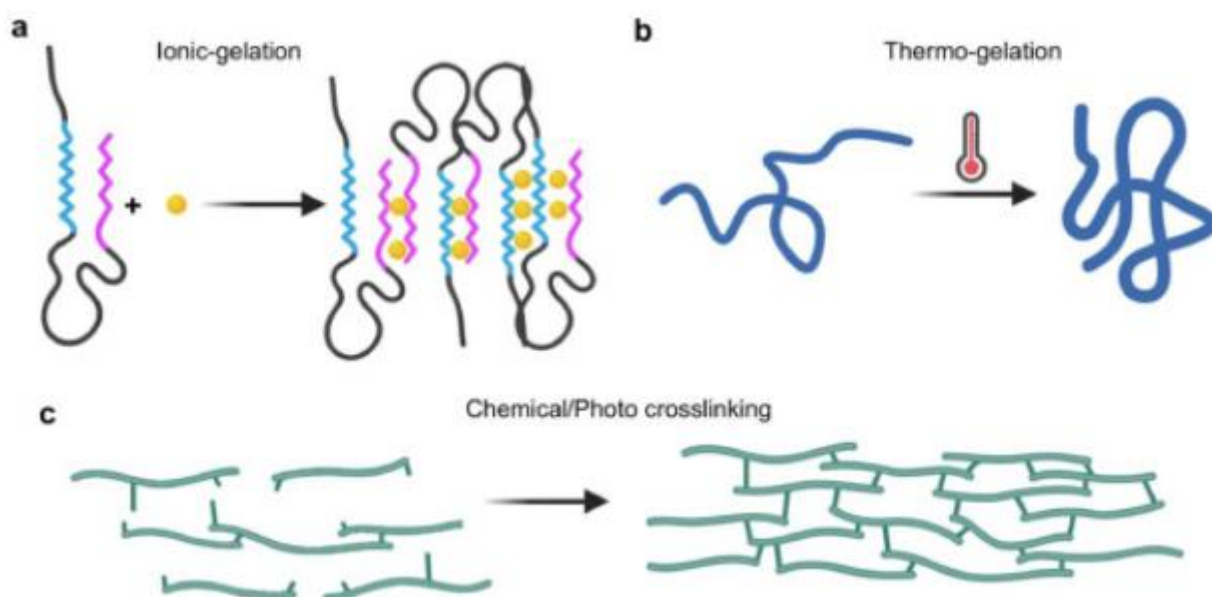
Πίνακας 2.10 Κοινά μελάνια υδρογέλης που χρησιμοποιούνται στη βιοεκτύπωση και οι βιολογικές και φυσικοχημικές τους ιδιότητες. [36].

Γενικά, οι κοινές υδρογέλες για τρισδιάστατη βιοεκτύπωση κατασκευάζονται από φυσικές ή συνθετικές πρωτεΐνες όπως κολλαγόνο, ινώδες, ζελατίνη, μετάξι αράχνης (Spider Silk), μεθακρυλαμίδιο ζελατίνης, πρωτεΐνες που προέρχονται από εξωκυτταρική μήτρα ECM (π.χ. Matrigel), αυτοσυναρμολογούμενα πεπτίδια ή από πολυσακχαρίτες όπως αλγινικό, χιτοζάνη, αγαρόζη, κ-καρραγενάνη και μεθυλοκυτταρίνη.

Οι ρεολογικές ιδιότητες αναφέρονται στη μελέτη της ροής και της μεταβολής της μορφής της ύλης υπό την επίδραση μιας δύναμης. Στη βιοεκτύπωση, οι ρεολογικές ιδιότητες των υλικών παίζουν κρίσιμο ρόλο για τη διευκόλυνση της χρήσης και της πιστότητας της διαδικασίας. Αυτό γιατί καθορίζουν την ταχύτητα εξώθησης, τη συνοχή του βιομελανιού, την εκτυπωσιμότητα, τη συμβατότητα και (εάν υπάρχει) τη δομική ακεραιότητα των ενθυλακωμένων κυττάρων. Η δυνατότητα εκτύπωσης ενός βιομελανιού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η σύνθεση του βιομελανιού, η ικανότητα αραίωσης διάτμησης και άλλες παράμετροι που αφορούν την διαδικασία εκτύπωσης. Ο συντελεστής αραίωσης διάτμησης (shear thinning) είναι ένας παράγοντας που αφορά τη θερμοκρασία, την πίεση και την ταχύτητα κίνησης του βιομελανιού κατά τη διάτμηση. Ένα βιομελάνι με υψηλό συντελεστή αραίωσης διάτμησης είναι πιο εύκαμπτο και ρέει ευκολότερα κατά τη διάτμηση, επιτρέποντας έτσι μια πιο αποτελεσματική διαδικασία εκτύπωσης. Ωστόσο, η δυνατότητα εκτύπωσης εξαρτάται επίσης από την μέθοδο εκτύπωσης, τις παράμετρους εκτύπωσης και την ποιότητα του εκτυπωτή. Τα βιομελάνια αραίωσης διάτμησης περιλαμβάνουν αλγινικό, αγαρόζη, κ-καρραγενάνη, μετάξι, αυτοσυναρμολογούμενα πεπτίδια και μεθακρυλαμίδιο ζελατίνης. Αντίθετα, τα φυσικά προερχόμενα βιομελάνια όπως κολλαγόνο ή ινώδες έχουν χαμηλό ιξώδες και συνδυάζονται με τα προαναφερθέντα υλικά για να έχουν χαρακτηριστικά αραίωσης διάτμησης. Από την άλλη πλευρά, οι φυσικοί παράγοντες βιομελάνων που αναπαράγουν την εξωκυτταρική μήτρα επιτρέπουν περισσότερες βιολογικές

αλληλεπιδράσεις καθώς παρουσιάζουν βιοδραστικές ενδείξεις και σημεία κυτταρικής προσκόλλησης που μπορούν να επηρεάσουν τις κυτταρικές αλληλεπιδράσεις. Για παράδειγμα, οι κατασκευασμένες υπερμοριακές υδρογέλες (όπως αυτοσυναρμολογούμενα πεπτίδια, πεπτιδικά αμφίφιλα) έχουν την ικανότητα να ενσωματώνουν θέσεις δέσμησης κυττάρων κατά τη διάρκεια ή μετά τη σύνθεσή τους, οι οποίες αλληλεπιδρούν συγκεκριμένα με τα κύτταρα και επηρεάζουν ορισμένες από τις βιολογικές τους λειτουργίες.

Τέλος, η διαδικασία ζελατινοποίησης των υδρογελών μπορεί να επηρεάσει τόσο τη βιωσιμότητα όσο και την ανάλυση εκτύπωσης. Οι πιο κοινές διεργασίες ζελατινοποίησης είναι η ιοντική, η θερμική, η ενζυματική, η φωτο-σταυροσύνδεση και η χημική διασταύρωση (εικόνα 2.10) [36]



Εικόνα 2.10 Συνήθεις διεργασίες ζελατινοποίησης υδρογέλης. (α) Ιονική ζελατινοποίηση, (β) θερμοπηκτωματοποίηση και (γ) χημική και φωτο-διασταυρούμενη σύνδεση. [36]

Οι ιοντικές αλληλεπιδράσεις επιτρέπουν την αυτόματη φυσική ζελατινοποίηση λόγω της παρουσίας ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων. Αυτή η φαινόμενη επίδραση διευκολύνει την εκτύπωση με μια πιο αποτελεσματική διαδικασία. Αυτές οι υδρογέλες είναι γνωστές ως πολυηλεκτρολύτες, οι οποίες περιέχουν καθαρά φορτία κατά μήκος και διασυνδέονται για να σχηματίσουν σύμπλοκα όταν συνδυάζονται με πολυσθενή κατιόντα ή ανιόντα ανάλογα με το φορτίο τους.

Για παράδειγμα, οι Freeman., είχαν ερευνήσει την επίδραση των ιοντικών διασταυρούμενων συνδέσμων και τη συγκέντρωσή τους στα τυπωμένα πλάτη αλγινικών νημάτων, παρατηρώντας ότι ανεξάρτητα από την επιλογή του παράγοντα διασύνδεσης ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$  ή  $\text{CaCO}_3$ ) χαμηλού μοριακού βάρους με αλγινικό ποσό 2,5 φορές περισσότερο από αυτό που χρειάζεται για το αλγινικό υψηλού μοριακού βάρους. Ταυτόχρονα, οι συγγραφείς ανέφεραν ότι το  $\text{CaSO}_4$  παρήγαγε σημαντικά πιο άκαμπτα ικρίσματα. Συνολικά, η ιοντική

ζελατινοποίηση επιτρέπει σταθερό ιξώδες κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης λόγω αναστρέψιμων αλληλεπιδράσεων, αλλά οι τελικές κατασκευές είναι μηχανικά αδύναμες (επειδή συγκρατούνται μεταξύ τους από μη ομοιοπολικές αλληλεπιδράσεις). Συνεπώς, απαιτείται διασύνδεση μετά τη διαδικασία.

Η θερμική ζελατινοποίηση γίνεται σε περιβάλλον αυξανόμενης θερμοκρασίας. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στη συσσώρευση των δομικών στοιχείων για να σχηματιστούν σύμπλοκα υψηλότερου μοριακού βάρους. Συνήθως, η υδρόφοβη κατάρρευση και οι δισουλφιδικές γέφυρες παίζουν βασικό ρόλο κατά τη διάρκεια της ζελατινοποίησης. Αυτή η διαδικασία ζελατινοποίησης είναι απλή και εξαιρετικά συμβατή με βιολογικά συστήματα και περιλαμβάνει δυναμικές μη ομοιοπολικές αλληλεπιδράσεις.

Οι πιο σταθερές και μηχανικά συντονιζόμενες υδρογέλες λαμβάνονται μέσω της χημικής και της φωτο-σταυροσύνδεσης. Με τη φωτο-σταυροσύνδεση, ο πολυμερισμός των βιομελανών συμβαίνει μετά την εξώθηση και δεν επηρεάζει το ιξώδες τους. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η έκθεση σε ελεύθερες ρίζες μπορεί να επηρεάσει τη βιωσιμότητα των κυττάρων. Αντίθετα, οι συμβατικοί χημικοί μηχανισμοί διασταύρωσης περιλαμβάνουν προσθήκη τύπου Michael, αλδεϋδες, αντιδράσεις συμπύκνωσης μεταξύ ομάδων υδροξυλίου ή αμίνης με καρβοξυλικά οξέα ή παράγωγα, εκλεκτικές ορθογώνιες αντιδράσεις, αντιδράσεις θειολενίου και αντίδραση κυκλοπροσθήκης αζιδίου-αλκινίου. [36]

## **2.11 Υλικά με βάση τα κεραμικά**

Υλικά με βάση τα κεραμικά όπως ο υδροξυαπατίτης και το φωσφορικό ασβέστιο χρησιμοποιούνται ευρέως για ιατρικές εφαρμογές λόγω της υψηλής ακαμψίας τους (393 GPa) και της ομοιότητάς τους με την ορυκτή φάση των οστών, καθιστώντας τα πολύ χρήσιμα στην ορθοπεδική και οδοντιατρική χειρουργική. Παρόλα αυτά, οι διαθέσιμες μέθοδοι προσθετικής κατασκευής περιορίζονται στην άμεση εκτύπωση κεραμικών λόγω των υψηλών θερμοκρασιών τήξης τους, που είναι πάνω από 2000 °C, πολύ πιο υψηλές από το εύρος των εκτυπωτών FDM. Μια πιθανή επιλογή είναι η χρήση τους ως πρόσθετο σε σκόνη σε ένα σύνθετο σύστημα (με PLA για παράδειγμα), το οποίο καθιστά δυνατή τη χρήση μεθόδων FDM.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι ξεκάθαρο ότι υπάρχει ευρύ φάσμα χρησιμοποίησης διαφόρων υλικών στον τομέα της ιατρικής, συγκεκριμένα στην βιοεκτύπωση. Ο συνδυασμός αυτών με τον τομέα της μηχανικής έχει φέρει επανάσταση στον τομέα της βιομηχανίας καθώς επιφέρει μεγάλες εξελίξεις στα έξυπνα συστήματα παραγωγής όπως για παράδειγμα τους ρομποτικούς χειριστές που μιμούνται την ανθρώπινη συμπεριφορά. [36]

## **2.12 Εύκαμπτα ρομπότ και προσθετική κατασκευή**

Η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση αποτελεί μια πρωτοφανή εποχή αλλαγής και καινοτομίας, καθώς συνδυάζει τις ψηφιακές τεχνολογίες με την αυτοματοποίηση και τη δικτύωση. Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης, της μηχανικής μάθησης και των αισθητήρων, καθώς και η εκτεταμένη χρήση της τεχνολογίας

cloud computing, δημιουργούν νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της απόδοσης σε πολλούς τομείς. Οι καινοτομίες που αναπτύσσονται στο πλαίσιο αυτής της επανάστασης, όπως η προσθετική κατασκευή και η νανοτεχνολογία, έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την κατασκευή προϊόντων και την ανταγωνιστικότητα της βιομηχανίας. Τα έξυπνα υλικά και οι αισθητήρες μπορούν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη καλύτερων και πιο αποδοτικών προϊόντων, ενώ η τεχνολογία blockchain μπορεί να διευκολύνει τις διαδικασίες διαχείρισης του εφοδιαστικού αλυσίδας και να βελτιώσει τη διαφάνεια και την ασφάλεια σε αυτές. Η χρήση της τεχνολογίας ρομποτικής και της εικονικής πραγματικότητας μπορεί να βελτιώσει την εκπαίδευση και την εκπαιδευτική εμπειρία, ενώ η τεχνολογία ιατρικής μπορεί να βοηθήσει στην παροχή καλύτερης περίθαλψης και στην αντιμετώπιση των προκλήσεων της υγείας. Ωστόσο, η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση επιφέρει επίσης ανησυχίες σχετικά με την ανεργία και την ανισότητα. Η αυτοματοποίηση και η ρομποτική μπορεί να αντικαταστήσουν ανθρώπινες θέσεις εργασίας, ενώ η τεχνολογική ανάπτυξη μπορεί να αυξήσει την απόσταση μεταξύ των πλουσίων και των φτωχών.

Οι επιπτώσεις των τεχνολογικών εξελίξεων στα έξυπνα εργοστάσια είναι ακόμη υπό συζήτηση και εξελίσσονται συνεχώς. Από τη μία πλευρά, η αυτοματοποίηση και η χρήση ρομποτικής τεχνολογίας μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγικότητας και της ακρίβειας των παραγόμενων προϊόντων. Από την άλλη πλευρά, η αυτοματοποίηση μπορεί να οδηγήσει στη μείωση των θέσεων εργασίας, με αναπόφευκτη την ανάγκη για επανεκπαίδευση των εργαζομένων και την αναδιοργάνωση των επιχειρήσεων. Η υιοθέτηση της έξυπνης κατασκευής και η χρήση ενσωματωμένων αισθητήρων και αυτοματισμού μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη ακρίβεια και παρακολούθηση των διαδικασιών παραγωγής, και να βοηθήσει στην πρόληψη σφαλμάτων και στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των αποθεμάτων. Η εξέλιξη της υπολογιστικής ισχύος, η επαυξημένη πραγματικότητα και οι τεχνολογίες εικονικής πραγματικότητας μπορούν να βοηθήσουν στην εκπαίδευση των εργαζομένων και στη βελτίωση της ασφάλειας στην εργασία. Ωστόσο, οι επιπτώσεις των τεχνολογικών εξελίξεων στα έξυπνα εργοστάσια πρέπει να αξιολογούνται με προσοχή. Η αποτυχία της τεχνολογίας ή η κακή χρήση της μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα ασφαλείας, ενώ η υπερβολική εξάρτηση από την τεχνολογία μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία αντιμετώπισης κρίσιμων καταστάσεων. Επιπλέον, η χρήση των έξυπνων εργοστασίων μπορεί να έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας και η αύξηση των αποβλήτων. Αυτό επισημαίνει την ανάγκη για βιώσιμη κατασκευή και παραγωγή στα έξυπνα εργοστάσια. Συνολικά, οι τεχνολογικές εξελίξεις στα έξυπνα εργοστάσια παρέχουν πολλές ευκαιρίες για βελτίωση της παραγωγικότητας και της αποτελεσματικότητας, αλλά πρέπει να αξιολογούνται με προσοχή.

Η συγχώνευση των μηχανισμών και των υλικών μπορεί να φανεί σε μία από τις πρόσφατες εξελίξεις στα έξυπνα συστήματα παραγωγής, τα οποία περιλαμβάνουν ρομποτικούς χειριστές που μιμούνται την ανθρώπινη συμπεριφορά. Τα μελλοντικά έξυπνα συστήματα κατασκευής θα περιλαμβάνουν διεπαφές ανθρώπων και ρομπότ, είτε σε μορφές προσθετικής βοήθειας, είτε με την αύξηση των ανθρώπινων δυνατοτήτων. Η ενεργοποίηση της αίσθησης της αφής για ρομπότ και μηχανές θα μπορούσε να είναι μια τεχνολογία που θα αλλάξει τη ζωή του ανθρώπου, με τη βοήθεια καινοτομιών όπως τα ρομποτικά δέρματα. Οι μαλακοί ρομποτικοί

ενεργοποιητές αποτελούν σημαντική τεχνολογική πρόοδο για πολλές εφαρμογές, όπως ο χειρισμός ευαίσθητων και εύθραυστων αντικειμένων, καθώς και η συγκομιδή ώριμων φρούτων. Οι υπάρχουσες μέθοδοι ενεργοποίησης των μηχανισμών αποτελούνται από ρευστά ή πνευματικά συστήματα, τα οποία όμως μπορεί να είναι ογκώδη για τα συστήματα παραγωγής. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές διερευνούν τη χρήση μικρορευστικών συσκευών ως πιθανή μέθοδο ενεργοποίησης των μαλακών ρομποτικών λαβών. Αυτές οι λαβές θα χρησιμοποιηθούν ως τελικοί τελεστές στη ρομποτική για την κατασκευή πιο ευαίσθητων και ακριβών συστημάτων ελέγχου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12 [16],[18],[16],[19], [22], [23], [24].



**Εικόνα 2.12** Τεχνητό δέρμα σε ρομποτικά δάχτυλα εμπνευσμένο από τη συμπεριφορά του ανθρώπινου δέρματος (Πανεπιστήμιο της Ουάσιγκτον και UCLA) [30].

## Κεφάλαιο 3

### 3 Νανοσύνθετα υλικά στην προσθετική κατασκευή

Η Νανοτεχνολογία έχει ανοίξει έναν νέο κόσμο δυνατοτήτων στην επιστήμη και την τεχνολογία, και η προσθετική κατασκευή αποτελεί μόνο μία από τις πολλές εφαρμογές της. Οι εξελίξεις στη Νανοτεχνολογία έχουν ήδη οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση και λειτουργικότητα σε πολλούς τομείς, όπως η ηλεκτρονική, η ιατρική και η ενέργεια. Στον τομέα της προσθετικής κατασκευής, η Νανοτεχνολογία μπορεί να επιτρέψει στους κατασκευαστές να δημιουργήσουν αντικείμενα με ακόμα μικρότερες λεπτομέρειες και πιο ακριβείς διαστάσεις. Αυτό επιτρέπει στους σχεδιαστές να δημιουργούν σχέδια με περίπλοκες γεωμετρίες και λεπτομέρειες, κάτι που παλαιότερα ήταν αδύνατο λόγω των περιορισμών των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής.

Η Νανοτεχνολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με τον έλεγχο και την χρήση της ύλης σε μικρότερη κλίμακα, συγκεκριμένα σε ατομικό, μοριακό και υπερμοριακό επίπεδο. Η συνδυασμένη εφαρμογή αυτών των τομέων μπορεί να δημιουργήσει ευρεία ποικιλία υλικών για καινοτόμες εφαρμογές. Σε ορισμένες από αυτές τις εφαρμογές, η χρήση νανοϋλικών μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία περίπλοκων δομών και σχημάτων, και να βελτιώσει τις ιδιότητες τους. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε νέες πιθανές εφαρμογές στις βιολογικές επιστήμες, τη γεωργία και την ιατρική. Η χρήση νανοϋλικών στην προσθετική κατασκευή μπορεί επίσης να καταστήσει την τεχνολογία πιο προσιτή και βιώσιμη όσον αφορά την επεξεργασία των υλικών. Τα τελευταία χρόνια, έχουν σημειωθεί σημαντικές εξελίξεις στην χρήση των νανοϋλικών για διάφορες εφαρμογές.

Έχει αποδειχθεί πως η νανοτεχνολογία είναι μια βασική τεχνολογία που θα φέρει καινοτομία στις επιστήμες των υλικών. Καθημερινά, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερα νανοϋλικά σε προϊόντα όπως κινητά τηλέφωνα, χρώματα, προϊόντα ομορφιάς και εξαρτήματα αεροσκαφών. Αυτό είναι αποτέλεσμα της κατανόησης των επιστημόνων και μηχανικών για την επεξεργασία των υλικών προκειμένου να βελτιώσουν τις ιδιότητές τους. Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει εύκολα την κατασκευή υλικών διαφορετικών μεγεθών, και αυτό ανοίγει τον δρόμο για τη δημιουργία οπτικά ενεργών αισθητήρων, ρομποτικών βραχιόνων, θερμομονωτικών υλικών, ευέλικτων ηλεκτρονικών, μικροηλεκτρονικών και μηχανικών συστημάτων, ηλιακών κυττάρων και κριωμάτων. Η ενσωμάτωση των νανοϋλικών στην προσθετική κατασκευή δημιουργεί νέες εφαρμογές προηγμένης τεχνολογίας.

Η επιστήμη της νανοτεχνολογίας περιλαμβάνει δύο βασικούς τομείς: (1) τη δομή και τα υλικά σε κλίμακα νανομέτρων και (2) την αναζήτηση και εφαρμογή μοναδικών φαινομένων σε αυτήν την κλίμακα για τη δημιουργία χαρακτηριστικών που προσδίδουν νέα ή βελτιωμένη λειτουργικότητα. Η νανοκλίμακα αναφέρεται συνήθως σε μήκη κλίμακας μεταξύ 1 nm και 100 nm. Η έννοια της νανοτεχνολογίας έχει επηρεαστεί σημαντικά από τρία γεγονότα. Το πρώτο ήταν η ομιλία του Richard Feynman το 1959 με τίτλο "Στο κάτω μέρος υπάρχει

ένας υπέροχος χώρος", που άνοιξε τον δρόμο για την ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας. Το δεύτερο γεγονός ήταν η ανακάλυψη του μικροσκοπίου σάρωσης σήραγγας το 1981, το οποίο επέτρεψε την πρώτη απεικόνιση σε ατομικό-μοριακό επίπεδο. Τέλος, το 1990, το Ερευνητικό Κέντρο IBM Almaden πραγματοποίησε επιτυχώς την πρώτη ατομική επιχείρηση, που είχε μεγάλη επίδραση στην ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας και των πρακτικών λειτουργιών της.

Η νανοβιομηχανία είναι μια αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική μέθοδος κατασκευής υλικών, δομών, συσκευών και συστημάτων. Είναι μια ουσιαστική γέφυρα μεταξύ των ανακαλύψεων της νανοεπιστήμης και των προϊόντων νανοτεχνολογίας του πραγματικού κόσμου. Η νανοβιομηχανία είναι η βάση της νανοτεχνολογίας και περιλαμβάνει διαδικασίες για τον έλεγχο των δομών των υλικών, των εξαρτημάτων, των συσκευών και συστημάτων σε νανοκλίμακα (1 nm–100 nm) σε μία, δύο και τρεις διαστάσεις. Η κατασκευή με νανομετρική ακρίβεια και νανομετρική κλίμακα γενικά είναι κάτι ακόμα που περιλαμβάνεται στην νανοβιομηχανία. Επίσης υπάρχουν άλλοι δύο μέθοδοι, η νανομηχανική και η νανομετρολογία που σημαίνει διαδικασία κατασκευής και αξιολόγηση, αντίστοιχα. Τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από τη νανοβιομηχανία μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες ως εξής:

- Εξαρτήματα με νανο- μικροδομές με μεγέθη χαρακτηριστικών σε νανομετρική κλίμακα. (τα μέρη είναι μικροσκοπικά ή μακροσκοπικά).

- Μέρη με γεωμετρική ακρίβεια σε νανομετρικό επίπεδο. Οι συσκευές είναι σε μακροσκοπική κλίμακα. [32], [33].

### 3.1 Βελτιώσεις στις μηχανικές ιδιότητες

Η δυνατότητα χρήσης διαφορετικών ειδών υλικών, όπως κράματα μνήμης σχήματος, νανοςύνθετα υλικά και νανοϋλικά άνθρακα, έχει επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής των τρισδιάστατων εκτυπωμένων υλικών. Επιπλέον, έχουν σημειωθεί σημαντικές βελτιώσεις στην αντοχή στον εφελκυσμό και τη διαφάνεια των υλικών και των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δομών με την προσθήκη νανοσωλήνων άνθρακα, νανοινών άνθρακα, οξειδίου γραφενίου, νανοσωματιδίων μετάλλων και νανοσωματιδίων οξειδίου μετάλλου στην πολυμερή μήτρα.

Οι νανοσωλήνες, τα φύλλα οξειδίου του γραφενίου και τα νανοσωματίδια άνθρακα έχουν εξαιρετικές δυνατότητες αντοχής και μηχανικών ιδιοτήτων λόγω της δομής τους σε νανοκλίμακα. Επίσης, έχουν εξαιρετικές θερμικές ιδιότητες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως σε ηλεκτρονικά, φωτονικά, μηχανικά και ιατρικά πεδία. Η προσθήκη MWCNT στη ρητίνη έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Η αύξηση στην αντοχή σε εφελκυσμό και στην τάση θραύσης οφείλεται στην ικανότητα των MWCNT να ενισχύουν τη μηχανική αντοχή του υλικού με τη μορφή της σκληρότητας και της αντοχής στην τάση. Επιπλέον, με αυτή την επεξεργασία έχει μια καλύτερη θερμική σταθερότητα σε θερμοκρασίες άνω των 200°C με υψηλότερη φόρτωση μάζας MWCNT στη ρητίνη. Αν και έχει γίνει σημαντική



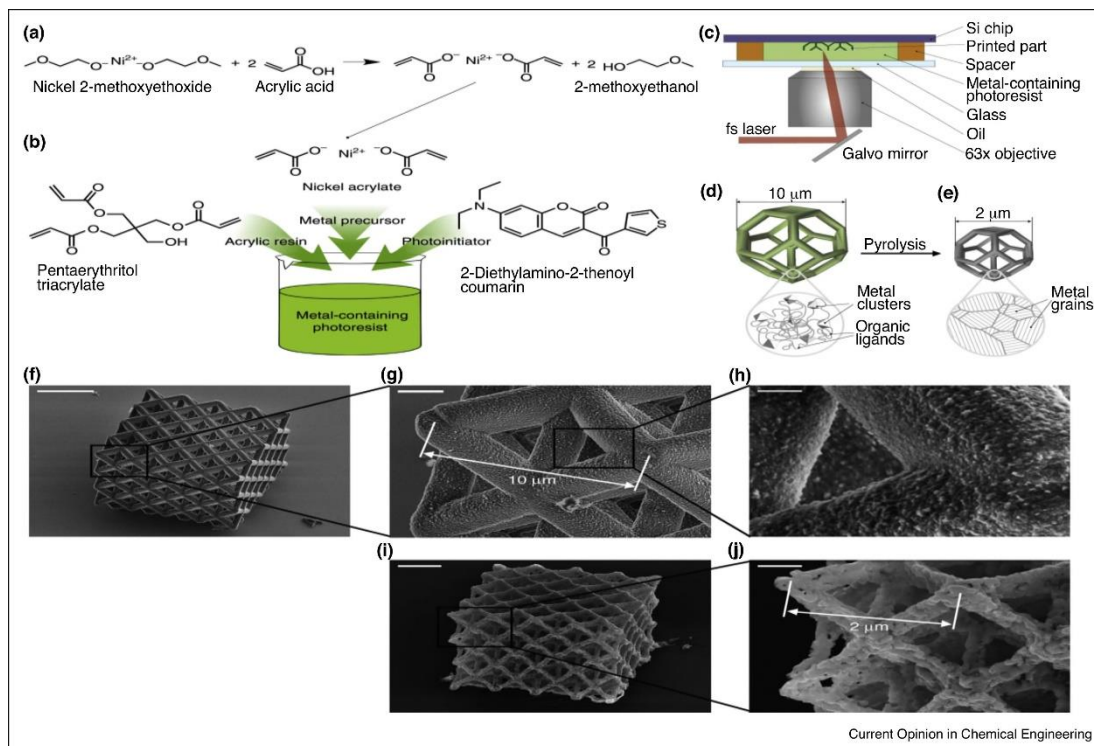
έρευνα για τη βελτίωση της τάσης θραύσης και της αντοχής σε εφελκυσμό, υπάρχει ένα τεράστιο κενό στη σταθεροποίηση των νανοπληρωτικών με υψηλότερη φόρτιση μάζας και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στη ρητίνη. Αυτό είναι ένα σημαντικό ζήτημα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές και οι μηχανικοί στον τομέα της χρήσης νανοπληρωτικών για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Μια πιθανή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση προστατευτικών μονωτικών στρώσεων στα νανοσωματίδια, που μπορούν να μειώσουν τον αριθμό των ανοικτών πλήγματος στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων. Επιπλέον, η χρήση πολυμερών που είναι συμβατά με τα νανο-σωματίδια μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα τους στο μέσο. Παρόλο που οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT) έχουν εντυπωσιακές μηχανικές ιδιότητες, η εμπορική τους παραγωγή είναι δαπανηρή και απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Ως εναλλακτική λύση, τα φύλλα οξειδίου γραφενίου αναδεικνύονται ως πολλά υποσχόμενα, λόγω της σχετικά αποδοτικής και ευκολότερης στρατηγικής παραγωγής τους.

Σε μια προσέγγιση για τη δημιουργία ενός ποιοτικότερου και σχετικά χαμηλού κόστους υλικού, επιστήμονες έχουν επεξεργαστεί την εμπορική στερεολιθογραφική ρητίνη με οξείδιο γραφενίου. Με την προσθήκη 0,2% GO κατά μάζα, παρατηρείται σημαντική αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό κατά 62% και της επιμήκυνσης κατά 12,8%. Εκτός από την αύξηση της αντοχής το υλικό παρουσίασε επίσης καλύτερη ολκιμότητα. Σε μια άλλη προσέγγιση για την παραγωγή βαφής καλύτερης ποιότητας, η προσθήκη 2% κατά βάρος με πολυμερές ABS είχε αυξήσει το μέτρο του κατά 37% και την αντοχή σε εφελκυσμό κατά 24% σε σύγκριση με το ABS από μόνο του. Παρόλο που έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθεί τόσο η ανάμειξη διαλυτών όσο και η άμεση ανάμειξη, μόνο η ανάμειξη διαλυτών ήταν επιτυχής με ένα πεδίο βελτίωσης. Το νανοσύνθετο υλικό κατασκευασμένο με ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο με πολύ χαμηλή φόρτιση μάζας 0,06 wt% οξειδίου του γραφενίου αύξησε σημαντικά την αντοχή σε αστοχία και ακαμψία σε 14% και 20%, σκληρότητα σε 20% και 55%, αντοχή σε θραύση σε 3,5% και 10% και ακαμψία σε 6% και 15% για οριζόντια και διαμήκη διάταξη, αντίστοιχα.

Οι ίνες άνθρακα έχουν εξαιρετικές ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή σε κάμψη και αντοχή στη διάβρωση, καθιστώντας τις ιδανικές για χρήση σε εξαρτήματα προσθετικής κατασκευής όπως αεροσκάφη, αυτοκίνητα, ποδήλατα και αθλητικό εξοπλισμό. Επιπλέον, οι ίνες άνθρακα είναι ελαφριές και έχουν υψηλή αντοχή στην καταπόνηση, καθιστώντας τις ιδανικές για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή απόδοση. Αυτό γίνεται με την ενίσχυση των δομικών ιδιοτήτων της πολυμερούς μήτρας χρησιμοποιώντας ίνες άνθρακα ως πληρωτικά. Για παράδειγμα το νάιλον ενισχύθηκε με ανθρακονήματα και αύξησε τη δομική του απόδοση δύο φορές περισσότερο σε σύγκριση με τα μέρη που κατασκευάζονταν μόνο από νάιλον. Όταν το Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP) εκτυπώθηκε τρισδιάστατα χρησιμοποιώντας την Fused Filament Fabrication (FFF), ο προσανατολισμός και η κατανομή των ινών άνθρακα στη μήτρα του πολυμερούς ήταν ομοιόμορφος όπως προβλεπόταν.

Εκτός από τις πρόσφατες εξελίξεις στα νανουλικά υλικά από άνθρακα, έχει σημειωθεί σημαντική ανάπτυξη στη χρήση μεταλλικών και κεραμικών νανοσωματιδίων προκειμένου να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Μια από τις τελευταίες προσεγγίσεις είναι η επίστρωση αιωρήματος νανοαργύρου πάνω από το στρώμα μικροαργύρου με χρήση εκτύπωσης inkjet και έπειτα πυροσυσσώματωση, η οποία παρέχει υψηλή δύναμη συγκόλλησης, με αποτέλεσμα το 3D εκτυπωμένο προϊόν να αντέχει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος οδηγεί σε βελτιωμένη όγκιμη εκτύπωση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους εκτύπωσης. [22],[23],[33],[34]



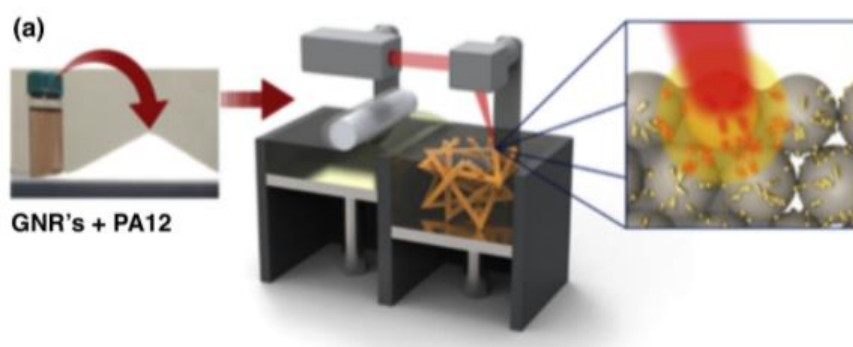
Εικόνα 3.1. Διαδικασία για την προσθετική κατασκευή μετάλλων σε νανοκλίμακα. [33].

### 3.1.2 Βελτιώσεις στις οπτικές ιδιότητες

Μετά από πολλές επιστημονικές έρευνες πάνω στα δομικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή, αποδείχθηκε ότι το χρώμα παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του τελικού προϊόντος στην αγορά. Έτσι, διεξήχθη έρευνα για τη βελτίωση των οπτικών ιδιοτήτων των 3D εκτυπωμένων μερών με τη χρήση νανοσωματιδίων χρυσού και νανοράβδου σε διαφορετικές πολυμερής μήτρες. Συνήθως, για την κατασκευή αντικειμένων σε μαύρο και γκρι χρώμα, χρησιμοποιούνται ευαισθητοποιητές με βάση τον άνθρακα. Η παραγωγή διαφανών και χρωματιστών αντικειμένων με βάση τον άνθρακα αποτελεί σχετικά δύσκολη διαδικασία. Αυτό αντιμετωπίστηκε χρησιμοποιώντας πυρίτιο επικαλυμμένο με νανοσωματίδια χρυσού (GNRs). Το επικαλυμμένο με GNRs πυρίτιο αναμίχθηκε μηχανικά με σκόνες πολυαμιδίου για να παραχθούν τα πολύχρωμα σύμπλοκα.

Η επικάλυψη του πυριτίου με νανοσωματίδια χρυσού (GNR) οδήγησε σε σημαντική μείωση της ενέργειας που απαιτείται για τη σύντηξη. Εκτός από την παραγωγή πολλαπλών έγχρωμων αντικειμένων, αυτά τα πλασμονικά νανοσωματίδια αποδείχθηκαν πιο φωτεινά από τον συμβατικό άνθρακα. Τα νανοσωματίδια χρυσού έχουν ενσωματωθεί μέσα στη μήτρα του πολυμερούς αντί να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερική επίστρωση. Αυτό δείχνει ένα μοναδικό οπτικό φαινόμενο, που εμφανίζει διαφορετικά χρώματα (Καφέ) κατά την ανάκλαση και (Μωβ) στην μετάδοση του φωτός.

Μια νέα προσέγγιση προκειμένου να εξαλειφθεί το φαινόμενο της απομίμησης των εξαρτημάτων που εκτυπώνονται τρισδιάστατα, είναι η δημιουργία νανοσωματιδίων με τη χρήση χρωματικής κωδικοποίησης. Αυτή η νέα μέθοδος χρησιμοποιεί τον φωτισμό των λανθανοειδών νανοσωματιδίων παρουσία πηγής φωτός (για παράδειγμα 254 nm [Tb<sup>3+</sup>] και 365 nm [Eu<sup>3+</sup>]) με διαφορετικά χρώματα. Παρακάτω αποικονομούνται τα βασικά συστατικά που αναμιγνύονται για να σχηματίσουν τις νανοσύνθετες σκόνες και τη διαδικασία SLS, τονίζοντας τη θερμαντική επίδραση των GNR στην εισροή. [33]



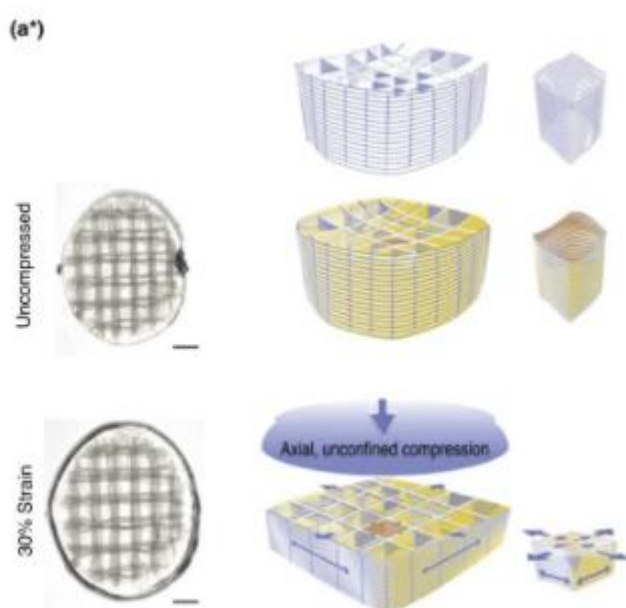
**Εικόνα 3.1.2** προσθετική κατασκευή με φωτοθερμικούς ευαισθητοποιητές νανομηχανικής. [33].

### 3.1.3 Βελτιώσεις στις βιολογικές ιδιότητες

Η βιοσυμβατότητα, η χαμηλή τοξικότητα και η σταθερότητα αποτελούν ζωτικές ιδιότητες για βιολογικές εφαρμογές, όπως η μηχανική ιστών και η βιοανάλυση. Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει την εφαρμογή αυτών των ιδιοτήτων στον σχεδιασμό και την κατασκευή βιολογικών αντικειμένων με ευκολία, χαμηλό κόστος και ευκολία χρήσης. Ειδικότερα, η ανάπτυξη τρισδιάστατων ικριωμάτων έχει δώσει στη βιοχημική ερευνητική κοινότητα τη δυνατότητα να αξιολογήσει τις βιολογικές αποκρίσεις και λειτουργίες των κατασκευασμένων ιστών σε ένα προσαρμοσμένο περιβάλλον.

Το βιο-ανανεώσιμο πολυμερές PA-11 και το νανογεμιστικό σεπιόλιθου χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ενός νανοσύνθετου υλικού που χρησιμοποιείται για εκτύπωση με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και σταθερότητα διαστάσεων. Υπάρχει ακόμη μεγάλο πεδίο για την ανάπτυξη βιώσιμων υλικών για την προσθετική κατασκευή. Παρακάτω απεικονίζονται ικριώματα από μικροΐνες PCL (μπλε) που χρησιμεύουν ως ενισχυτικό συστατικό στην υδρογέλη (κίτρινο). Όταν εφαρμόζεται αξονική συμπίεση στις ενισχυμένες

υδρογέλες, οι άκαμπτες λεπτές ίνες του ικριώματος τεντώνονται στην πλευρική μετατόπιση της υδρογέλης. Αυτός ο μηχανισμός παρέχει τα σύνθετα. [33]



Εικόνα 3.1.3 Απεικόνιση ικριωμάτων από μικροΐνες PCL [33].

### 3.1.4 Νέες μέθοδοι για προσθετική κατασκευή με νανοσύνθετα υλικά

Η κατασκευή περίπλοκων δομών με πολλά υλικά αποτελεί μια πρόκληση στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα κατάλληλων υλικών και τεχνολογιών εκτύπωσης. Οι υψηλής ανάλυσης εκτυπωτές προσθετικής κατασκευής είναι ακόμα σχετικά ακριβοί, και για αυτό η εκτύπωση περίπλοκων δομών με πολλά υλικά είναι ακόμα περιορισμένη. Ωστόσο, η χρήση νανοσυνθετικών υλικών και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών εκτύπωσης μπορούν να βοηθήσουν στην επίλυση αυτών των προβλημάτων και στη βελτίωση της προσβασιμότητας της προσθετικής κατασκευής σε ευρύ φάσμα υλικών και εφαρμογών.

Οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν οργανική μελάνη με νανοσωματίδια  $\text{TiO}_2$  για να δημιουργήσουν μια δομή παρόμοια με πλέγμα με στρώσεις μέσω ενός ρομποτικά ελεγχόμενου συστήματος Direct Ink Writing (DIW). Η δομή που δημιουργήθηκε με χρήση οργανικής μελάνης και νανοσωματιδίων  $\text{TiO}_2$  με την τεχνική της DIW, έχει αποδειχθεί ότι είναι μηχανικά σταθερή σε κάμψη και τάνυση. Κατά τη διαδικασία εξόθησης, το οργανικό μελάνι διατήρησε το σχήμα του υλικού και απέδειξε την ενισχυμένη μηχανική σταθερότητα του. Αυτό καθιστά τα υλικά αυτά ιδανικά για την κατασκευή μηχανικών ιστών. Επιπλέον, μέσω της τεχνικής ευθυγράμμισης ινών, κατασκευάστηκε ένα σύνθετο πολυμερές ενισχυμένο με οξείδιο του αλουμινίου. Η εκτύπωση που προέκυψε από αυτό το σύστημα είχε κατακόρυφα ευθυγραμμισμένα νανοσύρματα που ενίσχυαν την αντοχή σε εφελκυσμό κατά 28%, σε σχέση με το σύνθετο πολυμερές που ήταν τυχαία προσανατολισμένο.

Η χρήση τεχνολογίας τήξης δέσμης λέιζερ για την παραγωγή τρισδιάστατων δομών από στρώμα σκόνης υλικού αντιπροσωπεύει μια καινοτόμα προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς. Μια επιπλέον προσθήκη στη διαδικασία παραγωγής είναι η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων  $Al_2O_3$  στην επιφάνεια του χάλυβα, προσδίδοντας βελτιωμένες ιδιότητες στο υλικό. Η τεχνική αυτή δεν βελτιώνει μόνο τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού, αλλά και την αντοχή του σε θερμότητα και φθορά, αυτό θα έχει σημαντικό αντίκτυπο σε μελλοντικές εφαρμογές.

Βελτιώσεις υπήρξαν και στην ενεργειακή απόδοση με την τεχνική SLS, όπου τα νανοσωματίδια χρυσού προσροφήθηκαν από την επιφάνεια του οξειδίου του ψευδαργύρου με διαφορετικά φορτία μάζας σε συγκεντρώσεις 0,1% και άνω. Αυτή η προσθήκη GNPs σε ZnO αυξάνει τη σύντηξη με λέιζερ ημιαγώγιμων υλικών και ενισχύει την παραγωγικότητα στην προσθετική κατασκευή. Οι κατασκευασμένες μικρο/νανο συσκευές έχουν επιπλέον εφαρμογές στην ενεργειακή αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας. Η χρήση νανοδομημένων υλικών στις μπαταρίες μπορεί να αυξήσει την πυκνότητα ενέργειας και να μειώσει τη χωρητικότητα φόρτισης. Επιπλέον, οι νανοδομημένες συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων, όπως η μεταφορά ηλιακής ενέργειας από ένα σύστημα φωτοβολταϊκών στη διανομή ενέργειας στο δίκτυο. Επιπλέον, η χρήση νανοδομημένων υλικών μπορεί να αυξήσει την απόδοση των ηλεκτρονικών συσκευών, όπως οι οθόνες και τα LED φώτα. Οι εν λόγω εφαρμογές έχουν σημαντικές συνέπειες για την ενεργειακή απόδοση και την αειφορία των συστημάτων ενέργειας.

Ένας οικονομικός, εύκαμπτος χωρητικός αισθητήρας δημιουργήθηκε από ερευνητές με τη χρήση ενός σύνθετου CNT-PDMS για ηλεκτρόδια. Ο αισθητήρας αυτός έχει όριο ανίχνευσης  $1 \times 10^{-6}$  M για NaCl σε υδατικό διάλυμα και είναι ιδανικός για εφαρμογές σε φορητές και εμφυτευμένες συσκευές. Τα νανοσωματίδια στο ηλεκτρόδιο χρυσού συντέθηκαν χρησιμοποιώντας μικρορευστοποιητικά κανάλια σε σχήμα Y, με ρυθμό ροής 100-2000  $\mu L \text{ min}^{-1}$  για την ανίχνευση υπεροξειδίου του υδρογόνου. Η κατασκευή των νανοσωματιδίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής και αυτή η μικρορευστοποιητική συσκευή αποδείχθηκε πολύ αποτελεσματική στην κατασκευή τους. [44],[45]

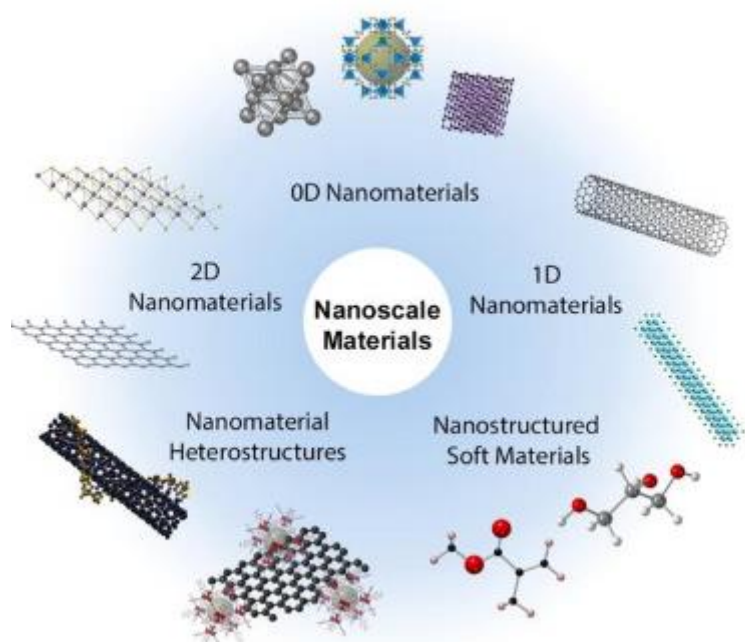
### **3.2 Νανοϋλικά στην κατασκευή αισθητήρων και οι εφαρμογές τους στο IoT:**

#### **Πλεονεκτήματα και προκλήσεις.**

Τα υλικά σε νανοκλίμακα διαθέτουν μοναδικά χημικά και φυσικά χαρακτηριστικά, καθώς και ιδιότητες που εξαρτώνται από το μέγεθος τους, την υψηλή επιφάνεια προς όγκο αναλογία τους και την ανώτερη καταλυτική τους δραστηριότητα. Αυτές οι μοναδικές ιδιότητες επιτρέπουν στους αισθητήρες να ανταποκρίνονται γρήγορα και με υψηλή ευαισθησία. Με την είσοδο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), η ζήτηση για αισθητήρες βασισμένους σε νανοϋλικά έχει αυξηθεί σημαντικά. Μέσω της ευελιξίας των τεχνικών προσθετικής κατασκευής στον σχεδιασμό και στην μείωση του κόστους, μπορεί να αναπτυχθεί μια νέα γενιά πλατφορμών ανίχνευσης που βασίζονται σε νανοϋλικά, η οποία θα μπορούσε να ενσωματωθεί με συσκευές IoT στον

καταναλωτικό χώρο. Στη συνέχεια, θα αναλυθούν τα δυνατά και αδύναμα σημεία των συστημάτων αισθητήρων που βασίζονται σε μηδενικά, μονο- και δισδιάστατα νανοϋλικά. Επιπλέον, ερευνώνται αισθητήρες που ενεργοποιούνται από την αντίδραση με συγκεκριμένα αέρια και χημικές ενώσεις, όπως παρασιτοκτόνα, τοξικά αέρια, και βαρέα μέταλλα. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση επικίνδυνων αερίων και χημικών ενώσεων σε διάφορες εφαρμογές, όπως στη βιομηχανία, στην ιατρική και στο περιβάλλον.

Οι αισθητήρες έχουν φέρει επανάσταση στα συστήματα μηχανικής με την ικανότητά τους να ανιχνεύουν αλλαγές στο τοπικό περιβάλλον, παρέχοντας ανατροφοδότηση σε άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Στη σύγχρονη εποχή, πολλοί διαφορετικοί τύποι αισθητήρων (π.χ. φυσικοί, χημικοί και βιολογικοί) συγκλίνουν στη νανοκλίμακα, έτσι ώστε να παρακολουθούν ταυτόχρονα πολλαπλούς τύπους περιβαλλοντικών ερεθισμάτων. Ωστόσο, από την ανακάλυψη του γραφενίου, έχει προκύψει μια πληθώρα υλικών νανοκλίμακας (Εικ. 3.2) συμπεριλαμβανομένων μηδενικών διαστάσεων (0D) νανοϋλικών (π.χ. μεταλλικά νανοσωματίδια και κβαντικές κουκκίδες), μονοδιάστατα (1D) νανοϋλικά, νανοσωλήνες και νανοςύρματα, δισδιάστατα (2D) νανοϋλικά (π.χ. γραφένιο και οξειδίο του γραφενίου), και μαλακά νανοϋλικά (π.χ. νανοδομημένα πολυμερή). Η ευρεία γκάμα ηλεκτρονικών, οπτικών και μηχανικών ιδιοτήτων σε αυτές τις κατηγορίες νανοϋλικών παρουσιάζει σημαντικές ευκαιρίες για την ανάπτυξη αισθητήρων με πρωτοφανή υψηλή ευαισθησία, γρήγορη απόκριση και στιβαρότητα. [53]



**Εικόνα 3.2.α** Απεικόνιση υλικών νανοκλίμακας που χρησιμοποιούνται σε εκτυπώσιμες πλατφόρμες ανίχνευσης. [53].

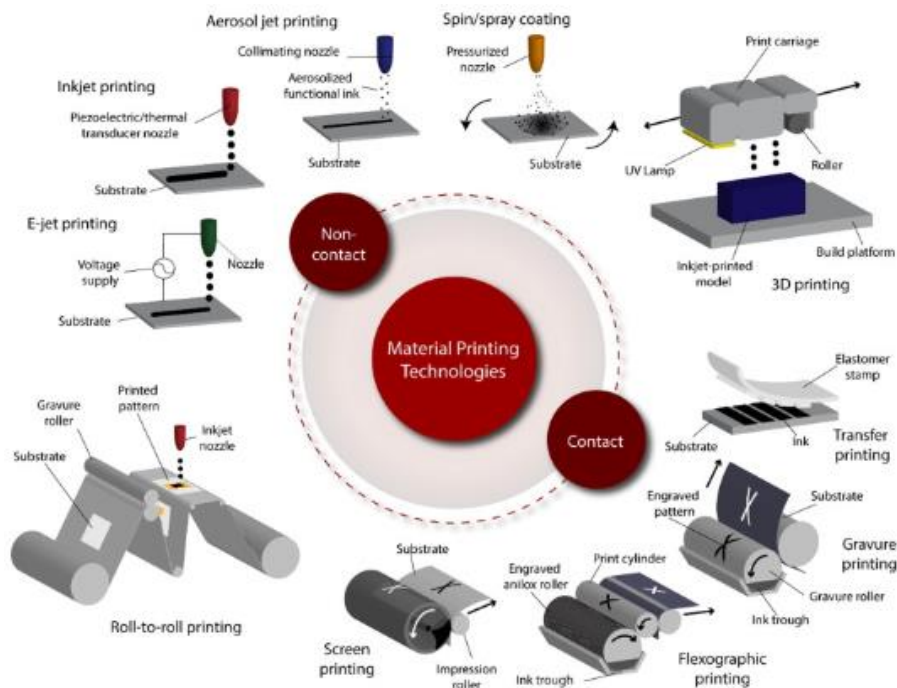
Η εμφάνιση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και η δικτύωση έξυπνων αντικειμένων έχουν επίσης αυξήσει σημαντικά τη ζήτηση για αισθητήρες και την εφαρμογή τους τόσο στις βιομηχανικές εφαρμογές όσο και στην καθημερινή ζωή. Οι συμβατικές τεχνολογίες αισθητήρων που βασίζονται σε ημιαγωγούς όπως το

πυρίτιο, αντιμετωπίζουν δυσκολίες στο να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη ζήτηση λόγω της άκαμπτης μορφής τους. Η εγγενώς εύθραυστη φύση των ανόργανων ημιαγωγών περιορίζει την παραμόρφωση και την επαφή τους με ακανόνιστες επιφάνειες. Επιπλέον, το κόστος των ανόργανων συσκευών ημιαγωγών αυξάνεται αναλογικά με το αποτύπωμά τους, περιορίζοντας τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητάς τους. Επομένως, είναι μεγάλη ανάγκη για τους ερευνητές να προωθήσουν εναλλακτικά υλικά και μεθόδους κατασκευής που επιτρέπουν την κατασκευή πλατφορμών ανίχνευσης.

Οι τεχνολογίες εκτύπωσης υλικών αποτελούν ένα υποσύνολο της προσθετικής κατασκευής και παρέχουν μια οικονομική, επεκτάσιμη και αποδοτική λύση για την παραγωγή νανοηλεκτρονικών και αισθητήρων. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην προσθετική κατασκευή μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: εκτύπωση με επαφή και εκτύπωση χωρίς επαφή. Η εκτύπωση με επαφή περιλαμβάνει την άμεση επαφή του προτύπου ή του στένσιλ με το υλικό, με σκοπό τη μεταφορά του σχεδίου στο υπόστρωμα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να περιλαμβάνει τεχνικές όπως η μεταξοτυπία, ή η εκτύπωση μεταφοράς. Από την άλλη πλευρά, η εκτύπωση χωρίς επαφή περιλαμβάνει τεχνικές εναπόθεσης υλικού χωρίς να υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ του προτύπου και του υλικού. Αυτές οι τεχνικές μπορεί να περιλαμβάνουν εκτύπωση inkjet, Electrohydrodynamic jet (e-jet), Aerosol Jet Printing (AJP), επίστρωση περιστροφής/ψεκασμού και εκτύπωση 3D (3DP). Αυτές οι τεχνολογίες παρέχουν λύσεις για διάφορες εφαρμογές όπως ηλεκτρονικά μιας χρήσης για ανίχνευση επικίνδυνων ουσιών, οδοντιατρικά εξαρτήματα, ιατρικές συσκευές, κεραμικά αντικείμενα και προϊόντα συσκευασίας.

Η μεταξοτυπία είναι μια διαδικασία εκτύπωσης με επαφή, στην οποία η μελάνη μεταφέρεται στο υπόστρωμα μέσω ενός στενσιλ. Η εκτύπωση μεταφοράς ακολουθεί μια παρόμοια διαδικασία, αλλά χρησιμοποιεί ένα μεταφορικό φύλλο για να μεταφέρει τη μελάνη στο υπόστρωμα. Η φλεξογραφία είναι μια διαδικασία εκτύπωσης με επαφή που χρησιμοποιεί ένα εύκαμπτο στένσιλ για να μεταφέρει τη μελάνη στο υπόστρωμα.

Η εκτύπωση inkjet είναι μια τεχνική εκτύπωσης χωρίς επαφή που χρησιμοποιεί μια κεφαλή εκτύπωσης για να ψεκάσει τη μελάνη στο υπόστρωμα. Η e-jet χρησιμοποιεί έναν ηλεκτροστατικό φορτιστή για να μετακινήσει το υλικό από μια κεφαλή εκτύπωσης σε μια επιφάνεια. Η εκτύπωση AJP χρησιμοποιεί μια σειρά από μικρές εκκροές αερίου για να εκτυπώσει το υλικό σε στρώματα. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2. β. [53]



Εικόνα 3.2.β Σχέδια κατασκευής πρόσθετων για την κατασκευή αισθητήρων με νανοϋλικά. [53].

### 3.3 Νανοϋλικά στη σύγχρονη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης

Η ενσωμάτωση νανοϋλικών στην τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής ανοίγει έναν νέο ορίζοντα στη δημιουργία ιατροτεχνολογικών συσκευών και συστημάτων με βελτιωμένες ιδιότητες και πολυλειτουργικότητα. Η ανάπτυξη λειτουργικών νανοϋλικών μέσω προσθετικής κατασκευής έχει επεκταθεί σε βιοϊατρικές εφαρμογές όπως η βιομοριακή αίσθηση, η βιολογική απεικόνιση και η χορήγηση φαρμάκων. Με την μέθοδο της προσθετικής κατασκευής έχουν παραχθεί με επιτυχία διάφορα ιατρικά συστήματα όπως το οστικό ικρίωμα, τα βιονικά όργανα, οι βιοαισθητήρες, η βιοαπεικόνιση, τα χειρουργικά εργαλεία και οι διαγνωστικές συσκευές. [54]

### 3.4 Μεταλλικά νανοςωματίδια στην προσθετική κατασκευή

Τα μεταλλικά νανοςωματίδια παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον για τους ερευνητές επειδή οι οπτικές, θερμικές και ηλεκτροχημικές ιδιότητές τους εξαρτώνται σημαντικά από το μέγεθός τους. Τα μεταλλικά νανοςωματίδια μπορούν να συντεθούν με διαφορετικά σχήματα – σφαίρες, κύβους, ράβδους – ανάλογα με τη διαδικασία που υποβάλλονται. Τα μεταλλικά νανοςωματίδια έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, στην αίσθηση, την κατάλυση, τη βιοαπεικόνιση, τη χορήγηση φαρμάκων και τη μικροηλεκτρονική.

Λόγω του φαινομένου του θερμοδυναμικού μεγέθους, η θερμοκρασία τήξης των μεταλλικών νανοςωματιδίων μπορεί να μειωθεί έως και 900°C (π.χ. η θερμοκρασία τήξης του χρυσού είναι 1.063°C, ενώ



η θερμοκρασία τήξης του συμπλέγματος χρυσού με μέση διάμετρο 2 nm είναι  $\sim 130^{\circ}\text{C}$ ). Αυτό επιτρέπει την χρήση χαμηλότερων θερμοκρασιών για την πυροσυσσωμάτωση των τυπωμένων εξαρτημάτων, γεγονός που βελτιώνει την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Τα νανοσωματίδια σιδήρου (με διάμετρο από 7 έως 10 nm) χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της ποιότητας πυροσυσσωμάτωσης των χαλύβδινων εξαρτημάτων που δημιουργούνται από την προσθετική κατασκευή.

Έπειτα δοκιμάστηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις για τη διείδυση νανοσωματιδίων, όπως πολλαπλές εφαρμογές νανο-συνδετικών, ξήρανση κάτω από μαγνητικό πεδίο και χρήση οξειδωμένων και μη οξειδωμένων νανοσωματιδίων. Διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη ενός νανοσυνδετικού στα τυπωμένα μέρη μείωσε την παραμόρφωση και τη συρρίκνωση. Παρακάτω απεικονίζεται η σύγκριση της παραμόρφωσης ερπυσμού δύο τυπωμένων μερών κατά τη διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης, το πρώτο με επεξεργασία νανοσίδηρου και το δεύτερο χωρίς επεξεργασία. [55]



**Εικόνα 3.4** Σύγκριση παραμόρφωσης ανοξειδωτου χάλυβα με και χωρίς επεξεργασία νανοσίδηρου [56]

### 3.5 Micro Stereolithography υψηλής ανάλυσης

Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί ταχεία πρόοδος στην τεχνολογία των μικροηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (MEMS). Η τεχνολογία αυτή αποτελείται από την ενσωμάτωση μηχανικών αισθητήρων και ενεργοποιητών σε τσιπ, παρέχοντας πλεονεκτήματα χαμηλού κόστους κατασκευής, υψηλή ευαισθησία, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ενσωμάτωση πολλών λειτουργιών. Εκτός από την τοποθέτηση επίπεδων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στο υπόστρωμα ημιαγωγών, οι τεχνολογίες μικροηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων επεκτείνουν τη μικροκατασκευή στην κατακόρυφη διάσταση ώστε να προσφέρουν καλύτερη απόδοση στις μικρομηχανικές συσκευές. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία των μικροηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη μικροκατεργασία πυριτίου ως την κύρια καθιερωμένη τεχνολογία για μικροκατασκευή

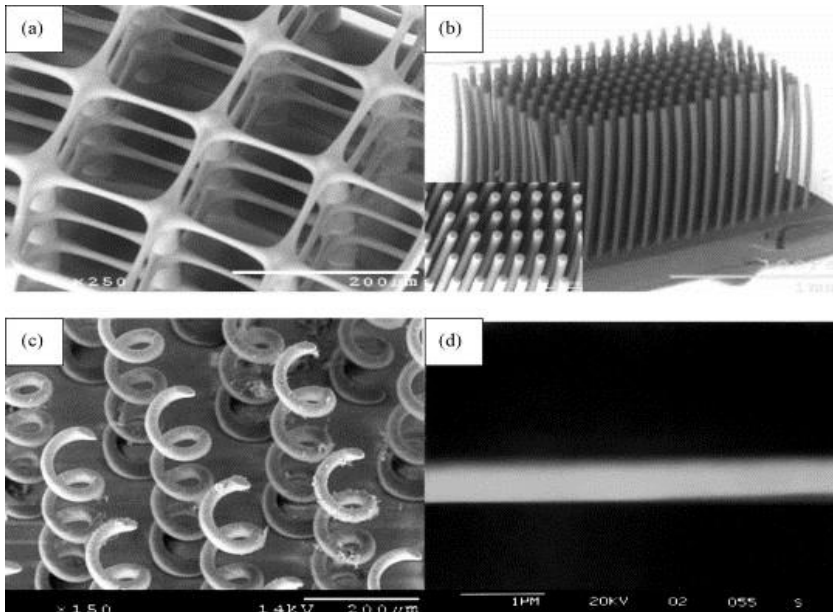
Συνήθως, η τεχνολογία μικροκατεργασίας πυριτίου, η οποία περιλαμβάνει την τεχνολογία μικροηλεκτρο-μηχανικής επεξεργασίας επιφανειών, χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή μικροηλεκτρο-μηχανικών συσκευών. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή είναι περιορισμένη στην ικανότητά της να κατασκευάζει πολύπλοκες μικροδομές, παράγοντας μόνο απλά γεωμετρικά σχήματα από ισότροπη και ανισότροπη χάραξη. Επιπλέον, η τεχνολογία μικροκατεργασίας πυριτίου μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε υλικά όπως κοινοί ημιαγωγοί, μέταλλα και διηλεκτρικά υλικά. [64]

### 3.5.1 Τρισδιάστατη μικροκατασκευή

Η επίτευξη της τρισδιάστατης μικροκατασκευής απαιτεί τη δημιουργία πολύπλοκων τρισδιάστατων μικροδομών, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5.1 παρακάτω. Η διαδικασία αυτή απαιτεί τη χρήση πιο προηγμένων τεχνολογιών μικροκατεργασίας, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν δομές με περίπλοκα σχήματα και διαστάσεις σε όλες τις τρεις διαστάσεις. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν την εκτύπωση 3D, την ηλεκτροστατική μετατόπιση, την ελαστική μετατόπιση, καθώς και άλλες μεθόδους. Η επίτευξη της τρισδιάστατης μικροκατασκευής είναι σημαντική για την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών, όπως οι μικροηλεκτρο-μηχανικές συσκευές και οι αισθητήρες. Η μικρο-μήτρα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5.1 (α) αποτελείται από 110 στρώματα πάχους 5  $\mu\text{m}$  και περιλαμβάνει τρία ανεξάρτητα στρώματα πλέγματος που αιωρούνται σε μια σειρά κατακόρυφων στύλων. Τα στρώματα χωρίζονται σε ίσες αποστάσεις σε κάθετη κατεύθυνση, ενώ το φαινόμενο της στιχομυθίας (cross-talk) παρατηρείται λόγω του ανομοιόμορφου πλάτους γραμμής των αιωρούμενων συρμάτων και της διάθλασης του φωτός. Παράλληλα, πειράματα βρίσκονται σε εξέλιξη με στόχο τη διερεύνηση του φαινομένου αλληλεπίδρασης, των μηχανισμών του και των τρόπων μείωσής του. Η επίτευξη της τρισδιάστατης μικροκατασκευής είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη πολλών συστημάτων μικροηλεκτρο-μηχανικής, και η μικροκατασκευή με μικρο-μήτρα αποτελεί μια από τις πιο συναρπαστικές προοπτικές για το μέλλον της τεχνολογίας.

Με την προσθήκη περισσότερων στρώσεων, μπορεί επίσης να κατασκευαστεί μια μικροδομή με ακόμη υψηλότερο λόγο διαστάσεων. Η συστοιχία μικροράβδων ( Εικ. 3.5.1 (β)) αποτελείται από μια σειρά ράβδων με εξαιρετικά υψηλή αναλογία διαστάσεων. Οι ράβδοι που φαίνονται στο σχήμα παρουσιάζουν ομοιόμορφες διαστάσεις με διάμετρο 30  $\mu\text{m}$  και ύψος 1000  $\mu\text{m}$ , που αντιστοιχούν στην αναλογία διαστάσεων 33:1. Η κατασκευή μικροδομών με τέτοιο υψηλό λόγο διαστάσεων είναι δύσκολη, καθώς απαιτεί εξειδικευμένα εργαλεία. Ωστόσο, οι μικροδομές με υψηλό λόγο διαστάσεων έχουν πολλές χρήσεις, όπως η βελτίωση της απόδοσης φωτονικών συσκευών, η μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών σε μικρή κλίμακα και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όπως οι νανο-ηλεκτρονικές συσκευές. Η συστοιχία μικροράβδων αποτελεί ένα από τα παραδείγματα τέτοιων μικροδομών και μπορεί να βοηθήσει στην περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα των μικρο- και νανο-κατασκευών.

Η τεχνολογία της Projection Micro Stereolithography (PμSL) δεν περιορίζεται μόνο στην κατασκευή δομών με υψηλή αναλογία διαστάσεων, αλλά επιτρέπει επίσης τη δημιουργία πολύπλοκων τρισδιάστατων μικροδομών, η οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί με τις συμβατικές διαδικασίες μικροκατασκευής. Η PμSL επιτυγχάνει αυτό το αποτέλεσμα κατασκευάζοντας μια συστοιχία  $3 \times 3$  μικροπηνίων σε 108 στρώματα, κάθε ένα από τα οποία έχει πάχος 5  $\mu\text{m}$ . Το πηνίο έχει διάμετρο 150  $\mu\text{m}$  και το σύρμα έχει διάμετρο 15  $\mu\text{m}$  (Εικόνα 3.5.1 (γ)). Ο απόλυτος έλεγχος μεγέθους χαρακτηριστικών επιτυγχάνεται μέσω της κατασκευής κρεμαστών δοκών με διάμετρο 0,6  $\mu\text{m}$  (Εικόνα 3.5.1 (δ)). [64]



**Εικόνα 3.5.1** Τρισδιάστατες πολύπλοκες μικροδομές που κατασκευάζονται με διαδικασία PμSL: (α) μικρομήτρα με διάμετρο αναρτημένης δέσμης 5  $\mu\text{m}$ . (β) Η συστοιχία μικροράβδων υψηλής αναλογίας διαστάσεων αποτελείται από  $21 \times 11$  ράβδους με συνολικό μέγεθος 2 mm  $\times$  1 mm. Η διάμετρος και το ύψος της ράβδου είναι 30  $\mu\text{m}$  και 1 mm, αντίστοιχα. γ) συστοιχία μικροπηνίων με διάμετρο πηνίου 100  $\mu\text{m}$  και διάμετρο σύρματος 25  $\mu\text{m}$ . δ) αναρτημένη εξαιρετικά λεπτή γραμμή με διάμετρο 0,6  $\mu\text{m}$ . [64]

## Κεφάλαιο 4

### 4. Μελέτες περίπτωσης από σύγχρονες εφαρμογές στο χώρο της μηχανικής

Η τελευταία βιομηχανική επανάσταση, ενθαρρύνει την ενοποίηση ευφών συστημάτων παραγωγής και προηγμένων τεχνολογιών πληροφοριών. Η προσθετική κατασκευή θεωρείται απαραίτητη σε αυτό το κίνημα. Καθώς η προσθετική κατασκευή γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη σε εμπορικά κατασκευαστικά περιβάλλοντα, η ανάγκη για αποτελεσματική εξέταση των βέλτιστων στρατηγικών για τη διαχείριση αυξάνεται. Προς το παρόν, οι περισσότερες έρευνες έχουν επικεντρωθεί σε μεμονωμένες μηχανές, ωστόσο υπάρχει πληθώρα στοιχείων που υποδηλώνουν ότι η ανταγωνιστική κατασκευή είναι η καλύτερη διαχείριση από την άποψη των συστημάτων.

Η προσθετική κατασκευή αποτελεί μια από τις πιο καινοτόμες τεχνολογίες παραγωγής που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, έχοντας αλλάξει τον τρόπο παραγωγής πρωτοτύπων, εργαλείων και ακόμη και τελικών προϊόντων. Η δυνατότητα άμεσης παραγωγής και προσαρμογής ανταλλακτικών έχει αλλάξει τον τρόπο λειτουργίας πολλών βιομηχανικών κλάδων. Παρόλο που η τεχνολογία αυτή είναι ακόμα σε ανάπτυξη, πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι ενδέχεται να σημάνει μια νέα βιομηχανική επανάσταση, με την εκτίμηση να είναι ότι έως το 2025 θα έχει παγκόσμιο οικονομικό αντίκτυπο. Παρακάτω θα αναλυθεί η σημασία και η επίδραση της προσθετικής κατασκευής στην εμπορική κατασκευαστική.

Η προσθετική κατασκευή έχει σημαντικό ρόλο στην εμπορική κατασκευαστική βιομηχανία τα τελευταία χρόνια. Αρχικά, αναπτύχθηκε για την παραγωγή πρωτοτύπων. Ωστόσο, με τη βελτίωση της τεχνολογίας, η προσθετική κατασκευή επεκτάθηκε στην παραγωγή εργαλείων και πρόσφατα, στην παραγωγή τελικών ανταλλακτικών και προϊόντων. Πολλές επιτυχημένες εφαρμογές έχουν ήδη αποδειχθεί, αλλά πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι η προσθετική κατασκευή μπορεί να οδηγήσει σε μια νέα βιομηχανική επανάσταση, καθώς προβλέπεται ότι έως το 2025 η τεχνολογία αυτή θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στην παγκόσμια οικονομία.

Παρόλο που οι τεχνολογίες της προσθετικής κατασκευής αναφέρονται ως μελλοντική επανάσταση στον τομέα της κατασκευής, οι τρέχουσες ερευνητικές προσεγγίσεις εξακολουθούν να βασίζονται στην παραδοσιακή "εποχή της μηχανής". Συγκεκριμένα, αυτές οι προσεγγίσεις επικεντρώνονται στην ανάλυση και επίλυση των προβλημάτων μέσω του αναγωγισμού του μηχανισμού σε συστατικά μέρη. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση απομονώνει τη συμβολή άλλων πόρων και δυνατοτήτων στην επίτευξη του στόχου της "κατασκευής". Είναι σημαντικό να επικεντρωθούμε στις πιο συνολικές προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη όλες τις δυνατότητες των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής και να μελετήσουμε πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό και την κατασκευή προϊόντων. [37], [41]

## 4.1 Θεωρία συστήματος

Η ευρύτερη αντίληψη, στηρίζει πως ένα «σύστημα» μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύνολο, τα στοιχεία του οποίου αποτελούν οντότητες που έχουν το χαρακτηριστικό ότι κάθε μία από αυτές αλληλεπιδρά ή συσχετίζεται με τουλάχιστον μίαν άλλη από το ίδιο σύνολο. Δεδομένου ότι η προσέγγιση αυτή τείνει να μην εκφράζει σωστά τη μοντελοποίηση σαν σύστημα, θέτοντας βασικές δυσκολίες στο επίπεδο προσδιορισμού των ορίων, πρέπει να υπάρχουν και εναλλακτικές προσεγγίσεις. Μια τέτοια προσέγγιση βασίζεται στη Γενική Θεωρία Συστημάτων και την εφαρμογή της στον τομέα των συστημάτων της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Η εφαρμογή της θεωρίας των συστημάτων σε ένα κατασκευαστικό πλαίσιο έχει σημαντική απήχηση, καθώς έχει αναγνωριστεί ότι προσφέρει τη δυνατότητα να παράγονται καλύτερες λύσεις στα κατασκευαστικά προβλήματα από οποιαδήποτε άλλη προσέγγιση. Ο κεντρικός στόχος ενός συστήματος παραγωγής είναι να μετατρέπει τις πρώτες ύλες σε προϊόντα, προσφέροντας υψηλότερη αξία στη διαδικασία. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, τα συστήματα παραγωγής συγκεντρώνουν ένα πλήθος διαφορετικών πόρων, τους οργανώνουν και τους ελέγχουν για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης. Ένα σύστημα παραγωγής ενσωματώνει δραστηριότητες, μηχανισμούς ενεργοποίησης και κατάλληλους ελέγχους στη μετατροπή των πρώτων υλών σε τελικά προϊόντα, προκειμένου να ικανοποιήσει τη ζήτηση των πελατών. Η στρατηγική παραγωγής επικεντρώνεται συχνά στην επίτευξη ανταγωνιστικών προτεραιοτήτων όσον αφορά το κόστος, την αξιοπιστία, την ευελιξία, την ποιότητα και την ταχύτητα.

Τα συστήματα παραγωγής αποτελούν αναπόσπαστο μέρος ενός συστήματος οργάνωσης. Αν και δεν υπάρχει ένας ενιαίος ορισμός για το σύστημα παραγωγής, αναγνωρίζεται ότι υπάρχουν πολλά διαφορετικά σχέδια συστημάτων παραγωγής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες ενός οργανισμού. Μια συνηθισμένη προσέγγιση είναι η ανάλυση του συστήματος παραγωγής, η οποία περιλαμβάνει την εξέταση του συστήματος σε εργοστασιακό επίπεδο, χωρισμένο σε κέντρα εργασίας και στη συνέχεια σε μεμονωμένους πόρους παραγωγής.

Ένα σύστημα παραγωγής αποτελείται από μια ποικιλία διαφορετικών πόρων, όπως μηχανές, εργασία και εξοπλισμός επεξεργασίας υπολογιστών/πληροφοριών, που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση διάφορων δραστηριοτήτων με σκοπό την επίτευξη των στόχων του συστήματος. Τα συστήματα παραγωγής αποτελούν ένα «ολοκληρωμένο σύνολο», το οποίο παρουσιάζει μεγάλο πλεονέκτημα έναντι των επιμέρους κατασκευαστικών πόρων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι δυνατότητες ενός συστήματος είναι μεγαλύτερες από το άθροισμα των μερών του. Για να επιτευχθεί αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής, απαιτείται η συνεργασία και η συντονισμένη λειτουργία διαφορετικών στοιχείων πόρων, όπως μηχανές, εργασία και εξοπλισμός επεξεργασίας υπολογιστών/πληροφοριών. Η απόδοση ενός συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα των εξαρτημάτων που λειτουργούν μαζί και όχι από την ανεξάρτητη απόδοση του καθενός. Έτσι, η κατανόηση της φύσης των συστημάτων παραγωγής απαιτεί μια εκτίμηση του

τρόπου με τον οποίο τα συστατικά μέρη επιτυγχάνουν τη συναρμολόγηση στο σύνολο, αντί να δίνεται έμφαση στις τεχνολογίες κατασκευής. [37],[40]

#### **4.1.1 Μια προοπτική συστημάτων παραγωγής για την προσθετική κατασκευή**

Η απόδοση των παραγωγικών δραστηριοτήτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ευελιξία, η οποία αποτελεί έναν βασικό στόχο για την ανταπόκριση στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των αβέβαιων και ανταγωνιστικών αγορών. Παρόλο που οι μηχανές προσθετικής κατασκευής θεωρούνται συχνά «ευέλικτες», δεν υπάρχει λεπτομερής κατανόηση αυτής της ευελιξίας στο πλαίσιο διαχείρισης λειτουργιών. Στη συνέχεια, σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η ευελιξία από την άποψη των συστημάτων παραγωγής και παρουσιάζονται οι διαφορετικές ικανότητες που μπορούν να επιτευχθούν, καθώς και οι παράγοντες που μπορούν να τις εμποδίσουν πρακτικά.

Η αξιολόγηση της ευελιξίας βασίζεται στην προοπτική του τι μπορεί να προσφέρει το σύστημα (εσωτερική προοπτική) και πώς αντιλαμβάνεται ο πελάτης τις λειτουργίες του (εξωτερική προοπτική). Παρόλο που συχνά οι προοπτικές συγχέονται, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε ποια προοπτική ακολουθείται από παραγωγούς, διευθυντές παραγωγής ή πελάτες. Η εσωτερική ευελιξία συνδέεται με τις ικανότητες του συστήματος παραγωγής, ενώ η εξωτερική ευελιξία αναφέρεται στις δυνατότητες που προσφέρονται ως αποτέλεσμα αυτών των ικανοτήτων.

Η ευελιξία είναι μια πολυδιάστατη έννοια, με πολλούς διαφορετικούς τύπους. Οι τύποι ευελιξίας παρέχουν ένα όνομα και μια περιγραφή για αυτόν τον τύπο, ενώ τα μέτρα παρέχουν ένα εργαλείο για την αξιολόγηση της ευελιξίας υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Πολλοί τύποι ευελιξίας έχουν προταθεί, αν και η βιβλιογραφία σχετικά με την παραγωγή τείνει να επαναλαμβάνει και να προσαρμόζει τους υπάρχοντες τύπους ευελιξίας. Επιπλέον, οι ερμηνείες των ορισμών των τύπων ευελιξίας συχνά διαφέρουν μεταξύ των μελετών. Για παράδειγμα, κάποιοι ερευνητές έχουν προσδιορίσει εννέα διαφορετικούς ορισμούς του τύπου "ευελιξίας διαδικασιών" που χρησιμοποιούνται σε δώδεκα μελέτες.

Παρά το εύρος των τύπων ευελιξίας και των ορισμών, μπορεί να επιτευχθεί κάποια σαφήνεια αν ληφθεί υπόψη ότι οι τύποι που χρησιμοποιούνται αναφέρονται συνήθως στη σύγχρονη εργασία. Κατά την παραγωγή μιας ταξινόμησης ευελιξίας, ο Jain (2013) χρησιμοποίησε τους τύπους που περιλαμβάνονται στις τρεις πιο δημοφιλείς εργασίες ανασκόπησης ευελιξίας (του Browne (1984), του Sethi (1990) και των Koste and Malhotra (1999)), αποδίδοντας 12 τύπους ευελιξίας. Ο Πίνακας I παρακάτω παρέχει μια σύνοψη αυτών, από πέντε εξαιρετικά αναφερόμενες και θεμελιώδεις ανασκοπήσεις της ευελιξίας σε ένα πλαίσιο λειτουργιών, μαζί με μια επισκόπηση της έρευνας εφαρμογών για κάθε τύπο.

Πολλές μελέτες που έγιναν για την προσθετική κατασκευή αναφέρονται στον όρο "σύστημα" χωρίς να

έχουν την ειδίκευση και τη σύνδεση με τη θεωρία των συστημάτων. Ωστόσο, η προσθετική κατασκευή μπορεί να αξιοποιήσει τη θεωρία των συστημάτων για τη βελτίωση της απόδοσης της μηχανής προσθετικής κατασκευής και την ανάπτυξη νέων εφαρμογών. Η χρήση συστημάτων στην προσθετική κατασκευή μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη πιο πολύπλοκων δομών και σχεδίων και στη βελτίωση της ποιότητας και της ακρίβειας του τελικού προϊόντος

Η χρήση του όρου «σύστημα» για την προσθετική κατασκευή είναι πολλές φορές πλεοναστική και δεν έχει επισημοποιηθεί ακόμη από κατασκευαστική προοπτική. Για να υιοθετηθεί μια προοπτική των συστημάτων παραγωγής, πρέπει να κατανοηθούν τα συστατικά του συστήματος και τα όρια μεταξύ αυτών. Επιπλέον, η ανάπτυξη μιας θεωρίας των συστημάτων για την προσθετική κατασκευή μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων στοιχείων της διαδικασίας και στην βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας της.

Συγκεκριμένα, αν κατανοηθούν τα συστατικά του συστήματος της προσθετικής κατασκευής, μπορούν να αναλυθούν οι αλυσίδες διαδικασιών και να εξερευνηθούν οι συνέπειες των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Μπορούν να αναλυθούν τα διάφορα επίπεδα ελέγχου και τα συστατικά τους, όπως η διαχείριση των δεδομένων, ο προγραμματισμός,

Η προσέγγιση των Birtchnell και Urry, καθώς και η εργασία των Nagel και Liou και οι ορισμοί του Mellor, αποτελούν διαφορετικές προσεγγίσεις για την ανάλυση και την κατανόηση των συστημάτων κατασκευής. Η θεωρία των συστημάτων κατασκευής προσπαθεί να αναλύσει τα συστήματα παραγωγής ως ένα σύνολο από αλληλεπιδραστικά στοιχεία που λειτουργούν μαζί για να παράγουν ένα προϊόν ή μια υπηρεσία. Η προσέγγιση των Birtchnell και Urry εστιάζει στη διαδικασία της παραγωγής, της διανομής και της κατανάλωσης, που είναι οι βασικές διαδικασίες που απαιτούνται για τη δημιουργία και την παροχή ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στο να κατανοηθούν τα διαφορετικά στάδια που απαιτούνται για να παραχθεί ένα προϊόν ή μια υπηρεσία, και πώς τα συστήματα διαδικασιών που αποτελούνται από αυτά τα στάδια αλληλεπιδρούν.

Η προσέγγιση των Nagel και Liou εστιάζει στα βασικά στοιχεία που απαιτούνται για την ανάπτυξη ενός συστήματος παραγωγής και αποτελεί μια συγκεκριμένη προσέγγιση στον σχεδιασμό και τη διαχείριση ενός τέτοιου συστήματος. Η προσέγγιση αυτή εστιάζει σε πέντε βασικά στοιχεία που απαιτούνται για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής: στο σχεδιασμό της παραγωγής (λογισμικό), στον έλεγχο του συστήματος, στην κίνηση των υλικών και του εξοπλισμού στο εσωτερικό του συστήματος, στη διαδικασία κατασκευής των μονάδων παραγωγής και στη διαδικασία φινιρίσματος. Με την ανάλυση αυτών των βασικών στοιχείων, ο σχεδιασμός ενός συστήματος παραγωγής μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματικός και αποδοτικός, διασφαλίζοντας ότι οι διάφορες διαδικασίες λειτουργούν ομαλά και ότι η παραγωγή έχει υψηλή ποιότητα και απόδοση.

Είναι σημαντικό να ελέγχονται τα συστήματα παραγωγής, αλλά επίσης είναι αξιοσημείωτο να δίνετε έμφαση στον έλεγχο, καθώς είναι εξαιρετικά περιορισμένος. Από έρευνα, οι περισσότερες πηγές επικεντρώνονται στον έλεγχο των διαδικασιών μηχανών προσθετικής κατασκευής (δηλαδή ελεγκτές κινητήρα και λήψη σχολίων από τις μηχανές). Σε επίπεδο συστήματος, οι αρχιτεκτονικές ελέγχου δεν έχουν εξεταστεί επίσημα, αν και ουσιαστικά είτε οι κεντρικές είτε οι αποκεντρωμένες προσεγγίσεις είναι εμφανείς. Για παράδειγμα, στις κεντρικές αρχιτεκτονικές οι ερευνητές Nagel και Liou εστίασαν στον έλεγχο από την οπτική γωνία των τεχνολογιών ηλεκτρικού ή μηχανικού ελέγχου, ενώ ο Espalín τόνισε τη χρήση επαναδιαμορφώσιμων ελεγκτών σε πραγματικό χρόνο για τη λειτουργία του συστήματος και τον ρόλο τόσο του υλικού όσο και του λογισμικού για την υποστήριξη στόχων ελέγχου, χρησιμοποιώντας μηχανές πεπερασμένης κατάστασης. Για τις αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές, ο έλεγχος έχει επικεντρωθεί στον «τηλε-έλεγχο» που βασίζεται στο διαδίκτυο, επιτρέποντας τις λειτουργίες των μηχανών προσθετικής κατασκευής από απόσταση.

Από την έρευνα που διεξήχθη, προκύπτει ότι είναι σημαντικό να ελέγχονται τα συστήματα παραγωγής και να δίνεται έμφαση στον έλεγχο της προσθετικής κατασκευής, καθώς είναι περιορισμένος. Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σε επίπεδο συστήματος, καθώς οι αρχιτεκτονικές ελέγχου δεν έχουν εξεταστεί επίσημα. Η έρευνα έχει επικεντρωθεί στον έλεγχο των διαδικασιών μηχανών προσθετικής κατασκευής, αλλά υπάρχουν και άλλες προσεγγίσεις, όπως οι κεντρικές και αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές ελέγχου. Είναι σημαντικό να εξεταστούν αυτές οι προσεγγίσεις περαιτέρω για να βελτιωθεί ο έλεγχος της προσθετικής κατασκευής και να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ασφάλεια των συστημάτων παραγωγής.[37], [43],[70]

#### **4.1.2 Συλλογή δεδομένων**

Στην βιομηχανία της προσθετικής κατασκευής, υπάρχουν πολλές καθιερωμένες εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα. Σε αυτήν την μελέτη περίπτωσης θα αναφερθούν τέσσερις εταιρείες που έχουν αποδείξει την αξία τους στην αγορά της προσθετικής κατασκευής: την Zimmer Biomet, την Stryker, την Smith & Nephew και την Johnson & Johnson.

Η Zimmer Biomet είναι μια εταιρεία που παρέχει μια ευρεία γκάμα προϊόντων για την προσθετική κατασκευή, συμπεριλαμβανομένων των αρθροπλαστικών, των οστεοσυνθέτων και των διακοσμητικών εμφυτευμάτων. Η εταιρεία χρησιμοποιεί σύγχρονες τεχνολογίες για την ανάπτυξη και την παραγωγή των προϊόντων της, όπως η τεχνολογία 3D εκτύπωσης και η βελτιωμένη επίστρωση επιφανειών για βελτιωμένη διάρκεια ζωής των εμφυτευμάτων. Επιπλέον, η Zimmer Biomet επενδύει σημαντικά στην έρευνα και ανάπτυξη για να δημιουργήσει καινοτόμα προϊόντα και να επεκτείνει την παρουσία της σε νέες αγορές.

Η Stryker είναι μια άλλη μεγάλη εταιρεία που ειδικεύεται στην προσθετική κατασκευή, με μια ευρεία γκάμα προϊόντων που περιλαμβάνει αρθροπλαστικά, οστεοσυνθέτες, εμφυτεύματα νωτιαίου μυελού και



προϊόντα αποκατάστασης. Η εταιρεία χρησιμοποιεί επίσης σύγχρονες τεχνολογίες, όπως η ρομποτική τεχνολογία και η χρήση υλικών υψηλής αντοχής, για να βελτιώσει την ακρίβεια και την απόδοση των προϊόντων της.

Η Johnson & Johnson είναι μια άλλη μεγάλη εταιρεία που δραστηριοποιείται στο χώρο της προσθετικής κατασκευής, παρέχοντας προϊόντα για την αντικατάσταση αρθρώσεων και την αντιμετώπιση του πόνου στην πλάτη. Η εταιρεία επίσης επενδύει σημαντικά στην έρευνα και ανάπτυξη για τη δημιουργία νέων και καινοτόμων προϊόντων.

Η Smith & Nephew είναι μια άλλη κορυφαία εταιρεία στο χώρο της προσθετικής κατασκευής, που παρέχει προϊόντα για την αντικατάσταση αρθρώσεων και την αντιμετώπιση τραυματισμών. Η εταιρεία χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνολογίες όπως η ρομποτική χειρουργική και η ψηφιακή εικόνα για την ακριβή τοποθέτηση των εμφυτευμάτων και την προσαρμογή τους στις ατομικές ανάγκες του κάθε ασθενούς. Επιπλέον, η Smith & Nephew επικεντρώνεται στην ανάπτυξη προϊόντων με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και λιγότερες επιπλοκές, καθώς και στην ανάπτυξη προϊόντων για την αντιμετώπιση της νόσου του Άλτσχάιμερ και των προβλημάτων του καρπού.

Οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στη βιομηχανία της προσθετικής κατασκευής αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως η ανταγωνιστικότητα στην αγορά, η συμμόρφωση με τους κανονισμούς και οι δυσκολίες στην εύρεση εξειδικευμένων εργαζομένων. Παρόλα αυτά, η αυξανόμενη ζήτηση για αντικατάσταση αρθρώσεων και οι συνεχείς επιστημονικές εξελίξεις στον τομέα της προσθετικής κατασκευής δημιουργούν ευκαιρίες για την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων και την επέκταση της παρουσίας τους στην αγορά. Επιπλέον, η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της ρομποτικής και της τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να βελτιώσει τη διαδικασία της χειρουργικής και την ποιότητα των προϊόντων που παράγονται. Επιπλέον, η ανάπτυξη προϊόντων που είναι πιο ανθεκτικά, διαρκή και πιο προσαρμοστικά στις ανάγκες των ασθενών μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας των εταιρειών στην αγορά. Τέλος, η συνεργασία με ιατρικούς επαγγελματίες και οι προσπάθειες για τη βελτίωση της εκπαίδευσης και της επαγγελματικής ανάπτυξης τους μπορούν να συμβάλουν στην αντιμετώπιση της έλλειψης εξειδικευμένων εργαζομένων στον τομέα της προσθετικής κατασκευής. [37] ,[70]

Η σύγκριση μεταξύ των εταιρειών έγινε βάσει των κερδών (καθαρά κέρδη) που αναφέρονται στις οικονομικές τους καταστάσεις για τα έτη 2020 και 2019. Συγκεκριμένα, έγινε η ανάλυση των ακόλουθων κερδών στον παρακάτω πίνακα 4.1.2:

Εταιρεία	Κέρδη 2019 (σε εκατομμύρια ευρώ)	Κέρδη 2020 (σε εκατομμύρια ευρώ)	Μεταβολή (σε ποσοστό)
----------	----------------------------------	----------------------------------	-----------------------

Zimmer Biomet	1.726,7	1.619,9	-6,2
Stryker	3.780,3	4.223,5	+11,7
Smith & Nephew	1.276,2	966,7	-24,3
Johnson & Johnson	66.053,9	72.311,5	+9,5

Πίνακας 4.1.2 Κερδοφορία Εταιρειών στη Βιομηχανία Προσθετικής Κατασκευής

Παρατηρείται ότι οι εταιρείες Stryker και Johnson & Johnson είχαν αύξηση των κερδών τους το 2020 σε σχέση με το 2019, ενώ οι εταιρείες Zimmer Biomet και Smith & Nephew είχαν μείωση των κερδών τους. Ειδικότερα, η Stryker αύξησε τα κέρδη της κατά 11.9%, ενώ η Johnson & Johnson αύξησε τα κέρδη της κατά 9.4%. Αντίθετα, η Smith & Nephew μείωσε τα κέρδη της κατά 24.3% και η Zimmer Biomet κατά 6.2%.

### 4.1.3 Ανάλυση δεδομένων

Η σύγκριση μεταξύ των εταιρειών έγινε βασισμένη στα δεδομένα που παρουσιάζονται στα οικονομικά τους αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, έγινε σύγκριση των εσόδων και των κερδών των εταιρειών για τα έτη 2019 και 2020. Επίσης, αξιολογήθηκε η αύξηση ή μείωση των εσόδων και των κερδών ανά έτος για κάθε εταιρεία και τη θέση τους στην αγορά σε σχέση με τους ανταγωνιστές τους. Επιπλέον, εξετάστηκε η δραστηριότητα έρευνας και ανάπτυξης κάθε εταιρείας, καθώς αυτή η πτυχή αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων και τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας. [37] ,[70]

### 4.1.4 Αποτελέσματα

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η σύγκριση των κερδών αυτών των εταιρειών μεταξύ τους δεν αποτελεί απόλυτο δείκτη απόδοσης, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τα κέρδη μιας εταιρείας, όπως οι επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη, οι επιδόσεις των προϊόντων τους στην αγορά, η συμμόρφωσή τους με τους κανονισμούς, καθώς και η καθολική οικονομική κατάσταση της αγοράς.

Ωστόσο, μπορεί να διακριθεί ότι οι Stryker και Johnson & Johnson είχαν καλύτερη απόδοση από τις Smith & Nephew και Zimmer Biomet. Επιπλέον, η Stryker φαίνεται να αποδίδει ιδιαίτερα καλά, αφού είχε τη μεγαλύτερη αύξηση σε κέρδη, ενώ η Smith & Nephew είχε τη μεγαλύτερη μείωση. Με βάση τα παραπάνω συνοψίζεται ότι οι εταιρείες προσθετικής κατασκευής αντιμετωπίζουν προκλήσεις, όπως η ανταγωνιστικότητα στην αγορά και η συμμόρφωση με τους κανονισμούς, αλλά παράλληλα έχουν ευκαιρίες για ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων και επέκταση της παρουσίας τους, καθώς η ζήτηση για αντικατάσταση αρθρώσεων αυξάνεται και συνεχώς εξελίσσονται οι επιστημονικές γνώσεις στον τομέα αυτό.[37] ,[70]

## Κεφάλαιο 5

### 5 Σύνθετα υλικά στην προσθετική κατασκευή

Τα σύνθετα υλικά αντιπροσωπεύουν μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα της προσθετικής κατασκευής. Αυτά τα υλικά συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα διαφορετικών στοιχείων για να δημιουργήσουν ένα υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες και απόδοση. Τα σύνθετα υλικά είναι υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά στοιχεία που έχουν συνδεθεί μαζί για να δημιουργήσουν ένα υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε τάση, κρούση, φθορά και θερμότητα. Τα σύνθετα υλικά έχουν ευρεία χρήση σε πολλές βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και την βιοϊατρική. Συγκεκριμένα, τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (PMC) και τα σύνθετα υλικά μήτρας αλουμινίου και με βάση TiAl (MMC) χρησιμοποιούνται συχνά σε αυτές τις βιομηχανίες. Η προσθετική κατασκευή είναι μια διαδικασία παραγωγής που επιτρέπει την κατασκευή καινοτόμων και πολύπλοκων εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας σύνθετα υλικά.

Η προσθετική κατασκευή παρέχει μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία γεωμετρικά περίπλοκων σχημάτων και περιορίζει τα απόβλητα, καθώς χρησιμοποιεί μόνο το απαιτούμενο υλικό για τη δημιουργία του αντικειμένου. Αν και η προσθετική κατασκευή έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για τη δημιουργία πρωτοτύπων, η εφαρμογή της στην άμεση κατασκευή ανταλλακτικών αυξάνεται. Αυτό είναι είναι περισσότερο εμφανές στη βιομηχανία, όπου η παραγωγή μικρών ανταλλακτικών ή η επισκευή παλαιότερων μηχανημάτων μπορεί να γίνει πολύ πιο αποδοτικά με τη χρήση της προσθετικής κατασκευής. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή επιτρέπει τη δημιουργία προσαρμοσμένων ανταλλακτικών για παλαιότερα μηχανήματα, τα οποία πλέον δεν παράγονται μαζικά, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνέχιση της λειτουργίας τους. Τέλος, η προσθετική κατασκευή μπορεί να μειώσει τον χρόνο παραγωγής και τα κόστη, καθώς μειώνει την ανάγκη για πολλαπλά εργαλεία και την παραγωγή προσαρμοσμένων εξαρτημάτων σε παραδοσιακές μεθόδους.

#### 5.1 Βιομηχανική ζήτηση για σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν έναν σημαντικό κλάδο της βιομηχανίας, με μεγάλη ζήτηση στην κατασκευή προϊόντων και εξαρτημάτων σε πολλούς κλάδους της οικονομίας, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η κατασκευή εξοπλισμού, η κατασκευή σκαφών, η κατασκευή ανεμογεννητριών και πολλών άλλων. Επί του παρόντος, περίπου το 50% του πλαισίου των αεροσκαφών κατασκευάζεται από σύνθετα υλικά. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά παρουσίασαν αύξηση 5% σε ετήσια βάση στην αυτοκινητοβιομηχανία από το 2015. Η παγκόσμια ζήτηση για σύνθετα υλικά ήταν έχει εκτοξευθεί από το 2015. [58]

## 5.2 Ανθρακονήματα-πολυμερή

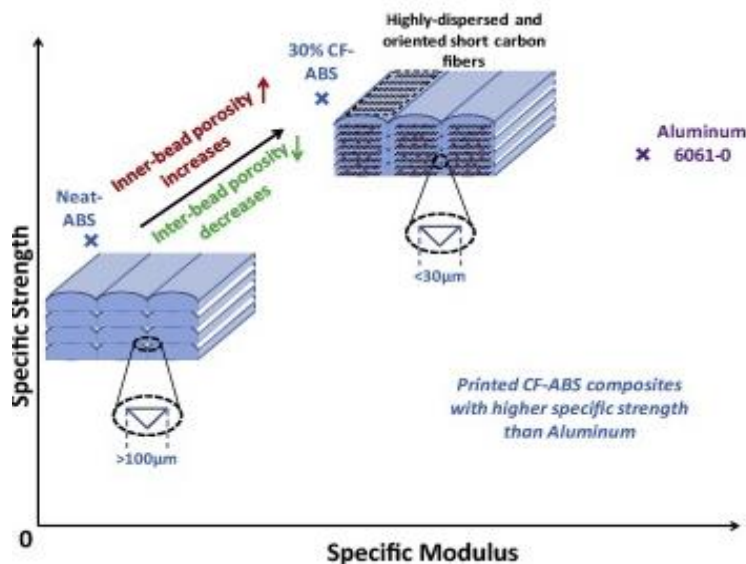
Παρακάτω θα παρουσιαστεί μια έρευνα που διεξήχθη σχετικά με τη χρήση των συνθετικών υλικών ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου ενισχυμένα με κοντές ίνες (0,2-0,4 mm) ως πρώτη ύλη για την προσθετική κατασκευή. Στην έρευνα αναλύεται η δυνατότητα επεξεργασίας, η μικροδομή και η μηχανική απόδοση αυτών των υλικών. Επιπλέον, η έρευνα συγκρίνει τα πρόσθετα συστατικά με τα παραδοσιακά σύνθετα υλικά που παράγονται με τη συμβατική τεχνική χύτευσης με συμπίεση.

Η έρευνα έδειξε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό και ο συντελεστής εφελκυσμού των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δειγμάτων αυξήθηκαν κατά περίπου 115% και 700% αντίστοιχα. Επιπλέον, η προσθετική κατασκευή δημιούργησε δείγματα με πολύ υψηλό προσανατολισμό ινών προς την κατεύθυνση εκτύπωσης (έως 91,5%), ενώ η διαδικασία χύτευσης με συμπίεση δημιούργησε δείγματα με σημαντικά χαμηλότερο προσανατολισμό ινών προς την κατεύθυνση εκτύπωσης (μέχρι 63%). Αυτό σημαίνει ότι η προσθετική κατασκευή μπορεί να δημιουργήσει αντικείμενα με πολύ υψηλότερη αντοχή και αντοχή στη διάβρωση από ό,τι η διαδικασία χύτευσης με συμπίεση. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες κατά την επιλογή της διαδικασίας κατασκευής, όπως η ποιότητα του υλικού, οι διαθέσιμες δυνατότητες της εκάστοτε διαδικασίας και οι απαιτήσεις του συγκεκριμένου κατασκευαστικού έργου.

Η ενίσχυση με ίνες μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις ιδιότητες των υλικών από πολυμερική ρητίνη και τα σύνθετα υλικά συνεχών ινών μπορούν να προσφέρουν υψηλή μηχανική απόδοση. Τα Secreted Frizzled-Related proteins (SFRPs) χρησιμοποιούνται συχνότερα για την κατασκευή σύνθετων εξαρτημάτων χαμηλού κόστους, αλλά έχουν μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Οι μηχανικές ιδιότητες τους εξαρτώνται σημαντικά από την κατανομή του μήκους και του προσανατολισμού των ινών. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, η θραύση των ινών μπορεί να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Όσο αυξάνεται η φόρτωση των ινών, τόσο αυξάνεται και η θραύση τους, λόγω της αυξημένης αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Επομένως, η κατανομή του μήκους της ίνας, ο προσανατολισμός της ίνας καθορίζουν την τελική κατανομή μήκους ινών του σύνθετου υλικού. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή, την επιμήκυνση και την αντοχή στη διάβρωση του σύνθετου υλικού. Για παράδειγμα, ένα σύνθετο υλικό με ίνες που έχουν προσανατολιστεί παράλληλα με τον άξονα τομής μπορεί να έχει μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με ένα σύνθετο υλικό με ίνες που έχουν τυχαίο προσανατολισμό.

Υπάρχουν μελέτες που αναφέρουν τη χρήση ενισχυμένης με ίνες πρώτης ύλης στην τεχνολογία FDM. Μία από αυτές είναι η μελέτη του Gray IV, στην οποία πρόσθεσε θερμοτροπικά υγρά κρυσταλλικά πολυμερή ινίδια σε πολυπροπυλένιο για να δημιουργήσει μια σύνθετη πρώτη ύλη για FDM.. Άλλη μια μελέτη του Zhong εξέτασε την επεξεργασία FDM βραχείας ρητίνης, ενισχυμένης με ίνες γυαλιού ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS). Η προσθήκη πλαστικοποιητή και συμβατοποιητή βελτίωσε την επεξεργασιμότητα της πρώτης ύλης. Επιπλέον, ο Shofner μελέτησε την επίδραση των ινών άνθρακα στο ABS ως πρώτη ύλη FDM,

παρατηρώντας αύξηση 39% στην αντοχή εφελκυσμού σε φόρτωση 10 wt% νανοϊνών. Παρ' όλα αυτά, δεν έχει αναφερθεί μέχρι σήμερα η επεξεργασία FDM βραχείας ρητίνης ενισχυμένης με ίνες άνθρακα διαμέτρου 5-7  $\mu\text{m}$ , παρά τις υψηλές δυνατότητές της να επιτύχει τις επιθυμητές μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες και τη χαμηλή πυκνότητα. Η χρήση σύνθετων υλικών θερμοπλαστικής μήτρας μπορεί να παρέχει περαιτέρω βελτιωμένη σκληρότητα και δυνατότητα ανακύκλωσης. [48]



**Εικόνα 5.2** Σχηματική παρουσίαση τρισδιάστατου εκτυπωμένου σύνθετου υλικού ενισχυμένου με ίνες με μοντελοποίηση λιωμένης εναπόθεσης. [48]

### 5.3 Πολυκατευθυντικά προμορφώματα για την παραγωγή σύνθετων υλικών

Τα παραδοσιακά σύνθετα υλικά αποτελούνται από μια φάση ενίσχυσης που συνδέεται με ένα συνδετικό υλικό. Οι ιδιότητές τους μπορούν να προσαρμοστούν μέσω της επιλογής συστατικών των υλικών και των τεχνικών επεξεργασίας, καθώς και μέσω του σχεδιασμού μικροδομικών παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να περιλαμβάνουν ενισχύσεις σε μορφή διακριτών σωματιδίων, συνεχών ινών, ή τρισδιάστατων προμορφωμάτων. Τα τρισδιάστατα προμορφώματα περιέχουν ίνες/νήματα που είναι ευθυγραμμισμένα σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις. Λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών τους, των μηχανικών ιδιοτήτων τους, της δομικής ικανότητας σχεδιασμού τους, της βελτιωμένης δομικής ακεραιότητας και ανοχής, τα πολυκατευθυντικά προμορφώματα έχουν ευρεία χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Τα παραδοσιακά σύνθετα υλικά αποτελούνται από μια φάση ενίσχυσης που συγκρατείται από ένα συνδετικό υλικό, και οι μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες μπορούν να προσαρμοστούν μέσω της κατάλληλης επιλογής των συστατικών των υλικών και τεχνικών επεξεργασίας, καθώς και του σχεδιασμού μικροδομικών παραμέτρων. Μεταξύ των μικροδομικών παραμέτρων, οι ενισχύσεις μπορεί να είναι με διακριτά

σωματίδια, συνεχείς ινώδεις δομές, δισδιάστατα ή τρισδιάστατα προμορφώματα. Στα τρισδιάστατα προμορφώματα, οι ίνες/νήματα είναι ευθυγραμμισμένα σε περισσότερες από μία κατευθύνσεις.

Μία από τις προκλήσεις στην κατασκευή προμορφωμάτων πολλαπλών κατευθύνσεων είναι η εξασφάλιση ότι θα έχουν την επιθυμητή γεωμετρία και διαστάσεις. Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα είναι η επίτευξη της απαιτούμενης μηχανικής αντοχής και ιδιοτήτων στρέβλωσης. Επιπλέον, η κατασκευή προμορφωμάτων πολλαπλών κατευθύνσεων μπορεί να επηρεάσει την απόδοση τους στο πεδίο της παραγωγής, καθώς μπορεί να επηρεάσει τη δυνατότητα επεξεργασίας τους και την αντοχή τους σε διάφορες συνθήκες.

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες και διαδικασίες κατασκευής, που επιτρέπουν την παραγωγή προμορφωμάτων πολλαπλών κατευθύνσεων με βελτιωμένες ιδιότητες και ακρίβεια. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τη χρήση ρομποτικών συστημάτων για την ακριβή τοποθέτηση των ιών, τη χρήση της τεχνολογίας του 3D εκτυπωτή για την κατασκευή προμορφωμάτων με πολλαπλές κατευθύνσεις. Επιπλέον, η ανάπτυξη προηγμένων υπολογιστικών μοντέλων και αλγορίθμων βελτιστοποίησης μπορεί να βοηθήσει στην ακριβή πρόβλεψη της μικρο- και μακρο-δομής των προμορφωμάτων και στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της κατασκευής τους. Αυτές οι τεχνολογίες και διαδικασίες κατασκευής έχουν ήδη ξεκινήσει να χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η ιατρική, και αναμένεται να επεκταθούν σε περισσότερους τομείς στο μέλλον. [49]

### **5.3.1 Προμορφώματα πολλαπλών κατευθύνσεων και συμβατικές τεχνολογίες κατασκευής κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων**

Τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα πολλαπλών κατευθύνσεων είναι ένα είδος προμορφωμάτων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Σε αυτά τα προϊόντα, οι ενισχυτικές ίνες είναι προσανατολισμένες σε πολλαπλές κατευθύνσεις. Η ευρεία χρήση των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων πολλαπλών κατευθύνσεων οφείλεται στα μοναδικά χαρακτηριστικά τους. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, καθώς τα 3D προμορφώματα παρέχουν ενίσχυση στην κατεύθυνση του πάχους και στο επίπεδο, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση στις τρεις διαστάσεις.
- Έχουν ευρεία δομική δυνατότητα σχεδιασμού, καθώς η έρευνα πάνω στη σχέση μεταξύ της διαδικασίας κλωστοϋφαντουργίας-κατασκευής-ιδιότητας παρέχει ένα ευρύ χώρο σχεδιασμού για τη δομή και την απόδοση του προμορφώματος.
- Έχουν βελτιωμένη δομική ακεραιότητα και αντοχή σε φθορές: Οι τεχνικές κατασκευής υφασμάτων επιτρέπουν την κατασκευή σε σχήμα δικτυού ή συνθετικών μερών με πολύπλοκα σχήματα, μειώνοντας ή εξαλείφοντας την ανάγκη για αρμούς. Η εξαιρετικά ενσωματωμένη δομή των ιών ενισχύει σημαντικά την ανοχή σε ζημιές και καταπονήσεις, καθιστώντας τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα πολλαπλών κατευθύνσεων ιδανικά για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα στον χρόνο, όπως για παράδειγμα στην κατασκευή αεροσκαφών και αυτοκινήτων, σε επαγγελματικά και спор είδη

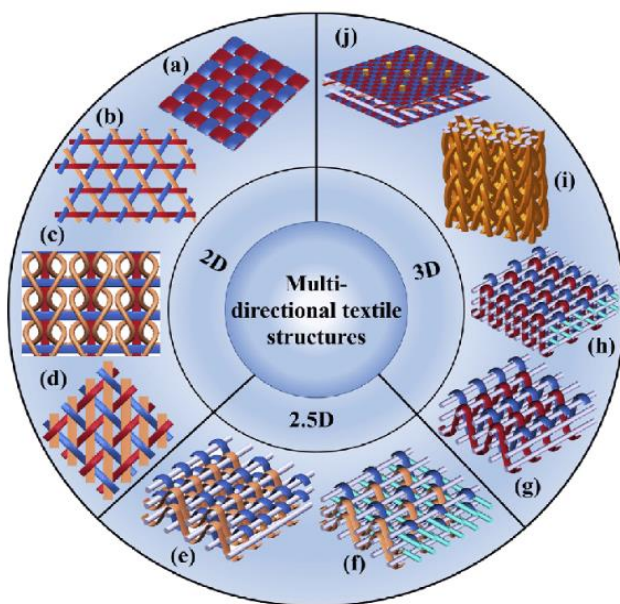
ενδυμασίας και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

- Η οικονομία του κόστους: Η χρήση δικτυωτής δομής για τη σύνθεση των εξαρτημάτων μειώνει σημαντικά ή ακόμα και εξαλείφει την ανάγκη για επεξεργασία, κοπή και συναρμολόγηση τους, επιτυγχάνοντας έτσι αποτελεσματικότητα στο κόστος.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές κατασκευής υφασμάτων με σύνθετα υλικά για προμορφώματα πολλαπλών κατευθύνσεων. Μία από αυτές είναι η ύφανση, όπου τα νήματα ταξινομούνται σε νήματα πλήρωσης και συνδετικού. Με το συνδυασμό διαφορετικών ομάδων νημάτων σε ένα προκαθορισμένο σχέδιο, μπορούν να δημιουργηθούν ύφασμα με δισδιάστατη ή τρισδιάστατη δομή, ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται. Άλλη μια τεχνική είναι η διαδικασία του πλέξιματος, η οποία αφορά τη σύνδεση κάθε νήματος σε ένα φορέα, ο οποίος κινείται κατά μήκος κυματοειδών γραμμικών ή κυκλικών διαδρομών για το 2D πλέξιμο, ή μέσα σε μια πλατφόρμα για το τρισδιάστατο πλέξιμο. Κατά τη διαδικασία, τα νήματα συμπλέκονται λόγω της διαφορετικής κίνησης τους. Το αποτέλεσμα είναι ένα πολύ ελαστικό ύφασμα, στο οποίο τα νήματα τυλίγονται το ένα μέσω του άλλου για να σχηματίσουν μια δομή.

Μια άλλη τεχνική είναι το καρφίτσωμα και η ραφή με Z. Η στερέωση και η ραφή με τη χρήση του Z-καρφώματος είναι συνήθως τεχνικές ενίσχυσης πολυστρωματικών κατασκευών στην κατεύθυνση του πάχους/Z. Κατά τη διαδικασία του Z-καρφώματος, μια ομάδα ακίδων προσανατολισμένων στην κατεύθυνση του διαμπερούς πάχους εισάγεται στα ελασματοποιημένα στρώματα, ενώ στη διαδικασία της ραφής χρησιμοποιείται μια ομάδα συνεχών νημάτων.

Παρακάτω στην εικόνα 5.3.1. παρουσιάζονται οι δισδιάστατες (2D) υφαντικές κατασκευές: (α) απλό υφαντό ύφασμα, (β) τριαξονικό υφαντό ύφασμα, (γ) ένθετο πλεκτού υφάσματος με ίσια νήματα, (δ) τριαξονική πλεξούδα 2D. (ε) Υφαντικές κατασκευές 2.5D: υφαντό ύφασμα από στρώμα σε στρώμα με γωνιακή μανδάλωση χωρίς και (στ) με ένθετα ίσια νήματα. Τρισδιάστατες υφαντικές κατασκευές: (ζ) υφαντό ύφασμα 3D διαμέσου του πάχους γωνίας-αλληλοκλείδωσης, (η) 3D ορθογώνιο υφαντό ύφασμα, (ι) τρισδιάστατη πλεκτή δομή και (ι) 3D ραμμένο πολυστρωματικό προφόρμα. 2.5D, δυόμισι διαστάσεις. 3D, τρισδιάστατο; 2D, δισδιάστατο. [49], [50]



**Εικόνα 5.3.1** Ταξινόμηση τυπικών υφασμάτων πολλαπλών κατευθύνσεων με βάση τη διάσταση των προδιαμορφωμένων δομών. [50]

## 5.4 Εκτύπωση πολυλειτουργικών νανοσύνθετων υλικών

Η προσθετική κατασκευή μπορεί να ανοίξει νέους δρόμους για τη δημιουργία πολυλειτουργικών νανοσύνθετων υλικών. Χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα εκτύπωσης τρισδιάστατων αντικειμένων με νανοϋλικά, μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερο έλεγχο των ιδιοτήτων του υλικού σε όλες τις διαστάσεις. Η χρήση των νανοϋλικών μπορεί να επεκτείνει την πολυλειτουργικότητα των νανοσύνθετων υλικών και να βελτιώσει ιδιότητες όπως η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε παραδείγματα που δείχνουν τις λειτουργικές ιδιότητες των νανοϋλικών στην προσθετική κατασκευή.

Σήμερα, οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο τα νανοσύνθετα υλικά λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που προσφέρουν από τη μητρική τους ύλη. Παρόλα αυτά, υπάρχουν προκλήσεις που εμποδίζουν την παραγωγή νανοσυνθετικών υλικών σε διάφορους τομείς, όπως η επεξεργασία, το κόστος, η συνέπεια και η αξιοπιστία στην παραγωγή σε μεγάλες ποσότητες, ο υψηλός χρόνος παράδοσης και η θερμική αστάθεια τους. Ωστόσο, οι νέες τεχνικές επεξεργασίας που έχουν αναπτυχθεί μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα για τα νανοσύνθετα υλικά. Ένας ερευνητικός τομέας που έχει παραλληλιστεί με την ανάπτυξη των νανοσυνθετικών υλικών κατά τις τελευταίες δεκαετίες είναι η προσθετική κατασκευή.

Η προσθετική κατασκευή μπορεί να δώσει τη δυνατότητα να προστεθούν νανοσωλήνες άνθρακα, νανοσύρματα και κβαντικές κουκκίδες σε μήτρες υποδοχής, πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά, κάνοντας την παραγωγή των νανοσύνθετων ακόμη πιο επεκτάσιμη. Η συνένωση αυτών των τεχνολογιών θα μπορούσε να έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως προσαρμοσμένες γεωμετρίες αντικειμένων, μειωμένη καθυστέρηση στον σχεδιασμό, παραγωγή εργαλείων και αυξημένη ενσωμάτωση εξαρτημάτων.



Έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες που έχουν αποδείξει τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα της χρήσης νανοϋλικών στην προσθετική κατασκευή. Δύο μέθοδοι για την ενσωμάτωσή τους είναι: (1) η εκτύπωση του υλικού της μήτρας κεντρικού υπολογιστή σε διακεκομμένα στάδια, ακολουθούμενη από την αυτόματη ή χειροκίνητη εισαγωγή των νανοϋλικών, και (2) η προ-ανάμιξη των νανοϋλικών στη μήτρα κεντρικού υπολογιστή, ακολουθούμενη από την εκτύπωση του μίγματος ως ένα πλήρες τρισδιάστατο αντικείμενο. Η προσθήκη νανοϋλικών μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες, να αυξήσει τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, να μειώσει τις θερμοκρασίες πυροσυσσωμάτωσης και να επηρεάσει την ακρίβεια των διαστάσεων, παρέχοντας μια ισχυρή εργαλειοθήκη στη συνηθισμένη παραγωγή αντικειμένων.[67]

## 5.5 Προσθετική κατασκευή σύνθετων υλικών πολυμερών-ινών

Η προσθετική κατασκευή σύνθετων υλικών πολυμερών-ινών αποτελεί μια μέθοδο που συνέβαλε στη δημιουργία εξαιρετικά προσαρμοσμένων εξαρτημάτων με σημαντικά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Σχεδόν όλες οι διαθέσιμες μέθοδοι προσθετικής κατασκευής θα μπορούσαν να ωφεληθούν από τη χρήση τεχνικών ενίσχυσης ινών. Μερικές από αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνουν τη Fused Deposition Modeling (FDM), την Laminated Object Manufacturing (LOM), τη Stereolithography (SL) και την Selective Laser Sintering. Εκτός από την επιπλέον αντοχή που προσφέρουν, οι ίνες έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης στην εκτύπωση 4D για τον έλεγχο και τον χειρισμό της αλλαγής σχήματος ή της διόγκωσης μετά την εκτύπωση 3D.

Μέχρι σήμερα, η βιομηχανία προσθετικής κατασκευής έχει βασιστεί κυρίως στην εκτύπωση ενός μόνο υλικού, με περιορισμένες επιλογές σε ρητίνες συμβατές με εμπορικούς εκτυπωτές. Αυτό έχει περιορίσει σοβαρά τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των αντικειμένων που παράγονται. Για να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα, αναπτύχθηκαν εκτυπωτές πολλαπλών υλικών με μερικό έλεγχο της σύνθεσης και των ιδιοτήτων του υλικού, δίνοντας τη δυνατότητα για την παραγωγή πολυεπίπεδων σύνθετων υλικών. Επιπλέον, οι πολλαπλές κεφαλές εκτύπωσης επέτρεψαν την εκτύπωση μεικτών συνθετικών υλικών με λειτουργικά και μεταβλητά χαρακτηριστικά, βελτιώνοντας σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, αυτές οι διαδικασίες είναι πολύπλοκες και δυσκολεύουν την επεξεργασία. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, απαιτούνται νέες τεχνολογίες για την ανάπτυξη νέων μεθόδων κατασκευής σύνθετων υλικών μέσω της προσθετικής κατασκευής.

Μια πιθανή προσέγγιση για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, είναι η χρήση πολλαπλών υλικών και η ενσωμάτωση λειτουργικών χαρακτηριστικών στα αντικείμενα που παράγονται, μέσω της εκτύπωσης μεικτών συνθετικών υλικών. Επιπλέον, η ανάπτυξη νέων ρητινών και άλλων υλικών, που θα έχουν βελτιωμένες ιδιότητες, θα μπορούσε να βοηθήσει στη δημιουργία αντικειμένων με πιο ανθεκτικά και πολύπλοκα χαρακτηριστικά. Η εξέλιξη των τεχνολογιών μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να παίξει έναν σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της διαδικασίας της προσθετικής κατασκευής και της ανάπτυξης

νέων υλικών και τεχνικών. Η χρήση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της εκτύπωσης, στην ανίχνευση προβλημάτων που επηρεάζουν την ποιότητα των εκτυπωμένων αντικειμένων και στη βελτίωση της απόδοσης του εκτυπωτή σε διάφορες συνθήκες.

Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στη χρήση προαναμεμιγμένων υλικών με υλικά πλήρωσης, όπως νανοσωματίδια, νανοσωλήνες άνθρακα, ίνες και γραφένιο, προκειμένου να επιτευχθούν μοναδικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Η προσθήκη ίνων, ειδικότερα, αποτελεί αποδοτική λύση για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των πολυμερών. Τα προαναμεμιγμένα υλικά με ασυνεχείς ίνες έχουν αποτελέσει αντικείμενο έντονης έρευνας, καθώς αποτελούν μια εναλλακτική λύση για εκτυπωτές πολλαπλών κεφαλών με πολύπλοκα και δαπανηρά σχέδια. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν μοναδικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες, ανάλογα με το πρόσθετο που χρησιμοποιείται, και μπορούν να επιτύχουν κατάλληλες μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες με φθηνότερο τρόπο.

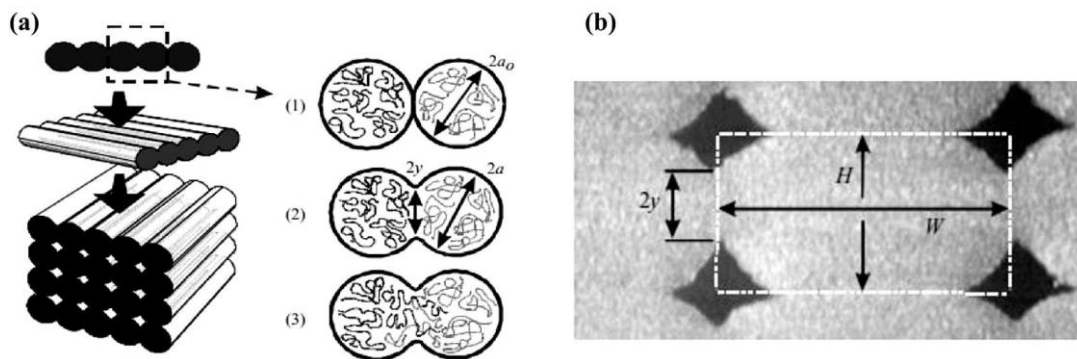
Τα πολυμερή έχουν κεντρικό ρόλο στην προσθετική κατασκευή λόγω της ευκολίας και της διαθεσιμότητάς τους. Η βιομηχανία της προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιεί κυρίως πολυμερή σε διάφορες μορφές, όπως υγρά διαλύματα και θερμοπλαστικά τήγματα. Οι βελτιώσεις στην ενίσχυση ινών μαζί με αυτά τα υλικά προσφέρουν έναν ευνοϊκό συνδυασμό για τη μελλοντική ανάπτυξη της τεχνολογίας AM. Επιπλέον, σχεδόν όλες οι υπάρχουσες μέθοδοι προσθετικής κατασκευής μπορούν να ωφεληθούν από την ενίσχυση με ίνες. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν, όπως η επίδραση των ινών στην ανάλυση, το σχηματισμό συσσωματωμάτων, τον ετερογενή σχηματισμό σύνθετων υλικών, την απόφραξη των κεφαλών του εκτυπωτή, την μη πρόσφυση και τους αυξημένους χρόνους σκλήρυνσης. Αν και αυτά τα ζητήματα αποτελούν πρόκληση στην προσθετική κατασκευή, οι επιστήμονες συνεχίζουν να αναπτύσσουν νέες μεθόδους και τεχνολογίες που θα βελτιώσουν τη δυνατότητα αξιοποίησης των ινών στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής.[68]

## **5.6 3D εκτύπωση σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στην Fused Deposition**

### **Modeling (FDM)**

Η προσθήκη ινών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις ιδιότητες των αντικειμένων που εκτυπώνονται με πολυμερή μήτρα στην προσθετική κατασκευή. Η τεχνολογία FDM είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στον τομέα της προσθετικής κατασκευής και αποτελεί παραπάνω από το 41,5% του μεριδίου αγοράς της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής. Τα κύρια στοιχεία της τεχνολογίας αυτής περιλαμβάνουν ένα μηχανισμό τροφοδοσίας υλικού, ένα υγροποιητή, μια κεφαλή εκτύπωσης, ένα σκελετό και μια επιφάνεια κατασκευής. Η διαδικασία αυτή διέπεται από πολλές παραμέτρους, όπως το πλάτος των σφαιριδίων, το διάκενο αέρα, τη θερμοκρασία κατασκευής και την κατεύθυνση.

Στα σχήματα 1 και 2 παρουσιάζεται ο μηχανισμός συγκόλλησης των πολυμερών στοιχείων κατά μήκος της διατομής των τυπωμένων εξαρτημάτων. Έχουν προταθεί αρκετές ιδέες για τη βελτίωση της αντοχής και της ακρίβειας των τυπωμένων εξαρτημάτων, όπως η τοποθέτηση εξαρτημάτων κατασκευής για την αντιμετώπιση των συγκεντρωτικών τάσεων στις γωνίες και τη διασφάλιση εφελκυστικών φορτίων που μεταφέρονται αξονικά κατά μήκος των εκτυπωμένων κατευθύνσεων.[68], [74], [75], [76]



**Εικόνα 5.6** (α) Διαδικασία σχηματισμού δεσμού μεταξύ δύο νημάτων: (1) επαφή με την επιφάνεια. (2) ανάπτυξη λαιμού (3) μοριακή διάχυση στη διεπιφάνεια και τυχαιοποίηση, (β) μικροφωτογραφία της περιοχής διατομής ενός τμήματος FDM:  $W$  είναι το πλάτος του νήματος,  $H$  είναι το ύψος του νήματος.  $2y$  είναι το μήκος του λαιμού μεταξύ των παρακείμενων νημάτων. [68]

## Κεφάλαιο 6

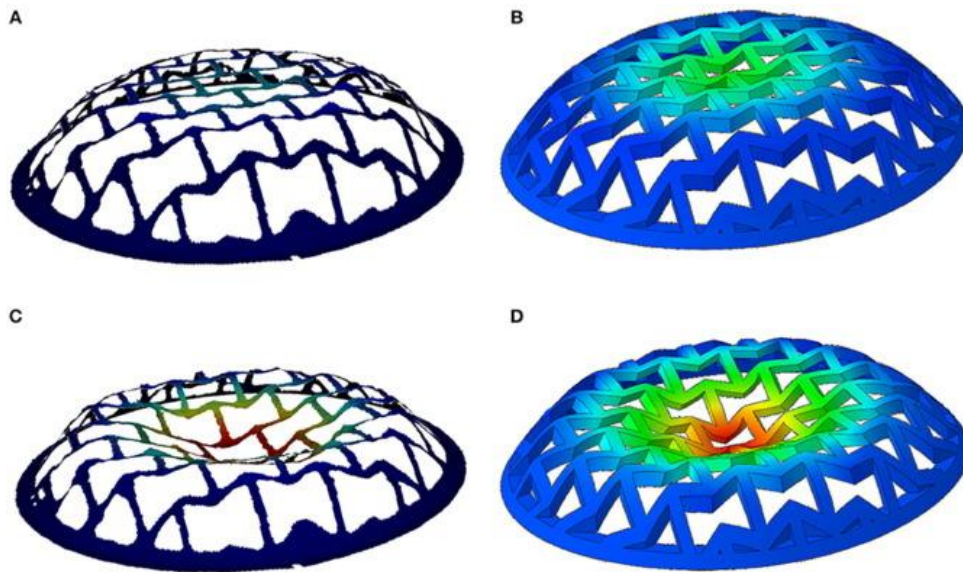
### 6 Σύγχρονα αυξητικά υλικά

Οι αυξητικές δομές ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία δομικών στοιχείων που έχουν αρνητικό συντελεστή Poisson λόγω της εσωτερικής μικροδομής ή της δομικής γεωμετρίας τους. Για να κατασκευαστούν αυτές οι δομές, απαιτούνται εξειδικευμένες διαδικασίες κατασκευής που στοχεύουν στην επίτευξη ακρίβειας διαστάσεων, μείωσης της σπατάλης υλικού και ταχύτερης κατασκευής.

Ενώ τα κανονικά υλικά συστέλλονται όταν τεντώνονται, τα αυξητικά υλικά διαστέλλονται πλευρικά κατά μήκος. Ο συγγραφέας Love περιέγραψε σε ένα βιβλίο το 1944 ένα υλικό με αρνητική αναλογία Poisson, το πρώτο εύρημα αυξητικού υλικού που καταγράφηκε, αν και υλικά με αρνητική ή μηδενική αναλογία Poisson μπορεί να ήταν γνωστά για περισσότερο από 100 χρόνια πριν.

Ο Gibson βρήκε την επόμενη τεκμηριωμένη απόδειξη ενός αυξητικού υλικού 38 χρόνια αργότερα, το 1982. Ανακάλυψε ότι οι δισδιάστατες κυψελωτές δομές από καουτσούκ σιλικόνης ή αλουμινίου μπορούν να παραμορφωθούν από την κάμψη των νευρώσεων και να παρουσιάσουν αυξητικό αποτέλεσμα. Αυτά τα αυξητικά κυψελωτά υλικά έχουν μοναδικές και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες καθώς παρουσιάζουν αρνητικό λόγο Poisson λόγω της δομικής παραμόρφωσης της εσωτερικής κυτταρικής δομής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου τους όταν τεντώνονται και το αντίστροφο. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν αυτά τα υλικά κατάλληλα για πολλές εφαρμογές, όπως η ενίσχυση της πυκνότητας, της ακαμψίας, της αντοχής στη θραύση, της απορρόφησης ενέργειας και της απόσβεσης. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να προσαρμοστούν περαιτέρω χρησιμοποιώντας μεταβλητή γεωμετρία (κυψελοειδή) και κατανομή πυκνότητας. Μια τέτοια προσαρμογή μπορεί να επιτευχθεί μέσω λειτουργικά διαβαθμισμένου πορώδους αυξητικών υλικών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια επισκόπηση των αυξητικών υλικών ως προς την ανάπτυξή τους, τις πιο κοινές γεωμετρίες, τις μεθόδους κατασκευής, τις μηχανικές ιδιότητες, τις εφαρμογές και τις περαιτέρω δυνατότητες τους.

Τα αυξητικά υλικά διαθέτουν σημαντικά μηχανικά και θερμικά χαρακτηριστικά όπως: μειωμένη πυκνότητα, εξαιρετική ακουστική απόδοση, βελτιωμένο θερμικό έλεγχο (ιδανικό για εφαρμογές σε εναλλάκτες θερμότητας), υψηλότερη απορρόφηση ισχύος, αντοχή σε φορτία και πολλά άλλα. Παρακάτω παρουσιάζεται η επεικόνιση αυξητικού υλικού σε σχήμα θόλου. [59], [60], [69]

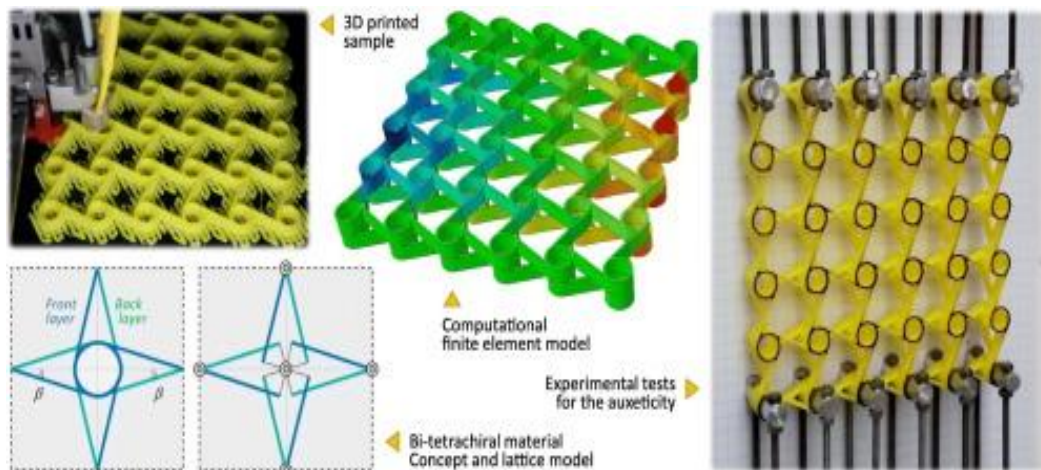


Εικόνα 6 Αυξητικά υλικά σε σχήμα θόλου. [60]

### 6.1 Η εξέλιξη των αυξητικών υλικών μέσω μελέτης της μικροδομής της κηρήθρας

Υλικά με μικροδομή κυψελοειδούς μορφής είναι ιδανικά για πολλές καινοτόμες τεχνολογικές εφαρμογές, λόγω των ιδιοτήτων τους. Τα υλικά αυτά παρέχουν ακραία χαρακτηριστικά κατευθυντικής αυξητικότητας, ενισχυμένη αντοχή έναντι αστάθειας λυγισμού και αντοχή σε θραύση και εσοχή. Η μικροδομή τους μπορεί να προσαρμοστεί με λεπτομέρεια, για την υλοποίηση αποτελεσματικών και ευέλικτων φίλτρων, κυματοδηγών και διόδων. Πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία έχουν επιβεβαιωθεί με παραμετρικές αναλυτικές και υπολογιστικές αναλύσεις, έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της επίτευξης ισχυρών αρνητικών αναλογιών Poisson. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από μια περίεργη σφαιρική ελαστική ιδιότητα μιας τοπολογίας δύο στρωμάτων.

Με βάση την κινηματική συμπεριφορά του τετραχειρικού υλικού, έχει σχεδιαστεί μια νέα τοπολογία διπλής στιβάδας, η οποία ονομάζεται δι-τετραχειρικό υλικό και έχει μηχανικά μοντελοποιηθεί. Η νέα τοπολογία εκμεταλλεύεται τη συνεργασία μεταξύ δύο τετραχειρικών στρωμάτων με αντίθετες χειρομορφίες, και έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από το τετραχειρικό υλικό, όσον αφορά τον παγκόσμιο συντελεστή Young και την αυξητική συμπεριφορά. Επιπλέον, η νέα τοπολογία δίνει τη δυνατότητα επίτευξης ισχυρά αρνητικών αναλογιών Poisson, η οποία αποτελεί μια σημαντική ελαστική ιδιότητα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν επιβεβαιωθεί από παραμετρικές αναλυτικές και υπολογιστικές αναλύσεις. [61]



Εικόνα 6.1 Δομή τετραχειρικού υλικού. [61]

## 6.2 Προσθετική κατασκευή για τη δημιουργία αυξητικών μεταλλικών διπλού υλικού

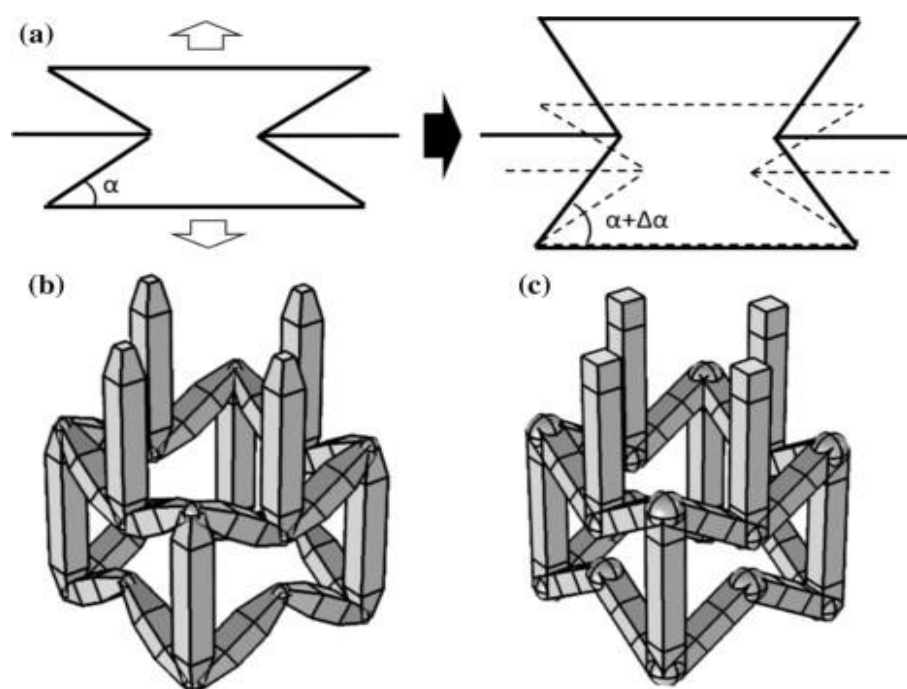
Η πλειονότητα των συμβατικών υλικών διαθέτουν θετική αναλογία Poisson, δηλαδή όταν εφαρμόζεται επέκταση στον άξονα του υλικού, παρατηρείται συστολή στη διάταξη των μορίων κατά μήκος της διεύθυνσης που είναι κάθετη στον άξονα αυτό και αντίστροφα. Αυτό συμβαίνει διότι διατηρείται ο όγκος του υλικού. Αντίθετα, τα αυξητικά υλικά εμφανίζουν πλευρική αλλαγή στις διαστάσεις τους κατά την εφαρμογή τάσης ή συμπίεσης κατά μήκος τους.

Τα αυξητικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως και έχουν αναφερθεί για μια ευρεία γκάμα υλικών, όπως μέταλλα, κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά και ινώδη υλικά. Αν και η θεωρητική αναλογία Poisson για ισοτροπικά στερεά υλικά είναι  $-1$ , τα μεταλλικά υλικά μπορούν να υπερβούν αυτό το όριο. Τα μεταλλικά υλικά εισήχθησαν για πρώτη φορά ως νέα ηλεκτρομαγνητικά υλικά και η δομή τους έχει μήκος μικρότερο από το μήκος κύματος. Πρόσφατα, η έννοια των μεταλλικών υλικών επεκτάθηκε για να περιλαμβάνει οποιοδήποτε υλικό του οποίου οι αποτελεσματικές ιδιότητες προέρχονται από τη δομή του και όχι από τη μαζική συμπεριφορά των υλικών που το αποτελούν.

Υπήρξαν πολλές αναζητήσεις για την ανάπτυξη αυξητικών υλικών από συμβατικά υλικά, όπως εποξειδικό SU-8, υγρά κρυσταλλικά πολυμερή, μέταλλα, και σύνθετα. Οι επιστήμονες δημιούργησαν μια βιβλιοθήκη σχεδιασμού με βοήθεια υπολογιστή (CAD) που περιλαμβάνει αυξητικές γεωμετρίες και συνέκριναν τις αναλογίες Poisson, τις μέγιστες μειώσεις εμβαδού/όγκου και τους ισοδύναμους συντελεστές Young μεταξύ 25 δισδιάστατων (2D) και 7 τρισδιάστατων (3D) μοτίβων. Φυσικά, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών..

Η αυξητικότητα του μεταλλικού προκύπτει από την ευκαμψία των αρμών, δηλαδή την ικανότητα αλλαγής γωνίας μεταξύ δύο συνδεδεμένων αρθρώσεων (Εικ. 6.2.α). Καθώς το πάχος των αρθρώσεων

αυξάνεται, μπορεί κανείς είτε να αυξήσει ταυτόχρονα το πάχος στους αρμούς, γεγονός που μειώνει την ευκαμψία (Εικ. 6.2.b), είτε να διατηρηθούν οι αρθρώσεις σε πιο λεπτές γεωμετρίες, γεγονός που τις αφήνει ως δομικά αδύναμες όταν ολόκληρη η δομή παραμορφώνεται (Εικ.6.2.c). Σε άλλες μελέτες που έχουν διερευνηθεί οι επιδράσεις των γεωμετρικών αλλαγών σε βασικά αυξητικά, συμπεριλαμβανομένου του σχήματος κυψέλης, της ευθυγράμμισης της δέσμης και των γωνιών, παρατηρείται ότι το υψηλότερο ισοδύναμο του συντελεστή Young υποδηλώνει πιο άκαμπτες δομές που ουσιαστικά σημαίνουν μεγαλύτερες αρθρώσεις που είναι κατασκευασμένες από ένα μόνο υλικό. Η αυξητικότητα του μεταλλικού προκύπτει από την ευκαμψία των αρμών, δηλαδή την ικανότητα αλλαγής γωνίας μεταξύ δύο συνδεδεμένων αρθρώσεων (Εικ. 6.2.a). Τα παραπάνω σενάρια οδηγούν σε μείωση της αρνητικής αναλογίας Poisson ή μείωση της μέγιστης επιφάνειας ή όγκου.



**Εικόνα 6.2** (α) Αλλαγές γωνίας στις αρθρώσεις όταν το αυξητικό μεταλλικό παραμορφώνεται. (β) το πάχος στους αρμούς αυξάνεται με τις δοκούς/τοιίχους, και (γ) το πάχος στους αρμούς παραμένει το ίδιο όταν το πάχος των δοκών/τοιίχων αυξάνεται. [62]

Η χρήση της τεχνολογίας PolyJet® από την Objet στους τρισδιάστατους εκτυπωτές της σειράς Connex™ που κατασκευάζονται από την Stratasys Ltd. έχει επιλύσει το δίλημμα του σχεδιασμού με αυξητικά υλικά. Οι Connex™ εκτυπωτές είναι σε θέση να εκτυπώνουν δύο τύπους υλικών ταυτόχρονα στο ίδιο μέρος και να δημιουργήσουν "ψηφιακά υλικά" με μικτές μηχανικές ιδιότητες. [62]

### 6.3 Ανάπτυξη δομής αρνητικού λόγου Poisson από TiNi μέσω Selective Laser Melting

Η ανάπτυξη νέων υλικών με ιδιότητες που να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες ανάγκες είναι ένα σημαντικό πεδίο έρευνας στην επιστήμη των υλικών. Ένα από τα υλικά που έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον της

επιστημονικής κοινότητας είναι το TiNi. Το TiNi είναι ένα από τα πιο δημοφιλή και πολλά υποσχόμενα υλικά καθώς διαθέτει την ικανότητα να αλλάζει το σχήμα του υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μέσω της τεχνικής SLM, μπορεί να δημιουργηθεί μια δομή Shape Memory Alloy βασισμένη στον αρνητικό λόγο Poisson. Αυτή η πολυλειτουργική δομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως θωράκιση, προσφέροντας αντιστατικές ιδιότητες και αντοχή σε κρούσεις.

Στο παρακάτω κείμενο θα αξιολογηθεί η επίδραση της ισχύος του λέιζερ, της ταχύτητας σάρωσης και της απόστασης διαδρομής στη διαδικασία SLM για την ανάπτυξη μικροδομικής και δομικής ακεραιότητας σε ένα κράμα νικελίου-τιτανίου TiNi. Επιπλέον, θα εξεταστεί το αντίκτυπο της ομογενοποίησης μετά τη διαδικασία επεξεργασίας στη μικροδομή και τους μετασχηματισμούς φάσης του υλικού.

Οι κατασκευές συνήθως παρουσιάζουν ρωγμές που προκαλούνται από τάσεις και υπολειπόμενο πορώδες, οι οποίες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Ωστόσο, η επεξεργασία ομογενοποίησης είναι απαραίτητη για τη μείωση του κλάσματος των διαμεταλλικών Ti<sub>2</sub>Ni, τα οποία επηρεάζουν τη χημεία και συνεπώς τις απαιτούμενες θερμοκρασίες μετασχηματισμού φάσης. Οι βέλτιστες παράμετροι διεργασίας χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή δομών με αρνητικό λόγο Poisson και αυτές επικυρώθηκαν μηχανικά για να επιβεβαιωθούν οι προβλέψεις του λόγου Poisson.

Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλότερη ολκιμότητα στις κατασκευές που είχαν υποστεί επεξεργασία ομογενοποίησης. Η ελαχιστοποίηση αυτών των ρωγμών θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της βελτιστοποίησης της διαδικασίας SLM, συμπεριλαμβανομένων της ισχύος του λέιζερ, της ταχύτητας σάρωσης και της απόστασης διαδρομής. Επιπλέον, η επεξεργασία ομογενοποίησης ήταν απαραίτητη για τη μείωση του κλάσματος των διαμεταλλικών Ti<sub>2</sub>Ni, τα οποία διαταράσσουν τη χημεία και επηρεάζουν τις απαιτούμενες θερμοκρασίες μετασχηματισμού φάσης.

Οι δομές NPR, είναι διασυνδεδεμένες δομές που αναπτύσσονται σε μέγεθος όταν τεντώνονται και συρρικνώνονται όταν συμπιέζονται. Αυτή η μοναδική ιδιότητα προσφέρει βελτιωμένη λειτουργικότητα στη μηχανική απόδοση αυτών των κατασκευών, παρέχοντας αντίσταση σε θραύση, συντελεστή διάτμησης, αντίσταση εσοχής και ακουστική απόκριση. Οι δομές NPR έχουν κατηγοριοποιηθεί σε διάφορους τύπους, όπως "χειρόμορφες", "επαναισόδου", "περιστρεφόμενες", και άλλες.

Μια συγκριτική μελέτη 2D και 3D NPR γεωμετριών που διεξήχθη από τον ερευνητή Elip, χρησιμοποιώντας προσομοίωση και CAD/CAE, έδειξε ότι οι γεωμετρίες 2D και 3D που επαναισάγονται έχουν την υψηλότερη αρνητική αναλογία Poisson και τη χαμηλότερη μείωση επιφάνειας, ενώ οι δομές NPR δισδιάστατων χειρόμορφων και τρισδιάστατων πυραμίδων έδειξαν τη μεγαλύτερη μείωση επιφάνειας και τη χαμηλότερη αναλογία Poisson, οι γεωμετρίες 2D και 3D που επαναισάγονται έχουν την υψηλότερη αρνητική



αναλογία Poisson και τη χαμηλότερη μείωση επιφάνειας, σύμφωνα με τη συγκριτική μελέτη που διεξήγαγε ο ερευνητής Elip χρησιμοποιώντας προσομοίωση και CAD/CAE.

Οι δομές NPR, είτε αυτές είναι χειρόμορφες, επαναεισόδου, περιστρεφόμενες, κ.α., προσφέρουν βελτιωμένη λειτουργικότητα στη μηχανική απόδοση τους σε σχέση με τις συμβατικές κατασκευές, και μπορούν να παρέχουν αυξημένη επιπεδωτική τάση, ρυθμίσιμη πυκνότητα, αντίσταση σε θραύση, συντελεστή διάτμησης, αντίσταση εσοχής και ακουστική απόκριση, ανάλογα με την κατασκευή και τη γεωμετρία τους.

Για να βελτιωθεί η λειτουργικότητα των δομών NPR, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κράματα μνήμης που βασίζονται σε TiNi. Η χρήση αυτών των κραμάτων μνήμης μπορεί να συνδυαστεί με τη χρήση της AM, προκειμένου να εκμεταλλευτεί τη σχεδιαστική ευελιξία που παρέχει. Τα κράματα SMA που βασίζονται σε TiNi έχουν μεγάλη λειτουργικότητα λόγω ενός αναστρέψιμου μετασχηματισμού φάσης, ο οποίος μπορεί να προκληθεί είτε από παραμόρφωση είτε από θερμοκρασία. Αυτή η μεταλλουργική συμπεριφορά καθιστά τα κράματα SMA κατάλληλα για δομές που απορροφούν κραδασμούς, φουσκώνουν ή ενεργοποιούνται, καθώς μπορούν να ανακτήσουν το αρχικό τους σχήμα μετά από παραμόρφωση, με ή χωρίς θερμικό ερέθισμα. Η χημεία του κράματος και οι παρούσες φάσεις καθορίζουν αν ο μετασχηματισμός φάσης προκαλείται από υπερελαστικότητα ή από φαινόμενο μνήμης σχήματος (SME).

Παρ' όλο που είναι γνωστό ότι η κατασκευή σχήματος μνήμης σε κράματα μεμονωμένης μετάλλαξης μέσω συμβατικών μεθόδων (όπως η χύτευση πλινθωμάτων και η θερμική παραμόρφωση) οδηγεί σε διάφορα ελαττώματα λόγω της υψηλής ευαισθησίας στις ρωγμές, μαζί με την κακή μηχανική αντοχή τους, εξετάζονται νέες διαδικασίες παραγωγής. Η χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής είναι μια πιθανή επιλογή για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προαναφέρθηκαν, λόγω της ευελιξίας στον σχεδιασμό, καθώς και της δυνατότητας μείωσης του διαχωρισμού και του μεγέθους των κόκκων, με αποτέλεσμα την κατασκευή βελτιωμένων μηχανικά δομών σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους όπως η χύτευση. [63], [71]

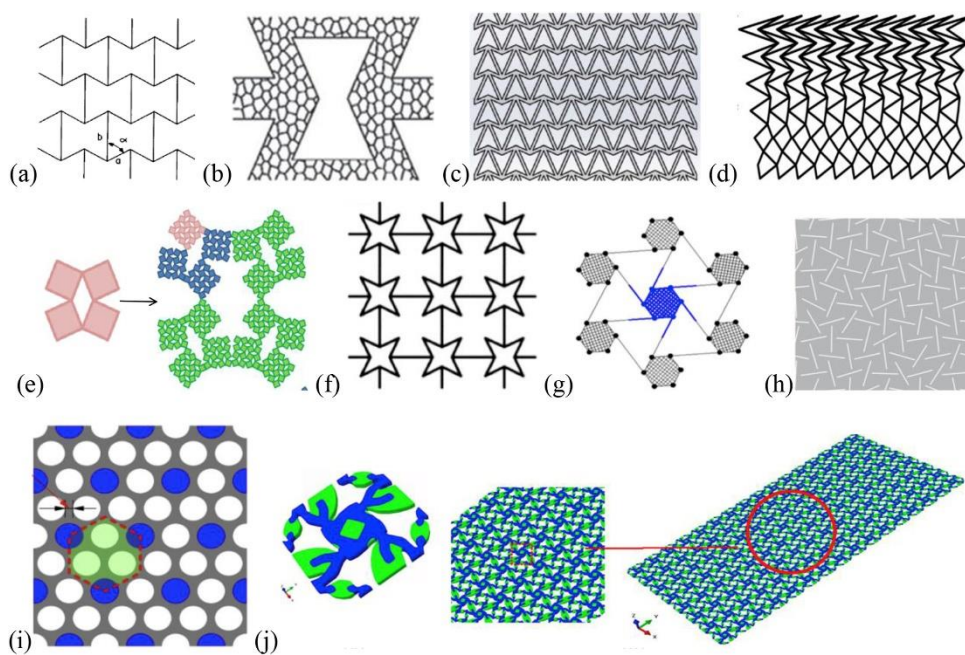
#### **6.4 Υλικά/Κατασκευές με Αυξητικούς Πυρήνες: Εφαρμογές και Πλεονεκτήματα**

Η τεχνολογία των αυξητικών υλικών και κατασκευών έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και έχει εντυπωσιάσει τους επιστήμονες και τους μηχανικούς με τις δυνατότητές της. Αυτά τα υλικά είναι σχεδιασμένα να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και να ανταποκρίνονται στις αλλαγές του.

Ένα αυξητικό υλικό είναι ένα υλικό που μπορεί να αλλάξει το μέγεθος, το σχήμα, την υφή, την πυκνότητα ή τις φυσικές του ιδιότητες όταν εκτίθεται σε εξωτερικούς παράγοντες, όπως η θερμότητα, ο φωτισμός, η υγρασία και η πίεση. Τέτοια υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, από τη βιομηχανία και την ηλεκτρονική έως την ιατρική και την αεροναυπηγική.

Η έννοια του αυξητικού υλικού είναι γνωστή εδώ και πολλές δεκαετίες. Αρχικά, η έρευνα επικεντρωνόταν σε υλικά που μπορούσαν να αλλάζουν το σχήμα τους με την εφαρμογή θερμότητας ή πίεσης, όπως τα μέταλλα και οι πλαστικοί πολυμερείς. Αργότερα, ανακαλύφθηκαν υλικά που μπορούν να αλλάξουν το μέγεθος τους με την εφαρμογή θερμότητας, όπως τα αυξητικά μέταλλα (π.χ. η μνήμη σχήματος αντιμετώπιση με τη θερμότητα) και τα αυξητικά πολυμερή. Η τεχνολογία των αυξητικών υλικών έχει κατακτήσει τη βιομηχανία και έχει δημιουργήσει νέες δυνατότητες για την κατασκευή προηγμένων προϊόντων και συστημάτων. Οι εφαρμογές των αυξητικών υλικών είναι ποικίλες και συνεχώς εξελίσσονται.

Τα αυξητικά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ευαίσθητων αισθητήρων και τη δημιουργία προηγμένων υλικών που μπορούν να αλλάζουν το χρώμα ή τη διαφάνειά τους σε απόκριση σε διάφορα ερεθίσματα όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση. Πολλά αυξητικά υλικά με δισδιάστατα (2D) και τρισδιάστατα (3D) σχέδια έχουν σχεδιαστεί, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Αυτά περιλαμβάνουν διάφορες μορφολογίες όπως αστέρι, αιχμή βέλους, με λιγότερες νευρώσεις, και με άλλες γεωμετρικές τοπολογίες. [65] ,[71] ,[72], [73]



**Εικ. 6.4** Τυπικές δισδιάστατες τοπολογίες για αυξητικά υλικά: (α) δομή επανεισόδου. (β) Δισδιάστατα κελιά (γ) δομή αιχμής βέλους (δ) στερεός όγκος που αλλάζει από τις επάνω κεφαλές διπλού βέλους στις κάτω συμβατικές κεφαλές διπλού βέλους ε) μηχανισμός περιστρεφόμενων άκαμπτων μονάδων (στ) σχήμα αστεριού (ζ) επαναλαμβανόμενη μονάδα χειρόμορφης δομής (η) ένα αυξητικό διάτρητο σύστημα (ι) αυξητικές κατασκευές με κυκλικά άκαμπτα εγκλείσματα (ι) διυλικά χειρόμορφα αυξητικών μεταλλικών: μονάδα μονάδας και περιοδική διάταξη  $8 \times 16$ . [65]

## Κεφάλαιο 7

### 7 Το μέλλον της προσθετικής κατασκευής στη μηχανική

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας και της ακαδημαϊκής κοινότητας, και έχει εμπνεύσει το κίνημα των κατασκευαστών με την εκδημοκρατισμένη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής. Οι εξελίξεις σε πολλές τεχνολογίες, όπως η επεξεργασία και η βελτιστοποίηση υλικών όλο ένα προωθούν την προσθετική κατασκευή ως πρώτη επιλογή, καθώς δημιουργεί νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της τεχνολογίας και τη δημιουργία πιο αποτελεσματικών και ανθεκτικών προϊόντων. Αυτό ενισχύει το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας και της βιομηχανίας για την προσθετική κατασκευή και οδηγεί σε ακόμη πιο σημαντικές εξελίξεις στο μέλλον.

Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής έχει γίνει δημοφιλής στα μέσα ενημέρωσης και έχει τραβήξει την προσοχή του κοινού και των ερευνητών σε πολλούς τομείς. Η τεχνολογία αυτή διαμορφώνεται συνεχώς και προσαρμόζεται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η μηχανική, η ιατρική, τα βιολογικά συστήματα και οι αλυσίδες εφοδιασμού τροφίμων. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον και επένδυση στις τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, καθώς η δημιουργία ενός αντικειμένου με αυτή την τεχνική μπορεί να δημιουργήσει πολύπλοκες γεωμετρίες χρησιμοποιώντας μια μεγάλη ποικιλία υλικών.

Οι νεοσύστατες εταιρείες συχνά αναπτύσσουν τρισδιάστατους εκτυπωτές για θερμοπλαστικά, οι οποίοι είναι καινοτόμοι και οικονομικοί. Αυτή η τεχνολογία έχει κατακτήσει τη φαντασία του ευρύτερου κοινού μέσω πλατφορμών όπως το Do-It-Yourself (DIY). Επιχειρήσεις εφοδιασμού και λιανικής εκμεταλλεύονται τη δημοτικότητα αυτών των πλατφορμών και προσφέρουν εμπορικές υπηρεσίες εκτύπωσης και αποστολής απευθείας στους πελάτες. Επιπλέον, υποστηρίζουν κοινότητες χομπίστων με διαδικτυακούς τρισδιάστατους μοντελιστές που επιτρέπουν στους χρήστες να δημιουργούν ή να προσαρμόζουν σχέδια και να τα μετατρέπουν σε προσαρμοσμένα προϊόντα.

Η ταχεία εξάπλωση των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής οφείλεται στην αύξηση της ποικιλίας των υλικών, στη διάθεση μηχανών χαμηλού κόστους και στις δυνατότητες για νέους τομείς εφαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι πλέον υπάρχουν περισσότερα διαθέσιμα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις τεχνολογίες αυτές, ενώ οι μηχανές παραγωγής έχουν γίνει πιο προσιτές σε κόστος. Αυτό επιτρέπει σε μικρότερες επιχειρήσεις και ακόμη και σε ιδιώτες να αξιοποιούν αυτές τις τεχνολογίες για να κατασκευάσουν πρωτότυπα και εξατομικευμένα προϊόντα. Επιπλέον, η δυνατότητα εφαρμογής των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής σε νέους τομείς όπως η ιατρική, η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω εξέλιξη και ανάπτυξη της τεχνολογίας. [44], [45]

## 7.1 Βασικές αρχές παραγωγής στην προσθετική κατασκευή

Η προσθετική κατασκευή αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στο μέλλον της βιομηχανίας. Η διαθεσιμότητα υλικών και μηχανών χαμηλού κόστους, σε συνδυασμό με τις καινοτόμες δυνατότητές της, έχουν οδηγήσει σε μια ταχεία εξάπλωσή της. Για να αξιοποιηθεί στο έπακρο το δυναμικό αυτής της τεχνολογίας, απαιτούνται εκπαιδευτικά προγράμματα προσαρμοσμένα ώστε να ενστερνίζονται τις θεμελιώδεις αρχές της και τις καινοτόμες δυνατότητές της. Η προσθετική κατασκευή καλύπτει αρκετούς κλάδους, όπως η κατασκευή, η αεροναυπηγική και η ιατρική τεχνολογία, παρουσιάζοντας μια πρόκληση για τους εκπαιδευτές.

Αυτό αποτελεί μια ευκαιρία για να ενσωματώσουν τη γνώση μέσω δημιουργικών και απαιτητικών έργων και να προετοιμάσουν τους μελλοντικούς επαγγελματίες για την αποτελεσματική χρήση αυτής της τεχνολογίας στη σχεδίαση και κατασκευή προϊόντων. Εκπαιδευτικά προγράμματα που περιλαμβάνουν την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής πρέπει να επικεντρώνονται σε θέματα όπως η σχεδίαση 3D μοντέλων, η χρήση και συντήρηση των εκτυπωτών 3D και η εφαρμογή της τεχνολογίας σε πρακτικά προβλήματα. Οι εκπαιδευτικοί πρέπει επίσης να είναι εξοικειωμένοι με τις πρόσφατες εξελίξεις και τις εφαρμογές της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής σε διάφορους κλάδους, όπως η ιατρική, η κατασκευή αυτοκινήτων και η αεροναυπηγική. Με αυτόν τον τρόπο, οι εκπαιδευτές μπορούν να προετοιμάσουν τους μελλοντικούς επαγγελματίες για μια καριέρα σε έναν ταχέως αναπτυσσόμενο κλάδο με αναπόφευκτη επίδραση στη μελλοντική παραγωγή και κατασκευή προϊόντων.

Η προσθετική κατασκευή ανοίγει τον δρόμο για τον σχεδιασμό και την παραγωγή πολύπλοκων αντικειμένων και επιτρέπει την εξερεύνηση νέων ιδιοτήτων των υλικών, αλλάζοντας τον τρόπο που διαμορφώνονται οι τοπικές και παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού. Αυτό το καινοτόμο εργαλείο έχει ήδη οδηγήσει σε επενδύσεις στην επικύρωση των τρεχουσών τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής και στην ταχεία ανάπτυξη νέων εννοιών. Τα έσοδα από προϊόντα και υπηρεσίες προσθετικής κατασκευής αυξήθηκαν κατά 35,2% από το 2013 έως το 2014, δείχνοντας την ταχύτερη ανάπτυξη αυτής της αγοράς. Υπάρχει μια αυξανόμενη επιρροή από τους κατασκευαστές, όπως αποδεικνύεται από τη μέση ετήσια αύξηση 346% στις πωλήσεις τρισδιάστατων εκτυπωτών καταναλωτικής χρήσης από το 2008 έως το 2011. Οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί έχουν αυξανόμενη ανάγκη για εξοικείωση με την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής και την πρακτική της εφαρμογής της, καθώς ο αριθμός των πωλήσεων τρισδιάστατων εκτυπωτών συνεχώς αυξάνεται και η χρήση αυτών των συσκευών γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη.

Η ταχεία ανάπτυξη και η δυναμική των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής απαιτούν εκπαιδευτικά προγράμματα που εστιάζουν στις βασικές αρχές της τεχνολογίας και επιτρέπουν σε σχεδιαστές και μηχανικούς να κατανοήσουν πλήρως τις δυνατότητές της. Επιπλέον, με την αυξανόμενη διαθεσιμότητα υλικών, λογισμικών και εξοπλισμού προσθετικής κατασκευής, η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο διδασκαλίας σε πολλούς τομείς. Το 2009, αναγνωρίστηκε η σημασία της εκπαίδευσης προσθετικής κατασκευής

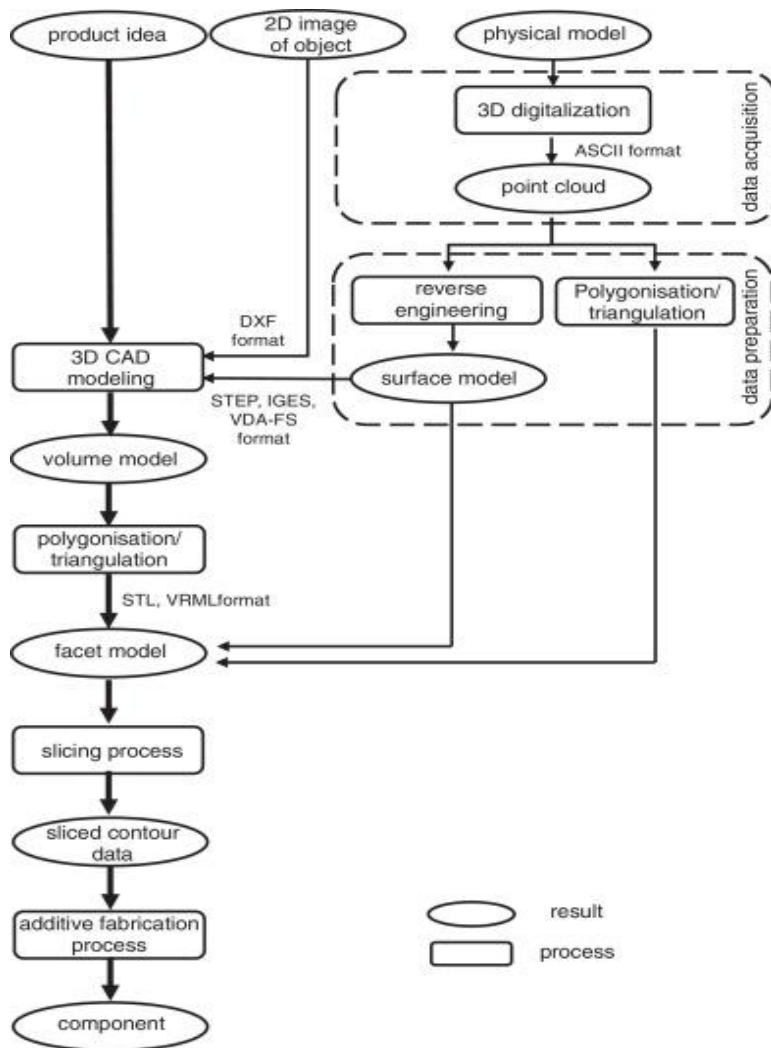
για την πρόοδο του τομέα και αναφέρθηκε η ανάγκη για προγράμματα σε πανεπιστήμια, κολέγια και άλλες κοινότητες. Από τότε, έχουν αναπτυχθεί πολλές πρωτοβουλίες για την εκπαίδευση στην τεχνολογία προσθετικής κατασκευής. [46]

### **7.1.1 Ψηφιακή ροή εργασιών για την προσθετική παραγωγή**

Η ψηφιακή ροή εργασιών αποτελεί ένα σύστημα που αναπτύχθηκε για να βελτιώσει και να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία παραγωγής μέσω προσθετικής κατασκευής. Στην ουσία αυτό περιλαμβάνει την χρήση ψηφιακών εργαλείων και τεχνολογιών για τη σχεδίαση, την προετοιμασία και την παραγωγή ενός αντικειμένου. Η παραγωγή περνά πλέον από μια ψηφιακή ροή εργασιών, σε μια φυσική ροή εργασιών που μετατρέπει τις πρώτες ύλες σε τελικά μέρη (Εικ. 7.2.1).

Αυτή η διαδικασία ξεκινά συνήθως με μια ιδέα προϊόντος, μια εικόνα 2D όπως μια φωτογραφία, ένα σύνολο εικόνων 2D όπως αυτές που προέρχονται από σαρώσεις Υπολογιστικής Τομογραφίας (CT) ή ένα φυσικό τρισδιάστατο αντικείμενο όπως ένα πρωτότυπο. Αυτά μετατρέπονται σε ψηφιακά μοντέλα με τη χρήση λογισμικού μοντελοποίησης. Στη συνέχεια, ελέγχονται τα δεδομένα για σφάλματα, διορθώνονται τα σφάλματα και προστίθενται δομές υποστήριξης, αν χρειάζεται, με τη χρήση λογισμικού ειδικά σχεδιασμένου για την παραγωγή προϊόντων με προσθετική κατασκευή, όπως το Magics από την Materialize NV.

Τέλος, το ψηφιακό μοντέλο διακριτοποιείται για να δημιουργηθούν οδηγίες για το μηχάνημα. Αυτό γίνεται συχνά χρησιμοποιώντας λογισμικό ειδικό για τη μηχανή, όπως την κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή CAM ή λογισμικό. Στη συνέχεια, η μηχανή προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιεί αυτές τις οδηγίες για να παράγει το τελικό μέρος, στρώμα πάνω σε στρώμα, μέσω της προσθετικής διαδικασίας. Το αποτέλεσμα είναι ένα τελικό μέρος που αντιστοιχεί απόλυτα στο ψηφιακό μοντέλο και είναι έτοιμο για χρήση.



Εικόνα 7.2.1 Ψηφιακή και φυσική ροή εργασίας από την ιδέα του προϊόντος στο πραγματικό στοιχείο. [47]

## 7.2 Σχεδιασμός για προσθετική κατασκευή: τάσεις, ευκαιρίες, εκτιμήσεις και περιορισμοί

Η προσθετική κατασκευή έχει βιώσει σημαντική ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες. Από ένα υποσχόμενο σύνολο μη εμπορευματοποιημένων τεχνολογιών στις αρχές της δεκαετίας του 1980, η προσθετική κατασκευή έχει εξελιχθεί σε έναν δυναμικό κλάδο, με διψήφια ανάπτυξη τα τελευταία 27 χρόνια. Αυτή η ανάπτυξη οφείλεται στη βελτίωση των υλικών και της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, καθώς και στην αύξηση της ζήτησης για εξατομικευμένα προϊόντα, στη μείωση του κόστους κατασκευής και στην αύξηση της ευελιξίας και της ταχύτητας παράδοσης. Επιπλέον, η εισαγωγή νέων επιχειρηματικών μοντέλων και οι αυξανόμενοι κανονισμοί για τη βιωσιμότητα έχουν συντελέσει στην επιτάχυνση της ανάπτυξης της.

Τα τελευταία 30 χρόνια, η χρήση της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής έχει εξελιχθεί σημαντικά. Αρχικά, οι εφαρμογές της προσθετικής κατασκευής επικεντρώνονταν σε μοντέλα και πρωτότυπα. Καθώς η τεχνολογία ωριμάζε, η προσθετική κατασκευή έπαιξε έναν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή γρήγορων και

ευέλικτων εργαλείων, όπως καλούπια χύτευσης κενού και σιλκόνης. Σήμερα, η τεχνολογία χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή ανταλλακτικών και τελικών προϊόντων. Το 2014, η αγορά ανταλλακτικών τελικής χρήσης προσθετικής κατασκευής είχε αξία πολλών δισεκατομμυρίων ευρώ, με αύξηση 66% σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Η δυναμική ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα αναμένεται να συνεχιστεί και στο μέλλον.

Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιεί ψηφιακές πληροφορίες για να παράγει φυσικά αντικείμενα κομμάτι-κομμάτι, γραμμή-γραμμή, επιφάνεια-επιφάνεια ή στρώμα-από-στρώμα. Η γεωμετρία του αντικειμένου και οι ιδιότητες του υλικού καθορίζονται από αυτή τη διαδικασία. Η μορφή, το μέγεθος και η αντοχή των δεσμών μεταξύ τους καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης και του εξοπλισμού κατασκευής. Η συνολική γεωμετρία του τμήματος καθορίζεται από τις διαδρομές εργαλείου, τα μοτίβα προβολής ή τον συνδυασμό και των δύο. Με αυτόν τον τρόπο, οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής μπορούν να κατασκευάσουν εξαρτήματα χωρίς να χρειάζονται ενδιάμεσα εργαλεία διαμόρφωσης.

Η προσθετική κατασκευή αντιπροσωπεύει μια σχετικά νέα μέθοδο κατασκευής με πληθώρα πλεονεκτημάτων σε σχέση με παραδοσιακές ή αφαιρετικές τεχνολογίες κατασκευής. Δεν απαιτεί τη χρήση εργαλείων, επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων σχημάτων χωρίς μεγάλη αύξηση στο κόστος και το χρόνο, ενώ επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων σχημάτων σε διαφορετικές κλίμακες (μακρο-, μεσο- και μικροκλίμακα). Επιπλέον, η παρέμβαση τεχνικού προσωπικού είναι ελάχιστη κατά την κατασκευή προϊόντων με αυτήν την τεχνολογία, μεταξύ πολλών άλλων πλεονεκτημάτων. [47].[52]

## Βιβλιογραφία/Αναφορές

- [1] Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- [2] Wojtyła, S., Klama, P., & Baran, T. (2017). Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), D80-D85.
- [3] Swetham, T., Reddy, K.M.M., Huggi, A., & Kumar, M.N. (2017). A Critical Review on of 3D Printing Materials and Details of Materials used in FDM. *International Journal of Scientific Research in Science and Engineering*, 3(2), 353-361.
- [4] Vishwakarma, S.K., Pandey, P., & Gupta, N.K. (2017). Characterization of ABS material: a review. *Journal of Research in Mechanical Engineering*, 5, 13-16.
- [5] Lifton, V.A., Lifton, G., & Simon, S. (2014). Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology. *Rapid Prototyping Journal*, 20(5), 403-412.
- [6] Nampoothiri, K.M., Nair, N.R., & John, R.P. (2010). An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresource Technology*, 101(22), 8493-8501.
- [7] Duda, T., & Raghavan, L.V. (2016). 3D metal printing technology. *IFAC-Papers OnLine*, 49(29), 103-110.
- [8] Lim, C.H., Rajoo, S., Noor, A.M., Ahmad, N., & Uday, M.B. (2017). Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 21(6), 323-347.
- [9] Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., Liu, C., Li, Y., Wang, P., & He, Y. (2017). 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(4), 661-687.
- [10] wikipedia.org < Τρισδιάστατη εκτύπωση >
- [11] Wohlers, T., Gornet, T. (2016). *Wohlers Report: History of Additive Manufacturing*.



- [12] Funding Universe. (2005). Stratasys Company History, International Directory of Company Histories, Vol. 67. St. James Press.
- [13] Boik, J. (2004). Lessons from the Greatest Stock Traders of All Time. McGraw-Hill Professional.
- [14] International Directory of Company Histories. (2005). Vol. 67. St. James Press.
- [15] "Οπτικοποίηση επάλληλης στρώσης υλικού." Wikiwand. (2014).
- [16] Kumar, A. (2018). Methods and Materials for Smart Manufacturing: Additive Manufacturing, Internet of Things, Flexible Sensors and Soft Robotics. Elsevier.
- [17] Bhatia, A., Sehgal, A.K. (2021). Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. Materials Today: Proceedings, Elsevier.
- [18] Schwab, K. (2017). The Fourth Industrial Revolution. Crown Business.
- [19] Urbina Coronado, P.D., Ahuett-Garza, H., Morales-Menendez, R., Orta Castañón, P., Dávila, L.D., Flores Escalera, M.R. (2017). Connectivity of a modular electric vehicle by the use of a mobile device. Advances in Mechanical Engineering, 9.
- [20] Chen, A., Dinar, M., Gruenewald, T., Wang, M., Rosca, J., Kurfess, T.R. (2017). Manufacturing apps and the dynamic house of quality: towards an industrial revolution. Manufacturing Letters.
- [21] Lynn, R., Louhichi, W., Parto, M., Wescoat, E., & Kurfess, T. (2017). Rapidly Deployable Mtconnect-Based Machine Tool Monitoring Systems. Τόπος έκδοσης: Εκδότης. Παρουσιάστηκε στο ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing.
- [22] Xia, L.-W., Xie, R., Ju, X.-J., Wang, W., Chen, Q., & Chu, L.-Y. (2013). Nano-structured smart hydrogels with rapid response and high elasticity. Nature Communications, 4.
- [23] Sun, K., Wei, T. S., Ahn, B. Y., Seo, J. Y., Dillon, S. J., & Lewis, J. A. (2013). 3D printing of interdigitated li-ion microbattery architectures. Advanced Materials, 25.

- [24] Lessing, J., Glavan, A. C., Walker, S. B., Keplinger, C., & Whitesides, G. M. (2014). Inkjet printing of conductive inks with high lateral resolution on omniphobic “RF paper” for paper based electronics and mems. *Advanced Materials*, 26.
- [25] Bartolozzi, C., Natale, L., Nori, F., & Metta, G. (2016). Robots with a Sense of Touch. *Nature Materials*,
- [26] Yin, J., Santos, V. J., & Posner, J. D. (2017). Bioinspired flexible microfluidic shear force sensor skin. *Sensors and Actuators A: Physical*, 264.
- [27] Majidi, C. (2014). Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future. *Soft Robotics*, 1.C. Majidi, *Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future Soft Rob*, 1 (2014)
- [28] Trivedi, D., Rahn, C. D., Kier, W. M., & Walker, I. D. (2008). Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future research. *Applied Bionics and Biomechanics*, 5.
- [29] Shepherd, R. F., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S. A., Stokes, A. A., & Mazzeo, A. D. (2011). Multigait Soft Robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 20400-20403.
- [30] University of Washington. (2017, October 17). Flexible 'skin' can help robots, prosthetics perform everyday tasks by sensing shear force. Retrieved from <http://www.washington.edu/news/2017/10/17/flexible-skin-can-help-robots-prosthetics-perform-everyday-tasks-by-sensing-shear-force/>
- [31] Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Development of a microfabricated microbalance with wireless readout. *Sensors and Actuators A: Physical*, 97-98, 672-678.
- [32] Challagulla, N. V., Rohatgi, V., Sharma, D., & Kumar, R. (2020). *Current Opinion in Chemical Engineering*. Elsevier.
- [33] Challagulla, N. V., Rohatgi, V., Sharma, D., & Kumar, R. (2020). *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28, 54-60. Elsevier.
- [34] Yamamoto, B. E., Trimble, A. Z., Minei, B., & Ghasemi Nejjhad, M. N. (2019). Development of multifunctional nanocomposites with 3-D printing additive manufacturing and low graphene loading. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32(3), 383-408.
- [35] Jandyal, A., Chaturvedi, I., Wazir, I., Raina, A., & Haq, M. I. U. (2022). *Sustainable Operations and Computers*. Elsevier.

- [36] Pugliese, R., Beltrami, B., Regondi, S., & Lunetta, C. (2021). *Annals of 3D Printed Medicine*, 2, 26-35. Elsevier.
- [37] Eyers, D. R., & Potter, A. T. (2017). *Computers in Industry*. Elsevier.
- [38] Resinex. (n.d.). Τύπων πολυμερου [Polymer types]. Retrieved April 29, 2023, from <https://www.resinex.gr/typon-polymeroy/pc.html>
- [39] Melchels, F. P. W., Feijen, J., & Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130.
- [40] Kruth, J.-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26-36. Emerald Publishing Limited.
- [41] Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). An approach for optimization of injection molding process parameters using Taguchi and ANOVA. *Procedia Manufacturing*, 7, 348-355.
- [42] Jordan, J. S. (1998). *Systems Theories and A Priori Aspects of Perception* (Vol. 29). Amsterdam: Elsevier Science. Chapter 3, pp. 47-74.
- [43] Eyers, D. R., Potter, A. T., Gosling, J., & Naim, M. M. (2018). Integrating maintenance planning with production scheduling in process industries. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(5), 1295-1321.
- [44] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- [45] Anderson, C. (2012). *Makers: the new industrial revolution*. Crown Business.
- [46] Go, J., & Hart, A. J. (2016). *Selective powder deposition for additive manufacturing using a vibrating chute*. Elsevier.

- [47] Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ... & Martina, F. (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65(2), 737-760.
- [48] Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., ... & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150.
- [49] Quan, Z., Wu, A., Keefe, M., Qin, X., Yu, J., Suhr, J., ... & Chou, T. W. (2015). A comprehensive study on three-dimensional woven carbon fiber composites. *Materials Today*, 18(8), 470-478.
- [50] ResearchGate GmbH. (2008-2022). Classification of typical multidirectional textiles based on the dimension of preform. Elsevier. Retrieved from [https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-typical-multidirectional-textiles-based-on-the-dimension-of-preform\\_fig1\\_339606652](https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-typical-multidirectional-textiles-based-on-the-dimension-of-preform_fig1_339606652)
- [51] ResearchGate GmbH. Elsevier (2012, 2008-2022). 3D printing of hydrogel composite systems: Recent advances in technology for tissue engineering. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/322610582\\_3D\\_printing\\_of\\_hydrogel\\_composite\\_systems\\_Recent\\_advances\\_in\\_technology\\_for\\_tissue\\_engineering](https://www.researchgate.net/publication/322610582_3D_printing_of_hydrogel_composite_systems_Recent_advances_in_technology_for_tissue_engineering)
- [52] López-Taborda, L.L., Maury, H., & Pacheco, J. (2021). Review of current 3D printing techniques for continuous fiber composite materials. *Rapid Prototyping Journal*, 27(6), 1162-1175.
- [53] Sui, X., Downing, J.R., Hersam, M.C., & Chen, J. (2021). Two-dimensional materials for additive manufacturing. *Materials Today*, 49, 54-66.
- [54] Singh, J., Singh, G., & Pandey, P.M. (2021). Additive manufacturing of functionalized nanomaterials for the modern health care industry. In *Additive Manufacturing with Functionalized Nanomaterials* (pp. 345-365). Elsevier.
- [55] Ivanova, O., Williams, C., & Campbell, T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyping Journal*, 19(5), 353-364.
- [56] ResearchGate GmbH. (2008-2022). Photo comparing the deflection of 410 stainless steel bars with and without nanoiron. [https://www.researchgate.net/figure/Photo-comparing-the-deflection-of-410-stainless-steel-bars-with-and-without-nanoiron\\_fig1\\_235323006](https://www.researchgate.net/figure/Photo-comparing-the-deflection-of-410-stainless-steel-bars-with-and-without-nanoiron_fig1_235323006)
- [57] Yakout, M. & Elbestawi, M. A. (2017). Additive manufacturing of composite materials: An overview. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 109, p. 02001). EDP Sciences.

- [58] Mazumdar, S. (2016). State of the composites industry. Basalt.
- [59] Prawoto, Y. (2012). A review on micromechanics and its applications in the design of advanced materials. *Computational Materials Science*, 58, 140-153.
- [60] Gill, H.S. (2021). Additive manufacturing and its applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 42, 193-200.
- [61] Auricchio, F., Bacigalupo, A., Gambarotta, L., Lepidi, M., Morganti, S., & Vadalà, F. (2019). Additive manufacturing of glass fiber-reinforced composite materials: Numerical simulations and experimental validation. *Materials & Design*, 182, 108040.
- [62] Wang, K., Chang, Y.-H., Chen, Y., Zhang, C., & Wang, B. (2015). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Materials & Design*, 86, 271-279.
- [63] Li, S., Hassanin, H., Attallah, M. M., Adkins, N. J. E., & Essa, K. (2016). *Acta Materialia: Auxetic materials*. Elsevier.
- [64] Sun, C., Fang, N., Wu, D. M., & Zhang, X. (2005). *Sensors and Actuators A: Physical*. Elsevier.
- [65] Zhang, J., Lu, G., & You, Z. (2020). *Composites Part B: Engineering*. Elsevier.
- [66] Alderson, A., & Alderson, K. L. (2007). *P I Mech Eng G-J Aer.: Auxetic materials*.
- [67] Campbell, T. A., & Ivanova, O. S. (2013). *Nano Today*. Elsevier.
- [68] Parandoush, P., & Lin, D. (2017). *Composite Structures*. Elsevier.
- [69] Joseph, A., Mahesh, V., & Harursampath, D. (2021). On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review. *Adv. Manuf*, 9, 342–368.
- [70] Fusion Media Limited. (2007-2023). Zimmer Holdings earnings. <https://gr.investing.com/equities/zimmer-hldgs-earnings>

- [71] Mercelis, P., & Kruth, J. (2006). Rapid Prototyping Journal, 12(5), 254-265. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting.
- [72] Atieh, M. A., & El-Meligy, M. E. (2021). Design and characterization of auxetic materials for biomedical applications. Journal of Materials Science.
- [73] Alreshoodi, N. B., & Neves, M. J. (2020). Design and characterization of auxetic materials for biomedical applications. Applied Acoustics.
- [74] Liu, J., Zhang, H., & Liu, L. (2018). 3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites using Fused Deposition Modeling. Composites Science and Technology.
- [75] Annavarapu, S. C., & Singh, B. (2020). Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing of Fiber Reinforced Polymers: A Review and Future Perspectives. Materials Today: Proceedings.
- [76] Yoon, D. H., & Kim, S. (2019). 3D printing of fiber-reinforced composites using fused deposition modeling: a review and a new direction. Rapid Prototyping Journal.
- [77] Chia, H. N., & Wu, B. M. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. Journal of Biological Engineering, 9(1), 4.